

# ベローズ強度評価のための簡易解析手法

1989年11月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## ベローズ強度評価のための簡易解析手法

月森和之\*

### 要 旨

FBR大型炉のコスト低減方策のひとつであるベローズ継手の適用に関するR&D試験が、昭和58年度から本格的に開始され、昭和62年度までにほぼ終了した。その後は、総合的なとりまとめ、評価、検討が進められている。

本報告書は、既報“ベローズの解析のための簡易計算手法”に引続き、ベローズの設計基準案策定に反映することを狙って考案したいくつかの評価手法を解説したものである。

以下に項目を列挙する。

- (1) ベローズの内圧によるコラム座屈
- (2) 内圧によるベローズのクリープ座屈
- (3) ベローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数
- (4) ベローズ継手適用配管系で生じる弾性追従の簡易評価
- (5) ベローズのコンボリューション間で生じる弾性追従の簡易評価

Simplified Analysis Methods for  
Strength Evaluation of Bellows

Kazuyuki Tsukimori\*

Abstract

The R&D on the feasibility of the bellows expansion joint, which is one of the cost reduction measures for large scale FBR plants, was conducted from 1983 to 1987. Afterwards the synthetic evaluations and examinations are still continued.

This report has been written as the companion report to "Simplified Analysis Methods for Bellows Analyses". Concerning the following five items, the evaluation methods, which have been developed in order to utilize in establishing design rules for bellows, are explained.

- (1) Column buckling of bellows under internal pressure.
- (2) Creep buckling of bellows under internal pressure.
- (3) Evaluation of strain amplification of bellows generated by the irregularity of the dimensions among convolutions in elastic-plastic region.
- (4) Elastic follow-up in the piping system with bellows expansion joints.
- (5) Elastic follow-up among convolutions of bellows.

---

\*Structural Engineering Section, Oarai Engineering Center

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. ベローズの内圧によるコラム座屈 .....	3
2.1 長柱円筒についての基礎式 .....	5
2.2 種々の境界条件での座屈圧力の導出 .....	7
2.3 座屈圧力に及ぼす横方向分布荷重（自重，浮力等）の影響 .....	20
2.4 ベローズの内圧によるコラム座屈への適用 .....	25
2.5 ベローズの座屈圧に及ぼす曲げ予変形の影響 .....	28
☆ 解析例 .....	42
☆ 計算プログラム解説 .....	44
3. 内圧によるベローズのクリープ座屈 .....	67
3.1 $\frac{1}{4}$ コンポリューション短冊要素についての変位速度と荷重の関係式 .....	70
3.2 クリープ座屈評価式の導出 .....	73
☆ 計算プログラム解説 .....	88
☆ 解析例 .....	124
4. ベローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数 .....	132
4.1 単純化した簡易ラチェット評価法の利用 .....	134
4.2 弾塑性ひずみ割増し係数の前提 .....	134
4.3 評価モデル，記号及び基本的諸量 .....	134
4.4 ひずみ割増し係数の簡易評価 .....	136
4.5 まとめ .....	151
☆ 解析例 .....	169
☆ 計算プログラム解説 .....	173
5. ベローズ継手適用配管系で生じる弾性追従の簡易評価 .....	194
5.1 基本的な考え方 .....	196
5.2 ベローズ継手をばねとみなす単純モデル .....	198
5.3 コンポリューションのクリープ変形を考慮した評価法 .....	203
☆ 解析例 .....	212
☆ 計算プログラム解説 .....	219
6. ベローズのコンポリューション間で生じる弾性追従の簡易評価 .....	239
7. あとがき .....	251

付 録 .....	252
コンポリューション毎の寸法のばらつきによって生じるひずみ集中の簡易評価法（補遺）	
謝 辞 .....	259

## 1. ま え が き

FBR大型炉のコスト低減方策のひとつであるベローズ継手の適用に関するR&D試験が昭和58年度から本格的に開始され、昭和62年度までにほぼ終了した。その後は、総合的なとりまとめ、評価、検討が進められている。FBR配管用ベローズ継手に関する設計基準案も大きな成果のひとつであり、昭和62年度に暫定案が作成された<sup>1)</sup>。R&D試験終了後も強度評価法の合理化、高度化の検討を進めており、暫定案の見直し、改良を行う予定である。

強度評価法の合理化、高精度化には、有限要素法に代表される構造解析技術が大きな役割を果たすことは勿論であるが、ベローズのような複雑な形状で、しかもある規則性を有する構造についてはその特徴を考慮した簡易解析手法の開発も欠かせない。本報告書は、ベローズの解析のための簡易計算手法<sup>2)</sup>に引続き、ベローズの設計基準案策定に反映することを狙って考案したいくつかの評価手法を解説したものである。

以下に、項目を列挙する。

### (1) ベローズの内圧によるコラム座屈

ベローズの内圧によるコラム座屈のメカニズムは、理想的な薄肉長円筒の内圧座屈で説明される。これを基に初期曲げなど予変形を有するベローズ、自重、浮力等の等分布荷重を考慮したベローズの内圧座屈の簡易評価法を提案する。(2章)

### (2) 内圧によるベローズのクリープ座屈

内圧によるコラム座屈の考え方とNorton則をベースとしてベローズのクリープ座屈評価式を導く。(3章)

### (3) ベローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数

ベローズの製作公差から、各コンボリューションの剛性のばらつきを保守的に考慮し、圧力、繰返し変位重畳下、弾塑性領域でひずみ割増し係数を簡易に評価する手法を提案する。(4章)

### (4) ベローズ継手適用配管系で生じる弾性追従の簡易評価

ベローズ継手適用配管系で生じる可能性のある弾性追従挙動を考察し、第3章の定式化の一部を利用した簡易評価法を示す。(5章)

### (5) ベローズのコンボリューション間で生じる弾性追従の簡易評価

第3章の定式化の一部と第4章の寸法公差の考え方を組み合わせて、コンボリューション間で生じる弾性追従の簡易評価式の導出を試みる。(6章)

また、付録“コンボリューション毎の寸法のばらつきによって生じるひずみ集中の簡易評価法”は、既報2)の6章の補遺である。

## 参考文献

- 1) 高速増殖炉第一種配管用ベローズ継手の高温構造設計方針(暫定案), 1987.8(PNC)

SN9410 87-111)

- 2) 月森他, ベローズの解析のための簡易計算手法, 1986.12 (PNC SN9410 86-128)



## 2. ベローズの内圧によるコラム座屈

ベローズの内圧による座屈を支配するメカニズムを与える長柱円筒についての基礎式を示し、初期不整、境界条件の不確定性等を相定してこの式を種々の境界条件で解くことを試みる。また、自重あるいは浮力の座屈に及ぼす影響を考慮するために横方向等分布荷重を含んだ形で検討を行う。

こうして得た円筒に関する式をベローズに適用し、曲げ予変形の影響も含むベローズの座屈内圧の簡易評価式を提案する。

List of Figures

Fig. 1-1 Equilibrium of Curved Cylinder Segment  
 Subjected to Internal Pressure ..... 36

Fig. 2-1 Simply Supported Cylinder ..... 37

Fig. 2-2 Fixed Cylinder with Initial Rotation Angle ... 37

Fig. 2-3 Relation between Maximum Deflection and  
 Pressure ..... 37

Fig. 2-4 Fixed Cylinder with Initial Deflection ..... 38

Fig. 2-5 Fixed Cylinder with Constant Curvature ..... 38

Fig. 2-6 Elastically Supported Cylinder ..... 38

Fig. 2-7 Evaluation of  $\lambda_{cr}$  ..... 39

Fig. 4-1 Axial Reaction Force due to Pressure Contained  
 in Convolution Annular Space ..... 40

Fig. 5-1 Simplified Pressure Limitation of Bellows with  
 Initial Bending Angle ..... 41

Fig. 5-2 Calculation of Buckling Pressure of Bellows  
 with Initial Bending Displacements by Present  
 Simplified Method ..... 43



Fig. I.1 Input Data Contents ..... 49

Fig. I.2 Example of Input Data ..... 50

Fig. I.3 JCL for KORAMU1 ..... 50

Fig. I.4 Data Form for XY Plot ..... 51

Fig. I.5 Example of Data for XY Plot ..... 52

Fig. I.6 Example of Calculation Result ..... 53

Fig. I.7 Example of XY Plot ..... 54

Fig. II.1 Input Data Contents ..... 62

Fig. II.2 Example of Input Data ..... 63

Fig. II.3 JCL for TAWAMI ..... 63

Fig. II.4 Example of Data for XY Plot ..... 64

Fig. II.5 Example of XY Plot ..... 65

## 2.1 長柱円筒についての基礎式<sup>1)</sup>

梁タイプの変形状態にある円筒の微小長さ  $dx$  を考える。曲率を有する円筒は、Fig.1-1 のように内圧  $p$  によって横方向荷重を受ける。

$$R \, d\theta = dx \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

$$\begin{aligned} & p \int_0^{2\pi} (r \sin\varphi + R) \, d\theta \cdot r \, d\varphi \cdot \sin\varphi \\ &= p \cdot d\theta \cdot r \int_0^{2\pi} (r \sin\varphi + R) \sin\varphi \, d\varphi \\ &= pr \cdot d\theta \int_0^{2\pi} (r \sin^2\varphi + R \sin\varphi) \, d\varphi \\ &= pr \cdot d\theta \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{r}{2} (1 - \cos 2\varphi) + R \sin\varphi \right\} \, d\varphi \\ &= \pi r^2 p \, d\theta \\ &= \frac{\pi r^2 p}{R} \, dx \quad \dots\dots\dots (1-2) \end{aligned}$$

横方向分布荷重：

$$q = \frac{\pi r^2}{R} p = -\pi r^2 p \frac{d^2 w}{dx^2} \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

式(1-1)～式(1-3)において

- R：曲率半径
- $\theta$ ：撓み角
- x：長手方向座標
- r：円筒半径
- w：横方向変位
- $\varphi$ ：円筒断面の極座標の角度パラメータ
- p：内 圧
- q：内圧と撓みによって生じる円筒単位長さに作用する横方向荷重

横方向分布荷重  $q$  を受ける梁の基礎式は、

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q}{EI} \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

ここで、EI は曲げ剛性である。

式(1-3)より、式(1-4)は

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

ここに、

$$\lambda^2 = \frac{\pi r^2 L^2}{EI} p \quad \dots\dots\dots (1-6)$$

式(1-5)を2回積分すると、

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 w = C_1 x + C_2 \quad \dots\dots\dots (1-7)$$

(C<sub>1</sub> , C<sub>2</sub> : 積分定数)

ここで、

$$\tilde{w} = A \frac{x}{L} + B \quad (A, B \text{ は任意定数}) \quad \dots\dots\dots (1-8)$$

が、式(1-7)の特解であることを考慮すると、一般解は、

$$w = A + B \frac{x}{L} + C \sin \lambda \frac{x}{L} + D \cos \lambda \frac{x}{L} \quad \dots\dots\dots (1-9)$$

ここで、L は梁(円筒)長さ

A, B, C, D ; 境界条件によって定まる定数

また、式(1-9)から、

$$\frac{dw}{dx} = \frac{B}{L} + C \frac{\lambda}{L} \cos \lambda \frac{x}{L} - D \frac{\lambda}{L} \sin \lambda \frac{x}{L} \quad \dots\dots\dots (1-10)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -C \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \sin \lambda \frac{x}{L} - D \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \cos \lambda \frac{x}{L} \quad \dots\dots\dots (1-11)$$

2.2 種々の境界条件での座屈圧力の導出

(1) 両端単純支持 ( Fig.2-1 )

境界条件は

$$\left. \begin{aligned} M &= -EI \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \\ w &= 0 \end{aligned} \right\} x = 0, L \quad \begin{array}{l} \dots\dots\dots (2-1 a) \\ \dots\dots\dots (2-1 b) \end{array}$$

式(2-1)を式(1-9), 式(1-11)に適用すると,

$$\left\{ \begin{aligned} A + D &= 0 \\ A + B + C \sin \lambda + D \cos \lambda &= 0 \\ D &= 0 \\ C \sin \lambda + D \cos \lambda &= 0 \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

式(2-2)から,

$$A = B = D = 0 \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

$$\sin \lambda = 0 \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

従って,

$$w = C \sin \lambda \frac{x}{L} \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

式(2-4)より

$$\lambda = n\pi \quad (n: \text{整数}) \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

n=1では, 式(1-6)から,

$$P_{cr} = \frac{\pi EI}{r^2 L^2} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

$$w = C \sin \pi \frac{x}{L} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

(2) 初期曲げ変位を有する場合 ( Fig.2-2 )

境界条件は

$$w = 0 \quad ; \quad x = 0, L \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$$\frac{dw}{dx} = \theta_0 : x=0 \quad \dots\dots\dots (2-10a)$$

$$\frac{dw}{dx} = -\theta_0 : x=L \quad \dots\dots\dots (2-10b)$$

式(2-9), 式(2-10)を式(1-9)及び式(1-10)に用いると

$$\begin{cases} A+D=0 \\ A+B+C \sin \lambda + D \cos \lambda = 0 \\ B+C \lambda = L \theta_0 \\ B+C \lambda \cos \lambda - D \lambda \sin \lambda = -L \theta_0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

連立方程式(2-11)の係数行列式は,

$$\mathcal{D} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \sin \lambda & \cos \lambda \\ 0 & 1 & \lambda & 0 \\ 0 & 1 & \lambda \cos \lambda & -\lambda \sin \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \sin \lambda & \cos \lambda \\ 1 & \lambda & 0 \\ 1 & \lambda \cos \lambda & -\lambda \sin \lambda \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 & \sin \lambda \\ 0 & 1 & \lambda \\ 0 & 1 & \lambda \cos \lambda \end{vmatrix}$$

$$= 2 \lambda (1 - \cos \lambda - \frac{\lambda}{2} \sin \lambda)$$

$$= 4 \lambda \sin \frac{\lambda}{2} \left( \sin \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

式(2-11)を解くと,

$$A = \frac{1}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \sin \lambda & \cos \lambda \\ L \theta_0 & 1 & \lambda & 0 \\ -L \theta_0 & 1 & \lambda \cos \lambda & -\lambda \sin \lambda \end{vmatrix}$$

$$= -\frac{L \theta_0}{\mathcal{D}} (2 \sin \lambda - \lambda - \lambda \cos \lambda)$$

$$= -\frac{L \theta_0 (2 \sin \lambda - \lambda - \lambda \cos \lambda)}{2 \lambda (1 - \cos \lambda - \frac{\lambda}{2} \sin \lambda)}$$

$$= -\frac{1 + \cos \lambda}{\lambda \sin \lambda} L \theta_0$$

$$= - \frac{\cos \frac{\lambda}{2}}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} L \theta_0 \dots \dots \dots (2-13)$$

$$B = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & \sin \lambda & \cos \lambda \\ 0 & L \theta_0 & \lambda & 0 \\ 0 & -L \theta_0 & \lambda \cos \lambda & -\lambda \sin \lambda \end{vmatrix}$$

$$= \frac{L \theta_0}{D} \{ \lambda \cos^2 \lambda + \lambda \sin^2 \lambda + \lambda \cos \lambda - (\lambda \cos \lambda + \lambda) \}$$

$$= 0 \dots \dots \dots (2-14)$$

$$C = \frac{L \theta_0}{D} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \cos \lambda \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -\lambda \sin \lambda \end{vmatrix}$$

$$= \frac{L \theta_0}{D} \{ -\lambda \sin \lambda - 2 \cos \lambda - (-1 - 1) \}$$

$$= \frac{L \theta_0}{D} (2 - 2 \cos \lambda - \lambda \sin \lambda)$$

$$= \frac{L \theta_0}{\lambda} \dots \dots \dots (2-15)$$

$$D = \frac{L \theta_0}{D} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \sin \lambda & 0 \\ 0 & 1 & \lambda & 1 \\ 0 & 1 & \lambda \cos \lambda & -1 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{L \theta_0}{D} (-\lambda + \sin \lambda - \lambda \cos \lambda + \sin \lambda)$$

$$= \frac{L \theta_0}{2 \lambda} \frac{(2 \sin \lambda - \lambda - \lambda \cos \lambda) \times \sin \lambda}{\left(1 - \cos \lambda - \frac{\lambda}{2} \sin \lambda\right) \times \sin \lambda}$$

$$= \frac{1 + \cos \lambda}{\lambda \sin \lambda} L \theta_0$$

$$= \frac{\cos \frac{\lambda}{2}}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} L \theta_0 \dots\dots\dots (2-16)$$

式(2-13)~式(2-16)から, 式(1-9)は,

$$\begin{aligned} w &= \frac{L \theta_0}{\lambda} \left\{ \sin \frac{\lambda x}{L} - \frac{\cos \frac{\lambda}{2}}{\sin \frac{\lambda}{2}} \left( 1 - \cos \frac{\lambda x}{L} \right) \right\} \\ &= \frac{2L \theta_0}{\lambda} \cdot \frac{\sin \frac{\lambda x}{2L}}{\sin \frac{\lambda}{2}} \left( \sin \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda x}{2L} - \cos \frac{\lambda}{2} \sin \frac{\lambda x}{2L} \right) \\ &= \frac{2L \theta_0}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} \sin \frac{\lambda x}{2L} \cdot \sin \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \dots\dots\dots (2-17) \end{aligned}$$

また,

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= \frac{\theta_0}{\sin \frac{\lambda}{2}} \left\{ \cos \frac{\lambda x}{2L} \sin \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) - \sin \frac{\lambda x}{2L} \cos \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \right\} \\ &= - \frac{\theta_0}{\sin \frac{\lambda}{2}} \sin \left( \frac{\lambda x}{L} - \frac{\lambda}{2} \right) \\ &= - \frac{\theta_0}{\sin \frac{\lambda}{2}} \sin \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \dots\dots\dots (2-18) \end{aligned}$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = - \frac{\lambda \theta_0}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \cos \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \dots\dots\dots (2-19)$$

ここで, 中央変位 $w_0$  は, 式(2-17)より,

$$\begin{aligned} w_0 = w \Big|_{x=\frac{L}{2}} &= \frac{2L \theta_0}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} \sin^2 \frac{\lambda}{4} \\ &= \frac{L \theta_0}{\lambda} \tan \frac{\lambda}{4} \dots\dots\dots (2-20) \end{aligned}$$



初期変位  $w_{0i}$  は、 $\lambda(p) \rightarrow 0$  とすることによって得られる。

$$w_{0i} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{L \theta_0}{\lambda} \tan \frac{\lambda}{4} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{L \theta_0}{4 \cos^2 \frac{\lambda}{4}} = \frac{L \theta_0}{4} \dots\dots\dots (2-21)$$

式(2-20)より、 $\cos \frac{\lambda}{4} = 0$  となるとき、 $w_0 \rightarrow \infty$  となる。最低次のモードより座屈圧は次の式で与えられる。

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$$

即ち、式(1-6)より、

$$p_{cr} = \frac{4 \pi E I}{r^2 L^2} \dots\dots\dots (2-22)$$

式(2-20)と式(1-6)から、初期曲げを有する両端固定円筒の内圧と中央たわみの関係が与えられる。

$$w_0 = L \theta_0 f_1(\lambda) \dots\dots\dots (2-23a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \tan \frac{\lambda}{4} \dots\dots\dots (2-23b) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda^2 = \frac{\pi r^2 L^2}{E I} p \dots\dots\dots (2-23c) \end{array} \right.$$

特別な場合として、 $\theta_0 = 0$  の場合、式(2-12)の  $\Phi$  を零とする  $\lambda$  のうち、非零の最小値が座屈圧を与える。従って、

$$\frac{\lambda}{2} = \pi \dots\dots\dots (2-24)$$

式(1-6)から、式(2-22)と同じ結果が得られる。式(2-24)の関係を式(2-11)に用いると、

$$\left\{ \begin{array}{l} A+B \dots\dots\dots (2-25) \\ B=C=0 \end{array} \right.$$

従って、式(1-9)は、

$$w = A \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right) \dots\dots\dots (2-26)$$

式(2-23)は、内圧の増加とともに増加し、式(2-22)で与えられる圧力に漸近し、変位がここで無限大となる曲線群となる (Fig.2-3)。

式(2-7)及び式(2-22)で与えられる座屈圧に円筒断面積をかけて得られる荷重は、結果的に Euler のコラム座屈の軸荷重に等しくなる。

(3)  $w_0(x)$  で与えられる初期不整を有する場合 (Fig.2-4)

同一平面内で軸方向に分布する横方向の初期不整を  $w_0(x)$ 、撓みによる変位を  $w_1$  とすると、

$$w_1 = w - w_0 \dots\dots\dots (2-27)$$

式(1-5)に相当する基礎式は、

$$\frac{d^4 w_1}{dx^4} + \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \dots\dots\dots (2-28)$$

式(2-27)を考慮すると、式(2-28)は、

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{d^4 w_0}{dx^4} \dots\dots\dots (2-29)$$

式(2-29)を2回積分すると、

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2 w = \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 \dots\dots\dots (2-30)$$

( $C_1, C_2$  は積分定数)

式(2-30)の同次式の一般解は、

$$\tilde{w} = C \sin \lambda \frac{x}{L} + D \cos \lambda \frac{x}{L} \dots\dots\dots (2-31)$$

また、

$$A = \begin{vmatrix} \sin \frac{\lambda x}{L} & \cos \frac{\lambda x}{L} \\ \frac{\lambda}{L} \cos \frac{\lambda x}{L} & -\frac{\lambda}{L} \sin \frac{\lambda x}{L} \end{vmatrix} = -\frac{\lambda}{L} \dots\dots\dots (2-32)$$

式(2-30)の特解は,

$$\begin{aligned}
 \tilde{w} &= \sin \frac{\lambda x}{L} \int \frac{L}{\lambda} \cos \frac{\lambda x}{L} \left( \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 \right) dx \\
 &\quad - \cos \frac{\lambda x}{L} \int \frac{L}{\lambda} \sin \frac{\lambda x}{L} \left( \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 \right) dx \\
 &= \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \left\{ \sin^2 \frac{\lambda x}{L} \left( \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 \right) - \sin \frac{\lambda x}{L} \int \sin \frac{\lambda x}{L} \cdot \left( \frac{d^3 w_0}{dx^3} + C_1 \right) dx \right. \\
 &\quad \left. + \cos^2 \frac{\lambda x}{L} \left( \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 \right) - \cos \frac{\lambda x}{L} \int \cos \frac{\lambda x}{L} \cdot \left( \frac{d^3 w_0}{dx^3} + C_1 \right) dx \right\} \\
 &= \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \left\{ \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 - \frac{L}{\lambda} \left( \sin \frac{\lambda x}{L} \int \cos \frac{\lambda x}{L} \cdot \frac{d^4 w_0}{dx^4} dx - \cos \frac{\lambda x}{L} \int \sin \frac{\lambda x}{L} \cdot \frac{d^4 w_0}{dx^4} dx \right) \right\} \\
 &= \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \left\{ \frac{d^2 w_0}{dx^2} + C_1 x + C_2 - \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \frac{d^4 w_0}{dx^4} \right. \\
 &\quad \left. + \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \left( \sin \frac{\lambda x}{L} \int \sin \frac{\lambda x}{L} \cdot \frac{d^5 w_0}{dx^5} dx + \cos \frac{\lambda x}{L} \int \cos \frac{\lambda x}{L} \cdot \frac{d^5 w_0}{dx^5} dx \right) \right\} \\
 &\dots\dots\dots (2-33)
 \end{aligned}$$

式(2-30)の一般解は,

$$w = \tilde{w} + \tilde{\tilde{w}} \dots\dots\dots (2-34)$$

式(2-33)は,  $w_0(x)$ が具体的に与えられない限り,  $\tilde{\tilde{w}}$ を陽な形に表わせない。

やや, 特別な場合として,  $w_0(x)$ を5次の多項式とすると,

$$\frac{d^n w_0}{dx^n} = 0 \quad (n \geq 6) \dots\dots\dots (2-35)$$

式(2-33)は,

$$\tilde{w} = \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \left\{ \frac{d^2 w_0}{dx^2} - \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \frac{d^4 w_0}{dx^4} + C_1 x + C_2 \right\} \dots\dots\dots (2-36)$$

式(2-34)は, 式(2-31)と式(2-36)から,

$$w = A + B \frac{x}{L} + C \sin \frac{\lambda x}{L} + D \cos \frac{\lambda x}{L} + \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \left\{ \frac{d^2 w_0}{dx^2} - \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \frac{d^4 w_0}{dx^4} \right\} \dots\dots\dots (2-37)$$

また, 
$$\frac{dw}{dx} = \frac{B}{L} + C \frac{\lambda}{L} \cos \frac{\lambda x}{L} - D \frac{\lambda}{L} \sin \frac{\lambda x}{L} + \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \left\{ \frac{d^3 w_0}{dx^3} - \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \frac{d^5 w_0}{dx^5} \right\}$$

..... (2-38)

次の境界条件を考える。

$$w = w_0(0) = w_0^0, \quad \frac{dw}{dx} = \frac{dw_0}{dx}(0) = \theta^0 : x = 0 \quad \text{..... (2-39)}$$

$$w = w_0(L) = w_0^L, \quad \frac{dw}{dx} = \frac{dw_0}{dx}(L) = -\theta^L : x = L \quad \text{..... (2-40)}$$

従って,

$$\begin{cases} A & & + D + f(0) = w_0^0 \\ B & + \lambda C & + Lf'(0) = L\theta^0 \\ A+B & + \sin\lambda \cdot C + \cos\lambda \cdot D + f(L) = w_0^L \\ B + \lambda \cos\lambda \cdot C - \lambda \sin\lambda \cdot D + Lf'(L) = -L\theta^L \end{cases} \quad \text{..... (2-41)}$$

ここで,

$$f(x) = \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \left\{ \frac{d^2 w_0}{dx^2} - \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \frac{d^4 w_0}{dx^4} \right\} \quad \text{..... (2-42)}$$

式(2-41)の係数行列式は,

$$\begin{aligned} \mathcal{D} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \lambda & 0 \\ 1 & 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \\ 0 & 1 & \lambda \cos\lambda & -\lambda \sin\lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \lambda & 0 \\ 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \\ 1 & \lambda \cos\lambda - \lambda \sin\lambda \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 & \lambda \\ 1 & 1 & \sin\lambda \\ 0 & 1 & \lambda \cos\lambda \end{vmatrix} \\ &= -\lambda \sin^2\lambda + \lambda \cos\lambda - \lambda \cos^2\lambda + \lambda^2 \sin\lambda - \lambda + \lambda \cos\lambda \\ &= -\lambda (2 - 2\cos\lambda - \lambda \sin\lambda) \quad \text{..... (2-43)} \end{aligned}$$

式(2-41)を解く,

$$A = \frac{1}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} w_0^0 - f(0) & 0 & 0 & 1 \\ L\theta^0 - Lf'(0) & 1 & \lambda & 0 \\ w_0^L - f(L) & 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \\ -L\theta^L - Lf'(L) & 1 & \lambda \cos\lambda & -\lambda \sin\lambda \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{D} \left\{ (w_0^0 - f(0)) \begin{vmatrix} 1 & \lambda & 0 \\ 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \\ 1 & \lambda\cos\lambda & -\lambda\sin\lambda \end{vmatrix} - L(\theta^0 - f'(0)) \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \\ 1 & \lambda\cos\lambda & -\lambda\sin\lambda \end{vmatrix} \right. \\
 &\quad \left. + (w_0^L - f(L)) \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & \lambda & 0 \\ 1 & \lambda\cos\lambda & -\lambda\sin\lambda \end{vmatrix} + L(\theta^L + f'(L)) \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & \lambda & 0 \\ 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \end{vmatrix} \right\} \\
 &= \frac{1}{D} \left\{ (w_0^0 - f(0)) \lambda (\lambda\sin\lambda + \cos\lambda - 1) - L(\theta^0 - f'(0)) (\lambda\cos\lambda - \sin\lambda) \right. \\
 &\quad \left. + (w_0^L - f(L)) \lambda (\cos\lambda - 1) + L(\theta^L + f'(L)) (\sin\lambda - \lambda) \right\} \\
 &\hspace{15em} \dots\dots\dots (2-44)
 \end{aligned}$$

以下の計算は、省略する。

特別な場合として、初期不整として一様曲率を有する場合を考える (Fig. 2-5)。

$$w_0 = \frac{\theta_0}{L} (L - x) x \dots\dots\dots (2-45)$$

$$\frac{dw_0}{dx} = \frac{\theta_0}{L} (L - 2x) \dots\dots\dots (2-46)$$

$$\frac{d^2w_0}{dx^2} = -\frac{2\theta_0}{L} \dots\dots\dots (2-47)$$

式(2-42)から、

$$f = -\frac{2L\theta_0}{\lambda^2}, \quad f' = 0 \dots\dots\dots (2-48)$$

また、

$$w_0^0 = 0, \quad w_0^L = 0 \dots\dots\dots (2-49a)$$

$$\theta^0 = \theta_0, \quad \theta^L = \theta_0 \dots\dots\dots (2-49b)$$

式(2-41)は、

$$\left[ \begin{array}{l} A \\ B + \lambda \cdot C \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} + D = \frac{2L\theta_0}{\lambda^2} \\ = L\theta_0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A+B+\sin\lambda\cdot C+\cos\lambda\cdot D = \frac{2L\theta_0}{\lambda^2} \\ B+\lambda\cos\lambda\cdot C-\lambda\sin\lambda\cdot D = -L\theta_0 \end{array} \right. \dots\dots\dots (2-50)$$

式(2-50)を解くと,

$$A = \frac{L\theta_0}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} \frac{2}{\lambda^2} & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \lambda & 0 \\ \frac{2}{\lambda^2} & 1 & \sin\lambda & \cos\lambda \\ -1 & 1 & \lambda\cos\lambda & -\lambda\sin\lambda \end{vmatrix}$$

$$= \frac{2L\theta_0}{\lambda^2(2-2\cos\lambda-\lambda\sin\lambda)} \left\{ \frac{\lambda^2}{2} (1+\cos\lambda) - 2\cos\lambda - 2(\lambda\sin\lambda - 1) \right\}$$

\dots\dots\dots (2-51)

$$B = \frac{L\theta_0}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} 1 & \frac{2}{\lambda^2} & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \lambda & 0 \\ 1 & \frac{2}{\lambda^2} & \sin\lambda & \cos\lambda \\ 0 & -1 & \lambda\cos\lambda & -\lambda\sin\lambda \end{vmatrix}$$

$$= 0 \dots\dots\dots (2-52)$$

$$C = \frac{L\theta_0}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} 1 & 0 & \frac{2}{\lambda^2} & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \frac{2}{\lambda^2} & \cos\lambda \\ 0 & 1 & -1 & -\lambda\sin\lambda \end{vmatrix}$$

$$= \frac{L\theta_0}{\lambda} \dots\dots\dots (2-53)$$

$$D = \frac{L\theta_0}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{2}{\lambda^2} \\ 0 & 1 & \lambda & 1 \\ 1 & 1 & \sin\lambda & \frac{2}{\lambda^2} \\ 0 & 1 & \lambda\cos\lambda & -1 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{L \theta_0 (2 \sin \lambda - \lambda \cos \lambda - \lambda)}{\lambda (2 - 2 \cos \lambda - \lambda \sin \lambda)} \dots\dots\dots (2-54)$$

式(2-37), 式(2-45)及び式(2-51)~式(2-54)から,

$$w = \frac{L \theta_0}{\lambda} \left\{ \sin \frac{\lambda x}{L} - \frac{\cos \frac{\lambda}{2}}{\sin \frac{\lambda}{2}} \left( 1 - \cos \frac{\lambda x}{L} \right) \right\} \dots\dots\dots (2-55)$$

上式は, 曲げ初期変形を加える場合のたわみ式(2-17)に一致する。

(4) 両端が弾性支持されている場合 (Fig. 2-6)

端部のバネ剛性をそれぞれ  $K_{\theta^0}$ ,  $K_{\theta^L}$  とすると,

境界条件は,

$$w = 0 \quad : \quad x = 0, L \dots\dots\dots (2-56)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} (0) = \frac{K_{\theta^0}}{EI} \cdot \frac{dw}{dx} (0) = \frac{k_{\theta^0}}{L} \cdot \frac{dw}{dx} (0) \dots\dots\dots (2-57)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} (L) = -\frac{K_{\theta}}{EI} \cdot \frac{dw}{dx} (L) = -\frac{k_{\theta}}{L} \cdot \frac{dw}{dx} (L) \dots\dots\dots (2-58)$$

式(1-9)~式(1-11)に式(2-56)~式(2-58)を用いると,

$$\left\{ \begin{array}{l} A \qquad \qquad \qquad + D = 0 \\ A + B \qquad \qquad \qquad + \sin \lambda \cdot C \qquad \qquad \qquad + \cos \lambda \cdot D = 0 \\ -k_{\theta^0} B \qquad \qquad \qquad - k_{\theta^0} \lambda \cdot C \qquad \qquad \qquad - \lambda^2 D = 0 \\ +k_{\theta^L} B + \lambda(k_{\theta^L} \cos \lambda - \lambda \sin \lambda) C - \lambda(k_{\theta^L} \sin \lambda + \lambda \cos \lambda) D = 0 \end{array} \right. \dots\dots\dots (2-59)$$

式(2-59)の係数行列式は,

$$\mathcal{D} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \sin \lambda & \cos \lambda \\ 0 & -k_{\theta^0} & -k_{\theta^0} \lambda & -\lambda^2 \\ 0 & k_{\theta^L} & -\lambda(-k_{\theta^L} \cos \lambda + \lambda \sin \lambda) & \lambda(-k_{\theta^L} \sin \lambda - \lambda \cos \lambda) \end{vmatrix}$$

$$= -\lambda \{ \sin \lambda \cdot \lambda^3 - (k_{\theta^0} + k_{\theta^L}) \cos \lambda \cdot \lambda^2 + (-k_{\theta^0} k_{\theta^L} + k_{\theta^0} + k_{\theta^L}) \sin \lambda \cdot \lambda + 2 k_{\theta^0} k_{\theta^L} (1 - \cos \lambda) \} \dots\dots\dots (2-60)$$

座屈圧は,  $\mathcal{D} = 0$  と置くことによって得られる。ただし,  $\lambda \neq 0$ 。

$$\sin\lambda \cdot \lambda^3 - (k_{\theta}^0 + k_{\theta}^L) \cos\lambda \cdot \lambda^2 + (-k_{\theta}^0 k_{\theta}^L + k_{\theta}^0 + k_{\theta}^L) \sin\lambda \cdot \lambda + 2k_{\theta}^0 k_{\theta}^L (1 - \cos\lambda) = 0$$

..... (2-61)

式(2-61)についていくつかの場合を考える。

(i) 片端モーメントフリー ;  $k_{\theta}^0 = 0$

式(2-61)は,

$$\sin\lambda \cdot \lambda^3 - k_{\theta}^L \cos\lambda \cdot \lambda^2 + k_{\theta}^L \sin\lambda \cdot \lambda = 0$$

即ち,

$$\sin\lambda \cdot \lambda^2 - k_{\theta}^L \cos\lambda \cdot \lambda + k_{\theta}^L \sin\lambda = 0 \quad \text{..... (2-62)}$$

式(2-62)から,

$$\frac{k_{\theta}^L}{k_{\theta}^L + \lambda^2} = \frac{\tan\lambda}{\lambda} \quad \text{..... (2-63)}$$

式(2-63)において,  $k_{\theta}^L \rightarrow \infty$  とすることによって, 片端固定, 片端回転自由の場合の座屈圧が得られる。

$$\tan\lambda = \lambda \quad (k_{\theta}^L \rightarrow \infty, k_{\theta}^0 = 0) \quad \text{..... (2-64)}$$

(ii) 両端の回転曲げ剛性が等しい場合 ;  $k_{\theta}^0 = k_{\theta}^L = k_{\theta}$

式(2-61)は,

$$\sin\lambda \cdot \lambda^3 - 2k_{\theta} \cos\lambda \cdot \lambda^2 - k_{\theta}(k_{\theta} - 2) \sin\lambda \cdot \lambda + 2k_{\theta}^2 (1 - \cos\lambda)$$

$$= 2 \sin \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \cdot \lambda^3 - 2k_{\theta} \left( \cos^2 \frac{\lambda}{2} - \sin^2 \frac{\lambda}{2} \right) \lambda^2$$

$$- 2k_{\theta}(k_{\theta} - 2) \sin \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \cdot \lambda + 4k_{\theta}^2 \sin^2 \frac{\lambda}{2} = 0$$

両辺を  $\cos^2 \frac{\lambda}{2}$  で割ると,

$$\tan \frac{\lambda}{2} \cdot \lambda^3 - k_{\theta} \left( 1 + \tan^2 \frac{\lambda}{2} \right) \lambda^2 - k_{\theta}(k_{\theta} - 2) \tan \frac{\lambda}{2} \cdot \lambda + 2k_{\theta}^2 \tan^2 \frac{\lambda}{2} = 0$$



更に,

$$\begin{aligned} & \tan \frac{\lambda}{2} \cdot \lambda^2 \left( \lambda + k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} \right) - k_{\theta} \lambda \left( \lambda + k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} \right) + 2k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} \left( \lambda + k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} \right) \\ &= \left( \lambda + k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} \right) \left( \tan \frac{\lambda}{2} \cdot \lambda^2 - k_{\theta} \lambda + 2k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} \right) = 0 \dots\dots\dots (2-65) \end{aligned}$$

従って,

$$\lambda + k_{\theta} \tan \frac{\lambda}{2} = 0 \dots\dots\dots (2-66)$$

または,

$$k_{\theta} \lambda - (\lambda^2 + 2k_{\theta}) \tan \frac{\lambda}{2} = 0 \dots\dots\dots (2-67)$$

式(2-66)の $\lambda$ は, 次の2つの曲線の交点となる(Fig.2-7)。

$$\zeta = \tan \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots (2-68a)$$

$$\zeta = -\frac{1}{k_{\theta}} \lambda \dots\dots\dots (2-68b)$$

式(2-66)あるいは, Fig.2-7からも推察できるように,

$$\lim_{k_{\theta} \rightarrow 0} \lambda_{c,r} = \pi \quad \left( \tan \frac{\lambda}{2} \rightarrow -\infty \text{ 即ち } \cos \frac{\lambda}{2} = 0 \right) \dots\dots\dots (2-69)$$

また,

$$\lim_{k_{\theta} \rightarrow \infty} \lambda_{c,r} = 2\pi \quad \left( \tan \frac{\lambda}{2} = 0 \text{ 即ち } \sin \frac{\lambda}{2} = 0 \right) \dots\dots\dots (2-70)$$

式(2-69)は, 両端単純支持, 式(2-70)は両端固定の境界条件に相当し, それぞれ, 式(2-6)及び式(2-24)に一致する。

2.3 座屈圧力に及ぼす横方向分布荷重（自重，浮力等）の影響

自重，浮力等による荷重を想定して横方向等分布荷重  $q_0$  を考慮すると，式(1-3)は，

$$q = q_0 - \pi r^2 p \frac{d^2 w}{dx^2} \dots\dots\dots (3-1)$$

従って，解くべき微分方程式は，

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{q_0}{EI} \dots\dots\dots (3-2)$$

上式を2回積分すると，

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 w = \frac{q_0}{2EI} x^2 + C_1 x + C_2 \dots\dots\dots (3-3)$$

式(3-3)は非同次2階微分方程式であり，一般解は，

$$w = A + \frac{B}{L} x + C \left(\frac{x}{L}\right)^2 + D \sin \lambda \frac{x}{L} + E' \cos \lambda \frac{x}{L} \dots\dots\dots (3-4)$$

また，

$$\frac{dw}{dx} = \frac{B}{L} + \frac{2C}{L^2} x + D \frac{\lambda}{L} \cos \lambda \frac{x}{L} - E' \frac{\lambda}{L} \sin \lambda \frac{x}{L} \dots\dots\dots (3-5)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{2C}{L^2} - D \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \sin \lambda \frac{x}{L} - E' \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \cos \lambda \frac{x}{L} \dots\dots\dots (3-6)$$

Fig. 2-2 に示されるような曲げ予変形を有する場合を考えると，境界条件は以下のようなになる。

$$x = 0 \quad ; \quad w = 0 \quad , \quad \frac{dw}{dx} = \theta_0 \dots\dots\dots (3-7ab)$$

$$x = L \quad ; \quad w = 0 \quad , \quad \frac{dw}{dx} = -\theta_0 \dots\dots\dots (3-7cd)$$

$$x = \frac{L}{2} \quad ; \quad \frac{dw}{dx} = 0 \dots\dots\dots (3-7e)$$

上の境界条件を式(3-4)，(3-5)に考慮すると，

$$A + E' = 0 \dots\dots\dots (3-8a)$$

$$A + B + C + D \sin \lambda + E' \cos \lambda = 0 \quad \dots\dots\dots (3-8b)$$

$$B + C + D \lambda \cos \frac{\lambda}{2} - E' \lambda \sin \frac{\lambda}{2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-8c)$$

$$B + D \lambda = L \theta_0 \quad \dots\dots\dots (3-8d)$$

$$B + 2C + D \lambda \cos \lambda - E' \lambda \sin \lambda = -L \theta_0 \quad \dots\dots\dots (3-8e)$$

一方, 式(3-4)を式(3-2)に代入することにより,

$$C = \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

式(3-8a), (3-8b), (3-8d), (3-8e)及び(3-9)から, C, E'を消去すると,

$$A(1 - \cos \lambda) + B + D \sin \lambda = -\frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \quad \dots\dots\dots (3-10a)$$

$$B + D \lambda = L \theta_0 \quad \dots\dots\dots (3-10b)$$

$$A \lambda \sin \lambda + B + D \lambda \cos \lambda = -L \theta_0 - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{EI} \quad \dots\dots\dots (3-10c)$$

上の連立方程式を解く, 行列式 $\mathcal{D}$ は,

$$\begin{aligned} \mathcal{D} &= \begin{vmatrix} 1 - \cos \lambda & 1 & \sin \lambda \\ 0 & 1 & \lambda \\ \lambda \sin \lambda & 1 & \lambda \cos \lambda \end{vmatrix} \\ &= -2 \lambda \left( 1 - \cos \lambda - \frac{\lambda}{2} \sin \lambda \right) \\ \text{or} \\ &= -4 \lambda \sin \frac{\lambda}{2} \left( \sin \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (3-11) \end{aligned}$$

各係数は,

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} -\frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} & 1 & \sin \lambda \\ L\theta_0 & 1 & \lambda \\ -L\theta_0 - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} & 1 & \lambda \cos \lambda \end{vmatrix} \\
 &= -\frac{\cos \frac{\lambda}{2}}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} \left( L\theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \dots\dots\dots (3-12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{1}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} 1 - \cos \lambda & -\frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} & \sin \lambda \\ 0 & L\theta_0 & \lambda \\ \lambda \sin \lambda & -L\theta_0 - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} & \lambda \cos \lambda \end{vmatrix} \\
 &= -\frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \dots\dots\dots (3-13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{1}{\mathcal{D}} \begin{vmatrix} 1 - \cos \lambda & 1 & -\frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \\ 0 & 1 & L\theta_0 \\ \lambda \sin \lambda & 1 & -L\theta_0 - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \end{vmatrix} \\
 &= \frac{1}{\lambda} \left( L\theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \dots\dots\dots (3-14)
 \end{aligned}$$

式(3-9), 式(3-12)~(3-14)及び式(3-8a)を式(3-4)に適用して, 式を整理すると,

$$\begin{aligned}
 w &= -\frac{\cos \frac{\lambda}{2}}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} \left( L \theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \left( 1 - \cos \lambda \frac{x}{L} \right) \\
 &\quad - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \cdot \frac{x}{L} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{\lambda} \left( L \theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \sin \lambda \frac{x}{L} \\
 \text{or} \\
 &= \frac{2}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} \left( L \theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \sin \frac{\lambda x}{2L} \cdot \sin \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \\
 &\quad - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \cdot \frac{x}{L} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \dots\dots\dots (3-15)
 \end{aligned}$$

また,

$$\begin{aligned}
 \frac{dw}{dx} &= \frac{1}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \left( L \theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \sin \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \\
 &\quad - \frac{L^3}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \dots\dots\dots (3-16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2w}{dx^2} &= -\frac{\lambda}{L^2 \sin \frac{\lambda}{2}} \left( L \theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{2EI} \right) \cos \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) + \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{EI} \\
 &\dots\dots\dots (3-17)
 \end{aligned}$$

式(3-15)から, 中央の変位は,

$$\begin{aligned}
 w_0 &= w \Big|_{x=\frac{L}{2}} \\
 &= \frac{\tan \frac{\lambda}{4}}{\lambda} L \theta_0 + \left( \frac{\tan \frac{\lambda}{4}}{\lambda} - \frac{1}{4} \right) \frac{L^4}{2\lambda^2} \cdot \frac{q_0}{EI} \dots\dots\dots (3-18)
 \end{aligned}$$

式(3-18)の極限として、圧力0のときの変位を求めると、

$$\lim_{\lambda(p) \rightarrow 0} w_0 = \frac{L \theta_0}{4} + \frac{L^4 q_0}{384 EI} \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

式(3-19)を見ると、当然のことながら、右辺第1項は、式(2-21)に一致し、第2項は両端固定はりに等分布荷重が作用する場合のたわみとなる。

座屈圧力は式(3-18)の  $w_0$  を無限大とする  $\lambda$  の値から得られる。これは、式(2-22)と同じであり、

$$p_{cr} = \frac{4 \pi EI}{r^2 L^2} \quad (\lambda = 2 \pi) \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

次に、等分布荷重を考慮する場合としない場合の中央のたわみ比  $\xi$  を求めると、式(2-20)と式(3-18)から、

$$\xi(\lambda) = \frac{w_0(q_0 \neq 0)}{w_0(q_0 = 0)} = 1 + \left(1 - \frac{\lambda}{4 \tan \frac{\lambda}{4}}\right) \frac{L^3}{2 \lambda^2} \cdot \frac{q_0}{\theta_0 EI} \quad \dots\dots\dots (3-21)$$

例えば、座屈圧力に相当する  $\lambda = 2 \pi$  では、

$$\xi(\lambda = 2 \pi) = 1 + 0.05066 \cdot \frac{q_0 L^3}{\theta_0 EI} \quad \dots\dots\dots (3-22)$$

等分布荷重  $q_0$  による静たわみを  $\delta$  とすると、

$$\delta = \frac{L^4 q_0}{384 EI} \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

式(3-23)を式(3-21)に用いると、

$$\xi(\lambda) = 1 + \frac{192}{\lambda^2} \left(1 - \frac{\lambda}{4 \tan \frac{\lambda}{4}}\right) \cdot \frac{\delta}{L \theta_0} \quad \dots\dots\dots (3-24)$$

2.4 ベローズの内圧によるコラム座屈への適用

これまでに示したフォーミュレーションが適用できる実構造としてはベローズがその典型として挙げられる。しかしながら前述の理論的展開をベローズにあてはめる場合、いくつか考慮すべき点があるものと考えられる。

主な点は、

- ① ベローズ曲げ剛性の評価
- ② ひだ部分に含まれる流体圧力によって発生する軸方向荷重
- ③ 端部の剛性の評価
- ④ ベローズの伸びによる軸力及び全体長さの変化

以上の4点について議論する。

(1) ベローズ曲げ剛性の評価

ベローズの曲げ剛性を評価するには、次の方法が考えられる。

- ① 試験により実測する。
- ② 数値解析による。
- ③ 簡易評価式による。

以上の中でも、次の関係により、軸剛性から曲げ剛性を換算する方法も考えられる。

$$K_{\theta} = \frac{d_p^2}{8} K_X \dots\dots\dots (4-1)$$

ここで、 $K_{\theta}$  : ベローズ曲げバネ定数

$K_X$  : ベローズ軸バネ定数

$d_p$  : ベローズピッチ径

数値解析においては、軸対称解析と非軸対称解析結果の比較から、式(4-1)の関係はほぼ成立することを確認している。しかしながら、試験結果からは、直接曲げ剛性を測定した値の方が、軸剛性測定結果から式(4-1)を用いて割出した曲げ剛性よりも一律に低い傾向を示している。式(4-1)の成立性については今一度吟味する必要がある。

簡易評価式としてはE J M Aスタンダード<sup>2)</sup>が挙げられる。この式でもやはり、式(4-1)の関係が用いられている。

$$K_X = \frac{f_{iu}}{N} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$K_{\theta} = \frac{d_p^2 f_{iu}}{8 N} \dots\dots\dots (4-3)$$

ここで、 $f_{iu}$  : ベローズ1山当りの軸バネ定数

N : ベローズ山数

はり理論の鈍曲げの式との比較から、曲げ剛性(EI)は、

$$(EI) = \frac{q d_p^2 f_{iu}}{8} \dots\dots\dots (4-4)$$

ここで、q : ベローズピッチ

式(4-4)を式(1-6)に適用すると

$$\begin{aligned} \lambda^2 &= \frac{8 N^2 q}{d_p^2 f_{iu}} \pi r^2 p \\ &= \frac{2 \pi N^2 q}{f_{iu}} p \dots\dots\dots (4-5) \end{aligned}$$

上式で、次の関係を用いている。

$$L = q N \dots\dots\dots (4-6)$$

$$r = \frac{d_p}{2} \dots\dots\dots (4-7)$$

(2) ひだ部分に含まれる流体圧力によって発生する軸方向荷重

ベローズ構造として右図のようにひだが外側に張出したものを考えると、両端のコンボリューションの壁に内圧pにより、ベローズを押し拡げようとする力が残留し、見かけ上、両固定端に軸圧縮荷重Pが作用すると考えられる。

$$\begin{aligned} P &\doteq \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) p \times \frac{1}{2} \\ &= \pi H d_p \cdot p \times \frac{1}{2} \dots\dots\dots (4-8) \end{aligned}$$

ここで、H : 山高

式(4-5)において、軸圧縮力Pの効果を検討すると、

$$\begin{aligned} \lambda^2 &= \frac{8 N^2 q}{d_p^2 f_{iu}} (\pi r^2 p + P) \\ &= \frac{8 N^2 q}{d_p^2 f_{iu}} \left( \frac{\pi}{4} d_p^2 + \frac{\pi H}{2} d_p \right) p \\ &= \frac{2 \pi N^2 q}{f_{iu}} \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \dots\dots\dots (4-9) \end{aligned}$$



なお、ペローズの構造が直管部の内側にひだが張出しているものであれば、当然のことながら、式(4-8)の軸荷重Pは引張りとなる。

両端固定の場合  $\lambda = 2\pi$  であるから、式(4-9)を使って、

$$p_{cr} = \frac{f_{iu}}{N^2 q \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right)} \dots\dots\dots (4-10)$$

(3) 端部の剛性の評価

通常のペローズは、両端部にいわゆる端部短管を有し、構造的に不連続となっている。特に両端固定条件においてこの影響を評価するのは、かなり難しい問題と思われるが、理論式への導入の仕方として次の2つを考えてみる。

- ① 端部に有限の回転剛性を考える。
- ② 全体長さを補正する。

①の方法は、両端の回転剛性  $k_\theta$  を仮定し、式(2-66)から  $\lambda$  (両端固定と単純支持の中間値) を求めることによって実行できる。

②の方法は、式(4-9)において全体長さを調整することにより簡単に導入できるが、補正量の算定は難しい。

$$\lambda^2 = \frac{2\pi N}{f_{iu}} (Nq + 2\Delta L) \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \dots\dots\dots (4-11)$$

ここで、 $\Delta L$  : 片側補正長さ

(4) ペローズの伸びによる軸力及び全体長さの変化

ペローズに引張り変位  $\delta$  が加わった状態で内圧座屈を考える場合、軸力  $P_\delta$  と全体長さの変化を考慮しなければならない。

$$P_\delta = K_X \cdot \delta = \frac{f_{iu}}{N} \delta \dots\dots\dots (4-12)$$

式(4-9)に式(4-12)を考慮すると、

$$\begin{aligned} \lambda^2 &= \frac{8N(Nq + \delta)}{d_p^2 f_{iu}} \left\{ \left( \frac{\pi}{4} d_p^2 + \frac{\pi}{2} H d_p \right) p - \frac{f_{iu}}{N} \delta \right\} \\ &= \frac{2\pi N(Nq + \delta)}{f_{iu}} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p - \frac{8(Nq + \delta)}{d_p^2} \delta \end{aligned}$$

即ち,

$$\lambda^2 + \frac{8(Nq + \delta)\delta}{d_p^2} = \frac{2\pi N(Nq + \delta)}{f_{iu}} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \quad \dots\dots\dots (4-13)$$

更に, 補正長さ  $2\Delta L$  を考慮すると,

$$\lambda^2 + \frac{8(Nq + 2\Delta L + \delta)\delta}{d_p^2} = \frac{2\pi N(Nq + 2\Delta L + \delta)}{f_{iu}} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \quad \dots\dots\dots (4-14)$$

両端固定の場合,  $\lambda = 2\pi$  であるから

$$p_{cr} = \frac{2\{\pi^2 d_p^2 + 2(Nq + 2\Delta L + \delta)\delta\} f_{iu}}{\pi N d_p^2 (Nq + 2\Delta L + \delta) \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right)} \quad \dots\dots\dots (4-15)$$

2.5 ベローズの座屈圧に及ぼす曲げ予変形の影響

(1) たわみによる応力の評価

Fig. 2-2 に示されるように初期に両端に等しい曲げ角  $\theta_0$  を有する長さ  $L$  のベローズに横方向等分布荷重  $q_0$  と内圧  $p$  を負荷した場合に生じる全たわみ量  $w$  は, 式(3-15)で与えられる。式(4-4)を用いると,

$$w = \frac{2}{\lambda \sin \frac{\lambda}{2}} \left( L \theta_0 + \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right) \sin \frac{\lambda x}{2L} \cdot \sin \frac{\lambda}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) - \frac{L^4}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \cdot \frac{x}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

ここで, 式(4-9)より,

$$\lambda^2 = \frac{2\pi N^2 q}{f_{iu}} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

- 但し,  $f_{iu}$  : ベローズ1山相当のバネ定数
- $H$  : ベローズ山高
- $q$  : ベローズピッチ
- $d_p$  : ベローズピッチ径
- $N$  : ベローズ山数

また、たわみ角及び曲率は、

$$\begin{aligned} \tilde{\theta} = \frac{dw}{dx} = & \frac{1}{\sin \frac{\lambda}{2}} \left( \theta_0 + \frac{L^3}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right) \sin \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \\ & - \frac{L^3}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \dots\dots\dots (5-3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \doteq \frac{d^2w}{dx^2} = & - \frac{\lambda}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \left( \theta_0 + \frac{L^3}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right) \cos \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \\ & + \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \dots\dots\dots (5-4) \end{aligned}$$

$\rho$  は、 $x=0(L)$  と  $x=\frac{L}{2}$  で極値をとる。

$$\begin{aligned} \rho_1 = & - \frac{\lambda \cos \frac{\lambda}{2}}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \left( \theta_0 + \frac{L^3}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right) + \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \quad (x=0, L) \\ & \dots\dots\dots (5-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_2 = & - \frac{\lambda}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \left( \theta_0 + \frac{L^3}{\lambda^2} \cdot \frac{4q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right) + \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \quad (x=\frac{L}{2}) \\ & \dots\dots\dots (5-6) \end{aligned}$$

式(5-5)、(5-6)から圧力零の極限をとると、

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \rho_1 = - \frac{2\theta_0}{L} + \frac{L^2}{12} \cdot \frac{8q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \dots\dots\dots (5-7)$$

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \rho_2 = - \frac{2\theta_0}{L} - \frac{L^2}{24} \cdot \frac{8q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \dots\dots\dots (5-8)$$

式(5-5)に示される曲率 $\rho_1$ の絶対値は等分布荷重 $q_0$ の影響がかなり大きいときには、式(5-6)の曲率 $\rho_2$ の絶対値よりも大きくなる可能性がある。

ベローズ1ピッチ平均で最小曲率半径をR、ベローズ1ピッチの回転角を $\varphi$ とすると、

$$R \varphi \doteq q \dots\dots\dots (5-9)$$

曲げによる1山当りの軸方向相当変位  $e_\theta$  は,

$$e_\theta = \frac{d_p}{2} \varphi = \frac{d_p \cdot q}{2} \cdot \frac{1}{R} \dots\dots\dots (5-10)$$

で, 保守的に評価される。

式(5-5), (5-6)を式(5-10)に用いて,

$$e_{\theta_1} = \frac{d_p \cdot q}{2} |\rho_1|$$

$$= \frac{d_p \cdot q}{2} \left\{ \frac{\lambda \cos \frac{\lambda}{2}}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \theta_0 + \left( 1 - \frac{\lambda \cos \frac{\lambda}{2}}{2 \sin \frac{\lambda}{2}} \right) \cdot \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8 q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right\} \dots (5-11)$$

$$e_{\theta_2} = \frac{d_p \cdot q}{2} |\rho_2|$$

$$= \frac{d_p \cdot q}{2} \left\{ \frac{\lambda \theta_0}{L \sin \frac{\lambda}{2}} + \left( \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\lambda}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8 q_0}{q d_p^2 f_{iu}} \right\} \dots\dots (5-12)$$

ここで, 次の関係を用いると,

$$L = q N \dots\dots\dots (5-13)$$

式(5-11), (5-12)は,

$$e_{\theta_1}(\lambda, \theta_0, q_0) = \frac{d_p}{2} \left\{ \frac{\lambda \cos \frac{\lambda}{2}}{N \sin \frac{\lambda}{2}} \theta_0 + \left( 1 - \frac{\lambda \cos \frac{\lambda}{2}}{2 \sin \frac{\lambda}{2}} \right) \cdot \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8 q_0}{d_p^2 f_{iu}} \right\}$$

$$\dots\dots\dots (5-14)$$

$$e_{\theta_2}(\lambda, \theta_0, q_0) = \frac{d_p}{2} \left\{ \frac{\lambda \theta_0}{N \sin \frac{\lambda}{2}} + \left( \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\lambda}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{L^2}{\lambda^2} \cdot \frac{8 q_0}{d_p^2 f_{iu}} \right\}$$

$$\dots\dots\dots (5-15)$$

一方、ベローズで支配的となる子午線方向曲げ応力は、E J M Aスタンダード<sup>2)</sup>より、次式で表わされる。

$$\sigma_{b,d,m} = \frac{5 E t_p}{3 H^2 C_d} e \quad \dots\dots\dots (5-16)$$

ここで、 $\sigma_{b,d,m}$  : 変位によって発生する子午線方向曲げ応力

$E$  : ベローズの縦弾性係数

$t_p$  : ベローズの補正板厚  $\left( t_p = t \sqrt{\frac{d}{d_p}} \right)$

$t$  : 成形前の板厚

$d$  : ベローズ谷径

$d_p$  : ベローズピッチ径 ( $d_p = d + H$ )

$C_d$  : E J M Aで与えられる係数

$e$  : 1山相当の軸方向変位

式(5-14)、(5-15)と式(5-16)から、初期曲げ変形を有するベローズに内圧を負荷することによって生じるたわみによって発生する子午線方向曲げ応力の最大値は、次式によって表わされる。

$$\sigma_{b,d,m} = \frac{5 E t_p}{3 H^2 C_d} e_{\theta} \quad \dots\dots\dots (5-17)$$

但し、

$$e_{\theta} = \max \{ e_{\theta_1}, e_{\theta_2} \} \quad \dots\dots\dots (5-18)$$

なお、式(5-14)、(5-15)における $\lambda$ と $p$ の関係は式(5-2)で与えられる。

また、横方向等分布荷重の単位長さ当りの値 $q_0$ は次式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$q_0 = 2 \pi g d_p \left| \rho_B \frac{t L_d}{q} \pm \rho_F \frac{d_p}{8} \right| \quad \dots\dots\dots (5-19)$$

ここで、 $g$  : 重力加速度

$L_d$  : ベローズ半山子午線方向展開長さ

$\rho_B$  : ベローズの密度

$\rho_F$  : 流体の密度

式(5-19)の中のマイナスの符号は、浮力を受ける場合で、横置き外圧型ベローズ継手がこれに相当する。

(2) 内圧による応力

内圧によって生じる子午線方向曲げ応力は、E J M Aスタンダード<sup>2)</sup>より、

$$\sigma_{m^p,b} = \frac{C_p}{2} \left( \frac{H}{t_p} \right)^2 p \quad \dots\dots\dots (5-20)$$

ここで、 $\sigma_{m^p,b}$  : 圧力によって発生する子午線方向曲げ応力

$C_p$  : E J M Aで与えられるベローズ形状によって定まる係数

(3) 曲げ予変形を有するベローズの座屈圧の簡易評価法

曲げ予変形を有するベローズについて、降伏域の拡がりから曲げ剛性の低下を評価して理論的に厳密に座屈圧を決定することは難しいので、内圧と内圧によって生じる変位による応力が降伏点に達する圧力を指標とすることにする。

式(5-17)と式(5-20)の和によって最大応力を近似し、これを次のように降伏応力  $S_y$  の  $\alpha$  倍に置くことによって限界圧力  $p_{er}$  を定める。なお、パラメータ  $\alpha$  は試験などにより、合理的に決定するものとする。

$$\frac{5 E t_p}{3 H^2 C_d} e^{\theta} + \frac{C_p}{2} \left( \frac{H}{t_p} \right)^2 p_{er} = \alpha S_y \quad \dots\dots\dots (5-21)$$

但し、式(5-2)から、

$$\lambda^2 = \frac{2 \pi N^2 q}{f_{iu}} \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p_{er} \quad \dots\dots\dots (5-22)$$

なお、式(5-21)を満たす圧力を  $p_{er}$  として区別している。

限界圧力  $p_{er}$  は、式(5-14),(5-15),(5-18)及び式(5-21)から式(5-22)の  $\lambda$  をパラメータとして数値的に求めることができる。

次に、簡単のために、自重あるいは浮力の影響を考慮しない場合、すなわち、 $q_0 = 0$  の場合を考える。この場合、式(5-5),(5-6)は、

$$\rho_1 = - \frac{\lambda \cos \frac{\lambda}{2}}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \theta_0 \quad (x = 0, L) \quad \dots\dots\dots (5-23)$$

$$\rho_2 = - \frac{\lambda}{L \sin \frac{\lambda}{2}} \theta_0 \quad (x = \frac{L}{2}) \quad \dots\dots\dots (5-24)$$

明らかに,

$$|\rho_1| \leq |\rho_2| \quad (\text{等号は, } p=0 \text{ で成立}) \quad \dots\dots\dots (5-25)$$

従って, 式(5-14), (5-15)の大小関係は,

$$e_{\theta_1}(\lambda, \theta_0, q_0=0) \leq e_{\theta_2}(\lambda, \theta_0, q_0=0) \quad \dots\dots\dots (5-26)$$

式(5-17)は, 簡単に次の形で求まる。

$$\sigma_{b^d, m} = \frac{5 E t_p d_p}{6 H^2 C_d N} \cdot \frac{\lambda}{\sin \frac{\lambda}{2}} \theta_0 \quad \dots\dots\dots (5-27)$$

上式を用いると, 式(5-21)は,

$$\frac{5 E t_p d_p}{6 H^2 C_d N} \cdot \frac{\lambda}{\sin \frac{\lambda}{2}} \theta_0 + \frac{C_p}{2} \left( \frac{H}{t_p} \right)^2 p_{cr} = \alpha S y \quad \dots\dots\dots (5-28)$$

一方, ベローズ中央 ( $x = \frac{L}{2}$ ) のたわみは, 式(2-20)で与えられる。

$$w_0 = L \theta_0 \frac{\tan \frac{\lambda}{4}}{\lambda} = q N \theta_0 \frac{\tan \frac{\lambda}{4}}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (5-29)$$

式(5-28)と式(5-29)から  $\theta_0$  を消去すると,  $p_{cr}$  と  $w_0$  の関係が得られる。

$$\frac{5 E t_p d_p}{12 H^2 q N^2 C_d} \cdot \frac{\lambda^2}{\sin^2 \frac{\lambda}{4}} w_0 + \frac{H^2 C_p}{2 t_p^2} p_{cr} = \alpha S y \quad \dots\dots\dots (5-30)$$

式(5-22)を用いると,

$$\frac{5 \pi E t_p d_p}{6 H^2 C_d f_{iu}} \left( 1 + \frac{2 H}{d_p} \right) \cdot \frac{1}{\sin^2 \frac{\lambda}{4}} w_0 + \frac{H^2 C_p}{2 t_p^2} = \frac{\alpha S y}{p_{cr}} \quad \dots\dots\dots (5-31)$$

更に,

$$f_{iu} = \frac{5}{3} \cdot \frac{E d_p t_p^3}{H^3 C_f} \quad \dots\dots\dots (5-32)$$

を用いると,

$$w_0 = \frac{HC_d \sin^2 \frac{\lambda}{4}}{\pi C_f \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right)} \left( \frac{2 t_p^2}{H^2} \cdot \frac{\alpha S_y}{p_{cr}} - C_p \right) \quad (\alpha \geq 1) \quad \dots\dots (5-33)$$

ここで、 $\alpha = 1$  のとき、最大発生応力がほぼ降伏応力となる圧力を規定することになる。実際には、曲げ応力が支配的なので降伏点を越えてもある程度、耐力を期待できることから、

1 以上の適切な  $\alpha$  を選択できるようにする。

式(5-33)について、特別なケースを考える。

i)  $p_{cr} = 0$  の場合

$$\begin{aligned} \lim_{p_{cr} \rightarrow 0} \frac{\sin^2 \frac{\lambda}{4}}{p_{cr}} &= \frac{2 \pi N^2 q}{f_{iu}} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\sin^2 \frac{\lambda}{4}}{\lambda^2} \\ &= \frac{\pi N^2 q}{8 f_{iu}} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) \\ &= \frac{3 \pi H^3 q N^2 C_f}{40 E d_p t_p^3} \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) \quad \dots\dots (5-34) \end{aligned}$$

よって,

$$\lim_{p_{cr} \rightarrow 0} w_0 = \frac{3 H^2 q N^2 C_d}{20 E d_p t_p} \alpha S_y \quad \dots\dots (5-35)$$

一方、式(2-21)より、 $p = 0$  において、

$$w_0 = \frac{L \theta_0}{4} = \frac{q N}{4} \theta_0 \quad \dots\dots (5-36)$$

式(5-35), (5-36) から,

$$\alpha S_y = \frac{5 E d_p t_p}{3 H^2 N C_d} \theta_0 \quad \dots\dots (5-37)$$

式(5-37)は、式(5-27)において  $\lambda \rightarrow 0$  とした場合に一致する。

(ii)  $w_0 = 0$  の場合

式(5-33)において  $w_0 = 0$  とすると,



$$\alpha S y = \frac{H^2 C_p}{2 t_p^2} p_{er} \quad \dots\dots\dots (5-38)$$

これは、式(5-20)に一致する。

式(5-29)と式(5-22)が種々の曲げ予変形  $2\theta_0$  を有するベローズの圧力  $p$  と中央たわみ  $w_0$  の関係を与えるのに対し、式(5-33)は式(5-28)の関係を満たす限界圧力  $p_{er}$  と中央たわみ  $w_0$  の関係を与える。これを図式的に示すと Fig. 5-1 のようになる。曲げ予変形  $2\theta_0$  のベローズの限界圧力  $p_{er}$  は、2つの曲線の交点として得られる。

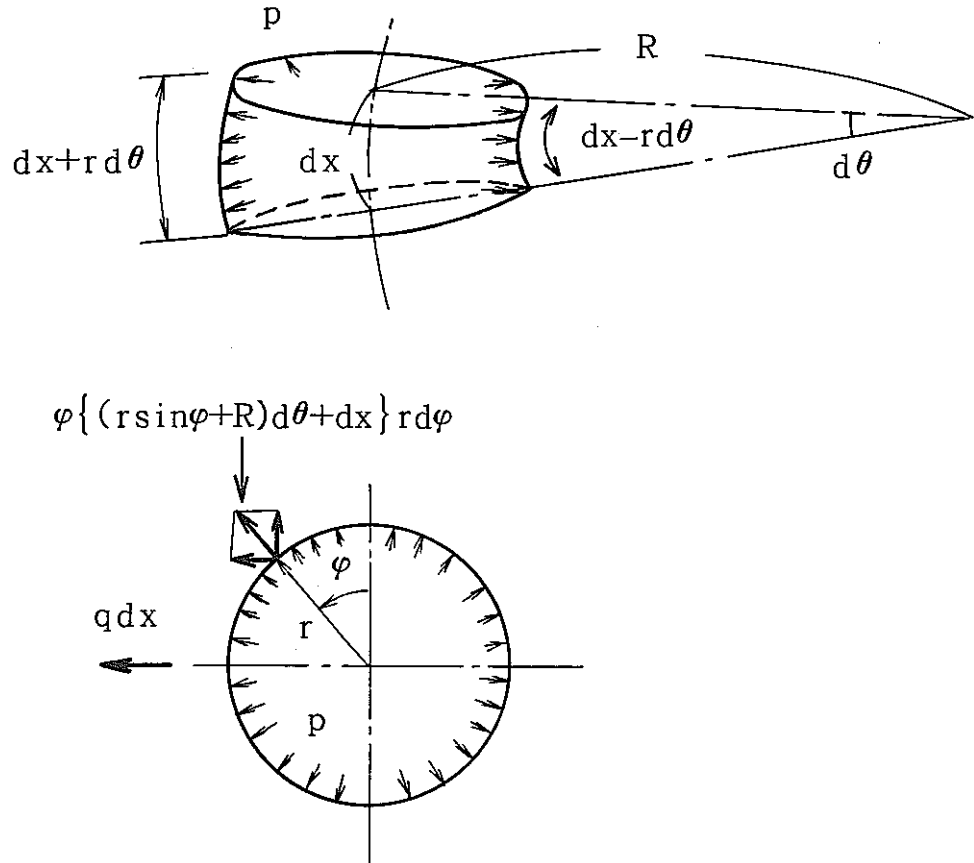


Fig.1-1 Equilibrium of Curved Cylinder Segment Subjected to Internal Pressure

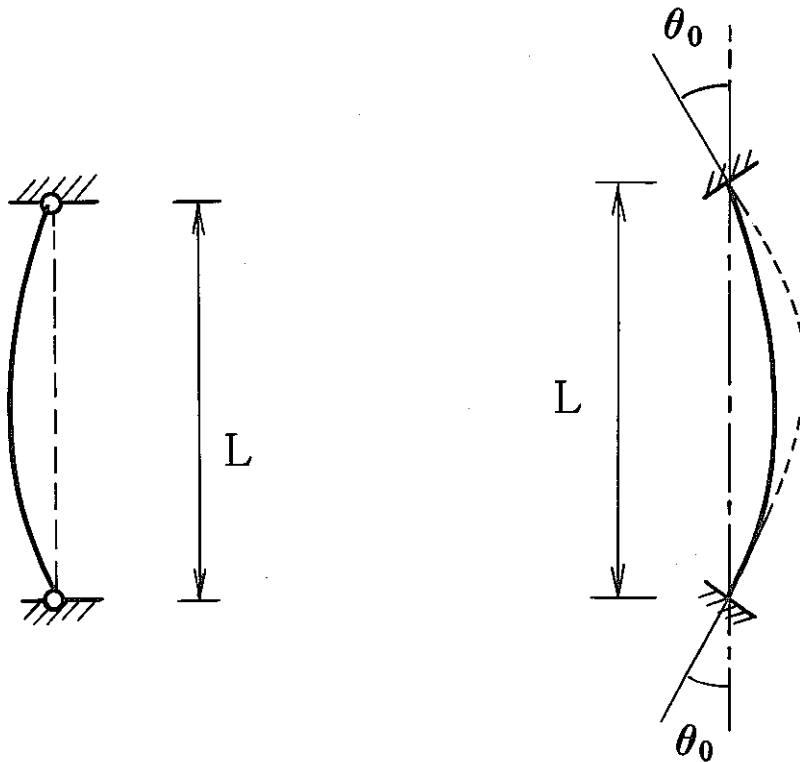


Fig.2-1 Simply Supported Cylinder      Fig.2-2 Fixed Cylinder with Initial Rotation Angle

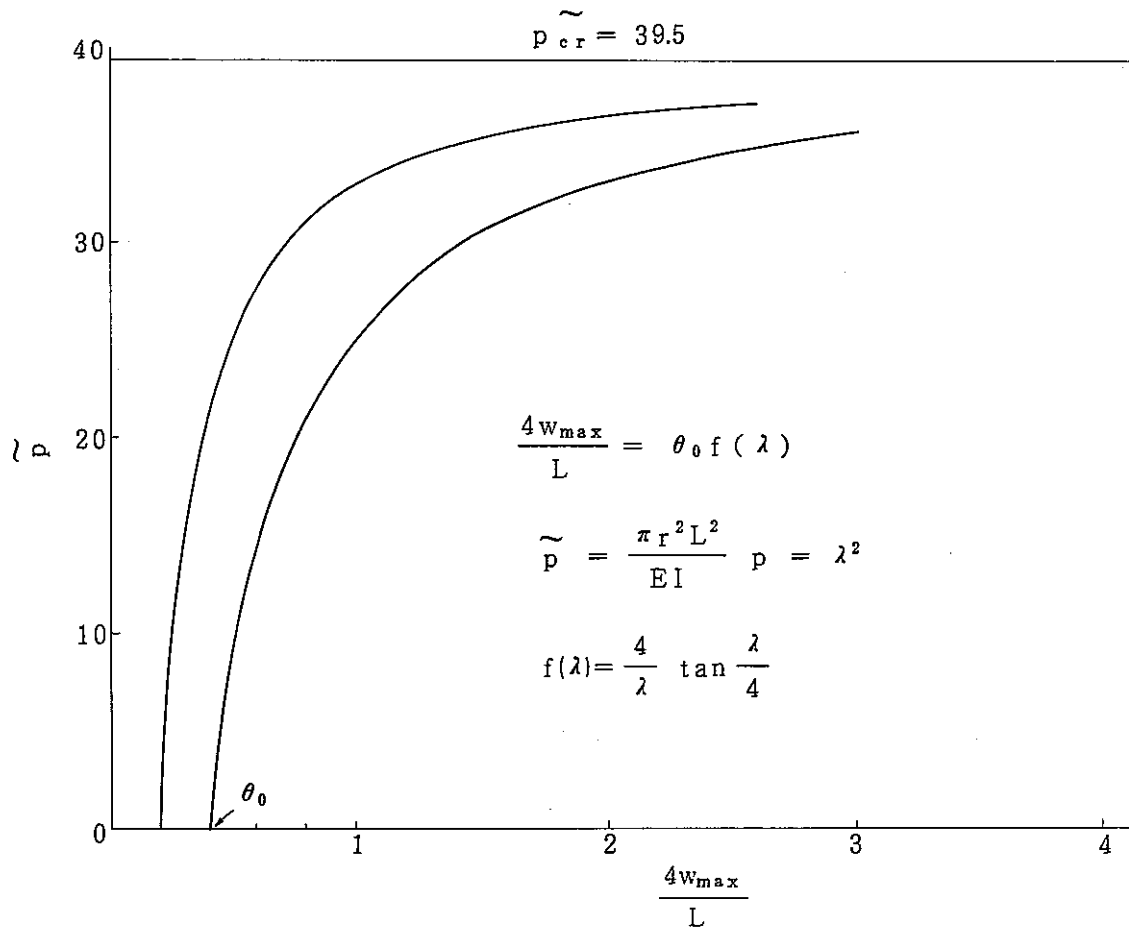


Fig.2-3 Relation between Maximum Deflection and Pressure

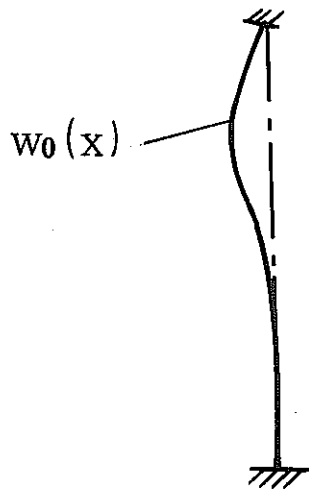


Fig.2-4 Fixed Cylinder with Initial Deflection



Fig.2-5 Fixed Cylinder with Constant Curvature

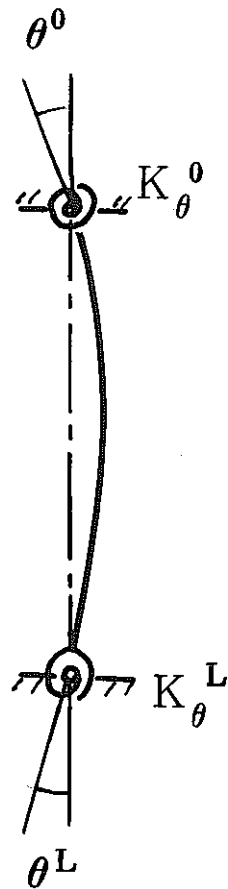


Fig.2-6 Elastically Supported Cylinder

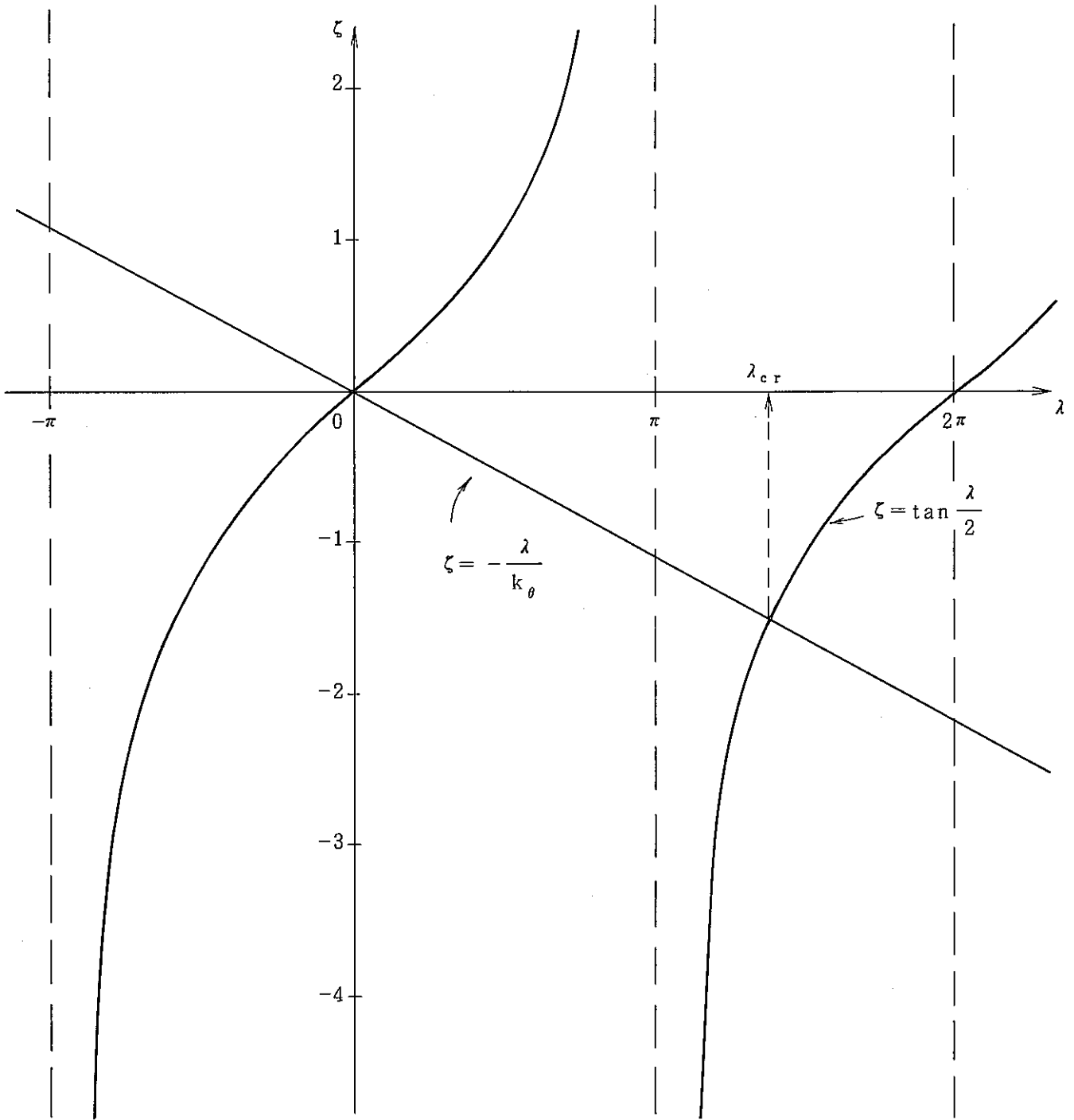


Fig.2-7 Evaluation of  $\lambda_{cr}$

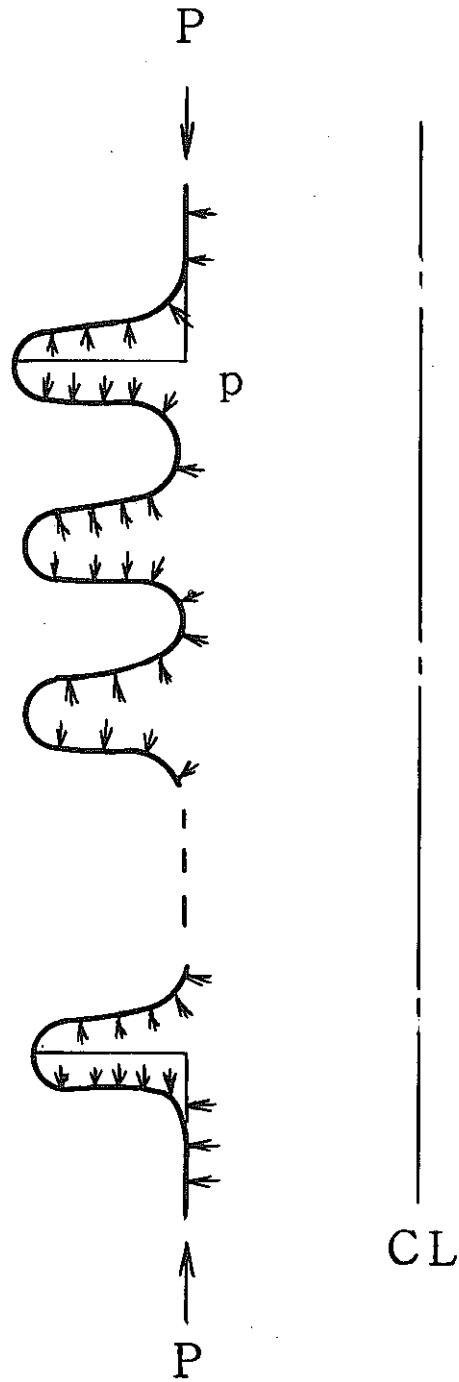


Fig.4-1 Axial Reaction Force due to Pressure Contained in Convolution Anular Space

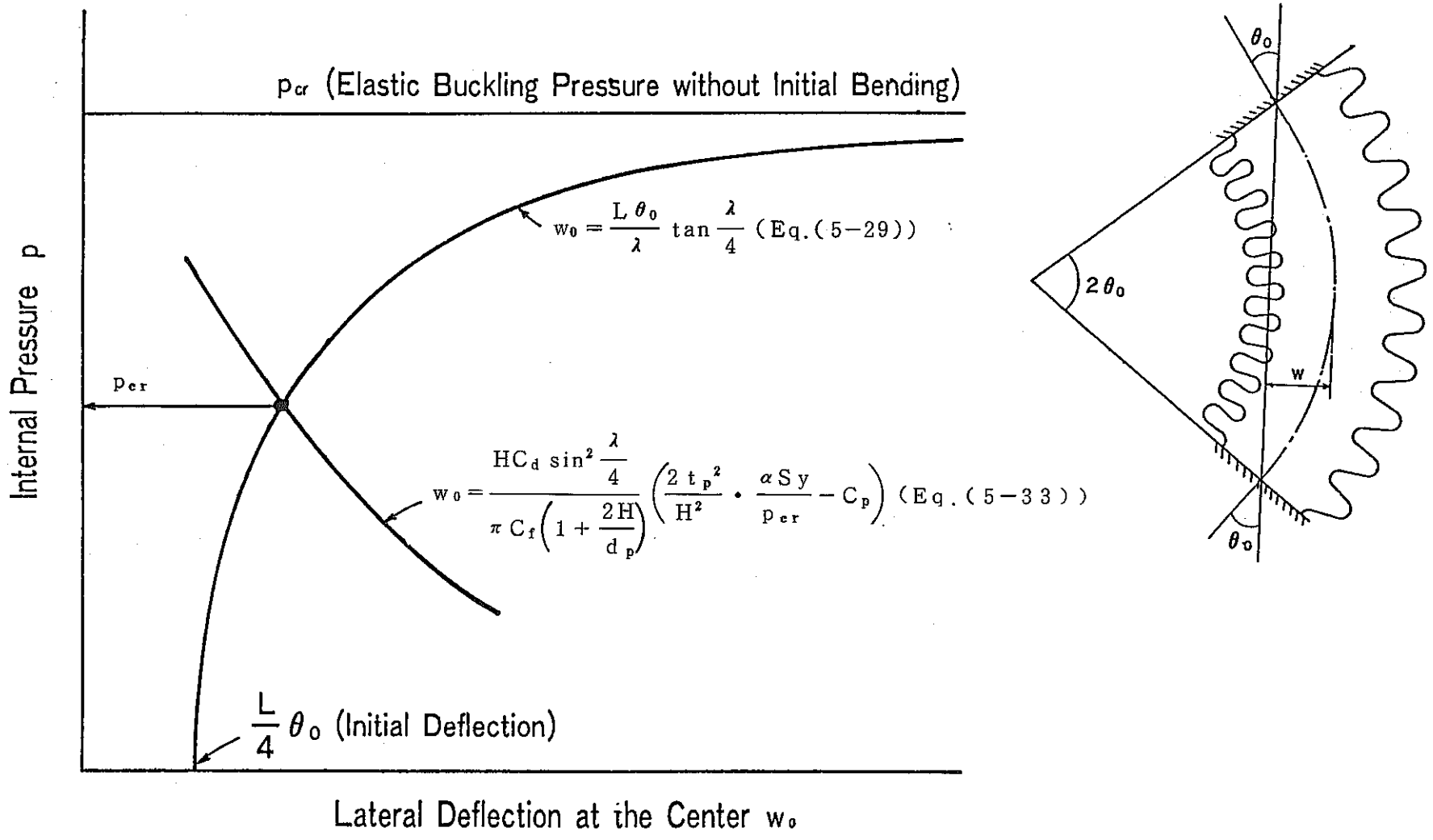


Fig. 5-1 Simplified Pressure Limitation of Bellows with Initial Bending Angle

## ☆ 解 析 例

解析例として次の仕様のペローズを取上げる。

○形状、寸法

- ・ピッチ  $q = 16.0 \text{ mm}$
- ・山高  $H = 17.5 \text{ mm}$
- ・板厚  $t = 0.465 \text{ mm}$
- ・ペローズ谷径  $d = 301.0 \text{ mm}$
- ・山数  $N = 5 \sim 40$
- ・EJMA係数  $C_f = 1.51$
- ・ "  $C_d = 1.71$
- ・ "  $C_p = 0.667$

○材料定数

- ・ヤング率  $E = 19900 \text{ kg/mm}^2$
- ・降伏応力  $S_y = 20 \text{ kg/mm}^2$

○ペローズ1山当りのバネ定数  $f_{iu}$

式(5-32)から簡易に求めることもできるが、実測値、FEM解等を直接入力することも可能である。ここではFEM解析による次の値を用いる<sup>4)</sup>。

$$f_{iu} = 120 \text{ kg/mm}$$

○パラメータ  $\alpha$  : 式(5-21)

ここでは、試験結果との対応から、次の値を選ぶ。

$$\alpha = 3.0$$

○自重の影響等は含まない。

○曲げ予変形量  $2\theta_0 \sim 1$  山当りの軸方向相当変位  $e_\theta$  で与える。

次の3ケースとする。

- ・  $e_\theta = 0$  : 曲げ予変形なし
- ・  $e_\theta = 0.3674 \text{ mm/山}$  : 発生最大ひずみ約0.05%に相当
- ・  $e_\theta = 0.7348 \text{ mm/山}$  : 発生最大ひずみ約0.1%に相当

計算結果をFig. 5-2に示す。図中には参考のため、EJMA規定と、試験結果<sup>4)</sup>を併記している。ここで取上げたペローズについては、15山以上の広い範囲で試験結果と良く一致した線図が描けることがわかる。

なお、計算に使用したプログラムについては後述する。



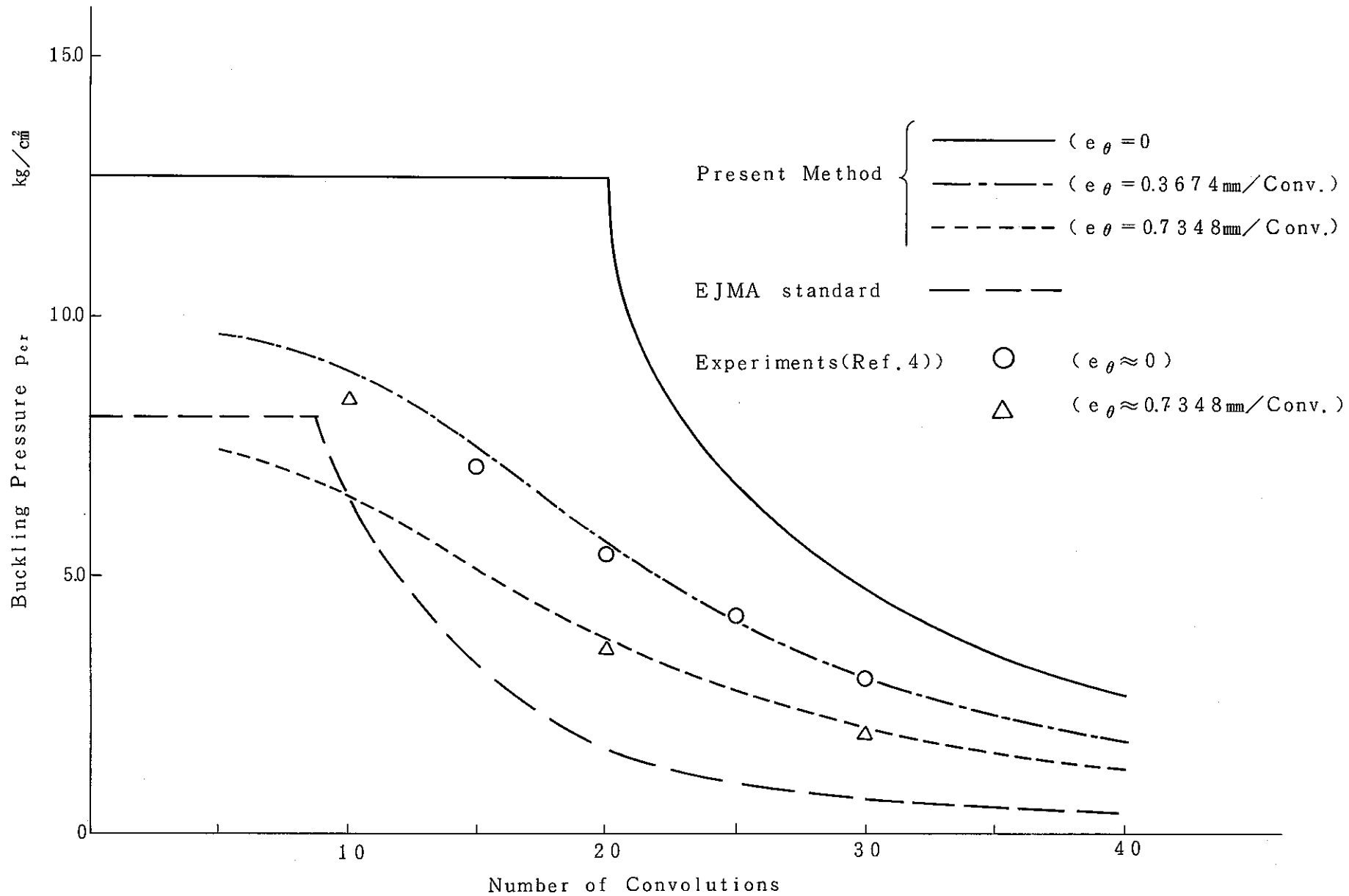


Fig.5-2 Calculation of Buckling Pressure of Bellows with Initial Bending Displacements by Present Simplified Method

## ☆ 計算プログラム解説

本章で述べた手法により、曲げ予変形を有するベローズの座屈圧を求めるために次の2種類の計算プログラムを用意している。

### I. KORAMU 1

### II. TAWAMI

KORAMU1は、山数をパラメータとして山数と座屈圧の関係を求めるプログラムであり、TAWAMIは、曲げ予変形量及び $\alpha$ をパラメータとして、中央たわみ量と座屈圧の関係を求めるプログラムである。プログラム作成に当っては、日立エンジニアリング(株)後藤文彦氏の協力を得た。

以下、それぞれのプログラムについて次の順序に従って解説する。

1. 入力データ
2. 使用方法
3. 出力データ
4. 図(XY PLOT)の出力
5. ソースリスト

## I. KORAMU 1

(山数と座屈圧の関係)

### I.1 入力データ

#### I.1.1 入力データ形式

入力データ形式をFig. I.1に示す。入力データは、A～Dの4種類のカードよりなっている。

#### I.1.2 入力データの内容

入力データの内容をFig. I.1に示す。

#### I.1.3 入力データの例

入力データの例をFig. I.2に示す。

### I.2 使用方法

#### I.2.1 バッチ形式の使用

バッチ形式は、あらかじめ利用者がジョブコントロールカードを用意しておき実行させる方法である。

プログラムソースは、Q 3036. ¥FG, FORT(KORAM2)にある。出力を計算値、入力データ、グラフのみとする場合のJCLをFig. I.3に示す。FINASプロットの入力データイメージはHOLDされるため、JOB実行後、CANCELコマンドかPFD 3.8で消去する必要がある。FINASプロットの入力データイメージを出力したい場合はPFD 3.8でSYSOU CLASSをXからSにかえると出力する。

### I.3 出力データ

#### I.3.1 出力データの種類

出力データの種類は、<sup>(1)</sup>図(XYPLOT)出力のためのデータと<sup>(2)</sup>計算結果の2種類が出力される。

#### I.3.2 出力データ形式

図(XYPLOT)出力のためのデータ形式をFig. I.4に示す。

#### I.3.3 出力データの例

図(XYPLOT)出力のためのデータの例をFig. I.5に示し、計算結果の例をFig. I.6に示す。

### I.4 図(XYPLOT)の出力

#### I.4.1 図(XYPLOT)出力例

山数と座屈圧の関係を示したXYPLOTの例をFig. I.7に示す。



```

* +-----+
* | BELLOWS PARAMETER |
* +-----+
000022 DP = D+H
000023 TP = T*(SQRT(D/DP))
* +-----+
* | FIU ==> VALU |
* +-----+
000024 IF ( FIVE . EQ . 0.0 ) THEN
000025 FIU = (5.0*E*DP*(TP**3.0))/(3.0*CF*(H**3.0))
000026 ELSE
000027 FIU = FIVE
000028 ENDIF
*
000029 N = 1
*
000030 WRITE ( 6 , 450 ) COM1
*
* ++++ DO LOOP ++++
*
000031 DO 10 I = 1 , 40
*
000032 AN(I) = I
*
000033 PC(I) = ((2.0*PI)*FIU)/((AN(I)**2.0)*Q*(1+(2.0*H)/DP))
000034 10 CONTINUE
*
* ++++ DO LOOP END ++++
*
* +-----+
* | FILE OUTPUT |
* +-----+
* | WRITE | FINAS,PLOT,OUTPUT,XYPLOT,FRAME |
* +-----+
000035 WRITE ( 10 , 950 ) FIN,PLO,OUT,XPY,FRA
000036 WRITE ( 10 , 1000 ) M,(AN(I),I=1,40)
000037 WRITE ( 10 , 1100 ) M,(PC(I),I=1,40)
*
000038 M = M+1
*
* ++++ DO LOOP ++++
*
000039 DO 20 K = 5 , 40
*
000040 AN(K) = K
000041 N = K
*
* +-----+
* | AA,BB,CC,DD,EE |
* +-----+
000042 AA = (5.0*E*TP*DP)/(6.0*(H**2.0)*CD*N)
000043 BB = CP/2.0
000044 CC = (H/TP)**2.0
000045 DD = DP/(DP+2.0*H)
000046 EE = FIU/(2.0*PI*(N**2.0)*Q)
*
* +-----+
* | TH |
* +-----+
000047 TH = ((2.0*N)/DP)*ETH 88/8/1 MODIFY
TH = (N/DP)*ETH
*
* ++++ CALL ++++
*
000048 CALL CASE1(X)
*
* +-----+
* | PY(K),PC(K),PP(K) ==> VALU |
* +-----+
000049 PY(K) = ((X**2.0)*FIU*DP)/(2.0*PI*(N**2.0)*Q*(DP+2.0*H))
000050 PC(K) = ((2.0*PI)*FIU)/((N**2.0)*Q*(1+(2.0*H)/DP))
000051 PP(K) = PY(K)/PC(K)
*
* +-----+
* | LIST OUTPUT |
* +-----+
000052 WRITE ( 6 , 400 ) N,TH,PC(K),PY(K),PP(K)
000053 20 CONTINUE
*
* ++++ DO LOOP END ++++
000054 WRITE (6,150) Q,H,T,D,FIUE,CF,CD,CP,E,SY,ETH,AL,YVA,ATI
*

```

```

00790003
00800003
00810003
00820003
00830003
00840003
00850003
00860003
00870003
00880003
00890003
00900003
00910003
00920003
00930003
00940003
00950003
00960003
00970003
00980003
00990003
01000003
01010003
01020003
01030003
01040003
01050003
01060003
01070003
01080003
01090003
01100003
01110003
01120003
01130003
01140003
01150003
01160003
01170003
01180003
01190003
01200003
01210003
01220003
01230003
01240003
01250003
01260003
01270003
01280003
01290003
01300003
01310003
01320003
01330003
01340003
01350003
01360003
01370003
01380003
01390003
01400003
01410003
01420003
01430003
01440003
01450003
01460003
01470003
01480003
01490003
01500003
01510003
01520003
01530003
01540003
01550003
01560003
01570003
01571003
01580003

```

```

* +-----+
* | FILE OUTPUT |
* +-----+
000055 WRITE ( 10 , 1000 ) M,(AN(K),K=10,40)
000056 WRITE ( 10 , 1100 ) M,(PY(K),K=10,40)
* +-----+
* | WRITE | CURVE,XTITLE,YTITLE,PTITLE,YRANGE, |
* | | YRANGE,XRANGE,PLOT3,END OUTPUT, |
* | | END FINAS |
* +-----+
000057 WRITE ( 10 , 960 ) CU1,CU2,XTI,YTI,PTI,ATI,YRA,YVA,XRA,PL3,EOU,EFI
* +-----+
* | FORMAT |
* +-----+
000058 100 FORMAT (5F10.0/4F10.0/4F10.0/10X,A60 )
000059 150 FORMAT (1H , 'INPUT DATA'/5F10.3/4F10.3/4F10.3/10X,A60 )
000060 200 FORMAT (1H ,5X,'N =',2PE10.3E1,10X,'TH =',1PE10.3/
* 6X,'PCR=',1PE15.7,5X,'PY =',1PE15.7/
* 6X,'P =',1PE15.7)
* 300 FORMAT (1H ,5X,'N =',2PE10.3E1,10X,'PCR=',E15.7)
* 350 FORMAT (1H ,5X,'Q=',F10.3,5X,'H=',F10.3/5X,
* 'T=',F10.3,5X,'D=',F10.3/5X,
* 'CF=',F10.3,5X,'CD=',F10.3/5X,
* 'CP=',F10.3,5X,'E=',F10.3/5X,
* 'SY=',F10.3,5X,'ETH=',F10.3/5X,
* 'AL=',F10.3,5X,'DP=',F10.3/5X,
* 'TP=',F10.3,5X,'FIU=',F10.3)
000061 400 FORMAT (1H ,10X,2X,I3,1X,1PE10.3,2X,1PE10.3,2X,1PE10.3,2X,1PE10.3)
000062 450 FORMAT (1H ,A100 )
* 500 FORMAT (1H ,5X,'AA=',E15.7,5X,'BB=',E15.7/5X,
* 'CC=',E15.7,5X,'DD=',E15.7/5X,
* 'EE=',E15.7,5X,'TH=',E15.7)
000063 950 FORMAT (A5/A4/A6/A6/A14)
000064 960 FORMAT (A25/A25/A38/A26/A6,4X,A60/A13,7X,F10.2/A24/A72/A10/A9)
000065 1000 FORMAT ('XVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)))
000066 1100 FORMAT ('YVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)))

000067 STOP
000068 END

```

```

STATISTICS: 68 STEPS, PROCEDURE SIZE= 2776 BYTES, PROGRAM NAME=MAIN
196 LINES, PROGRAM SIZE= 7504 BYTES, DIAGNOSTICS = 0
REMAINING SIZE= 1748K BYTES, HIGHEST SEVERITY CODE=00

```

```

1 FORTRAN 77 V10L31 DATE 88.08.02 TIME 16.15.40 PAGE
0 *****
* ***** . + . + *****
* * + . . CASE1 + . . *
* * . . . + . *
* * + ( 1-15 ) . + . *
* *****
* *****
000069 SUBROUTINE CASE1(X)
000070 COMMON PI,CF,CD,CP,Q,H,T,D,E,SY,AL,ETH,TH,N,DP,FIU,TP,
* AA,BB,CC,DD,EE
000071 EXTERNAL FSIN
*
000072 AI = 1.57079
000073 BI = 6.28
000074 EPST = 1.0E-3
*
000075 CALL TSD1 (AI,BI,FSIN,EPST,X,ICON)
*
* WRITE ( 6 , 110 ) X,ICON
*110 FORMAT ( 1H ,9X,'X =',E15.7/5X,'ICON =',15 )
000076 RETURN
000077 END

```

```

STATISTICS: 9 STEPS, PROCEDURE SIZE= 82 BYTES, PROGRAM NAME=CASE1
22 LINES, PROGRAM SIZE= 426 BYTES, DIAGNOSTICS = 0
REMAINING SIZE= 1760K BYTES, HIGHEST SEVERITY CODE=00

```

```

1 FORTRAN 77 V10L31 DATE 88.08.02 TIME 16.15.40 PAGE
0 *****
* * FUNCTION *
* *****
000078 FUNCTION FSIN(X)
000079 COMMON PI,CF,CD,CP,Q,H,T,D,E,SY,AL,ETH,TH,N,DP,FIU,TP,
* AA,BB,CC,DD,EE
*
000080 FSIN = AA*TH*(X/(SIN(X/2.0)))
* +BB*CC*DD*EE*(X**2.0)-AL*SY
*
000081 RETURN
000082 END

```

	10	20	30	40	50	60	70
A	q	H	t	d	f <sub>iu</sub>		
B	C <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	C <sub>p</sub>	E			
C	S <sub>y</sub>	e <sub>θ</sub>	α	YRANGE			
D	TITLE						

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内容
A	1~10	実数	q	ベローズ形状パラメータ
	11~20	"	H	"
	21~30	"	t	"
	31~40	"	d	"
	41~50	"	f <sub>iu</sub>	ばね定数(0.0入力の場合, E JMAによるばね定数を入力)
B	1~10	実数	C <sub>f</sub>	係数(E JMA Fig.C19)
	11~20	"	C <sub>d</sub>	" ( " Fig.C20)
	21~30	"	C <sub>p</sub>	" ( " Fig.C18)
	31~40	"	E	ヤング率
C	1~10	実数	S <sub>y</sub>	降伏応力
	11~20	"	e <sub>θ</sub>	1山当りの軸方向相当変位
	21~30	"	α	係数
	31~40	"	YRANGE	Y軸(座屈圧)の値の上限
D	11~70	文字	TITLE	タイトル

Fig.I.1 Input Data Contents

16.0	17.5	0.45	301.0	120.0
1.510	1.710	0.667	19900.0	
20.0	0.365	1.5	1.0	

FIG. FIU=120.0(KG/NH\*\*2),ETH=0.365,ALPHA=1.5

Fig.I.2 Example of Input Data

	1	2	3	4	5	6	7	8
000001	.....0	.....0	.....0	.....0	.....0	.....0	.....0	.....0
000002	000001	000002	000003	000004	000005	000006	000007	000008
000003	000009	000010	000011	000012	000013	000014	000015	000016
000004	000017	000018	000019	000020	000021	000022	000023	000024
000005	000025	000026	000027	000028	000029	000030	000031	000032
000006	000033	000034	000035	000036	000037	000038	000039	000040
000007	000041	000042	000043	000044	000045	000046	000047	000048
000008	000049	000050	000051	000052	000053	000054	000055	000056
000009	000057	000058	000059	000060	000061	000062	000063	000064
000010	000065	000066	000067	000068	000069	000070	000071	000072
000011	000073	000074	000075	000076	000077	000078	000079	000080
000012	000081	000082	000083	000084	000085	000086	000087	000088
000013	000089	000090	000091	000092	000093	000094	000095	000096
000014	000097	000098	000099	000100	000101	000102	000103	000104
000015	000105	000106	000107	000108	000109	000110	000111	000112
000016	000113	000114	000115	000116	000117	000118	000119	000120
000017	000121	000122	000123	000124	000125	000126	000127	000128
000018	000129	000130	000131	000132	000133	000134	000135	000136
000019	000137	000138	000139	000140	000141	000142	000143	000144
000020	000145	000146	000147	000148	000149	000150	000151	000152
000021	000153	000154	000155	000156	000157	000158	000159	000160
000022	000161	000162	000163	000164	000165	000166	000167	000168
000023	000169	000170	000171	000172	000173	000174	000175	000176
000024	000177	000178	000179	000180	000181	000182	000183	000184
000025	000185	000186	000187	000188	000189	000190	000191	000192

```

.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+
000001 //Q3036K01 JOB (KICK),KORAMU,MSGCLASS=X,NOTIFY=Q3036,
000002 // SYSTEM=BEP1,MSGLEVEL=(2,0),
000003 // ATTR=(TO,C4,W1)
000004 //JOBPROC DD DSN=Q3050.PROCLIB,DISP=SHR
000005 // EXEC FORT7CLG,PARM='LC(99)',GOREGN=1400K
000006 //FORT.SYSPRINT DD DUMMY
000007 //FORT.SYSIN DD DSN=Q3036.YFG.FORT(KORAMU2),UNIT=SYSDA,DISP=SHR
000008 //LKED.SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR
000009 // DD DSN=SYS1.SSL2,DISP=SHR
000010 //LKED.SYSPRINT DD DUMMY
000011 //GO.FT05F001 DD DSN=Q3036.YFG.OUT(TT01),UNIT=DASD,DISP=SHR
000012 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=S
000013 //GO.FT10F001 DD DSN=Q3036.QKORA01.TT01,UNIT=DASD,
000014 // DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),
000015 // DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
000016 //GO.FT21F001 DD DSN=&&POS,UNIT=WORK,
000017 // SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),DISP=(NEW,PASS),
000018 // DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200,BUFNO=1)
000019 // EXEC FINAS
000020 //ODIC DD DUMMY
000021 //SYSIN DD DSN=Q3036.QKORA01.TT01,DISP=SHR
000022 //NLP EXEC FNSHLP
000023 //GDFILE DD SYSOUT=S
000024 //
000025 //

```

Fig.I.3 JCL for KORAMU 1



	10	20	30	40	50	60	70	80
A	XVALU	xvid	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
			x <sub>7</sub>	-----	-----	-----	-----	x <sub>n</sub>

	10	20	30	40	50	60	70	80
B	YVALU	yvid	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>
			y <sub>7</sub>	-----	-----	-----	-----	y <sub>n</sub>

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内 容
A	1~5	英 字	—	1~5カラムにXVALUと記入
	11~15	正整数	xvid	値の並びの識別番号
	21~30	実 数	x <sub>1</sub>	1番目の値
	31~40	"	x <sub>2</sub>	2番目の値
	⋮	⋮	⋮	⋮
	71~80	"	x <sub>6</sub>	6番目の値 値の個数が6を越える場合には次のカードの21~80カラムに10カラム単位で記入
B	1~5	英 字	—	1~5カラムにYVALUと記入
	11~15	正整数	yvid	値の並びの識別番号
	21~30	実 数	y <sub>1</sub>	1番目の値
	31~40	"	y <sub>2</sub>	2番目の値
	⋮	⋮	⋮	⋮
	71~80	実 数	y <sub>6</sub>	6番目の値 値の個数が6を越える場合には次のカードの21~80カラムに10カラム単位で記入

Fig.I.4 Data Form for XY・Plot

```

FINAS
PLOT
OUTPUT
XYPLOT
FRAME
A4V
XVALU      1      1.000E+00  2.000E+00  3.000E+00  4.000E+00  5.000E+00  6.000E+00
              7.000E+00  8.000E+00  9.000E+00  1.000E+01  1.100E+01  1.200E+01
              1.300E+01  1.400E+01  1.500E+01  1.600E+01  1.700E+01  1.800E+01
              1.900E+01  2.000E+01  2.100E+01  2.200E+01  2.300E+01  2.400E+01
              2.500E+01  2.600E+01  2.700E+01  2.800E+01  2.900E+01  3.000E+01
              3.100E+01  3.200E+01  3.300E+01  3.400E+01  3.500E+01  3.600E+01
              3.700E+01  3.800E+01  3.900E+01  4.000E+01
YVALU      1      4.246E+01  1.061E+01  4.718E+00  2.654E+00  1.698E+00  1.179E+00
              8.665E-01  6.634E-01  5.242E-01  4.246E-01  3.509E-01  2.948E-01
              2.512E-01  2.166E-01  1.887E-01  1.659E-01  1.469E-01  1.310E-01
              1.176E-01  1.061E-01  9.628E-02  8.772E-02  8.026E-02  7.371E-02
              6.793E-02  6.281E-02  5.824E-02  5.416E-02  5.049E-02  4.718E-02
              4.418E-02  4.146E-02  3.899E-02  3.673E-02  3.466E-02  3.276E-02
              3.101E-02  2.940E-02  2.791E-02  2.654E-02
XVALU      2      1.000E+01  1.100E+01  1.200E+01  1.300E+01  1.400E+01  1.500E+01
              1.600E+01  1.700E+01  1.800E+01  1.900E+01  2.000E+01  2.100E+01
              2.200E+01  2.300E+01  2.400E+01  2.500E+01  2.600E+01  2.700E+01
              2.800E+01  2.900E+01  3.000E+01  3.100E+01  3.200E+01  3.300E+01
              3.400E+01  3.500E+01  3.600E+01  3.700E+01  3.800E+01  3.900E+01
              4.000E+01
YVALU      2      0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00  1.398E-02  1.347E-02
              1.297E-02  1.246E-02  1.196E-02  1.147E-02  1.100E-02  1.053E-02
              1.008E-02  9.643E-03  9.224E-03  8.822E-03  8.437E-03  8.070E-03
              7.719E-03  7.386E-03  7.068E-03  6.767E-03  6.481E-03  6.209E-03
              5.951E-03  5.707E-03  5.475E-03  5.256E-03  5.045E-03  4.848E-03
              4.660E-03
CURVE      1      1
CURVE      2      1
XTITLE     N ( NUMBER OF CONVOLUTIONS )
YTITLE     PCR ( KG/CM**2 )
PTITLE     FIG.      FIU=120.0(KG/MM**2),ETH=0.365,ALPHA=1.5
YRANGE     0.0      1.00
XRANGE     0.0      40.0
PLOTS      XVALU    1      YVALU    1      XVALU    2      YVALU    2
END OUTPUT
END FINAS

```

Fig.I.5 Example of Data for XY Plot

N	THETA0	PCR	PY	P=PY/PCR
5	1.146E-02	1.698E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	1.375E-02	1.179E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	1.604E-02	8.665E-01	0.000E+00	0.000E+00
8	1.834E-02	6.634E-01	0.000E+00	0.000E+00
9	2.063E-02	5.242E-01	0.000E+00	0.000E+00
10	2.292E-02	4.246E-01	0.000E+00	0.000E+00
11	2.521E-02	3.509E-01	0.000E+00	0.000E+00
12	2.750E-02	2.948E-01	0.000E+00	0.000E+00
13	2.980E-02	2.512E-01	0.000E+00	0.000E+00
14	3.209E-02	2.166E-01	1.398E-02	6.453E-02
15	3.438E-02	1.887E-01	1.347E-02	7.137E-02
16	3.667E-02	1.659E-01	1.297E-02	7.817E-02
17	3.896E-02	1.469E-01	1.246E-02	8.482E-02
18	4.126E-02	1.310E-01	1.196E-02	9.129E-02
19	4.355E-02	1.176E-01	1.147E-02	9.755E-02
20	4.584E-02	1.061E-01	1.100E-02	1.036E-01
21	4.813E-02	9.628E-02	1.053E-02	1.094E-01
22	5.042E-02	8.772E-02	1.008E-02	1.149E-01
23	5.272E-02	8.026E-02	9.643E-03	1.201E-01
24	5.501E-02	7.371E-02	9.224E-03	1.251E-01
25	5.730E-02	6.793E-02	8.822E-03	1.299E-01
26	5.959E-02	6.281E-02	8.437E-03	1.343E-01
27	6.188E-02	5.824E-02	8.070E-03	1.386E-01
28	6.418E-02	5.416E-02	7.719E-03	1.425E-01
29	6.647E-02	5.049E-02	7.386E-03	1.463E-01
30	6.876E-02	4.718E-02	7.068E-03	1.498E-01
31	7.105E-02	4.418E-02	6.767E-03	1.532E-01
32	7.334E-02	4.146E-02	6.481E-03	1.563E-01
33	7.564E-02	3.899E-02	6.209E-03	1.593E-01
34	7.793E-02	3.673E-02	5.951E-03	1.620E-01
35	8.022E-02	3.466E-02	5.707E-03	1.647E-01
36	8.251E-02	3.276E-02	5.475E-03	1.671E-01
37	8.480E-02	3.101E-02	5.256E-03	1.695E-01
38	8.710E-02	2.940E-02	5.045E-03	1.716E-01
39	8.939E-02	2.791E-02	4.848E-03	1.737E-01
40	9.168E-02	2.654E-02	4.660E-03	1.756E-01

Fig.I.6 Example of Calculation Result

FINAS

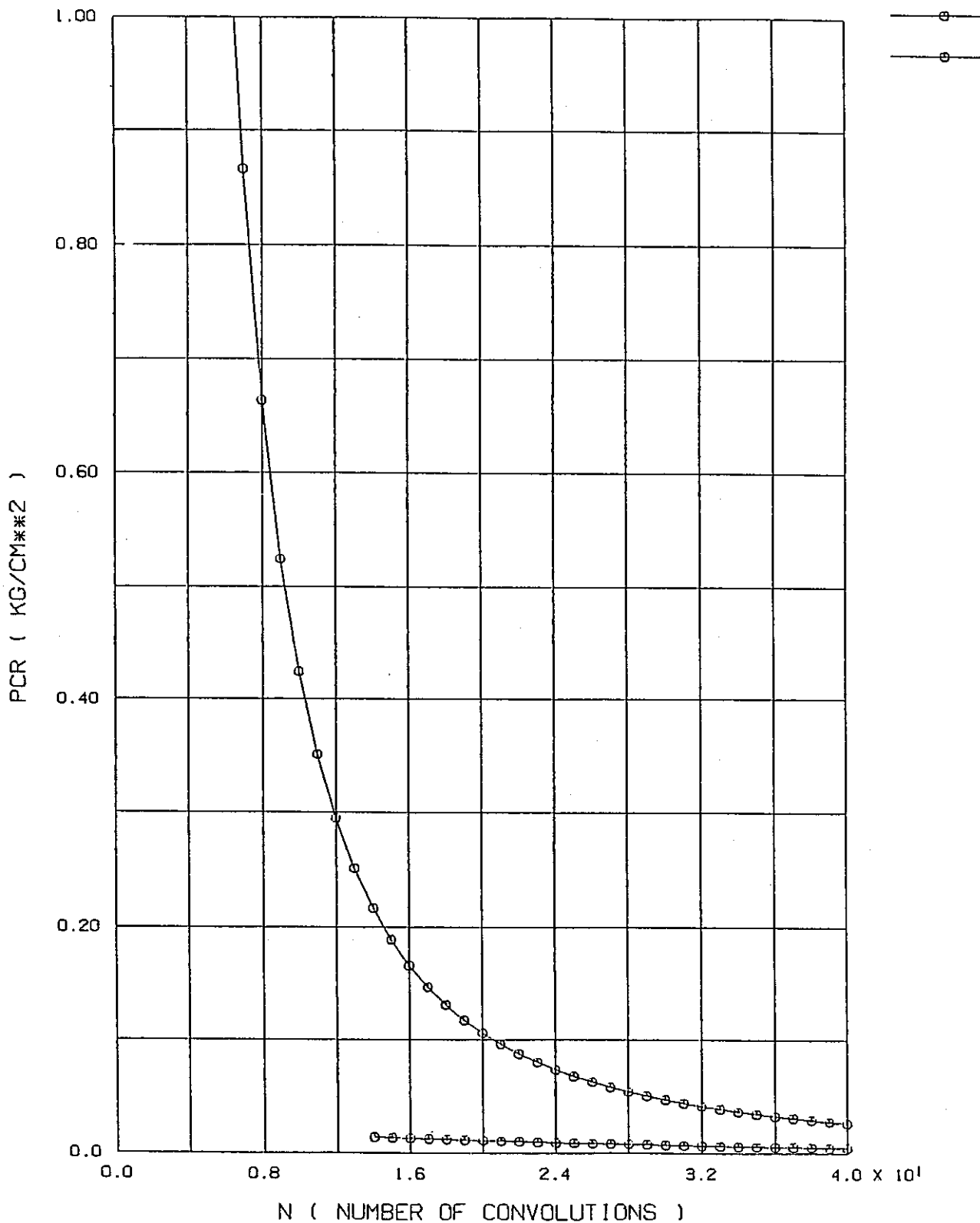


FIG. FIU=120.0(KG/MM\*\*2).ETH=0.365.ALPHA=1.5

Fig.I.7 Example of XY plot

## II. TAWAMI

(中央たわみ量と座屈圧の関係)

### II.1 入力データ

#### II.1.1 入力データ形式

入力データ形式をFig. II.1に示す。入力データはA～Fの6種類のカードよりなっている。

#### II.1.2 入力データの内容

入力データの内容をFig. II.1に示す。

#### II.1.3 入力データの例

入力データの例をFig. II.2に示す。

### II.2 使用方法

#### II.2.1 バッチ形式の使用

I 2.1項参照, ジョブコントロールカードをFig. II.3に示す。

### II.3 出力データ

#### II.3.1 出力データの種類

出力データの種類としては, 図(XYPLOT)出力のためのデータがある。

#### II.3.2 出力データ形式

I 3.2と同様, 参照

#### II.3.3 出力データの例

図(XYPLOT)出力のためのデータの例をFig. II.4に示す。

### II.4 図(XYPLOT)の出力

#### II.4.1 図(XYPLOT)出力例

中央たわみ量と座屈圧の関係を示したXYPLOTの例をFig. II.5に示す。

II. 5 ソースリスト

(1/6)

```

1      FORTRAN 77      V10L31      DATE 88.08.02 TIME 16.19.49      PAGE
0      * * * * *
      * * * * *          THZE  MODIFY          * * * * *      00010000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00011000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00012000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00020000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00030000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00040000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00050010
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00060000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00070000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00080000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00090000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00100000
000001 COMMON PI,CF,CD,CP,Q,H,T,D,E,SV,ETH,TH,AN,ALL,WV,ICON1,DP,      00110000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00120000
000002 DIMENSION PCR(5),WO(5),TH1(5),W1(5),WJJ(100),PY(100,5),AL(5),      00130000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00140000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00150000
000003 CHARACTER FIN*5,PLO*4,OUT*6,XYP*6,FRA*14,CU1*25,CU2*25,CU3*25,      00160000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00170000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00180000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00190000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00200000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00210000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00220000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00230000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00240000
000004 DATA FIN/'FINAS'/      00250000
000005 DATA PLO/'PLOT'/      00260000
000006 DATA OUT/'OUTPUT'/      00270000
000007 DATA XYP/'XYPLOT'/      00280000
000008 DATA FRA/'FRAME      A4V'/      00290000
000009 DATA CU1/'CURVE      1      0'/      00300000
000010 DATA CU2/'CURVE      2      0'/      00310000
000011 DATA CU3/'CURVE      3      0'/      00320000
000012 DATA CU4/'CURVE      4      0'/      00330000
000013 DATA CU5/'CURVE      5      0'/      00340000
000014 DATA CU6/'CURVE      6      0'/      00350000
000015 DATA CU7/'CURVE      7      0'/      00360000
000016 DATA CU8/'CURVE      8      0'/      00370000
000017 DATA CU9/'CURVE      9      0'/      00380000
000018 DATA CUA/'CURVE      10     0'/      00390000
000019 DATA CUB/'CURVE      11     0'/      00400000
000020 DATA CUC/'CURVE      12     0'/      00410000
000021 DATA XTI/'XTITLE      W ( MAX BENDING )'/      00420000
000022 DATA YTI/'YTITLE      P ( KG/CH**2 )'/      00430000
000023 DATA PTI/'PTITLE'/      00440000
000024 DATA XRA/'XRANGE      0.0      '/      00450000
000025 DATA YRA/'YRANGE      '/      00460000
000026 DATA PL3/'PLOT3      XVALU 100      YVALU 100      XVALU 1      00470000
      *YVALU 1'/      00480000
000027 DATA PL4/'      XVALU 2      YVALU 2      XVALU 3      00490000
      *YVALU 3'/      00500000
000028 DATA PL5/'      XVALU 4      YVALU 4      XVALU 5      00510000
      *YVALU 5'/      00520000
000029 DATA PL6/'      XVALU 11     YVALU 11     XVALU 12     00530000
      *YVALU 12'/      00540000
000030 DATA PL7/'      XVALU 13     YVALU 13     XVALU 14     00550000
      *YVALU 14'/      00560000
000031 DATA PL8/'      XVALU 15     YVALU 15     XVALU 16     00570000
      *YVALU 16'/      00580000
000032 DATA EQU/'END OUTPUT'/      00590000
000033 DATA EFI/'END FINAS'/      00600000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00610000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00620000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00630000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00640000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00650000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00660000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00670000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00680000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00690000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00700000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00710000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00720000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00730000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00740000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00750000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00760000
      * * * * *          * * * * *          * * * * *      00770000

```

```

* I E ; YOUNG'S MODULUS | 00780000
* I SY ; YIELDING STRESS | 00790000
* I ETH ; AXIAL DISPLACEMENT PER CONVOLUTION | 00800000
* I WZERO ; MAX DEFLECTION | 00810000
* I FIUE ; SPRING RATIO | 00820000
* I AL(1) ; ALPHA 1 | 00830000
* I AL(2) ; ALPHA 2 | 00840000
* I AL(3) ; ALPHA 3 | 00850000
* I AL(4) ; ALPHA 4 | 00860000
* I AL(5) ; ALPHA 5 | 00870000
* I XRAO ; YRANGE MAX | 00880000
* I ATI ; TITLE | 00890000
* +-----+
000034 READ (5,100) Q,H,T,D,AN,CF,CD,CP,E,SY,ETH,WZERO,FIUE, | 00910000
* AL(1),AL(2),AL(3),AL(4),AL(5),XRAO,ATI | 00920000
000035 WRITE (6,150) Q,H,T,D,AN,CF,CD,CP,E,SY,ETH,WZERO,FIUE, | 00921002
* AL(1),AL(2),AL(3),AL(4),AL(5),XRAO,ATI | 00922000
* +-----+ | 00930000
1 FORTRAN 77 V10L31 HAIN DATE 88.08.02 TIME 16.19.49 |
0 * I WRITE I FINAS,PLOT,OUTPUT,XYPLOT,FRAME | 00940000
* +-----+ | 00950000
000036 WRITE ( 10 , 950 ) FIN,PLD,OUT,XPY,FRA | 00960000
* | 00970000
* ++ BELLOWS PARAMETER ++ | 00980000
* | 00990000
* ++ DP , TP ++ | 01000000
* | 01010000
000037 DP = D+H | 01020000

000038 TP = T*(SQRT(D/DP)) | 01030000
* | 01040000
* **** ++ FIU ++ **** START ***** | 01050000
* | 01060000
000039 IF ( FIUE . EQ . 0.0 ) THEN | 01070000
000040 FIU = (5.0*E*DP*(TP**3.0))/(3.0*CF*(H**3.0)) | 01080000
000041 ELSE | 01090000
000042 FIU = FIUE | 01100000
000043 ENDIF | 01110000
* | 01120000
* **** ++ FIU OK ++ **** END ***** | 01130000
* | 01140000
* **** ++ DATA ++ **** | 01150000
* | 01160000
* ++ PI , MK ++ | 01170000
* | 01180000
000044 PI = 3.141592654 | 01190000
000045 MK = 100 | 01200000
* | 01210000
* **** ++ PCR ++ ***** START ***** | 01220000
* | 01230000
000046 PCR(1) = (2.0*PI*FIU)/((AN**2.0)*Q*(1.0+(2.0*H)/DP)) | 01240000
000047 PCR(2) = PCR(1) | 01250000
* | 01260000
* **** ++ PCR ++ ***** END ***** | 01270000
* | 01280000
* **** ++ ALPH MAX ++ ** START ***** | 01290000
* | 01300000
000048 AM = AL(1) | 01310000
* | 01320000
000049 DO 7 IJ = 1 , 5 | 01330000
* | 01340000
000050 IF ( AM . LE . AL(IJ) ) THEN | 01350000
000051 AM = AL(IJ) | 01360000
000052 ELSE | 01370000
000053 ENDIF | 01380000
* | 01390000
000054 7 CONTINUE | 01400000
* | 01410000
* **** ++ ALPH MAX ==> AM ! ++ ** END ***** | 01420000
* | 01430000
* **** ++ PY ++ ***** START ***** | 01440000
* | 01450000
* ++ AA , AB , AC , AD ++ | 01460000
* +-----+ | 01470000
* I ( - 18 ) , ( - 2 ) | 01480002
* +-----+ | 01490000
000055 AA = 12.0*SY*(AN**2.0)*Q*(H**2.0)*CD | 01500003
000056 AB = 5.0*E*TP*DP | 01510002
000057 AC = 3.0*(H**4.0)*CP*CD*FIU | 01520008
000058 AD = 5.0*PI*E*(TP**3.0)*(DP+2.0*H) | 01530006
* | 01540007

```

PAGE

```

000059          DO 5 I1 = 1 , 5          01550000
000060              TH1(I1) = 0.0        01560000
000061              W1(I1) = 0.0        01570000
000062          5          CONTINUE      01580000
*
000063          DO 10 I2 = 1 , 5         01590000
*
000064              ALL = AL(I2)         01600000
* +-----+
* | ( - 24 ) |                         01610000
* +-----+                             01620000
000065              XA = 3.0*(H**2.0)*AN*CD 01630000
000066              XB = 5.0*E*DP*TP    01640000
* +-----+                             01650000
* | P ==> 0.0 THZERO , WZERO |        01660000
* +-----+                             01670000
* ++ THZERO ==> VALU ++                01680000
*
000067              TH1(I2) = (XA*AL(I2)*SY)/XB 01690000
* +-----+                             01700000
* | ( - 23 ) , ( - 2 ) |              01710000
* +-----+                             01720000
* ++ WZERO ==> VALU ++                01730000
*
000068              W1(I2) = (Q*AN*TH1(I2))/4.0 01740000
*
* ++ P ==> 0.0 ++                      01750000
*
000069              PY(61,I2) = 0.0     01760000
000070              WJJ(60) = W1(I2)    01770000
* +-----+                             01780000
* | P ==> 0.0 THZERO , WZERO ==> VALU | 01790000
* +-----+                             01800000
* ++ W ==> VALU ++                    01810000
*
000071          X = 0.0                01820000
1          FORTRAN 77 V10L31 MAIN      DATE 88.08.02 TIME 16.19.49          01830000
000072          WW = 0.0                01840000
000073          WJ = 0.0                01850000
000074          WJJ(0) = 0.0           01860000
*
000075          WJ = W1(I2)/60.0        01870000
*
000076          DO 20 J = 1 , 60       01880000
*
000077          WW = WJJ(J-1)           01890000
000078          WJJ(J) = WJJ(J-1) + WJ 01900000
*
000079          IF ( WW . EQ . 0.0 ) THEN 01910000
* +-----+                             01920000
* | W ==> 0.0 PY(J,I2) |              01930000
* +-----+                             01940000
* | ( - 25 ) |                         01950000
* +-----+                             01960000
000080          PY(J,I2) = (ALL*SY*2.0*(TP**2.0))/(H**2.0)*CP 01970000
*
000081          ELSE                    01980000
*
* ++ CALL SUBROUTINE CASE1 ++         01990000
*
* ++ ( -18 , -2 ) ++                 02000000
*
000082          CALL CASE1(X)           02010000
*
000083          IF ( X . EQ . 0.0 ) THEN  02020000
000084              PY(J,I2) = PCR(1)    02030000
000085          ELSE                     02040000
000086              IF ( ICON1 . NE . 30000 ) THEN 02050000
*
* ++ ( -2 ) ++                       02060000
*
000087              PY(J,I2) = (DP*(X**2.0)*FIU) / 02070000
*
* ((DP+2.0*H)*2.0*PI*(AN**2.0)*Q) 02080000
000088          ELSE                    02090000
000089              PY(J,I2) = 0.0        02100000
000090              WJJ(J-1) = W1(I2)    02110000
000091          ENDIF                     02120000
000092          ENDIF                     02130000
000093          ENDIF                     02140000
*

```

PAGE



```

000094 20      CONTINUE                                02350000
*                                                    02360000
* ++ WDI ++                                          02370000
*                                                    02380000
000095      IF ( AL(I2) . EQ . AM ) THEN              02390000
*                                                    02400000
000096      WOI = WJJ(60)*1.5                          02410000
*                                                    02420000
000097      ELSE                                       02430000
000098      ENDIF                                       02440000
*                                                    02450000
* ++ XRA ++                                          02460000
*                                                    02470000
000099      IF ( XRA0 . EQ . 0.0 ) THEN                02480000
*                                                    02490000
000100      XRA1 = WOI                                    02500000
000101      ELSE                                       02510000
000102      ENDIF                                       02520000
*                                                    02530000
* ** ++ 10 FILE OUTPUT ++ **                          02540000
*                                                    02550000
* ++ WO , P ++                                        02560000
*                                                    02570000
000103      WRITE ( 10 , 1002 ) I2,(WJJ(J),J=0,60)    02580000
000104      WRITE ( 10 , 1102 ) I2,(PY(J,12),J=1,61)  02590000
*                                                    02600000
* ** ++ 10 FILE OUTPUT END ++ **                      02610000
*                                                    02620000
000105 10      CONTINUE                                02630000
*                                                    02640000
* **** ++ PY ++ ***** END *****                    02650000
*                                                    02660000
* **** ++ PCR ==> W VALU ++ ***** START *****    02670000
*                                                    02680000
000106      WO(1) = 0.0                                  02690000
000107      WO(2) = WOI                                  02700000
*                                                    02710000
* ** ++ 10 FILE OUTPUT ++ **                          02720000
*                                                    02730000
* ++ WO , PCR ++                                        02740000
*                                                    02750000
000108      WRITE ( 10 , 1001 ) MK,(WO(J),J=1,2)      02760000
000109      WRITE ( 10 , 1101 ) MK,(PCR(J),J=1,2)     02770000
*                                                    02780000
* ** ++ 10 FILE OUTPUT END ++ **                      02790000
*                                                    02800000
* **** ++ PCR ==> W VALU ++ ***** END *****    02810000
*                                                    02820000
* ++ THZERO ++                                         02830000
*                                                    02840000
* THZE = (2.0*AN*ETH)/DP 88/8/2                       02850000
000110      THZE = (AN*ETH)/DP                          02860000
*
1          FORTRAN ??  V10L31  MAIN      DATE 88.08.02  TIME 16.19.49
0000111  DD 70 LP = 1 , 6                                02870000
*                                                    02880000
000112      MP = LP+10                                  02890000
000113      WZER(LP) = (WZERO/6.0)*LP                  02900000
000114      WXZ = WZER(LP)                              02910000
*                                                    02920000
000115      THZR(LP) = (THZE/6.0)*LP                  02930000
000116      TZZ = THZR(LP)                             02940000
*                                                    02950000
000117      DD 90 K1 = 1 , 150                          02960000
*                                                    02970000
000118      WZP(K1,LP) = 0.0                            02980000
000119      WP(K1) = 0.0                                02990000
*                                                    03000000
000120 90      CONTINUE                                03010000
*                                                    03020000
000121      DD 95 K = 1 , 150                            03030000
*                                                    03040000
000122      PCR1 = PCR(1)/150.0                        03050000
* +-----+                                           03060000
* | P ==> VALU |                                         03070000
* +-----+                                           03080000
000123      WP(K+1) = WP(K) + PCR1                    03090000
* +-----+                                           03100000
* | R(K) ( - 2 ) |                                       03110000
* +-----+                                           03120000
000124      R(K) = SQRT((2.0*P1*(AN**2.0)*Q*(DP+2.0*H)*WP(K))  03130000
* / (FIU*DP))                                           03140000
*                                                    03150000

```

PAGE

```

000125          IF ( WP(K) . EQ . 0.0 ) THEN
* +-----+
* | WZP(K,LP) ( - 23 ) |
* +-----+
000126          WZP(K,LP) = (Q*AN*TZZ)/4.0
*
000127          ELSE
* +-----+
* | WZP(K,LP) ( - 16 ) |
* +-----+
000128          QQP = (Q*AN*TZZ*TAN(R(K)/4.0))/R(K)
*
000129          IF ( QQP . LE . WOI ) THEN
000130              WZP(K,LP) = QQP
000131          ELSE
000132              WZP(K,LP) = WOI
000133              WP(K) = WP(K-1)
000134          ENDIF
000135          ENDIF
*
000136          95 CONTINUE
*
* ** ++ 10 FILE OUTPUT **
*
000137          WRITE ( 10 , 1102 ) MP,(WP(K),K=1,150)
000138          WRITE ( 10 , 1002 ) MP,(WZP(K,LP),K=1,150)
*
000139          70 CONTINUE
*
* +-----+
* | WRITE | CURVE,XTITLE,YTITLE,PTITLE,YRANGE, |
* | | YRANGE,XRANGE,PLOT3,END OUTPUT, |
* | | END FINAS |
* +-----+
000140          WRITE ( 10 , 960 ) CU1,CU2,CU3,CU4,CU5,CU6,CU7,CU8,CU9,CUA,CUB,
*
* CUC,XTI,YTI,PTI,ATI,YRA,XRA,XRA1,PL3,PL4,PL5,
*
* PL6,PL7,PL8,EOU,EFI
*
* ++ FORMAT ++
*
000141          100 FORMAT ( 4F10.0/4F10.0/5F10.0/5F10.0/F10.0/10X,A60 )
000142          150 FORMAT (1H , 'INPUT DATA' /4F10.3/4F10.3/5F10.3/
*
* 5F10.3/F10.3/10X,A60 )
000143          950 FORMAT ( A5/A4/A6/A6/A14 )
000144          960 FORMAT ( A25/A25/A25/A25/A25/A25/A25/A25/A25/A25/A25/
*
* A27/A24/A6,4X,A60/A13/
*
* A20,F10.2/A72/A72/A72/A72/A72/A72/A10/A9 )
000145          1001 FORMAT ( 'XVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3) )
000146          1101 FORMAT ( 'YVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3) )
000147          1002 FORMAT ( 'XVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)) )
000148          1102 FORMAT ( 'YVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)) )
000149          STOP
000150          END

```

03160000  
03170000  
03180000  
03190000  
03200000  
03210000  
03220000  
03230000  
03240000  
03250000  
03260000  
03270000  
03280000  
03290000  
03300000  
03310000  
03320000  
03330000  
03340000  
03350000  
03360000  
03370000  
03380000  
03390000  
03400000  
03410000  
03420000  
03430000  
03440000  
03450000  
03460000  
03470000  
03480000  
03490000  
03500000  
03510000  
03520000  
03530000  
03540000  
03550000  
03560000  
03561003  
03562003  
03570000  
03580000  
03590000  
03600000  
03610000  
03620000  
03630000  
03640000  
03650000  
03660000

STATISTICS: 150 STEPS, PROCEDURE SIZE= 4774 BYTES, PROGRAM NAME=MAIN  
373 LINES, PROGRAM SIZE= 21402 BYTES, DIAGNOSTICS = 0  
REMAINING SIZE= 1726K BYTES,

HIGHEST SEVERITY CODE=00

1 FORTRAN 77 V10L31 DATE 88.08.02 TIME 16.19.49

PAGE

```

* *****
* *****
* * CASE1 *
* * ( - 2 ),( - 20 ) *
* *****
* *****
000151          SUBROUTINE CASE1(X)
000152          COMMON PI,CF,CD,CP,Q,H,T,D,E,SY,ETH,TH,AN,ALL,WW,ICON1,DP,
*
* XXJ,AA,AB,AC,AD,TP,FIU,WZZ,TZZ,THZE
000153          EXTERNAL FSIN
*
000154          AI = 1.57079
000155          BI = 6.28
000156          EPST = 1.0E-5
000157          CALL TSD1 (AI,BI,FSIN,EPST,X,ICON1)
*
* ++ LIST OUTPUT ++
*
* WRITE ( 6 , 100 ) X,ICON1
*100 FORMAT ( 1H ,9X,'X =',E15.7,5X,'ICON1=',15)
000158          RETURN
000159          END

```

03670000  
03680000  
03690000  
03700000  
03710000  
03720000  
03730000  
03740000  
03750000  
03760000  
03770000  
03780000  
03790000  
03800000  
03810000  
03820000  
03830000  
03840000  
03850009  
03860009  
03870000  
03880000

STATISTICS:	9 STEPS, PROCEDURE SIZE=	82 BYTES, PROGRAM NAME=CASE1	( 6 / 6 )
	22 LINES, PROGRAM SIZE=	422 BYTES, DIAGNOSTICS = 0	
	REMAINING SIZE=	1760K BYTES,	
1	FORTRAN 77	V10L31	HIGHEST SEVERITY CODE=00
0		DATE 88.08.02 TIME 16.19.49	PAGE
	*		03890000
	*	***** ++ FUNCTION ++ *****	03900000
	*		03910000
000160	FUNCTION FSIN(X)		03920000
000161	COMMON PI,CF,CD,CP,Q,H,T,D,E,SY,ETH,TH,AN,ALL,WV,ICON1,DP,		03930000
	* XXJ,AA,AB,AC,AD,TP,F1U,WZZ,TZZ,THZE		03940000
	*		03950000
000162	FSIN = ((AA*((2*(SIN(X/8.0))*COS(X/8.0)))**2.0)*ALL)/		03960005
	* (AB*(X**2.0))		03970005
	* -(AC*((2*(SIN(X/8.0))*COS(X/8.0)))**2.0)/AD)		03980005
	* -WV		03990000
000163	RETURN		04000000
000164	END		04010000

	10	20	30	40	50	60	70
A	g	H	t	d			
B	AN	C <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	C <sub>p</sub>			
C	E	S <sub>y</sub>	e <sub>θ</sub>	w <sub>0</sub>	f <sub>iu</sub>		
D	α(1)	α(2)	α(3)	α(4)	α(5)		
E	WMAX			TITLE			
F		TITLE					

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内容
A	1~10	実数	q	ベローズ形状パラメータ
	11~20	"	H	"
	21~30	"	t	"
	31~40	"	d	"
B	1~10	実数	AN	ベローズの山数
	11~20	"	C <sub>f</sub>	係数 (EJMA Fig. C19)
	21~30	"	C <sub>d</sub>	" ( " Fig. C20)
	31~40	"	C <sub>p</sub>	" ( " Fig. C18)
C	1~10	実数	E	ヤング率
	11~20	"	S <sub>y</sub>	降伏応力
	21~30	"	e <sub>θ</sub>	1山当りの軸方向相当変位
	31~40	"	w <sub>0</sub>	最大たわみ量
	41~50	"	f <sub>iu</sub>	ばね定数 (0.0を入れた場合EJMAによるばね定数が入力される)
D	1~10	実数	α(1)	係数
	11~20	"	α(2)	"
	21~30	"	α(3)	"
	31~40	"	α(4)	"
	41~50	"	α(5)	"
E	1~10	実数	WMAX	XRANGの値 (0.0を入力した場合, αの最大の値から)
F	11~70	文字	TITLE	タイトル

Fig.II.1 Input Data Contents

16.0	17.5	0.45	301.0		
20.0	1.510	1.710	0.667		
19900.0	20.0	0.3674	1.8455	120.0	
1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
	0.0				

FIG. N=20 CONV.,ETH=0.3674,WZERO=18455 FIU=120.0(KG/MH\*\*2)

Fig.II.2 Example of Input Data

```
      1           2           3           4           5           6           7           8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001 //Q3036TWO JOB (KICK),TAWAMI,MSGCLASS=X,NOTIFY=Q3036, 00010004
000002 //       MSGLEVEL=(2,0),SYSTEM=BEPI, 00020004
000003 //       ATTR=(TO,CA,W1) 00030004
000004 //JOBPROC DD DSN=Q3050.PROCLIB,DISP=SHR 00040004
000005 // EXEC FORT7CLG,PARM='LC(99)',GOREGN=1400K 00050004
000006 //FORT.SYSPRINT DD DUMMY 00060004
000007 //FORT.SYSIN DD DSN=Q3036.WFG.FORT(TAWAMI2),UNIT=SYSDA,DISP=SHR 00070004
000008 //LKED.SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR SOURCE 00080004
000009 //       DD DSN=SYS1.SSL2,DISP=SHR Program 00090004
000010 //LKED.SYSPRINT DD DUMMY 00100004
000011 //GO.FT05F001 DD DSN=Q3036.WFG.OUT(TW01),UNIT=DASD,DISP=SHR 00110004
000012 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=S Input Data 00120004
000013 //GO.FT10F001 DD DSN=Q3036.ATAWA01.TW01,UNIT=DASD, 00130004
000014 //       DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE), FINASPLOT 00140004
000015 //       DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520) Input Data 00150004
000016 //GO.FT21F001 DD DSN=&&POS,UNIT=WORK, 00160004
000017 //       SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),DISP=(NEW,PASS), 00170004
000018 //       DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200,BUFNO=1) 00180004
000019 // EXEC FINAS 00190004
000020 //ODIC DD DUMMY 00200004
000021 //SYSIN DD DSN=Q3036.ATAWA01.TW01,DISP=SHR 00210004
000022 //NLP EXEC FNSNLP FINASPLOT 00220004
000023 //GDFILE DD SYSOUT=S Input Data 00230004
000024 // * 00240004
000025 // 00250004
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+
```

Fig.II.3 JCL for TAWAMI

```

FINAS
PLOT
OUTPUT
XYPLOT
FRAME
A4V
XVALU 1 0.000E+00 6.044E-02 1.209E-01 1.813E-01 2.418E-01 3.022E-01
3.626E-01 4.231E-01 4.835E-01 5.440E-01 6.044E-01 6.648E-01
7.253E-01 7.857E-01 8.461E-01 9.066E-01 9.670E-01 1.027E+00
1.088E+00 1.148E+00 1.209E+00 1.269E+00 1.330E+00 1.390E+00
1.451E+00 1.511E+00 1.571E+00 1.632E+00 1.692E+00 1.753E+00
1.813E+00 1.874E+00 1.934E+00 1.994E+00 2.055E+00 2.115E+00
2.175E+00 2.236E+00 2.297E+00 2.357E+00 2.418E+00 2.478E+00
2.532E+00 2.599E+00 2.659E+00 2.720E+00 2.780E+00 3.626E+00
3.626E+00 3.626E+00 3.626E+00 3.626E+00 3.626E+00 3.626E+00
3.626E+00
YVALU 1 3.747E-02 3.664E-02 3.581E-02 3.500E-02 3.419E-02 3.340E-02
3.262E-02 3.184E-02 3.108E-02 3.032E-02 2.958E-02 2.884E-02
2.811E-02 2.739E-02 2.668E-02 2.597E-02 2.527E-02 2.458E-02
2.390E-02 2.322E-02 2.255E-02 2.189E-02 2.123E-02 2.058E-02
1.994E-02 1.930E-02 1.867E-02 1.804E-02 1.742E-02 1.681E-02
1.620E-02 1.559E-02 1.499E-02 1.440E-02 1.381E-02 1.323E-02
1.265E-02 1.208E-02 1.151E-02 1.094E-02 1.038E-02 9.825E-03
9.273E-03 8.726E-03 8.183E-03 7.643E-03 7.108E-03 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00
XVALU 2 0.000E+00 9.066E-02 1.813E-01 2.720E-01 3.626E-01 4.533E-01
5.440E-01 6.346E-01 7.253E-01 8.159E-01 9.066E-01 9.972E-01
1.088E+00 1.179E+00 1.269E+00 1.360E+00 1.451E+00 1.541E+00
1.632E+00 1.723E+00 1.813E+00 1.904E+00 1.994E+00 2.085E+00
2.176E+00 2.266E+00 2.357E+00 2.448E+00 2.538E+00 2.629E+00
2.720E+00 2.810E+00 2.901E+00 2.992E+00 3.082E+00 3.173E+00
3.264E+00 3.354E+00 3.445E+00 3.536E+00 3.626E+00 3.717E+00
-----
1.142E+01 1.168E+01 1.195E+01 1.224E+01 1.255E+01 1.286E+01
1.320E+01 1.356E+01 1.394E+01 1.434E+01 1.476E+01 1.521E+01
1.570E+01 1.621E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01
1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01
1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01
1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01 1.632E+01
CURVE 1 0
CURVE 2 0
CURVE 3 0
CURVE 4 0
CURVE 5 0
CURVE 6 0
CURVE 7 0
CURVE 8 0
CURVE 9 0
CURVE 10 0
CURVE 11 0
CURVE 12 0
XTITLE W ( MAX BENDING )
YTITLE P ( KG/CM**2 )
PTITLE FIG. N=20 CONV.,ETH=0.3674,WZERO=3.691,FIU=120.0(KG/MM**2)
YRANGE
XRANGE 0.0 16.32
PLOT3 XVALU 100 YVALU 100 XVALU 1 YVALU 1
XVALU 2 YVALU 2 XVALU 3 YVALU 3
XVALU 4 YVALU 4 XVALU 5 YVALU 5
XVALU 11 YVALU 11 XVALU 12 YVALU 12
XVALU 13 YVALU 13 XVALU 14 YVALU 14
XVALU 15 YVALU 15 XVALU 16 YVALU 16
END OUTPUT
END FINAS

```

Fig.II. 4 Example of Data for XY Plot

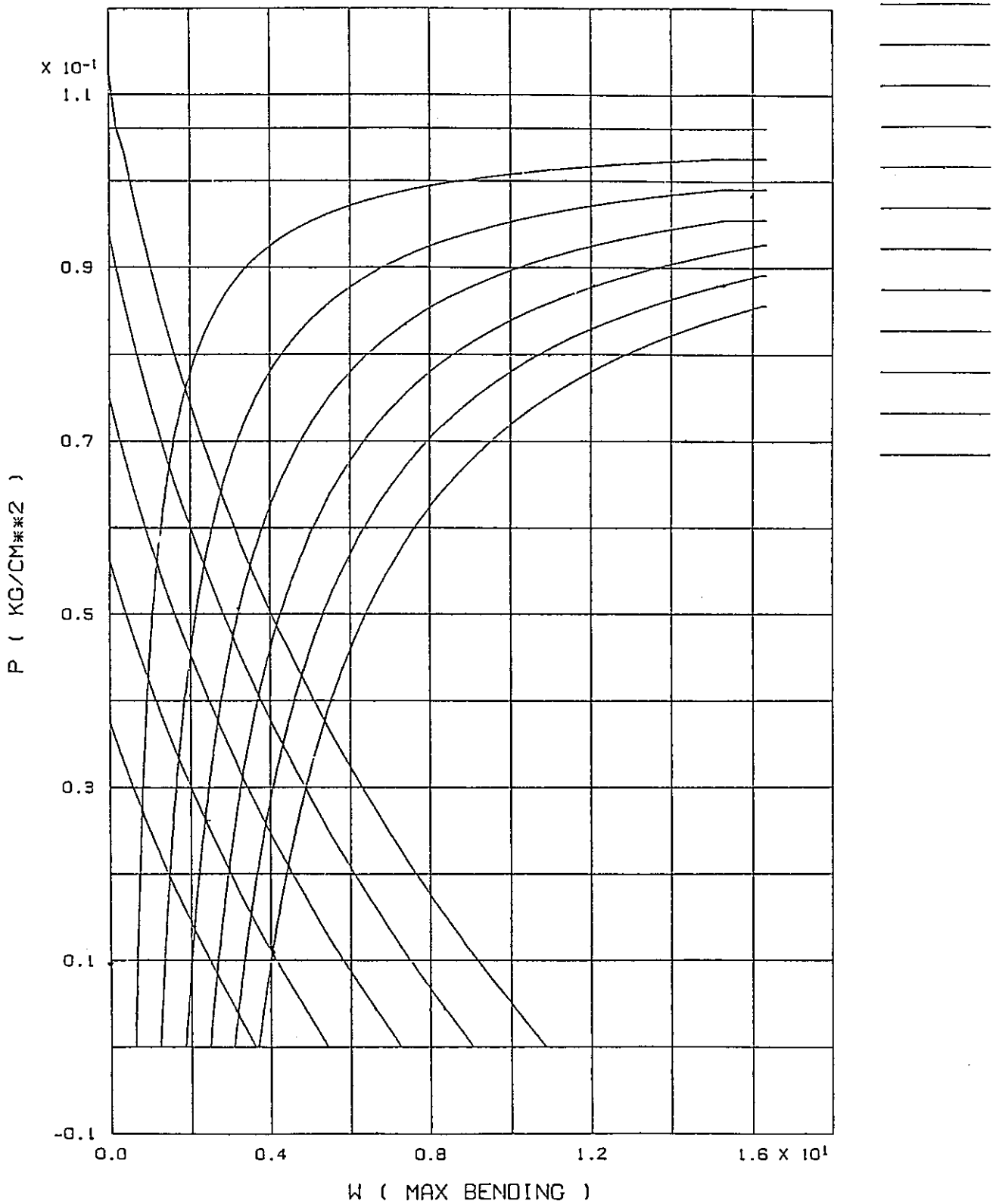


FIG. N=20 CONV. .ETH=0.3674.WZERO=3.691.FIU=120.0(KG/MM\*\*2)

Fig.II.5 Example of XY Plot

参 考 文 献

- 1) Flügge, W., Stress in Shells, 2nd ed. Spring-Verlag (1973).
- 2) Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, Inc., 5th ed., 1980.
- 3) 月森他, ベローズの解析のための簡易計算手法 (p88~124), 1986. 12, (PNC SN9410 86-128).
- 4) Tsukimori, K. et al., A Simplified Analysis Method for Buckling of Bellows under Internal Pressure and Its Validation Tests, Pressure Vessel Technology Vol.1, Pergamon Press, 1988, pp663-670.



### 3. 内圧によるペローズのクリープ座屈

Norton 則を用いて曲がり梁のクリープ変形挙動からコンボリューションの部分形状について荷重と変位速度の関係を導く。これをペローズ形状に組立てて曲げを受けるペローズのクリープ挙動を表わし、更にペローズ内圧座屈の基礎式に結びつけて、クリープ座屈評価式の導出を試みる。

最後に、計算プログラムの説明と例題解析を示す。

List of Figures

Fig. 1-1 Curved Beam Model ..... 85  
 Fig. 1-2 Arc Part of the Model ..... 85  
 Fig. 1-3 Straight Part of the Model ..... 85  
 Fig. 2-1 Bellows Model Subjected to Bending Moment .... 86  
 Fig. 2-2 Deflection and Moment Distribution of Bellows.. 87  
 Fig. 2-3 Changing Point of Curvature ..... 87  
 Fig. 2-4 Definition of  $X_0$  and  $X_0'$  ..... 87



Fig. I.1 Input Data Contents ..... 100  
 Fig. I.2 Example of Input Data ..... 101  
 Fig. I.3 JCL ..... 101  
 Fig. I.4 Data Form for XY PLOT ..... 102  
 Fig. I.5 Data Form for Additional Program ..... 103  
 Fig. I.6 Data Form for List Output ..... 104  
 Fig. I.7 Example of Output Data (XY Values) ..... 106  
 Fig. I.8 Example of Output Data (for Additional  
 Program) ..... 107  
 Fig. I.9 Example of Output Data (List) ..... 108  
 Fig. I.10 JCL for XY PLOT ..... 110  
 Fig. I.11 Example of XY PLOT Data for Output ( $p-T_{CR}$ ) ... 111  
 Fig. I.12 Example of XY PLOT Data for Output ( $t-w_{max}$ ) .. 112  
 Fig. I.13 Example of XY PLOT ( $p-T_{CR}$ ) ..... 113  
 Fig. I.14 Example of XY PLOT ( $t-w_{max}$ ) ..... 114



Fig. II.1 Input Data Form (1) ..... 119  
 Fig. II.2 Input Data Form (2) ..... 119  
 Fig. II.3 Example of Input Data (1) ..... 120  
 Fig. II.4 Example of Input Data (2) ..... 120  
 Fig. II.5 JCL ..... 120  
 Fig. II.6 Output Data Form ..... 121  
 Fig. II.7 Data Form of List Output ..... 122  
 Fig. II.8 Example of Output Data ..... 123



Fig. III.1	Analysis Result ( $p-T_{cr}$ )	126
Fig. III.2	Analysis Result ( $t-w_{max}$ )	127
Fig. III.3	Creep Strain of SUS316	128
Fig. III.4	$\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}_c$	129
Fig. III.5	$n - \ln k$	130

3.1  $\frac{1}{4}$ コンボリユーション短冊要素についての変位速度と荷重の関係式

Fig. 1-1に示すベローズコンボリユーションの $\frac{1}{4}$ の形状を有する単位幅の短冊要素について、荷重Pと変位速度 $\dot{\delta}$ の関数を考える。図中でHは山高、qはピッチ、rはコンボリユーション山、谷のアーチ( $r = \frac{q}{4}$ )である。

(1) 円弧部分

円弧部の任意の角度位置 $\varphi$ での曲げモーメントは、次の式(1-1)で表わされる。

$$\begin{aligned}
 M &= P \left\{ \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right) + r \cos \varphi \right\} \\
 &= P \left\{ \frac{H}{2} - \frac{q}{4} (1 - \cos \varphi) \right\} \dots\dots\dots (1-1)
 \end{aligned}$$

一方、円弧端(1)の荷重方向変位u及び $\Delta\varphi$ は次成で表わされる<sup>1)</sup>。

$$u = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (r - z) \omega d\varphi \dots\dots\dots (1-2a)$$

$$\Delta\varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d(\Delta\varphi) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \omega d\varphi \dots\dots\dots (1-2b)$$

ここで、次式を考慮する。

$$\omega = \frac{d(\Delta\varphi)}{d\varphi} = \frac{\kappa}{\kappa_0} - 1 \dots\dots\dots (1-3)$$

$$z = r(1 - \cos \varphi) \dots\dots\dots (1-4)$$

また、  $r = \frac{1}{\kappa_0} = \frac{q}{4} \dots\dots\dots (1-5)$

上式で、 $\kappa$  : 曲率

式(1-2)に式(1-3)~(1-5)を適用し、時間で微分すると、

$$\dot{u} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} r \cos \varphi \cdot \frac{\dot{\kappa}}{\kappa_0} d\varphi = \left(\frac{q}{4}\right)^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \dot{\kappa} \cos \varphi d\varphi \dots\dots\dots (1-6a)$$

$$\Delta \dot{\varphi} = \frac{q}{4} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \dot{\kappa} d\varphi \dots\dots\dots (1-6b)$$

ところで, Norton則は,

$$\dot{\varepsilon} = k \sigma^n \dots\dots\dots (1-7)$$

ここで,  $\dot{\varepsilon}$  : ひずみ速度

$\sigma$  : 応力

$k, n$  : 定数

式(1-7)に基づき, 曲がり梁の変形速度と外荷重の関係は, 膜力を無視した場合, 次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned} \dot{\kappa} &= \frac{k}{[I_n(\kappa_0)]^n} |M|^n \operatorname{sgn} M \\ &= \frac{k}{[I_n(\kappa_0)]^n} |P|^n \left\{ \frac{H}{2} - \frac{q}{4} (1 - \cos \varphi) \right\}^n \operatorname{sgn} P \dots\dots\dots (1-8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } [I_n(\kappa_0)] &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left| \frac{\eta}{1 + \kappa_0 \eta} \right|^{\frac{1}{n}} \eta \operatorname{sgn} \eta d\eta \\ &= \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{h}{2}} \left| \frac{\eta}{1 + \frac{q}{4} \eta} \right|^{\frac{1}{n}} |\eta| d\eta \dots\dots\dots (1-9) \end{aligned}$$

$\eta$  : 板厚方向座標

$h$  : 板厚

なお, 式(1-8)において, 式(1-1)を用いている。

式(1-8)の関係を式(1-6)の両式に用いると,

$$\dot{u} = \left(\frac{q}{4}\right)^2 \frac{k |P|^n}{[I_n(\kappa_0)]^n} J_{n,1} \cdot \operatorname{sgn} P \dots\dots\dots (1-10a)$$

$$\Delta \dot{\varphi} = \frac{q}{4} \frac{k |P|^n}{[I_n(\kappa_0)]^n} J_{n,0} \cdot \operatorname{sgn} P \dots\dots\dots (1-10b)$$

ここで,

$$J_{n,m} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{H}{2} - \frac{q}{4} (1 - \cos \varphi) \right\}^n \cos^m \varphi \, d\varphi \quad \dots\dots\dots (1-11)$$

(m=0, 1)

(2) 直線部分

直線部の任意の位置 x での曲げモーメントは, 次式(1-12)で表わされる。

$$M = -P \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} - x \right) \quad \dots\dots\dots (1-12)$$

真直梁については, 軸力を無視した場合, 式(1-7)に基づく変形速度と外荷重の関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{v}}{dx^2} &= -\frac{k}{[I_n(0)]^n} |M|^n \operatorname{sgn} M \\ &= \frac{k |P|^n}{[I_n(0)]^n} \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} - x \right)^n \operatorname{sgn} P \quad \dots\dots\dots (1-13) \end{aligned}$$

ここで, v は, 直線部端部(2)の荷重方向変位, [I<sub>n</sub>(0)]は, 式(1-9)で, x<sub>0</sub>=0とおいたもので,

$$[I_n(0)] = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} |\eta|^{\frac{n+1}{n}} \, d\eta \quad \dots\dots\dots (1-14)$$

式(1-13)を次の境界条件の下に積分する。

$$\left. \frac{d \dot{v}}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \dot{v} \right|_{x=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (1-15)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}(x) &= \frac{k |P|^n}{(n+1)(n+2)[I_n(0)]^n} \left\{ \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} - x \right)^{n+2} + (n+2) \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right)^{n+1} x \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right)^{n+2} \right\} \operatorname{sgn} P \quad \dots\dots\dots (1-16) \end{aligned}$$

端部(2)の変位速度  $\dot{v}$  は,

$$\dot{v} = \dot{v} \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right) = \frac{k |P|^n}{(n+2)[I_n(0)]^n} \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right)^{n+2} \operatorname{sgn} P \quad \dots\dots\dots (1-17)$$

(3)  $\frac{1}{4}$  コンボリユーション部分

$\frac{1}{4}$  コンボリユーション部分の変位速度  $\dot{\delta}$  は、式(1-10)及び式(1-17)から、

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \dot{u} + \left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4}\right) \Delta \dot{\varphi} + \dot{v} \\ &= \mathcal{F}(q, H, h, n) k |P|^n \operatorname{sgn} P \dots\dots\dots (1-18) \end{aligned}$$

ここで、 $\mathcal{F}$  はベローズ形状(ピッチ  $q$ 、山高  $H$ 、板厚  $h$ )及びNorton則の指数  $n$  により定まる係数であり、

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(q, H, h, n) &= \left(\frac{q}{4}\right)^2 \frac{J_{n,1}}{[I_n(\kappa_0)]^n} + \frac{q}{4} \left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4}\right) \frac{J_{n,0}}{[I_n(\kappa_0)]^n} + \frac{\left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4}\right)^{n+2}}{(n+2)[I_n(0)]^n} \\ &\dots\dots\dots (1-19) \end{aligned}$$

以上の式の導出にあたっては、コンボリユーションの展開長さに比して、板厚は比較的薄いとして、曲げのみを扱っている。

### 3.2 クリープ座屈評価式の導出

(注) 記号は、一部改めて定義する。

(1) ベローズ断面の曲げモーメント

Fig. 2-1 は、曲げモーメントを受けて変形するベローズの  $\frac{1}{4}$  山の縦、横断面を示している。

$$r = \frac{d_p}{2} \dots\dots\dots (2-1)$$

また、幾可学的関係から、

$$R\theta = (R+dR)(\theta+d\theta) = \frac{q}{4} \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\dot{\delta} = r \sin \varphi \cdot \dot{\theta} \dots\dots\dots (2-3)$$

- ここで、
- $d_p$ : ベローズピッチ径
  - $q$ : ベローズピッチ
  - $R$ : 曲率半径
  - $\theta$ : ベローズたわみ角
  - $\delta$ : ピッチ径上任意の位置での軸方向変位

P : ピッチ径上任意の位置での単位幅当りの軸方向荷重

M : 曲げモーメント

式(2-2)から, 曲率変化率  $\dot{\kappa}$  は,

$$\dot{\kappa} = \frac{4}{q} \dot{\theta} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

従って, 式(2-3)は,

$$\dot{\delta} = \frac{d_p q}{8} \dot{\kappa} \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

一方, 曲げモーメントMは,

$$M = \int_0^{2\pi} P r \sin \varphi \cdot (r d\varphi) = \frac{d_p^2}{4} \int_0^{2\pi} P \sin \varphi d\varphi \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

本来, 内圧を保持するベローズには周方向膜応力が発生するため, 多軸応力場のクリープとなるが, ここでは簡単のため, 周方向膜応力の子午線方向応力への影響を無視して, 式(1-18)を式(2-6)に用いる。

$$M = \frac{d_p^2}{4} (\mathcal{F} \cdot k)^{-\frac{1}{n}} \int_0^{2\pi} |\dot{\delta}|^{\frac{1}{n}} \operatorname{sgn} \dot{\delta} \sin \varphi d\varphi \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

更に, 式(2-5)を用いると,

$$\begin{aligned} M &= \frac{d_p^2}{4} \left( \frac{d_p q}{8 \mathcal{F} k} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^{2\pi} |\dot{\kappa} \sin \varphi|^{\frac{1}{n}} \sin \varphi \operatorname{sgn} (\dot{\kappa} \sin \varphi) d\varphi \\ &= \frac{d_p^2}{2} \left( \frac{d_p q}{8 \mathcal{F} k} \right)^{\frac{1}{n}} |\dot{\kappa}|^{\frac{1}{n}} \operatorname{sgn} \dot{\kappa} \int_0^{\pi} (\sin \varphi)^{\frac{n+1}{n}} d\varphi \quad \dots\dots\dots (2-8) \end{aligned}$$

ここで, ベローズの軸方向座標をx, 横たわみをwとすると,

$$\dot{\kappa} = - \frac{d^2 w}{d x^2} \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

式(2-9)を式(2-8)に用いると,

$$M = - a \left| \frac{d^2 w}{d x^2} \right|^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \frac{d^2 w}{d x^2} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

ここで,

$$a = \frac{d_p^2}{2} \left( \frac{d_p q}{8 \mathcal{F} k} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^{\pi} (\sin \varphi)^{\frac{n+1}{n}} d\varphi \quad \dots\dots\dots (2-11)$$



(2) ベローズのたわみと内圧によって発生する曲げモーメント

ベローズでは、横たわみと圧力が重畳することによって、横方向荷重が発生する。横たわみによって曲率を有するベローズの内圧による横方向分布荷重は、第2章(3-1)に示される様に次式で与えられる。

$$\tilde{q} = -\frac{\pi}{4} d_p^2 \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \cdot \frac{d^2 w}{d x^2} + q_0 \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

ここで、 $\tilde{q}$  : 横方向分布荷重

$p$  : 内圧

$H$  : ベローズ山高

$q_0$  : 自重等による等分布荷重

一方、梁理論から、

$$\frac{d^2 M}{d x^2} = -\tilde{q} \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

式(2-12)及び式(2-13)から、

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - q_0 \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

なお、上式において、曲げモーメント $M$ 及びたわみ $w$ が、座標 $x$ と時間 $t$ の関数であることを考慮して偏微分表示としている。式(2-14)を $x$ について1階積分すると、

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) p \frac{\partial w}{\partial x} - q_0 x + c(t) \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

ここで、変形形状は中央面( $x = \frac{L}{2}$ )で対称であり、曲げモーメント $M$ は、この点で時間 $t$ に無関係に極値をとると仮定すると、

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0 \quad \text{かつ} \quad \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

従って、

$$c(t) = \frac{L}{2} q_0 \quad \dots\dots\dots (2-17)$$

式(2-15)は、

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + q_0 \left( \frac{L}{2} - x \right) \dots\dots\dots (2-18)$$

式(2-18)を更にxで積分すると,

$$M = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \cdot w - \frac{q_0}{2} \left( \frac{L}{2} - x \right)^2 + c(t) \dots\dots\dots (2-19)$$

ここで,  $x = x_m$  (変曲点)において, 曲げモーメントMは時間tに無関係に零となると仮定すると,

$$M \Big|_{x=x_m} = 0 \dots\dots\dots (2-20)$$

式(2-19)は,

$$\frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \cdot w_m - \frac{q_0}{2} \left( \frac{L}{2} - x_m \right)^2 + c(t) = 0 \dots\dots\dots (2-21)$$

但し,

$$w_m = w(x_m, t) \dots\dots\dots (2-22)$$

従って, 式(2-19)は,

$$\begin{aligned} M &= \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p (w(x, t) - w_m(t)) - \frac{q_0}{2} \left\{ \left( \frac{L}{2} - x \right)^2 - \left( \frac{L}{2} - x_m \right)^2 \right\} \\ &= \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \tilde{w} - \frac{q_0}{2} (L - x_m - x)(x_m - x) \dots\dots\dots (2-23) \end{aligned}$$

ここで,

$$\tilde{w} = w - w_m \dots\dots\dots (2-24)$$

なお,

$$\frac{\partial \tilde{w}}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} \dots\dots\dots (2-25a)$$

$$\frac{\partial \tilde{w}}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial w_m}{\partial t} \dots\dots\dots (2-25b)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \dots\dots\dots (2-25c)$$

$$\frac{\partial^3 \tilde{w}}{\partial t \partial x^2} = \frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} \dots\dots\dots (2-25d)$$

(3) ベローズの内圧によるクリープ座屈時間

式(2-10)と式(2-23)を等置することにより、基礎偏微分方程式が得られる。

$$-a \left| \frac{\partial^3 \tilde{w}}{\partial t \partial x^2} \right|^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial^3 \tilde{w}}{\partial t \partial x^2} \right) = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \tilde{w} - \frac{q_0}{2} (L - x_m - x)(x_m - x) \dots\dots\dots (2-26)$$

式(2-26)を解くことは、難しいので、等分布荷重  $q_0$  が零の場合を考える。

$$-a \left| \frac{\partial^3 \tilde{w}}{\partial t \partial x^2} \right|^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial^3 \tilde{w}}{\partial t \partial x^2} \right) = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \tilde{w} \dots (2-26)'$$

式(2-26)'を解くために、変数分離法を適用する<sup>3)</sup>。

$$\tilde{w}(x, t) = X(x) \cdot T(t) \dots\dots\dots (2-27)$$

式(2-27)を式(2-26)に用いると、

$$-a \left| \frac{d^2 X}{d x^2} \cdot \frac{d T}{d t} \right|^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \left( \frac{d^2 X}{d x^2} \cdot \frac{d T}{d t} \right) = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \cdot X \cdot T \dots\dots\dots (2-28)$$

ここで、 $T$ は時間による変形の進行の程度を表わすファクターであり、振動することなく一方向に進行するものとする、次の様に置いて差支えない。

$$T > 0, \quad \frac{d T}{d t} \geq 0 \dots\dots\dots (2-29)$$

式(2-28)は、式(2-29)から、

$$-a \left| \frac{d^2 X}{d x^2} \right|^{\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{d T}{d t} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \cdot \frac{d^2 X}{d x^2} = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left( 1 + \frac{2H}{d_p} \right) p \cdot X \cdot T \dots\dots\dots (2-30)$$

変数を分離すると、

$$\frac{\frac{\pi}{4} d_p^2 \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right)}{\alpha} p \cdot \frac{T}{\left(\frac{dT}{dt}\right)^{\frac{1}{n}}} = - \frac{\left|\frac{d^2X}{dx^2}\right|^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \frac{d^2X}{dx^2}}{X} = \alpha^{\frac{1}{n}} (>0) \quad \dots\dots\dots (2-31)$$

更に,

$$\left|\frac{d^2X}{dx^2}\right|^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{sgn} \frac{d^2X}{dx^2} + \alpha^{\frac{1}{n}} X = 0 \quad \dots\dots\dots (2-32)$$

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{\frac{\pi}{4} d_p^2 \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right)}{\alpha^{\frac{1}{n}}} p \cdot T \quad \dots\dots\dots (2-33)$$

式(2-32)について,

$$\left(\frac{d^2X}{dx^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \alpha^{\frac{1}{n}} X = 0 \quad \left(\frac{d^2X}{dx^2} \geq 0\right) \quad \dots\dots\dots (2-34a)$$

$$\left(-\frac{d^2X}{dx^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \alpha^{\frac{1}{n}} (-X) = 0 \quad \left(\frac{d^2X}{dx^2} < 0\right) \quad \dots\dots\dots (2-34b)$$

式(2-34)両式から, 符号は異なるが全く同形の微分方程式であることが確認できる。

式(2-33)及び式(2-34b)を次の形に変形して出発する。

$$\frac{d^2X}{dx^2} = -\alpha X^n \quad \dots\dots\dots (2-35)$$

$$\frac{dT}{dt} = \beta T^n \quad \dots\dots\dots (2-36)$$

但し,

$$\beta = \frac{p^n}{\alpha^{\frac{1}{n}}} \left\{ \frac{\pi}{4} d_p^2 \left(1 + \frac{2H}{d_p}\right) \right\}^n \quad \dots\dots\dots (2-37)$$

式(2-35)の両辺に  $2 \frac{dX}{dx}$  を乗ざると,

$$2 \frac{dX}{dx} \frac{d^2X}{dx^2} = -2 \alpha X^n \frac{dX}{dx} \quad \dots\dots\dots (2-38)$$

上式は容易に積分できて,

$$\left(\frac{dX}{dx}\right)^2 = -\frac{2\alpha}{n+1} (X^{n+1} - C) \quad \dots\dots\dots (2-39)$$

中央において、たわみ角が零となる。

中央のたわみを $X_0$ とすると、式(2-39)は、

$$\frac{dX}{dx} = \sqrt{\frac{2\alpha}{n+1}} \sqrt{X_0^{n+1} - X^{n+1}} \quad (x_m \leq x \leq \frac{L}{2})$$

..... (2-40)

式(2-40)は、 $n=1$ のとき、容易に解ける。

$$\sin^{-1} \frac{X}{X_0} = \sqrt{\alpha} \left( x - \frac{L}{2} + \frac{\pi}{2\sqrt{\alpha}} \right) \quad (x_m \leq x \leq \frac{L}{2}) \quad \dots\dots (2-41a)$$

又、式(2-34b)について同様の展開を行うことによって、

$$\sin^{-1} \frac{X}{X_0'} = \sqrt{\alpha} \left( x - \frac{\pi}{2\sqrt{\alpha}} \right) \quad (0 \leq x \leq x_m) \quad \dots\dots (2-41b)$$

式(2-24)より、

$$X=0 \quad (x=x_m) \quad \dots\dots (2-42)$$

式(2-41)の両式に式(2-42)を適用すると、

$$\alpha = \frac{4\pi^2}{L^2} \quad (n=1) \quad \dots\dots (2-43)$$

$n > 1$ の場合、式(2-40)をそのまま解くのは難しいので断念する。次の関数の置きかえをする。

$$X = X_0 y, \quad 0 \leq y \leq 1 \quad (x_m \leq x \leq \frac{L}{2}) \quad \dots\dots (2-44)$$

式(2-44)を用いると、式(2-40)は、

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\frac{2\alpha}{n+1}} X_0^{\frac{n-1}{2}} \sqrt{1 - y^{n+1}} \quad (0 \leq y \leq 1) \quad \dots\dots (2-45)$$

更に、

$$\frac{dy}{\sqrt{1 - y^{n+1}}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{n+1}} \cdot X_0^{n-1} dx \quad \dots\dots (2-46)$$

左辺の  $y$  の関数を原点の回りに級数展開する<sup>4)</sup>。

$$f(z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{f^{(m)}(0)}{m!} z^m \dots\dots\dots (2-47)$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} (1-z)^{-\frac{1}{2}} &= 1 + \frac{1}{2}z + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} z^2 + \dots\dots\dots \\ &= 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m \cdot m!} z^m \dots\dots\dots (2-48) \end{aligned}$$

よって、

$$\sqrt{\frac{1}{1-y^{n+1}}} = 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m \cdot m!} y^{m(n+1)} \dots\dots\dots (2-49)$$

式(2-49)を使って、式(2-46)の積分を実施すると、

$$\left\{ 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m (mn+m+1) \cdot m!} y^{m(n+1)} \right\} y = \sqrt{\frac{2\alpha}{n+1}} X_0^{n-1} (x+c) \dots\dots\dots (2-50)$$

式(2-44)を式(2-50)にもどすと、

$$\begin{aligned} X_0^{-\frac{n+1}{2}} X + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m (mn+m+1) \cdot m!} X_0^{-(n+1)(m+\frac{1}{2})} \cdot X^{mn+m+1} \\ = \sqrt{\frac{2\alpha}{n+1}} (x+c) \quad \left( x_m \leq x \leq \frac{L}{2} \right) \dots\dots\dots (2-51) \end{aligned}$$

境界条件として、

$$X = X_0 \quad ; \quad x = \frac{L}{2} \dots\dots\dots (2-52)$$

を考慮すると、

$$c = \sqrt{\frac{n+1}{2\alpha}} X_0^{-\frac{n-1}{2}} \left( 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m (mn+m+1) \cdot m!} \right) - \frac{L}{2} \dots\dots\dots (2-53)$$

また、式(2-42)より、

$$x_m = \frac{L}{2} - \sqrt{\frac{n+1}{2\alpha}} X_o'^{-\frac{n-1}{2}} \left( 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m(mn+m+1) \cdot m!} \right) \dots (1-54)$$

式(2-34b)についても同様な展開ができ、

$$\begin{aligned} X_o'^{-\frac{n+1}{2}} (-X) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m(mn+m+1) \cdot m!} X_o'^{-(mn+m+\frac{n}{2}+\frac{1}{2})} \cdot (-X)^{mn+m+1} \\ = -\sqrt{\frac{2\alpha}{n+1}} (x+c) \quad (0 \leq x \leq x_m) \dots (2-55) \end{aligned}$$

境界条件として、

$$X = -X_o' \quad : \quad x = 0 \dots (2-56)$$

を考慮すると、

$$c = -\sqrt{\frac{n+1}{2\alpha}} X_o'^{-\frac{n-1}{2}} \left( 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m(mn+m+1) \cdot m!} \right) \dots (2-57)$$

また、式(2-42)より、

$$x_m = \sqrt{\frac{n+1}{2\alpha}} X_o'^{-\frac{n-1}{2}} \left( 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m(mn+m+1) \cdot m!} \right) \dots (2-58)$$

式(2-54)と式(2-58)から、

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} = \sqrt{\frac{n+1}{2\alpha}} \left( 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m(mn+m+1) \cdot m!} \right) \left\{ r^{\frac{n-1}{2}} + (1-r)^{\frac{n-1}{2}} \right\} X_r^{-\frac{n-1}{2}} \\ \dots (2-59) \end{aligned}$$

ここで、

$$X_r = X_o + X_o' \quad (\text{全たわみ}) \dots (2-60a)$$

$$r = \frac{X_o}{X_r} \quad (0 \leq r \leq 1) \dots (2-60b)$$

両端固定はりの類推から、変曲点の位置を $\frac{L}{4}$ とするのは左程不自然なこととは思われないが、 $r = \frac{1}{2}$ のとき式(2-59)右辺中括弧{ }内は極大となる。その結果、 $\alpha$ も極大となり、後にわかる様に、座屈時間は $r = \frac{1}{2}$ の場合より長くなる。従って、式(2-59)の $r$ はパラメータとして残しておく。式(2-59)から、

$$\alpha = \frac{2(n+1)}{L^2 X_r^{n-1}} \cdot \Sigma(n)^2 \cdot \Gamma(r, n)^2 \dots\dots\dots (2-61)$$

ここで、

$$\Sigma(n) = 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{2^m (mn+m+1) \cdot m!} \dots\dots\dots (2-62)$$

$$\Gamma(r, n) = r^{-\frac{n-1}{2}} + (1-r)^{-\frac{n-1}{2}} \quad (0 \leq r \leq 1) \dots\dots\dots (2-63)$$

なお、 $r = \frac{1}{2}$ のとき、式(2-61)は、

$$\alpha = \frac{2^{n+2}(n+1)}{L^2 X_r^{n-1}} \Sigma(n)^2 \quad (r = \frac{1}{2} \text{ i.e. } x_m = \frac{L}{4}, X_r = 2X_0) \dots\dots\dots (2-64)$$

次に式(2-36)を解く。式(2-36)は容易に積分できて、

$$\log T = \beta t + c \quad (n=1) \dots\dots\dots (2-65)$$

$$-\frac{1}{n-1} T^{-(n-1)} = \beta t + c \quad (n>1) \dots\dots\dots (2-66)$$

初期条件、

$$T = 1 \quad : \quad t = 0 \dots\dots\dots (2-67)$$

を考慮すると、式(2-65)及び式(2-66)は、

$$T = e^{\beta t} \quad (n=1) \dots\dots\dots (2-68)$$

$$T = \{ 1 - (n-1)\beta t \}^{-\frac{1}{n-1}} \quad (n>1) \dots\dots\dots (2-69)$$

式(2-68)からわかるように、 $n=1$ の場合、座屈時間 $t_{cr}$ は存在しない。

$$T \rightarrow \infty \quad : \quad t \rightarrow \infty \quad (n=1) \dots\dots\dots (2-70)$$

$$T \rightarrow \infty \quad : \quad t_{cr} = \frac{1}{(n-1)\beta} \quad (n>1) \dots\dots\dots (2-71)$$



座屈時間  $t_{er}$  計算の手順を次頁に図式化する。  $t_{er}$  は、ベローズ形状・寸法 ( $d_p, H, q, h, N$  (山数)), Norton則パラメータ ( $k, n$ ), 初期たわみを規定するパラメータ ( $X_r, r$ ) 及び内圧の関数として与えられる。

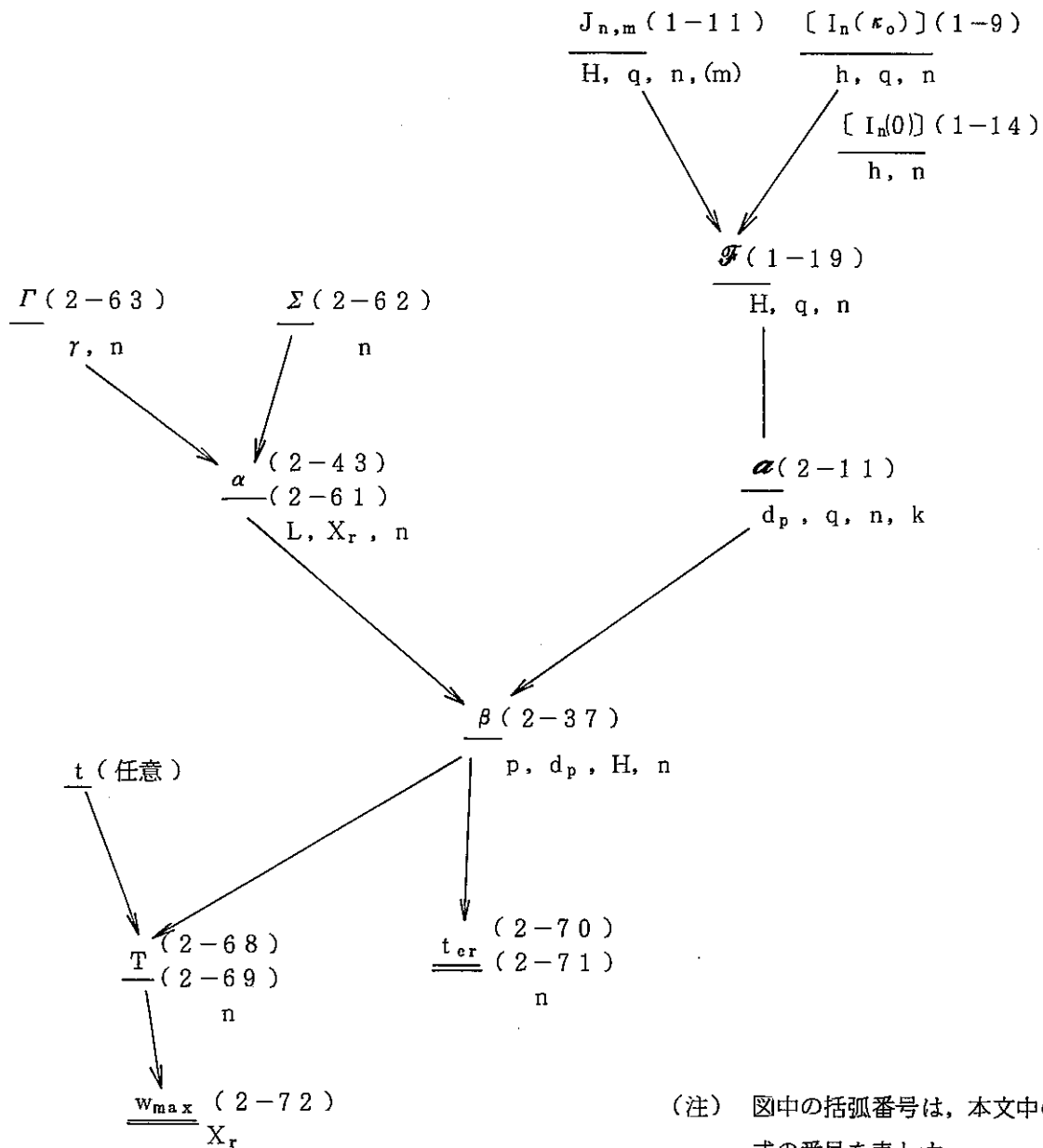
なお、任意の時刻  $t$  における最大たわみ量  $w_{max}$  は次式で与えられる。

$$w_{max}(t) = w\left(\frac{L}{2}, t\right) = X_r \cdot T(t) \dots\dots\dots (2-72)$$

以上の方法に従い、座屈時間  $t_{cr}$  及び最大たわみ  $w_{max}$  を計算する流れを以下に示す。

(必要データ)

- (1) ベローズ形状パラメータ :  $d_p, H, q, h, L = Nq$
- (2) Norton則パラメータ :  $k, n$
- (3) 初期たわみパラメータ :  $X_r, r$
- (4) 内 圧 :  $p$



座屈時間  $t_{cr}$  の計算手順

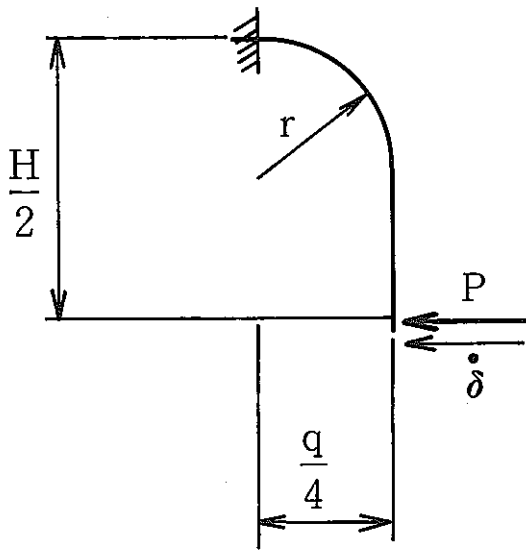


Fig. 1-1 Curved Beam Model

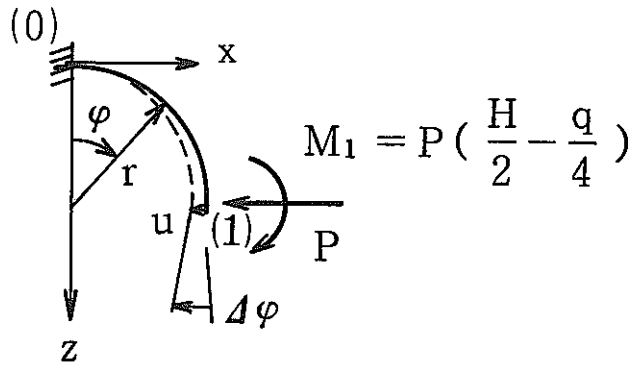


Fig. 1-2 Arc Part of the Model

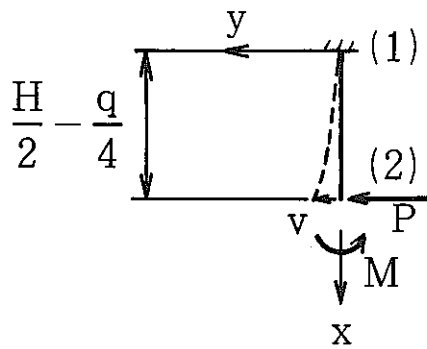


Fig. 1-3 Straight Part of the Model

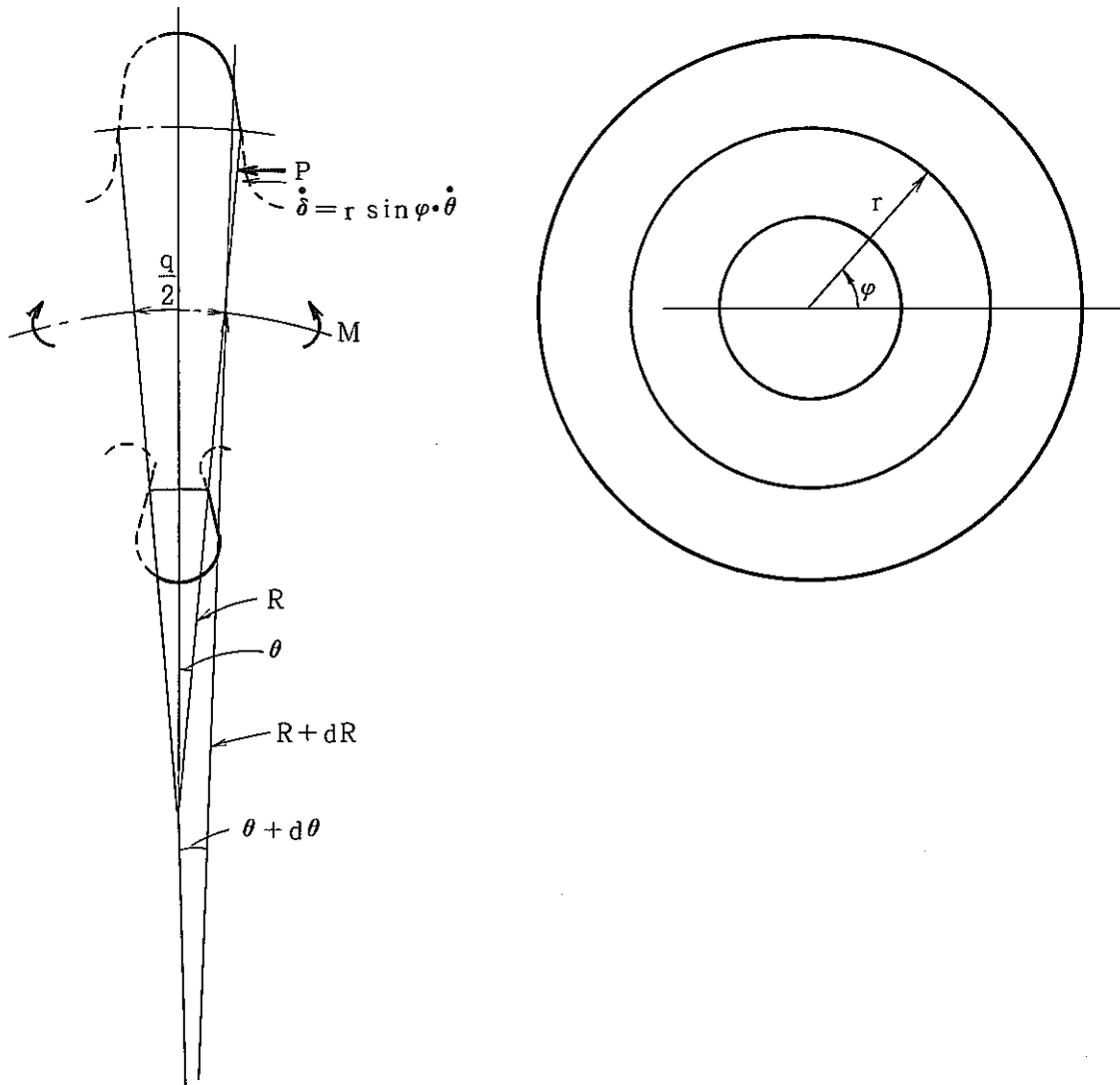


Fig. 2-1 Bellows Model subjected to Bending Moment

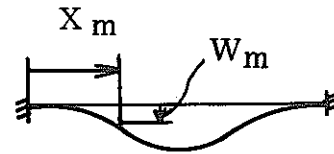
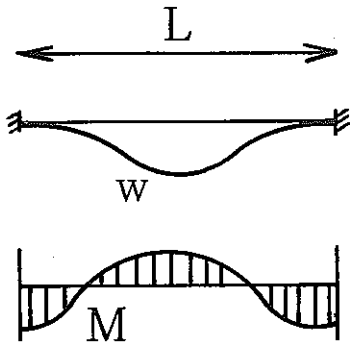


Fig. 2-2 Deflection and Moment Distribution of Bellows

Fig. 2-3 Changing Point of Curvature

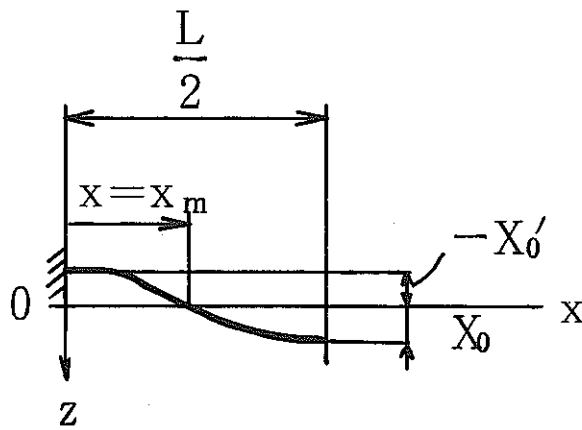


Fig. 2-4 Definition of  $X_0$  and  $X_0'$

## ☆ 計算プログラム解説

本章に述べた方法により、ベローズの内圧によるコラムタイプのクリープ座屈時間及び最大変位を計算するプログラムを用意している。

対象とするベローズは両端固定条件で、自重等の影響は考慮しない。解析に際しては、初期たわみ量、Norton則のパラメータ等を決めなければならないが、具体的な方法の一例は、この後の解析例で示す。計算結果として圧力と座屈時間、時間と最大変位の関係を示すグラフが出力されるようになっている。プログラム作成に当っては、日立エンジニアリング(株)後藤文彦氏の協力を得た。

以下、プログラムについて次の順序に従って解説する。

1. 入力データ
2. 使用方法
3. 出力データ
4. 図(XYPLOT)の出力
5. ソースリスト

なお、ひとつおりの計算を終了した後で、時間  $t$  を変えたい場合は、始めから計算するのではなく、付属プログラムで簡単に行える。主プログラムの後に付属プログラムの解説を追記する。

### I. 主プログラム

#### I.1 入力データ

##### I.1.1 入力データ形式

入力データ形式を Fig. I. 1 に示す。入力データは、A～Dの4種類のカードよりなっている。

##### I.1.2 入力データの内容

入力データの内容を Fig. I. 1 に示す。

##### I.1.3 入力データの例

入力データの例を Fig. I. 2 に示す。

#### I.2 使用方法

##### I.2.1 バッチ形式の使用

バッチ形式は、あらかじめ利用者がジョブコントロールカードおよび入力データを用意しておき実行させる方法である。ジョブコントロールカードを Fig. I. 3 に示す。ジョブコントロールカードの下線部を各々のケースにおいて変えて実行する。次に下線部の説明をする。上段より、(1)ソースプログラム、(2)1項で作成した入力データ、(3)図出力用データ出力先、(4)図出力用データ出力先、(5)式(2-37)より求めた  $\beta(1) \sim \beta(5)$  の値の出力先、以上を示す。出力データについては3項で示し、図(XYPLOT)出力については4項で示す。

### I.3 出力データ

#### I.3.1 出力データの種類

##### I.3.1.1 図出力のためのデータ（ファイル出力）

内圧  $p$ ，座屈時間  $t_{cr}$  を出力

##### I.3.1.2 図出力のためのデータ（ファイル出力）

任意の時間  $t$ ，最大たわみ量  $w_{max}$  を出力

I.3.1.3 任意の時間  $t$  を変える場合，付属プログラムにより I.3.1.2 を出力する。その場合の入力データとしてこれを与えることを目的とした出力データ（ファイル出力）

##### I.3.1.4 ベローズ形状パラメータおよび計算結果の出力（リスト出力）

#### I.3.2 出力データ形式

##### I.3.2.1 図（XY PLOT）出力のためのデータ形式

出力データ形式を，Fig. I.4 に示す。XVALU に内圧  $p$ ，YVALU に座屈時間  $t_{cr}$  を出力する。

##### I.3.2.2 図（XY PLOT）出力のためのデータ形式

I.3.2.1 と同様の出力データ形式とする。XVALU に任意の時間  $t$ ，YVALU に最大たわみ量  $w_{max}$  を出力する。

##### I.3.2.3 付属プログラムの入力データを与えることを目的とした出力データ形式

出力データ形式を Fig. I.5 に示す。

##### I.3.2.4 リスト出力のデータ形式

リスト出力のデータ形式および内容説明を Fig. I.6 に示す。

#### I.3.3 出力データの例

出力データの例を Fig. I.7（I.3.2.1 項），Fig. I.8（I.3.2.3 項）および Fig. I.9（I.3.2.4 項）に示す。

### I.4 図（XY PLOT）の出力

FINAS 10.8 項 XY PLOT 出力機能による<sup>5)</sup>。I.3.2.1 項および I.3.2.2 項の XVALU，YVALU のデータより，XY PLOT を出力する。

#### I.4.1 バッチ形式の使用

バッチ形式はあらかじめ利用者がジョブコントロールカードを用意しておき，出力データを使用し実行させる方法である。ジョブコントロールカードを Fig. I.10 に示す。ジョブコントロールカードの下線部を各々のケースにおいて変えて実行する。次に下線部の説明をする。上段より，(1)XY PLOT 出力用データ（FINAS による），(2)3 項で出力されたデータ。

Fig. I.11，Fig. I.12 に XY PLOT 出力用データの例を示す。

#### I.4.2 XY PLOT出力例

I.3.2.1およびI.3.2.2項のXVALU, YVALUのデータより, 出力したXY PLOTの例をFig. I.13およびFig. I.14に示す。



I.5 ソースリスト

( 1 / 9 )

```

* *****
* * 00010000
* * * 00020000
* *      ++ INPUT DATA COMENT ++ * 00030000
* * * 00040000
* * DP ; D+H , PITCH DIAMETER OF BELLOWS,(IN). * 00050000
* * QP ; BELLOWS PITCH,(IN). * 00060000
* * ZH ; CONVOLUTION DEPTH,(IN). * 00070000
* * TH ; THICKNESS * 00080000
* * ZL ; Q*N * 00090000
* *      Q ; BELLOWS PITCH,(IN). * 00100000
* *      N ; TOTAL NUMBER OF CONVOLUTIONS IN ONE BELLOWS * 00110000
* * ZLK ; * 00120000
* * ZZN ; * 00130000
* * XR ; * 00140000
* * RR ; * 00150000
* * PF ; INTERNAL PRESSURE. * 00160000
* * KK ; * 00170000
* * TF ; * 00180000
* * * 00190000
* ***** 00200000
* ***** 00210000
* * * 00220000
* *      +++ MAIN ROUTIN +++ * 00230000
* * * 00240000
* *      BELLOWS * 00250000
* *      INTERNAL PRESSURE * 00260000
* * * 00270000
* * * 00280000
* ***** 00290000
* COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, * 00300000
* XR,RR,PP,KK,TT * 00310000
* DIMENSION ZZK(5),ZZN(5),S1(5),S2(5),S2A(5),S3(5),S4(5), * 00320000
* SSA(5),S6(5),S7(5),S8(5),S9(100,5),S10(100,5), * 00330000
* S11(0:300,5),S12(0:300,5),PJJ(300),TJJ(0:300) * 00340000
* * 00350000
* CHARACTER MOJ11=18 * 00360000
* CHARACTER MOJ12=10 * 00370000
* * 00380000
* READ (5,900,END=999) DP,QP,ZH,TH,ZL,(ZZK(I),I=1,5), * 00390000
* (ZZN(I),I=1,5),XR,RR,PF,KK,TF * 00400000
* * 00410000
* DATA MOJ11/' KEISAN DEKIMASEN '/' * 00420000
* DATA MOJ12/' MUGENDAI '/' * 00430000
* * 00440000
* DO 300 I = 1 , 5 * 00450000
* * 00460000
* ZN = ZZN(I) * 00470000
* ZK = ZZK(I) * 00480000
* * 00490000
* WRITE ( 6 , 700 ) DP,QP,ZH,TH,ZL,ZZK(I),ZZN(I),XR,RR,PF * 00500000
* * 00510000
* CALL CASE1( S1(I) ) * 00520000
* * 00530000
* CALL CASE2( S2(I) ) * 00540000
* * 00550000
* CALL CASE2A( S2A(I) ) * 00560000
* * 00570000
* CALL CASE3( S3(I) ) * 00580000
* * 00590000
* CALL CASE4( S1(I),S2(I),S2A(I),S3(I),S4(I) ) * 00600000
* * 00610000
* CALL CASE5( S4(I),SSA(I) ) * 00620000
* * 00630000
* IF ( RR . GE . 0.0 . AND . RR . LE . 1.0 ) THEN * 00640000
* CALL CASE6( S6(I) ) * 00650000
* ELSE * 00660000
* WRITE ( 6 , 100 ) MOJ11 * 00670000
* GO TO 999 * 00680000
* FORMAT ( 1H , A18 ) * 00690000
100 * 00700000
* ENDDIF * 00710000
* * 00720000
* CALL CASE7( S7(I) ) * 00730000
* * 00740000
* IF( ZN . EQ . 1.0 ) THEN * 00750000
* CALL CASE8( S8(I) ) * 00760000
* ELSE * 00770000
* CALL CASE8A( S6(I),S7(I),S8(I) ) * 00780000
* ENDDIF * 00790000
* * 00800000
* PJJ(0) = 0.0

```

```

      PJ = 0.0
      PP = 0.0
*
*   DO 250 J = 1 , 100
*
*       PJ = PF/100.0
*       PJJ(J) = PJJ(J-1)+PJ
*       PP = PJJ(J)
*
*       CALL CASE9( SSA(I),S8(I),S9(J,I) )
*
*       IF ( ZN . GT . 1.0 ) THEN
*           CALL CASE10( S9(J,I),S10(J,I) )
*       ELSE
*           WRITE ( 6 , 200 ) HOJ12
200      FORMAT ( 1H , A10 )
*       ENDIF
*
*   250 CONTINUE
*
*       TJJ(0) = 0.0
*       TJ = 0.0
*       TT = 0.0
*
*       DO 270 K = 0 , 200
*
*           TT = TJJ(K)
*           TJ = TF/200.0
*           TJJ(K+1) = TJJ(K)+TJ
*
*           IF( ZN . EQ . 1.0 ) THEN
*               CALL CASE11( S9(100,I),S11(K,I) )
*           ELSE
*               CALL CASE12( S9(100,I),S11(K,I) )
*           ENDIF
*
*           CALL CASE13( S11(K,I),S12(K,I) )
*
*   270 CONTINUE
*
*       WRITE ( 7 , 1000 ) I,(PJJ(J),J=1,100)
*       WRITE ( 7 , 1100 ) I,(S10(J,I),J=1,100)
*       WRITE ( 6 , 800 ) S9(100,I),S10(200,I),S11(200,I),S12(200,I)
*       WRITE ( 10 , 1000 ) I,(TJJ(K),K=0,200)
*       WRITE ( 10 , 1100 ) I,(S12(K,I),K=0,200)
*
*   300 CONTINUE
*       WRITE ( 11 , 1200 ) S9(100,1),S9(100,2),S9(100,3),S9(100,4),
*           S9(100,5)
*   700 FORMAT (1H , 'DP=',F10.3,5X,'H =',F10.3,
*           /1H , 'Q =',F10.3,5X,'T =',F10.3,
*           /1H , 'L =',F10.3,5X,'K =',E15.5,5X,'N =',F10.5,
*           /1H , 'XR=',E10.3,5X,'G =',F10.5,5X,'P =',F10.5 )
*   800 FORMAT (1H , 'S9 =',E15.7,5X,'S10=',E15.7,
*           /1H , 'S11=',E15.7,5X,'S12=',E15.7 )
*   900 FORMAT (10X,5F10.0/10X,5F10.0/10X,5F10.0,
*           /10X,3F10.0,BN,110,F10.0)
*   1000 FORMAT ('XVALU',5X,I5,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)))
*   1100 FORMAT ('YVALU',5X,I5,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)))
*   1200 FORMAT (10X,5(1PE10.3))
*   999 CONTINUE
*       STOP
*       END
*
* *****
* *****
*           CASE1
* *****
*           ( 1-9 )
* *****
* *****
*
* SUBROUTINE CASE1(S1)
* COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* X      XR,RR,PP,KK,TT
*
* EXTERNAL FUN1
*       AA = -TH/2
*       BB = TH/2
*       EPSA1 = 1.0E-4
*       EPSR1 = 1.0E-4
*       NMNI1 = 21

```

```

00810000
00820000
00830000
00840000
00850000
00860000
00870000
00880000
00890000
00900002
00910000
00920000
00930002
00940000
00950000
00960000
00970000
00980001
00990001
01000000
01010001
01020001
01030001
01040001
01050001
01060001
01070001
01080002
01090001
01100001
01110000
01120002
01130000
01140002
01150000
01160000
01170002
01180000
01190001
01200000
01210001
01220002
01230002
01240002
01250002
01260000
01270000
01280004
01290004
01300005
01310005
01320005
01330005
01340005
01350005
01360003
01370003
01380003
01390003
01400005
01410000
01420000
01430000
01440000
01450000
01460000
01470000
01480000
01490000
01500000
01510000
01520000
01530000
01540000
01550000
01560000
01570000
01580000
01590000
01600000

```

```

      NMAX1 = 2000
      CALL AQN9 ( AA,BB,FUN1,EPSA1,EPSR1,NMIN1,NMAX1,S1,ERR1,N1,ICON1 )
      WRITE ( 6 , 100 ) ICON1,S1,ERR1,N1
100  FORMAT ( 1H ,6HICON1=,I5,5X,3HS1=,E15.7,
      *       /1H ,5HERR1=,E15.7,5X,3HN1=,I5 )
      RETURN
      END
      *****
      *           FUNCTION           *
      *****
      FUNCTION FUN1(X)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
      *       XR,RR,PP,KK,TT
      *
      ZNZ = 0.0
      QQ = 0.0
      FUN1 = 0.0
      *
      ZNZ = 1.0/ZN
      QQ = 4.0/QP
      *
      FUN1 = ((ABS(X/(1.0+QQ*X)))**ZNZ)*(ABS(X))
      *
      RETURN
      END
      *****
      *           CASE2           *
      *****
      *       ( 1-11 ) M = 1       *
      *****
      SUBROUTINE CASE2(S2)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
      *       XR,RR,PP,KK,TT
      *
      EXTERNAL FUN2
      *
      PHAI = 3.141592654
      AA = 0.0
      BB = PHAI/2.0
      EPSA2 = 1.0E-4
      EPSR2 = 1.0E-4
      NMIN2 = 21
      NMAX2 = 2000
      *
      CALL AQN9( AA,BB,FUN2,EPSA2,EPSR2,NMIN2,NMAX2,S2,ERR2,N2,ICON2 )
      *
      WRITE ( 6 , 100 ) ICON2,S2,ERR2,N2
100  FORMAT (1H ,6HICON2=,I5,5X,3HS2=,E15.7,
      *       /1H ,5HERR2=,E15.7,5X,3HN2=,I5 )
      RETURN
      END
      *****
      *           FUNCTION           *
      *****
      FUNCTION FUN2(X)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
      *       XR,RR,PP,KK,TT
      *
      QQ = 0.0
      TTH = 0.0
      CCJ = 0.0
      *
      QQ = QP/4.0
      TTH = ZH/2.0
      CCJ = TTH-QQ*(1.0-COS(X))
      FUN2 = 0.0
      *
      IF( CCJ.GT.0.0 ) FUN2 = ((TTH-QQ*(1.0-COS(X)))**ZN)*COS(X)
      *
      RETURN
      END
      *****
      *           CASE2A           *
      *****

```

```

*      *      ( 1-11 ) H = 0      *      02410000
*      *      *      *      *      *      02420000
*      *      *      *      *      *      02430000
SUBROUTINE CASE2A(S2A)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
*      *      XR,RR,PP,KK,TT      02440000
*      *      *      *      *      *      02450000
*      *      *      *      *      *      02460000
*      *      *      *      *      *      02470000
EXTERNAL FUN2A      02480000
*      *      *      *      *      *      02490000
*      *      PHAI = 3.141592654      02500000
*      *      AA = 0.0      02510000
*      *      BB = PHAI/2.0      02520000
*      *      EPSAJ = 1.0E-4      02530000
*      *      EPSRJ = 1.0E-4      02540000
*      *      NMINJ = 21      02550000
*      *      NMAXJ = 2000      02560000
*      *      *      *      *      *      02570000
*      *      CALL AQN9(AA,BB,FUN2A,EPSAJ,EPSRJ,NMINJ,NMAXJ,S2A,ERRJ,NJ,ICONJ)      02580000
*      *      *      *      *      *      02590000
*      *      WRITE ( 6 , 100 ) ICONJ,S2A,ERRJ,NJ      02600000
100 *      *      FORMAT (1H ,6HICONJ=,15,5X,4HS2A=,E15.7,      02610000
*      *      *      *      *      *      02620000
*      *      *      *      *      *      02630000
*      *      *      *      *      *      02640000
*      *      *      *      *      *      02650000
*      *      *      *      *      *      02660000
*      *      *      *      *      *      02670000
*      *      *      *      *      *      02680000
*      *      *      *      *      *      02690000
*      *      *      *      *      *      02700000
*      *      *      *      *      *      02710000
*      *      *      *      *      *      02720000
*      *      *      *      *      *      02730000
*      *      *      *      *      *      02740000
*      *      *      *      *      *      02750000
*      *      *      *      *      *      02760000
*      *      *      *      *      *      02770000
*      *      *      *      *      *      02780000
*      *      *      *      *      *      02790000
*      *      *      *      *      *      02800000
*      *      *      *      *      *      02810000
*      *      *      *      *      *      02820000
*      *      *      *      *      *      02830000
*      *      *      *      *      *      02840000
*      *      *      *      *      *      02850000
*      *      *      *      *      *      02860000
*      *      *      *      *      *      02870000
*      *      *      *      *      *      02880000
*      *      *      *      *      *      02890000
*      *      *      *      *      *      02900000
*      *      *      *      *      *      02910000
*      *      *      *      *      *      02920000
SUBROUTINE CASE3(S3)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
*      *      XR,RR,PP,KK,TT      02930000
*      *      *      *      *      *      02940000
*      *      *      *      *      *      02950000
EXTERNAL FUN3      02960000
*      *      *      *      *      *      02970000
*      *      *      *      *      *      02980000
*      *      *      *      *      *      02990000
*      *      *      *      *      *      03000000
*      *      *      *      *      *      03010000
*      *      *      *      *      *      03020000
*      *      *      *      *      *      03030000
*      *      *      *      *      *      03040000
*      *      *      *      *      *      03050000
*      *      *      *      *      *      03060000
*      *      *      *      *      *      03070000
*      *      *      *      *      *      03080000
100 *      *      *      *      *      *      03090000
*      *      *      *      *      *      03100000
*      *      *      *      *      *      03110000
*      *      *      *      *      *      03120000
*      *      *      *      *      *      03130000
*      *      *      *      *      *      03140000
*      *      *      *      *      *      03150000
*      *      *      *      *      *      03160000
*      *      *      *      *      *      03170000
*      *      *      *      *      *      03180000
*      *      *      *      *      *      03190000
*      *      *      *      *      *      03200000
*      *      *      *      *      *      03210000
*      *      *      *      *      *      03220000
*      *      *      *      *      *      03230000
*      *      *      *      *      *      03240000
*      *      *      *      *      *      03250000
*      *      *      *      *      *      03260000
*      *      *      *      *      *      03270000
*      *      *      *      *      *      03280000
*      *      *      *      *      *      03290000
*      *      *      *      *      *      03300000
*      *      *      *      *      *      03310000
*      *      *      *      *      *      03320000
*      *      *      *      *      *      03330000
*      *      *      *      *      *      03340000
*      *      *      *      *      *      03350000
*      *      *      *      *      *      03360000
*      *      *      *      *      *      03370000
*      *      *      *      *      *      03380000
*      *      *      *      *      *      03390000
*      *      *      *      *      *      03400000
*      *      *      *      *      *      03410000
*      *      *      *      *      *      03420000
*      *      *      *      *      *      03430000
*      *      *      *      *      *      03440000
*      *      *      *      *      *      03450000
*      *      *      *      *      *      03460000
*      *      *      *      *      *      03470000
*      *      *      *      *      *      03480000
*      *      *      *      *      *      03490000
*      *      *      *      *      *      03500000
*      *      *      *      *      *      03510000
*      *      *      *      *      *      03520000
*      *      *      *      *      *      03530000
*      *      *      *      *      *      03540000
*      *      *      *      *      *      03550000
*      *      *      *      *      *      03560000
*      *      *      *      *      *      03570000
*      *      *      *      *      *      03580000
*      *      *      *      *      *      03590000
*      *      *      *      *      *      03600000
*      *      *      *      *      *      03610000
*      *      *      *      *      *      03620000
*      *      *      *      *      *      03630000
*      *      *      *      *      *      03640000
*      *      *      *      *      *      03650000
*      *      *      *      *      *      03660000
*      *      *      *      *      *      03670000
*      *      *      *      *      *      03680000
*      *      *      *      *      *      03690000
*      *      *      *      *      *      03700000
*      *      *      *      *      *      03710000
*      *      *      *      *      *      03720000
*      *      *      *      *      *      03730000
*      *      *      *      *      *      03740000
*      *      *      *      *      *      03750000
*      *      *      *      *      *      03760000
*      *      *      *      *      *      03770000
*      *      *      *      *      *      03780000
*      *      *      *      *      *      03790000
*      *      *      *      *      *      03800000
*      *      *      *      *      *      03810000
*      *      *      *      *      *      03820000
*      *      *      *      *      *      03830000
*      *      *      *      *      *      03840000
*      *      *      *      *      *      03850000
*      *      *      *      *      *      03860000
*      *      *      *      *      *      03870000
*      *      *      *      *      *      03880000
*      *      *      *      *      *      03890000
*      *      *      *      *      *      03900000
*      *      *      *      *      *      03910000
*      *      *      *      *      *      03920000
*      *      *      *      *      *      03930000
*      *      *      *      *      *      03940000
*      *      *      *      *      *      03950000
*      *      *      *      *      *      03960000
*      *      *      *      *      *      03970000
*      *      *      *      *      *      03980000
*      *      *      *      *      *      03990000
*      *      *      *      *      *      04000000

```

```

      ZNN = (ZLN+1.0)/ZN
      FUN3 = (ABS(X))**ZNN
      RETURN
      END
      *****
      *****
      *
      *           CASE4
      *
      *           ( 1-19 )
      *
      *****
      *****
      SUBROUTINE CASE4( S1,S2,S2A,S3,S4)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
      *        XR,RR,PP,KK,TT
      *
      QQA = 0.0
      QQP = 0.0
      ZZH = 0.0
      ZZJ = 0.0
      ZZN = 0.0
      ZNZ = 0.0
      S4 = 0.0
      SS1 = 0.0
      SSA = 0.0
      SSB = 0.0
      SSC = 0.0
      *
      QQA = QP/4.0
      QQP = QQA**2
      ZZH = ZH/2.0
      ZZJ = ZZH-QQA
      ZZN = ZN+2.0
      ZNZ = ZZJ**ZZN
      *
      SS1 = S1**ZN
      SSA = QQP*(S2/SS1)
      SSB = QQA*ZZJ*(S2A/SS1)
      SSC = ZNZ/(ZZN*(S3**ZN))
      *
      S4 = SSA+SSB+SSC
      *
      WRITE ( 6 , 109 ) S4
100  FORMAT ( 1H ,3HS4=,E15.7 )
      RETURN
      END
      *****
      *****
      *
      *           CASE5
      *
      *           ( 2-11 )
      *
      *****
      *****
      SUBROUTINE CASE5( S4,SSA)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
      *        XR,RR,PP,KK,TT
      *
      EXTERNAL FUN3
      *
      AA = 0.0
      BB = 3.141592654
      EPSA5 = 1.0E-4
      EPSR5 = 1.0E-4
      NMINS = 21
      NMAX5 = 4000
      *
      CALL AQN9(AA,BB,FUN3,EPSA5,EPSR5,NMINS,NMAX5,SS,ERR5,NS,ICONS)
      *
      DDP = 0.0
      DDL = 0.0
      ZZN = 0.0
      VV1 = 0.0
      VV2 = 0.0
      *
      DDP = DP*QP
      DDL = 8.0*S4*ZK
      ZZN = 1.0/ZN
      *
      VV1 = (DP**2.0)/2.0
      VV2 = (DDP/DDL)**ZZN
  
```

```

03210000
03220000
03230000
03240000
03250000
03260000
03270000
03280000
03290000
03300000
03310000
03320000
03330000
03340000
03350000
03360000
03370000
03380000
03390000
03400000
03410000
03420000
03430000
03440000
03450000
03460000
03470000
03480000
03490000
03500000
03510000
03520000
03530000
03540000
03550000
03560000
03570000
03580000
03590000
03600000
03610000
03620000
03630000
03640000
03650000
03660000
03670000
03680000
03690000
03700000
03710000
03720000
03730000
03740000
03750000
03760000
03770000
03780000
03790000
03800000
03810000
03820000
03830000
03840000
03850000
03860000
03870000
03880000
03890000
03900000
03910000
03920000
03930000
03940000
03950000
03960000
03970000
03980000
03990000
04000000
  
```

```

      SSA = VV1=VV2=S5
*
* WRITE ( 6 , 100 ) ICON5,S5,ERR5,N5,SSA
100 FORMAT (1H ,6HICON5=,I5,5X,3HSS=,E15.7,
*         /1H ,5HERR5=,E15.7,5X,3HN5=,I5,
*         /1H ,4HSSA=,E15.7 )
      RETURN
      END
*
* *****
* *           FUNCTION           *
* *****
      FUNCTION FUN5(X)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
*          XR,RR,PP,KK,TT
*
      YY = 0.0
      ZN = 0.0
*
      YY = .SIN(X)
      ZN = (1.0+ZN)/ZH
      FUN5 = 0.0
*
      IF ( YY . GE . 0.0 ) FUN5 = YY**ZN
*
      RETURN
      END
*
* *****
* *           CASE6             *
* *                               *
* *          ( 2-63 )           *
* *                               *
* *****
      SUBROUTINE CASE6(S6)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
*          XR,RR,PP,KK,TT
*
      ZNN = 0.0
      S6 = 0.0
*
      ZNN = -(ZN-1.0)/2.0
*
      S6 = RR**ZNN+(1-RR)**ZNN
*
      WRITE ( 6 , 100 ) S6
100 FORMAT (1H ,3HS6=,E15.8)
      RETURN
      END
*
* *****
* *           CASE7             *
* *                               *
* *          ( 2-62 )           *
* *                               *
* *****
      SUBROUTINE CASE7(S7)
      COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
*          XR,RR,PP,KK,TT
*
      DIMENSION Z(50000)
*
      Z(1) = 1.0/(2.0*(ZN+2.0))
      ZJJ = 0.0
*
      DO 50 K = 1 , KK
*
      ZJJ = Z(K) + ZJJ
      Z(K+1)=Z(K)*(((2*K+1)*(K*ZN+K+1))/(2*(ZN*(K+1)+K+2)*(K+1)))
*
50    CONTINUE
*
      S7 = 1 + ZJJ
*
      WRITE ( 6 , 100 ) S7
100 FORMAT ( 1H ,3HS7=,E15.7)
      RETURN
      END
*
* *****
* *           CASE8             *
* *                               *
* *****

```

```

04010000
04020000
04030000
04040000
04050000
04060000
04070000
04080000
04090000
04100000
04110000
04120000
04130000
04140000
04150000
04160000
04170000
04180000
04190000
04200000
04210000
04220000
04230000
04240000
04250000
04260000
04270000
04280000
04290000
04300000
04310000
04320000
04330000
04340000
04350000
04360000
04370000
04380000
04390000
04400000
04410000
04420000
04430000
04440000
04450000
04460000
04470000
04480000
04490000
04500000
04510000
04520000
04530000
04540000
04550000
04560000
04570000
04580000
04590000
04600000
04610000
04620000
04630000
04640000
04650000
04660000
04670000
04680000
04690000
04700000
04710000
04720000
04730000
04740000
04750000
04760000
04770000
04780000
04790000
04800000

```

```

* * * * * ( 2-43 ) * * * * *
* ***** * * * * *
* *****
SUBROUTINE CASE8(S8)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* XR,RR,PP,KK,TT
*
ZLL = 0.0
SB = 0.0
*
PHAI = 3.141592654
ZLL = ZL**2
*
SB = (4.0*(PHAI**2))/ZLL
*
WRITE ( 6 , 100 ) S8
100 FORMAT ( 1H ,3HS8=,E15.8 )
RETURN
END
* *****
* *****
* * * * * CASE8A * * * * *
* * * * * ( 2-61 ) * * * * *
* *****
* *****
SUBROUTINE CASE8A(S6,S7,S8)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* XR,RR,PP,KK,TT
*
ZNN = 0.0
ZNZ = 0.0
ZZL = 0.0
XXR = 0.0
SS6 = 0.0
SS7 = 0.0
SB = 0.0
*
ZNN = 2.0*(ZN+1.0)
ZNZ = ZN-1.0
ZZL = ZL**2.0
XXR = XR**ZNZ
SS6 = S6**2.0
SS7 = S7**2.0
*
SB = (ZNN/(ZZL*XXR))*SS6*SS7
*
WRITE ( 6 , 100 ) S8
100 FORMAT ( 1H ,3HS8=,E15.8 )
RETURN
END
* *****
* *****
* * * * * CASE9 * * * * *
* * * * * ( 2-37 ) * * * * *
* *****
* *****
SUBROUTINE CASE9(S5A,S8,S9)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* XR,RR,PP,KK,TT
*
PHAI = 3.141592654
DDP = 0.0
BBA = 0.0
BBC = 0.0
SS5 = 0.0
PPA = 0.0
SS8 = 0.0
S9 = 0.0
*
DDP = (2.0*ZH)/DP
BBA = ((PHAI/4.0)*(DP**2))*(1+DDP)
SS5 = S5A**ZN
PPA = PP**ZN
SS8 = SS5*S8
BBC = PPA/S58
*
S9 = (BBA**ZN)*BBC
*

```

```

04810000
04820000
04830000
04840000
04850000
04860000
04870000
04880000
04890000
04900000
04910000
04920000
04930000
04940000
04950000
04960000
04970000
04980000
04990000
05000000
05010000
05020000
05030000
05040000
05050000
05060000
05070000
05080000
05090000
05100000
05110000
05120000
05130000
05140000
05150000
05160000
05170000
05180000
05190000
05200000
05210000
05220000
05230000
05240000
05250000
05260000
05270000
05280000
05290000
05300000
05310000
05320000
05330000
05340000
05350000
05360000
05370000
05380000
05390000
05400000
05410000
05420000
05430000
05440000
05450000
05460000
05470000
05480000
05490000
05500000
05510000
05520000
05530000
05540000
05550000
05560000
05570000
05580000
05590000
05600000

```

```

* WRITE ( 6 , 100 ) S9
*100 FORMAT ( 1H ,3HS9=,E15.8)
RETURN
END
*****
*****
* CASE10
*
* ( 2-71 )
*****
*****
SUBROUTINE CASE10(S9,S10)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* XR,RR,PP,KK,TT
*
* ZZN = 0.0
* S10 = 0.0
*
* ZZN = ZN-1.0
* S10 = 1.0/(ZZN*S9)
* WRITE ( 6 , 100 ) S10,S9
*100 FORMAT ( 1H ,4HS10=,E15.8,5X,'S9=',E15.8 )
RETURN
END
*****
*****
* CASE11
*
* ( 2-68 )
*****
*****
SUBROUTINE CASE11(S9,S11)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* XR,RR,PP,KK,TT
*
* SS9 = 0.0
* S11 = 0.0
* EE = 2.718281828
*
* SS9 = S9*TT
* S11 = EE**(SS9)
*
* WRITE ( 6 , 100 ) S11,S9,TT
*100 FORMAT ( 1H ,'S11=',E15.8,5X,'S9=',E15.8,5X,'T=',F10.2 )
RETURN
END
*****
*****
* CASE12
*
* ( 2-69 )
*****
*****
SUBROUTINE CASE12(S9,S11)
COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,
* XR,RR,PP,KK,TT
*
* ZNZ = 0.0
* ZAZ = 0.0
* XZX = 0.0
* SS9 = 0.0
* S11 = 0.0
*
* ZNZ = -(1/(ZN-1))
* ZAZ = ZN-1
* XZX = S9*ZAZ*TT
* SS9 = 1-XZX
*
* IF( SS9 . LT . 0.0 ) GO TO 900
*
* S11 = SS9**ZNZ
*
* WRITE ( 6 , 100 ) S11,S9,TT
*100 FORMAT ( 1H ,'S11=',E15.8,5X,'S9=',E15.8,5X,'T=',F10.2 )
900 RETURN
END
*****
*****
* CASE13
*
*

```

```

05610000
05620000
05630000
05640000
05650000
05660000
05670000
05680000
05690000
05700000
05710000
05720000
05730000
05740000
05750000
05760000
05770000
05780000
05790000
05800000
05810001
05820001
05830000
05840000
05850000
05860000
05870000
05880000
05890000
05900000
05910000
05920000
05930000
05940000
05950000
05960000
05970000
05980000
05990000
06000000
06010000
06020000
06030005
06040005
06050000
06060000
06070000
06080000
06090000
06100000
06110000
06120000
06130000
06140000
06150000
06160000
06170000
06180000
06190000
06200000
06210000
06220000
06230000
06240000
06250000
06260000
06270000
06280000
06290000
06300000
06310000
06320000
06330005
06340005
06350000
06360000
06370000
06380000
06390000
06400000

```



```
* * * ( 2-72 ) * * 06410000
* ***** * 06420000
* ***** * 06430000
* SUBROUTINE CASE13(S11,S12) * 06440000
* COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, * 06450000
* XR,RR,PP,KK,TT * 06460000
* * 06470000
* S12 = 0.0 * 06480000
* * 06490000
* S12 = S11*XR * 06500000
* * 06510000
* WRITE ( 6 , 100 ) S11,S12 * 06520005
*100 FORMAT ( 1H , 'S11=',E15.8,5X,'S12=',E15.8 ) * 06530005
* RETURN * 06540000
* END * 06550000
```

	10	20	30	40	50	60
A		$d_p$	$q$	$H$	$h$	$L$
B		$k(1)$	$k(2)$	$k(3)$	$k(4)$	$k(5)$
C		$n(1)$	$n(2)$	$n(3)$	$n(4)$	$n(5)$
D		$X_r$	$\gamma$	$p$	$m$	$t$

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内 容
A	11~20	実 数	$d_p$	ベローズ形状パラメータ
	21~30	"	$q$	"
	31~40	"	$H$	"
	41~50	"	$h$	"
	51~60	"	$L$	" $L=N_q$
B	11~20	実 数	$k(1)$	Norton則パラメータ
	21~30	"	$k(2)$	"
	31~40	"	$k(3)$	"
	41~50	"	$k(4)$	"
	51~60	"	$k(5)$	"
C	11~20	実 数	$n(1)$	Norton則パラメータ
	21~30	"	$n(2)$	"
	31~40	"	$n(3)$	"
	41~50	"	$n(4)$	"
	51~60	"	$n(5)$	"
D	11~20	実 数	$X_r$	初期たわみパラメータ
	21~30	"	$\gamma$	"
	31~40	"	$p$	内 圧
	41~50	正整数	$m$	(2-62)繰り返し回数
	51~60	実 数	$t$	任意の時間

Fig. I.1 Input Data Contents

1160.0	50.0	60.0	1.89	700.0
1.024E-09	4.151E-09	1.024E-09	8.358E-09	1.024E-09
2.05	2.05	3.05	2.05	3.45
1.52E+10.5	0.06	10000		1.0E+04

Fig. I.2 Example of Input Data

```

//Q303C1 JOB (ENG),F.GOTOH,MSGCLASS=S,NOTIFY=Q303C,
//      MSGLEVEL=(1,1),SYSTEM=BEPI,
//      ATTR=(T1,C1,W2)
// EXEC FORT7CLG,PARM='LC(99)',GOREGN=1400K
//FORT.SYSPRINT DD DSN=&&COMPACT,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//      SPACE=(TRK,(200,100),RLSE)
//FORT.SYSIN DD DSN=Q303C.FG.FORT(CREEP2C),UNIT=SYSDA,DISP=SHR
//LKED.SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR (1)
//      DD DSN=SYS1.SSL2,DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT05F001 DD DSN=Q303C.FG.DATA(TDA3288),UNIT=DASD,DISP=SHR
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=* (2)
//GO.FT07F001 DD DSN=Q303C.QFG07.TDA3288,UNIT=DASD,
//      DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE), (3)
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
//GO.FT10F001 DD DSN=Q303C.QFG10.TDA3288,UNIT=DASD,
//      DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE), (4)
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
//GO.FT11F001 DD DSN=Q303C.QFG11.TDA3288,UNIT=DASD,
//      DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE), (5)
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
//GO.FT21F001 DD DSN=&&POS,UNIT=WORK,
//      SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),DISP=(NEW,PASS),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200,BUFNO=1)
//*SYSIN DD DUMMY
//COMPACT EXEC COMPACT,COND=EVEN
//

```

Fig. I.3 JCL

	10	20	30	40	50	60	70	80
A	XVALU	xvid	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
			x <sub>7</sub>	-----	-----	-----	-----	x <sub>n</sub>

	10	20	30	40	50	60	70	80
B	YVALU	yvid	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>
			y <sub>7</sub>	-----	-----	-----	-----	y <sub>n</sub>

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内 容
A	1~5	英 字	-	1~5 カラムにXVALUと記入
	11~15	正整数	xvid	値の並びの識別番号
	21~30	実 数	x <sub>1</sub>	1 番目の値
	31~40	"	x <sub>2</sub>	2 番目の値
	⋮	⋮	⋮	⋮
	71~80	"	x <sub>6</sub>	6 番目の値 値の個数が6を越える場合には次のカード の21~80カラムに10カラム単位で記入
B	1~5	英 字	-	1~5 カラムにYVALUと記入
	11~15	正整数	yvid	値の並びの識別番号
	21~30	実 数	y <sub>1</sub>	1 番目の値
	31~40	"	y <sub>2</sub>	2 番目の値
	⋮	⋮	⋮	⋮
	71~80	実 数	y <sub>6</sub>	6 番目の値 値の個数が6を越える場合には次のカード の21~80カラムに10カラム単位で記入

Fig. I.4 Data Form for XY PLOT

	10	20	30	40	50	60
A		$\beta(1)$	$\beta(2)$	$\beta(3)$	$\beta(4)$	$\beta(5)$

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内 容
A	11~20	実 数	$\beta(1)$	式(2-37)による値
	21~30	"	$\beta(2)$	"
	31~40	"	$\beta(3)$	"
	41~50	"	$\beta(4)$	"
	51~60	"	$\beta(5)$	"

Fig. I.5 Data Form for Additional Program

```

DP=          H =
Q =          T =
L =          K =
XR=          G =          P =      N =
ICON1=       S1=
ERR1=                N1=
ICON2=       S2=
ERR2=                N2=
ICONJ=       S2A=
ERRJ=                NJ=
ICON3=       S3=
ERR3=                N3=
S4=
ICON5=       S5=
ERR5=                N5=
S5A=
S6=
S7=
S8=
S9 =          S10=
S11=          S12=
    
```

記号	内 容
DP	ベローズ形状パラメータ $d_p$
H	" H (山高)
Q	" q (ピッチ)
T	" h (板厚)
L	" L (=Nq)
K	Norton則パラメータ $k(n)$
N	" $n(n)$
XR	初期たわみパラメータ $X_r$
G	" $r$
P	内 圧 $p$
ICON1	コンディションコード (SSL II 使用手引書 P110表AQN9-1参照)
S1	式(1-9)の解
ERR1	S1の絶対誤差の推定値
N1	被積分関数の計算回数
ICON2	ICON1と同じ
S2	式(1-11)の解 ( $m=1$ のとき)
ERR2	S2の絶対誤差の推定値
N2	N1と同じ

Fig. I.6 Data Form for List Output (1/2)

記号	内 容
ICONJ	ICON1と同じ
S2A	式(1-11)の解 (m=0のとき)
ERRJ	S2Aの絶対誤差の推定値
NJ	N1と同じ
ICON3	ICON1と同じ
S3	式(1-14)の解
ERR3	S3の絶対誤差の推定値
N3	N1と同じ
S4	式(1-19)の解
ICON5	ICON1と同じ
S5	式(2-11)の積分の解
ERR5	S5の絶対誤差の推定値
N5	N1と同じ
S5A	式(2-11)の解
S6	式(2-63)の解
S7	式(2-62)の解
S8	式(2-43)または式(2-61)の解
S9	式(2-37)の解
S10	式(2-71)の解
S11	式(2-68)の解
S12	式(2-69)の解

Fig. I.6 Data Form for List Output (2/2)

XVALU	1	6.000E-04	1.200E-03	1.800E-03	2.400E-03	3.000E-03	3.600E-03		
		4.200E-03	4.800E-03	5.400E-03	6.000E-03	6.600E-03	7.200E-03		
		7.800E-03	8.400E-03	9.000E-03	9.600E-03	1.020E-02	1.080E-02		
		1.140E-02	1.200E-02	1.260E-02	1.320E-02	1.380E-02	1.440E-02		
		1.500E-02	1.560E-02	1.620E-02	1.680E-02	1.740E-02	1.800E-02		
		1.860E-02	1.920E-02	1.980E-02	2.040E-02	2.100E-02	2.160E-02		
		2.220E-02	2.280E-02	2.340E-02	2.400E-02	2.460E-02	2.520E-02		
		2.580E-02	2.640E-02	2.700E-02	2.760E-02	2.820E-02	2.880E-02		
		2.940E-02	3.000E-02	3.060E-02	3.120E-02	3.180E-02	3.240E-02		
		3.300E-02	3.360E-02	3.420E-02	3.480E-02	3.540E-02	3.600E-02		
		3.660E-02	3.720E-02	3.780E-02	3.840E-02	3.900E-02	3.960E-02		
		4.020E-02	4.080E-02	4.140E-02	4.200E-02	4.260E-02	4.320E-02		
		4.380E-02	4.440E-02	4.500E-02	4.560E-02	4.620E-02	4.680E-02		
		4.740E-02	4.800E-02	4.860E-02	4.920E-02	4.980E-02	5.040E-02		
		5.100E-02	5.160E-02	5.220E-02	5.280E-02	5.340E-02	5.400E-02		
		5.460E-02	5.520E-02	5.580E-02	5.640E-02	5.700E-02	5.760E-02		
		5.820E-02	5.880E-02	5.940E-02	6.000E-02				
		YVALU	1	3.527E+08	8.518E+07	3.710E+07	2.057E+07	1.302E+07	8.958E+06
				6.531E+06	4.967E+06	3.902E+06	3.144E+06	2.586E+06	2.163E+06
				1.836E+06	1.577E+06	1.369E+06	1.199E+06	1.059E+06	9.422E+05
		8.433E+05	7.591E+05	6.869E+05	6.244E+05	5.700E+05	5.224E+05		
		4.805E+05	4.433E+05	4.103E+05	3.809E+05	3.544E+05	3.306E+05		
		3.091E+05	2.896E+05	2.719E+05	2.558E+05	2.410E+05	2.275E+05		
		2.151E+05	2.036E+05	1.931E+05	1.833E+05	1.743E+05	1.659E+05		
		1.581E+05	1.508E+05	1.440E+05	1.377E+05	1.317E+05	1.261E+05		
		1.209E+05	1.160E+05	1.114E+05	1.071E+05	1.030E+05	9.909E+04		
		9.543E+04	9.197E+04	8.869E+04	8.559E+04	8.264E+04	7.984E+04		
		7.718E+04	7.465E+04	7.224E+04	6.995E+04	6.776E+04	6.567E+04		
		6.368E+04	6.177E+04	5.995E+04	5.821E+04	5.654E+04	5.494E+04		
XVALU	5	6.000E-04	1.200E-03	1.800E-03	2.400E-03	3.000E-03	3.600E-03		
		4.200E-03	4.800E-03	5.400E-03	6.000E-03	6.600E-03	7.200E-03		
		7.800E-03	8.400E-03	9.000E-03	9.600E-03	1.020E-02	1.080E-02		
		1.140E-02	1.200E-02	1.260E-02	1.320E-02	1.380E-02	1.440E-02		
		1.500E-02	1.560E-02	1.620E-02	1.680E-02	1.740E-02	1.800E-02		
		1.860E-02	1.920E-02	1.980E-02	2.040E-02	2.100E-02	2.160E-02		
		2.220E-02	2.280E-02	2.340E-02	2.400E-02	2.460E-02	2.520E-02		
		2.580E-02	2.640E-02	2.700E-02	2.760E-02	2.820E-02	2.880E-02		
		2.940E-02	3.000E-02	3.060E-02	3.120E-02	3.180E-02	3.240E-02		
		3.300E-02	3.360E-02	3.420E-02	3.480E-02	3.540E-02	3.600E-02		
		3.660E-02	3.720E-02	3.780E-02	3.840E-02	3.900E-02	3.960E-02		
		4.020E-02	4.080E-02	4.140E-02	4.200E-02	4.260E-02	4.320E-02		
		4.380E-02	4.440E-02	4.500E-02	4.560E-02	4.620E-02	4.680E-02		
		4.740E-02	4.800E-02	4.860E-02	4.920E-02	4.980E-02	5.040E-02		
		5.100E-02	5.160E-02	5.220E-02	5.280E-02	5.340E-02	5.400E-02		
		5.460E-02	5.520E-02	5.580E-02	5.640E-02	5.700E-02	5.760E-02		
		5.820E-02	5.880E-02	5.940E-02	6.000E-02				
YVALU	5	3.644E+09	3.335E+08	8.233E+07	3.052E+07	1.413E+07	7.534E+06		
		4.426E+06	2.792E+06	1.860E+06	1.293E+06	9.307E+05	6.894E+05		
		5.230E+05	4.050E+05	3.192E+05	2.555E+05	2.073E+05	1.702E+05		
		1.412E+05	1.183E+05	9.999E+04	8.517E+04	7.306E+04	6.308E+04		
		5.479E+04	4.786E+04	4.202E+04	3.706E+04	3.284E+04	2.921E+04		
		2.609E+04	2.338E+04	2.103E+04	1.897E+04	1.716E+04	1.557E+04		
		1.417E+04	1.292E+04	1.182E+04	1.083E+04	9.943E+03	9.150E+03		
		8.436E+03	7.793E+03	7.212E+03	6.685E+03	6.207E+03	5.772E+03		
		5.376E+03	5.014E+03	4.683E+03	4.379E+03	4.101E+03	3.845E+03		
		3.609E+03	3.391E+03	3.190E+03	3.005E+03	2.833E+03	2.673E+03		
		2.525E+03	2.387E+03	2.259E+03	2.139E+03	2.028E+03	1.924E+03		
		1.827E+03	1.736E+03	1.650E+03	1.571E+03	1.495E+03	1.425E+03		
		1.359E+03	1.297E+03	1.238E+03	1.183E+03	1.130E+03	1.081E+03		
		1.035E+03	9.908E+02	9.492E+02	9.098E+02	8.726E+02	8.373E+02		
		8.038E+02	7.720E+02	7.418E+02	7.131E+02	6.859E+02	6.599E+02		
		6.352E+02	6.117E+02	5.893E+02	5.680E+02	5.476E+02	5.282E+02		
		5.096E+02	4.919E+02	4.750E+02	4.588E+02				

Fig. I.7 Example of Output Data (XY Values)



3.399E-05 1.378E-04 3.475E-04 2.774E-04 8.896E-04

Fig. I.8 Example of Output Data (for Additional Program)

```

DP= 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000        T = 1.890
L = 700.000      K = 0.10240E-08      N = 2.05000
XR= 0.152E+02    G = 0.50000      P = 0.06000
ICON1= 0          S1= 0.6991958E+00
ERR1= 0.2894503E-04      N1= 31
ICON2= 0          S2= 0.8903096E+03
ERR2= 0.8490652E-02      N2= 31
ICONJ= 0          S2A= 0.1226252E+04
ERRJ= 0.1169445E-01      NJ= 31
ICON3= 0          S3= 0.6983908E+00
ERR3= 0.2878635E-04      N3= 31
S4= 0.9040651E+06
ICON5= 0          S5= 0.1753156E+01
ERR5= 0.1007719E-03      N5= 31
S5A= 0.2719907E+10
S6= 0.28778667E+01
S7= 0.1392362E+01
S8= 0.11477397E-04
S9 = 0.3399228E-04      S10= 0.0000000E+00
S11= 0.1522664E+01      S12= 0.2314449E+02
DP= 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000        T = 1.890
L = 700.000      K = 0.41510E-08      N = 2.05000
XR= 0.152E+02    G = 0.50000      P = 0.06000
ICON1= 0          S1= 0.6991958E+00
ERR1= 0.2894503E-04      N1= 31
ICON2= 0          S2= 0.8903096E+03
ERR2= 0.8490652E-02      N2= 31
ICONJ= 0          S2A= 0.1226252E+04
ERRJ= 0.1169445E-01      NJ= 31
ICON3= 0          S3= 0.6983908E+00
ERR3= 0.2878635E-04      N3= 31
S4= 0.9040651E+06
ICON5= 0          S5= 0.1753156E+01
ERR5= 0.1007719E-03      N5= 31
S5A= 0.1374170E+10
S6= 0.28778667E+01
S7= 0.1392362E+01
S8= 0.11477397E-04
S9 = 0.1377951E-03      S10= 0.0000000E+00
S11= 0.0000000E+00      S12= 0.0000000E+00
DP= 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000        T = 1.890
L = 700.000      K = 0.10240E-08      N = 3.05000
XR= 0.152E+02    G = 0.50000      P = 0.06000
ICON1= 0          S1= 0.7536681E+00
ERR1= 0.4281550E-04      N1= 31
ICON2= 0          S2= 0.2480372E+05
ERR2= 0.2365467E+00      N2= 31
ICONJ= 0          S2A= 0.3258829E+05
ERRJ= 0.3107861E+00      NJ= 31
ICON3= 0          S3= 0.7531632E+00
ERR3= 0.4282485E-04      N3= 31
S4= 0.2696154E+08
ICON5= 0          S5= 0.1824066E+01
ERR5= 0.4653037E-04      N5= 41
S5A= 0.7340806E+08
S6= 0.40699177E+01
S7= 0.1304460E+01

```

Fig. I.9 Example of Output Data (List) (1/2)

```

S8= 0.17601160E-05
S9 = 0.3474622E-03      S10= 0.0000000E+00
S11= 0.0000000E+00     S12= 0.0000000E+00
DP= 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000      T = 1.890
L = 700.000      K = 0.83580E-08      N = 2.05000
XR= 0.152E+02      G = 0.50000      P = 0.06000
ICON1= 0      S1= 0.6991958E+00
ERR1= 0.2894503E-04      N1= 31
ICON2= 0      S2= 0.8903096E+03
ERR2= 0.8490652E-02      N2= 31
ICONJ= 0      S2A= 0.1226252E+04
ERRJ= 0.1169445E-01      NJ= 31
ICON3= 0      S3= 0.6983908E+00
ERR3= 0.2878635E-04      N3= 31
S4= 0.9040651E+06
ICON5= 0      S5= 0.1753156E+01
ERR5= 0.1007719E-03      N5= 31
S5A= 0.9767252E+09
S6= 0.28778667E+01
S7= 0.1392362E+01
S8= 0.11477397E-04
S9 = 0.2774487E-03      S10= 0.0000000E+00
S11= 0.0000000E+00     S12= 0.0000000E+00
DP= 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000      T = 1.890
L = 700.000      K = 0.10240E-08      N = 3.45000
XR= 0.152E+02      G = 0.50000      P = 0.06000
ICON1= 0      S1= 0.7677543E+00
ERR1= 0.4523304E-04      N1= 31
ICON2= 0      S2= 0.9406931E+05
ERR2= 0.8971149E+00      N2= 31
ICONJ= 0      S2A= 0.1215941E+06
ERRJ= 0.1159611E+01      NJ= 31
ICON3= 0      S3= 0.7673157E+00
ERR3= 0.4515836E-04      N3= 31
S4= 0.1055011E+09
ICON5= 0      S5= 0.1842191 +01
ERR5= 0.4938520E-04      N5= 41
S5A= 0.3106614E+08
S6= 0.46751080E+01
S7= 0.1279487E+01
S8= 0.82667003E-06
S9 = 0.8896273E-03      S10= 0.1203395E+01
S11= 0.0000000E+00     S12= 0.0000000E+00

```

Fig. I.9 Example of Output Data (List) (2/2)

```
//Q303C1 JOB (ENG),STRESS,MSGCLASS=S,NOTIFY=Q303C,  
//      SYSTEM=BEP1,  
//      ATTR=(TO,C4,W3)  
//JOBPROC DD DSN=Q3050.PROCLIB,DISP=SHR  
//*  
//*****  
//*  
//*****  
//      EXEC FINAS  
//FT06F001 DD DSN=COMPACT,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),  
//          SPACE=(TRK,(100,80))  
//SYSIN   DD DSN=Q303C.FG,OUT(TDA328C),DISP=SHR  
//FT21F001 DD DSN=Q303C.BFG07.TDA328B,DISP=SHR  
//*  
//      EXEC COMPACT,TYPE=TYPE2  
//NLP     EXEC FNSHLP  
//GDFILE DD SYSOUT=*  
//
```

Fig. I.10 JCL for XYPLOT

```

SYSTEM 8/99
FINAS
PLOT
OUTPUT
XYPLOT
FRAME      A4V
-READ      21
CURVE      1      1      CASE1
CURVE      2      2      CASE2
CURVE      3      3      CASE3
CURVE      4      4      CASE4
CURVE      5      5      CASE5
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
XRANGE     0.0      0.06
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   1      YVALU   1      XVALU   2      YVALU   2
           XVALU   3      YVALU   3      XVALU   4      YVALU   4
           XVALU   5      YVALU   5
*
CURVE      1      0      CASE1
CURVE      2      0      CASE2
CURVE      3      0      CASE3
CURVE      4      0      CASE4
CURVE      5      0      CASE5
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
XRANGE     0.0      0.06
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   1      YVALU   1      XVALU   2      YVALU   2
           XVALU   3      YVALU   3      XVALU   4      YVALU   4
           XVALU   5      YVALU   5
*
CURVE      1      0      CASE1
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   1      YVALU   1
*
CURVE      1      0      CASE2
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   2      YVALU   2
*
CURVE      1      0      CASE3
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   3      YVALU   3
*
CURVE      1      0      CASE4
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   4      YVALU   4
*
CURVE      1      0      CASE5
XTITLE     P (KG/MH**2)
YTITLE     TCR (HR)
PTITLE
YLOG       YES
PLOT3      XVALU   5      YVALU   5
END OUTPUT
END FINAS

```

Fig. I.11 Example of XYPLOT Data for Output ( $p - T_{cr}$ )

```

SYSTEM 8/99
FINAS
PLOT
OUTPUT
XYPLOT
FRAME      A4V
=READ     21
CURVE      1      1      CASE1
CURVE      2      2      CASE2
CURVE      3      3      CASE3
CURVE      4      4      CASE4
CURVE      5      5      CASE5
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     SCASE OVER PLOT (XR=15.2MM,P=0.06KG/MM**2)
YRANGE     0.0      200.
XRANGE     0.0      10000.
PLOT3      XVALU    1      YVALU    1      XVALU    2      YVALU    2
           XVALU    3      YVALU    3      XVALU    4      YVALU    4
           XVALU    5      YVALU    5
*
CURVE      1      0      CASE1
CURVE      2      0      CASE2
CURVE      3      0      CASE3
CURVE      4      0      CASE4
CURVE      5      0      CASE5
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     SCASE OVER PLOT (XR=15.2MM,P=0.06KG/MM**2)
YRANGE     0.0      200.
XRANGE     0.0      10000.
PLOT3      XVALU    1      YVALU    1      XVALU    2      YVALU    2
           XVALU    3      YVALU    3      XVALU    4      YVALU    4
           XVALU    5      YVALU    5
*
CURVE      1      0      CASE1
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     K=1.024E-09,N=2.05,XR=15.2,P=0.06
YRANGE     0.0      30.
XRANGE     0.0      10000.
PLOT3      XVALU    1      YVALU    1
*
CURVE      1      0      CASE2
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     K=4.151E-09,N=2.05,XR=15.2,P=0.06
YRANGE     0.0      200.
XRANGE     0.0      7.0E3
PLOT3      XVALU    2      YVALU    2
*
CURVE      1      0      CASE3
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     K=1.024E-09,N=3.05,XR=15.2,P=0.06
YRANGE     0.0      200.
XRANGE     0.0      1.4E3
PLOT3      XVALU    3      YVALU    3
*
CURVE      1      0      CASE4
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     K=8.358E-09,N=2.05,XR=15.2,P=0.06
YRANGE     0.0      200.
XRANGE     0.0      3.5E3
PLOT3      XVALU    4      YVALU    4
*
CURVE      1      0      CASE5
XTITLE     T (HR)
YTITLE     WHAX (MM)
PTITLE     K=1.024E-09,N=3.45,XR=15.2,P=0.06
YRANGE     0.0      80.
XRANGE     0.0      500.
PLOT3      XVALU    5      YVALU    5
END OUTPUT
END FINAS

```

Fig. I.12 Example of XYPLOT Data for Output ( $t-w_{max}$ )

FINAS

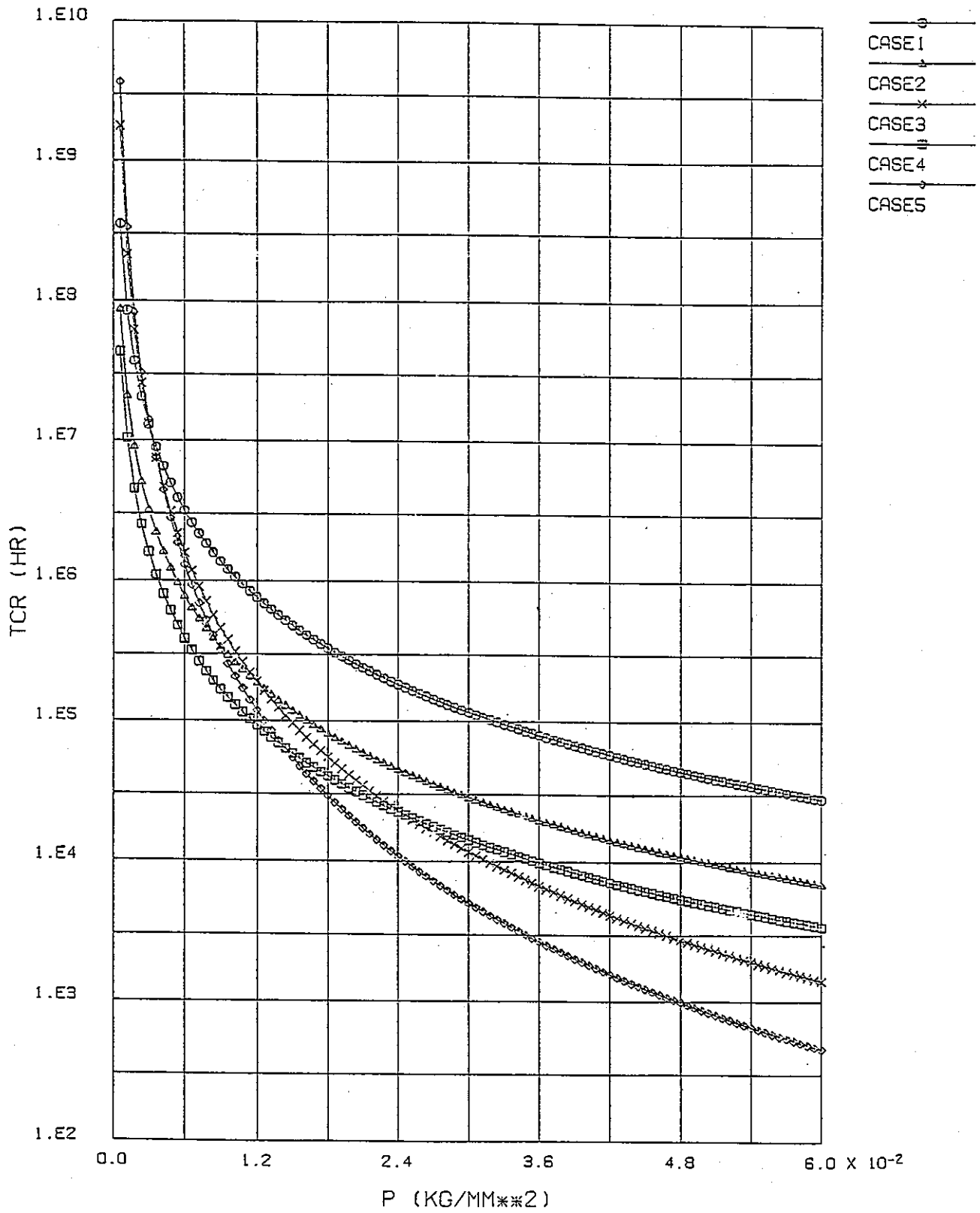
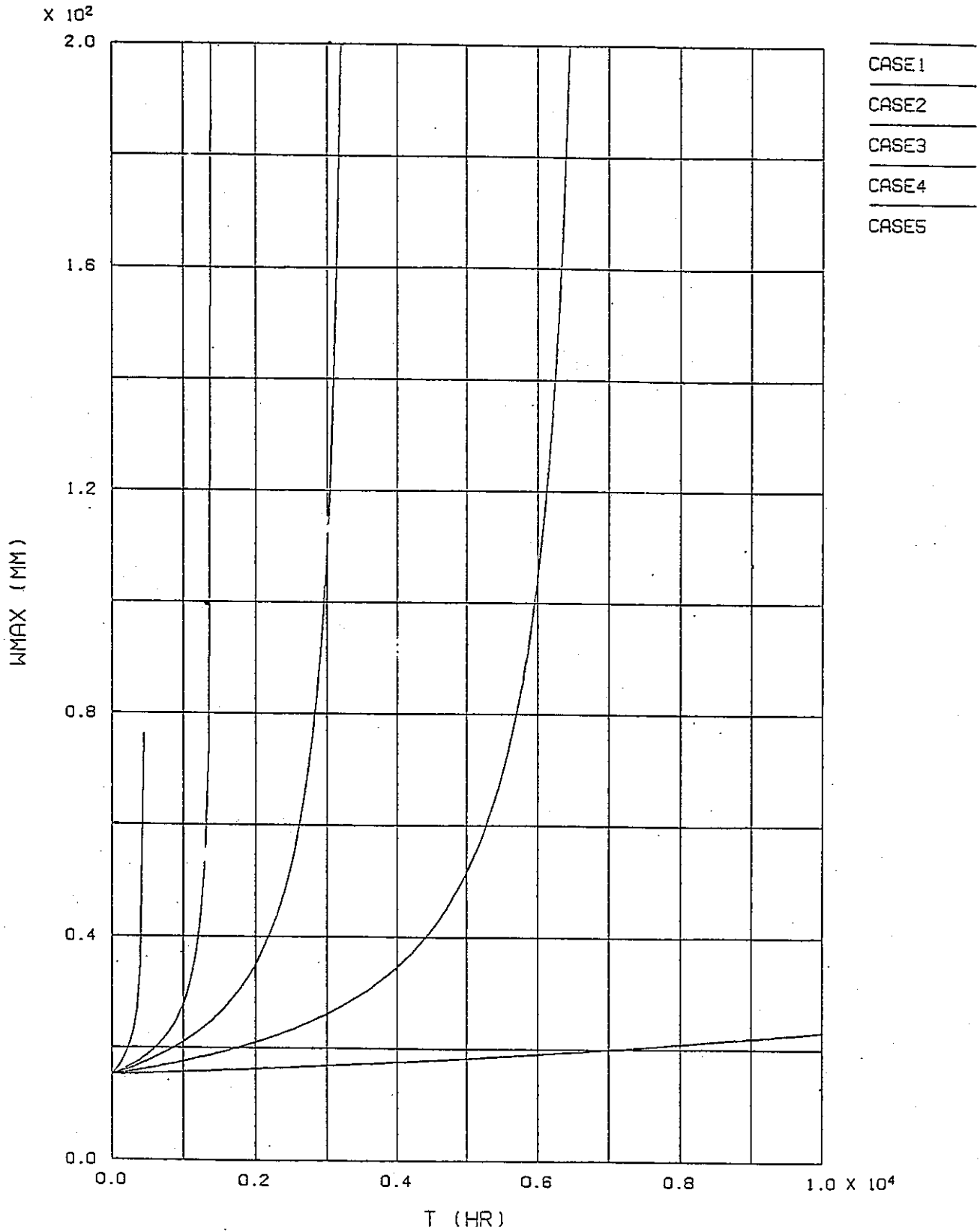


Fig. I.13 Example of XYPLOT (p-T<sub>cr</sub>)

FINAS



5CASE OVER PLOT (XR=15.2MM,P=0.06KG/MM\*\*2)

Fig. I.14 Example of XYPLOT (t-w<sub>max</sub>)



## II. 付属プログラム

### II.1 入力データ

入力データは、Norton則パラメータ、初期たわみパラメータおよび任意の時間よりなる入力データと主プログラムより出力された入力データよりなる。

#### II.1.1 入力データ形式

##### II.1.1.1 入力データ形式(1)

Norton則パラメータ、初期たわみパラメータおよび任意の時間よりなる入力データ形式をFig. II.1に示す。

##### II.1.1.2 入力データ形式(2)

主プログラムよりなる入力データ形式をFig. II.2に示す。

#### II.1.2 入力データの内容( II.1.1 入力データ形式に対応する )

##### II.1.2.1 入力データの内容(1)

入力データの内容をFig. II.1に示す。

##### II.1.2.2 入力データの内容(2)

入力データの内容をFig. II.2に示す。

#### II.1.3 入力データの例

##### II.1.3.1 入力データの例(1)

II.1.1.1項の入力形式による入力データの例をFig. II.3に示す。

##### II.1.3.2 入力データの例(2)

II.1.1.2項の入力形式による入力データの例をFig. II.4に示す。

### II.2 使用方法

#### II.2.1 バッチ形式の使用

ジョブコントロールカードをFig. II.5に示す。ジョブコントロールカードの下線部を各々のケースにおいて変えて実行する。次に下線部の説明をする。上段より、(1)ソースプログラム、(2)II.1.1.1項で作成した入力データファイル、(3)図出力用データ出力先、(4)II.1.1.2項の入力データファイル、以上を示す。(4)の入力データについては、主プログラムより作成される。

### II.3 出力データ

#### II.3.1 出力データの種類

##### II.3.1.1 図出力のためのデータ(ファイル出力)

任意の時間  $t$ 、最大たわみ量  $w_{max}$  を出力

##### II.3.1.2 入力データおよび計算結果の出力(リスト出力)

初期たわみパラメータ、Norton則パラメータ、計算結果を出力

#### II.3.2 出力データ形式

##### II.3.2.1 図(XYPLOT)出力のためのデータ形式

出力データ形式をFig. II.6に示す。XVALUに任意の時間 $t$ ，YVALUに最大たわみ量 $w_{\max}$ を出力する。

#### II.3.2.2 リスト出力のデータ形式

リスト出力のデータ形式および内容説明をFig. II.7に示す。

#### II.3.3 出力データの例

出力データの例をFig. II.8 ( II.3.2.2項 )に示す。なお，II.3.2.1項の例は，主プログラムのFig. I.7を参照。

#### II.4 図(XY PLOT)の出力

主プログラムと使用方法については，同様であり出力例についてもFig. I.14を参照のこと。

II. 5 ソースリスト

```

* *****
* *
* *          ++ INPUT DATA COMENT ++
* *
* *   ZZN ;
* *   XR ;
* *   TF ;
* *
* *****
* *****
* *
* *          +++ MAIN ROUTIN +++
* *
* *          BELLOWS
* *          INTERNAL PRESSURE
* *
* *****
* COMMON TT,XR,ZN,S9
* DIMENSION S11(0:201,5),S12(0:201,5),TJJ(0:201),
*           ZZN(5),BE(5)
* READ ( 5,650 ) (ZZN(I),I=1,5),XR,TF
* READ ( 11,600,END=999 ) (BE(I),I=1,5)
*
* DO 300 I = 1 , 5
*
*     ZN = ZZN(I)
*     S9 = BE(I)
*
*           WRITE ( 6 , 700 ) XR,ZZN(I),TF,BE(I)
*
*     TJJ(0) = 0.0
*     TJ = 0.0
*     TT = 0.0
*
* DO 250 J = 0 , 200
*
*     TT = TJJ(J)
*     TJ = TF/200.0
*     TJJ(J+1) = TJJ(J)+TJ
*
*     WRITE ( 6 , * ) TT
*
*     IF( ZN .EQ. 1.0 ) THEN
*         CALL CASE11( S11(J,I) )
*     ELSE
*         CALL CASE12( S11(J,I) )
*     ENDIF
*
*     CALL CASE13( S11(J,:),S12(J,I) )
*
* 250 CONTINUE
*
* WRITE ( 6 , 800 ) BE(I),S11(200,I),S12(200,I)
* WRITE ( 10 , 1000 ) I,(TJJ(J),J=0,200)
* WRITE ( 10 , 1100 ) I,(S12(J,I),J=0,200)
*
* 600 FORMAT (10X,5(E10.0))
* 650 FORMAT (10X,5F10.0/10X,5F10.0/10X,2F10.0)
* 700 FORMAT (1H,'XR=',1PE15.5,5X,'N=',0PF10.5,5X,'T=',1PE15.5,
*           5X,'S9=',1PE15.5)
* 800 FORMAT ( 1H,'S9 =',E15.7,5X,
*           /1H,'S11=',E15.7,5X,'S12=',E15.7 )
* 1000 FORMAT ('XVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)))
* 1100 FORMAT ('YVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)))
* 300 CONTINUE
* 999 CONTINUE
* STOP
* END
* *****
* *****
* *          CASE11
* *
* *          ( 2-68 )
* *
* *****
* *****
* SUBROUTINE CASE11(S11)
* COMMON TT,XR,ZN,S9
*
*     SS9 = 0.0

```

```

S11 = 0.0
EE = 2.718281828
*
SS9 = S9*TT
S11 = EE**(SS9)
*
WRITE ( 6 , 100 ) S11,SS9
*100 FORMAT ( 1H ,4HS11=,1PE15.8,5X,4HSS9=,1PE15.8 )
RETURN
END
*****
*
*          CASE12
*
*          ( 2-69 )
*
*****
SUBROUTINE CASE12(S11)
COMMON TT,XR,ZN,S9
*
ZMZ = 0.0
ZAZ = 0.0
XZX = 0.0
SS9 = 0.0
S11 = 0.0
*
ZMZ = -(1/(ZN-1))
ZAZ = ZN-1
XZX = S9*ZAZ*TT
SS9 = 1-XZX
*
IF( SS9 . LT . 0.0 ) GO TO 900
*
S11 = SS9**ZMZ
*
900 RETURN
END
*****
*
*          CASE13
*
*          ( 2-72 )
*
*****
SUBROUTINE CASE13(S11,S12)
COMMON TT,XR,ZN,S9
*
S12 = 0.0
*
S12 = S11*XR
*
WRITE ( 6 , 100 ) S12
*100 FORMAT ( 1H ,4HS12=,E15.8)
RETURN
END

```

```

00810000
00820000
00830000
00840000
00850000
00860000
00870000
00880000
00890000
00900000
00910000
00920000
00930000
00940000
00950000
00960000
00970000
00980000
00990000
01000000
01010000
01020000
01030000
01040000
01050000
01060000
01070000
01080000
01090000
01100000
01110000
01120000
01130000
01140000
01150000
01160000
01170000
01180000
01190000
01200000
01210000
01220000
01230000
01240000
01250000
01260000
01270000
01280000
01290000
01300000
01310000
01320000
01330000
01340000
01350000

```

	10	20	30	40	50	60
A	n(1)	n(2)	n(3)	n(4)	n(5)	
B	$X_r$	t				

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内 容
A	11~20	実 数	n(1)	Norton則パラメータ
	21~30	"	n(2)	"
	31~40	"	n(3)	"
	41~50	"	n(4)	"
	51~60	"	n(5)	"
B	11~20	実 数	$X_r$	初期たわみパラメータ
	21~30	"	t	任意の時間

Fig. II. 1 Input Data Form (1)

	10	20	30	40	50	60
A	$\beta(1)$	$\beta(2)$	$\beta(3)$	$\beta(4)$	$\beta(5)$	

カードの種類	カラム	タイプ	変数	内 容
A	11~20	実 数	$\beta(1)$	式(2-37)による値
	21~30	"	$\beta(2)$	"
	31~40	"	$\beta(3)$	"
	41~50	"	$\beta(4)$	"
	51~60	"	$\beta(5)$	"

Fig. II.2 Input Data Form (2)

2.05      2.05      3.05      2.05      3.45  
 15.2E-0 1.000E+04

Fig. II.3 Example of Input Data (1)

3.399E-05 1.378E-04 3.475E-04 2.774E-04 8.896E-04

Fig. II.4 Example of Input Data (2)

```
//Q303C1 JOB (ENG),F.GOTOH,MSGCLASS=S,NOTIFY=Q303C,
//      MSGLEVEL=(1,1),SYSTEM=BEP1,
//      ATTR=(T1,C1,W2)
// EXEC FORT7CLG,PARM='LC(99)',GOREGN=1400K
//FORT.SYSPRINT DD DSN=&&COMPACT,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//      SPACE=(TRK,(200,100),RLSE)
//FORT.SYSIN DD DSN=Q303C.FG.FORT(CREEP3E),UNIT=SYSDA,DISP=SHR
//LKED.SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR ← (1)
//      DD DSN=SYS1.SSL2,DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUNNY
//GO.FT05F001 DD DSN=Q303C.FG.OUT(TDA3288),UNIT=DASD,DISP=SHR
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=* ← (2)
//GO.FT10F001 DD DSN=Q303C.FG05.TDA3288,UNIT=DASD,
//      DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE), ← (3)
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
//GO.FT11F001 DD DSN=Q303C.FG11.TDA3288,UNIT=DASD,DISP=SHR
//GO.FT21F001 DD DSN=&&POS,UNIT=WORK, ← (4)
//      SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),DISP=(NEW,PASS),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200,BUFNO=1)
//*SYSIN DD DUNNY
//COMPACT EXEC COMPACT,COND=EVEN
//
```

Fig. II.5 JCL

	10	20	30	40	50	60	70	80
A	XVALU	xvid	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
			x <sub>7</sub>	-----	-----	-----	-----	x <sub>n</sub>

	10	20	30	40	50	60	70	80
B	YVALU	yvid	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>
			y <sub>1</sub>	-----	-----	-----	-----	y <sub>n</sub>

カードの種類	カラム	タイプ	変数	
A	1~5	英 字	-	1~5 カラムにXV A LUと記入
	11~15	正整数	xvid	値の並びの識別番号
	21~30	実 数	x <sub>1</sub>	1 番目の値
	31~40	"	x <sub>2</sub>	2 番目の値
	⋮	⋮	⋮	⋮
	71~80	"	x <sub>6</sub>	6 番目の値
				値の個数が6 を越える場合には次のカード の21~80 カラムに10 カラム単位で記入
B	1~5	英 字	-	1~5 カラムにYV A LUと記入
	11~15	正整数	yvid	値の並びの識別番号
	21~30	実 数	y <sub>1</sub>	1 番目の値
	31~40	"	y <sub>2</sub>	2 番目の値
	⋮	⋮	⋮	⋮
	71~80	実 数	y <sub>6</sub>	6 番目の値
				値の個数が6 を越える場合には次のカード の21~80 カラムに10 カラム単位で記入

Fig. II.6 Output Data Form

XR=                    N=                    T=                    S9=  
 S9 =  
 S11=                    S12=

記号	内容
XR	初期たわみパラメータ $X_r$
N	Norton則パラメータ $n(n)$
T	任意の時間 $t$
S9	式(2-37)の $\beta(n)$ 値
S9	"
S11	式(2-68)の解
S12	式(2-69)の解

Fig. II.7 Data Form of List Output



XR=	1.52000E+01	N=	2.05000	T=	1.00000E+04	S9=	3.39900E-05
S9 =	0.3399000E-04						
S11=	0.1522610E+01	S12=	0.2314366E+02				
XR=	1.52000E+01	N=	2.05000	T=	1.00000E+04	S9=	1.37800E-04
S9 =	0.1378000E-03						
S11=	0.0000000E+00	S12=	0.0000000E+00				
XR=	1.52000E+01	N=	3.05000	T=	1.00000E+04	S9=	3.47500E-04
S9 =	0.3475000E-03						
S11=	0.0000000E+00	S12=	0.0000000E+00				
XR=	1.52000E+01	N=	2.05000	T=	1.00000E+04	S9=	2.77400E-04
S9 =	0.2774000E-03						
S11=	0.0000000E+00	S12=	0.0000000E+00				
XR=	1.52000E+01	N=	3.45000	T=	1.00000E+04	S9=	8.89600E-04
S9 =	0.8896000E-03						
S11=	0.0000000E+00	S12=	0.0000000E+00				

Fig II.8 Example of Output Data

## ☆ 解 析 例

### (1) 解析条件

#### ○ベローズ寸法, 形状

- ピッチ径 :  $d_p = 1160 \text{ mm}$
- ピッチ :  $q = 50 \text{ mm}$
- 山高 :  $H = 60 \text{ mm}$
- 板厚 :  $h(t_p) = 1.89 \text{ mm}$
- 長さ :  $L = qN = 700 \text{ mm}$  ( $N = 14$ )

#### ○材料~SUS316 (注)

#### • Norton則パラメータ ( $k, n$ )

- case 1 ( $1.024 \times 10^{-9}, 2.05$ )
- case 2 ( $4.151 \times 10^{-9}, 2.05$ )
- case 3 ( $1.024 \times 10^{-9}, 3.05$ )
- case 4 ( $8.358 \times 10^{-9}, 2.05$ )
- case 5 ( $1.024 \times 10^{-9}, 3.45$ )

#### ○初期不整パラメータ $X_r, \gamma$ , 内圧 $p$

- $X_r = 15.2 \text{ mm}, \gamma = 0.5$
- $p = 6.0 \text{ kg/cm}^2$

### (2) 解析結果

解析結果をFig. III.1及びFig. III.2に示す。Fig. III.1は、内圧 $p$ と座屈時間 $T_{cr}$ の関係を示す。case 3について、座屈時間 $T_{cr}$ が1000hとすると保持内圧 $p$ は $6.6 \text{ kg/cm}^2$ 程度になる。

Fig. III.2は圧力 $p = 6 \text{ kg/cm}^2$ の場合の時間 $t$ と最大変位 $w_{max}$ との関係を示す。case 3は1400hr程度で座屈することがわかる。

解析結果は、クリープ座屈挙動をよく表わしていると言えるが、Norton則のパラメータの選択によって定量的に結果が大きく変わってくるので注意を要する。

---

(注)  $k, n$ を決めた方法については、補遺として後述する。

— 補 遺 — Norton則パラメータ k, n の決定について

実際のクリープ挙動は、Norton則で表わされるほど単純ではないが、ここではNorton則のパラメータ k, n を決定するために、材料試験データに基づくBlackburnタイプの式を使って最小自乗法による近似を行った。

SUS316鋼のクリープひずみ式は、Fig. III.3で与えられる<sup>6)</sup>。これから、クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_c$  は、

$$\dot{\epsilon}_c = r_1 C_1 e^{-r_1 t} + r_2 C_2 e^{-r_2 t} + \dot{\epsilon}_m \dots\dots\dots (III-1)$$

この式から、m個の  $(\ln \sigma, \ln \dot{\epsilon}_c)$  のペアを求め、次の値を計算する。

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \sum_{i=1}^m (\ln \sigma_i) & S_y &= \sum_{i=1}^m (\ln \dot{\epsilon}_{ci}) \\ S_{xx} &= \sum_{i=1}^m (\ln \sigma_i)^2 & S_{xy} &= \sum_{i=1}^m (\ln \dot{\epsilon}_{ci} \ln \sigma_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (III-2)$$

Norton 則のパラメータ n, k を次式で求める。

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{m S_{xy} - S_x S_y}{m S_{xx} - S_x^2} \\ \ln k &= \frac{S_{xx} S_y - S_x S_{xy}}{m S_{xx} - S_x^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (III-3)$$

次に具体的に計算を行った結果を示す。温度 T = 600℃、応力の範囲は  $\sigma = 1 \sim 30 \text{ kg/mm}^2$  で増分  $\Delta \sigma = 1 \text{ kg/mm}^2$ 、即ち m = 30 とする。Fig. III-4 は t = 1000hr の場合について式 (III-1) から求めた  $\ln \dot{\epsilon}_c$  と  $\ln \sigma$  と直線回帰したものを比較した1例である。直線回帰する範囲が異なると n, k の値もかなり違ってくる。Fig. III.5 は、挙動のばらつき  $\alpha_c$ 、ピックアップする応力の範囲、時間 t をサーベイして SUS 316 の n,  $\ln k$  のデータ群をプロットしている。参考のために、SUS 304 のデータ群を併記しているが、明らかに SUS 316 とは離れた領域に分布している。前述の解析例では、この図に示されるデータの分布を考慮して5つの n, k の組合せを選定した。

FINAS

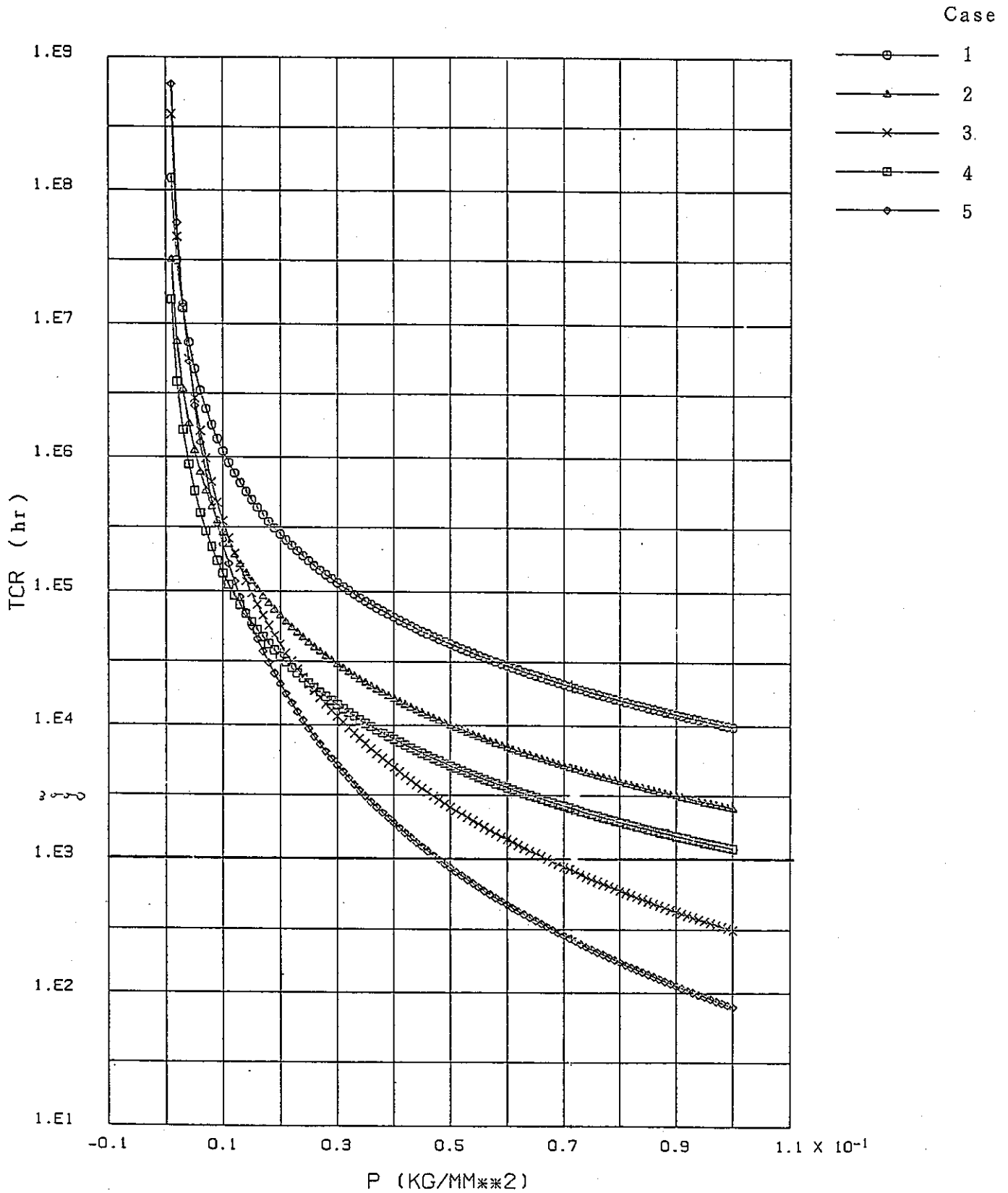
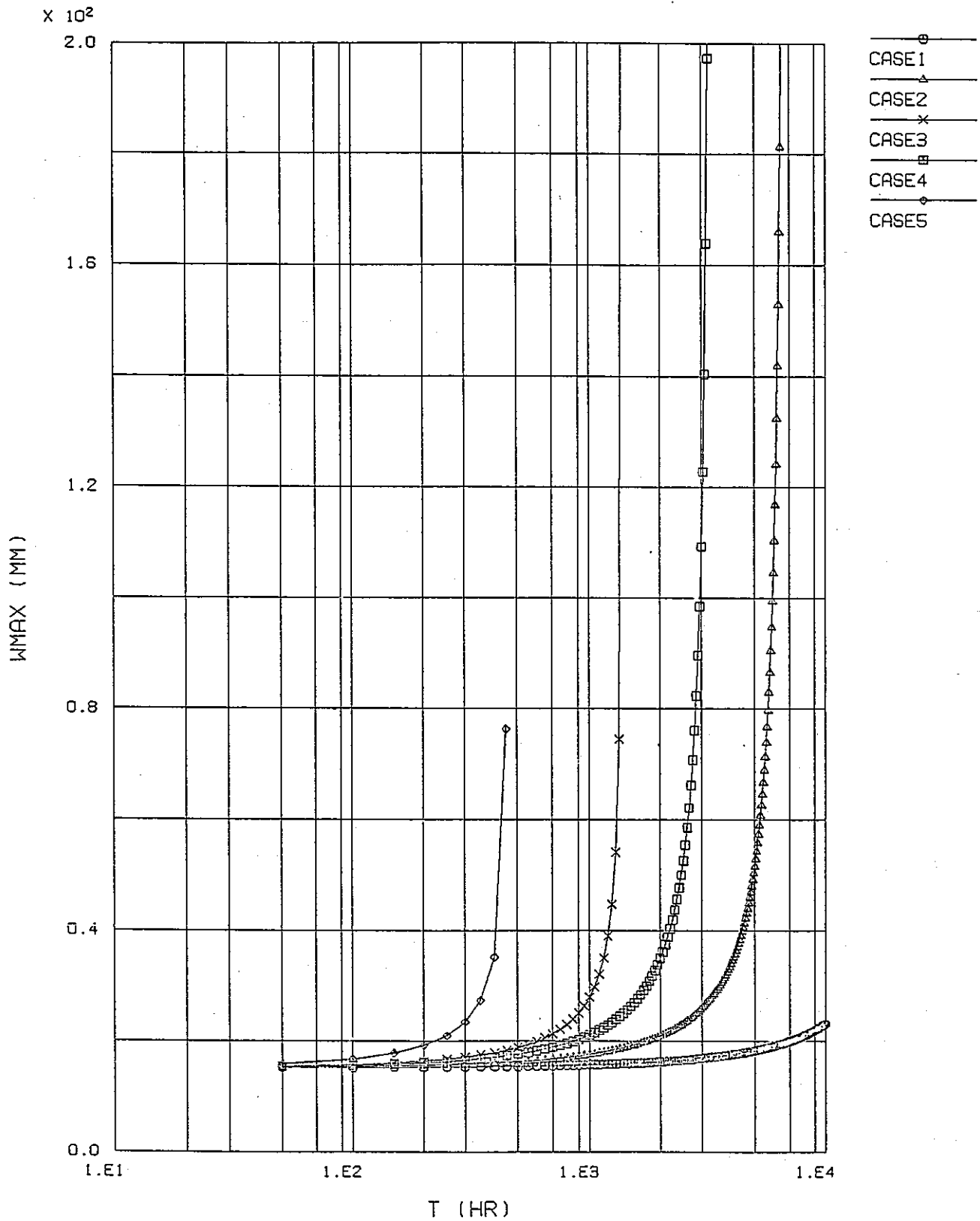


Fig. III.1 Analysis Result (p-T<sub>cr</sub>)

X<sub>r</sub> = 15.2 mm

FINAS



SCASE OVER PLOT (XR=15.2MM,P=0.06KG/MM\*\*2)

Fig. III,2 Analysis Result (t-w<sub>max</sub>)

$$\epsilon_c = C_1 (1 - e^{-r_1 t}) + C_2 (1 - e^{-r_2 t}) + \dot{\epsilon}_m t$$

使用単位

T : 温度 (°C)            425 ≤ T ≤ 650

σ : 応力 (kg/mm<sup>2</sup>)        0.7 ≤ σ

t<sub>R</sub> : 破断時間 (hr)

•ε<sub>m</sub> : 定常クリープ速度 (mm/mm/hr)

t : 時間 (hr)

t <sub>R</sub>	$\log_{10}(\alpha_c t_R) = -17.37762 + \frac{229832}{T+273.15} - \frac{798521}{T+273.15} \log_{10} \sigma - \frac{2163.93}{T+273.15} (\log_{10} \sigma)^2$		
•ε <sub>m</sub>	$591190 \cdot \exp\left[-\frac{934750}{8.31 \cdot (T+273.15)}\right] \cdot t_R^{-1.1126}$		
C <sub>1</sub>	$1.2692 \cdot \dot{\epsilon}_m^{0.74491} / r_1$	C <sub>2</sub>	$0.48449 \cdot \dot{\epsilon}_m^{0.81155} / r_2$
r <sub>1</sub>	$103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$	r <sub>2</sub>	$17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$

ただし、α<sub>c</sub> はクリープひずみ挙動のばらつきを表示するための時間係数である。

Fig. III. 3 Creep Strain of SUS316

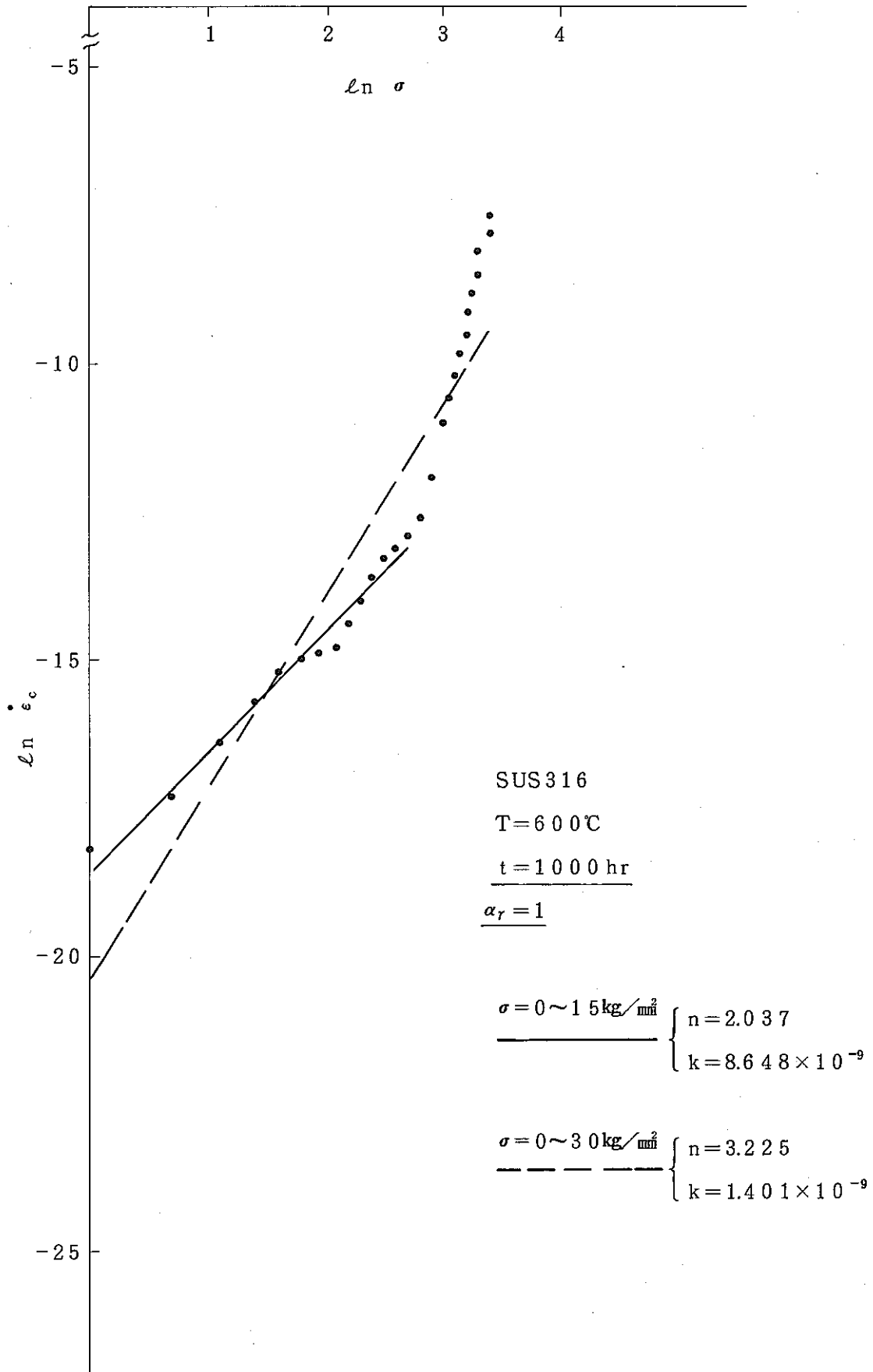


Fig. III.4  $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}_c$

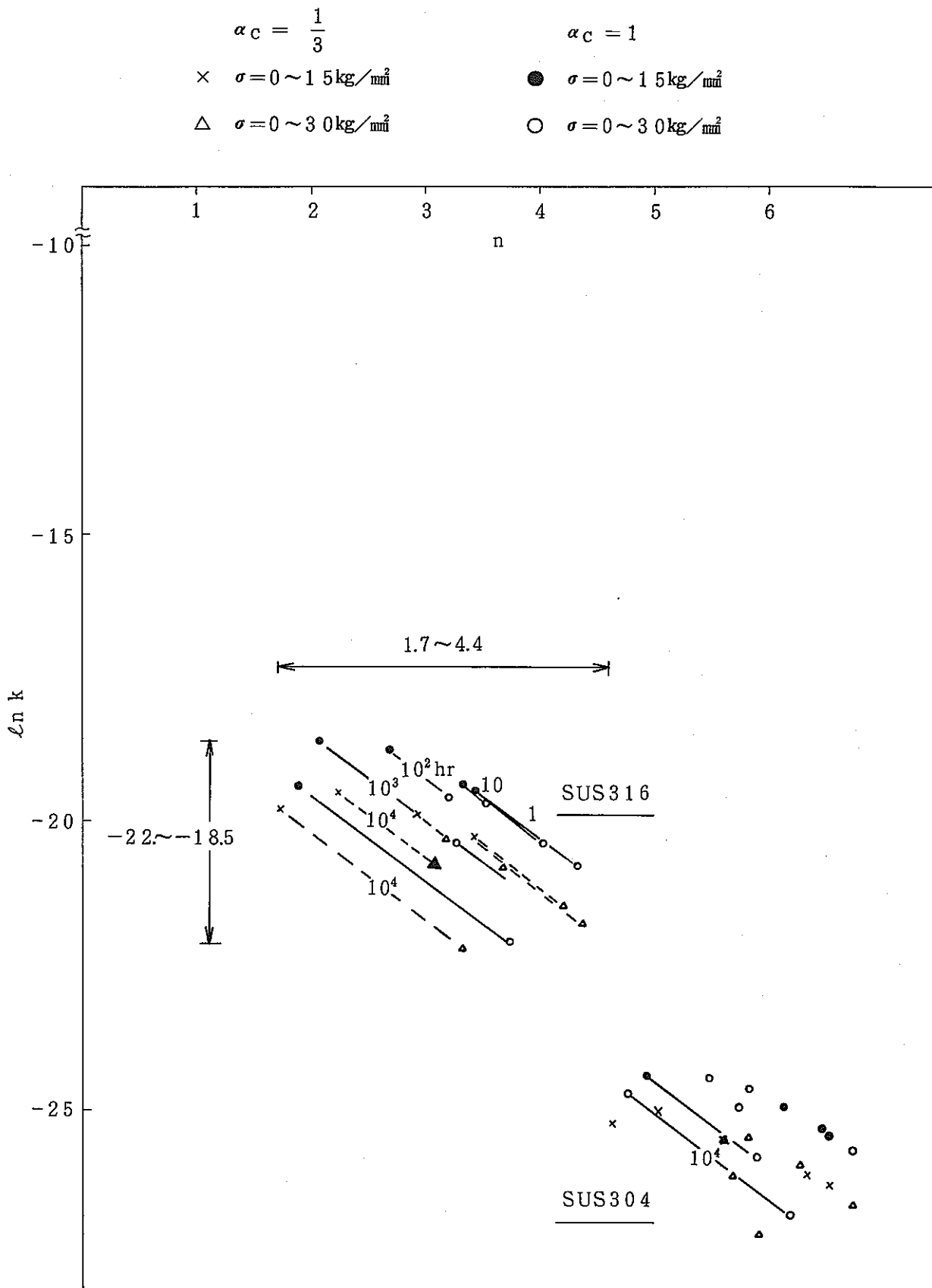


Fig. III.5 n-lnk



参 考 文 献

- 1) 中原一郎, 材料力学上巻, 養賢堂, 1974.
- 2) F. K. G. オドクビスト, J. ハルト著, 村上澄男訳, クリーブ強さの理論, 培風館, 1967.
- 3) 牧野不二雄, 渡辺宏, 微分方程式序論(改訂版), 東海大学出版会, 1966.
- 4) 西村勇城, 理工系 微分積分学, 槇書店, 1967.
- 5) F I N A S 汎用非線形構造解析システム使用説明書V. 9.0(1986, 3),  
(PNC N952 85-28)
- 6) 解説 高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等(1984, 11)  
(M280 85-02(7))

#### 4. ベローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数

ベローズは、複数のコンボリューションが直列に連結された構造であり、各コンボリューションの製作上の形状・寸法のわずかな差異によってひずみのばらつきが生じる可能性がある。設計上はこの割増しを考慮して合理的にひずみを評価する必要がある。既報“ベローズの解析のための簡易計算手法”<sup>1)</sup>では、コンボリューションひとつひとつを弾性ばねとみなし、ASME C.C.N-290の繰返し寸法公差を利用してひずみ割増し係数を求める簡易手法を示した。この手法は、通常の設計範囲ではほぼ妥当と言えるが、弾性ベースであり、非弾性ひずみ集中とは独立な扱いとなっているために適用範囲の拡大、評価法の高度化を考えた場合、改良の余地は残る。ここに示す手法は、既報の手法を更に一般化して、圧力荷重の影響、塑性の影響を含めた形に拡張したものである。

なお、既報<sup>1)</sup>に示したひずみ割増係数 $f_3$ に関する若干の検討を付録の中に補遺として記す。

### List of Figures

Fig.1-1 Simplified Evaluation Methods of Bellows Ratchetting... 162  
Fig.3-1 Analysis Model of Bellows ..... 163  
Fig.4-1 Strain Amplification Factor in Elastic Region ..... 164  
Fig.4-2 Strain Amplification Factor in Shake Down Region ..... 165  
Fig.4-3 Strain Amplification Factor in Ratchet Region..... 166  
Fig.4-4 Treatment of the Progressive Displacement "d<sup>t</sup>" ..... 167  
Fig.4-5 Strain Amplification Factor in Plastic Loop Region..... 168



Fig.I.1  $f_{\epsilon} (N=10, t_n=2, \eta_H=0.06, \eta_t=0.1, \kappa=2)$  ..... 171  
Fig.I.2  $f_{\epsilon} (N=10, t_n=2, \eta_H=0.06, \eta_t=0.1, \kappa=3)$  ..... 172

#### 4.1 単純化した簡易ラチェット評価法の利用

ベローズのラチェット挙動については、Fig.1-1(1)に示す簡易評価法が提案されている<sup>1)</sup>。

ここでは、弾塑性域での山毎の変形の不揃い（ピッチ変化の比率）を考慮したひずみ割増し係数を検討することを主眼としているので、簡単のため、Fig.1-1(2)の単純化した簡易ラチェット評価法を利用する。これは、弾性と全断面降伏（曲げ崩壊）の遷移領域を無視したもので、もとの簡易評価法に比べて、弾性（E）領域は1.5倍に拡大されるが、シェイクダウン（S）領域は逆に多少保守的となる。

#### 4.2 弾塑性ひずみ割増し係数の前提

- (1) 寸法、材料定数を勘案して最も保守的に評価した最大ひずみと公称寸法、設計材料特性で評価した最大ひずみの比をひずみ割増し係数とする。材料は弾完全塑性体とする。
- (2) 1つのベローズについては、各コンボリューションの材料特性に違いはないものとする。
- (3) ベローズのコンボリューション毎の特性のばらつきは、寸法のばらつきに起因するものとして、板厚、山高について、ASME C. C. N-290における基本寸法公差と繰返し寸法公差の両者を適用する。
- (4) 山間の変形の不揃いについては最も保守的な評価として1山のみ剛性が低く、他の山は一樣とし、その設定としては、(3)の寸法公差範囲で最も厳しい場合を採用する。

#### 4.3 評価モデル、記号及び基本的諸量

Fig. 3-1に評価対象とするベローズを示す。

以下の展開では、剛性の高いコンボリューションに関する諸量については添字(1)を、剛性の低いコンボリューションに関しては(2)を、平均値については(av)を、最大値、最小値についてはそれぞれ(max)、(min)を、公称値、設計材料特性については(n)を付す。

使用する主な記号は次の通りである。

- N ; 山 数
- q ; ピッチ
- H ; 山 高
- $t_p$  ; 補正板厚
- $d_p$  ; ピッチ径
- e ; 1山当りの変位（範囲を強調する場合  $d_e$ ）
- $\delta_T$  ; 全変位範囲
- p ; 圧 力
- Sy ; 降伏応力
- E ; 弾性定数

- $C_d, C_p$  : EJMA 係数 (寸法公差による区別はしない)  
 $k$  : 1/4 山当りの変位 ( $\frac{e}{4}$ ) と曲げモーメント ( $M_d$ ) の関係を表わす一種のばね定数  
 $M_y$  : 曲げ崩壊モーメント  
 $M_p$  : 圧力によって生じる曲げモーメント  
 $M_d$  : 変位によって生じる曲げモーメント  
 $e_y$  : 弾性計算で  $M_y$  に等しいモーメントを与える変位  
 $\sigma_{b,m}^p$  : 圧力による子午線方向曲げ応力  
 $\sigma_{b,m}^d$  : 変位による子午線方向曲げ応力  
 $\alpha$  : 式 (3-13) に示される無次元パラメータ  
 $\beta_H, \beta_t$  : 山高, 板厚についての繰返し寸法公差の幅を与えるパラメータ  
 $q^*$  : 弾性追従パラメータ (ベローズ 1 山, 弾塑性)  
 $Ke'$  : ひずみ集中係数 (ベローズ 1 山, 弾塑性)  
 $X^*, Y^*$  : 無次元化 1 次及び 2 次応力パラメータ  

$$\begin{cases} X^* = \sigma_{b,m}^p / S_y \\ Y^* = \sigma_{b,m}^d / S_y \end{cases}$$
 $\kappa$  :  $Ke'$  式の中で  $\Delta S$  を決めるパラメータ

基本的な物理量は下記の通り。応力評価式については EJMA。

$$M_y = \frac{t_p^2}{4} S_y \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

$$M_p = \frac{t_p^2}{6} \sigma_{b,m}^p = \frac{t_p^2}{12} \cdot \left(\frac{H}{t_p}\right)^2 C_p \cdot p = \frac{H^2 C_p}{12} p \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$M_d = \frac{t_p^2}{6} \sigma_{b,m}^d = \frac{5E t_p^3}{18H^2 C_d} e = \frac{10E t_p^3}{9H^2 C_d} \cdot \frac{e}{4} = k \cdot \frac{e}{4} \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$$k = \frac{10E t_p^3}{9H^2 C_d} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

$$\frac{e_y}{4} = \frac{9S_y H^2 C_d}{40E t_p} \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

Fig. 3-1(3)より, モーメントの釣合いは,

$$(左) M_{d3} = M_{d1} - F_A H_1 - F_L \cdot \frac{q}{2} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

$$(右) \quad M_{d3} = M_{d2} - F_A H_2 + F_L \cdot \frac{q}{2} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

これは、厳密には左右モーメントのバランスで変形が決まる不静定問題であるが、全体モデルで横方向荷重がないことから、

$$F_L = 0 \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

とおく。Fig. 1-1に示した評価法は半山を対象としたものであり、両端回転拘束で軸直変位を許す一様断面はりに基礎を置いている。従って式(3-8)を考慮しても、Fig. 3-1(3)のモーメントダイアグラムに示されるような両端のモーメントのアンバランスを厳密に考慮することはできない。そこで、敢えて、モーメントの不連続を許容して、軸方向の力の釣合いのみ満たす次式を仮定する。

$$\frac{M_{d1}}{H_1} = \frac{M_{d2}}{H_2} \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

#### 4.4 ひずみ割増し係数の簡易評価

##### (1) 弾性式 (Fig. 4-1 参照)

コンポリューションがすべて弾性挙動をする領域を考える。半山当りの変位と曲げモーメントの関係はFig. 4-1の通りとなる。図中、(N-1)ケの剛性の高いコンポリューションのばね定数をk<sub>1</sub>、崩壊モーメントをM<sub>y1</sub>、1山当りの変位をe<sub>1</sub>、1ケの剛性の低いコンポリューションの各値には添字(2)を付している。M<sub>p</sub>は圧力によって生じる曲げモーメントである。

ベローズ全体の変位δ<sub>T</sub>と変位負荷後の力の釣合いについて式(3-9)を考慮すると次の2式が得られる。

$$(N-1)e_1 + e_2 = \delta_T = N e_{av} \quad \dots\dots\dots (3-10)$$

$$\frac{k_1 e_1}{H_1} = \frac{k_2 e_2}{H_2} \quad \dots\dots\dots (3-11)$$

2式から、e<sub>1</sub>を消去すると、

$$\left\{ \frac{H_1 k_2}{H_2 k_1} (N-1) + 1 \right\} e_2 = \delta_T \quad \dots\dots\dots (3-12)$$

式(3-4)から、

$$\frac{H_1 k_2}{H_2 k_1} = \left(\frac{t_{p2}}{t_{p1}}\right)^3 \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^3 = \frac{1}{\alpha} \quad (\alpha > 1) \quad \dots\dots\dots (3-13)$$

従って、

$$\frac{e_2}{e_{av}} = \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1) / N} \quad \dots\dots\dots (3-14)$$

式(3-14)は、既に提案されているコンポリューション毎の寸法のばらつきによって生じるひずみ集中の簡易評価法<sup>2)</sup>の中に示されるコンポリューション変位の集中を表わす式と同じ形である。但し、式(3-13)に示される $\alpha$ はピッチ径 $d_p$ に依存せず、従って軸負荷、曲げ負荷による違いは現われない。ASME C.C.N-290の繰返しの寸法公差を考慮した場合( (注)報告書2)とは添字の定義が逆)、

$$\frac{d_{p1}}{d_{p2}} \leq 1 + \frac{N}{N-1} \times \frac{\beta_d}{1 - \beta_d}, \quad \beta_d = 0.0015 \quad \dots\dots\dots (3-15a)$$

$$\frac{t_{p1}}{t_{p2}} \leq 1 + \frac{N}{N-1} \times \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}, \quad \beta_t = 0.06 \quad \dots\dots\dots (3-15b)$$

$$\frac{H_2}{H_1} \leq 1 + \frac{N}{N-1} \times \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}, \quad \beta_H = 0.03 \quad \dots\dots\dots (3-15c)$$

となり、 $d_p$ の最大、最小値の比は、 $t_p$ や $H$ に比べて1オーダー小さく、変位の集中に及ぼす効果は小さい。ひずみ割増し係数( $f_3$ )に相当する係数を求めてみると、

$$f_3' = 1.1673 \quad (N \rightarrow \infty) \quad \dots\dots\dots (3-16)$$

となり、既に提案されている $f_3$ (=1.173)と大差ない。

子午線方向曲げひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{b,m}$ は、

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{b,m} &= \frac{1}{E} (\sigma_{b,m}^d + \nu_{b,c}^d) \\ &= \frac{1 + \nu^2}{E} \sigma_{b,m}^d \quad \dots\dots\dots (3-17) \end{aligned}$$

EJMAスタンダードより、

$$\Delta \epsilon_{b,m} = (1 + \nu^2) \frac{5 t_p}{3 H^2 C_d} e \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

式(3-14)を用いると,

$$\Delta \varepsilon_{b,m2} = (1 + \nu^2) \frac{5 t_{p2}}{3 H_2^2 C_d} \cdot \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1) / N} \cdot e_{av} \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

変位によるひずみを式(3-19)の中で保守的に与えるためには,  $t_{p2}$ をできるだけ大きく,  $H_2$ をできるだけ小さくとらねばならない。そこで,  $t_{p1}$ を基本公差範囲で最大,  $H_1$ を最小とする。公称寸法を  $t_{pn}$ ,  $H_n$ , 片側公差と公称寸法の比をそれぞれ  $\eta_t$ ,  $\eta_H$  とすると,

$$t_{p1} = (1 + \eta_t) t_{pn} \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

$$H_1 = (1 - \eta_H) H_n \quad \dots\dots\dots (3-21)$$

式(3-20), (3-21)と式(3-15b), (3-15c)を式(3-19)に適用すると,

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{b,m2} &= (1 + \nu^2) \cdot \frac{5}{3 C_d} \cdot \frac{\alpha e_{av}}{1 + (\alpha - 1) / N} \cdot \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^2 \left(\frac{H_n}{H_1}\right)^2 \frac{t_{p2}}{t_{p1}} \frac{t_{p1}}{t_{pn}} \cdot \frac{t_{pn}}{H_n^2} \\ &= \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1) / N} \cdot \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right) (1 - \eta_H)^2} \\ &\quad \times (1 + \nu^2) \frac{5 t_{pn}}{3 C_d H_n^2} e_{av} \\ &= f_{\varepsilon E(N)} \Delta \varepsilon_{b,mn} \quad \dots\dots\dots (3-22) \end{aligned}$$

上式で,  $\Delta \varepsilon_{b,mn}$  は公称寸法, 平均変位で評価した子午線方向曲げひずみ範囲,  $f_{\varepsilon E}$  は弾性領域でのペローズのひずみ割増し係数を表わす。

$$f_{\varepsilon E(N)} = \frac{\alpha (1 + \eta_t)}{\left(1 + \frac{\alpha - 1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right) (1 - \eta_H)^2} \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

式(3-23)は,  $N \rightarrow \infty$ で保守的,

$$f_{\varepsilon E} = \frac{\alpha (1 + \eta_t)}{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right) (1 - \eta_H)^2} \quad (N \rightarrow \infty) \quad \dots (3-24)$$

C.C.N-290の寸法公差を適用すると,



$$\alpha = 1.3190 \dots\dots\dots (3-25a)$$

$$\beta_H = 0.03, \quad \beta_t = 0.06 \dots\dots\dots (3-25b)$$

$$\eta_H = 0.06, \quad \eta_t = 0.1 \dots\dots\dots (3-25c)$$

従って,

$$\underline{f_{\epsilon E} = 1.452} \dots\dots\dots (3-26)$$

弾性の範囲は、Fig. 4-1からわかるように,

$$e_2 \leq \frac{4 (M_{y2} - M_{p2})}{k_2} \dots\dots\dots (3-27)$$

式(3-1)~式(3-4)及び式(3-14)より,

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha-1}{N}} e_{av} &= \frac{9C_d Sy}{10E} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}} \left( 1 - \frac{C_p}{3Sy} p \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} \right) \\ &= \frac{9C_d Sy}{10E} \cdot \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 \left( \frac{H_1}{H_n} \right)^2 \frac{t_{p1}}{t_{p2}} \cdot \frac{t_{pn}}{t_{p1}} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \\ &\quad \times \left\{ 1 - \frac{C_p p}{3Sy} \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 \left( \frac{H_1}{H_n} \right)^2 \left( \frac{t_{p1}}{t_{p2}} \right)^2 \left( \frac{t_{pn}}{t_{p1}} \right)^2 \frac{H_n^2}{t_{pn}} \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (3-28)$$

N→∞のときは,

$$\begin{aligned} \alpha e_{av} &= \frac{9C_d Sy}{10E} \left( 1 + \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 (1-\eta_H)^2 \frac{1 + \frac{\beta_t}{1-\beta_t}}{1 + \eta_t} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \\ &\quad \times \left\{ 1 - \frac{C_p p}{3Sy} \left( \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 (1-\eta_H)^2 \frac{\left( 1 + \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^2}{(1 + \eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\} \dots\dots\dots (3-29) \end{aligned}$$

N=290の寸法公差を適用すると,

$$\underline{e_{av} \leq 0.6195 \frac{C_d Sy}{E} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \left( 1 - 0.2928 \frac{C_p}{Sy} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} p \right)} \dots\dots\dots (3-30)$$

(注) 式(3-26)に示されるひずみ割増し係数は既に提案されている $f_3 (= 1.173)$ に比べてかなり大きい、これは公称寸法ベースの評価として最悪の場合を想定しているた

めである。従って、実際のベローズの素材板厚に基づく寸法をベースとしてひずみ割増しを評価すれば余分な割増しは不要となり、次式のようにほぼ  $f_3$  に一致する。

$$f_{\epsilon E} (\text{actual dimension}) \doteq \frac{\alpha}{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)} \quad (N \rightarrow \infty) \dots (3-31a)$$

$$= 1.167 \quad (\text{C.C, N-290}) \dots (3-31b)$$

(2) シェークダウン域 ( Fig. 4-2 参照 )

ひとつの剛性の低いコンポリューションのみ若干降伏し、他の  $(N-1)$  山の剛性の高いコンポリューションは弾性挙動をする領域を考えると、半山当りの変位と曲げモーメントの関係は Fig. 4-2 の通りとなる。この場合、剛性の低いコンポリューションは初期に塑性変形するが、その後は弾性挙動となる。但し、最初のサイクルの塑性変形により、引張りで開始した場合は引張りの、圧縮で開始した場合は圧縮の変形が残留する。従って曲げ負荷を受けるベローズでは引張りと圧縮の残留変形が周方向に  $180^\circ$  離れた位置に生じることになる。

図中の記号については前述の弾性域に倣うが、負荷変位 (+) と除荷変位 (-) を分けて考える。ベローズの全変位を零に戻しても剛性の低いコンポリューションが塑性変形したことにより残留応力によるモーメントが発生するために、各コンポリューション毎に見た変位は零にはならず、零まで戻らない剛性の低いコンポリューションの変位を剛性の高いコンポリューションが均等に負担することになる。剛性の低いベローズ 1 山についてはシェークダウンと言え、山毎の動きから見てもシェークダウンと言え。

ベローズ全体の変位  $\delta_T$  と変位負荷後の力の釣合いについて式 ( 3-9 ) を考慮すると次の 2 式が得られる。

$$(N-1) e_1^+ + e_2^+ = \delta_T = N e_{av} \quad \dots (3-32)$$

$$\frac{k_1 e_1^+}{H_1} = \frac{4(M_{y2} - M_{p2})}{H_2} \quad \dots (3-33)$$

同様に変位除荷後については、

$$(N-1) e_1^- + e_2^- = 0 \quad \dots (3-34)$$

$$\frac{-k_1 e_1^-}{H_1} = \frac{k_2}{H_2} \left\{ e_2^+ - e_2^- - \frac{4(M_{y2} - M_{p2})}{k_2} \right\} \quad (3-35)$$

一方、変位範囲は、

$$\Delta e_1 = e_1^+ - e_1^-, \quad \Delta e_2 = e_2^+ - e_2^- \dots\dots\dots (3-36a, b)$$

従って,

$$(N-1) \Delta e_1 + \Delta e_2 = \delta_T = N e_{av} \dots\dots\dots (3-37)$$

$$\frac{k_1 \Delta e_1}{H_1} = \frac{k_2 \Delta e_2}{H_2} \dots\dots\dots (3-38)$$

式(3-37), (3-38)は, 式(3-10), (3-11)と全く同じ形であり, 同様に論を進めることが可能である。即ち,

$$\frac{\Delta e_2}{e_{av}} = \frac{\alpha}{1 + (\alpha-1)/N} \dots\dots\dots (3-39)$$

ここで,  $\alpha$ は式(3-13)に示される通りである。

初期の塑性ひずみを除く子午線方向曲げひずみ範囲は式(3-19)と同様,

$$\Delta \epsilon_{b,m2} = (1 + \nu^2) \frac{5 t_{p2}}{3 H_2^2 C_d} \cdot \frac{\alpha}{1 + (\alpha-1)/N} e_{av} \dots\dots\dots (3-40)$$

以下, 式(3-20)から式(3-26)まで全く同じ展開となる。

シェークダウンの範囲は, Fig. 4-2からわかるように,

$$\frac{4 (M_{y2} - M_{p2})}{k_2} < e_2^+ \dots\dots\dots (3-41)$$

$$\Delta e_1 \leq \frac{8 (M_{y2} - M_{p2})}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots (3-42)$$

式(3-41)については式(3-28)~式(3-30)と同様に考えられるので, N-290の寸法公差を適用した場合, 式(3-41)の領域は,

$$0.6195 \frac{C_d S_y}{E} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \left( 1 - 0.2928 \frac{C_p}{S_y} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} p \right) < e_{av} \dots\dots\dots (3-43)$$

式(3-42)については, 左辺は,

$$\Delta e_1 = \frac{N e_{av} - \Delta e_2}{N-1} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha-1}{N}} e_{av} \dots\dots\dots (3-44)$$

一方、右辺は、式(3-1)~(3-4)及び式(3-14)より、

$$\begin{aligned} \frac{8(M_{y2}-M_{p2})}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} &= \frac{18C_dSy}{10E} \cdot \frac{H_1^3 t_{p2}^2}{H_2 t_{p1}^3} \left(1 - \frac{C_p}{3Sy} \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} P\right) \\ &= \frac{18C_dSy}{10E} \cdot \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{t_{p2}^2}{t_{p1}^2} \cdot \frac{H_1^2}{H_n^2} \cdot \frac{t_{pn}}{t_{p1}} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \\ &\quad \times \left\{1 - \frac{C_p}{3Sy} \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 \left(\frac{H_1}{H_n}\right)^2 \left(\frac{t_{p1}}{t_{p2}}\right)^2 \left(\frac{t_{pn}}{t_{p1}}\right)^2 \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} P\right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3-45)$$

N→∞のとき、式(3-15 b, c)を用いると、式(3-42)は、

$$\begin{aligned} e_{av} &\leq \frac{18C_dSy}{10E} \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \\ &\quad \times \left\{1 - \frac{C_p}{3Sy} \frac{\left(1 + \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 (1-\eta_H)^2 \left(1 + \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2}{(1+\eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} P\right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3-46)$$

N=290の寸法公差を適用すると、式(3-25 b, c)から、

$$e_{av} \leq 1.239 \cdot \frac{C_dSy}{E} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \left(1 - 0.2928 \frac{C_p}{Sy} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} P\right) \quad \dots\dots\dots (3-47)$$

ここで、ベローズ板厚方向に発生する応力を局所的に見ると、この領域では全体としてシェイクダウン挙動であるが、内外表面層では弾性限界を越える可能性がある。子午線方向曲げ応力の最大値は、式(3-39)より、

$$\sigma_{b,m}^d = \frac{5Et_{p2}}{3H_2^2 C_d} \Delta e_z = \frac{5Et_{p2}}{3H_2^2 C_d} \cdot \frac{\alpha}{1+(\alpha-1)/N} e_{av} \quad \dots\dots\dots (3-47.1)$$

式(3-47.1)をシェイクダウン値( $\kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^p$ )に置いて、

$$e_{av}^* = \frac{3C_d H_2^2}{5Et_{p2}} \cdot \frac{1+(\alpha-1)/N}{\alpha} (\kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^p)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3C_d H_1^2}{5E t_{p1}} \cdot \frac{1+(\alpha-1)/N}{\alpha} \cdot \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (\kappa S_y - 2\sigma_{b,m}^p) \\
 &= \frac{3C_d H_n^2}{5E t_{pn}} \cdot \frac{1+(\alpha-1)/N}{\alpha} \cdot \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{1+\eta_t} (\kappa S_y - 2\sigma_{b,m}^p) \\
 & \dots\dots\dots (3-47.2)
 \end{aligned}$$

$\kappa$ はパラメータで内外表面の降伏の影響をどの程度考慮するかで決まる ( $2.0 \leq \kappa \leq 3.0$ )。

$N \rightarrow \infty$ とすると,

$$\begin{aligned}
 e_{av}^* &= \frac{3C_d H_1^2}{5E t_{p1} \alpha} \left(1 + \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (\kappa S_y - 2\sigma_{b,m}^p) \\
 &= \frac{3C_d H_n^2}{5E t_{pn} \alpha} \left(1 + \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{1+\eta_t} (\kappa S_y - 2\sigma_{b,m}^p) \\
 & \dots\dots\dots (3-47.3)
 \end{aligned}$$

$N=290$ の寸法公差を適用すると、式(3-25b, c)から,

$$e_{av}^* \doteq 0.4132 \frac{C_d H_n^2}{E t_{pn}} (\kappa S_y - 2\sigma_{b,m}^p) \dots\dots\dots (3-47.4)$$

式(3-26)あるいは式(3-31b)を用いて、ひずみ割増し係数を次の様に表わす。

$$\begin{aligned}
 f_{\epsilon E}^* &= Ke' f_{\epsilon E} \doteq 1.452 Ke' \dots\dots\dots (3-47.5) \\
 \left( e_{av}^* \leq e_{av} \leq 1.239 \frac{C_d S_y}{E} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \left(1 - 0.2928 \frac{C_p}{S_y} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} p\right) \right)
 \end{aligned}$$

ここで,

$$Ke' = 1 + \left( \frac{*}{q} - 1 \right) \left\{ 1 - \frac{4S}{\sigma_{b,m}^p} \right\} \dots\dots\dots (3-47.6)$$

$$4S = \kappa S_y - 2\sigma_{b,m}^p$$

(3) ラチェット域 (Fig. 4-3 参照)

ひとつの剛性の低いコンポリューションにかなり大きな塑性域が拡がる領域を考えると、半山当りの変位と曲げモーメントの関係はFig. 4-3の通りとなる。この場合、剛性の低いコ

ンボリユーシヨンは山谷の間でラチュット挙動をし、他のコンボリユーシヨンは弾性挙動をする。この場合、山相互の関係について見ると、ラチュット挙動は見られない。つまり、剛性の低いコンボリユーシヨンの吸収変位量は繰返しによって変化しない。

剛性の低いコンボリユーシヨンに発生する  $n$  サイクル目の負荷時の最大ひずみは次の形で与えられると考えられる。

$$\epsilon^+ = \epsilon^p + \epsilon^{e2^+} + (n-1) \epsilon_r \quad \dots\dots\dots (3-48)$$

$\epsilon^p$  は初期に内圧のみで生じるひずみ、 $\epsilon^{e2^+}$  は負荷された変位によって生じるひずみ、 $\epsilon_r$  は 1 山内で 1 サイクル毎に生じるラチュットひずみである。除荷時のひずみは、

$$\epsilon^- = \epsilon^p + \epsilon^{e2^-} + n \epsilon_r \quad \dots\dots\dots (3-49)$$

従って、最大ひずみ範囲としては、

$$\Delta \epsilon_{\max} = \Delta \epsilon^{e2} + \epsilon_r \quad \dots\dots\dots (3-50)$$

式 (3-50) の中で右辺第 1 項  $\Delta \epsilon^{e2}$  の算出について考える。

$$(N-1) e_1^+ + e_2^+ = \delta_T = N e_{av} \quad \dots\dots\dots (3-51)$$

$$(N-1) e_1^- + e_2^- = 0 \quad \dots\dots\dots (3-52)$$

また、

$$\frac{k_1 e_1^+}{H_1} = \frac{-k_1 e_1^-}{H_1} = \frac{4(M_{y2} - M_{p2})}{H_2} \quad \dots\dots\dots (3-53)$$

従って、

$$(N-1) \Delta e_1 + \Delta e_2 = \delta_T = N e_{av} \quad \dots\dots\dots (3-54)$$

$$\frac{k_1 \Delta e_1}{H_1} = \frac{8(M_{y2} - M_{p2})}{H_2} \quad \dots\dots\dots (3-55)$$

2 式から  $\Delta e_1$  を消去すると、

$$\Delta e_2 = \delta_T - \frac{8(N-1)(M_{y2} - M_{p2})}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \quad \dots\dots\dots (3-56)$$

更に、

$$\frac{\Delta e_2}{e_{av}} = N \left\{ 1 - \frac{8(N-1)(M_{y2} - M_{p2})}{\delta_T k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \right\} \dots\dots\dots (3-57)$$

$$= N \left\{ 1 - \frac{8(N-1) \left( \frac{t_{p2}^2}{4} S_y - \frac{H_2^2 C_p}{12} \cdot p \right)}{\delta_T \cdot \frac{10 E t_{p1}^3}{9 H_1^2 C_d}} \cdot \frac{H_1}{H_2} \right\}$$

$$= N \left\{ 1 - \frac{18 C_d (N-1) H_1^3 \left( t_{p2}^2 S_y - \frac{H_2^2 C_p}{3} p \right)}{10 E \delta_T t_{p1}^3 H_2} \right\}$$

$$= N \left\{ 1 - \frac{9 S_y C_d (N-1)}{5 E} \cdot \frac{t_{p2}^2 H_1^3}{\delta_T t_{p1}^3 H_2} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S_y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \right\}$$

\dots\dots\dots (3-58)

一方、1サイクルで進行するコンポリューション直線部の変位  $d^r$  は、

$$d^r = \frac{\Delta e_2}{2} - \frac{4(M_{y2} - M_{p2})}{k_2}$$

$$= \frac{\Delta e_2}{2} - \frac{9 C_d S_y H_2^2}{10 E t_{p2}} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S_y} \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \dots\dots\dots (3-59)$$

ここで、 $d^r$  によるひずみの増大を後の定式化を単純化するため、等価なひずみを発生させる端部変位  $\frac{e^r}{2}$  に置き換える。Fig. 4-4 の様に梁の類推から、端部(円内)の曲率を等しく置く。

$$\frac{e^r}{2} = 4 d^r \dots\dots\dots (3-60)$$

式(3-59)から、

$$\frac{e^r}{2} = 2 \Delta e_2 - \frac{18 C_d S_y H_2^2}{5 E t_{p2}} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S_y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \dots\dots\dots (3-61)$$

式(3-58)と式(3-61)の和として、1山のラチェット変形も考慮した1サイクル当たりの変位範囲  $e^{Total}$  を考えると、

$$e^{Total} = \Delta e_2 + e^r$$

$$\begin{aligned}
 &= 5 \Delta e_2 - \frac{36 C_d S y H_2^2}{5 E t_{p2}} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \\
 &= 5 \delta_T \left\{ 1 - \frac{18 S y C_d (N-1)}{10 E} \cdot \frac{t_{p2}^2 H_1^3}{\delta_T t_{p1}^3 H_2} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \right\} \\
 &\quad - \frac{36 C_d S y H_2^2}{5 E t_{p2}} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \\
 &= 5 \delta_T - \frac{9 C_d S y}{5 E} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \left\{ \frac{5 t_{p2}^2 H_1^3}{t_{p1}^3 H_2} (N-1) + \frac{4 H_2^2}{t_{p2}} \right\} \\
 &= 5 \delta_T - \frac{36 C_d S y}{5 E} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}} \left( 1 - \frac{C_p}{3 S y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p2}^2} p \right) \left\{ 1 + \frac{5 (N-1) t_{p2}^3 H_1^3}{4 t_{p1}^3 H_2^3} \right\} \\
 & \dots \dots \dots (3-62)
 \end{aligned}$$

更に、式(3-15 b, c)を用いると、

$$\begin{aligned}
 e^{Total} &= 5 \delta_T - \frac{36 C_d S y}{5 E} \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right) \frac{H_1^2}{t_{p1}} \\
 &\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3 S y} \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^2 \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\} \\
 &\times \left\{ 1 + \frac{5 (N-1)}{4 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^3 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^3} \right\} \\
 & \dots \dots \dots (3-63)
 \end{aligned}$$

式(3-20), (3-21)を用いると、

$$\begin{aligned}
 e^{Total} &= 5 \delta_T - \frac{36 C_d S y}{5 E} \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right) \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{1+\eta_t} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \\
 &\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3 S y} \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^2 \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{(1+\eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\} \\
 &\times \left\{ 1 + \frac{5 (N-1)}{4 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^3 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^3} \right\} \dots \dots \dots (3-64)
 \end{aligned}$$



$e^{Total}$ を用いて次の応力を求める。

$$\sigma_{b,m}^d = \frac{5 t_{p2} E}{3 H_2^2 C_d} e^{Total} \dots\dots\dots (3-65)$$

塑性によるひずみ集中を次式で評価する。

$$K e' = 1 + (\bar{q}^* - 1) \{ 1 - 3 S_m / \sigma_{b,m}^d \} \dots\dots\dots (3-66)$$

(たとえば,  $3 S_m = 2 S_y$ ,  $\bar{q}^* = 1.5$ )

$\bar{q}^*$ は弾性追従パラメータで、解析、試験等から妥当な値を決める。ラチェット領域でのベローズのひずみ割増係数を次の様に表わす。

$$f_{\epsilon R} = K e' \cdot \frac{t_{p2} H_n^2}{t_{pn} H_2^2} \cdot \frac{e^{Total}}{e_{av}}$$

$$= K e' \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 (1 - \eta_H)^2} \cdot \frac{e^{Total}}{e_{av}} \dots\dots\dots (3-67)$$

但し、前述のように実際のベローズの素材寸法に基づいてひずみ割増しを考える場合は、 $f_{\epsilon R}$ を合理的に設定できる。式(3-63)で算出した $e^{Total}$ を式(3-65)と次式に用いる。

$$f_{\epsilon R} = \frac{K e'}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2} \cdot \frac{e^{Total}}{e_{av}} \dots\dots\dots (3-68)$$

ラチェット領域は次の式で判定される。

$$\Delta e_1 > \frac{8 (M_{y2} - M_{p2})}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots (3-70)$$

式(3-44)と式(3-45)より、

$$e_{av} > \frac{9 C_d S_y}{5 E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha - 1}{N}\right)}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3S_y} \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right) \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\} \dots\dots\dots (3-71)$$

or

$$e_{av} > \frac{9C_d S_y}{5E} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{\alpha-1}{N} \right) (1-\eta_H)^2}{\left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right) \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^2 (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \\ \times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3S_y} \frac{\left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^2 (1-\eta_H)^2}{(1+\eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\} \dots\dots\dots (3-72)$$

(4) 塑性ループ領域 ( Fig. 4-5 参照 )

圧力が零のときのみ、シェイクダウン領域を越えると塑性ループを描く。この場合、図に示されるように原点に対して対称の挙動を呈し、ラチェットは生じない。従って、コンボリユーションに発生する最大ひずみ範囲を評価するためには、剛性の低いコンボリユーションが負担する変位範囲  $\Delta e_2$  を考慮すればよい。

図から、

$$(N-1) e_1^+ + e_2^+ = \delta_T = N e_{av} \dots\dots\dots (3-73)$$

$$(N-1) e_1^- + e_2^- = 0 \dots\dots\dots (3-74)$$

$$\frac{k_1 e_1^+}{H_1} = -\frac{k_1 e_1^-}{H_1} = \frac{4 M_{y2}}{H_2} \quad (M_p = 0) \dots\dots\dots (3-75)$$

従って、

$$(N-1) \Delta e_1 + \Delta e_2 = \delta_T = N e_{av} \dots\dots\dots (3-76)$$

$$\frac{k_1}{H_1} \Delta e_1 = \frac{8 M_{y2}}{H_2} \dots\dots\dots (3-77)$$

上の2式から、

$$\frac{\Delta e_2}{e_{av}} = N \left\{ 1 - \frac{8(N-1) M_{y2}}{\delta_T k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \right\} \dots\dots\dots (3-78)$$

式(3-78)は、式(3-57)において、 $M_{p2} = 0$ として得られる式と同じである。更に、

$$\frac{\Delta e_2}{e_{av}} = N \left\{ 1 - \frac{9 S_y C_d (N-1)}{5 E} \cdot \frac{t_{p2}^2 H_1^3}{\delta_T \cdot t_{p1}^3 H_2} \right\} \dots\dots\dots (3-79)$$

式(3-15 b, c)を適用すると、

$$\Delta e_2 = \delta_T \left\{ 1 - \frac{9 S_y C_d (N-1)}{5 E \delta_T} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}} \right\} \dots\dots\dots (3-80)$$

式(3-20), (3-21)を用いると、

$$\Delta e_2 = \delta_T \left\{ 1 - \frac{9 S_y C_d (N-1)}{5 E \delta_T} \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \right\} \dots\dots\dots (3-81)$$

$\Delta e_2$  を用いて、次の応力を求める。

$$\sigma_{b,m}^d = \frac{5 t_{p2} E}{3 H_2^2 C_d} \Delta e_2 \dots\dots\dots (3-82)$$

塑性によるひずみ集中を式(3-66)で評価する。

塑性ループ領域でのひずみ割増し係数を次のように表わす。

$$f_{\epsilon_P}^{(n)} = K e' \cdot \frac{t_{p2} H_n^2}{t_{pn} H_2^2} \cdot \frac{\Delta e_2}{e_{av}} \\ = K e' \cdot \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 (1-\eta_H)^2} \cdot \frac{\Delta e_2}{e_{av}} \dots\dots\dots (3-83)$$

実際のペローズの素材寸法に基づいてひずみ割増しを考える場合は、

$$f_{\epsilon_P}^{(a)} = \frac{K e'}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2} \cdot \frac{\Delta e_2}{e_{av}} \dots\dots\dots (3-84)$$

塑性ループ領域は次式で判定される。

$$\Delta e_1 > \frac{8M_y^2}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2}, \quad M_{p2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-85)$$

式(3-44)と式(3-45)より,

$$e_{av} > \frac{9C_d S_y}{5E} \cdot \frac{1 + \frac{\alpha-1}{N}}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}}, \quad p=0$$

\dots\dots\dots (3-86)

or

$$e_{av} > \frac{9C_d S_y}{5E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) (1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_H^2}{t_{pn}}, \quad p=0$$

\dots\dots\dots (3-87)

4.5 まとめ

I. 公称寸法をベースとする最も保守的な設定

(1) 弾性域

$$e_{av} \leq \frac{9 C_d S_y}{10 E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2}{\alpha (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_{pp}}{3 S_y} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1-\eta_H)^2}{(1+\eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\}$$

$$= e_{av}^{(n)}$$

$$f_{\epsilon E}^{(n)} = \frac{\alpha (1+\eta_t)}{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5 E t_{p2}}{3 H_n^2 C_d} e_2$$

$$= \frac{5 E t_{pn}}{3 C_d H_n^2} \cdot \frac{\alpha (1+\eta_t)}{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2} e_{av}$$

if  $\sigma_{b,m2}^d \leq \kappa S_y - 2 \sigma_{b,m}^{p(n)}$

$$K e' = 1$$

else  $K e' = 1 + (\bar{q} - 1) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\},$

$$\Delta S = \kappa S_y - 2 \sigma_{b,m}^{p(n)}$$

if  $\Delta S < 0 \rightarrow \Delta S = 0$

$$\sigma_{b,m}^{d(n)} = \frac{5 E t_{pn}}{3 H_n^2 C_d} e_{av} ,$$

$$\sigma_{b,m}^{p(n)} = \frac{p}{2} \left( \frac{H_n}{t_{pn}} \right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(n)}}{3 S_m} = \frac{5 E t_{pn}}{6 S_y H_n^2 C_d} e_{av} ,$$

$$x = \frac{\sigma_{b,m}^{p(n)}}{3 S_m} = \frac{C_p H_n^2}{4 S_y t_{pn}^2} p$$

$N \rightarrow \infty$ , C. C. N-290適用

$$e_{avE}^{(n)} = \frac{9 C_d S_y}{10 E} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \cdot \frac{(1 - \eta_H)^2}{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 (1 + \eta_t)}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3 S_y} \frac{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 (1 - \eta_H)^2}{(1 + \eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\}$$

$$= 0.6196 \frac{C_d S_y H_n^2}{E t_{pn}} \left( 1 - 0.2928 \frac{C_p H_n^2}{S_y t_{pn}^2} p \right)$$

$$f_{\epsilon E}^{(n)} = \frac{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 (1 + \eta_t)}{(1 - \eta_H)^2}$$

$$\doteq 1.452$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5 E t_{pn}}{3 C_d H_n^2} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 (1 + \eta_t)}{(1 - \eta_H)^2} e_{av}$$

$$\doteq 1.452 \sigma_{b,m}^{d(n)}$$

(2) シェイクダウン領域

$$e_{avE}^{(n)} < e_{av} \leq \frac{9C_d Sy}{5E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2 \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}}{\alpha(1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p p}{3Sy} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1-\eta_H)^2 \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2}}{(1+\eta_t)^2} \right\}$$

$$= e_{avS}^{(n)}$$

$$f_{\epsilon S}^{(n)} = K e' f_{\epsilon E}^{(n)}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5E t_{pn}^2}{3H_n^2 C_d} \Delta e_2$$

$$= \frac{5E t_{pn}}{3C_d H_n^2} \cdot \frac{\alpha(1+\eta_t)}{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2} e_{av}$$

if  $\sigma_{b,m2}^d \leq \kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^{p(n)}$

$$Ke' = 1$$

else

$$Ke' = 1 + \left(\frac{*}{q} - 1\right) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\}, \quad \Delta S = \kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^{p(n)}$$

( if  $\Delta S < 0 \rightarrow \Delta S = 0$  )

$$\sigma_{b,m}^{d(n)} = \frac{5E t_{pn}}{3H_n^2 C_d} e_{av}$$

$$\sigma_{b,m}^{p(n)} = \frac{p}{2} \left(\frac{H_n}{t_{pn}}\right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(n)}}{3Sm} = \frac{5E t_{pn}}{6SyH_n^2 C_d} e_{av}$$

$$x = \frac{C_p H_n^2}{4Sy t_{pn}^2} p$$

$N \rightarrow \infty$ , C.C.N-290適用

$$e_{avs}^{(n)} = \frac{9C_d Sy}{5E} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{\left(1+\frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1+\frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1+\eta_t)}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3Sy} \cdot \frac{\left(1+\frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1+\frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1-\eta_H)^2}{(1+\eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\}$$

$$\doteq 1.239 \frac{C_d Sy H_n^2}{E t_{pn}} \left( 1 - 0.2928 \frac{C_p H_n^2}{Sy t_{pn}^2} p \right)$$

$$f_{\varepsilon S}^{(n)} = \frac{\left(1+\frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1+\frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1+\eta_t)}{(1-\eta_H)^2} Ke'$$

$$\doteq 1.452 Ke'$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5E t_{pn}}{3C_d H_n^2} \cdot \frac{\left(1+\frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1+\frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1+\eta_t)}{(1-\eta_H)^2} e_{av}$$

$$\doteq 1.452 \sigma_{b,m}^{d(n)}$$



(3) ラチェット領域

$$e_{avs}^{(n)} < e_{av}$$

$$f_{eR}^{(n)} = Ke' \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2} \cdot \frac{e^{Total}}{e_{av}}$$

$$e^{Total} = 5 N e_{av} \frac{36 C_d S y}{5 E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2}{1 + \eta_t} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p p}{3 S y} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1-\eta_H)^2}{(1 + \eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\}$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{5(N-1)}{4 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^3 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^3} \right\}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5 E t_{pn}^2}{3 H_n^2 C_d} e^{Total}$$

$$= \frac{5 E t_{pn}}{3 C_d H_n^2} \cdot \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2} e^{Total}$$

if  $\sigma_{b,m2}^d \leq \kappa S y - 2 \sigma_{b,m}^{p(n)}$

$$Ke' = 1$$

else

$$Ke' = 1 + (q - 1) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\},$$

$$\Delta S = \kappa S y - 2 \sigma_{b,m}^{p(n)}$$

(if  $\Delta S < 0 \rightarrow \Delta S = 0$ )

$$\sigma_{b,m}^{d(n)} = \frac{5 E t_{pn}}{3 H_n^2 C_d} e_{av},$$

$$\sigma_{b,m}^{p(n)} = \frac{p}{2} \left( \frac{H_n}{t_{pn}} \right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(n)}}{3 S m} = \frac{5 E t_{pn}}{6 S y H_n^2 C_d} e_{av},$$

$$x = \frac{C_p H_n^2}{4 S y t_{pn}^2} p$$

(4) 塑性ループ領域

$$e_{avS}^{(n)*} < e_{av} \quad (p=0)$$

$$e_{av}^{(n)*} = \frac{9C_d Sy}{5E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) (1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}$$

$$f_{\epsilon_P}^{(n)} = Ke' \frac{(1+\eta_t)N}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 (1-\eta_H)^2}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{9SyC_d}{5E} \cdot \frac{N-1}{\delta_T} \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \right\}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5E t_{p2}}{3H_n^2 C_d} \Delta e_2$$

$$= \frac{5E t_{pn}}{3C_d H_n^2} \cdot \frac{(1+\eta_t)N}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) (1-\eta_H)^2}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{9SyC_d}{5E} \cdot \frac{N-1}{\delta_T} \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right) (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \right\} e_{av}$$

$$Ke' = 1 + (\bar{q} - 1) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\}, \quad \Delta S = \kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^{p(n)}$$

$$\sigma_{b,m}^{d(n)} = \frac{5E t_{pn}}{3H_n^2 C_d} e_{av},$$

$$\sigma_{b,m}^{p(n)} = \frac{p}{2} \left( \frac{H_n}{t_{pn}} \right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(n)}}{3Sm} = \frac{5E t_{pn}}{6SyH_n^2 C_d} e_{av}, \quad x = 0$$

II. 実態寸法をベースとする設定

(1) 弾性域

$$e_{av} \leq \frac{9C_d Sy}{10E} \cdot \frac{1 + \frac{\alpha - 1}{N}}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3Sy} \cdot \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\} = e_{av}^{(a)}$$

$$f_{cE}^{(a)} = \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2}{1 + \frac{\alpha - 1}{N}}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5E t_{p2}}{3H_2^2 C_d} e_2$$

$$= \frac{5E t_{p1}}{3C_d H_1} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2}{1 + \frac{\alpha - 1}{N}} e_{av}$$

$$\sigma_{b,m}^{d(a)} = \frac{5E t_{p1}}{3H_1^2 C_d} e_{av} ,$$

$$\sigma_{b,m}^{p(a)} = \frac{p}{2} \left(\frac{H_1}{t_{p1}}\right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(a)}}{3Sm} = \frac{5E t_{p1}}{6Sy H_1^2 C_d} e_{av} , \quad x = \frac{\sigma_{b,m}^{p(a)}}{3Sm} = \frac{C_p H_1^2}{4Sy t_{p1}^2} p$$

N → ∞, C. C. N-290を適用

$$e_{av}^{(a)} = \frac{9C_d Sy}{10E} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3Sy} \cdot \left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\}$$

$$\begin{aligned} & \doteq 0.7714 \frac{C_d S y H_1^2}{E t_{p1}} \left( 1 - 0.4009 \frac{C_p H_1^2}{S y t_{p1}^2} p \right) \\ f_{\varepsilon E}^{(a)} &= \left( 1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H} \right) \left( 1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t} \right)^2 \\ & \doteq 1.167 \\ \sigma_{b,m2}^d &= \frac{5 E t_{p1}}{3 C_d H_1^2} \left( 1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H} \right) \left( 1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t} \right)^2 e_{av} \\ & \doteq 1.167 \sigma_{b,m}^{d(a)} \end{aligned}$$

if  $\sigma_{b,m2}^d \leq \kappa S y - 2 \sigma_{b,m}^{p(n)}$

$$K e' = 1$$

else  $K e' = 1 + (q^* - 1) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\}$ ,  $\Delta S = \kappa S y - 2 \sigma_{b,m}^{p(n)}$   
 ( if  $\Delta S < 0 \rightarrow \Delta S = 0$  )

(2) シェイクダウン領域

$$\begin{aligned} e_{avE}^{(a)} < e_{av} \leq & \frac{9 C_d S y}{5 E} \cdot \frac{1 + \frac{\alpha - 1}{N}}{\left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H} \right) \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t} \right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}} \\ & \times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3 S y} \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H} \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t} \right)^2 \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\} = e_{avS}^{(a)} \end{aligned}$$

$$f_{\varepsilon S}^{(a)} = K e' f_{\varepsilon E}^{(a)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b,m2}^d &= \frac{5 E t_{p2}}{3 H_1^2 C_d} \Delta e_2 \\ &= \frac{5 E t_{p1}}{3 H_1^2 C_d} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H} \right) \left( 1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t} \right)^2}{1 + \frac{\alpha - 1}{N}} e_{av} \end{aligned}$$

if  $\sigma_{b,m2}^d \leq \kappa Sy - 2 \sigma_{b,m}^{p(a)}$

$$Ke' = 1$$

else

$$Ke' = 1 + (q^* - 1) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\},$$

$$\Delta S = \kappa Sy - 2 \sigma_{b,m}^{p(a)}$$

(if  $\Delta S < 0 \rightarrow \Delta S = 0$ )

$$\sigma_{b,m}^{d(a)} = \frac{5Et_{p1}}{3H_1^2 C_d} e_{av},$$

$$\sigma_{b,m}^{p(a)} = \frac{p}{2} \left( \frac{H_1}{t_{p1}} \right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(a)}}{3Sm} = \frac{5Et_{p1}}{6SyH_1^2 C_d} e_{av},$$

$$x = \frac{C_p H_1^2}{4Sy t_{p1}} p$$

$N \rightarrow \infty$ , C. C. N-290 適用

$$e_{avS}^{(a)} = \frac{9C_d Sy \cdot H_1^2}{5E t_{p1}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3Sy} \left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\}$$

$$\doteq 1.543 \frac{C_d Sy H_1^2}{E t_{p1}} \left( 1 - 0.4009 \frac{C_p H_1^2}{Sy t_{p1}^2} p \right)$$

$$f_{\epsilon E}^{(a)} = \left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 Ke'$$

$$\doteq 1.167 Ke'$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5Et_{p1}}{3C_d H_1^2} \left(1 + \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2 e_{av}$$

$$\doteq 1.167 \sigma_{b,m}^{d(a)}$$

(3) ラチェット領域

$$e_{avS}^{(a)} < e_{av}$$

$$f_{\epsilon R}^{(a)} = Ke' \frac{1}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)} \cdot \frac{e^{Total}}{e_{av}}$$

$$e^{Total} = 5Ne_{av} - \frac{36C_d Sy}{5E} \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right) \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3Sy} \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^2 \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}^2} \right\}$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{5(N-1)}{4 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^3 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^3} \right\}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5E t_{p2}}{3H_2^2 C_d} e^{Total}$$

$$= \frac{5E t_{p1}}{3C_d H_1^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1-\beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)} e^{Total}$$

if  $\sigma_{b,m2}^d \leq \kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^{p(a)}$

$$Ke' = 1$$

else

$$Ke' = 1 + (q - 1) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\},$$

$$\Delta S = \kappa Sy - 2\sigma_{b,m}^{p(a)}$$

(if  $\Delta S < 0 \rightarrow \Delta S = 0$ )

$$\sigma_{b,m}^{d(a)} = \frac{5E t_{p1}}{3H_1^2 C_d} e_{av}$$

$$\sigma_{b,m}^{p(a)} = \frac{p}{2} \left( \frac{H_1}{t_{p1}} \right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(a)}}{3Sm} = \frac{5E t_{p1}}{6SyH_1^2 C_d} e_{av}$$

$$x = \frac{C_p H_1^2}{4Sy t_{p1}^2} p$$

(4) 塑性ループ領域

$$e_{avS}^{(a)*} < e_{av} \quad (p = 0)$$

$$e_{avS}^{(a)*} = \frac{9C_d S y}{5E} \cdot \frac{1 + \frac{\alpha - 1}{N}}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}}$$

$$f_{\epsilon_P}^{(a)} = K e' \frac{N}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{9C_d S y}{5E} \cdot \frac{N-1}{\delta_T} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}} \right\}$$

$$\sigma_{b,m2}^d = \frac{5E t_{p2}}{3 H_2^2 C_d} \Delta e_2$$

$$= \frac{5E t_{p1}}{3 C_d H_1^2} \cdot \frac{N}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)}$$

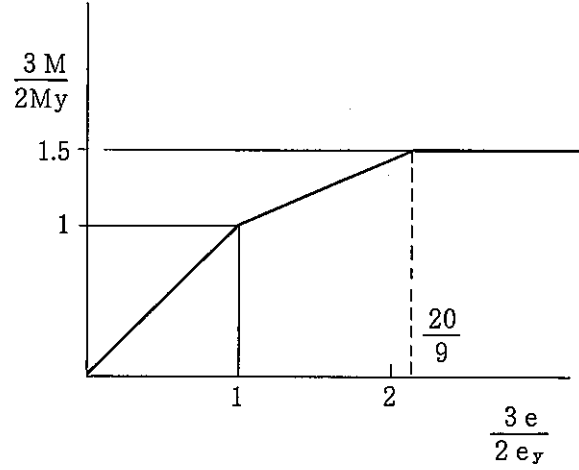
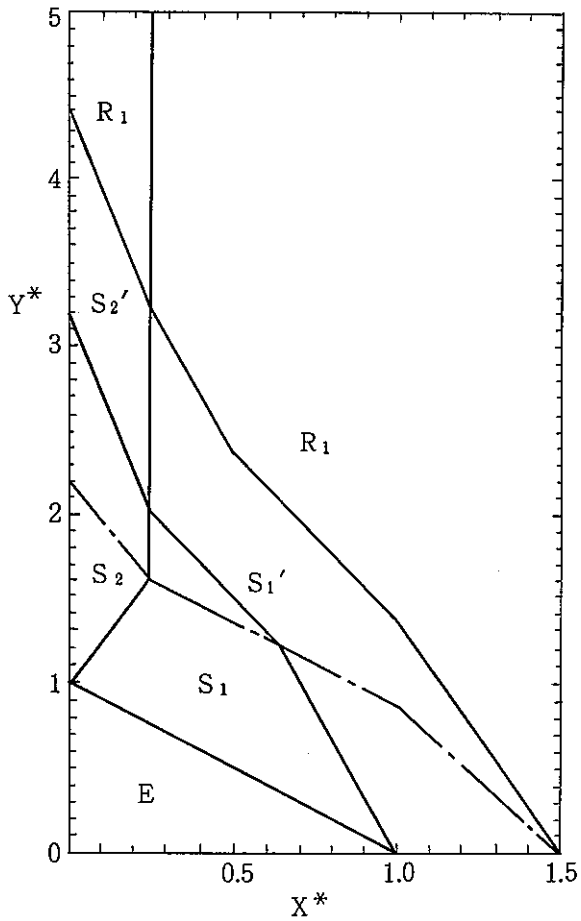
$$\times \left\{ 1 - \frac{9C_d S y}{5E} \cdot \frac{N-1}{\delta_T} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_H}{1 - \beta_H}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \cdot \frac{\beta_t}{1 - \beta_t}\right)^2} \cdot \frac{H_1^2}{t_{p1}} \right\} e_{av}$$

$$K e' = 1 + \left(\frac{*}{q} - 1\right) \left\{ 1 - \frac{\Delta S}{\sigma_{b,m2}^d} \right\}, \quad \Delta S = \kappa S y - 2 \sigma_{b,m}^{p(a)}$$

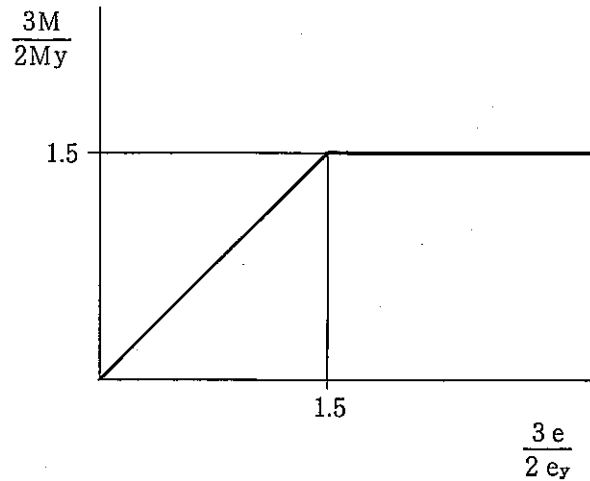
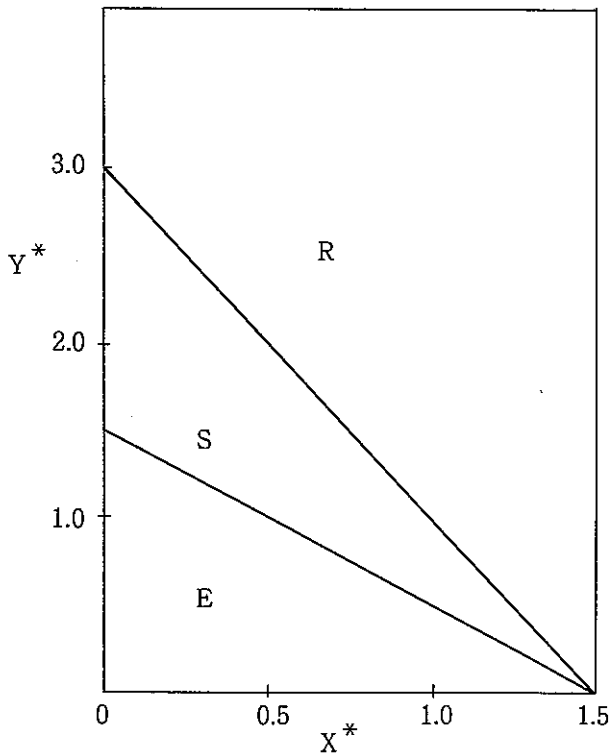
$$\sigma_{b,m}^{d(a)} = \frac{5E t_{p1}}{3 H_1^2 C_d} e_{av},$$

$$\sigma_{b,m}^{p(a)} = \frac{p}{2} \left( \frac{H_1}{t_{p1}} \right)^2 C_p$$

$$y = \frac{\sigma_{b,m}^{d(a)}}{3 S m} = \frac{5E t_{p1}}{6 S y H_1^2 C_d} e_{av}, \quad x = 0$$



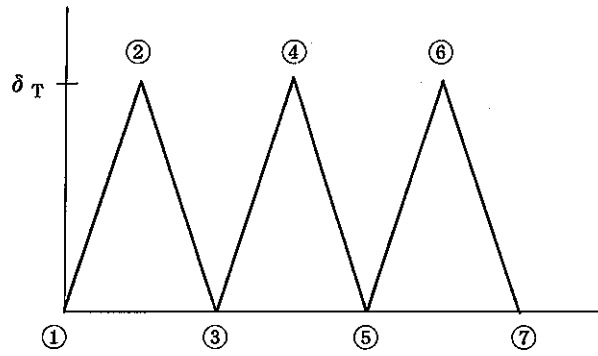
(1) Displacement-Moment Diagram (Tri-linear Approximation)



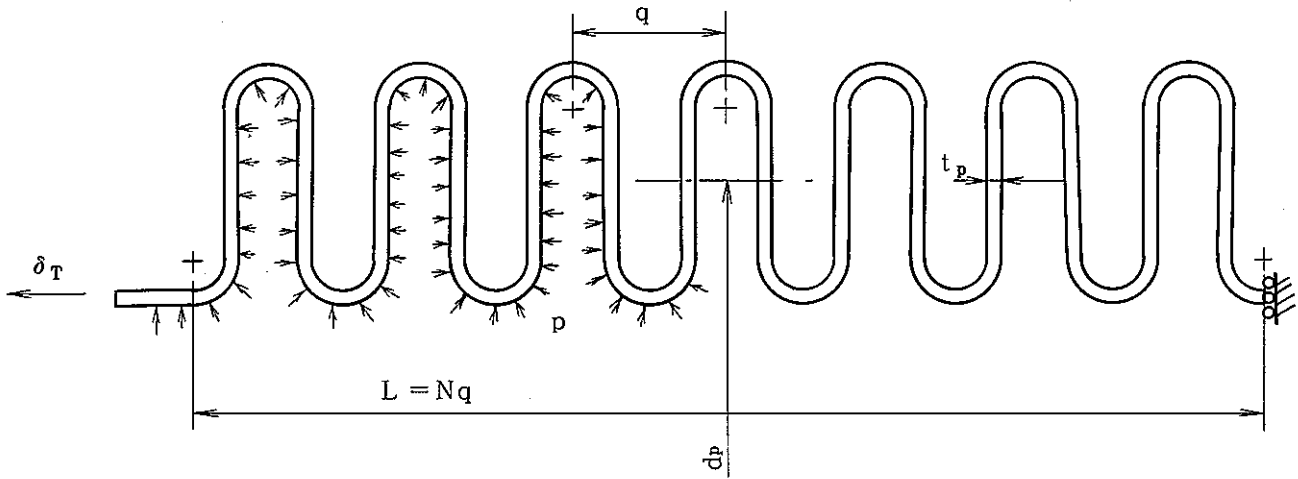
(2) Displacement-Moment Diagram (Bi-linear Approximation)

Fig.1-1 Simplified Evaluation Methods of Bellows Ratchetting

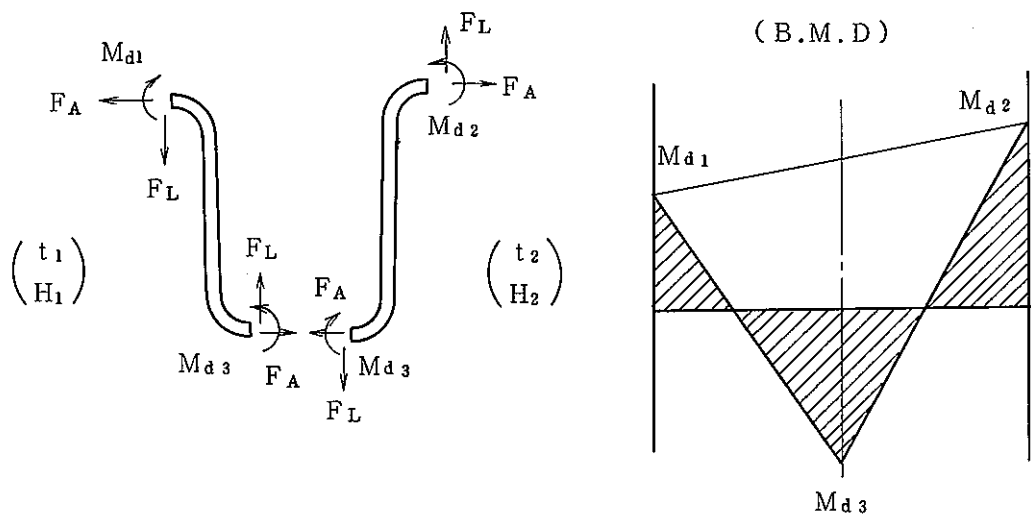




(1) Pattern of Displacement Loading



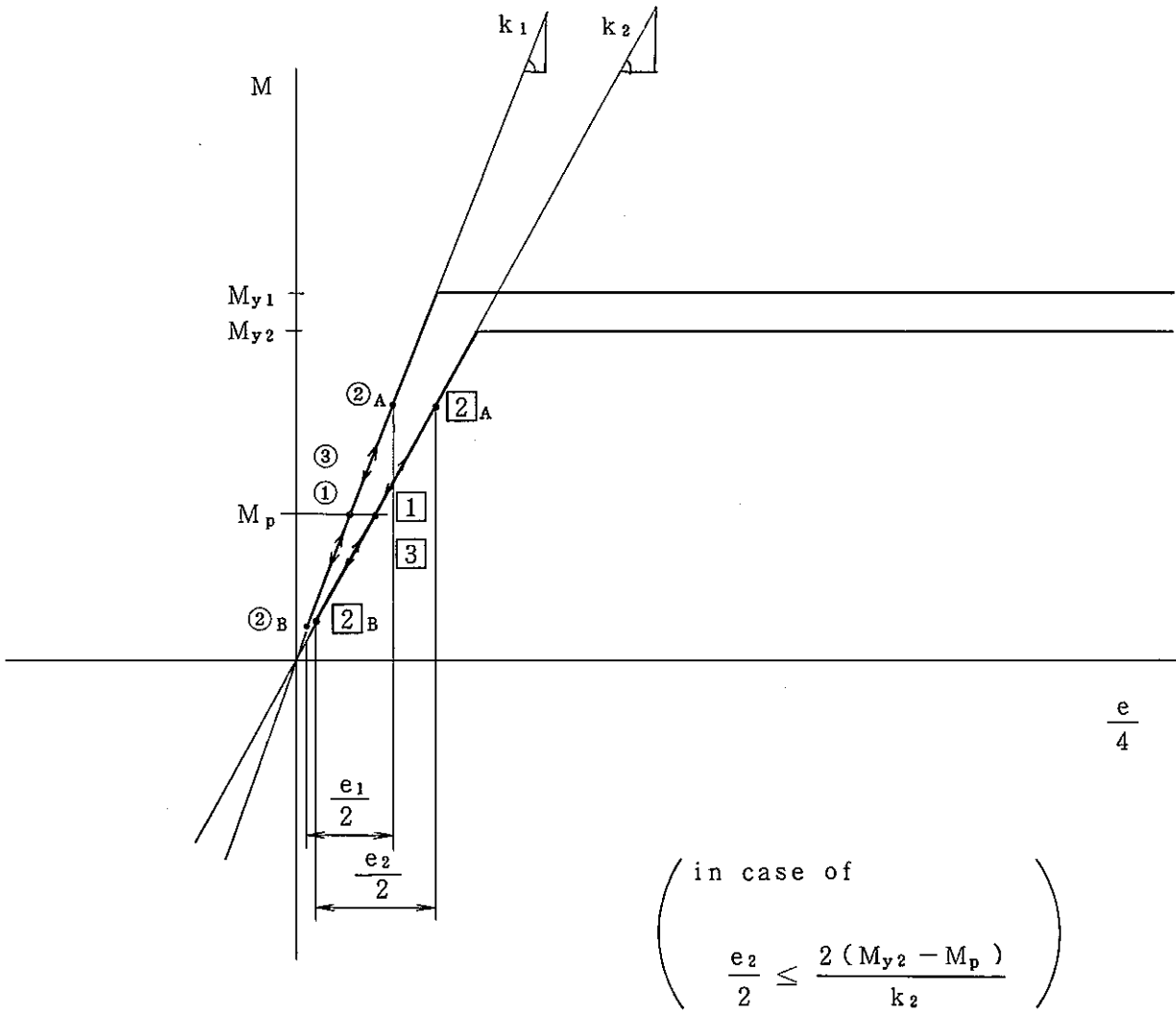
(2) Total Model



(3) Equilibrium for Displacement Loading

Fig. 3-1 Analysis Model of Bellows

Elastic Region



$$\left\{ \begin{array}{l} (N-1)e_1 + e_2 = \delta_T = N e_{av} \\ \frac{k_1 e_1}{H_1} = \frac{k_2 e_2}{H_2} \end{array} \right\} \quad (E1)$$

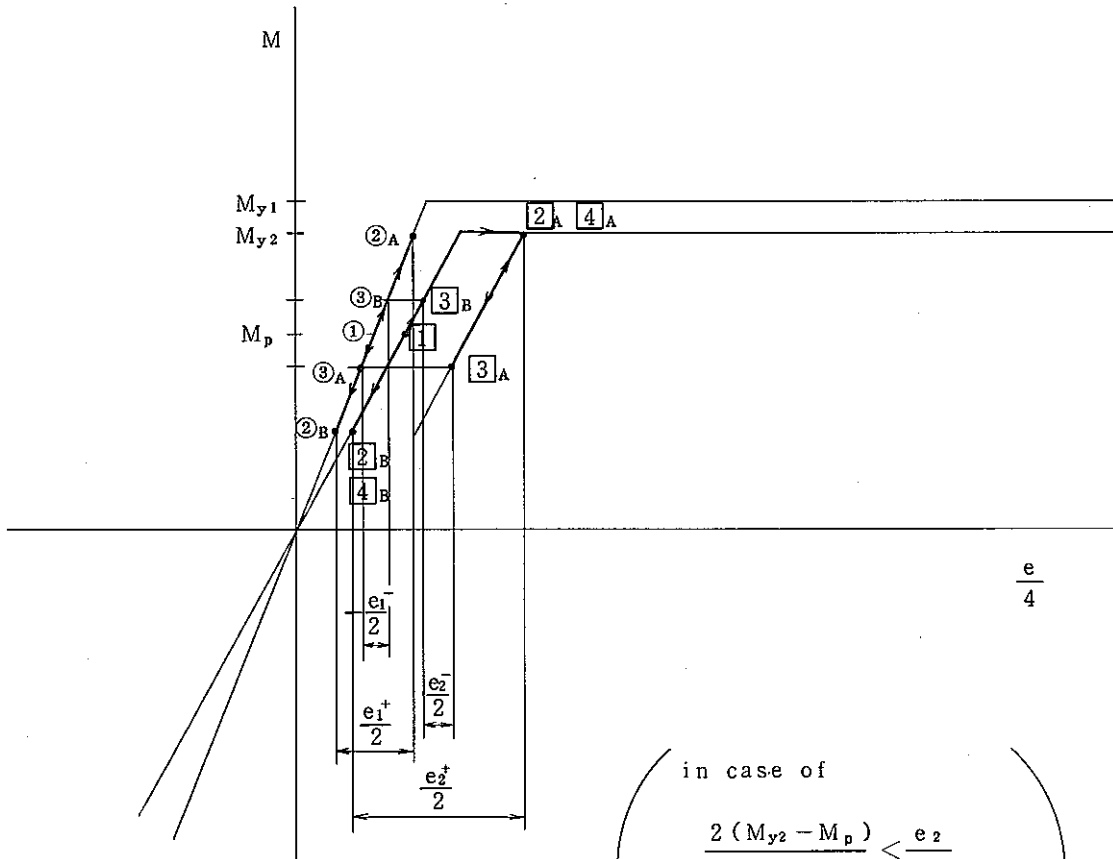
$$\left( \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{k_2}{k_1} (N-1) + 1 \right) e_2 = \delta_T$$

$$\frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \left( \frac{t_{p2}}{t_{p1}} \right)^3 \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^3 = \frac{1}{\alpha}$$

$$\frac{e_2}{e_{av}} = \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1) / N}$$

Fig. 4-1 Strain Amplification Factor in Elastic Region

Shake Down Region



( in case of

$$\frac{2(M_{y2} - M_p)}{k_2} < \frac{e_2}{2}$$

$$\frac{\Delta e_1}{2} \leq \frac{4(M_{y2} - M_p)}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2}$$

)

$$\begin{cases} (N-1)e_1^+ + e_2^+ = \delta_T = N e_{av} \\ (N-1)e_1^- + e_2^- = 0 \end{cases} \quad (S1)$$

$$\begin{cases} \frac{k_1 e_1^+}{H_1} = \frac{4(M_{y2} - M_p)}{H_2} \\ \frac{-k_1 e_1^-}{H_1} = \frac{k_2}{H_2} \left\{ e_2^+ - e_2^- - \frac{4(M_{y2} - M_p)}{k_2} \right\} \end{cases} \quad (S2)$$

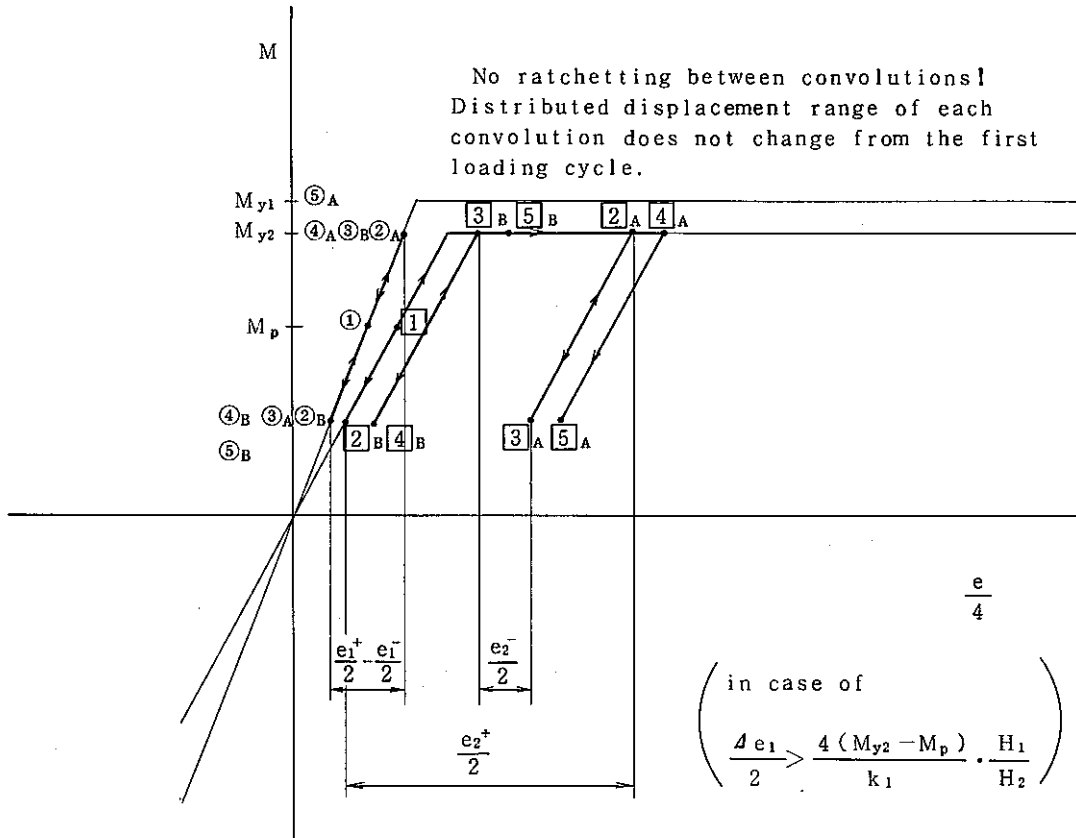
$$\Delta e_1 = e_1^+ - e_1^- \quad , \quad \Delta e_2 = e_2^+ - e_2^- \quad (S3)$$

$$\therefore \begin{cases} (N-1)\Delta e_1 + \Delta e_2 = \delta_T = N e_{av} \\ \frac{k_1 \Delta e_1}{H_1} = \frac{k_2 \Delta e_2}{H_2} \end{cases} \quad (S4) \Rightarrow \text{Same as eq. (E1)!}$$

so,  $f_e$  is independent of plastic effect in the shake down region

Fig. 4-2 Strain Amplification Factor in Shake Down Region

Ratchetting Region



$$\begin{cases} (N-1) e_1^+ + e_2^+ = \delta_T = N e_{av} \\ (N-1) e_1^- + e_2^- = 0 \end{cases} \quad (R1)$$

$$\frac{k_1 e_1^+}{H_1} = \frac{-k_1 e_1^-}{H_1} = \frac{4(M_{y2} - M_p)}{H_2} \quad (R2)$$

$$\begin{cases} (N-1) \Delta e_1 + \Delta e_2 = \delta_T = N e_{av} \\ \frac{k_1 \Delta e_1}{H_1} = \frac{8(M_{y2} - M_p)}{H_2} \end{cases} \quad (R3)$$

$$\Delta e_2 = \delta_T - \frac{8(N-1)(M_{y2} - M_p)}{k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \quad (R4)$$

$$\frac{\Delta e_2}{e_{av}} = N \left\{ 1 - \frac{8(N-1)(M_{y2} - M_p)}{\delta_T k_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \right\} \quad (R5)$$

from eq. (R5),

$$\frac{\Delta e_2}{e_{av}} = N \left\{ 1 - \frac{8(N-1) \left( \frac{t_p^2}{4} S_y - \frac{H_2^2 C_p}{12} p \right)}{\delta_T \cdot \frac{10 E t_p^3}{9 H_1^2 C_d}} \cdot \frac{H_1}{H_2} \right\} \quad \leftarrow \begin{matrix} \text{Conservatively} \\ M_p = M_{p2} \end{matrix}$$

$$= N \left\{ 1 - \frac{9 S_y C_d (N-1)}{5 E} \cdot \frac{H_1^3}{\delta_T t_p H_2} \left( \frac{t_p^2}{t_{p1}^2} - \frac{C_p}{3} \cdot \frac{p}{S_y} \cdot \frac{H_2^2}{t_{p1}^2} \right) \right\}$$

Fig. 4-3 Strain Amplification Factor in Ratchet Region

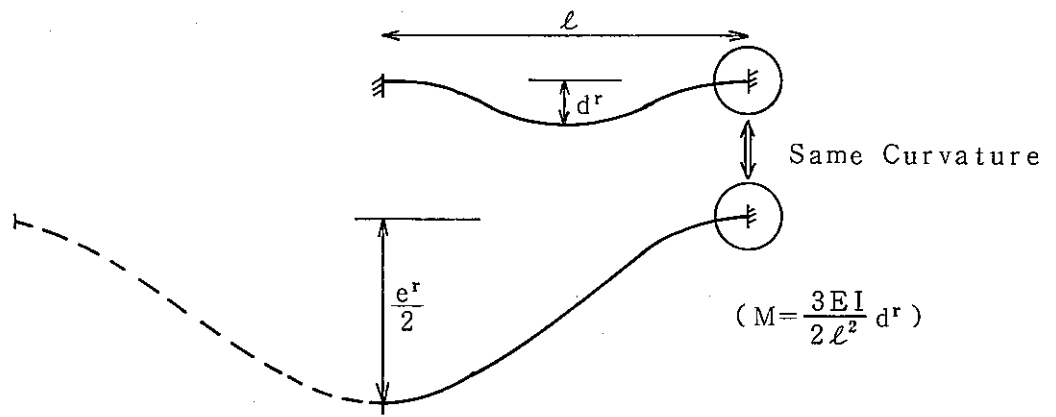
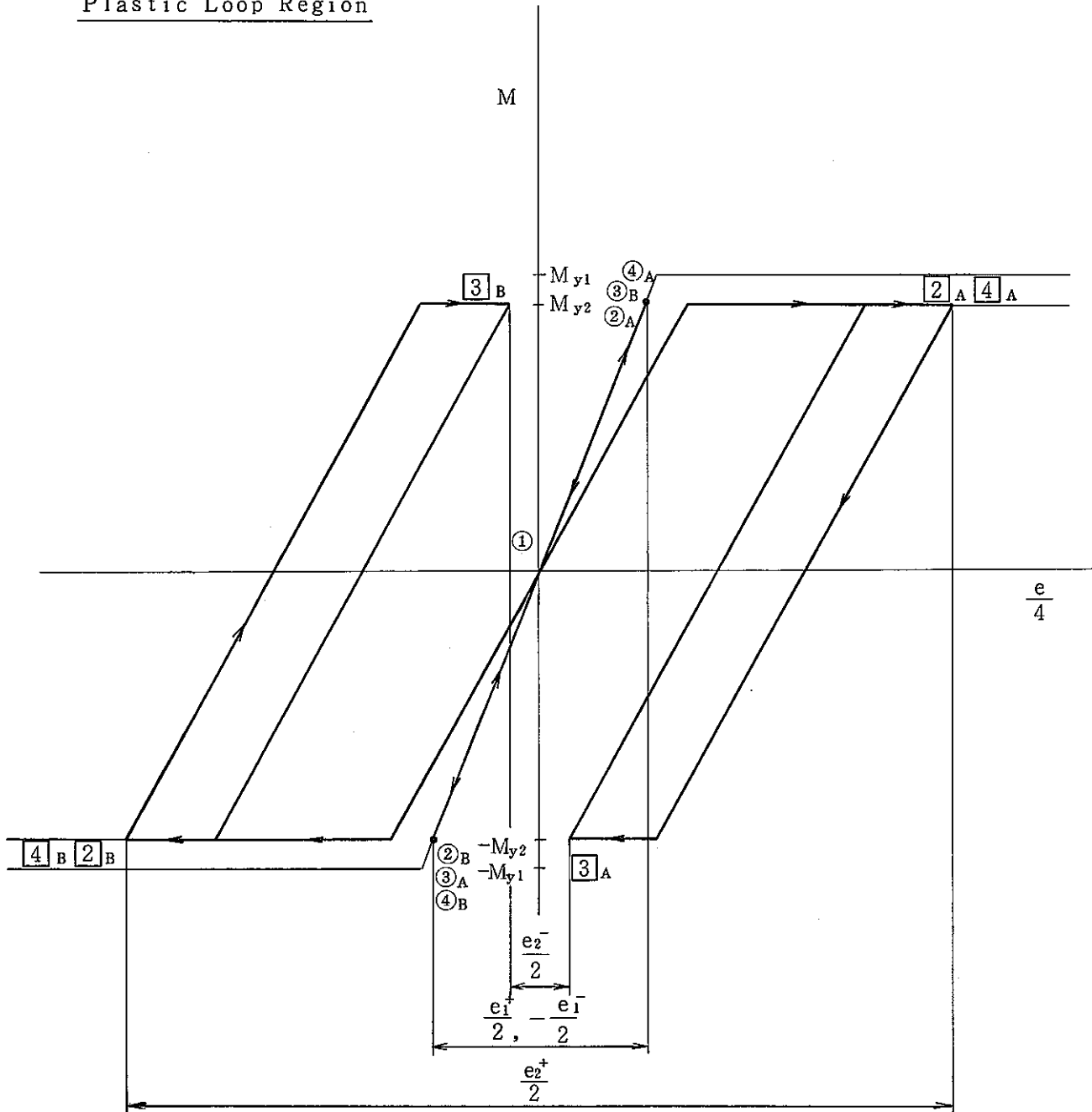


Fig. 4-4 Treatment of the Progressive Displacement "d<sup>r</sup>"

Plastic Loop Region



$$\begin{cases} (N-1) e_1^+ + e_2^+ = \delta_T = N e_{av} \\ (N-1) e_1^- + e_2^- = 0 \end{cases} \quad (P1)$$

$$\begin{cases} \frac{k_1 e_1^+}{H_1} = \frac{4 M_{y2}}{H_2} \\ -\frac{k_1 e_1^-}{H_1} = \frac{4 M_{y2}}{H_2} \end{cases} \quad (P2)$$

Fig. 4-5 Strain Amplification Factor in Plastic Loop Region

## ☆ 解析例

本章に述べた方法に従って、弾塑性ひずみ割増し係数を求めてみる。計算には、後述するプログラム“SAF”を使用する。

### (1) 計算条件

- ・ 山 数  $N$  ; 10
- ・ 谷 外 径  $d$  ; 1100 mm
- ・ 山高公称寸法  $H_n$  ; 60 mm
- ・ 板厚公称寸法  $t_n$  ; 2 mm
- ・ 1山当たりの平均変位  $e_{av}$  ; “4.5まとめ”に示した無次元パラメータ  $y$  に換算して、ひずみ割増し係数が6.0を超えない範囲で増分をきざむものとする。
- ・ 圧 力  $p$  ; “4.5まとめ”に示した無次元パラメータ  $x$  に換算して、増分0.1で0.0から0.6乃至0.7までをきざむものとする。
- ・ EJMAのパラメータ  $C_d$  ; 1.6
- ・ EJMAのパラメータ  $C_p$  ; 0.7
- ・ 温 度 TEMP ; 室 温
- ・ 縦弾性係数  $E$  ;  $1.98 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$
- ・ 降伏応力  $S_y$  ;  $21.0 \text{ kg/mm}^2$
- ・ シェイクダウン限界  $3 S_m$  ;  $42.0 \text{ kg/mm}^2$
- ・ 山高について基本寸法公差を決めるパラメータ  $\eta_H$  ; 0.06
- ・ 板厚について基本寸法公差を決めるパラメータ  $\eta_t$  ; 0.1
- ・ 山高について繰返しの寸法公差を決めるパラメータ  $\beta_H$  ; 0.03
- ・ 板厚について繰返しの寸法公差を決めるパラメータ  $\beta_t$  ; 0.06
- ・ コンポリューション内での塑性による弾性追従量を決めるパラメータ  $q^*$  ; 1.5
- ・  $K e'$  式の中で  $\Delta S$  を決めるパラメータ  $\kappa$  ; 2. / 3.

### (2) 計算結果

Fig. I.1とFig. I.2に $\kappa$ が2.0と3.0の場合の計算結果について、それぞれ各圧力レベル( $X$ )毎の変位( $Y$ )とひずみ割増し係数( $f_e$ )の関係として整理している。

この計算例では、公称寸法をベースに保守的に評価しているために、弾性域でのひずみ割増し係数 $f_e$ が1.45程度になっている。両図で各曲線が急激に立上がっている領域はラチェット領域である。本方法では、簡単のため、コンポリューション変位と曲げモーメントの関係を弾完全塑性体と同じ形に仮定したためにこの領域で非常に保守的な評価を与える結果となっている。実際には、ひずみ硬化によりひずみ振幅の増大はこれよりもっと緩やかであることが予

想されるが、いずれにしてもラチェット制限の方から設計では除外される領域である。

$\kappa = 2$  の場合 ( Fig. I. 1 ), ラチェット領域にはいる前にひずみ割増し係数  $f_e$  が比較的緩やかに立上がる領域がある。この方法では曲げモーメントをあたかも膜力の様に扱っており、マクロに見て弾性やシェークダウンの挙動を呈する領域にあっても、内外表面では多少降伏している可能性がある。 $\kappa$  はこの影響を設定するパラメータであり、 $\kappa = 2$  の時に最も保守的に考慮されていることになる。一方、 $\kappa = 1$  の場合 ( Fig. I. 2 ), 弾性及びシェークダウン領域では完全に弾性的な挙動を呈するものと割りきった場合に相当し、中間領域での曲線の立上がりは消失する。

両図に以下に示すような弾塑性の影響 ( $f_1$ ), 基本寸法公差の影響 ( $f_2$ ) および繰返しの寸法公差の影響 ( $f_3$ ) を独立に考えた手法<sup>3)</sup>による結果を破線で併記した。

$$f_1 = 1 \quad (Y \leq 1)$$

$$= 1 + (\bar{q}^* - 1) \left( 1 - \frac{1}{Y} \right) \quad (Y > 1, \quad \bar{q}^* = 1.5)$$

$$f_2 \doteq 1.245$$

$$f_3 \doteq 1.173 \quad (N \rightarrow \infty)$$

この場合、弾性域でのひずみ割増し係数はほとんど変わらないが、塑性によるひずみ増大について1次荷重(X)の影響が加味されていない。また、これは  $X = 0$  の場合に相当するが、上の式から明らかのように  $Y = 1.0$  で立上がり始めるのに対し、本手法による場合、 $Y = 0.7$  近傍から曲線が立上がっている ( Fig. I. 1,  $X = 0.0$  )。この理由は、本手法では、コンボリューション間の寸法誤差と塑性の相互作用が自動的に評価されることによる。

各因子の影響を独立に考える既存の手法では、内外表面の降伏の影響を1次荷重レベルをパラメータとして評価することはできない。

しかしながら、実質上、ラチェット領域はラチェット制限の方から設計許容範囲から除外されることを考えると、本手法によって  $\kappa = 3$  を設定した場合とほぼ同等な結果を与えることがわかる ( Fig. I. 2 )。



FINAS

-171-

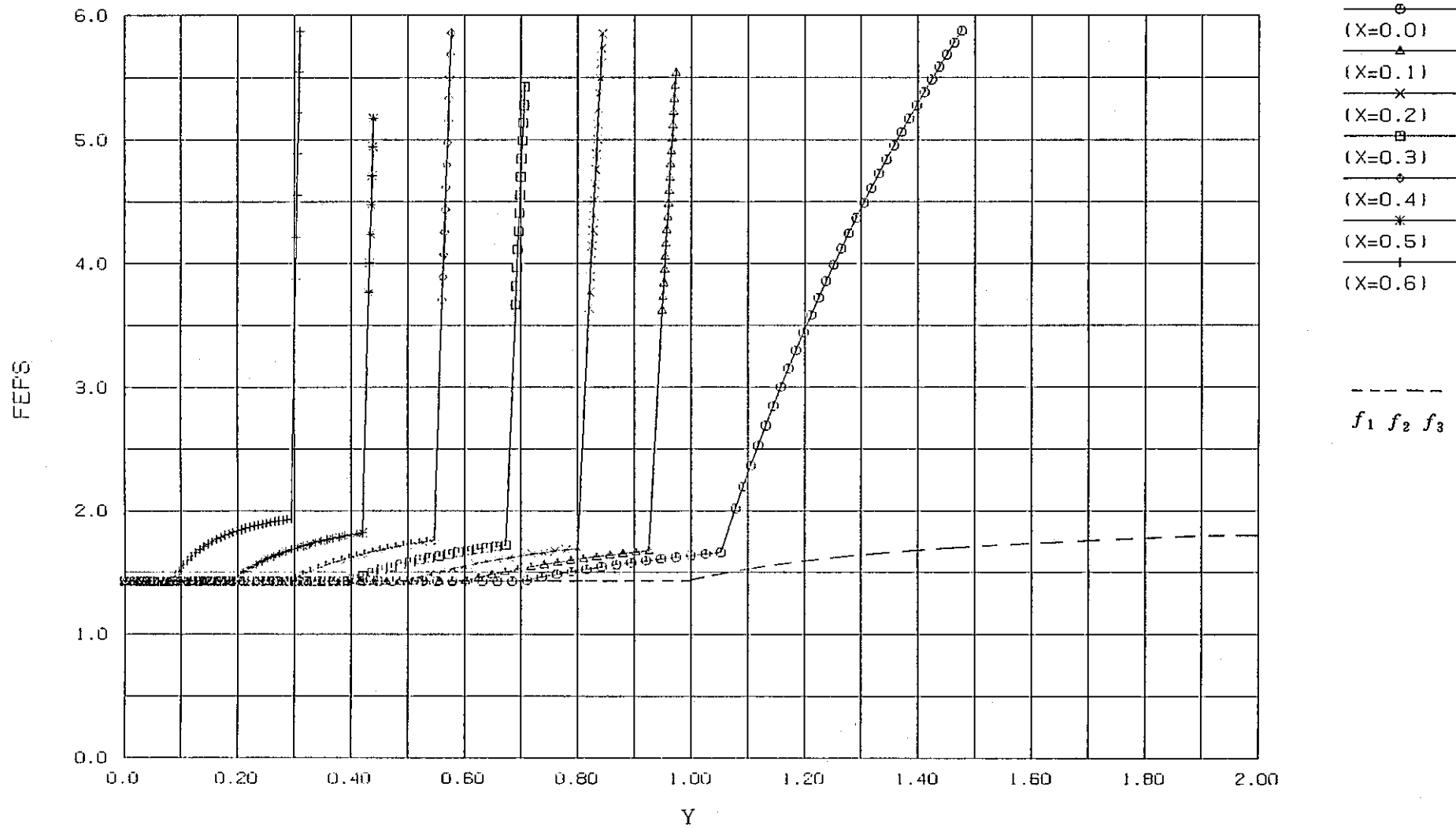


Fig. I.1  $f_e (N=10, t_n=2, \eta_H=0.06, \eta_t=0.1, \kappa=2)$

FINAS

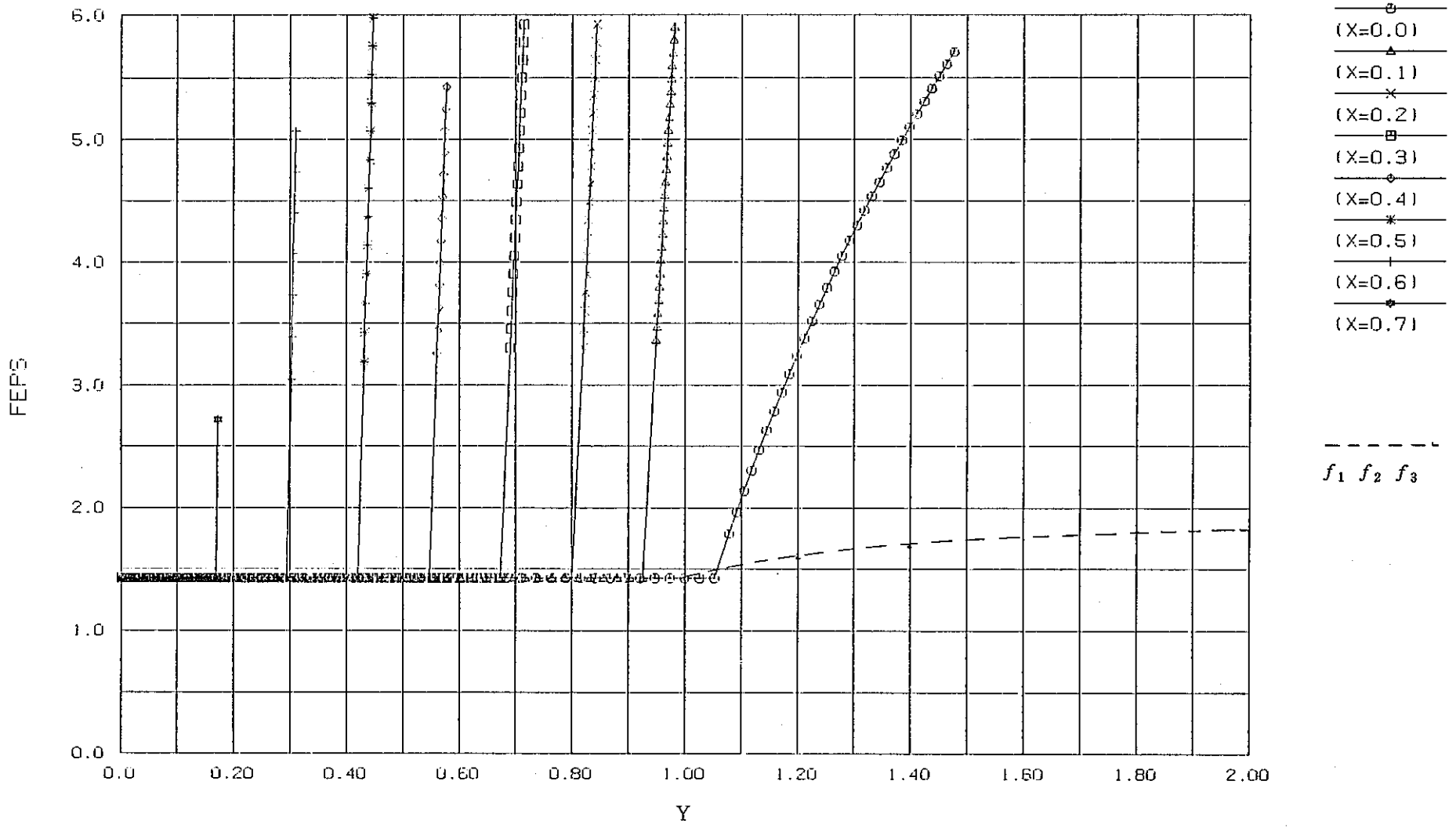


Fig. I.2  $f_{\epsilon}(N=10, t_n=2, \eta_H=0.06, \eta_t=0.1, \kappa=3)$

## ☆ 計算プログラム解説

本章に述べた方法により、ベローズのひずみ割増し係数を算出するプログラムを作成した。以下に“SAF”と称するこのプログラムのマニュアルとソースリストを添付する。

本プログラムの作成については、セントラル・コンピュータ・サービス(株)小出昭雄氏の協力によるところが大きい。

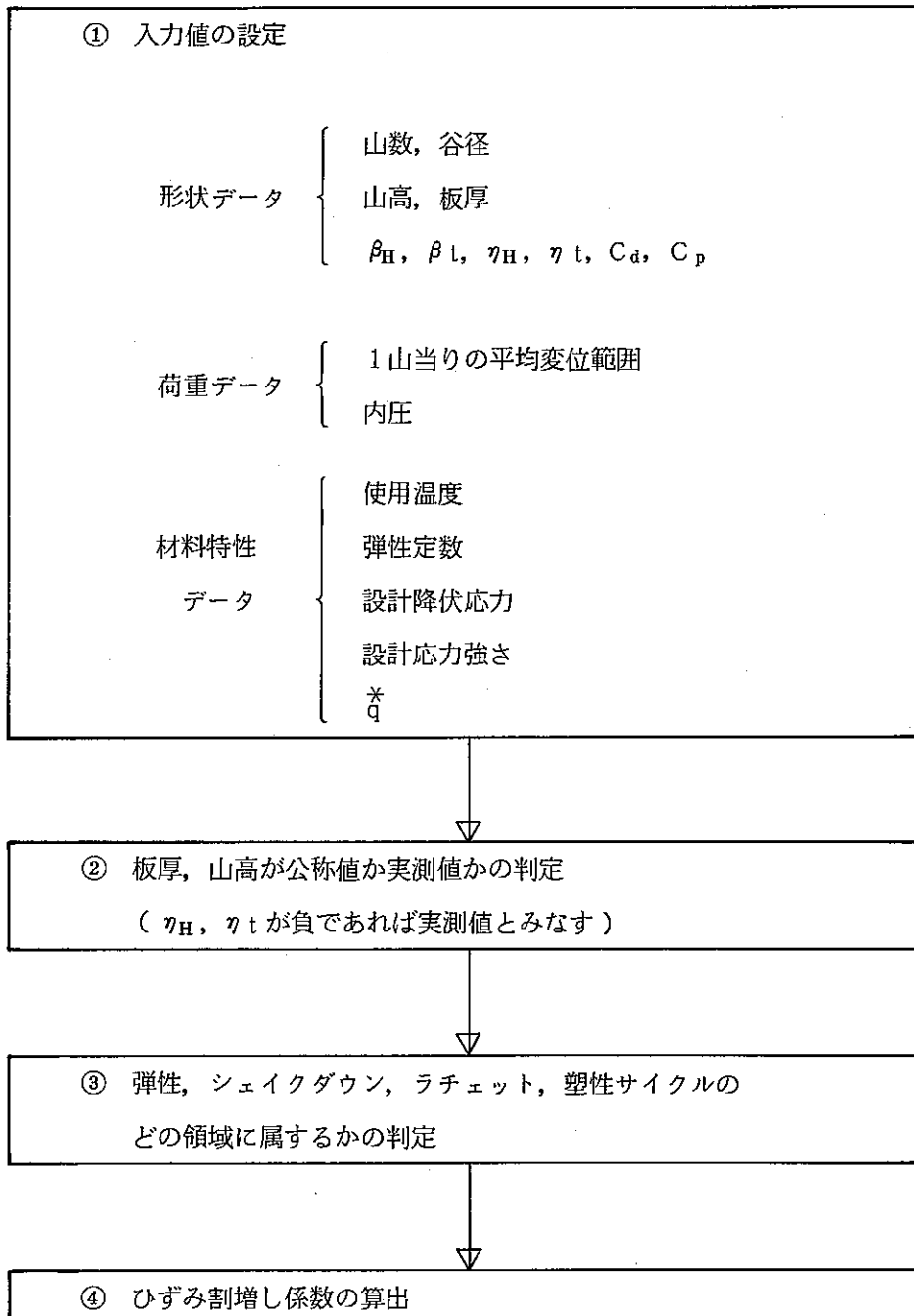
「ひずみ割増し係数算出プログラム」

S A F 取扱説明書  
(Strain Amplification Factor)

### 1. 概 要

本プログラムは、『ベローズの弾塑性ひずみ割増し係数の簡易評価法』に基づき、ベローズのひずみ割増し係数を算出するものである。

### 2. ひずみ割増し係数算出の流れ



### 3. 入出力変数

入力変数、出力変数は Table 3-1 に示す通りである。また Table 3-1 の出力変数の eq.\* は用いた式の番号を表わし、Table 3-2 に示している。

### 4. 入力ファイル

#### 4.1 書式

Table 4-1-1 に示すように、入力変数（データ入力順序が分かり易いように付けたコメントで、省略したい場合は空行を入れておくこと）の下に入力値を実数タイプで入れる。カラムは自由（数値と数値の間にカンマ“,” もしくは、1 個以上のブランクがあればそれを区切りと認識する）であるが、値が 0 でも必ず入力しなければならない。

5 行で 1 ケース分の入力データを記述する。

#### 4.2 設定値等

- (1)  $\eta_h$ ,  $\eta_t$  の両方に負値を指定すると、実態寸法をベースとした場合と見なされ、零値が、それ以外を指定すると公称寸法をベースとした値が使用される。
- (2) TEMP に 1 0 0 (°C) ~ 6 5 0 (°C) の値を入れると、ライブラリ (SUS316) による E, Sy, Sm の補間計算を行ない、E, Sy, Sm に値を指定しても無視される。  
TEMP に 0 を指定すると、補間を行わず E, Sy, Sm の入力値が使用される。
- (3)  $\beta_h$ ,  $\beta_t$ ,  $\bar{q}$  に負値を指定すると、標準値としてそれぞれ 0.03, 0.06, 1.5 の値が選ばれる。
- (4) eav (1 山当りの平均変位範囲) の値として、(-) をつけて入力すると、 $\delta_T$  (全変位範囲) とみなされる。

### 5. 出力ファイル

Table 5-1 に示すような書式で、結果は出力される。

f ε = 1.464 ~ f ε = 6 まで

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq e_{av} < e_{av} E & \Delta e_{av} = e_{av} E / 20 \\ e_{av} E \leq e_{av} < e_{av} S & \Delta e_{av} = (e_{av} S - e_{av} E) / 20 = e_{av} E / 20 \\ e_{av} S \leq e_{av}, P = 0 & \Delta e_{av} = 0.05 \\ e_{av} S \leq e_{av}, P \neq 0 & \Delta e_{av} = 0.005 \end{array} \right.$$

で計算する。

### 6. 実行手順

- ④ SAF.IN に入力値（レコードレイアウトは 7. を参照）を設定する。

② 『SAF』をキーイン，リターンする。

③ SAF.OUTに結果が出力される。

SAF.PLX に  $\left\{ \begin{array}{c} Y \\ f \epsilon \end{array} \right\}$  が6F10.4で出力される。  
SAF.PLY

7. レコードレイアウト

以下の5レコードが1組となっている。

001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024	025	026	027	028	029	030	031	032	033	034	035	036	037	038	039	040	041	042	043	044	045	046	047	048	049	050	051	052	053	054	055	056	057	058	059	060	061	062	063	064	065	066	067	068	069	070	071	072	073	074	075	076	077	078	079	080	081	082	083	084	085	086	087	088	089	090	091	092	093	094	095	096	097	098	099	100
コ メ ン ト (計算ケースに対する)																																																																																																			
属性																																																																																																			
桁数																																																																																																			
項番																																																																																																			

001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024	025	026	027	028	029	030	031	032	033	034	035	036	037	038	039	040	041	042	043	044	045	046	047	048	049	050	051	052	053	054	055	056	057	058	059	060	061	062	063	064	065	066	067	068	069	070	071	072	073	074	075	076	077	078	079	080	081	082	083	084	085	086	087	088	089	090	091	092	093	094	095	096	097	098	099	100
コ メ ン ト (次レコードに対する)																																																																																																			
属性																																																																																																			
桁数																																																																																																			
項番																																																																																																			

001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024	025	026	027	028	029	030	031	032	033	034	035	036	037	038	039	040	041	042	043	044	045	046	047	048	049	050	051	052	053	054	055	056	057	058	059	060	061	062	063	064	065	066	067	068	069	070	071	072	073	074	075	076	077	078	079	080	081	082	083	084	085	086	087	088	089	090	091	092	093	094	095	096	097	098	099	100
N										d										H <sub>n</sub>										t <sub>n</sub>										β <sub>H</sub>										β <sub>t</sub>										η <sub>H</sub>										η <sub>t</sub>																													
属性																																																																																																			
桁数																																																																																																			
項番																																																																																																			

No	ファイル名	ファイル-ID	ボリューム名	編成	レコード長	ブロック長	作成年月日	作成者



001	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
コ メ ン ト (次レコードに対する)																																																																		
属性																																																																		
指数																																																																		
項番																																																																		

001	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
TEMP	E	S <sub>y</sub>	S <sub>m</sub>	C <sub>d</sub>	C <sub>p</sub>	q	e <sub>av</sub>	p	K																																																									
属性																																																																		
指数																																																																		
項番																																																																		

001	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
属性																																																																		
指数																																																																		
項番																																																																		

No.	ファイル名	ファイル-ID	ボリューム名	編 成	レコード長	ブロッキング	作成年月日	作成者

第3レコードの第7、第8フィールドを負値にすると実測値入力となる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100		
	N			d														H <sub>1</sub>														t <sub>p1</sub>														H <sub>2</sub>														t <sub>p2</sub>														η <sub>H</sub>														η <sub>t</sub>														
属性																																																																																																						
桁数																																																																																																						
項番																																																																																																						

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
属性																																																																																																				
桁数																																																																																																				
項番																																																																																																				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
属性																																																																																																				
桁数																																																																																																				
項番																																																																																																				

No.	ファイル名	ファイル-ID	ボリューム名	編成	レコード長	ブロッキング	作成年月日	作成者

Table3-1 input and output data

input data		output data	
N	山数	$e_{av}$	eq. 2
d	谷径 (mm)	$e_{av} E$	eq. 3
H <sub>n</sub>	公称山高 (mm)	$e_{av} S$	eq. 4
t <sub>n</sub>	公称板厚 (mm)	$f \epsilon E$	eq. 5
$e_{av}$	1山当りの変位範囲 (mm)	$f \epsilon S$	eq. 6
P	内圧 (kg/mm <sup>2</sup> )	$f \epsilon R$	eq. 7
C <sub>d</sub>	E J M A 係数	$f \epsilon P$	eq. 8
C <sub>p</sub>		$e_2 R$	eq. 9
TEMP	使用温度(°C)	$e_r$	eq. 10
E	弾性定数 (kg/mm <sup>2</sup> )	$e^{total}$	eq. 11
S <sub>y</sub>	設計降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	$e_2 P$	eq. 12
S <sub>m</sub>	設計応力強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bm}^d R$	eq. 13
$\beta_H$	山高, 板厚についての繰返し寸	$\sigma_{bm}^d P$	eq. 14
$\beta_t$	法公差の幅を与えるパラメータ	$K e'$	eq. 15
$q^*$	弾性追従パラメータ	$H_2$	eq. 16
$\eta_H$	片側公差と公称寸法との比	$t p_2$	eq. 17
$\eta_T$		X	eq. 18, eq. 20, eq. 22
$\kappa$	eq. 15	Y	eq. 19, eq. 21, eq. 22

Table 3-2 used equations

(1/3)

$$\beta_{H'} = \frac{\beta_H}{1 - \beta_H} \quad , \quad \beta_{t'} = \frac{\beta_t}{1 - \beta_t} \quad \dots\dots\dots (\text{eq. 1})$$

$$e_{av} = \frac{1}{N} \{ (N-1) e_1 + e_2 \} \quad \dots\dots\dots (\text{eq. 2})$$

$$e_{av} E = \frac{9C_d S y}{10E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right) (1 - \eta_H)^2}{\alpha (1 + \eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3S y} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right)^2 (1 - \eta_H)^2}{(1 + \eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\}$$

..... (eq. 3)

$$e_{av} S = \frac{9C_d S y}{5E} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) (1 - \eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right)^2 (1 + \eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{C_p \cdot p}{3S y} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right)^2 (1 - \eta_H)^2}{(1 + \eta_t)^2} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}^2} \right\}$$

..... (eq. 4)

$$f_{\epsilon} E = \frac{\alpha (1 + \eta_t)}{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right) (1 - \eta_H)^2} \quad \dots\dots\dots (\text{eq. 5})$$

$$f_{\epsilon} S = \frac{\alpha (1 + \eta_t)}{\left(1 + \frac{\alpha-1}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right) (1 - \eta_H)^2} \quad (= f_{\epsilon} E) \quad \dots\dots\dots (\text{eq. 6})$$

$$f_{\epsilon} R = K e' \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right) (1 - \eta_H)^2} \cdot \frac{e_{total}}{e_{av}} \quad \dots\dots\dots (\text{eq. 7})$$

$$f_{\epsilon} P = K e' \frac{1 + \eta_t}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H\right)^2 (1 - \eta_H)^2} \cdot \frac{e_2 R}{e_{av}} \quad \dots\dots\dots (\text{eq. 8})$$

$$e_{2R} = \delta_t \left[ 1 - \frac{9SyC_d(N-1)}{5E} \cdot \frac{1}{\delta_T \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2} \frac{(1-\eta_H)H_n}{(1+\eta_t)t_{pn}} \right. \\ \left. \times \left\{ 1 - \frac{C_p}{3Sy} \cdot \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2 (1-\eta_H)^2 H_n^2}{(1+\eta_t)^2 t_{pn}} \cdot p \right\} \right] \dots\dots\dots (eq. 9)$$

$$e_r = 2 \left[ 2e_{2R} - \frac{18C_d Sy}{5E} (1-\eta_H)^2 H_n^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2 \cdot \frac{1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'}{(1+\eta_t)t_{pn}} \right. \\ \left. \times \left\{ 1 - \frac{C_p}{3Sy} (1-\eta_H)^2 H_n^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2 \frac{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'\right)^2}{(1+\eta_t)^2 t_{pn}^2} \cdot p \right\} \right] \dots\dots\dots (eq. 10)$$

$$e^{Total} = e_{2R} + e_r \dots\dots\dots (eq. 11)$$

$$e_{2P} = \delta_T \left\{ 1 - \frac{9SyC_d(N-1)}{5E \delta_T} \cdot \frac{(1-\eta_H)^2}{\left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'\right)^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2 (1+\eta_t)} \cdot \frac{H_n^2}{t_{pn}} \right\} \\ \dots\dots\dots (eq. 12)$$

$$\sigma_{bm}^d R = 5E \cdot \frac{(1+\eta_t)t_{pn}}{1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'} \cdot \frac{e^{Total}}{3C_d(1-\eta_H)^2 H_n^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2} \dots\dots\dots (eq. 13)$$

$$\sigma_{bm}^d P = 5E \cdot \frac{(1+\eta_t)t_{pn}}{1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'} \cdot \frac{e_{2P}}{3C_d(1-\eta_H)^2 H_n^2 \left(1 + \frac{N}{N-1} \beta_H'\right)^2} \dots\dots\dots (eq. 14)$$

$$Ke' = 1 + \left(\frac{*}{q} - 1\right) \left\{ 1 - \frac{AS}{\sigma_{bm}^d} \right\} \dots\dots\dots (eq. 15)$$

$$AS = \begin{cases} \kappa Sy - 2\sigma_{bm}^p & (\sigma_{bm}^p \leq \kappa Sy/2) \\ 0 & (\sigma_{bm}^p > \kappa Sy/2) \end{cases}$$

$$\sigma_{bm}^p = \frac{1}{2} \left(\frac{H_2}{t_{p2}}\right)^2 C_p \cdot p$$

$$H_2 = (1 - \eta_H) H_n \left( 1 + \frac{N}{N-1} \beta_{H'} \right) \dots\dots\dots (\text{eq. 16})$$

$$t_{p2} = \frac{(1 + \eta_t) t_{pn}}{1 + \frac{N}{N-1} \beta_t'} \dots\dots\dots (\text{eq. 17})$$

$$X = \frac{S_n'}{3 S_m} \quad (X^* \text{の約} \frac{1}{2} \text{に相当}) \dots\dots\dots (\text{eq. 18})$$

$$Y = \frac{S_n}{3 S_m} \quad (Y^* \text{の約} \frac{1}{2} \text{に相当}) \dots\dots\dots (\text{eq. 19})$$

$$S_n' = \frac{p}{2} \left( \frac{H}{t_{pn}} \right)^2 C_p \dots\dots\dots (\text{eq. 20})$$

$$S_n = \frac{5E t_{pn}}{3H^2 C_d} A e \dots\dots\dots (\text{eq. 21})$$

$$t_{pn} = t_n \sqrt{\frac{d}{d+H}} \dots\dots\dots (\text{eq. 22})$$

Table4-1-1 input data image

```
==== P-1 =====  
N / D / HN / TN / BETAH / BETAT / ETAH / ETAT  
10 1100. 60.0 2.0 -1. -1. 0.06 0.1296017  
TEMP/ E / SY / SM / CD / CP / Q / EAV / P / KAPPA  
0 15200 15.0 10.0 1.7 0.67 0 0.0 0.0754845 2.
```

Table 5-1 output data image

```

SSSS          AAA          FFFFFFFFFF
SSS  SSS     AA  AA      FF
SSS          AA  AA      FF
SSSS        AA  AA      FF  FF
SSSSS       AA  AA      FFFFFFFF
SSSS        AAAAAAAAAA   FF  FF
SSS  SSS     AA  AA      FF
SSS  SSS     AA  AA      FF
SSSS        AA  AA      FF
    
```

===== P-1 =====

< NOMINAL >

SPEC.

```

/ N / H1(MM) / H2(MM) / TP1(MM) / TP2(MM) / CD / CP /
10. 56.400 58.338 2.200 2.054 1.7000 0.6700
    
```

MATERIALS

```

/ TEMP(C) / E(KG/MM2) / SY(KG/MM2) / SM(KG/MM2) /
***** 15200. 15.000 10.000
    
```

TOLERANCE

```

/ BETAH / BEIAT / ETAH / ETAT /
0.0300 0.0600 0.0600 0.1296
    
```

ELASTIC FOLLOW UP COEFF.

```

/ Q /
1.5000
    
```

LOADING CONDITION

```

/ EAV(MM) / P(KG/MM2) /
0.0000 0.0755
    
```

< ELASTIC DOMAIN >

STRAIN AMPLIFICATION FACTOR

```

FEPSE = 1.4640 KE = 1.0000
EAV = 0.0000 EAVE = 0.1785 EAVS = 0.3571
    
```

DATA FOR XYGRAPH

```

X = 0.8000 Y = 0.0000
SNP = 24.0000 SN = 0.0000
    
```

SS

< RATCHET DOMAIN >

STRAIN AMPLIFICATION FACTOR

```

FEPSR = 6.2973 KE = 1.5000
EAV = 0.3760 EAVE = 0.1785 EAVS = 0.3571
    
```

OTHERS

```

ETOT = 1.415E+00 E2 = 6.578E-01 SIGR = 1.273E+01 KER = 1.500E+00
    
```

DATA FOR XYGRAPH

```

X = 0.8000 Y = 0.1010
SNP = 24.0000 SN = 3.0313
    
```



プログラムソースリスト

(1/6)

```

.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001 *#####00010002
000002 * THIS PROGRAM IS CALCULATING FOR STRAIN AMPLIFICATION FACTOR 00020002
000003 * ( BY TSUKIMORI'S FORMULA ) 00030002
000004 * 00040002
000005 * UPDATED '89.1.7 BETAT,BETAH 00050002
000006 * UPDAIED '89.9.1 K,KAPPA 00060002
000007 * UPDATED '89.9.8 DS 00070002
000008 *#####00080002
000009 PROGRAM SAF 00090002
000010 * 00100002
000011 INCLUDE (#SAFINC) 00110002
000012 CHARACTER*24 FL1,FL2,FL3,FL4,FL5 00120002
000013 COMMON /FL/ FL1,FL2,FL3,FL4,FL5 00130002
000014 FL1='Q303C.SAF.DATA(DATIN1)' 00140009
000015 FL2='Q303C.SAF.DATOU1' 00150009
000016 FL3='Q303C.SAF.SACHK1' 00160009
000017 FL4='Q303C.SAF.PLT1' 00170011
000018 FL5='Q303C.SAF.PLT1' 00180011
000019 OPEN(UNIT=10,FILE=FL1,FORM='FORMATTED') 00190002
000020 OPEN(UNIT=20,FILE=FL2,FORM='FORMATTED') 00200002
000021 OPEN(UNIT=30,FILE=FL3,FORM='FORMATTED') 00210002
000022 OPEN(UNIT=40,FILE=FL4,FORM='FORMATTED') 00220002
000023 OPEN(UNIT=50,FILE=FL5,FORM='FORMATTED') 00230011
000024 WRITE(6,1000) 00240002
000025 WRITE(6,1001) 00250002
000026 1001 FORMAT ( ' SSSS AAA FFFFFFFF' 00260002
000027 1 ,/, ' SSS SSS AA AA FF' 00270002
000028 1 ,/, ' SSS AA AA FF' 00280002
000029 1 ,/, ' SSSS AA AA FF FF' 00290002
000030 1 ,/, ' SSSSS AA AA FFFFFFFF' 00300002
000031 1 ,/, ' SSSS AAAAAAAAAA FF FF' 00310002
000032 1 ,/, ' SSS AA AA FF' 00320002
000033 1 ,/, ' SSS SSS AA AA FF' 00330002
000034 1 ,/, ' SSSS AA AA FF ' ) 00340002
000035 WRITE(6,1000) 00350002
000036 WRITE(20,1000) 00360002
000037 WRITE(20,1001) 00370002
000038 WRITE(20,1000) 00380002
000039 DO 100 IREAD=1,100 00390002
000040 * 00400002
000041 CALL CAL1 00410002
000042 * 00420002
000043 WRITE (6,1100) TITLE 00430002
000044 1000 FORMAT(1H ,/) 00440002
000045 1100 FORMAT(A) 00450002
000046 IF(EAV.LE.EAVE) THEN 00460002
000047 DEAV = EAVE/20. 00470002
000048 EAV = EAV+DEAV 00480002
000049 ELSEIF(EAV.GT.EVAE.AND.EAV.LE.EAVS) THEN 00490002
000050 DEAV = (EAVS-EAVE)/20. 00500002
000051 EAV = EAV+DEAV 00510002
000052 ELSEIF(EAV.GT.EAVS.AND.PABS.GT.ZERO) THEN 00520002
000053 EAV = EAV+0.005 00530002
000054 ELSEIF(EAV.GT.EAVP.AND.PABS.LE.ZERO) THEN 00540002
000055 EAV = EAV+0.05 00550002
000056 ENDIF 00560002
000057 IF(FEPS(IREAD).GT.6.0) THEN 00570002
000058 GO TO 999 00580002
000059 ENDIF 00590002
000060 DL = FAV*N 00600002
000061 IR = MOD(IREAD,6) 00610002
000062 IF(IR.EQ.0) THEN 00620002
000063 WRITE(40,3500) Y(IREAD-5),Y(IREAD-4),Y(IREAD-3),Y(IREAD-2), 00630010
000064 1 Y(IREAD-1),Y(IREAD) 00640002
000065 WRITE(50,3550) FEPS(IREAD-5),FEPS(IREAD-4),FEPS(IREAD-3), 00650011
000066 1 FEPS(IREAD-2),FEPS(IREAD-1),FEPS(IREAD) 00660002
000067 *3000 FORMAT(20X,6F10.4) 00670010
000068 3500 FORMAT(20HXVALU 1 1P,6F10.4 00671011
000069 + /(20X,1P,6F10.4)) 00672011
000070 3550 FORMAT(20HYVALU 1 1P,6F10.4 00673011
000071 + /(20X,1P,6F10.4)) 00674011
000072 ENDIF 00680002
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

```

.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000073      100  CONTINUE                                00690002
000074      *                                          00700002
000075          CLOSE(10)                                00710002
000076          CLOSE(20)                                00720002
000077          CLOSE(30)                                00730002
000078          CLOSE(40)                                00740002
000079          CLOSE(50)                                00750011
000080      999  STOP                                    00760002
000081          END                                    00770002
000082      *//////*                                     00780002
000083      *                                          00790002
000084      *      SUBROUTINE CAL1                          *      00800002
000085      *                                  MAIN CALCULATION *      00810002
000086      *//////*                                     00820002
000087          SUBROUTINE CAL1                            00830002
000088      *                                          00840002
000089          INCLUDE (#SAFINC)                          00850002
000090      *                                          00860002
000091          CALL CAL2                                  00870002
000092      *                                          00880002
000093          WRITE(30,*) 'NBH,NBH2,NBT,NBT2,ALP,ALPN'    00890002
000094          WRITE(30,*) NBH,NBH2,NBT,NBT2,ALP,ALPN    00900002
000095          WRITE(30,*) 'CSE,H1TP,ETOT,SIGPE'          00910002
000096          WRITE(30,*) 'EAVE,EAVS,FAVP,E2R,E2P'      00920002
000097          WRITE(30,*) CSE,H1TP,ETOT,SIGPE           00930002
000098          WRITE(30,*) EAVE,EAVS,EAVP,E2R,E2P       00940002
000099          WRITE(30,*) 'KAPPA,KEE'                  00950002
000100          WRITE(30,*) KAPPA,KEE                    00960002
000101          WRITE(30,*)                               00970002
000102          WRITE(20,*)                               00980002
000103          PABS = ABS(P)                             00990002
000104      *****                                       01000002
000105      *      ELASTIC DOMAIN *                          01010002
000106      *****                                       01020002
000107          IF(EAV.LE.EAVF) THEN                      01030002
000108          FEPS(IREAD) =KEE*ALP*(1.+ETAT)/(ALPN*NBH2*NBT*(1.-ETAH)*(1.-ETAH))01040002
000109      C                                          EQ.(3-23) 01050002
000110          WRITE(20,*) '< ELASTIC DOMAIN >'          01060002
000111          WRITE(20,*)                               01070002
000112          WRITE(20,*) 'STRAIN AMPLIFICATION FACTOR'  01080002
000113          WRITE(20,1100) FEPS(IREAD),KEE           01090002
000114          WRITE(20,*)                               01100002
000115          WRITE(20,1150) EAV,EAVE,EAVS              01110002
000116      *****                                       01120002
000117      *      SHAKEDOWN DOMAIN *                       01130002
000118      *****                                       01140002
000119          ELSEIF(EAV.GT.EAVF.AND.EAV.IE.EAVS) THEN  01150002
000120          FEPS(IREAD) =KEE*ALP*(1.+ETAT)/(ALPN*NBH2*NBT*(1.-ETAH)*(1.-ETAH))01160002
000121      C                                          EQ.(3-23) 01170002
000122          WRITE(20,*) '< SHAKEDOWN DOMAIN >'        01180002
000123          WRITE(20,*)                               01190002
000124          WRITE(20,*) 'STRAIN AMPLIFICATION FACTOR'  01200002
000125          WRITE(20,1200) FEPS(IREAD),KEE           01210002
000126          WRITE(20,*)                               01220002
000127          WRITE(20,1250) EAV,EAVE,EAVS              01230002
000128      *****                                       01240002
000129      *      RATCHET DOMAIN *                         01250002
000130      *****                                       01260002
000131          ELSEIF(EAV.GT.EAVS.AND.PABS.GT.ZFRO) THEN  01270002
000132      *      IF(KER1.LT.1..OR.KTR2.LT.1.) THEN      01280002
000133          IF(KFR1.LT.1.) THEN                          01290002
000134          WRITE(20,*) 'KE IS LESS THAN 1 !'          01300002
000135      C      STOP 5                                    01310002
000136          ENDF                                         01320002
000137          FEPS(IREAD) = KER1*ETOT*IP2*HN*HN/(TPN*H2*H2*EAV) 01330002
000138          FEPSR2 = KER2*ETOT*IP2*HN*HN/(TPN*H2*H2*EAV) 01340002
000139      C                                          EQ.(3-67) 01350002
000140          WRITE(20,*) '< RATCHET DOMAIN >'          01360002
000141          WRITE(20,*)                               01370002
000142          WRITE(20,*) 'STRAIN AMPLIFICATION FACTOR'  01380002
000143          WRITE(20,1300) FEPS(IREAD),KER1            01390002
000144          WRITE(20,*)                               01400002
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```





```

.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....
000289      Y(IREAD) = SN/(3.*SM)                                02850002
000290      RETURN                                              02860002
000291      END                                                  02870002
000292      *//////*                                              02880002
000293      *                                                    * 02890002
000294      *      SUBROUTINE REDLN                                * 02900002
000295      *                      READING INPUT DATA          * 02910002
000296      *//////*                                              02920002
000297      SUBROUTINE REDJN                                      02930002
000298      *                                                    02940002
000299      *      INCLUDE (#SAFINC)                              02950002
000300      *                                                    02960002
000301      READ(10,1100,ERR=998,END=999) TITLE                 02970002
000302      READ(10,*,ERR=998,END=999)                            02980002
000303      READ(10,*,ERR=998,END=999)N, D, HN, TN, BETAH, BETAT, ETAH, ETAT 02990002
000304      C READ(10,*,ERR=998,END=999) N, HN, TN, D, CD, CP, ETAH, ETAT 03000002
000305      READ(10,*,ERR=998,END=999)                            03010002
000306      READ(10,*,ERR=998,END=999)TEMP, E, SY, SM, CD, CP, Q, DL, P, KAPPA03020002
000307      C READ(10,*,ERR=998,END=999) TEMP, E, SY, SM, BETAH, BETAT, Q, DL, P03030002
000308      BETAH1 = BETAH                                          03031003
000309      BETAT1 = BETAT                                         03032003
000310      *****                                              03040002
000311      * DEFAULT VALUE (BETAH, BETAT, Q) *                  03050002
000312      *****                                              03060002
000313      WRITE(20,1100) TITLE                                  03070002
000314      TPN = SQRT(D/(D+HN))*TN                               03080002
000315      IF(BETAH.LT.0.E0.AND.BETAT.LT.0.E0) THEN           03090002
000316      BETAH = 0.03                                          03100002
000317      BETAT = 0.06                                          03110002
000318      BETAH1 = BETAH                                        03111003
000319      BETAT1 = BETAT                                       03112003
000320      ENDIF                                                 03120002
000321      IF(Q.LT.1.0E-6) THEN                                  03130002
000322      Q = 1.5                                               03140002
000323      ENDIF                                                 03150002
000324      IF(TEMP.LT.1.0E-6) THEN                                03160002
000325      TEMP = 1.0E10                                         03170002
000326      GO TO 100                                              03180002
000327      ENDIF                                                 03190002
000328      CALL LINIP(TEMP,E,SY,SM)                               03200002
000329      100 CONTINUE                                          03210002
000330      IF(DL.GE.0.) THEN                                      03220002
000331      EAV = DL                                               03230002
000332      DL = DL * N                                            03240002
000333      ELSE                                                 03250002
000334      DL = -DL                                               03260002
000335      EAV = DL/N                                             03270002
000336      ENDIF                                                 03280002
000337      *                                                    03290002
000338      WRITE(20,*)                                             03300002
000339      IF(ETAH.LT.0.E0.AND.ETAT.LT.0.E0) THEN                 03310002
000340      WRITE(20,*) '< ACTUAL >'                               03320002
000341      ETAH = 0.                                              03330002
000342      H1 = HN                                                 03340002
000343      H2 = BETAH                                              03350002
000344      BETAH = (H2/H1-1.)*(N-1.)/N                          03360002
000345      ETAT = 0.                                              03370002
000346      TPN = TN                                               03380002
000347      TP1 = TPN                                              03390002
000348      TP2 = BETAT                                             03400002
000349      BETAT = (TP1/TP2-1.)*(N-1.)/N                        03410002
000350      ELSE                                                 03420002
000351      WRITE(20,*) '< NOMINAL >'                               03430002
000352      BETAH = BETAH/(1.-BETAH)                               03440002
000353      BETAT = BETAT/(1.-BETAT)                             03450002
000354      H1 = (1.-ETAH)*HN                                       03460002
000355      H2 = H1*(1.+N/(N-1.))*BETAH )                        03470002
000356      TP1 = (1.+ETAT)*TPN                                     03480002
000357      TP2 = TP1/(1.+N/(N-1.))*BETAT )                    03490002
000358      ENDIF                                                 03500002
000359      WRITE(20,*)                                           03510002
000360      WRITE(20,*) 'SPEC.'                                    03520002
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....

```

```

.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000361      WRITE(20,*) '      / N / H1(MM) / H2(MM) /',          03530002
000362      1      ' TP1(MM) / TP2(MM) / CD / CP /'          03540002
000363      WRITE(20,2100) N, H1, H2, TP1, TP2, CD, CP          03550002
000364      WRITE(20,*)          03560002
000365      WRITE(20,*) 'MATERIALS'          03570002
000366      WRITE(20,*) '      / TEMP(C) / E(KG/MM2) /',          03580002
000367      1      ' SY(KG/MM2) / SM(KG/MM2) /'          03590002
000368      WRITE(20,2200) TEMP, E, SY, SM          03600002
000369      WRITE(20,*)          03610002
000370      WRITE(20,*) 'TOLERANCE'          03620002
000371      WRITE(20,*) '      / BETAH / BETAT / ETAH / ETAT /'          03630002
000372      WRITE(20,2300) BETAH1, BETAT1, ETAH, ETAT          03640003
000373      WRITE(20,*)          03650002
000374      WRITE(20,*) 'ELASTIC FOLLOW UP COEFF.'          03660002
000375      WRITE(20,*) '      / Q /'          03670002
000376      WRITE(20,2400) Q          03680002
000377      WRITE(20,*)          03690002
000378      WRITE(20,*) 'LOADING CONDITION'          03700002
000379      WRITE(20,*) '      / EAV(MM) / P(KG/MM2) /'          03710002
000380      WRITE(20,2500) EAV, P          03720002
000381      WRITE(20,*)          03730002
000382      *          03740002
000383      1100 FORMAT(A80)          03750002
000384      2100 FORMAT(9X,F5.0,2X,F7.3,2X,F7.3,2X,F7.3,2X,F7.3,3X,F7.4,1X,F7.4) 03760002
000385      2200 FORMAT(11X,F5.1,5X,F7.0,6X,F7.3,6X,F7.3)          03770002
000386      2300 FORMAT(10X,F7.4,2X,F7.4,1X,F7.4,1X,F7.4)          03780002
000387      2400 FORMAT(9X,F7.4)          03790002
000388      2500 FORMAT(11X,F7.4,2X,F7.4)          03800002
000389      *          03810002
000390      RETURN          03820002
000391      998 WRITE(20,*) 'FORMAT ERROR !'          03830002
000392      999 CONTINUE          03840002
000393      STOP          03850002
000394      END          03860002
000395      *////////////////////*          03870002
000396      *          *          03880002
000397      *      SUBROUTINE LINTP          *          03890002
000398      *          LINEAR INTERPOLATE          *          03900002
000399      *////////////////////*          03910002
000400      SUBROUTINE LINTP(TEMP,EO,SYO,SMO)          03920002
000401      *          03930002
000402      REAL SY(12), E(12), SM(12), TEMP, AMARI, SA          03940002
000403      REAL SYO, EO, SMO          03950002
000404      INTEGER TN          03960002
000405      *          03970002
000406      DATA SY / 17.9, .4, 15.2, 14.2, 13.4, 12.9,          03980002
000407      1      12.5, 12.1, 11.8, 11.4, 11.1, 10.7 /          03990002
000408      DATA E / 19400., 19100., 18800., 18400., 18000., 17600.,          04000002
000409      1      17200., 16700., 16200., 15700., 15200., 14700. /          04010002
000410      DATA SM / 14.0, 14.0, 13.5, 12.8, 12.1, 11.6,          04020002
000411      1      11.2, 10.9, 10.6, 10.3, 10.0, 9.6 /          04030002
000412      *          04040002
000413      ZERO = 1.0E-4          04050002
000414      *          04060002
000415      IF(TEMP.LT.100..OR.TEMP.GT.650.) THEN          04070002
000416      WRITE (6,*) 'INPUT TEMP.(',TEMP,') IS OUT OF RANGE ! '          04080002
000417      WRITE (20,*) 'INPUT TEMP.(',TEMP,') IS OUT OF RANGE ! '          04090002
000418      ELSE          04100002
000419      AMARI = ABS(MOD(TEMP,50.))          04110002
000420      TN = INT(TEMP/50.) - 1          04120002
000421      IF(AMARI.LT.ZERO) THEN          04130002
000422      SYO = SY(TN)          04140002
000423      EO = E(TN)          04150002
000424      SMO = SM(TN)          04160002
000425      ELSE          04170002
000426      SA = (TEMP-FLOAT(TN+1)*50.)/50.          04180002
000427      SYO = SY(TN) + (SY(TN+1)-SY(TN)) * SA          04190002
000428      EO = E(TN) + (E(TN+1)-E(TN)) * SA          04200002
000429      SMO = SM(TN) + (SM(TN+1)-SM(TN)) * SA          04210002
000430      ENDIF          04220002
000431      ENDIF          04230002
000432      RETURN          04240002
000433      END          04250002
000434      END          04260002

```

参考文献

- 1) 山下他, ベローズの塑性ラチェット評価法, 1987.3.  
(PNC SN9410 87-067)
- 2) 月森他, ベローズの解析のための簡易計算手法, 1986, 12  
(PNC SN9410 86-128)
- 3) Tsukimori, K. et al., Fatigue and Creep-fatigue Life Prediction  
of Bellows, PVP-vol.168, ASME, 1989, pp.113-122.

## 5. ベローズ継手適用配管系で生じる弾性追従の簡易評価

ベローズ継手を用いない配管引廻し方式では、高温において、エルボー間あるいはエルボーと直管の間で生じる弾性追従を設計上、制限する必要がある。ベローズ継手を適用した配管系の設計においても、弾性追従挙動を検討すべきであることは勿論であるが、通常、ベローズが直管やエルボーに比べて非常に剛性が低いため、その評価の仕方はかなり違ってくると考えられる。

本章では、まずベローズ継手適用配管系の弾性追従についての基本的な考え方を示す。次に、直管をばり、ベローズ継手を回転ばねに見立てた最も単純なモデルによって弾性追従挙動の定性的な検討を行い、最後に第3章に示したベローズのクリープ挙動の基礎式を利用して多少詳細に取扱うことを試みる。



## List of Figures

Fig.1-1	Absorption of Thermal Expansion of Simple "Z" bend piping system by Hinge type Expansion Joints .....	209
Fig.2-1	Elastic Follow-up between Bellows and Pipe .....	210
Fig.2-2	Elastic Follow-up between Two Bellows .....	210
Fig.3-1	Relation between Bending Moment and Rotational Displacement in the Elastic Follow-up of the Bellows Expansion Joint...	211



Fig.I.1(1)	Change of Moment Value with Time ( $\delta=50\text{mm}$ ).....	215
Fig.I.1(2)	Change of Moment Value with Time ( $\delta=25\text{mm}$ ).....	216
Fig.I.2(1)	Change of Rotation Angle with Time ( $\delta=50\text{mm}$ ).....	217
Fig.I.2(2)	Change of Rotation Angle with Time ( $\delta=25\text{mm}$ ).....	218



Fig.II.1.1	Input Data Contents .....	227
Fig.II.1.2	Example of Input Data .....	228
Fig.II.2.1	JCL .....	228
Fig.II.3.1	Data Form for XYPLOT .....	229
Fig.II.3.2	Data Form for List Output .....	230
Fig.II.3.3	Example of Output Data (XY values) .....	231
Fig.II.3.4	Example of Output Data (List) .....	232
Fig.II.4.1	JCL for XYPLOT .....	234
Fig.II.4.2	Example of XYPLOT Data for Output ( $t-\theta$ ) .....	235
Fig.II.4.3	Example of XYPLOT Data for Output ( $t-M$ ) .....	236
Fig.II.4.4	Example of XYPLOT ( $t-\theta$ ) .....	237
Fig.II.4.5	Example of XYPLOT ( $t-M$ ) .....	238

## 5.1 基本的な考え方

簡単のために Fig.1-1(a)に示す曲がり配管にヒンジ型ベローズ継手を適用して熱膨張変位を吸収させる場合を考える。

ベローズの剛性が、直管部やエルボーに比べて十分小さいと仮定すると、ベローズ継手適用配管系の弾性追従は、次の3つのパターンに類型化される。

- (1) 配管の熱応力は、ベローズ継手によって、完全に開放されるのではなく、一部の熱膨張変位の吸収は配管（エルボー）のたわみに依存する場合（Fig.1-1(b)）

この場合は、ベローズ継手部をピンとして配管系の弾性追従を解析すればよい。ここで問題となるのは、配管（エルボー）に発生する弾性追従ひずみの評価（通常配管引廻しの場合と同じ）と系の弾性追従によってピン廻りの回転角が増大する場合は配管系の弾性追従によって増加するベローズの端部相対変位である。いずれも、ベローズ継手をピンとみなした通常配管系の解析から得られる。

このようなケースは、適用するベローズ継手の数が少ない場合や、ベローズ継手にストッパーを設けて一部の変位を配管の撓みに依存する設計を行う場合等に当たる。

- (2) 配管の熱応力は、ベローズ継手によって完全に開放され、しかも、各ベローズ継手の吸収変位量は配管の熱膨張変位によって一意に規定される場合（Fig.1-1(c)）

この場合、配管の熱膨張はベローズ継手の変位吸収により完全に開放されるため、弾性追従は生じない。また、ベローズ継手相互間においても、各ベローズ継手の変位吸収量が、配管の熱膨張変位により、完全に規定されるのでこの意味での弾性追従は問題とならない。従って、配管系レベルでの弾性追従は生じないと考えられ、ベローズ継手適用配管系の設計としては理想的であると言える。

- (3) 配管の熱応力は、ベローズ継手によって完全に開放されるが、各ベローズ継手の吸収変位量は配管の熱膨張変位によって一意に規定されず、ベローズ継手相互間のばね定数のバランスで決まる場合（Fig.1-1(d)）

この場合、配管の熱膨張は、ベローズ継手の変位吸収により完全に開放されるため、配管（エルボー）には弾性追従ひずみは発生しないが、ベローズ継手相互間での弾性追従は生じ得る。

従って、ベローズ継手相互間での弾性追従挙動を解析し、設計の保守性を確保する必要がある。

このようなケースは、ひとつのベローズ継手の負担を軽減するために、多くのベローズ継手を設置した場合等に当たる。ストッパー等により、弾性追従による変位を制限するなどの方策が考えられるが、系の挙動は複雑になる。

(注意)

以上は、ベローズの剛性が、直管部やエルボーに比べて十分小さいという前提での議論であるが、例えばベローズとエルボーとの間で無視し得ない弾性追従が生じる可能性がある場合はベローズの剛性を考慮した系の解析が必要である。但し、弾性追従によってベローズ継手の吸収変位が増大する場合は、ベローズ継手をピンとみなした解析によってベローズ自体は保守的に評価されるものと考えられる。逆に、エルボーに弾性追従ひずみが発生する場合は、ベローズ継手をピンとみなした解析は非保守的な評価となる。

5.2 ベローズ継手をばねとみなす単純モデル

5.1 で示した2つのパターン ( Fig.1-1 の(c)と(d) ) について、ベローズ継手を回転ばね、配管をはりとみなした単純なモデルで検討を行う。以下の例では、ベローズ継手と直管がシリーズに継がった部分について検討しているが、複雑な配管系についても同様の考え方で評価できる。但し、定量的に評価するためには、式中の各定数を何らかの方法で適切に算定する必要がある。

(1) ベローズ継手と配管の間の弾性追従

(a) 弾性変形

概念的な検討を行うために Fig.2-1 に示す単純なベローズ継手と直管からなる系を考える。

◦配管のたわみ  $\delta_P$

$$\delta_P = \frac{L^3}{3EI} P = \frac{L^2}{3EI} M \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで、Lは配管長さ、EIは配管の曲げ剛性、Pは配管先端の横荷重、M (= PL) は曲げモーメントである。

◦ベローズの曲げ角度  $\theta^{(e)}$

$$\theta^{(e)} = \frac{M}{K_\theta} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

ここで、 $K_\theta$  はベローズ継手の曲げばね定数であり、簡単のため、ベローズ長さは無視している。

◦全たわみ  $\delta$

$$\delta = \delta_P + L \theta^{(e)} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

式(2-1)、式(2-2)からMを消去すると、

$$\delta_P = \frac{L^2}{3EI} k_\theta \cdot \theta^{(e)} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

式(2-4)を式(2-3)に代入すると、

$$\delta = L \left( 1 + \frac{L k_\theta}{3EI} \right) \theta^{(e)} \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

(b) クリープ変形後

ベローズにとって最も厳しい場合として、配管に完全に追従してベローズ変形が進行する

と仮定すると、クリープ変形後のペローズの曲げ角度  $\theta^{(c)}$  は、

$$\theta^{(c)} = \frac{\delta}{L} \dots\dots\dots (2-6)$$

ペローズに発生するひずみが曲げ角度に比例することから、ひずみ増倍率  $\eta$  は、

$$\eta = \frac{\theta^{(c)}}{\theta^{(e)}} = 1 + \xi \dots\dots\dots (2-7)$$

ただし、 $\xi$  はペローズと配管の曲げ剛性比であり、

$$\xi = \frac{k_{\theta} L}{3EI} \dots\dots\dots (2-8)$$

式(2-7)からわかるように  $\xi$  が僅少であれば、ペローズ継手と配管の間の弾性追従は問題とならない。

(c) 数値例

Fig. 2-1 の系で簡単に定量的評価を行う。想定した諸量は下記の通りである。

$$\left[ \begin{array}{l} \text{SUS316, } T=500^{\circ}\text{C, } E=16200 \text{ kg/mm}^2 \\ k_{\theta} = 2.2 \times 10^8 \text{ kg/rad (H=q=60, } t_B=3, d=900 \text{ mm, } N=20) \\ I = 3 \times 10^9 \text{ mm}^4 \text{ (d=900, } t_P=10 \text{ mm)} \\ L=8000 \text{ mm} \end{array} \right]$$

ペローズと配管の曲げ剛性比  $\xi$  は式(2-8)より、

$$\xi = 1.5 \times 10^{-6} L = 1.2 \times 10^{-2}$$

従って、ひずみ増倍率  $\eta$  は式(2-7)より、

$$\eta = 1.012$$

(2) ペローズ継手相互の弾性追従

最も簡単な系として Fig. 2-2 に示す様な配管にペローズ継手が2ヶ直列に設置されている場合を考える。但し、簡単のため、配管は剛とし、中間サポート、スナッチャー等の影響は考慮しない。

ペローズ(1)の曲げモーメント  $M_1$  は、

$$M_1 = k_{\theta 1} \cdot \theta_1 \dots\dots\dots (2-9)$$

ベローズ(2)の曲げモーメント  $M_2$  は,

$$M_2 = k_{\theta 2} \cdot \theta_2 \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

また,

$$M_1 = L P \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

$$M_2 = L_2 P \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

荷重点の変位  $\delta$  は,

$$\delta = L \theta_1 + L_2 \theta_2 \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

ここで,  $k_{\theta 1}$ ,  $k_{\theta 2}$  はそれぞれベローズ(1), (2)の曲げばね定数,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  はそれぞれベローズ(1), (2)の曲げ角度,  $P$  は荷重,  $L$  は配管全長,  $L_2$  は荷重点からベローズ(2)までの長さである。

式(2-9)~式(2-12)を用いると, 式(2-13)は,

$$\delta = \left\{ 1 + \left( \frac{L_2}{L} \right)^2 \cdot \frac{k_{\theta 1}}{k_{\theta 2}} \right\} L \theta_1 \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

クリープ変形後について(c)を付して, 式(2-11), 式(2-12)は,

$$M_1 = L P_c \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

$$M_2 = L_2 P_c \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

ベローズ(2)の方が応力が低く, 弾性的な挙動をすると仮定すると,

$$M_2 = k_{\theta 2} \cdot \theta_2 \quad \dots\dots\dots (2-17)$$

(†) ベローズ(1)が応力緩和してモーメント反力が  $M_2$  の  $\kappa$  倍に達するとそれ以上は弾性追従を生じないと仮定\*すると,

$$M_1 = \kappa M_2 = \kappa k_{\theta 2} \cdot \theta_2 = L P_c \quad \dots\dots\dots (2-18)$$

式(2-16)~式(2-18)から,

\* ベローズ(2)の方が応力が低く, 弾性的な挙動をすると仮定したことから, 初期のモーメント  $M_2$  の  $\kappa$  倍を弾性追従の閾値と考える。

$$\frac{k_{\theta 2} \theta_{2c}}{L_2} = \frac{\kappa k_{\theta 2} \theta_2}{L} \quad \text{即ち } L \theta_{2c} = \kappa L_2 \theta_2 \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

また、式(2-13)から同様に、

$$\delta_c = L \theta_{1c} + L_2 \theta_{2c} \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

式(2-13)、式(2-20)を式(2-19)に代入すると、

$$\frac{L}{L_2} (\delta_c - L \theta_{1c}) = \kappa (\delta - L \theta_1) \quad \dots\dots\dots (2-21)$$

即ち、

$$\frac{L}{L_2} \delta_c - \kappa \delta = \frac{L^2}{L_2} - \left( \theta_{1c} - \frac{L_2}{L} \kappa \theta_1 \right) \quad \dots\dots\dots (2-22)$$

ここで、

$$\delta_c = \delta \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

式(2-23)を式(2-22)に用い、更に式(2-14)を考慮すると、ベローズ(1)のひずみ増倍率  $\eta$  は

$$\eta = \frac{\theta_{1c}}{\theta_1} = \frac{L_2}{L} \left[ \kappa + \left( \frac{L}{L_2} - \kappa \right) \left\{ 1 + \left( \frac{L_2}{L} \right)^2 \cdot \frac{k_{\theta 1}}{k_{\theta 2}} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (2-24)$$

ただし、 $0 \leq L_2 \leq L$

あるいは、

$$\eta = 1 + \alpha^2 (1 - \kappa \alpha) \xi \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

なお、

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{L_2}{L} \quad \dots\dots\dots (2-26a) \\ \xi = \frac{k_{\theta 1}}{k_{\theta 2}} \quad \dots\dots\dots (2-26b) \end{array} \right.$$

数値例として,

$$\alpha = \frac{1}{2}, \quad \xi = 1, \quad \kappa = 1$$

とすると,

$$\eta = 1.125$$

(ii) 極端な場合としてベローズ(1)のモーメント反力が零まで緩和することを考えると,

$$\theta_{2c} = 0 \quad \text{即ち} \quad \theta_{1c} = \frac{\delta_c}{L} \quad \dots\dots\dots (2-27)$$

式(2-14)と式(2-27)及び式(2-23)より,あるいは,式(2-25)で  $\kappa = 0$  として,

$$\eta = 1 + \alpha^2 \xi \quad \dots\dots\dots (2-28)$$

数値例として, (i)と同じ値を考えると,

$$\eta = 1.250$$

以上, ベローズ継手相互間の弾性追従に関して, 簡単なモデルを使って検討したが, 実際の配管系はより複雑であり, 弾性追従挙動も単純ではない。

数値例で示される様にベローズ相互間の弾性追従量はベローズと配管の間の弾性追従量に比べてかなり大きくなる可能性がある。特に配管系の中で同じ自由度の変位を複数のベローズ継手で分担して吸収させるような場合, 即ちベローズ継手を関節として配管系が余剰自由度を有する場合には, 配管引廻しの設計において弾性追従挙動の観点からそれらのバランスを吟味, 検討する必要があるだろう。



5.3 コンポリューションのクリープ変形を考慮した評価法

第3章のベローズ断面の曲げモーメントを表わす式(2-10)を利用して、ベローズ継手を適用した配管系に生じる弾性追従挙動を若干詳細に検討する。ここでは、ベローズ継手の弾性追従が顕著となる可能性の大きい場合、即ち、Fig. 2-2に示されるヒンジ型ベローズ継手をピンとみなした場合、系の変位が一意に決まらない最も単純なケースをまず扱う。次に、より複雑な配管系あるいは、エルボや直管のたわみを考慮する場合も同様のアプローチが可能であることを示す。

内圧による座屈に関する記述で示したようにベローズにたわみがある場合、圧力によって横方向荷重を生じる。以下の検討では、簡単のため、この影響と配管等の自重を無視する。

Fig. 2-2の単純なベローズ継手付配管モデルについてベローズ継手(1)、(2)に負荷されるモーメント  $M_1$  ,  $M_2$  はそれぞれ

$$M_1 = LP \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

$$M_2 = L_2 P \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

ここで、 $P$  は端部に作用する横荷重、 $L$  は配管全長、 $L_2$  は荷重点からベローズ(2)までの長さである。

また、荷重点の変位  $\delta$  は、

$$\delta = L \theta_1 + L_2 \theta_2 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

ここで、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  は、それぞれベローズ継手(1)、(2)が吸収する曲げ角度である。

ベローズ(2)は、弾性挙動をとるとすると、式(3-2)のモーメントは、次の様に書ける。

$$M_2 = k_{\theta 2} \cdot \theta_2 \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

ここで、 $k_{\theta 2}$  はベローズ継手(2)の曲げばね定数である。

式(3-1)～式(3-4)を使って、

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{L}{L_2} M_2 = \frac{L}{L_2} k_{\theta 2} \cdot \theta_2 \\ &= \frac{L^2}{L_2^2} k_{\theta 2} \left( \frac{\delta}{L} - \theta_1 \right) \quad \dots\dots\dots (3-5) \end{aligned}$$

一方、ベローズの曲率速度と曲げモーメントの関係は、第3章の式(2-10)より、

$$M = -\alpha \left| \frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} \right|^{\frac{1}{n}} \cdot \text{sgn} \frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

式(3-6)中の記号は、3.2節に従う。

$\frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} < 0$  として式(3-6)を曲率速度について解きなおすと、

$$\frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} = -a^{-n} M^n \dots\dots\dots (3-7)$$

圧力による変形が小さいとすると、ヒンジ、ジンバル型ベローズ継手の場合、ベローズの曲率は  $x$  に関してほぼ一定とみなせる。

$$\frac{\partial M}{\partial x} \doteq 0 \text{ (曲率一定)} \dots\dots\dots (3-8)$$

式(3-8)の仮定のもとに式(3-7)を1回積分すると、

$$\frac{d \dot{w}}{dx} = -a^{-n} \cdot M^n x \dots\dots\dots (3-9)$$

ここで、次の境界条件を用いている。

$$\left. \frac{d \dot{w}}{dx} \right|_{x=0} = 0 \dots\dots\dots (3-10)$$

また、 $l$  をベローズ長さとして、

$$\left. \frac{d \dot{w}}{dx} \right|_{x=l} = -\dot{\theta}_1, \quad M \Big|_{x=l} = M_1 \dots\dots\dots (3-11 a b)$$

を式(3-9)に用いると、

$$\dot{\theta}_1 = \mathcal{A} M_1^n \dots\dots\dots (3-12)$$

ただし、

$$\mathcal{A} = a^{-n} l \dots\dots\dots (3-13)$$

式(3-12)に式(3-5)を代入すると、

$$\dot{\theta}_1 = \mathcal{A} \left( \frac{L}{L_2} \right)^{2n} \cdot k_{\theta 2}^n \cdot \left( \frac{\delta}{L} - \theta_1 \right)^n \dots\dots\dots (3-14)$$

よって,

$$\frac{d\theta_1}{\left(\frac{\delta}{L} - \theta_1\right)^n} = \mathcal{A} \left(\frac{L}{L_2}\right)^{2n} \cdot k_{\theta_2} \cdot dt \quad \dots\dots\dots (3-15)$$

これは、容易に積分できて,

$$\frac{1}{n-1} \left\{ \frac{1}{\left(\frac{\delta}{L} - \theta_1\right)^{n-1}} - \frac{1}{\left(\frac{\delta}{L} - \theta_{10}\right)^{n-1}} \right\} = \mathcal{A} \left(\frac{L}{L_2}\right)^{2n} \cdot k_{\theta_2} \cdot t \quad \dots\dots\dots (3-16)$$

ここで、次の初期条件を用いている。

$$\theta_1 \Big|_{t=0} = \theta_{10} \quad \dots\dots\dots (3-17)$$

式(3-16)を更に整理すると,

$$\theta_1 - \frac{\delta}{L} = \frac{\theta_{10} - \frac{\delta}{L}}{\left\{ 1 + (n-1) \mathcal{A} \left(\frac{L}{L_2}\right)^{2n} \cdot k_{\theta_2} \left(\frac{\delta}{L} - \theta_{10}\right)^{n-1} \cdot t \right\}^{\frac{1}{n-1}}} \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

上式は、Fig. 2-2の系の弾性追従挙動を表わす。ベローズ継手(1)の曲げ角度 $\theta_1$ は、初期( $t=0$ )に $\theta_{10}$ であるが、 $t \rightarrow \infty$ で $\frac{\delta}{L}$ に一致する。

$\theta_{10}$ は次式から求められる。

$$M_{10}(\theta_{10}) = \left(\frac{L}{L_2}\right)^2 k_{\theta_2} \left(\frac{\delta}{L} - \theta_{10}\right) \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

上式では、初期のベローズ継手(1)の曲げモーメント $M_{10}$ を $\theta_{10}$ の関数とおいている。もし、弾性範囲であれば、

$$M_{10} = k_{\theta_1} \theta_{10} \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

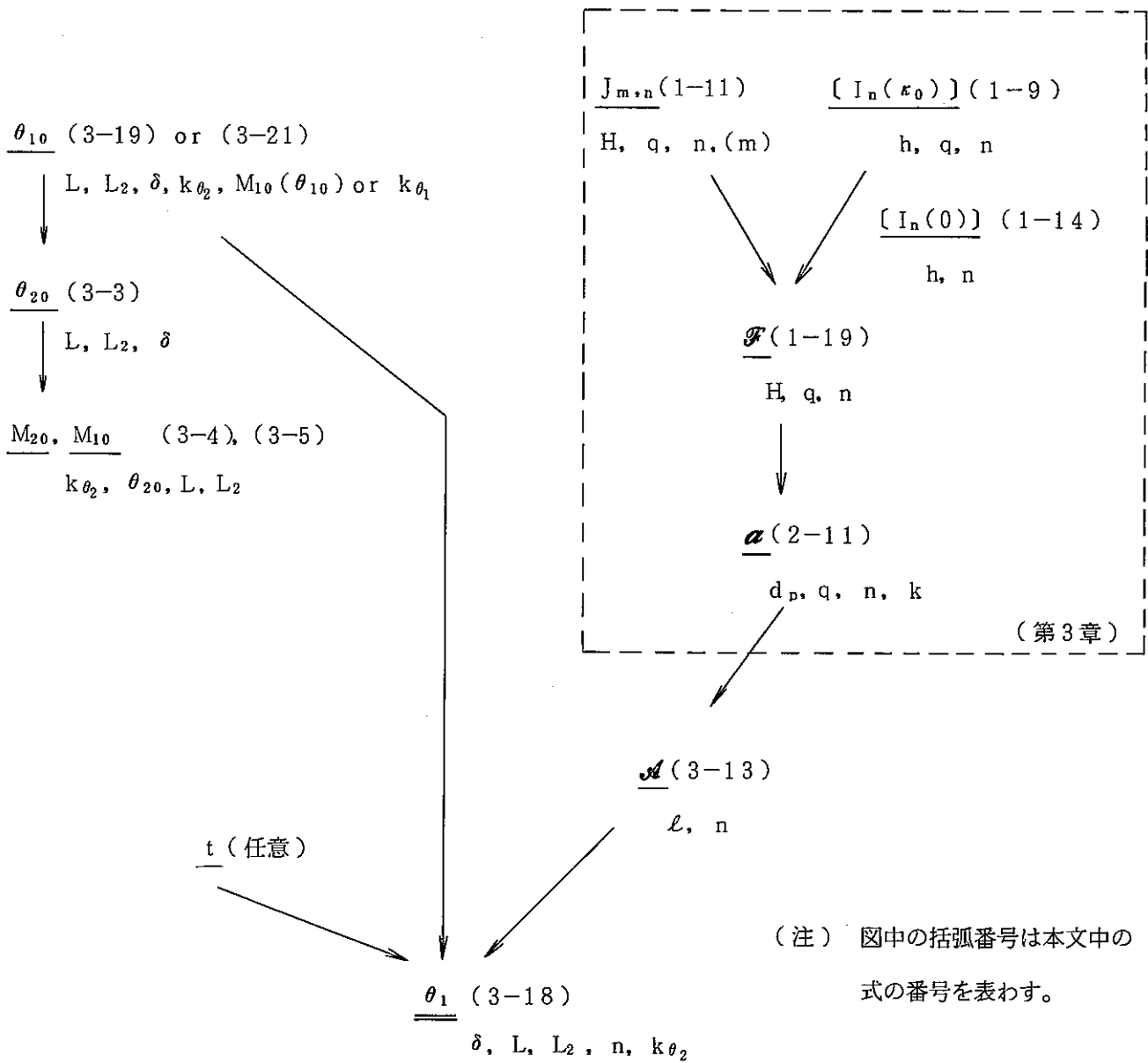
従って,

$$\theta_{10} = \frac{\delta}{L} \Big/ \left\{ 1 + \left(\frac{L_2}{L}\right)^2 \frac{k_{\theta_1}}{k_{\theta_2}} \right\} \quad \dots\dots\dots (3-21)$$

式(3-18)は、第3章の一部を利用して解くことができる。計算の流れを次頁に示す。

(必要データ)

- (1) ベローズ形状パラメータ :  $d_p, H, q, h(t), \ell = Nq$
- (2) Norton則パラメータ :  $k, n$
- (3) 配管長さ, 先端変位 :  $L, L_2, \delta$
- (4) ベローズ継手ばね定数 :  $k_{\theta_2}, k_{\theta_1}$  or  $M_{10}(\theta_{10})$



(注) 図中の括弧番号は本文中の式の番号を表わす。

弾性追従挙動  $\theta_1 \sim t$  の計算手順

次に、より一般的な配管引き廻しの場合のベローズ継手の弾性追従挙動を考える。複雑な配管引き廻しの場合も、弾性追従が生じると想定するベローズ継手に作用する曲げモーメントと変位角の関係が式(3-5)のように求まれば、前述の単純な系と同様のアプローチが可能である。

そこで、まず、ベローズ継手を単純な回転バネとみなした配管系の応力解析を実施し、この中で弾性追従を生じると考えられるベローズ継手の曲げ剛性を変化させて、このベローズ継手に加わる曲げモーメントMと吸収変位角θの関係を求める。弾性解析であれば、Mとθの関係はほぼ線形となる。Fig. 3-1は初期の曲げモーメントをM<sub>0</sub>、初期の変位角をθ<sub>0</sub>とした場合のMとθの関係を描いたものであるが、これは、βをパラメータとして次式で表わされる。

$$M = M_0 \left( 1 + \beta - \frac{\beta \theta}{\theta_0} \right) \dots\dots\dots (3-22)$$

式(3-12)と同様に

$$\dot{\theta} = \mathcal{A} M^n \dots\dots\dots (3-23)$$

式(3-22)を式(3-23)に代入すると

$$\dot{\theta} = \mathcal{A} M_0^n \left( \frac{\beta}{\theta_0} \right)^n \left( \frac{1+\beta}{\beta} \theta_0 - \theta \right)^n \dots\dots\dots (3-24)$$

式(3-24)を解くと

$$\frac{1}{n-1} \left\{ \frac{1}{\left( \frac{1+\beta}{\beta} \theta_0 - \theta \right)^{n-1}} - \frac{1}{\left( \frac{\theta_0}{\beta} \right)^{n-1}} \right\} = \mathcal{A} \left( \frac{\beta}{\theta_0} \right)^n M_0^n t \dots\dots\dots (3-25)$$

但し、次の初期条件を用いている。

$$\theta = \theta_0 \quad (t = 0) \dots\dots\dots (3-26)$$

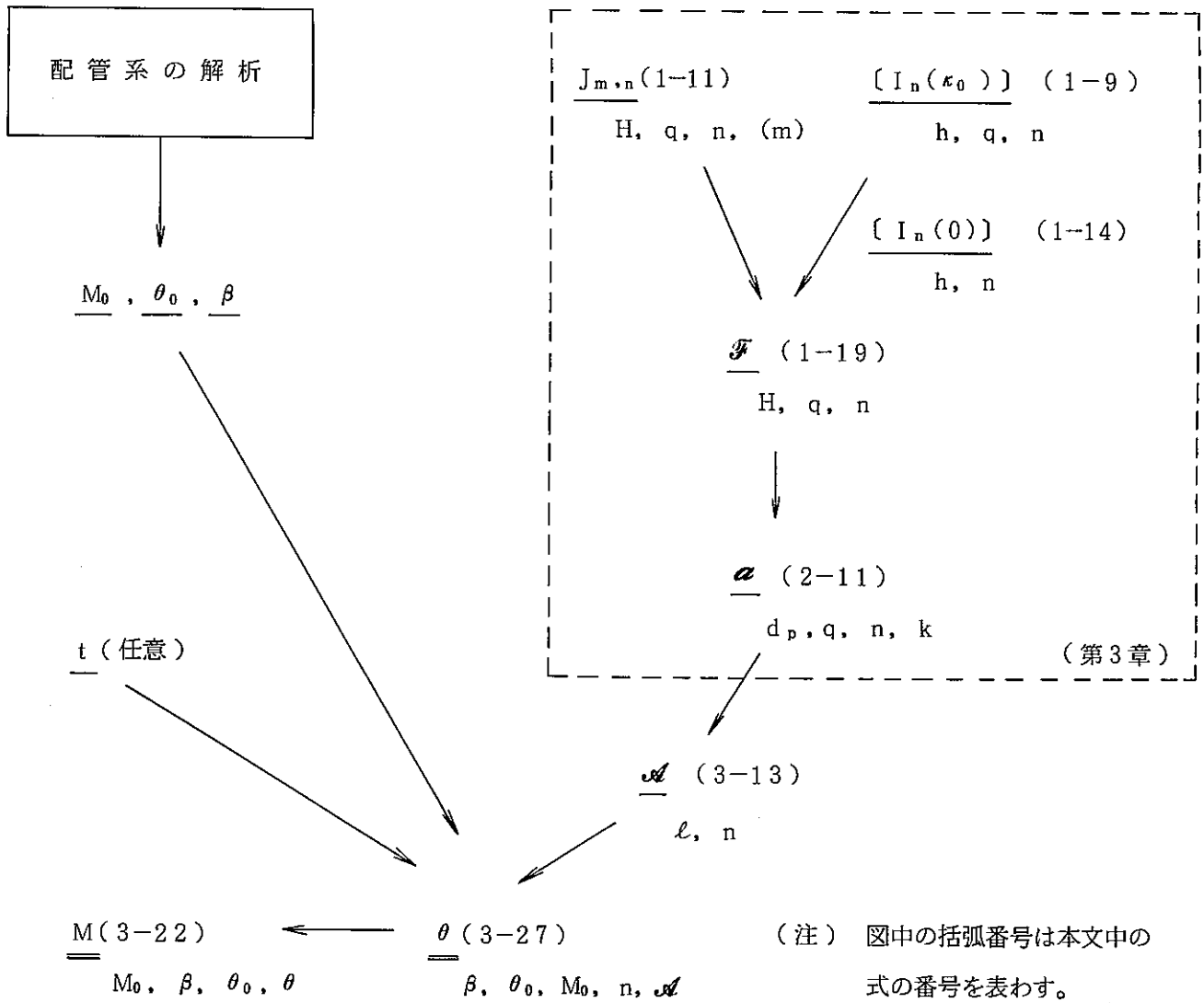
式(3-25)を整理すると

$$\theta = \frac{\theta_0}{\beta} \left[ 1 + \beta - \frac{1}{\left\{ 1 + (n-1) \mathcal{A} \cdot \frac{\beta}{\theta_0} \cdot M_0^n \cdot t \right\}^{\frac{1}{n-1}}} \right] \dots\dots\dots (3-27)$$

式(3-27)は、式(3-18)と同様に第3章の一部を利用して解くことができる。計算の流れを以下に示す。

(必要データ)

- (1) ベローズ形状パラメータ :  $d_p, H, q, h$  (板厚),  $l=Nq$
- (2) Norton則パラメータ :  $k, n$
- (3) ベローズに加わる曲げモーメントと変位角の関係を表わすパラメータ  
:  $M_0, \theta_0, \beta$  (配管系の解析から求める)



~~~~~  
ベローズ継手適用配管系の弾性追従挙動  $\theta(M) \sim t$  の計算

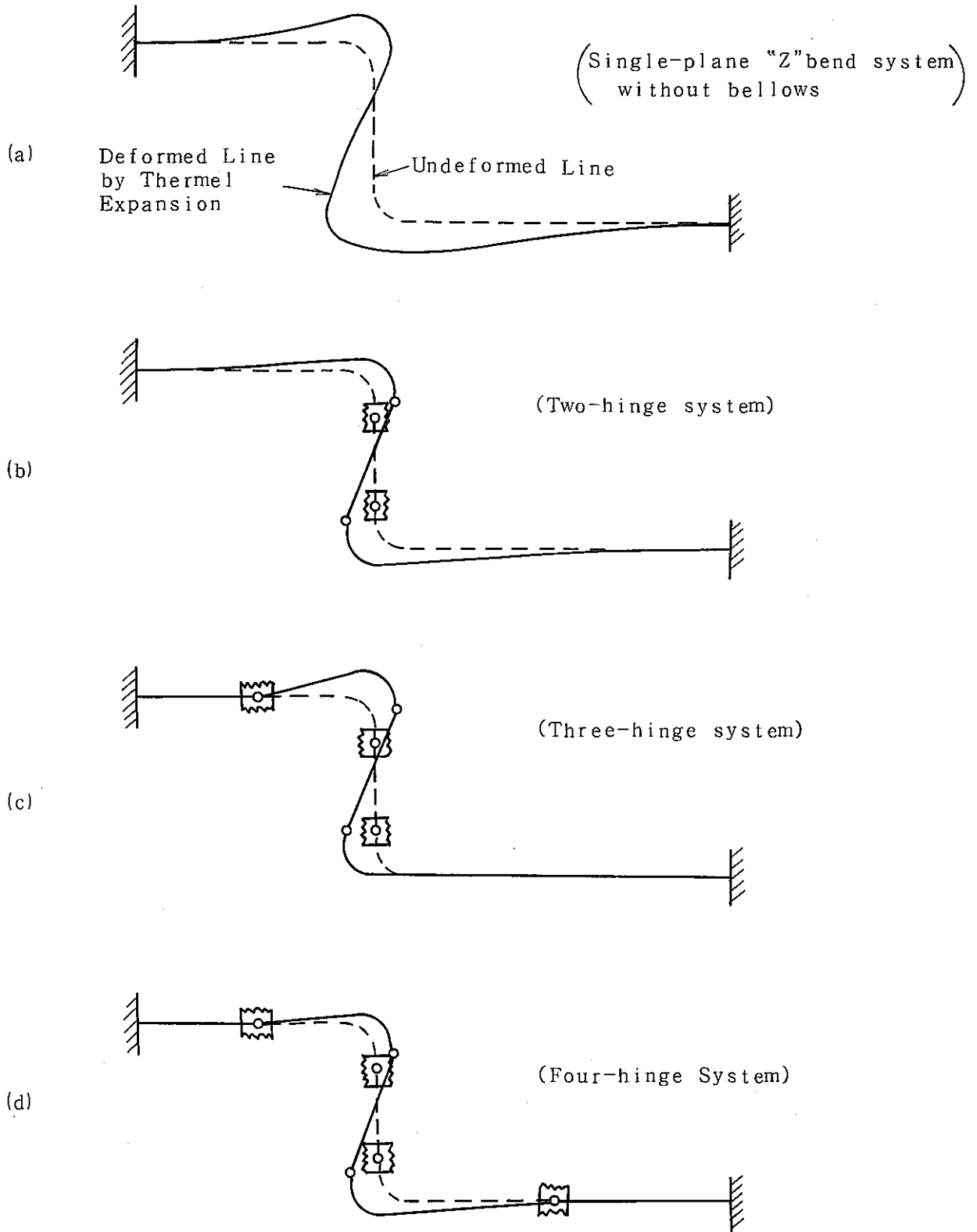


Fig.1-1 Absorption of Thermal Expansion of Simple "Z" Bend Piping System by Hinge Type Expansion Joints.

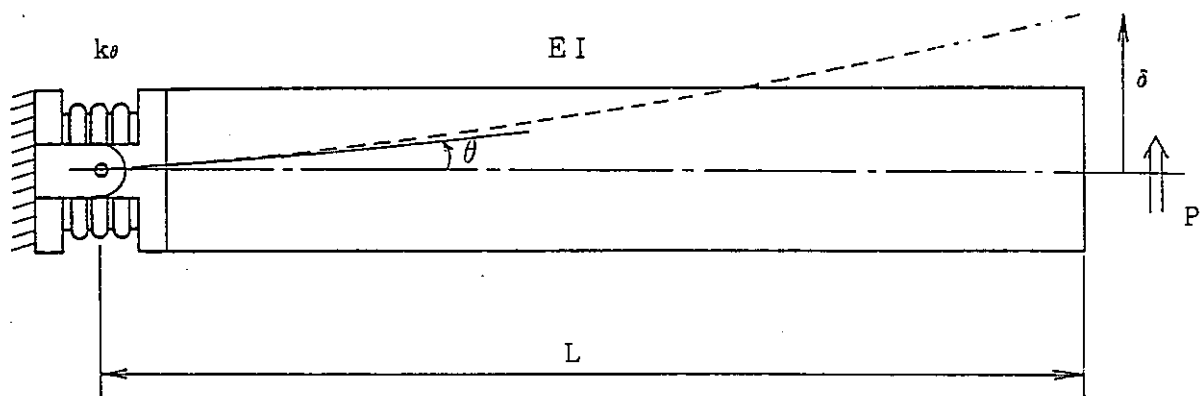


Fig. 2-1 Elastic Follow-up Between Bellows and Pipe

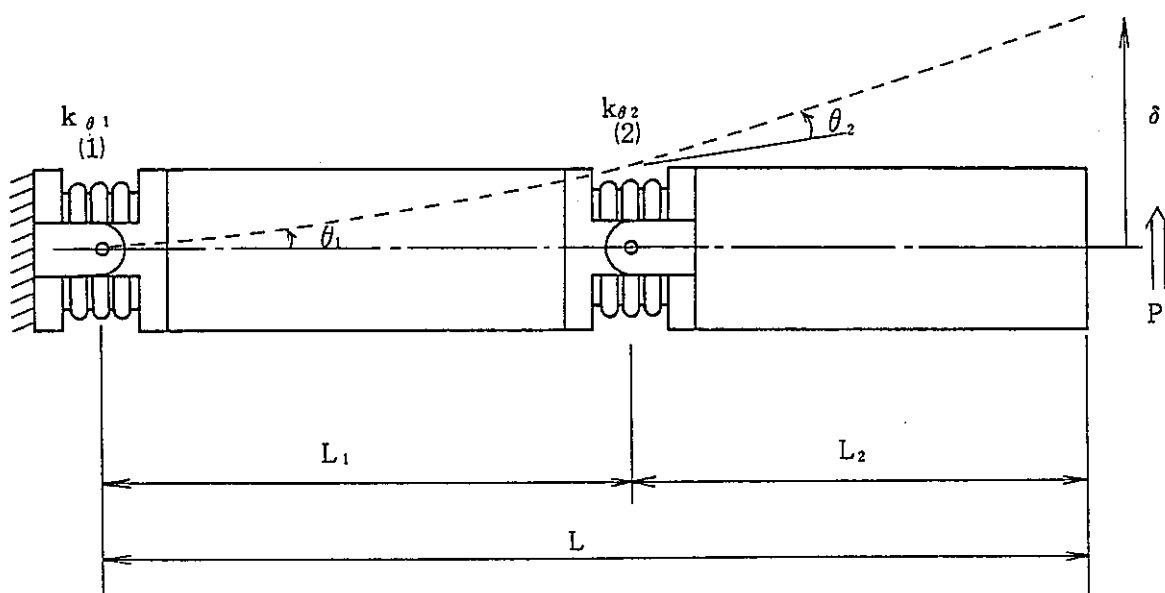


Fig. 2-2 Elastic Follow-up Between Two Bellows



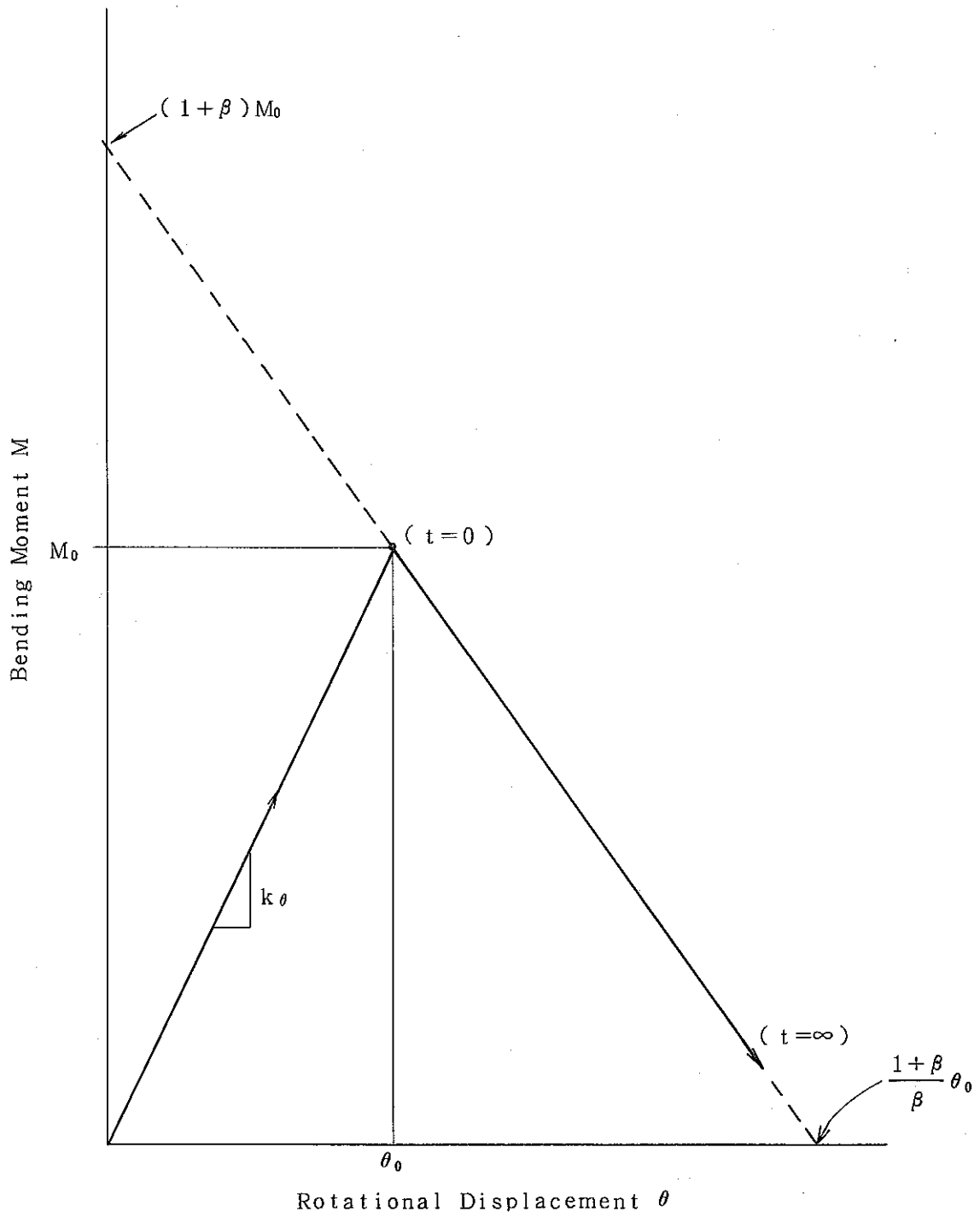


Fig. 3-1 Relation between Bending Moment and Rotational Displacement in the Elastic Follow-up of the Bellows Expansion Joint

## ☆ 解 析 例

ベローズ継手を有する配管系の弾性追従挙動解析の例として、Fig.2-2 に示す単純な系を取上げる。簡単のために、2個のベローズのばね定数と配管長さについて、

$$k_{\theta_1} = k_{\theta_2} = k_{\theta} \dots\dots\dots (3-28)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{L}{2} \dots\dots\dots (3-29)$$

とすると、式(2-14)は、

$$\delta = \frac{5}{4} L \theta_1 \dots\dots\dots (3-30)$$

従って、

$$\theta_1 = \frac{4\delta}{5L}, \quad \theta_2 = \frac{2\delta}{5L} \dots\dots\dots (3-31a, b)$$

荷重の厳しい固定端側のベローズが弾性追従すると仮定すると、終極の状態として式(2-27)は、

$$\theta_{1c} = \frac{\delta}{L} \dots\dots\dots (3-32)$$

2ヶのベローズの仕様を次のように定める。

- ピッチ径 :  $d_p = 1160 \text{ mm}$
- ピッチ :  $q = 50 \text{ mm}$
- 山高 :  $H = 60 \text{ mm}$
- 板厚 :  $h(t_p) = 1.95 \text{ mm}$
- 長さ :  $\ell = qN = 700 \text{ mm}$
- 縦弾性定数 :  $E = 1.52 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$  (SUS316, 600℃想定)

以上のベローズの寸法、材料定数からEJMAスタンダードを用いて、曲げばね定数 $k_{\theta}$ を求めると、

$$k_{\theta} = 7.947 \times 10^6 \text{ kgmm/rad}$$

Fig. 3-1において、初期変位角 $\theta_0$ は、式(3-31a)より、

$$\theta_0 = \theta_1 = \frac{4\delta}{5L} \dots\dots\dots (3-33)$$

従って、初期曲げモーメント $M_0$ は、

$$M_0 = k_\theta \cdot \theta_0 = \frac{4\delta}{5L} k_\theta \dots\dots\dots (3-34)$$

また、式(3-31a)と式(3-32)の関係から、

$$\beta = 4 \dots\dots\dots (3-35)$$

一方、配管系の長さLと端部横変位δを次の様に与える。

$$L = 10 \times 10^3 \text{ mm}$$

$$\delta = 50 \text{ mm}, \quad 25 \text{ mm} \quad (2 \text{ ケース})$$

それぞれに対して、 $\theta_0$ 、 $\theta_{0c}$  及び $M_0$  は式(3-33)、式(3-32)及び式(3-34)より、次の様に求まる。

$$\theta_0 = 4.0 \times 10^{-3} \text{ rad}, \quad 2.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\theta_{0c} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ rad}, \quad 2.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$M_0 = 3.18 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{mm}, \quad 1.59 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{mm}$$

次に、Norton 則のパラメータ(k, n)を第3章の解析例に倣って、以下の5ケースとする。

- Case 1 (1.024×10<sup>-9</sup>, 2.05)
- Case 2 (4.151×10<sup>-9</sup>, 2.05)
- Case 3 (1.024×10<sup>-9</sup>, 3.05)
- Case 4 (8.358×10<sup>-9</sup>, 2.05)
- Case 5 (1.024×10<sup>-9</sup>, 3.45)

なお、計算は0~20×10<sup>4</sup>hrで行った。

Fig. I. 1(1)~Fig. I. 2(2)に計算結果を示す。Fig. I. (1), (2)は、δ=50mm, 25mm それぞれについて、弾性追従するベローズの曲げモーメントが時間とともにどのように変化するかを示している。初期で速やかに低下して、徐々に零に漸近する様子がわかる。図中に式(2-18)のκのレベルを示しているが、同じ例題について前節の数値例で用いたκ=1を20×10<sup>4</sup>hrで満たすケースはδ=25mmの場合のケース3とケース5のみである。

Fig. I. 2(1), (2)は、δ=50mm, 25mmそれぞれについて弾性追従するベローズの曲げ角変位の時間変化を示している。初期で角変位が急速に増加するが、次第に鈍くなり、κ=0のレベルに漸近する。図からわかるように20×10<sup>4</sup>hrで考えるとこのモデルではκ=1として式(2-25)のひずみ増倍率ηを求めるのはあまり保守的とは言えない。

ここでは、簡単のために弾性追従を生じやすい単純な系を取上げたが、実際はηはもっと小さな

値で包絡できる場合が多いと考えられる。しかしながら、保持時間及び荷重のレベルによって $\eta$ は変わり得るので、実際の配管系でのベローズの弾性追従挙動を評価する場合は $\kappa$ の設定については十分注意する必要がある。また、Norton則のパラメータ $k$ 、 $n$ は第3章の解析例に倣ったが、実際の問題に適用する場合には、予めよく吟味することが重要である。

FINAS

$\delta = 50 \text{ mm}$

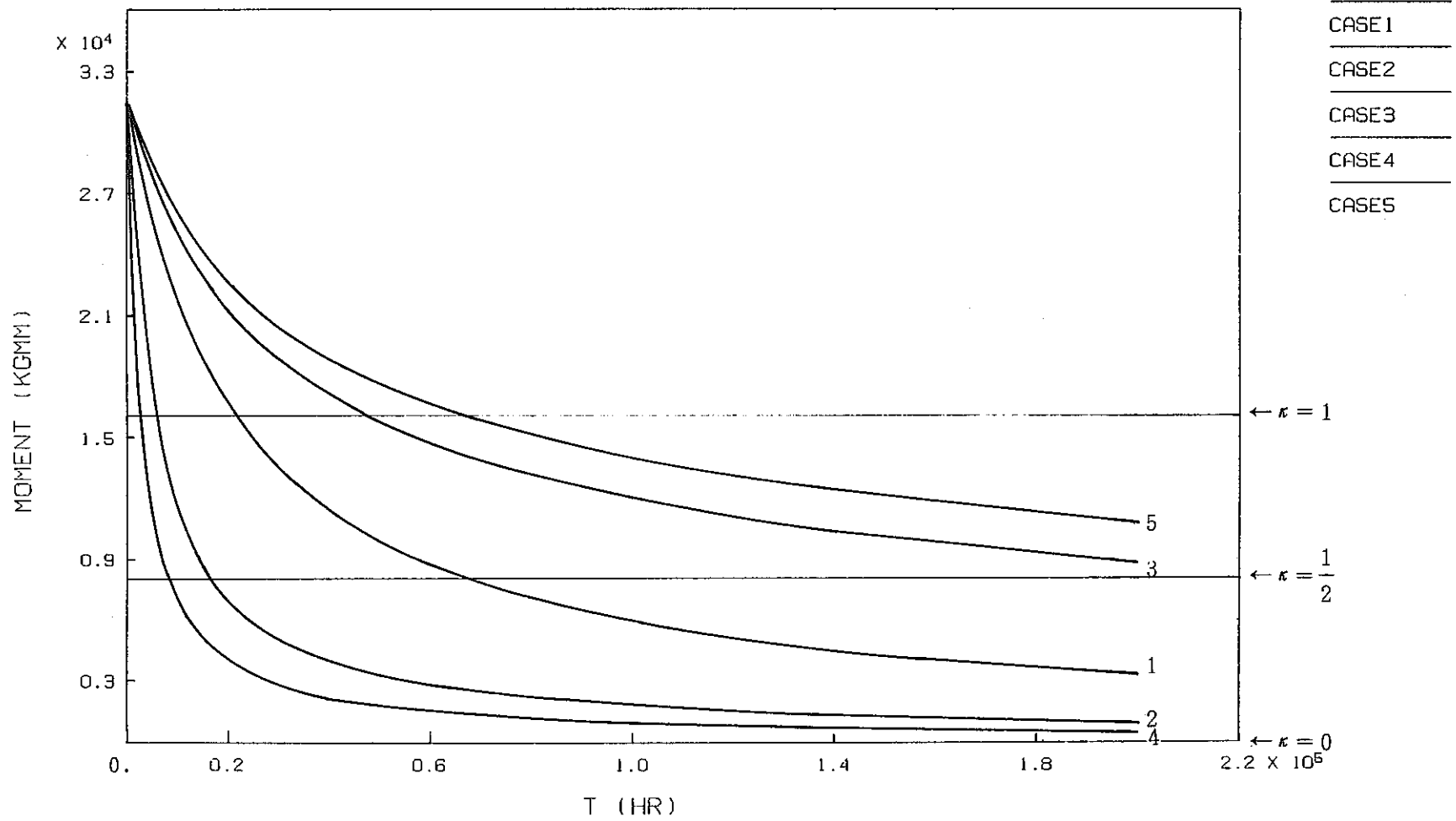


Fig. I.1(1) Change of Moment Value with Time ( $\delta=50 \text{ mm}$ )

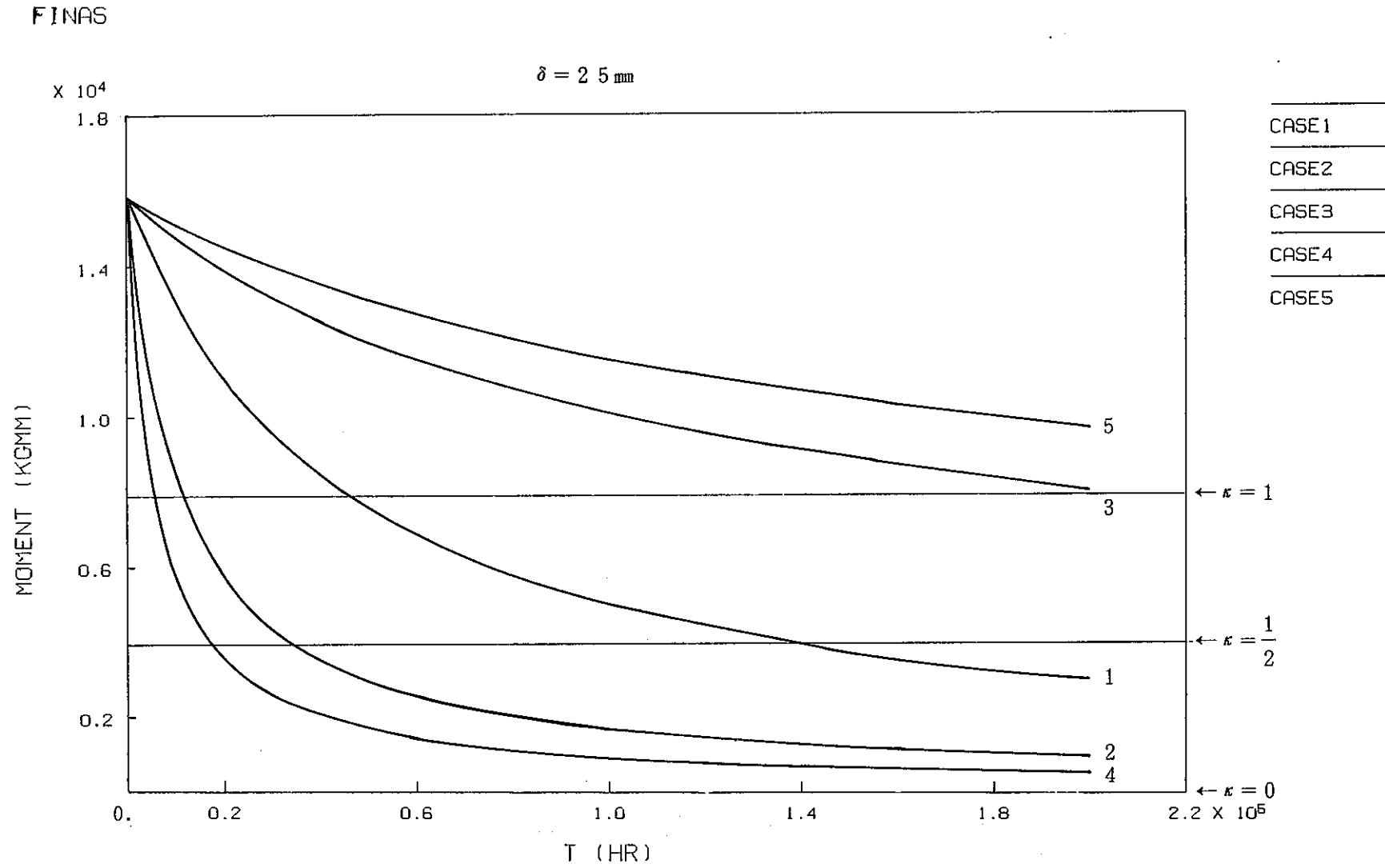


Fig.I.1(2) Change of Moment Value with Time ( $\delta = 25 \text{ mm}$ )

FINAS

$\delta = 50 \text{ mm}$

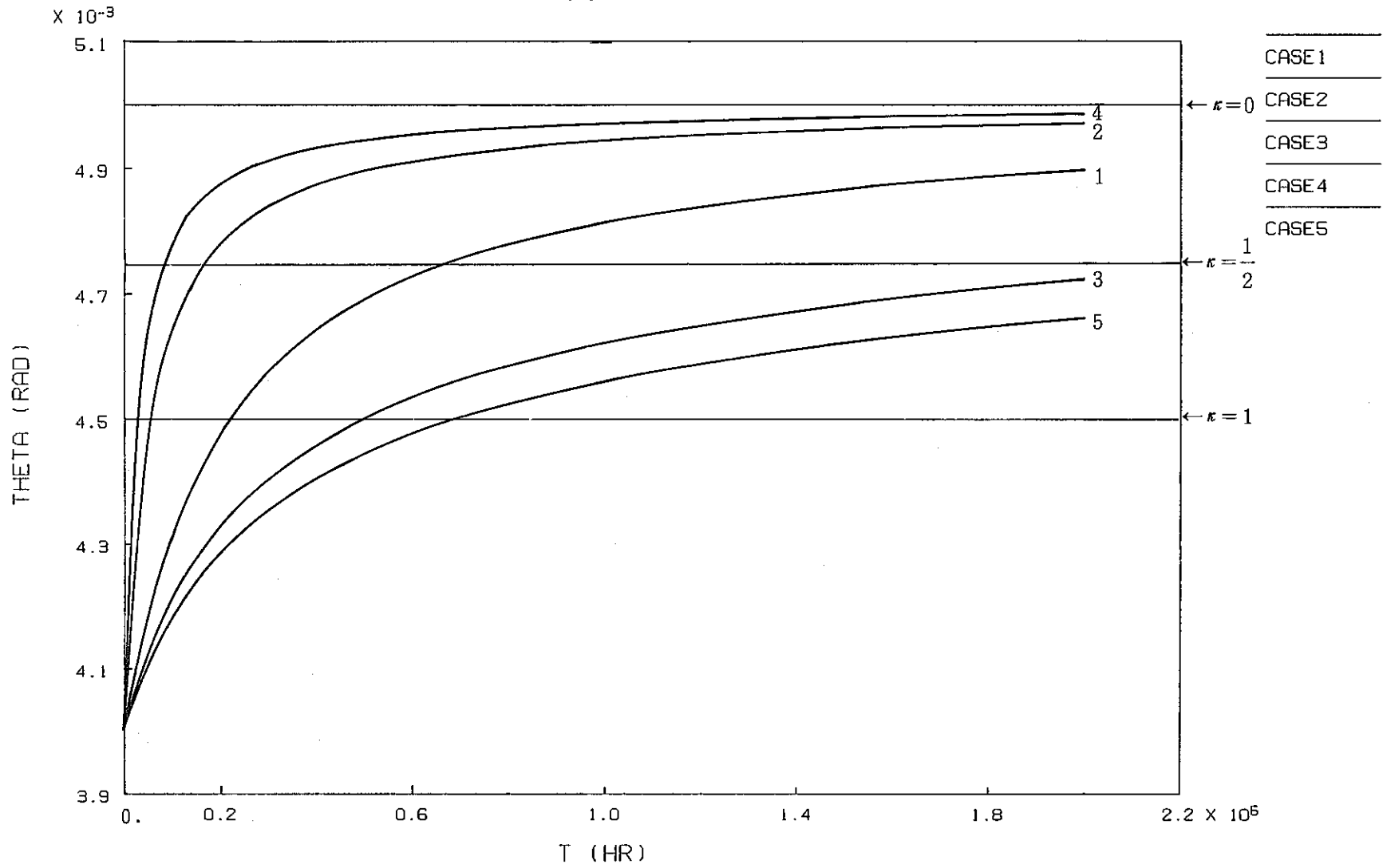


Fig. I.2(1) Change of Rotation Angle with Time ( $\delta = 50 \text{ mm}$ )

FINAS

$\delta = 2.5 \text{ mm}$

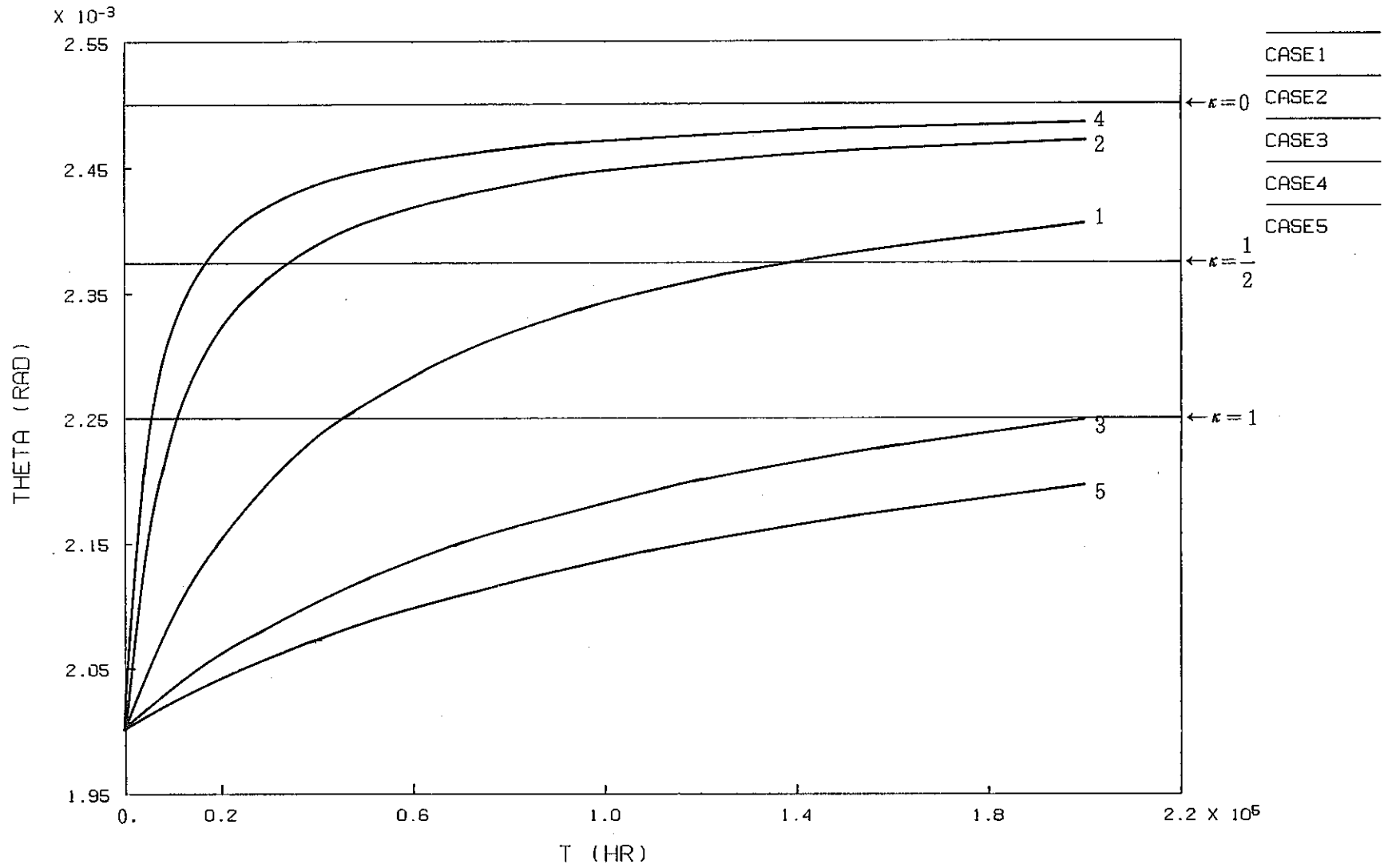


Fig. I.2(2) Change of Rotation Angle with Time ( $\delta = 2.5 \text{ mm}$ )



## ☆ 計算プログラム解説

本章に述べた手法により、ベローズ継手適用配管系で生じる弾性追従挙動を評価するプログラムを用意している。

プログラム本体は、第2章のクリープ座屈解析用のプログラムの共通部分を利用して作成している。プログラムの手直し等に関しては、ニュークリア・データ(柳井上泰章氏の協力を得た。

実際に解析を行う場合は、弾性追従を仮定するベローズ継手に着目した配管系の弾性解析を行い、ベローズ継手の吸収変位角と負荷されるモーメントの関係を予め得ておく必要がある。これに、初期変位角、初期モーメント及びNorton則のパラメータ、ベローズの形状、寸法等を加えて入力し、計算結果として変位角と時間、モーメントと時間の関係が得られる。

以下、プログラムについて次の順序に従って解説する。

1. 入力データ
2. 使用方法
3. 出力データ
4. 図(XYPLOT)の出力
5. ソースリスト

### 1. 入力データ

#### 1.1 入力データ形式

入力データ形式をFig. II.1.1に示す。入力データは、A～Dの4種類のカードよりなっている。

#### 1.2 入力データの内容

入力データの内容をFig. II.1.1に示す。

#### 1.3 入力データの例

入力データの例をFig. II 1.2に示す。

### 2. 使用方法

#### 2.1 バッチ形式の使用

バッチ形式は、あらかじめ利用者がジョブコントロールカード及び入力データを用意しておき実行させる方法である。ジョブコントロールカードをFig. II.2.1に示す。ジョブコントロールカードの下線部を各々のケースにおいて変えて実行する。次に下線部の説明をする。上段より、(1)ソースプログラム、(2)1項で作成した入力データ、(3)図出力用データ出力先、(4)図出力用を示す。

### 3. 出力データ

#### 3.1 出力データの種類

##### 3.1.1 図出力のためのデータ（ファイル出力）

任意の時間  $t$ ，変位角  $\theta$  を出力

##### 3.1.2 図出力のためのデータ（ファイル出力）

任意の時間  $t$ ，曲げモーメント  $M$  を出力

##### 3.1.3 ベローズ形状パラメータおよび計算結果の出力（リスト出力）

#### 3.2 出力データ形式

##### 3.2.1 図（XYPLOT）出力のデータ形式

出力データ形式を Fig. II. 3.1 に示す。

XVALU に任意の時間  $t$ ，YVALU に変位角  $\theta$  を出力する。

##### 3.2.2 図（XYPLOT）出力のデータ形式

3.2.1 と同様の出力データ形式とする。

XVALU に任意の時間  $t$ ，YVALU に曲げモーメント  $M$  を出力する。

##### 3.2.3 リスト出力のデータ形式

リスト出力のデータ形式および内容説明を Fig. II. 3.2 に示す。

#### 3.3 出力データの例

出力データの例を Fig. II. 3.3（3.2.1 項）および Fig. III. 3.4（3.2.3 項）に示す。

### 4. 図（XYPLOT）の出力

FINAS 1 0.8 項 XYPLOT 出力機能による。

3.2.1 項および 3.2.2 項の XVALU, YVALU のデータより XYPLOT を出力する。

#### 4.1 バッチ形式の使用

バッチ形式はあらかじめ利用者がジョブコントロールカードを用意しておき，出力データを使用し実行させる方法である。ジョブコントロールカードを Fig. II. 4.1 に示す。ジョブコントロールカードの下線部を各々のケースにおいて変えて実行する。次に下線部の説明をする。上段より(1) XYPLOT 出力用データ（FINAS による），(2) 3 項で出力されたデータ。

Fig. II. 4.2, Fig. II. 4.3 に XYPLOT 出力用データの例を示す。

#### 4.2 XYPLOT 出力例

3.2.1 項および 3.2.2 項の XVALU, YVALU のデータより出力した XYPLOT の例を Fig. II. 4.4 および Fig. II. 4.5 に示す。

5. ソースリスト

(1/6)

```

          1          2          3          4          5          6          7          8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....
000001 * ***** 00010001
000002 * * 00020001
000003 * *      ++ INPUT DATA COMENT ++ * 00030001
000004 * * * 00040001
000005 * * DP ; D+H , PITCH DIAMETER OF BELLOWS,(MM). * 00050001
000006 * * QP ; BELLOWS PITCH,(MM). * 00060001
000007 * * ZH ; CONVOLUTION DEPTH,(MM). * 00070001
000008 * * TH ; THICKNESS * 00080001
000009 * * ZL ; Q*N * 00090001
000010 * * Q ; BELLOWS PITCH,(MM). * 00100001
000011 * * N ; TOTAL NUMBER OF CONVOLUTIONS IN ONE BELLOWS * 00110001
000012 * * ZZK ; * 00120001
000013 * * ZZN ; * 00130001
000014 * * XHO ; * 00140001
000015 * * XTO ; * 00150001
000016 * * XBO ; * 00160001
000017 * * TF ; * 00170001
000018 * * * 00180001
000019 * ***** 00190001
000020 * ***** 00200001
000021 * * * 00210001
000022 * *      +++ MAIN ROUTIN +++ * 00220001
000023 * * * 00230001
000024 * *      PIPING SYSTEM * 00240001
000025 * *      ELASTIC FLOW-UP * 00250001
000026 * * * 00260001
000027 * * * 00270001
000028 * ***** 00280001
000029 * COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK,XHO,XTO,XBO,TT 00290007
000030 * DIMENSION ZZK(5),ZZN(5),S1(5),S2(5),S2A(5),S3(5),S4(5), 00300001
000031 * *      S5A(5),RAL(5), 00310001
000032 * *      XTT(0:300,5),XMT(0:300,5),TJJ(0:300) 00320001
000033 * * 00330001
000034 * READ (5,900,END=999) DP,QP,ZH,TH,ZL,(ZZK(I),I=1,5), 00340001
000035 * *      (ZZN(I),I=1,5),XHO,XTO,XBO,TF 00350001
000036 * * 00360001
000037 * DO 300 I = 1 , 5 00370001
000038 * * 00380001
000039 *      ZN = ZZN(I) 00390001
000040 *      ZK = ZZK(I) 00400001
000041 * * 00410001
000042 * WRITE ( 6 , 700 ) DP,QP,ZH,TH,ZL,ZZK(I),ZZN(I),XHO,XTO,XBO 00420001
000043 * * 00430001
000044 *      CALL CASE1( S1(I) ) 00440001
000045 * * 00450001
000046 *      CALL CASE2( S2(I) ) 00460001
000047 * * 00470001
000048 *      CALL CASE2A( S2A(I) ) 00480001
000049 * * 00490001
000050 *      CALL CASE3( S3(I) ) 00500001
000051 * * 00510001
000052 *      CALL CASE4( S1(I),S2(I),S2A(I),S3(I),S4(I) ) 00520001
000053 * * 00530001
000054 *      CALL CASE5( S4(I),S5A(I) ) 00540001
000055 * * 00550001
000056 *      CALL CASE6( S5A(I),RAL(I) ) 00560001
000057 * * 00570001
000058 *      TJJ(0) = 0.0 00580001
000059 *      TJ = 0.0 00590001
000060 *      TT = 0.0 00600001
000061 * * 00610001
000062 * DO 270 K = 0 , 200 00620008
000063 * * 00630001
000064 *      TT = TJJ(K) 00640001
000065 *      TJ = TF/200.0 00650008
000066 *      TJJ(K+1) = TJJ(K)+TJ 00660001
000067 * * 00670001
000068 *      CALL CASE11( RAL(I),XTT(K,I) ) 00680001
000069 * * 00690001
000070 *      CALL CASE12( XTT(K,I),XMT(K,I) ) 00700001
000071 * * 00710001
000072 * 270 CONTINUE 00720001
000073 * * 00730001
000074 * WRITE ( 6 , 800 ) RAL(I),XTT(200,I),XMT(200,I) 00740001
000075 * WRITE ( 10 , 1000 ) I,(TJJ(K),K=0,200) 00750014
000076 * WRITE ( 10 , 1100 ) I,(XTT(K,I),K=0,200) 00760014
000077 * WRITE ( 15 , 1000 ) I,(TJJ(K),K=0,200) 00770016
000078 * WRITE ( 15 , 1100 ) I,(XMT(K,I),K=0,200) 00780016
000079 * * 00790001
000080 * 300 CONTINUE 00800001
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

```

      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000081 WRITE ( 11 , 1200 ) RAL(1),RAL(2),RAL(3),RAL(4),RAL(5) 00810001
000082 700 FORMAT (1H , 'DP =',F10.3,5X,'H =',F10.3, 00820001
000083 * /1H , 'Q =',F10.3,5X,'T =',F10.3, 00830001
000084 * /1H , 'L =',F10.3,5X,'K =',E15.5,5X,'N =',F10.5, 00840001
000085 * /1H , 'XMO=',E10.3,5X,'XTO=',F15.5,5X,'XBO=',F10.5 ) 00850001
000086 800 FORMAT (1H , 'RAL =',E15.7,5X, 00860001
000087 * /1H , 'XTT=',E15.7,5X,'XMT=',E15.7 ) 00870001
000088 900 FORMAT (10X,5F10.0/10X,5F10.0/10X,5F10.0, 00880001
000089 * /10X,4F10.0) 00890001
000090 1000 FORMAT ( 'XVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)) 00900001
000091 1100 FORMAT ( 'YVALU',5X,15,5X,6(1PE10.3)/(20X,6(1PE10.3)) 00910001
000092 1200 FORMAT (10X,5(1PE10.3)) 00920001
000093 999 CONTINUE 00930001
000094 STOP 00940001
000095 END 00950001
000096 * ***** 00960001
000097 * ***** 00970001
000098 * * CASE1 * 00980001
000099 * * * 00990001
000100 * * ( 1-9 ) * 01000001
000101 * ***** 01010001
000102 * ***** 01020001
000103 SUBROUTINE CASE1(S1) 01030001
000104 COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 01040001
000105 * XMO,XTO,XBO,TT 01050001
000106 * 01060001
000107 EXTERNAL FUN1 01070001
000108 AA = -TH/2 01080001
000109 BB = TH/2 01090001
000110 EPSA1 = 1.0E-4 01100001
000111 EPSR1 = 1.0E-4 01110001
000112 NMIN1 = 21 01120001
000113 NMAX1 = 2000 01130001
000114 * 01140001
000115 CALL AQN9 ( AA,BB,FUN1,EPSA1,EPSR1,NMIN1,NMAX1,S1,ERR1,N1,ICON1 ) 01150001
000116 * 01160001
000117 WRITE ( 6 , 100 ) ICON1,S1,ERR1,N1 01170001
000118 * 01180001
000119 100 FORMAT ( 1H ,6HICON1=,15,5X,3HS1=,E15.7, 01190001
000120 * /1H ,5HERR1=,E15.7,5X,3HN1=,15 ) 01200001
000121 RETURN 01210001
000122 END 01220001
000123 * ***** 01230001
000124 * * FUNCTION * 01240001
000125 * ***** 01250001
000126 FUNCTION FUN1(X) 01260001
000127 COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 01270001
000128 * XMO,XTO,XBO,TT 01280001
000129 * 01290001
000130 ZNZ = 0.0 01300001
000131 QQ = 0.0 01310001
000132 FUN1 = 0.0 01320001
000133 * 01330001
000134 ZNZ = 1.0/ZN 01340001
000135 QQ = 4.0/QP 01350001
000136 * 01360001
000137 FUN1 = ((ABS(X/(1.0+QQ*X)))**ZNZ)*(ABS(X)) 01370001
000138 * 01380001
000139 RETURN 01390001
000140 END 01400001
000141 * ***** 01410001
000142 * ***** 01420001
000143 * * CASE2 * 01430001
000144 * * * 01440001
000145 * * ( 1-11 ) M = 1 * 01450001
000146 * ***** 01460001
000147 * ***** 01470001
000148 SUBROUTINE CASE2(S2) 01480001
000149 COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 01490001
000150 * XMO,XTO,XBO,TT 01500001
000151 * 01510001
000152 EXTERNAL FUN2 01520001
000153 * 01530001
000154 PHAI = 3.141592654 01540001
000155 AA = 0.0 01550001
000156 BB = PHAI/2.0 01560001
000157 EPSA2 = 1.0E-4 01570001
000158 EPSR2 = 1.0E-4 01580001
000159 NMIN2 = 21 01590001
000160 NMAX2 = 2000 01600001
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```



```

      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000241 * * ( 1-14 ) * 02410001
000242 * ***** 02420001
000243 * ***** 02430001
000244 SUBROUTINE CASE3(S3) 02440001
000245 COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 02450001
000246 * XHO,XTO,XBO,TT 02460001
000247 * 02470001
000248 EXTERNAL FUN3 02480001
000249 * 02490001
000250 AA = -TH/2.0 02500001
000251 BB = TH/2.0 02510001
000252 EPSA3 = 1.0E-4 02520001
000253 EPSR3 = 1.0E-4 02530001
000254 NMIN3 = 21 02540001
000255 NMAX3 = 2000 02550001
000256 * 02560001
000257 CALL AQN9(AA,BB,FUN3,EPSA3,EPSR3,NMIN3,NMAX3,S3,ERR3,N3,ICON3) 02570001
000258 * 02580001
000259 WRITE ( 6 , 100 ) ICON3,S3,ERR3,N3 02590001
000260 100 FORMAT ( 1H ,6HICON3=,I5,5X,3HS3=,E15.7, 02600001
000261 * /1H ,5HERR3=,E15.7,5X,3HN3=,I5 ) 02610001
000262 RETURN 02620001
000263 END 02630001
000264 * ***** 02640001
000265 * * FUNCTION * 02650001
000266 * ***** 02660001
000267 FUNCTION FUN3(X) 02670001
000268 COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 02680001
000269 * XHO,XTO,XBO,TT 02690001
000270 * 02700001
000271 ZNN = 0.0 02710001
000272 FUN3 = 0.0 02720001
000273 ZNN = (ZNN+1.0)/ZNN 02730001
000274 * 02740001
000275 FUN3 = (ABS(X))*ZNN 02750001
000276 * 02760001
000277 RETURN 02770001
000278 END 02780001
000279 * ***** 02790001
000280 * ***** 02800001
000281 * * CASE4 * 02810001
000282 * * * 02820001
000283 * * ( 1-19 ) * 02830001
000284 * ***** 02840001
000285 * ***** 02850001
000286 SUBROUTINE CASE4( S1,S2,S2A,S3,S4) 02860001
000287 COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 02870001
000288 * XHO,XTO,XBO,TT 02880001
000289 * 02890001
000290 QQA = 0.0 02900001
000291 QQP = 0.0 02910001
000292 ZZH = 0.0 02920001
000293 ZZJ = 0.0 02930001
000294 ZZN = 0.0 02940001
000295 ZNZ = 0.0 02950001
000296 S4 = 0.0 02960001
000297 SS1 = 0.0 02970001
000298 SSA = 0.0 02980001
000299 SSB = 0.0 02990001
000300 SSC = 0.0 03000001
000301 * 03010001
000302 QQA = QP/4.0 03020001
000303 QQP = QQA**2 03030001
000304 ZZH = ZH/2.0 03040001
000305 ZZJ = ZZH-QQA 03050001
000306 ZZN = ZN+2.0 03060001
000307 ZNZ = ZZJ**ZZN 03070001
000308 * 03080001
000309 SS1 = S1**ZN 03090001
000310 SSA = QQP*(S2/SS1) 03100001
000311 SSB = QQA*ZZJ*(S2A/SS1) 03110001
000312 SSC = ZNZ/(ZZN*(S3**ZN)) 03120001
000313 * 03130001
000314 S4 = SSA+SSB+SSC 03140001
000315 * 03150001
000316 WRITE ( 6 , 100 ) S4 03160001
000317 100 FORMAT ( 1H ,3HS4=,E15.7 ) 03170001
000318 RETURN 03180001
000319 END 03190001
000320 * ***** 03200001
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

```

      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000321 * ***** 03210001
000322 * *          CASE5 * 03220001
000323 * * * * * 03230001
000324 * * *          ( 2-11 ) * 03240001
000325 * ***** 03250001
000326 * ***** 03260001
000327 * SUBROUTINE CASE5( S4,S5A) 03270001
000328 * COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 03280001
000329 * XHO,XTO,XBO,TT 03290001
000330 * EXTERNAL FUN5 03300001
000331 * 03310001
000332 * AA = 0.0 03320001
000333 * BB = 3.141592654 03330001
000334 * EPSA5 = 1.0E-4 03340001
000335 * EPSR5 = 1.0E-4 03350001
000336 * NMIN5 = 21 03360001
000337 * NMAX5 = 4000 03370001
000338 * 03380001
000339 * CALL AQN9(AA,BB,FUN5,EPSA5,EPSR5,NMIN5,NMAX5,S5,ERR5,N5,ICON5) 03390001
000340 * 03400001
000341 * DDP = 0.0 03410001
000342 * DDL = 0.0 03420001
000343 * ZZN = 0.0 03430001
000344 * VV1 = 0.0 03440001
000345 * VV2 = 0.0 03450001
000346 * 03460001
000347 * DDP = DP*QP 03470001
000348 * DDL = 8.0*S4*ZK 03480001
000349 * ZZN = 1.0/ZN 03490001
000350 * 03500001
000351 * VV1 = (DP**2.0)/2.0 03510001
000352 * VV2 = (DDP/DDL)**ZZN 03520001
000353 * S5A = VV1*VV2*S5 03530001
000354 * 03540001
000355 * WRITE ( 6 , 100 ) ICON5,S5,ERR5,N5,S5A 03550001
000356 * 100 FORMAT (1H ,6HICON5=,I5,5X,3HS5=,E15.7, 03560001
000357 * /1H ,5HERR5=,E15.7,5X,3HNS=,I5, 03570001
000358 * /1H ,4HS5A=,E15.7 ) 03580001
000359 * RETURN 03590001
000360 * END 03600001
000361 * ***** 03610001
000362 * * FUNCTION * 03620001
000363 * ***** 03630001
000364 * FUNCTION FUN5(X) 03640001
000365 * COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 03650001
000366 * XHO,XTO,XBO,TT 03660001
000367 * 03670001
000368 * YY = 0.0 03680001
000369 * ZNZ = 0.0 03690001
000370 * 03700001
000371 * YY = SIN(X) 03710001
000372 * ZNZ = (1.0+ZN)/ZN 03720001
000373 * FUN5 = 0.0 03730001
000374 * 03740001
000375 * IF ( YY . GE . 0.0 ) FUN5 = YY**ZNZ 03750001
000376 * 03760001
000377 * RETURN 03770001
000378 * END 03780001
000379 * ***** 03790001
000380 * ***** 03800001
000381 * *          CASE6 * 03810001
000382 * * * * * 03820001
000383 * * *          ( 3-13 ) * 03830001
000384 * ***** 03840001
000385 * ***** 03850001
000386 * SUBROUTINE CASE6(S5A,RAL) 03860001
000387 * COMMON DP,ZH,QP,TH,ZL,ZN,ZK, 03870001
000388 * XHO,XTO,XBO,TT 03880001
000389 * 03890001
000390 * ZNN = -ZN 03900001
000391 * RAL= S5A**ZNN*ZL 03910001
000392 * 03920001
000393 * WRITE ( 6 , 100 ) RAL 03930008
000394 * 100 FORMAT (1H ,4HRAL=,E15.4) 03940008
000395 * C WRITE ( 6 , 101 ) S5A,ZNN,ZL,RAL 03950008
000396 * C101 FORMAT (1H ,4HS5A=,E15.4,2X,4HZNN=,E15.4,2X, 03960008
000397 * * 3HZL=,E15.4,2X,4HRAL=,E15.4) 03970008
000398 * RETURN 03980001
000399 * END 03990001
000400 * ***** 04000001
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```





|   |        |            |         |        |        |
|---|--------|------------|---------|--------|--------|
| A | $d_p$  | $q$        | $H$     | $h$    | $L$    |
| B | $k(1)$ | $k(2)$     | $k(3)$  | $k(4)$ | $k(5)$ |
| C | $n(1)$ | $n(2)$     | $n(3)$  | $n(4)$ | $n(5)$ |
| D | $m_0$  | $\theta_0$ | $\beta$ | $t$    |        |

| カードの種類 | カラム       | タイプ | 変数         | 内容           |
|--------|-----------|-----|------------|--------------|
| A      | 1 1 ~ 2 0 | 実数  | $d_p$      | ベローズ形状パラメータ  |
|        | 2 1 ~ 3 0 | "   | $q$        | "            |
|        | 3 1 ~ 4 0 | "   | $H$        | "            |
|        | 4 1 ~ 5 0 | "   | $h$        | "            |
|        | 5 1 ~ 6 0 | "   | $L$        | " $L = N_q$  |
| B      | 1 1 ~ 2 0 | 実数  | $k(1)$     | Norton則パラメータ |
|        | 2 1 ~ 3 0 | "   | $k(2)$     | "            |
|        | 3 1 ~ 4 0 | "   | $k(3)$     | "            |
|        | 4 1 ~ 5 0 | "   | $k(4)$     | "            |
|        | 5 1 ~ 6 0 | "   | $k(5)$     | "            |
| C      | 1 1 ~ 2 0 | 実数  | $n(1)$     | Norton則パラメータ |
|        | 2 1 ~ 3 0 | "   | $n(2)$     | "            |
|        | 3 1 ~ 4 0 | "   | $n(3)$     | "            |
|        | 4 1 ~ 5 0 | "   | $n(4)$     | "            |
|        | 5 1 ~ 6 0 | "   | $n(5)$     | "            |
| D      | 1 1 ~ 2 0 | 実数  | $m_0$      | 初期曲げモーメント    |
|        | 2 1 ~ 3 0 | "   | $\theta_0$ | 初期変位角        |
|        | 3 1 ~ 4 0 | "   | $\beta$    | パラメータ        |
|        | 4 1 ~ 5 0 | "   | $t$        | 任意の時間        |

Fig. II.1.1 Input Data Contents

```

DATASET NAME : Q3071.*FG.DATA(DATAT)
                                03/09/89   10:57:40

      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001      1160.0    50.0    60.00    1.95    700.0
000002      1.024E-09 4.151E-09 1.024E-09 8.358E-09 1.024E-09
000003      2.05     2.05     3.05     2.05     3.45
000004      1.2715E+05 0.016    4.0      1.0E+04
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

Fig. II.1.2 Example of Input Data

```

DATASET NAME : Q3071.*FGJCL.CNTL(CRP2CM)
                                03/09/89   10:19:42

      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001 //Q3071CRP JOB (TSUKI),CRP2CM,MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3071,
000002 //      MSGLEVEL=(2,0),SYSTEM=BEP1,
000003 //      ATTR=(TO,C1,W0)
000004 // EXEC FORT7CLG,PARM='LC(99)',GOREGN=1400K
000005 //FORT.SYSPRINT DD DUMMY
000006 //FORT.SYSIN  DD DSN=Q3071.*FG.FORT77(C2T),UNIT=SYSDA,DISP=SHR
000007 //LKED.SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR
000008 //      DD DSN=SYS1.SSL2,DISP=SHR
000009 //LKED.SYSPRINT DD DUMMY
000010 //GO.FT05F001 DD DSN=Q3071.*FG.DATA(DATAT),UNIT=DASD,DISP=SHR
000011 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
000012 //GO.FT10F001 DD DSN=Q3071.@TTH1.DATA,UNIT=DASD,
000013 //      DISP=(NEW,CATLG,DELETE),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),
000014 //      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
000015 //GO.FT15F001 DD DSN=Q3071.@TMO1.DATA,UNIT=DASD,
000016 //      DISP=(NEW,CATLG,DELETE),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),
000017 //      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
000018 //GO.FT11F001 DD DSN=Q3071.@RALM1.DATA,UNIT=DASD,
000019 //      DISP=(NEW,CATLG,DELETE),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),
000020 //      DCB=(RECFM=FB,LRECL=88,BLKSIZE=3520)
000021 //
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

Fig. II.2.1 JCL

|   |       |      |                |                |                |                |                |                |
|---|-------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A | XVALU | xvid | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> |
|   |       |      | x <sub>7</sub> | .....          | .....          | .....          | .....          | x <sub>n</sub> |

|   |       |      |                |                |                |                |                |                |
|---|-------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| B | YVALU | yvid | y <sub>1</sub> | y <sub>2</sub> | y <sub>3</sub> | y <sub>4</sub> | y <sub>5</sub> | y <sub>6</sub> |
|   |       |      | y <sub>7</sub> | .....          | .....          | .....          | .....          | y <sub>n</sub> |

| カードの種類 | カラム   | タイプ | 変数             |                                         |
|--------|-------|-----|----------------|-----------------------------------------|
| A      | 1~5   | 英字  | -              | 1~5カラムにXVALUと記入                         |
|        | 11~15 | 正整数 | xvid           | 値の並びの識別番号                               |
|        | 21~30 | 実数  | x <sub>1</sub> | 1番目の値                                   |
|        | 31~40 | "   | x <sub>2</sub> | 2番目の値                                   |
|        | ⋮     | ⋮   | ⋮              | ⋮                                       |
|        | 71~80 | 実数  | x <sub>6</sub> | 6番目の値                                   |
|        |       |     |                | 値の個数が6を越える場合には次のカードの21~80カラムに10カラム単位で記入 |
| B      | 1~5   | 英字  | -              | 1~5カラムにYVALUと記入                         |
|        | 11~15 | 正整数 | yvid           | 値の並びの識別番号                               |
|        | 21~30 | 実数  | y <sub>1</sub> | 1番目の値                                   |
|        | 31~40 | "   | y <sub>2</sub> | 2番目の値                                   |
|        | ⋮     | ⋮   | ⋮              | ⋮                                       |
|        | 71~80 | 実数  | y <sub>6</sub> | 6番目の値                                   |
|        |       |     |                | 値の個数が6を越える場合には次のカードの21~80カラムに10カラム単位で記入 |

Fig. II.3.1 Data Form for XYPLOT

```

DP=          H =
Q =          T =
L =          K =          N =
XMO=         XTO=         XBO=
ICON1=       S1=          N1=
ERR1=                N2=
ICON2=       S2=          N2=
ERR2=                NJ=
ICONJ=       S2A=         NJ=
ERRJ=                N3=
ICON3=       S3=          N3=
ERR3=                N5=
S4=
ICON5=       S5=          N5=
ERR5=
S5A=
RAL=
RAL =
XTT=                XMT=
    
```

| 記号    | 内 容                                     |
|-------|-----------------------------------------|
| DP    | ベローズ形状パラメータ $d_p$                       |
| H     | " H (山高)                                |
| Q     | " q (ピッチ)                               |
| T     | " h (板厚)                                |
| L     | " L (= $N_q$ )                          |
| K     | Norton則パラメータ $k(n)$                     |
| N     | " $n(n)$                                |
| XMO   | 初期曲げモーメント                               |
| XTO   | 初期変位角                                   |
| XBO   | パラメーター                                  |
| ICON1 | コンディションコード (SSL II 使用手引書 P110表AQN9-1参照) |
| S1    | 式(1-9)の解                                |
| ERR1  | S1の絶対誤差の推定値                             |
| N1    | 被積分関数の計算回数                              |
| ICON2 | ICON1に同じ                                |
| S2    | 式(1-11)の解 (m=1のとき)                      |
| ERR2  | S2の絶対誤差の推定値                             |
| N2    | N1に同じ                                   |
| ICONJ | ICON1に同じ                                |
| S2A   | 式(1-11)の解 (m=0のとき)                      |
| ERRJ  | S2Aの絶対誤差の推定値                            |
| NJ    | N1に同じ                                   |
| ICON3 | ICON1に同じ                                |
| S3    | 式(1-14)の解                               |
| ERR3  | S3の絶対誤差の推定値                             |
| N3    | N1に同じ                                   |
| S4    | 式(1-19)の解                               |
| ICON5 | ICON1に同じ                                |
| S5    | 式(2-11)の積分の解                            |
| ERR5  | S5の絶対誤差の推定値                             |
| N5    | N1に同じ                                   |
| S5A   | 式(2-11)の解                               |
| RAL   | 式(3-13)の解                               |
| RAL   | 式(3-13)の解                               |
| XTT   | 式(3-27)の解                               |
| XMT   | 式(3-22)の解                               |

Fig. II 3.2 Data Form for List Output

DATASET NAME : Q3071.ATTN1.DATA

03/09/89 10:58:24

|                                                              | 1     | 2 | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         |
|--------------------------------------------------------------|-------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| .....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0 |       |   |           |           |           |           |           |           |
| 000001                                                       | XVALU | 1 | 0.000E+00 | 5.000E+01 | 1.000E+02 | 1.500E+02 | 2.000E+02 | 2.500E+02 |
| 000002                                                       |       |   | 3.000E+02 | 3.500E+02 | 4.000E+02 | 4.500E+02 | 5.000E+02 | 5.500E+02 |
| 000003                                                       |       |   | 6.000E+02 | 6.500E+02 | 7.000E+02 | 7.500E+02 | 8.000E+02 | 8.500E+02 |
| 000004                                                       |       |   | 9.000E+02 | 9.500E+02 | 1.000E+03 | 1.050E+03 | 1.100E+03 | 1.150E+03 |
| 000005                                                       |       |   | 1.200E+03 | 1.250E+03 | 1.300E+03 | 1.350E+03 | 1.400E+03 | 1.450E+03 |
| 000006                                                       |       |   | 1.500E+03 | 1.550E+03 | 1.600E+03 | 1.650E+03 | 1.700E+03 | 1.750E+03 |
| 000007                                                       |       |   | 1.800E+03 | 1.850E+03 | 1.900E+03 | 1.950E+03 | 2.000E+03 | 2.050E+03 |
| 000008                                                       |       |   | 2.100E+03 | 2.150E+03 | 2.200E+03 | 2.250E+03 | 2.300E+03 | 2.350E+03 |
| 000009                                                       |       |   | 2.400E+03 | 2.450E+03 | 2.500E+03 | 2.550E+03 | 2.600E+03 | 2.650E+03 |
| 000010                                                       |       |   | 2.700E+03 | 2.750E+03 | 2.800E+03 | 2.850E+03 | 2.900E+03 | 2.950E+03 |
| 000011                                                       |       |   | 3.000E+03 | 3.050E+03 | 3.100E+03 | 3.150E+03 | 3.200E+03 | 3.250E+03 |
| 000012                                                       |       |   | 3.300E+03 | 3.350E+03 | 3.400E+03 | 3.450E+03 | 3.500E+03 | 3.550E+03 |
| 000013                                                       |       |   | 3.600E+03 | 3.650E+03 | 3.700E+03 | 3.750E+03 | 3.800E+03 | 3.850E+03 |
| 000014                                                       |       |   | 3.900E+03 | 3.950E+03 | 4.000E+03 | 4.050E+03 | 4.100E+03 | 4.150E+03 |
| 000015                                                       |       |   | 4.200E+03 | 4.250E+03 | 4.300E+03 | 4.350E+03 | 4.400E+03 | 4.450E+03 |
| 000016                                                       |       |   | 4.500E+03 | 4.550E+03 | 4.600E+03 | 4.650E+03 | 4.700E+03 | 4.750E+03 |
| 000017                                                       |       |   | 4.800E+03 | 4.850E+03 | 4.900E+03 | 4.950E+03 | 5.000E+03 | 5.050E+03 |
| 000018                                                       |       |   | 5.100E+03 | 5.150E+03 | 5.200E+03 | 5.250E+03 | 5.300E+03 | 5.350E+03 |
| 000019                                                       |       |   | 5.400E+03 | 5.450E+03 | 5.500E+03 | 5.550E+03 | 5.600E+03 | 5.650E+03 |
| 000020                                                       |       |   | 5.700E+03 | 5.750E+03 | 5.800E+03 | 5.850E+03 | 5.900E+03 | 5.950E+03 |
| 000021                                                       |       |   | 6.000E+03 | 6.050E+03 | 6.100E+03 | 6.150E+03 | 6.200E+03 | 6.250E+03 |
| 000022                                                       |       |   | 6.300E+03 | 6.350E+03 | 6.400E+03 | 6.450E+03 | 6.500E+03 | 6.550E+03 |
| 000023                                                       |       |   | 6.600E+03 | 6.650E+03 | 6.700E+03 | 6.750E+03 | 6.800E+03 | 6.850E+03 |
| 000024                                                       |       |   | 6.900E+03 | 6.950E+03 | 7.000E+03 | 7.050E+03 | 7.100E+03 | 7.150E+03 |
| 000025                                                       |       |   | 7.200E+03 | 7.250E+03 | 7.300E+03 | 7.350E+03 | 7.400E+03 | 7.450E+03 |
| 000026                                                       |       |   | 7.500E+03 | 7.550E+03 | 7.600E+03 | 7.650E+03 | 7.700E+03 | 7.750E+03 |
| 000027                                                       |       |   | 7.800E+03 | 7.850E+03 | 7.900E+03 | 7.950E+03 | 8.000E+03 | 8.050E+03 |
| 000028                                                       |       |   | 8.100E+03 | 8.150E+03 | 8.200E+03 | 8.250E+03 | 8.300E+03 | 8.350E+03 |
| 000029                                                       |       |   | 8.400E+03 | 8.450E+03 | 8.500E+03 | 8.550E+03 | 8.600E+03 | 8.650E+03 |
| 000030                                                       |       |   | 8.700E+03 | 8.750E+03 | 8.800E+03 | 8.850E+03 | 8.900E+03 | 8.950E+03 |
| 000031                                                       |       |   | 9.000E+03 | 9.050E+03 | 9.100E+03 | 9.150E+03 | 9.200E+03 | 9.250E+03 |
| 000032                                                       |       |   | 9.300E+03 | 9.350E+03 | 9.400E+03 | 9.450E+03 | 9.500E+03 | 9.550E+03 |
| 000033                                                       |       |   | 9.600E+03 | 9.650E+03 | 9.700E+03 | 9.750E+03 | 9.800E+03 | 9.850E+03 |
| 000034                                                       |       |   | 9.900E+03 | 9.950E+03 | 1.000E+04 |           |           |           |
| 000035                                                       | YVALU | 1 | 1.600E-02 | 1.604E-02 | 1.608E-02 | 1.612E-02 | 1.615E-02 | 1.619E-02 |
| 000036                                                       |       |   | 1.622E-02 | 1.626E-02 | 1.629E-02 | 1.633E-02 | 1.636E-02 | 1.639E-02 |
| 000037                                                       |       |   | 1.642E-02 | 1.645E-02 | 1.649E-02 | 1.652E-02 | 1.655E-02 | 1.657E-02 |
| }                                                            |       |   |           |           |           |           |           |           |
| 000304                                                       |       |   | 9.300E+03 | 9.350E+03 | 9.400E+03 | 9.450E+03 | 9.500E+03 | 9.550E+03 |
| 000305                                                       |       |   | 9.600E+03 | 9.650E+03 | 9.700E+03 | 9.750E+03 | 9.800E+03 | 9.850E+03 |
| 000306                                                       |       |   | 9.900E+03 | 9.950E+03 | 1.000E+04 |           |           |           |
| 000307                                                       | YVALU | 5 | 1.600E-02 | 1.615E-02 | 1.628E-02 | 1.639E-02 | 1.650E-02 | 1.659E-02 |
| 000308                                                       |       |   | 1.668E-02 | 1.676E-02 | 1.683E-02 | 1.690E-02 | 1.697E-02 | 1.702E-02 |
| 000309                                                       |       |   | 1.708E-02 | 1.713E-02 | 1.718E-02 | 1.723E-02 | 1.727E-02 | 1.731E-02 |
| 000310                                                       |       |   | 1.735E-02 | 1.739E-02 | 1.742E-02 | 1.746E-02 | 1.749E-02 | 1.752E-02 |
| 000311                                                       |       |   | 1.755E-02 | 1.758E-02 | 1.761E-02 | 1.763E-02 | 1.766E-02 | 1.768E-02 |
| 000312                                                       |       |   | 1.771E-02 | 1.773E-02 | 1.775E-02 | 1.777E-02 | 1.779E-02 | 1.781E-02 |
| 000313                                                       |       |   | 1.783E-02 | 1.785E-02 | 1.787E-02 | 1.789E-02 | 1.790E-02 | 1.792E-02 |
| 000314                                                       |       |   | 1.794E-02 | 1.795E-02 | 1.797E-02 | 1.798E-02 | 1.800E-02 | 1.801E-02 |
| 000315                                                       |       |   | 1.803E-02 | 1.804E-02 | 1.805E-02 | 1.807E-02 | 1.808E-02 | 1.809E-02 |
| 000316                                                       |       |   | 1.810E-02 | 1.812E-02 | 1.813E-02 | 1.814E-02 | 1.815E-02 | 1.816E-02 |
| 000317                                                       |       |   | 1.817E-02 | 1.818E-02 | 1.819E-02 | 1.820E-02 | 1.821E-02 | 1.822E-02 |
| 000318                                                       |       |   | 1.823E-02 | 1.824E-02 | 1.825E-02 | 1.826E-02 | 1.827E-02 | 1.828E-02 |
| 000319                                                       |       |   | 1.828E-02 | 1.829E-02 | 1.830E-02 | 1.831E-02 | 1.832E-02 | 1.833E-02 |
| 000320                                                       |       |   | 1.833E-02 | 1.834E-02 | 1.835E-02 | 1.836E-02 | 1.836E-02 | 1.837E-02 |
| 000321                                                       |       |   | 1.838E-02 | 1.838E-02 | 1.839E-02 | 1.840E-02 | 1.840E-02 | 1.841E-02 |
| 000322                                                       |       |   | 1.842E-02 | 1.842E-02 | 1.843E-02 | 1.844E-02 | 1.844E-02 | 1.845E-02 |
| 000323                                                       |       |   | 1.845E-02 | 1.846E-02 | 1.847E-02 | 1.847E-02 | 1.848E-02 | 1.848E-02 |
| 000324                                                       |       |   | 1.849E-02 | 1.849E-02 | 1.850E-02 | 1.851E-02 | 1.851E-02 | 1.852E-02 |
| 000325                                                       |       |   | 1.852E-02 | 1.853E-02 | 1.853E-02 | 1.854E-02 | 1.854E-02 | 1.855E-02 |
| 000326                                                       |       |   | 1.855E-02 | 1.856E-02 | 1.856E-02 | 1.856E-02 | 1.857E-02 | 1.857E-02 |
| 000327                                                       |       |   | 1.858E-02 | 1.858E-02 | 1.859E-02 | 1.859E-02 | 1.860E-02 | 1.860E-02 |
| 000328                                                       |       |   | 1.860E-02 | 1.861E-02 | 1.861E-02 | 1.862E-02 | 1.862E-02 | 1.862E-02 |
| 000329                                                       |       |   | 1.863E-02 | 1.863E-02 | 1.864E-02 | 1.864E-02 | 1.864E-02 | 1.865E-02 |
| 000330                                                       |       |   | 1.865E-02 | 1.865E-02 | 1.866E-02 | 1.866E-02 | 1.867E-02 | 1.867E-02 |
| 000331                                                       |       |   | 1.867E-02 | 1.868E-02 | 1.868E-02 | 1.868E-02 | 1.869E-02 | 1.869E-02 |
| 000332                                                       |       |   | 1.869E-02 | 1.870E-02 | 1.870E-02 | 1.870E-02 | 1.871E-02 | 1.871E-02 |
| 000333                                                       |       |   | 1.871E-02 | 1.872E-02 | 1.872E-02 | 1.872E-02 | 1.873E-02 | 1.873E-02 |
| 000334                                                       |       |   | 1.873E-02 | 1.873E-02 | 1.874E-02 | 1.874E-02 | 1.874E-02 | 1.875E-02 |
| 000335                                                       |       |   | 1.875E-02 | 1.875E-02 | 1.875E-02 | 1.876E-02 | 1.876E-02 | 1.876E-02 |
| 000336                                                       |       |   | 1.877E-02 | 1.877E-02 | 1.877E-02 | 1.877E-02 | 1.878E-02 | 1.878E-02 |
| 000337                                                       |       |   | 1.878E-02 | 1.878E-02 | 1.879E-02 | 1.879E-02 | 1.879E-02 | 1.879E-02 |
| 000338                                                       |       |   | 1.880E-02 | 1.880E-02 | 1.880E-02 | 1.880E-02 | 1.881E-02 | 1.881E-02 |
| 000339                                                       |       |   | 1.881E-02 | 1.881E-02 | 1.882E-02 | 1.882E-02 | 1.882E-02 | 1.882E-02 |
| 000340                                                       |       |   | 1.883E-02 | 1.883E-02 | 1.883E-02 |           |           |           |
| .....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+ |       |   |           |           |           |           |           |           |

Fig. II. 3.3 Example of Output Data (XY values)



```

DP = 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000         T = 1.950
L = 700.000        K = 0.10240E-08      N = 2.05000
XMO= 0.159E+05     XTO= 0.00200        XBO= 4.00000
ICON1= 0           S1= 0.7557837E+00
ERR1= 0.3114477E-04      N1= 31
ICON2= 0           S2= 0.8903096E+03
ERR2= 0.8490652E-02      N2= 31
ICONJ= 0           S2A= 0.1226252E+04
ERRJ= 0.1169445E-01      NJ= 31
ICON3= 0           S3= 0.7548572E+00
ERR3= 0.3099066E-04      N3= 31
S4= 0.7707554E+06
ICON5= 0           S5= 0.1753156E+01
ERR5= 0.1007719E-03      N5= 31
S5A= 0.2940024E+10
RAL= 0.2723E-16
RAL = 0.2722557E-16
XTT= 0.2404527E-02      XMT= 0.3036066E+04
DP = 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000         T = 1.950
L = 700.000        K = 0.41510E-08      N = 2.05000
XMO= 0.159E+05     XTO= 0.00200        XBO= 4.00000
ICON1= 0           S1= 0.7557837E+00
ERR1= 0.3114477E-04      N1= 31
ICON2= 0           S2= 0.8903096E+03
ERR2= 0.8490652E-02      N2= 31
ICONJ= 0           S2A= 0.1226252E+04
ERRJ= 0.1169445E-01      NJ= 31
ICON3= 0           S3= 0.7548572E+00
ERR3= 0.3099066E-04      N3= 31
S4= 0.7707554E+06
ICON5= 0           S5= 0.1753156E+01
ERR5= 0.1007719E-03      N5= 31
S5A= 0.1485378E+10
RAL= 0.1104E-15
RAL = 0.1103648E-15
XTT= 0.2471178E-02      XMT= 0.9165530E+03
DP = 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000         T = 1.950
L = 700.000        K = 0.10240E-08      N = 3.05000
XMO= 0.159E+05     XTO= 0.00200        XBO= 4.00000
ICON1= 0           S1= 0.8105775E+00
ERR1= 0.4588893E-04      N1= 31
ICON2= 0           S2= 0.2480372E+05
ERR2= 0.2365467E+00      N2= 31
ICONJ= 0           S2A= 0.3258829E+05
ERRJ= 0.3107861E+00      NJ= 31
ICON3= 0           S3= 0.8099992E+00
ERR3= 0.4583114E-04      N3= 31
S4= 0.2159349E+08
ICON5= 0           S5= 0.1824066E+01
ERR5= 0.4653037E-04      N5= 41
S5A= 0.7895098E+08
RAL= 0.5730E-21
RAL = 0.5730021E-21
XTT= 0.2247686E-02      XMT= 0.8023602E+04
DP = 1160.000      H = 50.000
Q = 60.000         T = 1.950
L = 700.000        K = 0.83580E-08      N = 2.05000

```

Fig. II. 3.4 Example of Output Data (List) (1/2)

```

△
  XMO= 0.159E+05      XT0=      0.00200      XBO=  4.00000
  ICON1=  0          S1= 0.7557837E+00
  ERR1= 0.3114477E-04      N1=  31
  ICON2=  0          S2= 0.8903096E+03
  ERR2= 0.8490652E-02      N2=  31
  ICONJ=  0          S2A= 0.1226252E+04
  ERRJ= 0.1169445E-01      NJ=  31
  ICON3=  0          S3= 0.7548572E+00
  ERR3= 0.3099066E-04      N3=  31
  S4= 0.7707554E+06
  ICON5=  0          S5= 0.1753156E+01
  ERR5= 0.1007719E-03      N5=  31
  SSA= 0.1055769E+10
  RAL=  0.2222E-15
  RAL = 0.2222182E-15
  XTT= 0.2484837E-02      XMT= 0.4822119E+03
  DP = 1160.000      H =  50.000
  Q =  60.000      T =  1.950
  L =  700.000      K =  0.10240E-08      N =  3.45000
  XMO= 0.159E+05      XT0=      0.00200      XBO=  4.00000
  ICON1=  0          S1= 0.8247414E+00
  ERR1= 0.4855655E-04      N1=  31
  ICON2=  0          S2= 0.9406931E+05
  ERR2= 0.8971149E+00      N2=  31
  ICONJ=  0          S2A= 0.1215941E+06
  ERRJ= 0.1159611E+01      NJ=  31
  ICON3=  0          S3= 0.8242396E+00
  ERR3= 0.4847952E-04      N3=  31
  S4= 0.8240978E+08
  ICON5=  0          S5= 0.1842191E+01
  ERR5= 0.4938520E-04      N5=  41
  SSA= 0.3337203E+08
  RAL=  0.7752E-23
  RAL = 0.7752277E-23
  XTT= 0.2195629E-02      XMT= 0.9678992E+04
  
```

Fig.II.3.4 Example of Output Data (List) (2/2)

```

DATASET NAME : Q3071.*FGJCL.CNTL(CRP2CPLT)
                                                    03/09/89  10:57:13

      1          2          3          4          5          6          7          8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001 //Q3071PLT JOB (TSUKI),CREEP2C,MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3071,
000002 //      MSGLEVEL=(2,0),SYSTEM=BEP1,
000003 //      ATTR=(TO,C4,W1)
000004 //JOBPROC DD DSN=Q3050.PROCLIB,DISP=SHR
000005 //*
000006 //      EXEC FINAS
000007 //FT06F001 DD DSN=&&COMPACT,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
000008 //      SPACE=(TRK,(100,80),RLSE)
000009 //SYSIN DD DSN=Q3071.*FG.OUT(TTHP),DISP=SHR
000010 //FT21F001 DD DSN=Q3071.aTTH1.DATA,DISP=SHR
000011 //*
000012 //COMPACT EXEC COMPACT,TYPE=TYPE2,COND=EVEN,CC=NO
000013 //NLP EXEC FNSHLP
000014 //GDFILE DD SYSOUT=*
000015 //
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

Fig. II. 4.1 JCL for XY PLOT



```

DATASET NAME : Q3071.*FG.OUT(TTHP)
                                03/09/89  10:58:59
      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001  SYSTEM 8/99
000002  FINAS
000003  PLOT
000004  OUTPUT
000005  XYPLOT
000006  FRAME      A4V
000007  =READ      21
000008  *
000009  CURVE      1      0      CASE1
000010  CURVE      2      0      CASE2
000011  CURVE      3      0      CASE3
000012  CURVE      4      0      CASE4
000013  CURVE      5      0      CASE5
000014  XTITLE      T (HR)
000015  YTITLE      THERTA (RAD)
000016  PTITLE      FIG.      XMO=1.2715+E05 XT0=0.0161 XBO=4.0
000017  YRANGE      0.0      0.02
000018  XRANGE      0.0      10000.
000019  %YDIVISION  20      1
000020  %XLOG      YES
000021  PLOT3      XVALU      1      YVALU      1      XVALU      2      YVALU      2
000022           XVALU      3      YVALU      3      XVALU      4      YVALU      4
000023           XVALU      5      YVALU      5
000024  END OUTPUT
000025  END FINAS
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

Fig.II. 4.2 Example of XY PLOT Data for Output (  $t - \theta$  )

```

DATASET NAME : Q3071.YFG.OUT(TMOP)
                                03/09/89  10:59:16

      1      2      3      4      5      6      7      8
.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
000001  SYSTEM 8/99
000002  FINAS
000003  PLOT
000004  OUTPUT
000005  XYPLOT
000006  FRAME      A4V
000007  =READ      21
000008  ¥
000009  CURVE      1      0      CASE1
000010  CURVE      2      0      CASE2
000011  CURVE      3      0      CASE3
000012  CURVE      4      0      CASE4
000013  CURVE      5      0      CASE5
000014  XTITLE      T (HR)
000015  YTITLE      MOMENT (KGMM)
000016  PTITLE      FIG.      XMO=1.2715+E05 XT0=0.016 XBO=4.0
000017  YRANGE      0.0      140000.
000018  XRANGE      0.0      10000.
000019  ¥YDIVISION  20      1
000020  ¥XLOG      YES
000021  PLOT3      XVALU  1      YVALU  1      XVALU  2      YVALU  2
000022           XVALU  3      YVALU  3      XVALU  4      YVALU  4
000023           XVALU  5      YVALU  5
000024  END OUTPUT
000025  END FINAS
.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+

```

Fig. II. 4.3 Example of XY PLOT Data for Output ( t-M )

FINAS

- 237 -

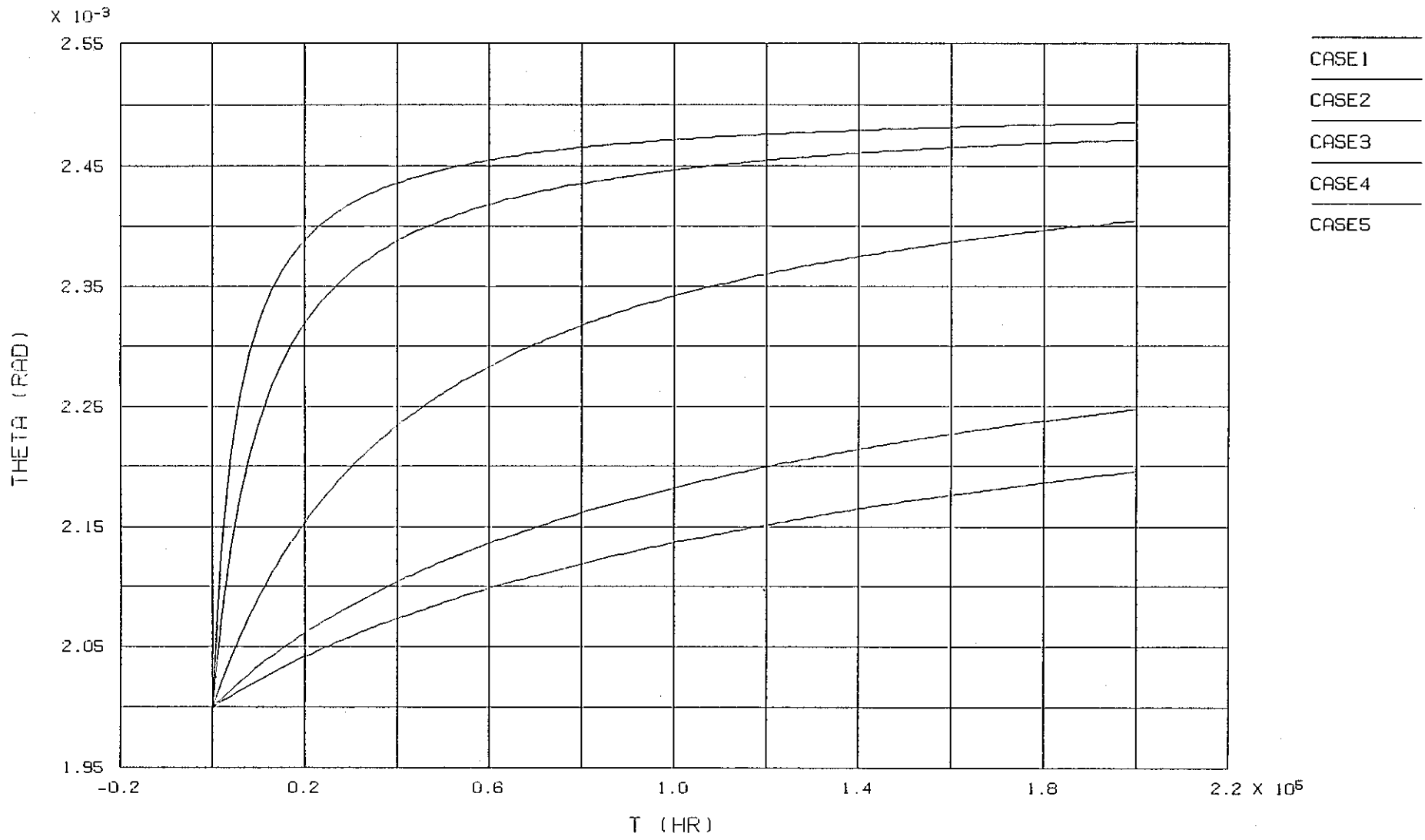
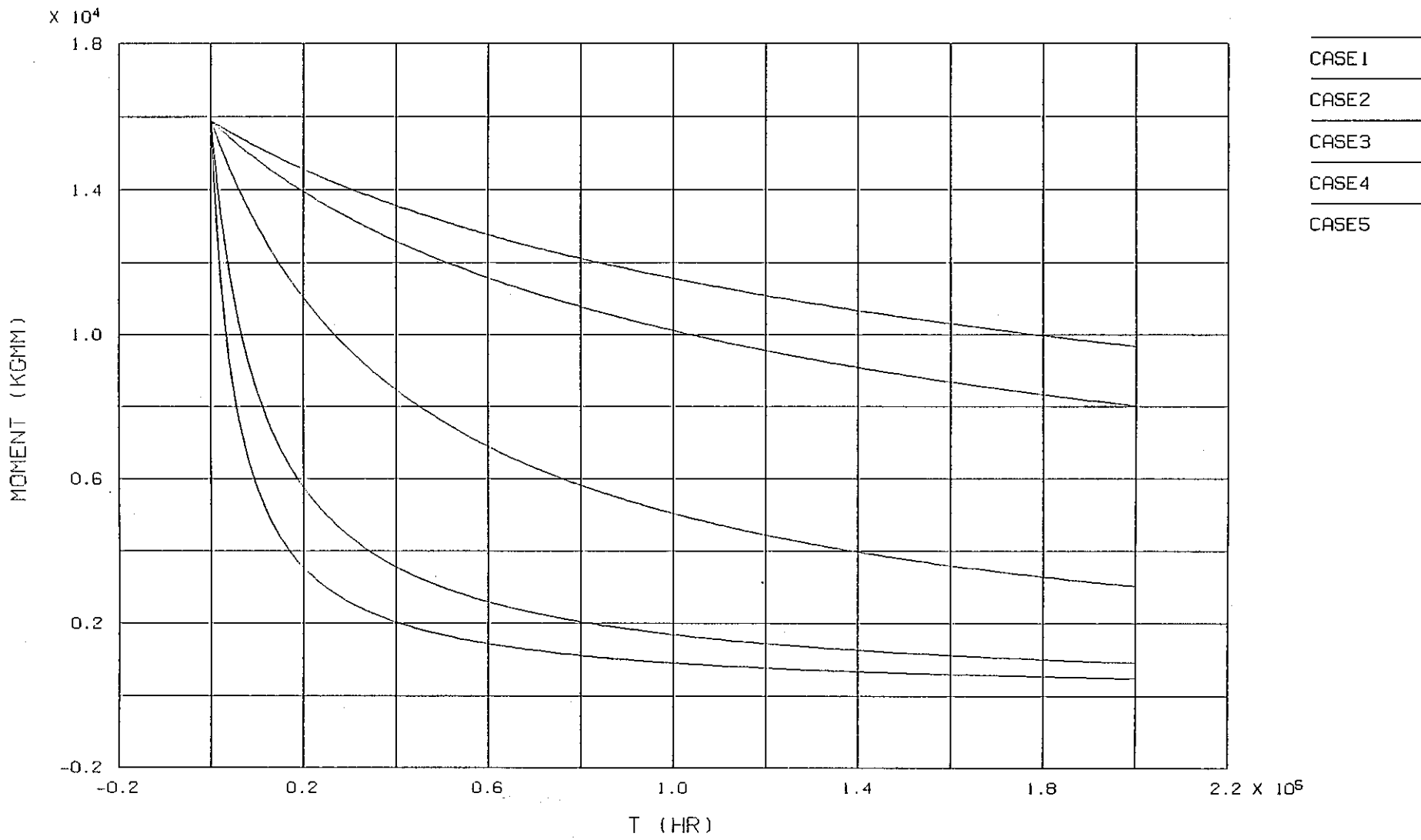


Fig. II.4.4 Example of XYPLOT (  $t-\theta$  )

FINAS



- 238 -

Fig. II.4.5 Example of XYPLOT (t-M)

## 6. ベローズのコンボリユーション間で生じる弾性追従の簡易評価

ベローズ継手を高温で使用する場合、各コンボリユーションの微妙な特性の違いにより、コンボリユーション相互間で弾性追従を生じる可能性がある。本章では、第3章で示したベローズのクリープ挙動の定式化と第4章の寸法公差を取入れたモデル設定の考え方を利用して、コンボリユーション間で生じる可能性のある弾性追従の保守的簡易評価式の導出を試みる。

## List of Figures

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 1 Convolution Elastic Follow-up under Bending Displacements ..... | 250 |
|------------------------------------------------------------------------|-----|

コンボリューション間の弾性追従挙動を解析するに当たり、簡単のため、圧力の影響は無視する。軸方向伸縮の場合、コンボリューション間のピッチ変動に及ぼす圧力の影響は力の釣合いから顕著ではないと考えられるが、1コンボリューション内に生じる圧力によるクリープひずみについては別途考慮する必要がある。

(1) 軸方向伸縮の場合

Norton 則を仮定し、周方向応力の影響を無視すると、クリープによる1山当りの変位速度は第3章の式(1-18)から次式で与えられる。

$$\dot{e} = \frac{4}{\pi^n d_p^n} \mathcal{F}(q, H, h, n) k P^n \quad (P \geq 0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\dot{e}$  はベローズ1山の変位速度、  
 $d_p$  はベローズピッチ径、 $q$  はピッチ、 $H$  は山高、 $h$  は板厚、  
 $P$  は軸方向荷重(第3章と定義が異なるので注意)、  
 $n, k$  はNorton 則のパラメータ ( $\dot{\epsilon} = k \sigma^n$ )、  
 $\mathcal{F}(q, H, h, n)$  は、第3章式(1-19)で与えられる。

次に、第4章に倣い、厳しい場合を想定して、マイナス公差の1山がクリープし、他の山は弾性挙動するものとする。

$$P = k_{a1} e_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $k_{a1}$  は1山当たりの軸方向ばね定数、 $e_1$  は1山の変位であり、添字"1"は、剛性の高いコンボリューションに関係することを意味する。また、

$$e_2 + (N-1)e_1 = \delta \text{ (const)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $N$  は山数、 $\delta$  は吸収変位量であり、添字"2"は剛性の低いコンボリューション(1山のみ)に関係することを意味する。

式(1)~式(3)より、剛性の低い山の変位速度は、

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \frac{4}{\pi^n d_p^n} \mathcal{F}_2 \cdot k P^n \\ &= \frac{4}{\pi^n d_p^n} \mathcal{F}_2 \cdot k \cdot k_{a1}^n e_1^n \\ &= \frac{4 k \cdot k_{a1}^n}{\pi^n d_p^n (N-1)^n} \mathcal{F}_2 (\delta - e_2)^n \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

式(4)は、 $\delta = \text{const.}$  より、次のように書ける。

$$\frac{d}{dt}(\delta - e_2) = - \frac{4k \cdot k_{a1}^n}{\pi^n d_p^n (N-1)^n} \mathcal{F}_2(\delta - e_2)^n \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式は、簡単に解ける。

○  $n = 1$ の場合:

$$e_2 = \delta - (\delta - e_{20}) \exp \left\{ - \frac{4k \cdot k_{a1} \mathcal{F}_2}{\pi d_p (N-1)} t \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし,  $e_2 = e_{20} \quad (t=0) \quad \dots\dots\dots (7)$

○  $n \neq 1$ の場合:

$$e_2 = \delta - \sqrt[n-1]{\frac{\pi^n d_p^n (N-1)^n}{4(n-1)k \cdot k_{a1}^n \mathcal{F}_2(t+t_0)}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= \frac{\pi^n d_p^n (N-1)^n}{4(n-1)k \cdot k_{a1}^n \mathcal{F}_2(\delta - e_{20})^{n-1}} \\ e_2 &= e_{20} \quad (t=0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

一方、子午線方向の最大ひずみ速度は、コンポリューションを子午線方向に曲がり梁とみなした場合、曲がり部で生じる。

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\kappa} \left| \frac{-\frac{h}{2}}{1 + \kappa_0 \left(-\frac{h}{2}\right)} \right| = \dot{\kappa} \frac{\frac{h}{2}}{1 - \frac{h}{2} \kappa_0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_c$  は、子午線方向最大ひずみ速度、  
 $\dot{\kappa}$  は曲率変化率、 $\kappa_0$  は初期曲率であり、

$$\kappa_0 \simeq \frac{4}{q} \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、 $\dot{\kappa}$  の最大値は、第3章式(1-8)から、 $\varphi = 0$  で生じ、次式で表わせる。

$$\dot{\kappa} = \frac{k H_2^n}{2^n \pi^n d_p^n [I_n(\kappa_0)]^n} P^n \quad (P \geq 0, \varphi = 0)$$



$$= \frac{k H_2^n \cdot k_{a1}^n}{2^n \pi^n d_p^n [I_n(\kappa_0)]^n (N-1)^n} (\delta - e_2)^n \dots\dots\dots (12)$$

上式に式(6), (8)を用いると,

$$\dot{\kappa} = \frac{k H_2 \cdot k_{a1}}{2 \pi d_p [I_1(\kappa_0)] (N-1)} (\delta - e_{20}) \exp \left\{ - \frac{4k \cdot k_{a1} \mathcal{F}_2}{\pi d_p (N-1)} t \right\} \dots\dots\dots (13a)$$

( n = 1 )

$$= \frac{H_2^n}{2^n [I_n(\kappa_0)]^n \cdot 4(n-1) \mathcal{F}_2} \left( \frac{\pi^n \cdot d_p^n (N-1)^n}{4(n-1) \cdot k \cdot k_{a1}^n \mathcal{F}_2} \right)^{\frac{1}{n-1}} \cdot \left( \frac{1}{t+t_0} \right)^{\frac{n}{n-1}} \dots (13b)$$

( n ≠ 1 )

コンポリューション間の弾性追従によって生じる子午線方向のクリープひずみ増分  $\Delta \epsilon_c$  は,

$$\Delta \epsilon_c = \int_0^T \dot{\epsilon}_c dt$$

$$= \frac{h_2}{2 - 4h_2/Q} \int_0^T \dot{\kappa} dt \dots\dots\dots (14)$$

ここで, Tは高温保持時間である。

式(13a), (13b)を用いて式(14)を求めると,

○ n = 1 の場合 :

$$\Delta \epsilon_c = \frac{h_2 \cdot H_2 \cdot (\delta - e_{20})}{16(1 - 2h_2/Q) \cdot [I_1(\kappa_0)] \cdot \mathcal{F}_2} \left\{ 1 - \exp \left( - \frac{4k \cdot k_{a1} \mathcal{F}_2}{\pi d_p (N-1)} T \right) \right\} \dots\dots\dots (15)$$

○ n ≠ 1 の場合 :

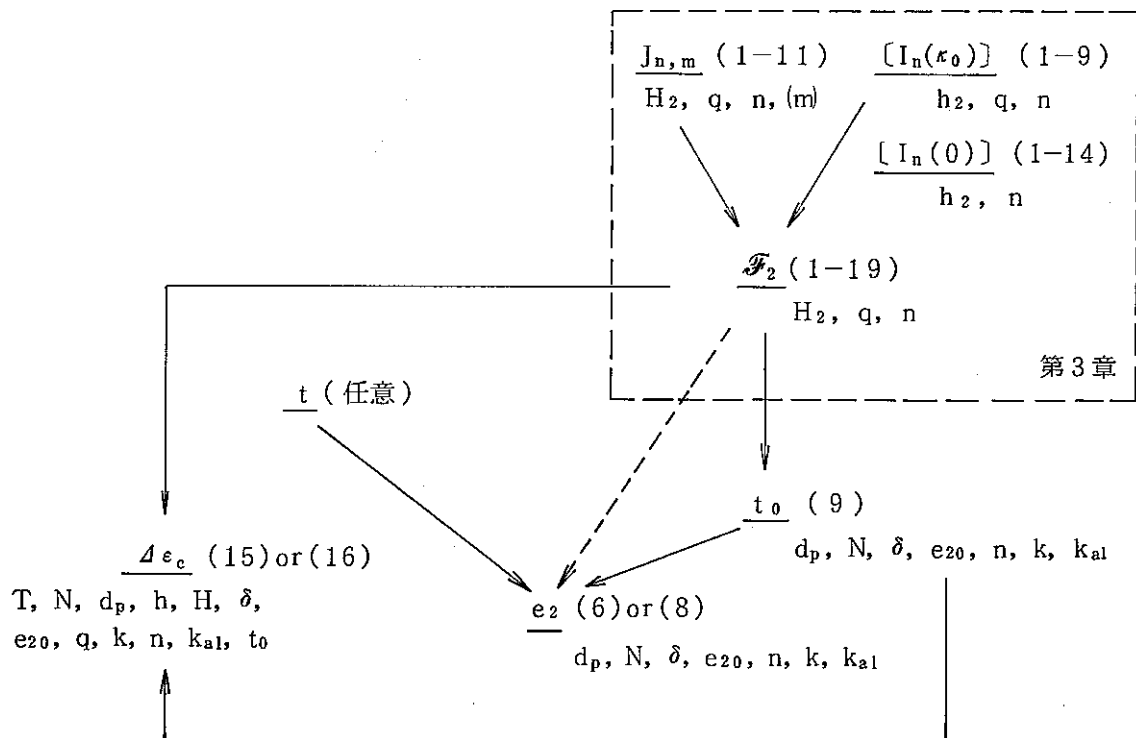
$$\Delta \epsilon_c = \frac{h_2 \cdot H_2^n}{8(1 - 2h_2/Q) \cdot 2^n [I_n(\kappa_0)]^n \mathcal{F}_2} \left( \frac{\pi^n d_p^n (N-1)^n}{4(n-1) \cdot k \cdot k_{a1}^n \mathcal{F}_2} \right)^{\frac{1}{n-1}} \cdot \left\{ \frac{1}{t_0^{\frac{1}{n-1}}} - \frac{1}{(T+t_0)^{\frac{1}{n-1}}} \right\}$$

\dots\dots\dots (16)

軸方向伸縮の場合の山間の弾性追従の計算の流れを以下に整理する。

(必要データ)

- (1) ベローズ形状パラメータ :  $d_p, H, q, h, N$  (公称寸法及び公差を考慮した寸法)  
(第4章参照)
- (2) Norton則パラメータ :  $k, n$
- (3) 軸方向変位, 高温保持時間 :  $\delta, T$
- (4) 初期変位及び軸ばね定数 :  $e_{20}, k_{a1}$



(注) 図中の括弧番号は本文中の式の番号を表わす。

ベローズ山間の弾性追従の計算手順(軸方向変位負荷の場合)

(2) 曲げ変形の場合

Norton則を仮定し、周方向応力の影響を無視するとクリープによる曲率変化率と曲げモーメントの関係は、第3章の式(2-10)より、

$$M = a \left| \dot{\kappa} \right|^{\frac{1}{n}} \text{sgn } \dot{\kappa} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 
$$a = \frac{d_p^2}{2} \left( \frac{d_p q}{8 \mathcal{F} k} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^\pi (\sin \varphi)^{\frac{n+1}{n}} d\varphi \quad (18)$$

Mは、曲げモーメント、 $\dot{\kappa}$ は曲率変化率、n、kはNorton則パラメータ、 $d_p$ はピッチ径、qはベローズピッチ、 $\varphi$ はベローズ周方向角度、 $\mathcal{F}$ は第3章の式(1-19)で表わされる。

一方、ヒンジ型ベローズ継手を想定して、一定の曲げ角度 $\theta$ が負荷された場合を考えて、1山のみの剛性が他の山よりも低いと仮定した場合、幾何学的な類推から、剛性の低い山谷がベローズの中央にあるものとする最も厳しいモデルとなることがわかる。Fig. 1は、この仮定に基づくモデルの概念を示している。但し、対称性から1/2を描いている。図に示される幾何学的な関係から、

$$R_0 \theta = Nq \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$R_{10} \theta_{10} = R_{20} \theta_{20} = q \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$R_1 \theta_1 = R_2 \theta_2 = q \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$(N-1) \theta_{10} + \theta_{20} = \theta \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$(N-1) \theta_1 + \theta_2 = \theta \quad \dots\dots\dots (23)$$

但し、弾性追従に伴うベローズ中心軸の伸びは微小として無視している。ここで、

$R_0$  : 不規則性のない理想的なベローズの中心軸の曲率半径

$\theta$  : 全曲げ変位角

N, q : ベローズの山数及びピッチ

$R_{10}, R_{20}$ : 初期における剛性の高いコンボリユーションと低いコンボリユーションの曲率半径

$\theta_{10}, \theta_{20}$ : 初期における剛性の高いコンボリユーションと低いコンボリユーションの吸収変位角

$R_1, R_2$ : 保持中における剛性の高いコンボリユーションと低いコンボリユーションの曲率半径

$\theta_1, \theta_2$ : 保持中における剛性の高いコンボリユーションと低いコンボリユーションの吸収変位角

ここで、軸方向伸縮の場合と同様に、剛性の低い1山がクリープし、他の山は弾性挙動すると仮定すると、

$$M = k_{b1} \theta_1 \quad \dots\dots\dots (24)$$

式(24)において、 $k_{b1}$ は剛性の高いコンポリューションの1山当たりの曲げばね定数である。  
式(17)と式(21)から、

$$M = \frac{1}{q^{\frac{1}{n}}} a_2 |\dot{\theta}_2|^{\frac{1}{n}} \operatorname{sgn} \dot{\theta}_2 \dots\dots\dots (25)$$

式(24)と式(23)から、

$$M = k_{b1} \cdot \frac{\theta - \theta_2}{N-1} \dots\dots\dots (26)$$

式(25)と式(26)を等置して、

$$\dot{\theta}_2 = \frac{q}{a_2^n} \left( \frac{k_{b1}}{N-1} \right)^n (\theta - \theta_2)^n \dots\dots\dots (27)$$

式(27)は、 $\theta = \text{const.}$  より、次の様に見える。

$$\frac{d}{dt} (\theta - \theta_2) = - \frac{q \cdot k_{b1}^n}{a_2^n (N-1)^n} (\theta - \theta_2)^n \dots\dots\dots (28)$$

○  $n = 1$ の場合:

$$\theta_2 = \theta - (\theta - \theta_{20}) \exp \left\{ - \frac{q \cdot k_{b1}}{a_2 (N-1)} t \right\} \dots\dots\dots (29)$$

ただし、 $\theta_2 = \theta_{20} \quad (t = 0) \dots\dots\dots (30)$

○  $n \neq 1$ の場合:

$$\theta_2 = \theta - \sqrt[n-1]{\frac{a_2^n (N-1)^n}{(n-1)q \cdot k_{b1}^n (t + t_0)}} \dots\dots\dots (31)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= \frac{a_2^n (N-1)^n}{(n-1)q \cdot k_{b1}^n (\theta - \theta_{20})^{n-1}} \\ \theta_2 &= \theta_{20} \quad (t = 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

一方、子午線方向の最大ひずみ速度は、曲げによって最も大きな変形を生じるベローズの2つの子午線の曲がり部(山、谷)で生じるとみなせる。

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\tilde{\kappa}} \left| \frac{-\frac{h_2}{2}}{1 + \tilde{\kappa}_0 \left(-\frac{h_2}{2}\right)} \right| = \dot{\tilde{\kappa}} \frac{\frac{h_2}{2}}{1 + \tilde{\kappa}_0 \frac{h_2}{2}} \dots\dots\dots (33)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_c$  はベローズコンボリユーション曲がり部での子午線方向最大ひずみ速度、 $\dot{\tilde{\kappa}}$  は曲がり部の曲率変化率(注ベローズ中心軸の曲率ではない)、 $\tilde{\kappa}_0$  は初期曲率であり、初期の変形による曲率変化を無視すれば、式(11)と置ける。板厚  $h_2$  の添字 " 2 " は剛性の低いコンボリユーションの値であることを意味する。

式(33)の  $\dot{\tilde{\kappa}}$  はベローズの周方向座標  $\varphi$  の関数である。簡単のため、 $\dot{\tilde{\kappa}}$  がベローズの曲げ中心軸からの距離に比例するとみなすと、

$$\dot{\tilde{\kappa}} = \dot{\tilde{\kappa}}_{\max} \sin \varphi \dots\dots\dots (34)$$

ここで、 $\dot{\tilde{\kappa}}_{\max}$  は  $\dot{\tilde{\kappa}}$  の最大値である。

第3章式(1-8)から、 $\dot{\tilde{\kappa}}$  の曲がり部での値は、

$$\dot{\tilde{\kappa}} = \frac{k H_2^n}{2^n [I_n(\tilde{\kappa}_0)]^n} P^n \dots\dots\dots (35)$$

ここで、 $n$ 、 $k$  はNorton則のパラメータ、 $H_2$  は剛性の低いコンボリユーションの山高、 $[I_n(\tilde{\kappa}_0)]$  は、第3章式(1-9)で与えられる。

$P$  はベローズ周方向単位長さなりに作用する軸方向荷重である。

式(34)と式(35)から、

$$P = \frac{[I_n(\tilde{\kappa}_0)]}{k^{\frac{1}{n}}} \cdot \frac{2}{H_2} \dot{\tilde{\kappa}}_{\max}^{\frac{1}{n}} |\sin \varphi|^{\frac{1}{n}} \operatorname{sgn}(\sin \varphi) \dots\dots\dots (36)$$

従って、ベローズの曲げモーメントは、

$$\begin{aligned} M &= \int_0^{2\pi} P r \sin \varphi (r d\varphi) \\ &= \frac{d_p^2}{H_2} \cdot \frac{[I_n(\tilde{\kappa}_0)]}{k^{\frac{1}{n}}} \dot{\tilde{\kappa}}_{\max}^{\frac{1}{n}} \cdot I_\varphi \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

ただし、

$$I_\varphi = \int_0^\pi (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} d\varphi \dots\dots\dots (38)$$

式(33)、式(37)及び式(26)から

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{cmax} &= \frac{\frac{h_2}{2}}{1 - \tilde{\kappa}_0 \cdot \frac{h_2}{2}} \cdot \frac{H_2^n k}{d_p^{2n} \cdot [I_n(\tilde{\kappa}_0)]^n \cdot I_\varphi^n} \cdot M^n \\ &= \frac{\frac{h_2}{2}}{1 - \tilde{\kappa}_0 \cdot \frac{h_2}{2}} \cdot \frac{H_2^n \cdot k \cdot k_{bl}^n (\theta - \theta_2)^n}{d_p^{2n} [I_n(\tilde{\kappa}_0)]^n \cdot I_\varphi^n (N-1)^n} \dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

さらに、上式と式(29)、(31)より、

○ n = 1 の場合 :

$$\dot{\epsilon}_{cmax} = \frac{\frac{h_2}{2}}{1 - \tilde{\kappa}_0 \cdot \frac{h_2}{2}} \cdot \frac{H_2 \cdot k \cdot k_{bl} (\theta - \theta_{20})}{d_p^2 [I_1(\tilde{\kappa}_0)] \cdot I_\varphi (N-1)} \exp \left\{ - \frac{q \cdot k_{bl}}{a_2 (N-1)} t \right\} \quad (40)$$

○ n ≠ 1 の場合 :

$$\dot{\epsilon}_{cmax} = \frac{\frac{h_2}{2}}{1 - \tilde{\kappa}_0 \cdot \frac{h_2}{2}} \cdot \frac{H_2^n \cdot k \cdot k_{bl}^n}{d_p^{2n} [I_n(\tilde{\kappa}_0)]^n \cdot I_\varphi^n (N-1)^n} \left( \frac{a_2^n (N-1)^n}{(n-1) q \cdot k_{bl}^n (t+t_0)} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (41)$$

従って、コンポリューション間の弾性追従によって生じる子午線方向クリープひずみ増分  $\Delta \epsilon_{cmax}$  は、式(14)から、

○ n = 1 の場合 :

$$\Delta \epsilon_{cmax} = \frac{h_2 \cdot H_2 \cdot k \cdot a_2 (\theta - \theta_{20})}{2 \left( 1 - \tilde{\kappa}_0 \cdot \frac{h_2}{2} \right) q \cdot d_p^2 [I_1(\tilde{\kappa}_0)] \cdot I_\varphi} \left\{ 1 - \exp \left( - \frac{q \cdot k_{bl}}{a_2 (N-1)} T \right) \right\} \quad (42)$$

○ n ≠ 1 の場合 :

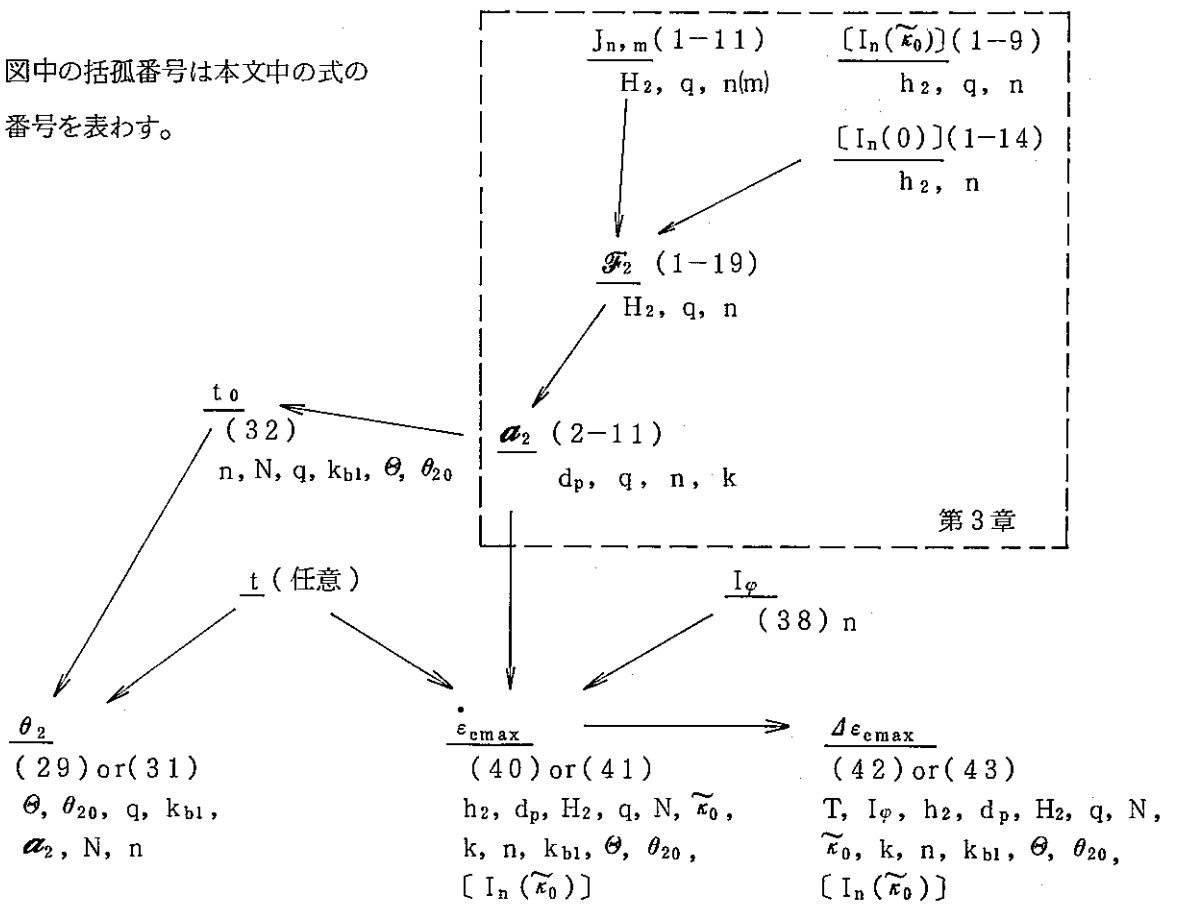
$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{cmax} &= \frac{h_2 \cdot H_2^n \cdot k \cdot a_2^n}{2 \left( 1 - \tilde{\kappa}_0 \cdot \frac{h_2}{2} \right) q \cdot d_p^{2n} [I_n(\tilde{\kappa}_0)]^n \cdot I_\varphi^n} \left( \frac{a_2^n (N-1)^n}{(n-1) q \cdot k_{bl}^n} \right)^{\frac{1}{n-1}} \\ &\quad \times \left\{ \frac{1}{t_0^{\frac{1}{n-1}}} - \frac{1}{(T+t_0)^{\frac{1}{n-1}}} \right\} \dots\dots\dots (43) \end{aligned}$$

曲げ変位吸収の場合の山間の弾性追従の計算の流れを以下に整理する。

(必要データ)

- (1) ベローズ形状パラメータ :  $d_p, H, q, h, N$  (公称寸法及び公差を考慮した寸法)  
(第4章参照)
- (2) Norton則パラメータ :  $k, n$
- (3) 曲げ角変位, 高温保持時間:  $\theta, T$
- (4) 剛性の低いコンポリューションの初期曲げ変位:  $\theta_{20}$   
剛性の高いコンポリューションの曲げばね定数:  $k_{b1}$

(注) 図中の括弧番号は本文中の式の番号を表わす。



~~~~~  
ベローズ山間の弾性追従の計算手順(曲げ変位負荷の場合)  
~~~~~

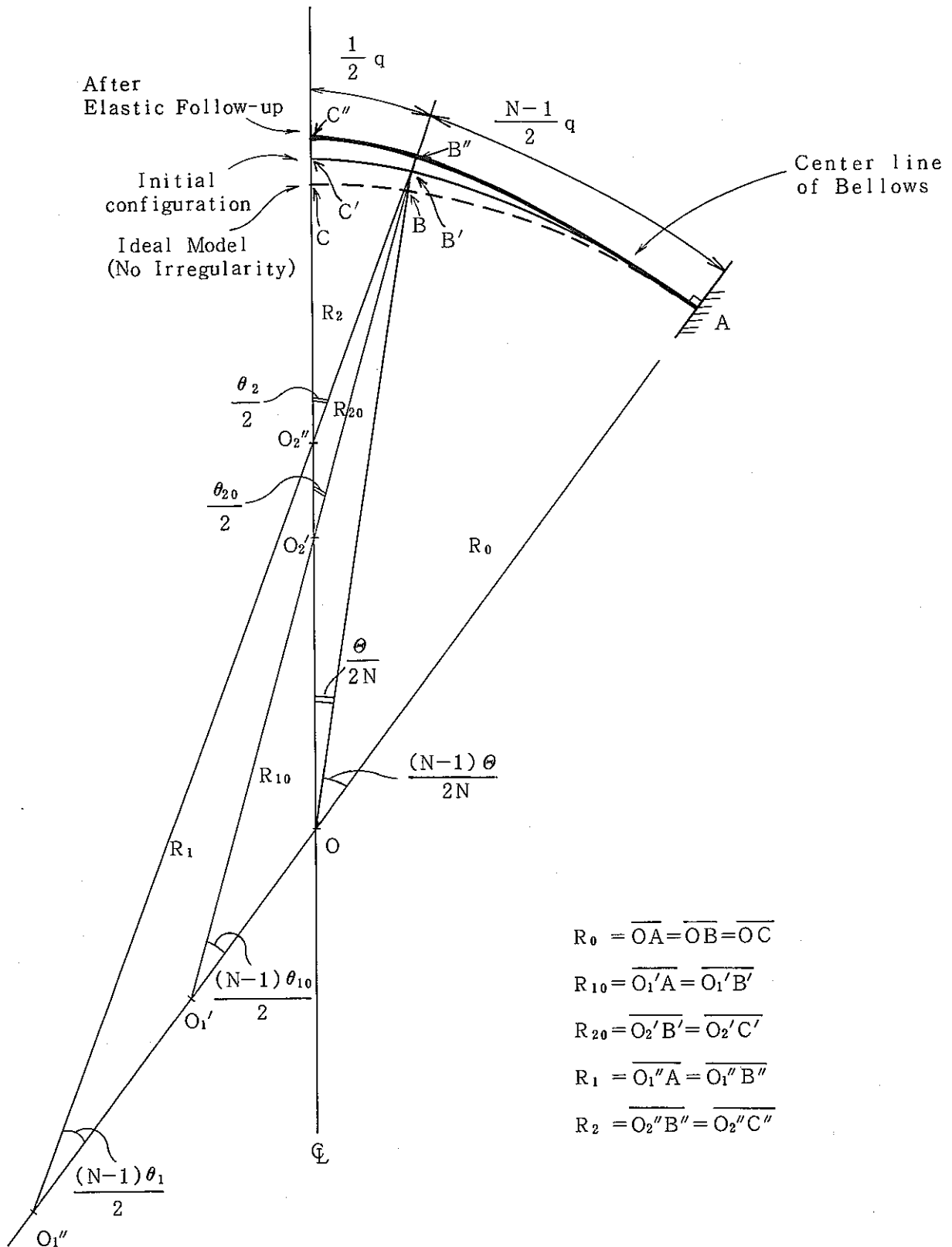


Fig. 1 Convolution Elastic Follow-up under Bending Displacements



## 7. あ と が き

信頼性の高いベローズ継手を合理的に設計するためには、疲労寿命、座屈等の破損の限界を精度良く予測する評価法の開発が必要となる。特に高温では、クリープ疲労、クリープ座屈、弾性追従など更にこみいった検討が要求される。

ベローズ継手は、非常に便利な機器であり、大小プラントを問わず、ごく普通に使用されているが、形状が複雑、特異であることもあって、強度評価法という点では未開拓の部分も多く残されていると言える。ベローズについて材料試験のように実験データに基づいて評価式を策定することは効率が悪く、また、クリープが問題となる領域では自ら制約がある。今は、有限要素法などの数値解析技術が発達しており、かなり複雑な解析が可能であるが、非線形効果の大きい大規模な問題などでは必ずしも全てうまくいくとは限らず、開発段階のものもある。また、設計スクリーニングの段階で評価解析を多用するのは得策とは言えない。こうした背景も踏まえて、ベローズに関する次の5つの項目について解析手法を提案した。

- (1) ベローズの内圧によるコラム座屈
- (2) 内圧によるベローズのクリープ座屈
- (3) ベローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数
- (4) ベローズ継手適用配管系で生じる弾性追従の簡易評価
- (5) ベローズのコンポリューション間で生じる弾性追従の簡易評価

昭和62年度までにFBR配管用ベローズ継手のフィージビリティ・スタディR&D試験をほぼ終了しており、成立性を見通しが得られている<sup>1)</sup>。

本報告書に記した解析手法は、ベローズの形状、製作上の寸法公差等を考慮して、非弾性挙動をより分析的に評価することを狙って展開したものであり、そういう意味で、フィージビリティ・スタディの後、さらに設計手法を合理化し、具体的な方向を把む必要が生じた場合、これに資するという位置付けにある。従って、本報告書では新しい解析手法の展開と簡単な例題解析に止まっているものもあり、これらについての途中の仮定を含めた手法の妥当性の確認あるいは係数決定など具体的運用の仕方は、フィージビリティ・スタディ以後の解析、試験に委ねることにしたい。

### 参 考 文 献

- 1) FBR配管用ベローズ継手の適用性に関する調査検討, 1988. 6.  
(PNC SJ9394 88-001)

付 録

コンボリューション毎の寸法のばらつきによって生じる  
ひずみ集中の簡易評価法（補遺）

List of Table and Figures

|           |                              |     |
|-----------|------------------------------|-----|
| Table A-1 | $f_3'$ vs N                  | 257 |
| Fig. A-1  | Spring series model          | 258 |
| Fig. A-2  | Relation between $f_3$ and N | 258 |

既報<sup>1)</sup>においてコンボリューションの剛性のばらつきによって生じるひずみの割増し係数 $f_3$ の導出について述べた。改めて、要点を記すと次の通りである。

各コンボリューションの剛性のばらつきによるひずみの割増しを表わす係数 $f_3$ は次式により、保守的に評価される。

$$f_3 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{\text{mean}}} = \frac{\alpha \beta}{1 + (\alpha - 1) / N} \quad \dots\dots\dots (A-1)$$

ここで、

$\epsilon_1$  : 剛性の低いコンボリューションのひずみ (最大ひずみ)

$\epsilon_{\text{mean}}$  : コンボリューション平均寸法から求めたひずみ

$\alpha$  : 剛性の高いコンボリューションと低いコンボリューションのばね定数比

• 軸変位吸収型の場合:  $\alpha_a = \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \left( \frac{t_{p2} H_1}{t_{p1} H_2} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (A-2 a)$

• 曲げ変位吸収型の場合:  $\alpha_b = \left( \frac{d_{p2} t_{p2} H_1}{d_{p1} t_{p1} H_2} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (A-2 b)$

$\beta$  : 吸収変位の割増し率とひずみの割増し係数を結びつける係数

$N$  : 山 数

$d_{p1}$  : 剛性の低いコンボリューションのピッチ径

$d_{p2}$  : 剛性の高いコンボリューションのピッチ径

$t_{p1}$  : 剛性の低いコンボリューションの補正板厚

$t_{p2}$  : 剛性の高いコンボリューションの補正板厚

$t_{p\text{mean}}$ : 補正板厚の平均値

$H_1$  : 剛性の低いコンボリューションの山高

$H_2$  : 剛性の高いコンボリューションの山高

$H_{\text{mean}}$ : 山高の平均値

ASME C. C. N-290 の繰返し寸法公差 (下記) を適用する。

$$\left. \begin{aligned} 0.97 H_{\text{mean}} &\leq H \leq 1.03 H_{\text{mean}} \\ 0.94 t_{\text{mean}} &\leq t \leq 1.06 t_{\text{mean}} \\ 0.9985 d_{p\text{mean}} &\leq d_p \leq 1.0015 d_{p\text{mean}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (A-3)$$

その結果、保守的な $f_3$ の最小値は次の通りとなる。

$$f_3 \doteq 1.173 \quad (N \rightarrow \infty) \quad \dots\dots\dots (A-4)$$

以上は、Fig. A-1 に示すように、各コンボリューションをばねと考え、ベローズをNケのばねの直列結合系と想定し、保守的な仮定として1ケのバネのみ剛性が劣り、他は同一の剛性を有するものとして導かれる。

簡単な計算から、剛性の低いばねの吸収変位  $e_1$  と平均の吸収変位  $e_{mean}$  の比は、

$$\frac{e_1}{e_{mean}} = \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1) / N} \quad \left( \alpha = \frac{k_2}{k_1} > 1 \right) \dots\dots\dots (A-5)$$

ここで、 $k_1, k_2$  は、ばね定数であり、添字 "1", "2" はそれぞれ剛性の低いばねと高いばねを表わす。

EJMAスタンダード<sup>2)</sup>によると1山当りの軸方向ばね定数  $f_{iu}$  は、

$$f_{iu} = 1.7 \frac{d_p t_p^3 E}{H^3 C_f} \dots\dots\dots (A-6)$$

ここで、 $E$  は縦弾性係数、 $C_f$  はEJMAで定められる係数である。

$E, C_f$  を一定とすると、式(A-2 a)あるいは式(A-2 b)が求まる。一方、EJMAスタンダードによると、変位による子午線方向曲げひずみは、

$$\epsilon = \frac{5 t_p}{3 H^2 C_d} e \dots\dots\dots (A-7)$$

ここで、 $C_d$  はEJMAで定められる係数、 $e$  は1山当りの等価軸変位である。

式(A-7)、式(A-5)及び式(A-2 a)あるいは式(A-2 b)から式(A-1)が得られる。

$$\begin{aligned} f_3 &= \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{mean}} = \frac{t_{p1}}{t_{pmean}} \left( \frac{H_{mean}}{H_1} \right)^2 \cdot \frac{e_1}{e_{mean}} \\ &= \frac{\alpha \beta}{1 + (\alpha - 1) / N} \end{aligned}$$

ここで、

$$\beta = \frac{t_{p1}}{t_{pmean}} \cdot \left( \frac{H_{mean}}{H_1} \right)^2 \dots\dots\dots (A-8)$$

式(A-1)に式(A-3)に示される公差を適用すると、 $f_3$  は山数Nの関数となり、 $f_3$  の振舞いは、Fig. A-2のようになり、式(A-4)が得られる。

式(A-1)の $\epsilon_{\text{mean}}$ は、式(A-8)からわかるようにコンポリューションの平均寸法 $t_{p\text{mean}}$ 、 $H_{\text{mean}}$ から求めたひずみである。ここでは、コンポリューションのひずみの平均値からひずみ割増し係数を求めることを試みる。

コンポリューションのひずみの平均値を $\epsilon'_{\text{mean}}$ とすると、

$$\epsilon'_{\text{mean}} = \{ (N-1)\epsilon_2 + \epsilon_1 \} / N \quad \dots\dots\dots (A-9)$$

ここで、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ はそれぞれ剛性の低いコンポリューション、剛性の高いコンポリューションに発生する最大ひずみであり、

$$\epsilon_1 = \frac{5 t_{p1}}{3 H_1^2 C_d} e_1, \quad \epsilon_2 = \frac{5 t_{p2}}{3 H_2^2 C_d} e_2 \quad \dots\dots\dots (A-10 a, b)$$

式(A-10 a, b)を式(A-9)に用いると、

$$\epsilon'_{\text{mean}} = \frac{5}{3 C_d N} \left\{ \frac{t_{p2}}{H_2^2} e_2 (N-1) + \frac{t_{p1}}{H_1^2} e_1 \right\} \quad \dots\dots\dots (A-11)$$

コンポリューションひずみの平均値 $\epsilon'_{\text{mean}}$ に基づく割増し係数 $f'_3$ は、

$$\begin{aligned} f'_3 &= \frac{\epsilon_1}{\epsilon'_{\text{mean}}} \\ &= \frac{t_{p1}}{t_{p2}} \cdot \frac{H_2^2}{H_1^2} \cdot \frac{e_1}{e_2} \left\{ 1 + \left( \frac{t_{p1}}{t_{p2}} \cdot \frac{H_2^2}{H_1^2} \cdot \frac{e_1}{e_2} - 1 \right) / N \right\} \\ &= \frac{\alpha'}{1 + (\alpha' - 1) / N} \quad \dots\dots\dots (A-12) \end{aligned}$$

ここで、

$$\alpha' = \frac{t_{p1}}{t_{p2}} \cdot \frac{H_2^2}{H_1^2} \cdot \frac{e_1}{e_2} \quad \dots\dots\dots (A-13)$$

また、

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{k_2}{k_1} \quad \dots\dots\dots (A-14)$$

従って、式(A-6)を用いて、

$$\alpha'_a = \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \cdot \left( \frac{t_{p2}}{t_{p1}} \right)^2 \cdot \frac{H_1}{H_2} \quad (\text{axial type}) \quad \dots\dots\dots (A-15 a)$$

$$\alpha_{b'} = \left( \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \right)^3 \cdot \left( \frac{t_{p2}}{t_{p1}} \right)^2 \cdot \frac{H_1}{H_2} \quad (\text{bending type}) \quad \dots\dots\dots (A-15b)$$

一方、式(A-3)の公差を適用すると、

$$\frac{d_{p2}}{d_{p1}} \leq 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0015 \quad \dots\dots\dots (A-16a)$$

$$\frac{t_{p2}}{t_{p1}} \leq 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0638 \quad \dots\dots\dots (A-16b)$$

$$\frac{H_1}{H_2} \leq 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0309 \quad \dots\dots\dots (A-16c)$$

保守的な設定として、式(A-16a)~(A-16c)の最大値を式(A-15a)、(A-15b)に用いる。

$$\alpha_a' = \left( 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0015 \right) \left( 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0638 \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0309 \right) \quad (A-17a)$$

$$\alpha_{b'} = \left( 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0015 \right)^3 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0638 \right)^2 \left( 1 + \frac{N}{N-1} \times 0.0309 \right) \quad (A-17b)$$

式(A-12)に基づくNと $f_3'$ の関係をTable A-1に示す。参考のため式(A-1)の $f_3$ も併記しているが、山数の少ない領域では $f_3'$ の方がわずかに大きい、漸近値はほとんど一致することがわかる。

参 考 文 献

- 1) 月森他, ベローズの解析のための簡易計算手法, 1986. 12.  
(PNC SN9410 86-128)
- 2) Standards of the Expansion Joint Manufactureres Association, Inc., 5th ed., 1980.

Table A-1  $f_3'$  vs N

| N        | $\alpha_a'$ | $\alpha_b'$ | $f_3'(\alpha_a')$ | $f_3'(\alpha_b')$ | $f_3(\alpha_a)^*$ | $f_3(\alpha_b)^*$ |
|----------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1        | —           | —           | 1.                | 1.                | 1.                | 1.                |
| 2        | 1.3541      | 1.3618      | 1.1504            | 1.1532            | 1.1196            | 1.1221            |
| 3        | 1.2590      | 1.2647      | 1.1590            | 1.1622            | 1.1424            | 1.1453            |
| 4        | 1.2283      | 1.2332      | 1.1620            | 1.1653            | 1.1508            | 1.1539            |
| 5        | 1.2132      | 1.2177      | 1.1636            | 1.1669            | 1.1551            | 1.1583            |
| •        |             |             |                   |                   |                   |                   |
| 10       | 1.1882      | 1.1921      | 1.1662            | 1.1696            | 1.1627            | 1.1661            |
| •        |             |             |                   |                   |                   |                   |
| 15       | 1.1811      | 1.1849      | 1.1670            | 1.1704            | 1.1649            | 1.1684            |
| •        |             |             |                   |                   |                   |                   |
| •        |             |             |                   |                   |                   |                   |
| $\infty$ | 1.1684      | 1.1719      | 1.1684            | 1.1719            | 1.1690            | 1.1725            |

\* ref. 1)

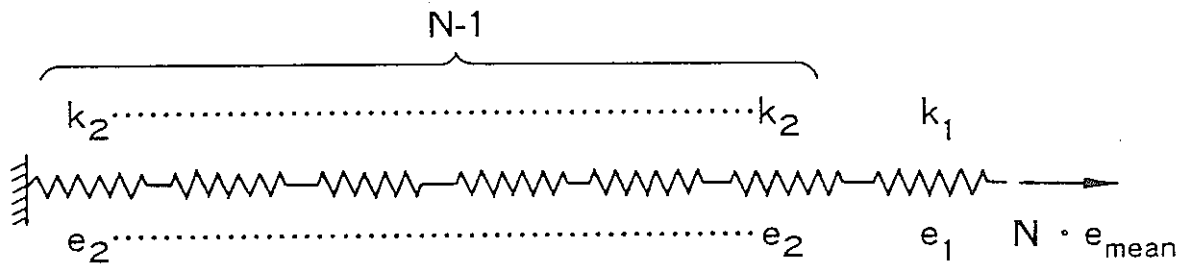
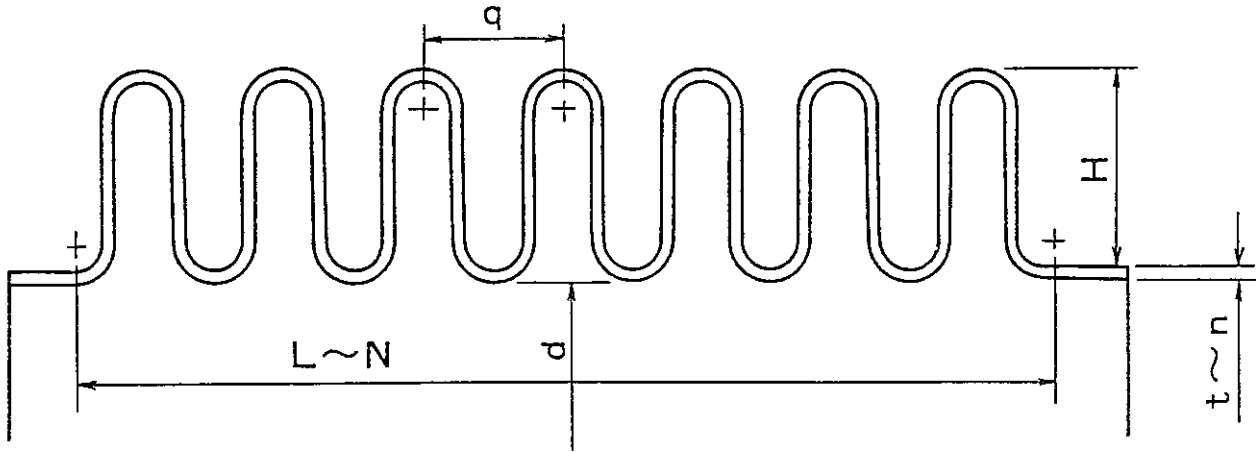


Fig. A-1 Spring series model

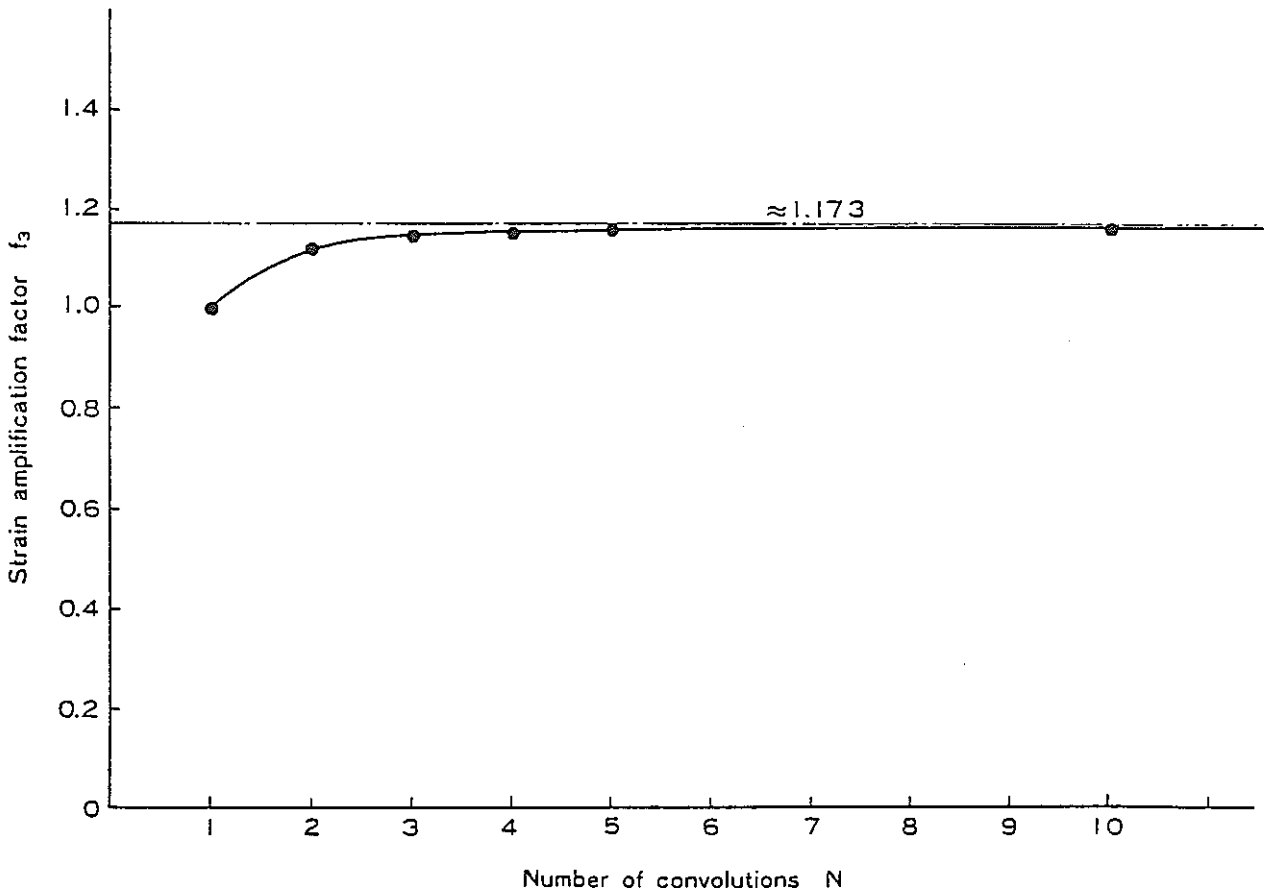


Fig. A-2 Relation between  $f_3$  and  $N$



## 謝 辞

本報告書は、既報“ペローズの解析のための簡易計算手法”の続編とも言えるものである。ペローズは、形状や構造が若干複雑であり、また特殊であることから、有限要素法などの詳細解析が必ずしも特策とは言えない場合もあり、合理的な簡易解析手法が有効となる場合も少なくない。このような問題意識から生まれたペローズに関する簡易解析法を既報に続き、とりまとめた。この中には、解析に基づく設計基準（暫定案）の中に取込まれているものもあり、またタイムリーに反映されなかったものもあるが、既にフィージビリティ・スタディも終了しており、ここにまとめることとした。

各簡易解析手法の作成に関しては、多くの方々に御協力を頂いた。山下卓哉氏（構造室）には、ペローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数（4章）の定式化において貴重な助言を頂いた。後藤文彦氏（日立エンジニアリング㈱）にはペローズの内圧によるコラム座屈（2章）、内圧によるペローズのクリープ座屈（3章）の計算プログラムの作成、井上泰幸氏（もとニュークリアデータ㈱）にはペローズ継手適用配管系で生じる弾性追従の簡易評価（5章）の計算プログラムの作成、小出昭雄氏（セントラル・コンピュータ・サービス㈱）にはペローズの弾塑性簡易ひずみ割増し係数（4章）の計算プログラム作成において協力頂いた。また、報告書全般にわたって岩田耕司構造室室長より懇切なる御教示を賜った。ここに記して謝意を表する次第である。