

ベローズ1山モデル疲労試験報告書

1987年3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 1 山モデル疲労試験報告書

筆者氏名 菊地 和明,* 月森 和之 *

岩田 耕司,* 今津 彰 *

要 旨

事業団では、FBR 大型炉の合理化の一方策として配管用ベローズ継手のフィージビリティスタディを進めており、ベローズの疲労及びクリープ疲労試験はそのための R & D 試験のひとつである。

本報告書はベローズコンボリューションの疲労、クリープ疲労試験と併行して、基本的なベローズ 1 山についての特性を検討する目的で実施したベローズ 1 山モデル（波板試験片）の室温疲労試験の結果を検討したものである。主な成果は、下記の通りである。

- (1) 1 山モデルの疲労試験データは材料試験ベースの疲労カーブと良く一致する。
- (2) 1 山モデルのひずみ挙動は理論及び数値解析によって把握できる。
- (3) 薄肉はり理論と EJMA スタンドード及び数値解析から、試験に用いた 1 山モデルと 42^B ベローズの対応を評価したがひずみ挙動について大きな差異はなかった。
- (4) ベローズ 1 山単位の塑性によるひずみ集中は、1 山モデルの試験と解析を包含する K_e ($q = 2.0$) で安全側に評価できる。

* 大洗工学センター 機器構造開発部構造工学室

Fatigue Test of Corrugated-plates taken from Bellows

Kazuaki Kikuchi*,
Kazuyuki Tsukimori*, Kohji Iwata*,
and Akira Imazu*

Abstract

PNC is promoting the feasibility study of piping bellows expansion joints as one of the measures that rationalize large scale FBR plants, and the fatigue and creep fatigue test of bellows is one of the R & D tests.

This report describes the fatigue test and analysis result of the bellows fundamental unit model (corrugated plates) at room temperature. The following is the main result.

- (1) The fatigue life data of the corrugated plates favorably coincide with the material fatigue curve.
- (2) The strain response of the corrugated plates can be satisfactorily analyzed by both theoretical and numerical method.
- (3) The relationship between the corrugated plate and the bellows (42 inches in diameter) was examined by using the shallow beam theory, the standards of EJMA and unmerical analyses (FEM). As the result there was no remarkable difference between them.
- (4) The degree of the strain concentration by plasticity in 1 convolution is estimated conservatively due to the factor K_e' ($q = 2.0$) which is bounded by test and analysis results.

* Structural Engineering Section, O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒 言	1
2. 試 験	3
2.1 概 要	3
2.2 試験装置	3
2.3 試 験 片	3
2.4 計 測	4
2.5 試験結果	4
3. 解 析	24
3.1 概 要	24
3.2 弾性理論解析	24
3.3 数値解析	29
4. 評価・検討	54
4.1 ベローズ疲労試験との相関性	54
4.2 疲労寿命の評価及び評価法の検討	55
5. 結 言	60
謝 辞	61
参考文献	62
付 録 ベローズ谷部の応力とひずみに関する補遺	63

List of Tables

Table 2.1	Test Condition	6
Table 2.2	Material Properties of SUS316 Sheets	7
Table 2.3	Measured Thickness and width of Test Pieces	8
Table 2.4	Fatigue Test Results (1.5 ^t)	9
Table 2.5	Fatigue Test Results (2.0 ^t) (1/3)	10
Table 2.6	Fatigue Test Results (2.0 ^t) (2/3)	11
Table 2.7	Fatigue Test Results (3.0 ^t)	12
Table 2.8	Fatigue Test Results (2.0 ^t) (3/3)	13
Table 2.9	The View of Final Crack and Fracture Surface (1.5 ^t).....	14
Table 2.10	The View of Final Crack and Fracture Surface (2.0 ^t)(1/3)	15
Table 2.11	The View of Final Crack and Fracture Surface (2.0 ^t)(2/3)	16
Table 2.12	The View of Final Crack and Fracture Surface (3.0 ^t)	17
Table 2.13	The View of Final Crack and Fracture Surface (2.0 ^t)(3/3)	18
Table 3.1	Coefficient α_m (Co/Cf)	32
Table 3.2	Coefficient α_b (1.07 Co/Cd)(1.5 ^t)	33
Table 3.3	Coefficient α_b (1.05 Co/Cd)(2.0 ^t)	34
Table 3.4	Coefficient α_b (1.03 Co/Cd)(3.0 ^t)	35
Table 3.5	Coefficient β (1.08 Co/Cf)	36
Table 3.6	Cyclic Stress-Strain Relation for SUS316-HP Stainless Steel Plate at R.T.	37
Table 3.7	Strain Values Derived from the Simplified Method, FEM and Test	38
Table 3.8	Thickness Distribution (2.0 ^t)	39
Table 4.1	Meridional Maximum Strain Ratio (Theory and FEM)	56
Table 4.2	Meridional Strain and Strain Ratio (with and without thickness distribution) : $t = 2\text{mm}$ (nominal)	57

List of Figures

Fig. 1.1	Study and Comparison of Single Corrugated Plate Model Test and Analysis with Bellows Test and Analysis ..	2
Fig. 2.1	Structure of Test Rig	19
Fig. 2.2	Shape and Dimension of Test Piece	20
Fig. 2.3	Fatigue Life (N_f vs Δe)	21
Fig. 2.4	Fatigue Life (N_f vs $\Delta \epsilon$)	22
Fig. 3.1	Coefficient α_m	40
Fig. 3.2	Coefficient α_b (1.5^t)	41
Fig. 3.3	Coefficient α_b (2.0^t)	42
Fig. 3.4	Coefficient α_b (3.0^t)	43
Fig. 3.5	Coefficient β	44
Fig. 3.6	Analysis Model of Single Corrugated Plate T.P.	45
Fig. 3.7	Analysis Model of Bellows Convolution (CONIC2)	46
Fig. 3.8	Finite Element Mesh of Corrugated Plate Model	47
Fig. 3.9	Finite Element Mesh of Bellows Convolution Model(CONIC2).	48
Fig. 3.10	Boundary Condition of Corrugated Plate Model (QFLAR4, BEAM2)	48
Fig. 3.11	Boundary Condition of Bellows Convolution Model(CONIC2) .	48
Fig. 3.12	Number and Position of Integral Points'	49
Fig. 3.13	Relation between Strain and Displacement Range (1.5^t) ...	50
Fig. 3.14	Relation between Strain and Displacement Range (2.0^t) ...	51
Fig. 3.15	Relation between Strain and Displacement Range (3.0^t) ...	52
Fig. 3.16	Relation between Strain and Displacement Range (with and without thickness distribution) : (2.0^t nominal)	53
Fig. 4.1	Strain Concentration due to Plasticity	58
Fig. 4.2	Fatigue Life (N_f vs Δe) 2.0^t	59

List of Photographs

Photo. 2.1	Overview of Fatigue Test Rig	23
Photo. 2.2	Test Piece Fixture and Mounted T.P.	23

1 緒 言

FBR 大型炉のコスト低減方策のひとつとして、主冷却系配管に配管用ベローズ継手を適用することが考えられている。現在、FBR 配管用ベローズ継手の成立性の検討が事業団を中心として進められているが、その一環として大洗工学センターにおいて昭和 60 年度より大型試験装置を用いたベローズの疲労及びクリープ疲労試験を開始した。

本報告書に述べるベローズ 1 山モデルに関する試験、解析は、上のベローズの疲労、クリープ疲労試験を支援するものとして位置づけられる。試験、解析の目的は、基本的な単位であるベローズ 1 山についての応答挙動、及び疲労寿命を把握することにある。1 山試験及び解析から得られたデータは複数山のいわゆるベローズの挙動を評価する上での基礎的な知見として反映される。

Fig. 1.1 は、試験、解析の比較、検討の関係を図式化したものである。

試験としては、レプリカベローズから切出した短冊状の 1 山試験片を用いて、室温における疲労試験を 38 ケース実施した。理論解析としては、薄肉曲がり梁理論を適用し、弾性挙動を評価した。これについてはコンボリューションとの比較という観点から、EJMA スタンドード¹⁾ (Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, Inc.) の応力評価式との相関性の検討も行った。数値解析については、はり要素及び 3 次元シェル要素による弾塑性大変形解析を実施するとともに、軸対称シェル要素によるコンボリューションの解析結果との比較を行った。

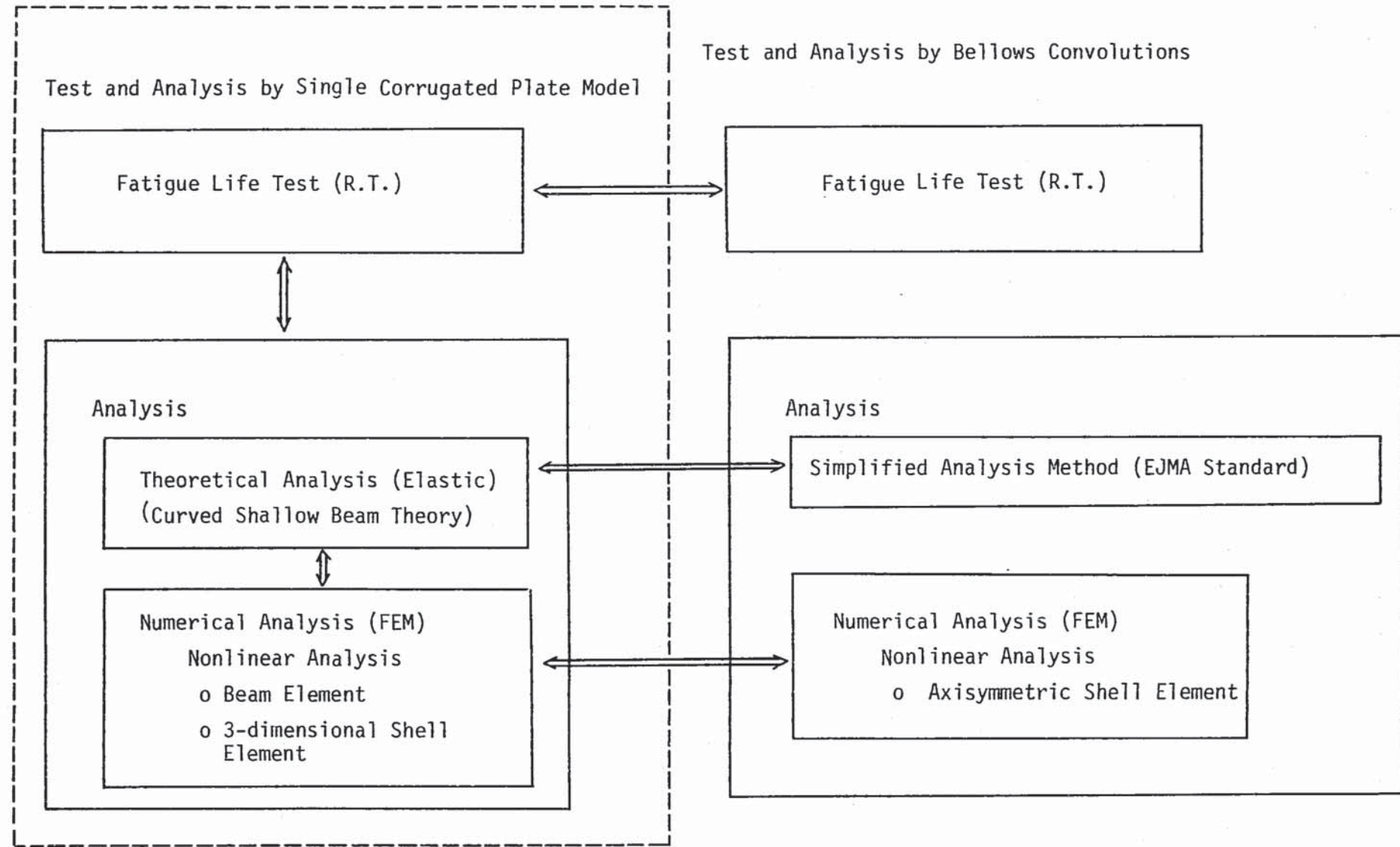


Fig. 1.1 Study and Comparison of Single Corrugated Plate Model Test and Analysis with Bellows Test and Analysis

2 試 験

2.1 概 要

試験は配管ベローズクリープ疲労試験及び座屈試験用供試体のレプリカベローズより採取した波板試験片（1山モデル）を用いた、大気中、室温における疲労試験である。試験条件をTable. 2.1に示す。

ひずみ速度は $4300 \sim 10000 \mu\epsilon/\text{sec}$ とした。

2.2 試験装置

疲労試験に用いた試験機は高速炉安全性第3試験室に設置されている「片持ち曲げ疲労試験機」であり、仕様は次のとおりである。

項 目	能 力
繰 返 し 速 度	21 C. P. M. $\sim$ 250 C. P. M.
設 定 変 位 量	0 $\sim$ $\pm$ 40 mm
同 時 試 験 数 量	2 本

Fig. 2.1 に疲労試験機の構造図を示す。Photo. 2.1 は疲労試験機外観，Photo. 2.2 は試験片の取付状態を示したものである。

2.3 試験片

試験片は、配管ベローズクリープ疲労試験及び座屈試験用供試体のレプリカベローズより切出し製作した。

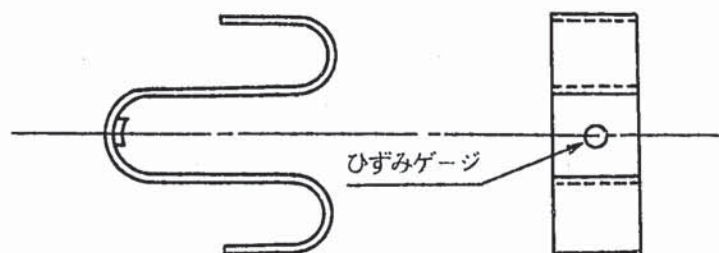
材料の化学成分、機械的性質をTable 2.2 に試験片形状を Fig. 2.2 に示す。試験片の寸法測定結果は Table 2.3 に示す。

2.4 計 測

本試験ではひずみ、変位、繰返し数（き裂発生、貫通、破断）を測定した。

(1) ひずみ

各試験片に1枚ひずみゲージ（ゲージ長1 mm）を貼り、ひずみを測定した。ひずみゲージは、子午線方向ひずみが最大となる凹側アール部中央に貼布した（下図参照）。



(2) 変 位

ダイヤルゲージにより測定した。

(3) 繰返し数

試験機に組込まれているサイクルカウンターにより測定した。

き裂発生は、カラーチェックにより確認した。1回目のカラーチェックは、EJMAの予想破損回数の $1/2$ で行ない以後き裂発生までは予想破損回数の $1/10$ ピッチで行なった。貫通は浸透液のしみ出しにより確認した。（内側に塗布し外側で確認）、破断は目視により確認した。

2.5 試験結果

疲労試験結果を Table 2.4 ～Table 2.8 に示す。

Fig. 2.3 は、破損繰返し数と負荷変位の関係を示している。図中には、EJMAスタンダード¹⁾による 42^B ペローズの疲労曲線及び板厚2 mm、 42^B ペローズの疲労試験データ⁴⁾を併記している。1山試験の結果は、EJMAスタンダードの評価に比べて長寿命側であるが、よい対応を示している。

Fig. 2.4 は、子午線方向ひずみレンジ実測値と貫通までの繰返し数の関係を示している。2本の参照曲線²⁾は、化学成分、熱処理条件の若干異なる丸棒の疲労強度データである（詳細は下表参照）。試験データは、板厚の違いにかかわらず、ほぼ2本の曲線の間分布し、ばらつきも少ない。

比較した材料データの特性等²⁾

番号	材料名 (規格)	化学成分 %	素材寸法, 製造履歴	熱処理, 採取条件	機械的性質, 物性値 kgf/mm ² , %, J/°C	荷重の種類	試験装置 (形式, 容量)	試験片形状 mm, 表面仕上	試験条件
3-5	SUS 316B	C 0.075 Cu 0.18 Si 0.77 Ti 0.040 Mn 1.49 Al 0.002 P 0.03 B 0.0009 S 0.009 N 0.026 Ni 10.02 Nb+Ta Cr 16.45 0.098 Mo 2.09	φ22 丸棒	1075°C, 30min 溶体化処理 1100°C, 7h 溶体化処理	σ_s 23.2 δ 66 σ_B 59.5 φ 79	軸力 ひずみ制御 $R_r = 1$	油圧サーボ ±5t 差動変圧器(軸ひずみ)	φ6 平滑 平行部 15 #600 エメリー仕上	室温 大気中 三角波 $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-3} s^{-1}$ $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-4} s^{-1}$
3-6	SUS 316B	C 0.081 Cu 0.088 Si 0.52 Ti 0.033 Mn 1.60 Al 0.002 P 0.027 B 0.0003 S 0.006 N 0.040 Ni 10.15 Nb+Ta Cr 19.73 0.032 Mo 2.18	"	1050°C 溶体化処理	σ_s 23.2 δ 67 σ_B 67.8 φ 81	"	"	"	室温 大気中 三角波 $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-3} s^{-1}$ $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-4} s^{-1}$

Table 2.9～Table 2.13 は、試験後のき裂の外観と破面を示しているが、内外表面から進展したき裂が合体するラインが観察できる。Table 2.9, Table 2.11, Table 2.12, 及びTable 2.13のき裂及び破面は、類似しており、凹凸の顕著なものとなっている。一方, Table 2.10の試験片は、他に比べてき裂は直線状であり、破面の凹凸も少ない。この原因は、ベローズ製造時に生じた谷部外面周方向圧痕であると考えられる。⁵⁾

Table 2.1 Test Condition

材 料	板 厚 (mm)	負荷変位(± mm)	試 験 片 数	繰返し速度(CPM)
SUS 316 ヒート番号 N47594	1.5	10.0	2	21
		7.0	2	42
		6.0	2	42
		4.5	2	63
SUS 316 ヒート番号 4N5730D	2.0	7.0	2	21
		5.0	2	42
		4.0	2	42
		3.0	2	63
SUS 316 ヒート番号 N39150	2.0	7.0	2	21
		5.0	2	42
		4.0	2	42
		3.0	2	63
SUS 316 ヒート番号 5N6216G	2.0	7.0	2	21
		5.0	2	42
		3.5	2	42
SUS 316 ヒート番号 4N5340A	3.0	4.5	2	21
		3.5	2	42
		2.5	2	42
		2.0	2	63
試 験 数	合 計 38 本			

Table 2.2 Material Properties of SUS 316 Sheets

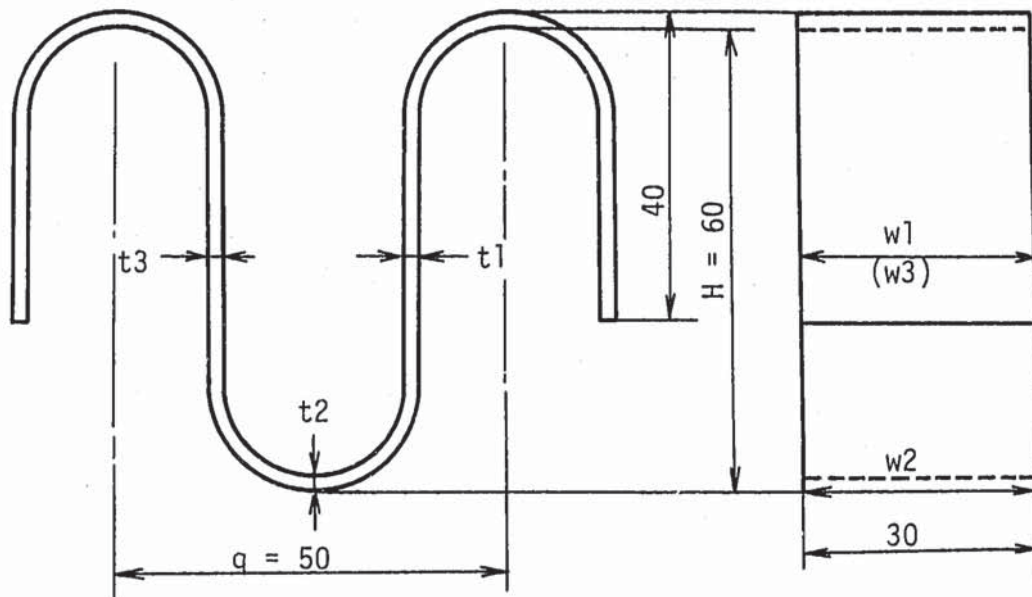
(1) 化学成分

ヒート番号	(mm) 板厚	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
N47594	1.5	0.06	0.60	1.70	0.026	0.007	10.93	16.99	2.21
4N5730D	2.0	0.04	0.75	0.97	0.032	0.006	10.21	16.96	2.15
N39150	2.0	0.05	0.76	1.72	0.028	0.004	10.90	16.92	2.16
5N6216G	2.0	0.05	0.88	0.97	0.033	0.009	10.32	17.07	2.18
4N5340A	3.0	0.04	0.77	0.97	0.026	0.004	11.23	17.01	2.62

(2) 機械試験結果（熱処理後）

ヒート番号	(mm) 板厚	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (HV)
N47594	1.5	22.7	57.7	60.0	195
4N5730D	2.0	24.4	64.9	82.1	-
N39150	2.0	21.1	56.5	63.0	193
5N6216G	2.0	-	-	-	-
4N5340A	3.0	-	-	-	-

Table 2.3 Measured Thickness and Width of Test Pieces



(mm)

測定位置 試験片No.	幅			板厚			測定位置 試験片No.	幅			板厚		
	w1	w2	w3	t1	t2	t3		w1	w2	w3	t1	t2	t3
1-1	30.6	30.7	30.5	1.49	1.61	1.50	10-2	31.9	32.3	31.7	1.84	1.89	1.84
1-2	30.1	30.2	30.2	1.50	1.58	1.50	11-1	31.9	32.0	31.7	1.85	1.88	1.86
2-1	30.0	30.4	30.0	1.49	1.61	1.52	11-2	32.2	32.0	31.9	1.86	1.87	1.86
2-2	30.0	30.5	30.4	1.51	1.60	1.50	12-1	31.6	31.5	31.7	1.85	1.88	1.86
3-1	32.0	32.4	32.0	1.51	1.61	1.50	12-2	32.0	32.0	32.0	1.86	1.87	1.84
3-2	31.9	32.4	31.8	1.50	1.61	1.52	13-1	31.0	31.2	30.9	2.94	2.98	2.93
4-1	32.0	33.0	32.3	1.50	1.60	1.51	13-2	30.5	30.6	30.3	2.93	2.98	2.93
4-2	31.4	32.9	32.4	1.51	1.62	1.51	14-1	31.0	30.7	30.5	2.93	2.99	2.93
5-1	32.0	31.6	31.6	2.05	2.10	2.06	14-2	31.0	30.7	30.6	2.93	2.99	2.94
5-2	31.8	31.3	31.8	2.05	2.09	2.05	15-1	30.3	30.5	30.4	2.93	2.99	2.93
6-1	31.4	31.9	31.4	2.06	2.09	2.05	15-2	30.6	30.4	30.6	2.93	2.99	2.93
6-2	31.9	31.4	31.7	2.06	2.09	2.06	16-1	31.0	30.7	31.2	2.93	3.00	2.94
7-1	32.0	31.8	32.0	2.04	2.07	2.04	16-2	30.5	30.8	30.3	2.95	2.96	2.93
7-2	31.8	31.3	31.7	2.03	2.08	2.04	17-1	30.8	31.2	30.6	1.89	1.90	1.89
8-1	32.0	32.0	31.7	2.03	2.08	2.03	17-2	30.6	30.1	30.4	1.88	1.89	1.89
8-2	31.7	31.3	32.0	2.04	2.10	2.03	18-1	31.4	31.2	31.3	1.91	1.92	1.89
9-1	32.1	32.2	31.9	1.86	1.89	1.87	18-2	30.1	31.1	30.9	1.90	1.91	1.89
9-2	31.4	30.9	31.0	1.86	1.87	1.85	19-1	30.9	31.8	31.2	1.89	1.92	1.89
10-1	31.2	31.5	31.3	1.85	1.89	1.87	19-2	30.7	30.9	31.0	1.88	1.91	1.87

Table 2.4 Fatigue Test Results (1.5t)

Test No.	Disp. (mm)	Specimen No.	Strain Range (%)	Number of cycles to failure		
				Surface crack initiation	Crack propagation through thickness	Break into two pieces
1	19.92	1 - 1	0.96	5700 ~ 6200	9750	10550
		1 - 2	0.98	5700 ~ 6200	9730	10430
2	13.46	2 - 1	0.65	19000 ~ 21000	32040	32840
		2 - 2	0.64	19000 ~ 21000	30580	33090
3	11.52	3 - 1	0.52	41000 ~ 43570	61000	65430
		3 - 2	0.53	41000 ~ 43570	59770	60920
4	8.33	4 - 1	0.31	190000 ~ 196000	197060	206250
		4 - 2	0.31	196000 ~ 210180	210420	216850

Table 2.5 Fatigue Test Results (2.0t) (1/3)

Test No.	Disp. (mm)	Specimen No.	Strain Range (%)	Number of cycles to failure		
				Surface crack initiation	Crack propagation through thickness	Break into two pieces
5	13.88	5 - 1	1.10	2650 ~ 2950	4600	4980
		5 - 2	1.02	2650 ~ 2950	5640	5710
6	9.69	6 - 1	0.69	18000 ~ 20000	25360	25540
		6 - 2	0.72	8000 ~ 10000	14420	14620
7	7.52	7 - 1	0.50	27500 ~ 32500	35500	35890
		7 - 2	0.56	27500 ~ 32500	36220	36450
8	5.51	8 - 1	0.29	185000 ~ 191270	193000	194810
		8 - 2	0.32	185000 ~ 191270	227970	229720

Table 2.6 Fatigue Test Results (2.0t) (2/3)

Test No.	Disp. (mm)	Specimen No.	Strain Range (%)	Number of cycles to failure		
				Surface crack initiation	Crack propagation through thickness	Break into two pieces
9	13.86	9 - 1	0.85	8650 ~ 9150	15000	15700
		9 - 2	0.85	8650 ~ 9150	15920	16350
10	9.69	10 - 1	0.59	24000 ~ 25000	37540	38770
		10 - 2	0.59	24000 ~ 25000	33220	34160
11	7.40	11 - 1	0.43	102500 ~ 104500	106120	110160
		11 - 2	0.41	102500 ~ 104500	111400	113260
12	5.58	12 - 1	0.30	185000 ~ 215000	270510	286320
		12 - 2	0.28	185000 ~ 215000	281920	321530

Table 2.7 Fatigue Test Results (3.0t)

Test No.	Disp. (mm)	Specimen No.	Strain Range (%)	Number of cycles to failure		
				Surface crack initiation	Crack propagation through thickness	Break into two pieces
13	8.91	13 - 1	0.85	2900 ~ 3400	10070	10170
		13 - 2	0.80	4900 ~ 5400	10210	10320
14	6.74	14 - 1	0.60	12500 ~ 13500	19000	19670
		14 - 2	0.58	18500 ~ 19500	28500	30740
14	4.38	15 - 1	0.31	85000 ~ 91000	126770	134180
		15 - 2	0.33	85000 ~ 91000	157980	162290
16	3.61	16 - 1	0.25	570000 ~ 589970	756370	786370
		16 - 2	0.24	550000 ~ 570000	589700	605710

Table 2.8 Fatigue Test Results (2.0t) (3/3)

Test No.	Disp. (mm)	Specimen No.	Strain Range (%)	Number of cycles to failure		
				Surface crack initiation	Crack propagation through thickness	Break into two pieces
17	14.10	17 - 1	0.91	5000 ~ 5500	8882	9012
		17 - 2	0.92	4500 ~ 5000	9391	9632
18	9.72	18 - 1	0.62	18000 ~ 19000	28654	29289
		18 - 2	0.60	18000 ~ 19000	28342	28984
19	6.46	19 - 1	0.36	120000 ~ 130220	162700	164610
		19 - 2	0.34	120000 ~ 130220	175900	178070

Table 2.9 The View of final crack and fracture surface (1.5t)

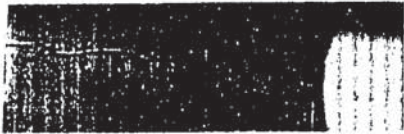
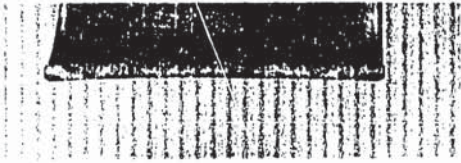
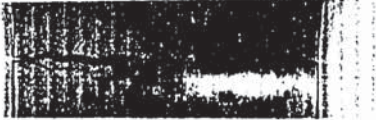
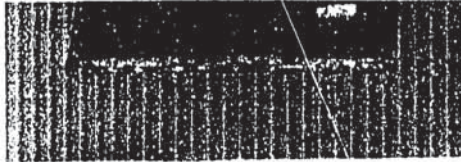
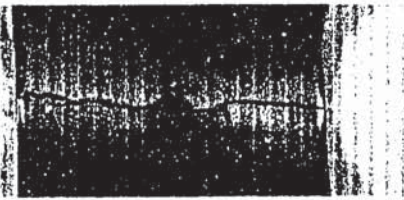
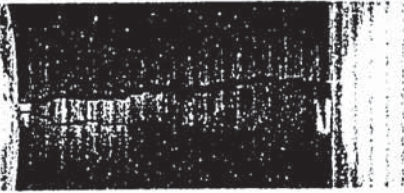
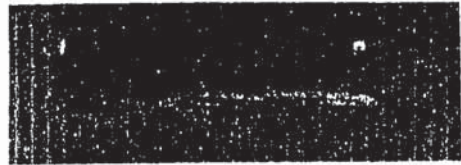
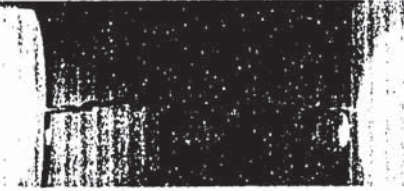
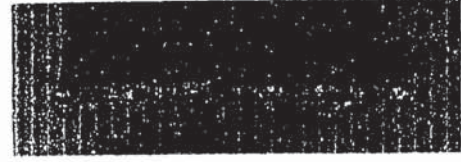
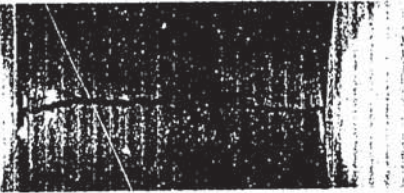
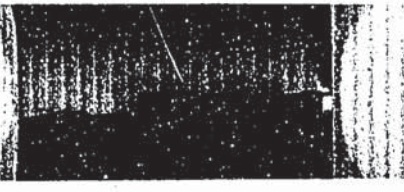
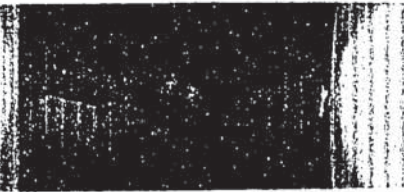
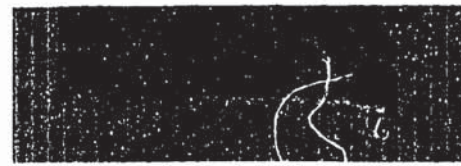
試験片No.	ひずみ範囲 (%)	試験片き裂外観	試験片破面状況
1-1	0.96		
1-2	0.98		
2-1	0.65		
2-2	0.64		
3-1	0.52		
3-2	0.53		
4-1	0.31		
4-2	0.31		

Table 2.10 The View of final crack and fracture surface (2.0t)

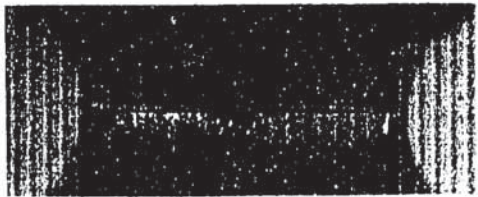
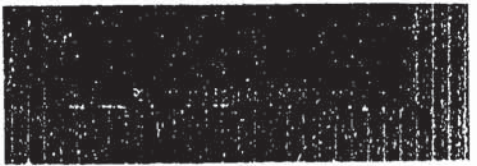
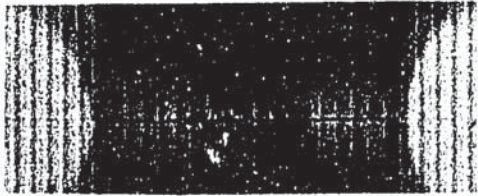
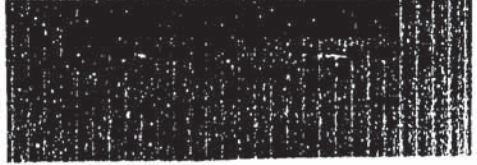
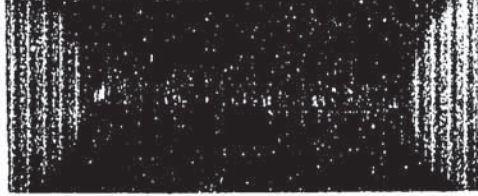
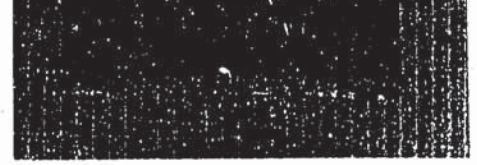
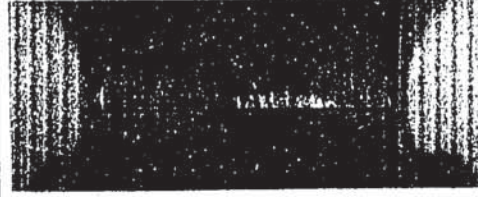
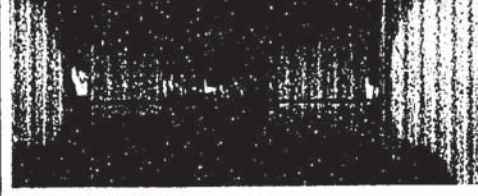
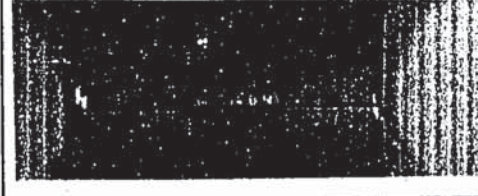
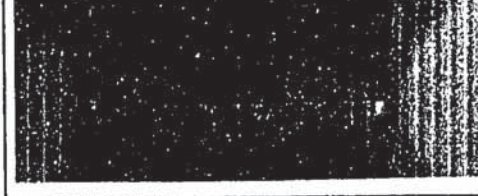
試験片No.	ひずみ範囲 (%)	試験片き裂外観	試験片破面状況
5-1	1.10		
5-2	1.02		
6-1	0.69		
6-2	0.72		
7-1	0.50		
7-2	0.56		
8-1	0.29		
8-2	0.32		

Table 2.11 The View of final crack and fracture surface (2.0 t)

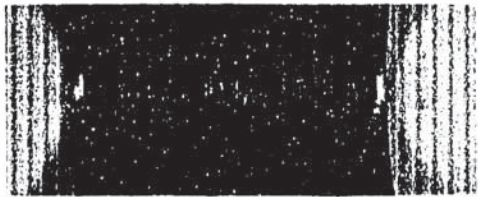
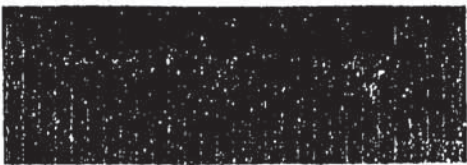
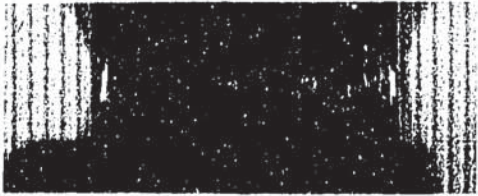
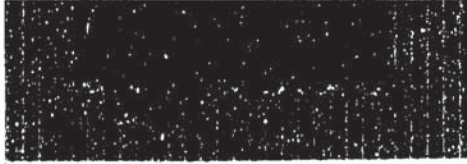
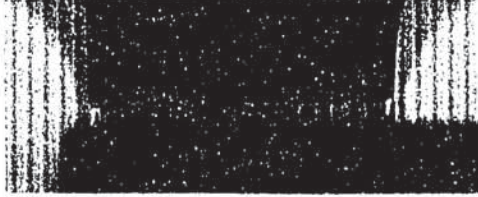
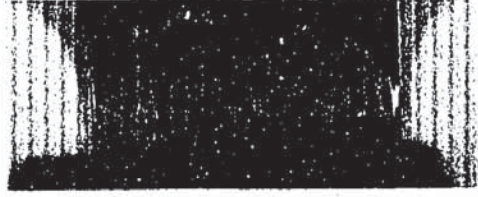
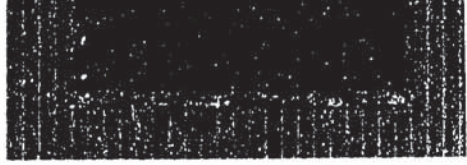
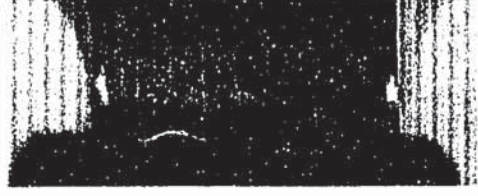
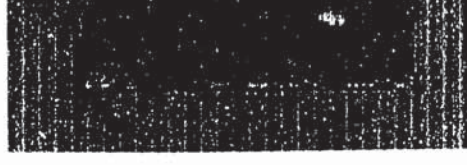
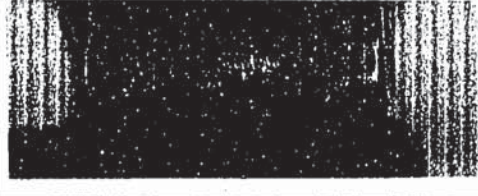
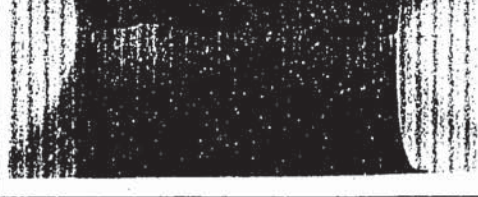
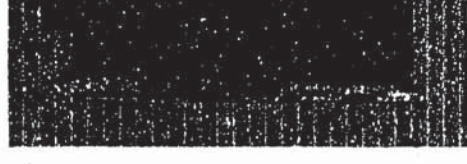
試験片No.	ひずみ範囲 (%)	試験片き裂外観	試験片破面状況
9-1	0.85		
9-2	0.85		
10-1	0.59		
10-2	0.59		
11-1	0.43		
11-2	0.41		
12-1	0.30		
12-2	0.28		

Table 2.12 The View of final crack and fracture surface (3.0t)

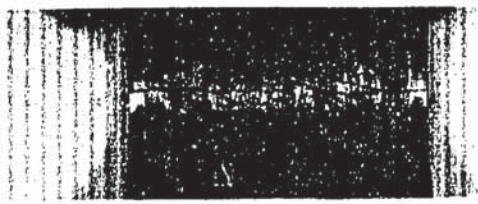
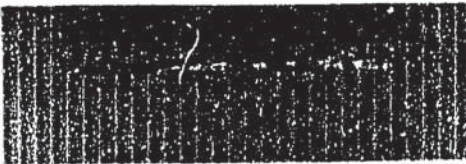
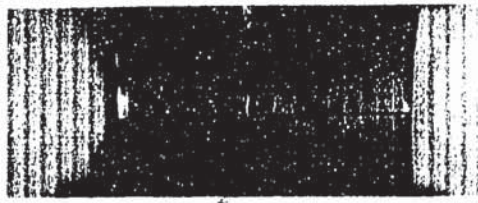
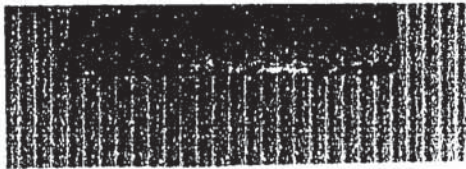
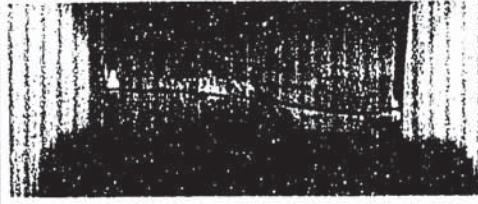
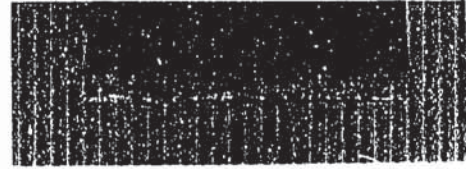
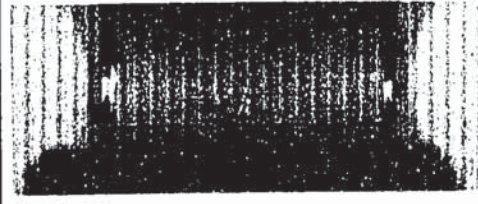
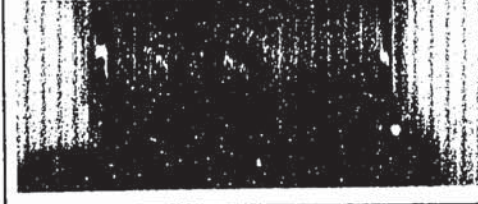
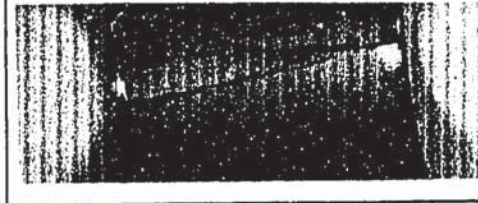
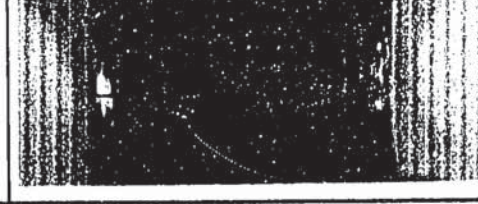
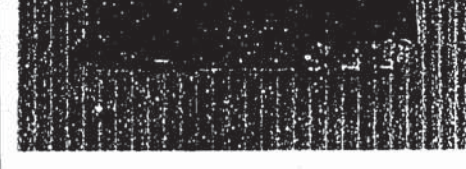
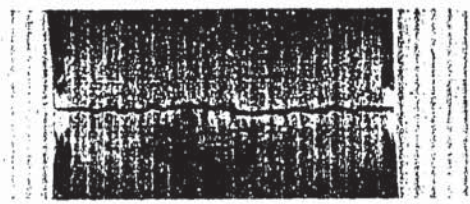
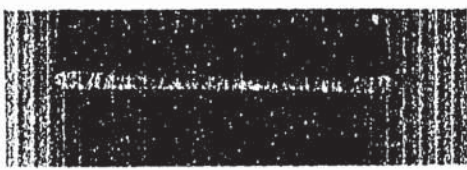
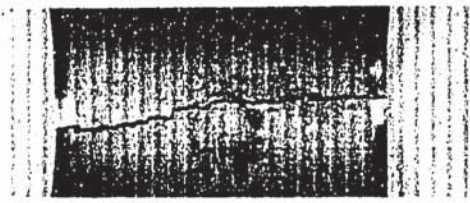
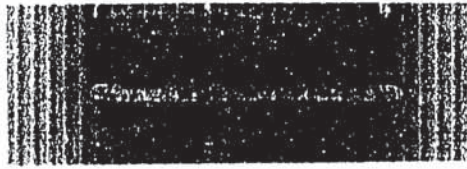
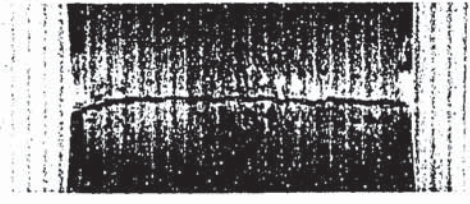
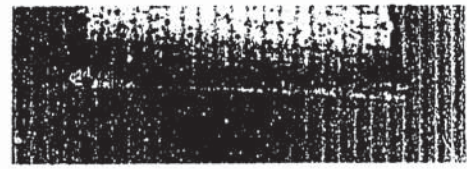
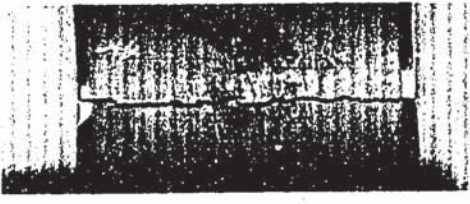
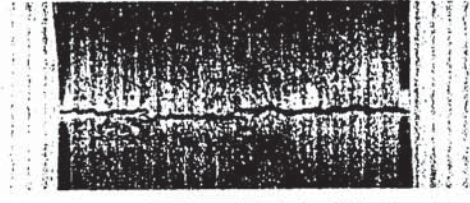
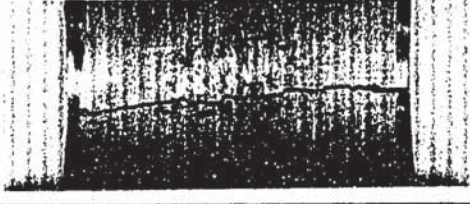
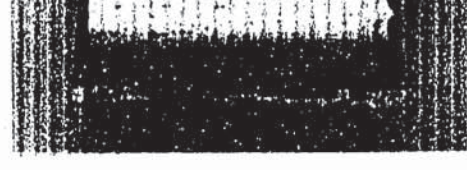
試験片No.	ひずみ範囲 (%)	試験片き裂外観	試験片破面状況
13-1	0.85		
13-2	0.80		
14-1	0.60		
14-2	0.58		
15-1	0.31		
15-2	0.33		
16-1	0.25		
16-2	0.24		

Table 2.13 The View of final crack and fracture surface (2.0 t)

試験片No.	ひずみ範囲 (%)	試験片き裂外観	試験片破面状況
17-1	0.91		
17-2	0.92		
18-1	0.62		
18-2	0.60		
19-1	0.36		
19-2	0.34		

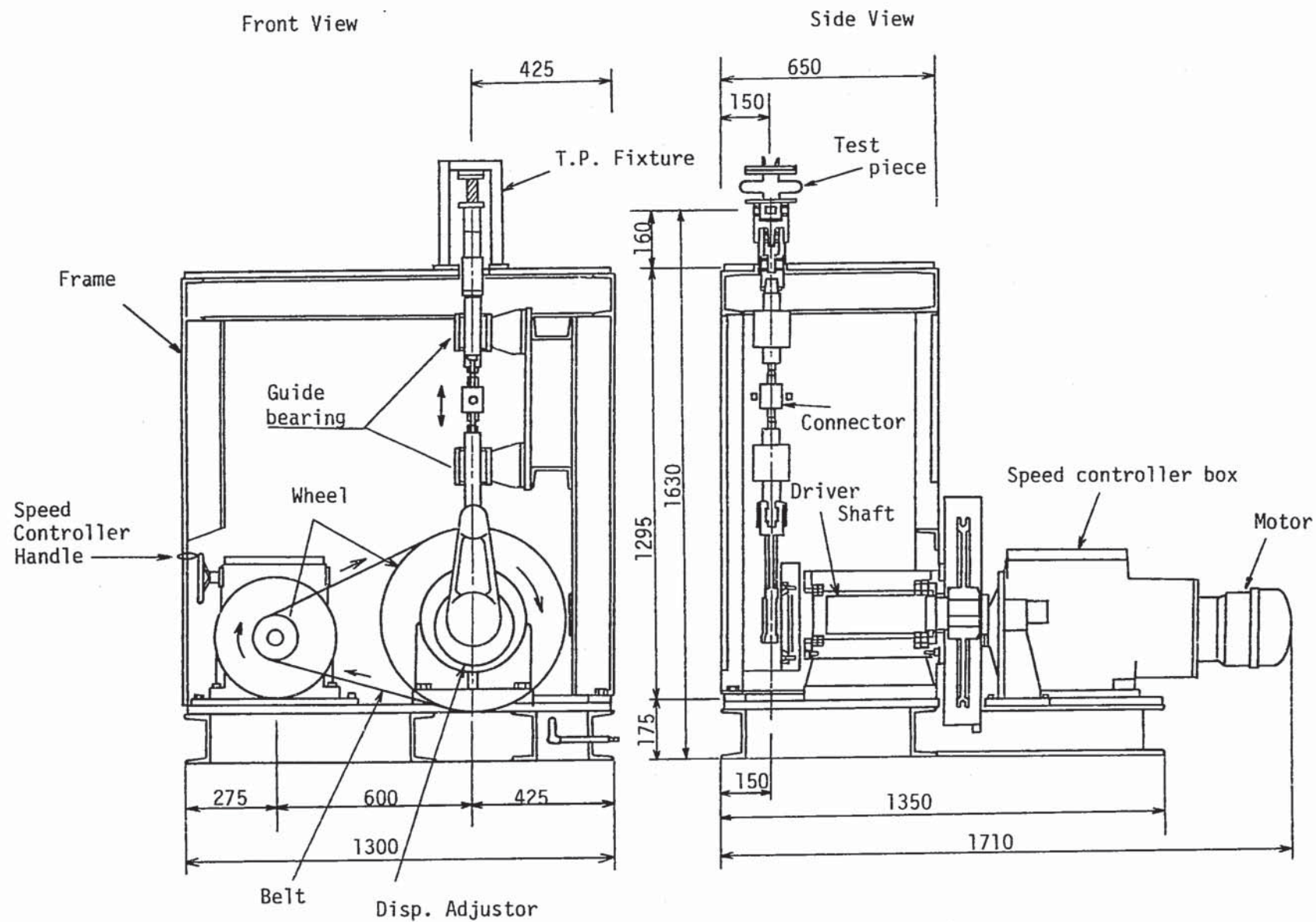


Fig. 2.1 Structure of Test Rig

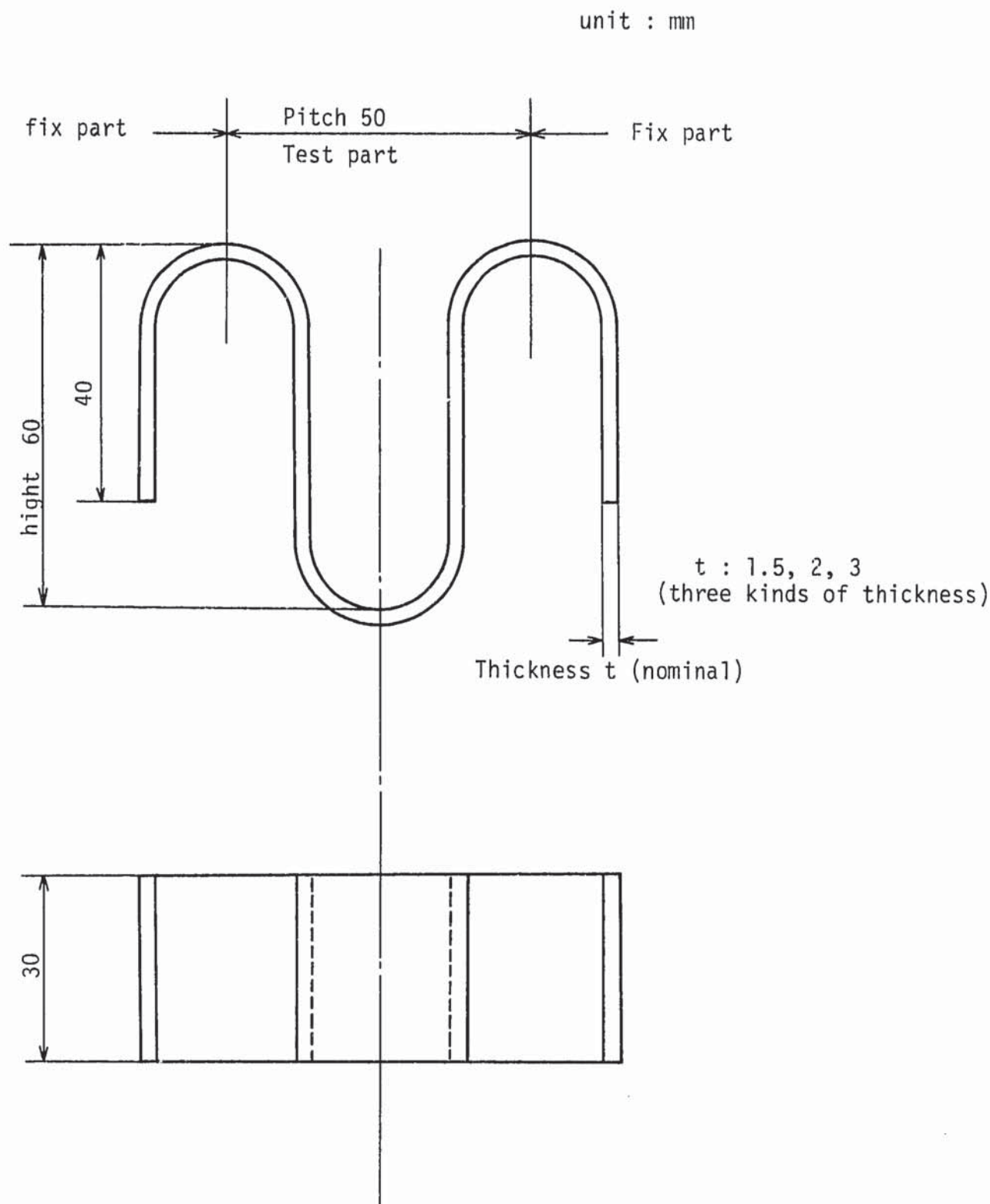
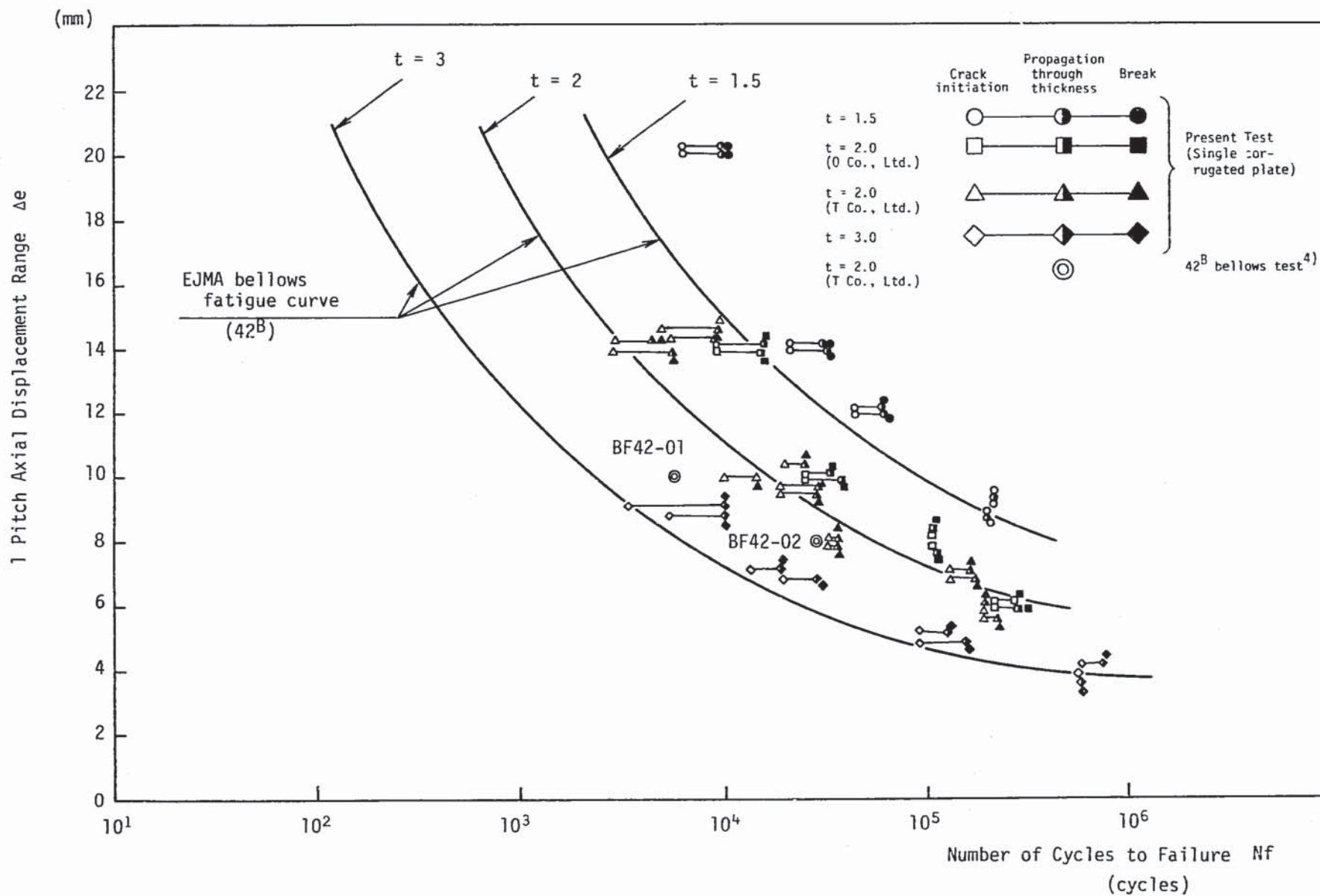


Fig. 2.2 Shape and Dimension of Test Peaces

Fig. 2.3 Fatigue Life (N_f vs Δe)

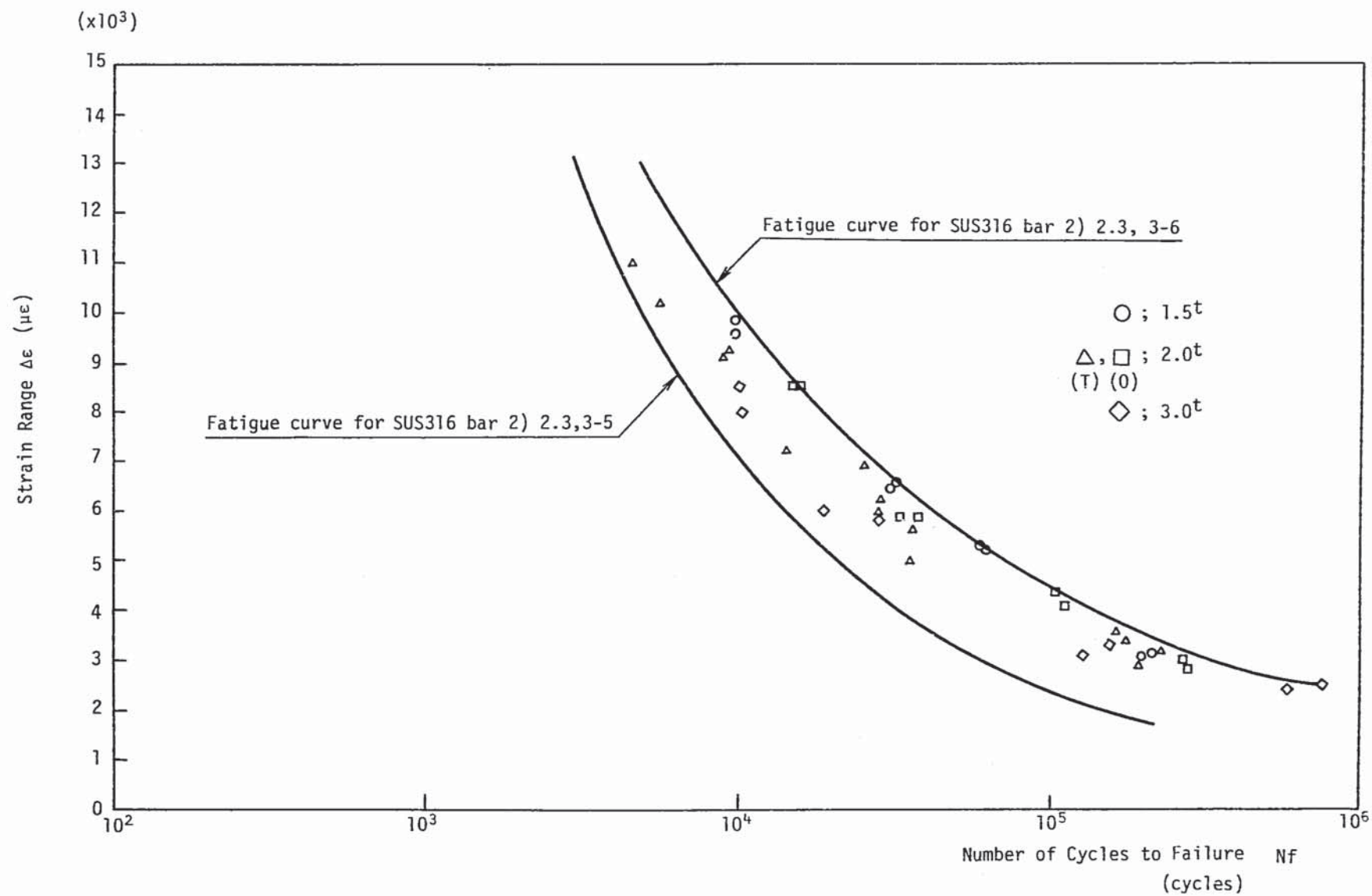
Fig. 2.4 Fatigue Life (N_f vs $\Delta\epsilon$)

Photo.2.1 Overview of Fatigue Test Rig

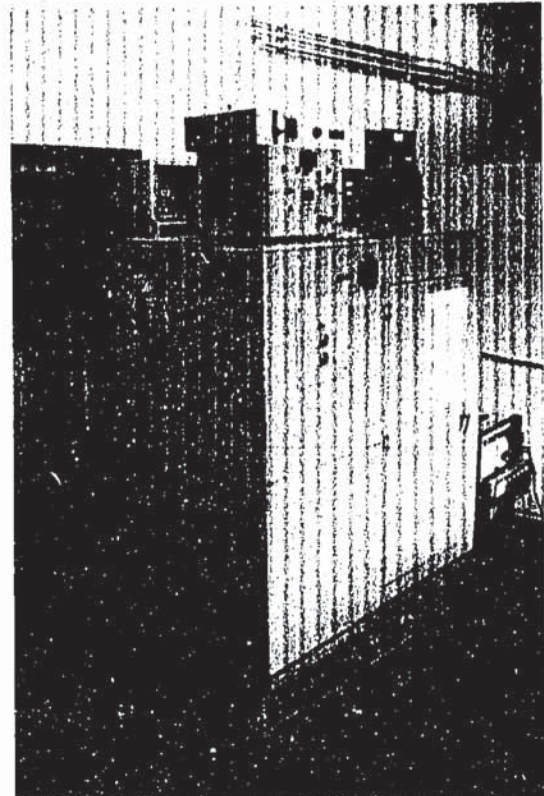
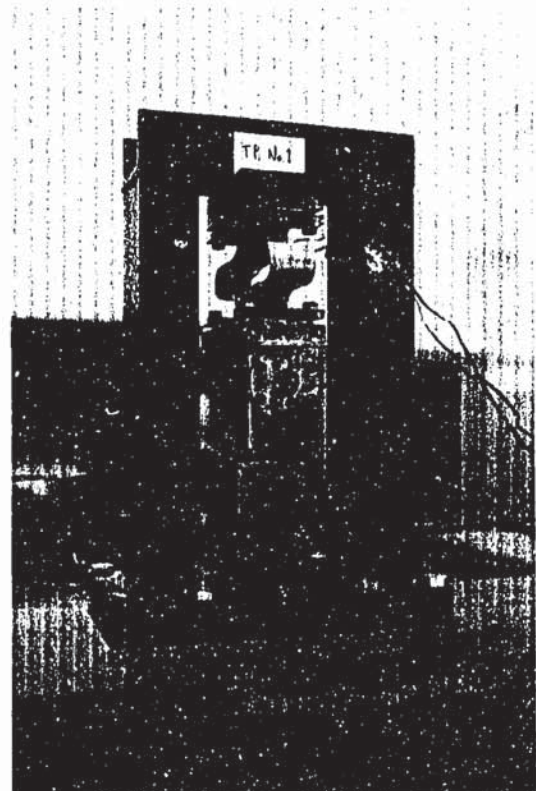


Photo.2.2 Test Piece Fixture and Mounted T.P.



3 解 析

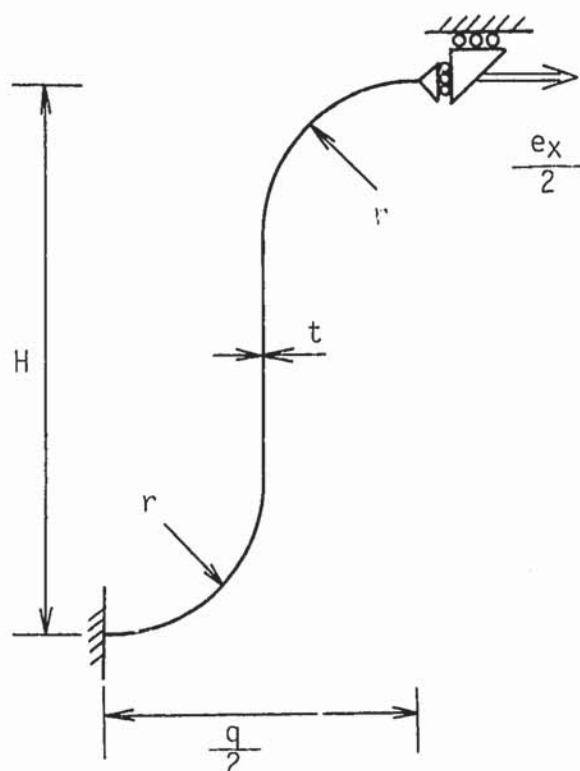
3.1 概 要

試験結果を評価するために、理論解析及びFEMによる数値解析を実施した。理論解析としては、薄肉曲がり梁理論により、負荷変位と反力、ひずみの関係式を求めている。更にこれらの式をEJMA式と比較することにより、波板とペローズコンボリューションとの対応を評価している。

数値解析としては、梁要素及び3次元シェル要素、又、ペローズコンボリューションとの比較のために軸対称シェル要素による解析を実施している。また、これらは、非弾性（塑性）ひずみの累積を評価するために、それぞれ弾性及び弾塑性両方で解析している。他に試験との対応から、板厚分布を考慮した解析も実施している。

3.2 弾性理論解析

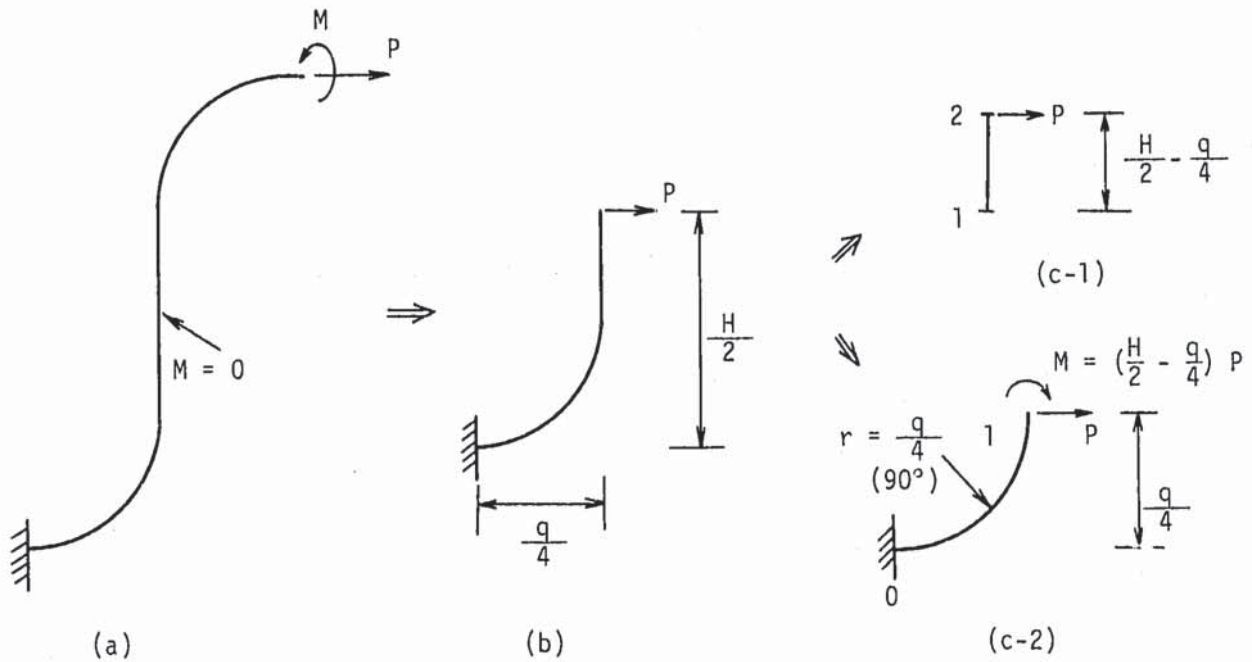
(1) 形状、寸法



山 高： H
 ピ ッ チ： q
 板 厚： t (一定)
 山谷のアール： $r = \frac{q}{4}$
 幅： 1 (単位幅)
 1 山 変 位： e_x

(2) たわみ及びたわみ角の算出

形状及び境界条件の対称性から、中央でのモーメントは零となり（下図(a)），下図(b)に示すコンボリューションの $\frac{1}{4}$ を考えればよい。これは、さらに下図(c)のように分解される。



上図で P は荷重、 M はモーメントである。また、 $\frac{1}{4}$ 円弧の両端を 0, 1, 直線部の両端を 1, 2 とし、以下、各位置の変数にはこれらの添字を付する。

曲がりはりの理論に従い、1 における変位及び回転角、 U_1 , θ_1 は、

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{P}{EI} \left\{ \left(\frac{q}{4} \right)^2 \left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right) + \frac{\pi}{4} \left(\frac{q}{4} \right)^3 \right\} \\ &= \frac{Pq^2}{16EI} \left\{ \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{Pq}{4EI} \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right) + \frac{q}{4} \right\} \\ &= \frac{Pq}{4EI} \left\{ \frac{\pi H}{4} + \frac{q}{4} \left(1 - \frac{\pi}{2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3-2)$$

上式において、 E は縦弾性係数、 I は断面 2 次モーメントである。

2 における変位 u_2 は、 u_1 , θ_1 を考慮して、

$$\begin{aligned} u_2 &= \left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right) \theta_1 + \frac{P}{3EI} \left(\frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right)^3 + u_1 \\ &= \frac{PH^3}{24EI} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} \end{aligned} \quad (3-3)$$

式(3-3)より, 1山当りの変位 e_x は,

$$e_x = 4u_2 = \frac{PH^3}{6EI} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{q}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} \quad (3-4)$$

さらに, 単位幅短形断面の場合,

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (3-5)$$

を考慮すると,

$$e_x = \frac{2PH^3}{Et^3} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{q}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} \quad (3-6)$$

(3) 応力の算出³⁾

軸力 P と曲げモーメント M による最大応力発生位置は, 山頂と谷底である。しかしながら, 曲がりはりの理論により, 曲げモーメントによる応力は線形に分布しない。軸力 P と曲げモーメント M によって発生応力 σ_o^m , σ_o^b はそれぞれ,

$$\sigma_o^m = \frac{P}{t} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_o^b &= \frac{4M}{qt} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{2t}{q-2t} - 1 \right) \\ &= \frac{2H}{qt} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{2t}{q-2t} - 1 \right) P \quad (M = \frac{H}{2} P) \end{aligned} \quad (3-8)$$

上式で κ は曲がりはりの断面係数で短形断面の場合次式で表わされる。

$$\kappa = -1 + \frac{q}{4t} \ln \frac{q+2t}{q-2t} \quad (3-9)$$

式(3-6)を用いると,

$$\sigma_o^m = \frac{Et^2}{2H^3} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{9\pi}{4} - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} e_x \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_o^b &= \frac{Et^2}{2H^2} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{2t}{q-2t} - 1 \right) \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{8} \left(\frac{9\pi}{4} - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} e_x \end{aligned} \quad (3-11)$$

ここで, $\frac{t}{q} \ll 1$ とすると,

$$\kappa \doteq \frac{4t^2}{3q^2} \quad (3-12)$$

従って、式(3-11)は、

$$\begin{aligned} \sigma_o^b = \frac{3Et}{2H^2} \left(1 + \frac{4t}{3q} \right) / \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} e_x \end{aligned} \quad (3-13)$$

更に、 $\frac{t}{q} \approx 0$ とすると、真直ばりの解に一致して、

$$\sigma_o^m = \frac{P}{t} \quad (3-14)$$

$$\begin{aligned} \sigma_o^b &= \frac{6M}{t^2} \\ &= \frac{3H}{t^2} P \quad \left(M = \frac{H}{2} P \right) \end{aligned} \quad (3-15)$$

式(3-10)と式(3-13)からひずみと評価する場合薄肉で相対的に幅が広いことを考慮して、幅方向のひずみ及び板厚方向の応力を零として、次式で表わされる E^* で除するべきであろう。

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (\nu \text{ はポアソン比}) \quad (3-16)$$

即ち、

$$\varepsilon_m = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_o^m$$

$$\varepsilon_b = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_o^b$$

(4) ばね定数

ベローズのばね定数と比較するために、ピッチ径の周長と同じ幅の波板を考えると、全荷重 F と単位幅の荷重 P との関係は、

$$F = \pi d_p P \quad (3-17)$$

式(3-6)は、

$$e_x = \frac{2H^3 F}{\pi E d_p t^3} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} \quad (3-18)$$

従って、1山当りのばね定数 k は、

$$k = \frac{\pi E d_p t_p^3}{2 H^3} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \right\} \quad (3-19)$$

なお、(3)と同じ理由で、幅方向のひずみを零とするなら、 E の代りに E^* （式（3-16））を用いるべきであろう。

(5) 簡易評価式（EJMAスタンダード）との比較

ベローズの応力、ばね定数の評価式として、EJMAスタンダードの式があるが、これと上述の波板の式との比較を行う。EJMAスタンダードの式を以下に示す。但し、記号は、本資料に合せ、添字“EJ”を付す。

$$\sigma_{EJ}^m = \frac{E t_p^2 e_x}{2 H^3 C_f} \quad (3-20)$$

$$\sigma_{EJ}^b = \frac{5 E t_p e_x}{3 H^2 C_d} \quad (3-21)$$

$$k_{EJ} = 1.7 \frac{d_p E t_p^3}{H^3 C_f} \quad (3-22)$$

上式において、 C_f 、 C_d は、パラメータ $\frac{q}{2H}$ 、 $\frac{q}{2.2\sqrt{d_p t_p}}$ によって定まる係数。 t_p は加工による減肉を考慮した板厚で、 $t_p = t \sqrt{\frac{d}{d_p}}$ （ d は谷外径）である。

ここで、簡単のため、式（3-10）、（3-13）及び式（3-19）の分母を次の様に置く。

$$C_o = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{q}{H} - \frac{3}{4} (\pi - 3) \left(\frac{q}{H} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{9}{4} \pi - 7 \right) \left(\frac{q}{H} \right)^3 \quad (3-23)$$

EJMAスタンダードには、ポアソン比 ν が陽に含まれていないので、とりあえず E を用いることとし、また、1山試験片はコンボリューションから切り出すのでベローズと同様の減肉があるものと考えて、

$$t_p \approx t \quad (3-24)$$

として扱うと、両者のひずみ、ばね定数の比は、

$$\alpha_m = \frac{\sigma_{EJ}^m / E}{\sigma_o^m / E^*} = \frac{C_o}{C_f} \quad (3-25)$$

$$\alpha_b = \frac{\sigma_{EJ}^b / E}{\sigma_o^b / E^*} = \frac{10 C_o}{9 C_d} \times \frac{1}{1 + \frac{4t}{3q}} \begin{cases} (t = 1.5) 1.07 \frac{C_o}{C_d} & (3-26a) \\ (t = 2.0) 1.05 \frac{C_o}{C_d} & (3-26b) \\ (t = 3.0) 1.03 \frac{C_o}{C_d} & (3-26c) \end{cases}$$

$$\beta = \frac{k_{EI}}{k} = \frac{3.4 C_o}{\pi C_f} = 1.08 \frac{C_o}{C_f} \quad (3-27)$$

$\frac{q}{2H}$, $\frac{q}{2.2 \sqrt{d_p t_p}}$ をパラメータとする α_m , α_b , β の値を Table 3.1 ~ Table 3.5 に, 又

$\frac{q}{2.2 \sqrt{d_p t_p}}$ をパラメータとする α_m , α_b , β の変化を Fig. 3.1 ~ Fig. 3.5 に示す。

(6) 波板 (1 山) 試験データの扱い

以上, 論じてきた事を考慮すれば, 1 山試験データからベローズの挙動を推測することはある程度可能と思われる。

しかしながら, 今まで述べて来た事は弾性微小変位理論の範囲であり, 非弾性領域について論じるには, 非弾性解析により両者の差異を確認する必要がある。

3.3 数値解析

(1) 使用プログラム

汎用非線形構造解析システム (FINAS) V. 9.1

(2) 使用要素

解析モデルの形状を Fig. 3.6 に示す。他に参考のため, コンボリュージョン半山の解析も行う (Fig. 3.7)

ベローズ 1 山モデル (波板試験片)

- 4 節点四辺形板曲げ低減積分要素 (QFLA 4 R)
- 3 次元短形断面梁要素 (BEAM 2)

ベローズコンボリュージョン

- 2 節点円錐台シェル要素 (CONIC 2)

(3) 解析パラメータ

ベローズ板厚をパラメータとして弾性微小変形解析, 弾性大変形解析, 弾塑性大変形解析を実施した。

板厚は, 次の 3 種である。

$$t = 1.5, 2.0, 3.0 \text{ (mm)}$$

(4) 解析モデル

ベローズ 1 山モデル (波板試験片)

- QFLA 4 R : 30 要素 (Fig. 3.8(a))
- BEAM 2 : 30 要素 (Fig. 3.8(b))
- 境界条件 : Fig. 3.10

ベローズコンボリユーション

◦ CONIC 2 : 30 要素 (Fig. 3.9)

◦ 境界条件 : Fig. 3.11

(5) 繰返し弾塑性応力 - ひずみ関係式 6)

解析に用いた多直線近似式を Table 3.6 に示す。但し、これは、試験材料と同一ロットではない。

(6) 解析結果

解析結果を Table 3.7 に示す。ひずみを出力した積分点を、下記の表と図に示す。(Fig. 3.12 参照) ひずみ値は、最大ひずみとした。CONIC 2 のみ内表面の積分点となった。

要素	要素番号	積分点番号
QFLA 4 R	291	45
BEAM 2	30	103
CONIC 2	1	1

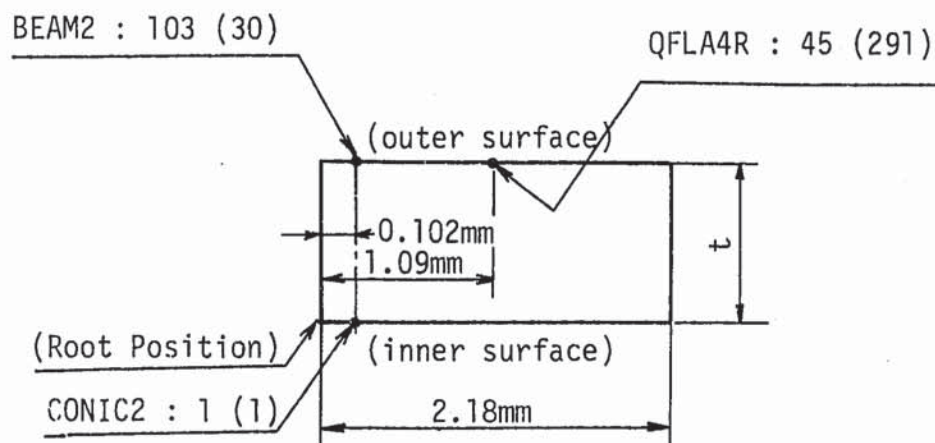


Table 3.7において全ひずみ範囲でみると、梁理論と BEAM 2, QFLA 4 R の弾性解析結果はほぼ一致している。

Fig. 3.13 ~ Fig. 3.15 に QFLA 4 R と BEAM 2 の弾塑性解析結果に試験データをオーバープロットしているが 2t の (T 社) の試験結果が解析より高くなっている。Table 2.3 試験片寸法測定結果から、ひずみが高くでている試験片板厚 (T. P. No 5 - 1 ~ 8 - 2) は公称値より厚い事が判る。

又、各板厚共、高ひずみレベルでは解析結果と比較的良く合っているが、低ひずみレベルでの試験結果は解析値より低い。これは、ベローズから切出した試験片では、加工による減肉により、降伏が遅れ、その結果、低ひずみレベル (降伏点近傍) において、一定板厚の解析結果よりも低いひずみになるためと考えられる。

Fig. 3.16 に、加工による板厚の分布を考慮した解析結果を示す。これから板厚分布を考慮すると、試験結果に更に近づくことがわかる。なお、コンポリューションの板厚の分布は、理想的な塑性加工を仮定し、素材板厚を 2 mm として Table 3.8 の数値を用いて計算した。

Table 3.1 Coefficient α_m ($\frac{C_o}{C_f}$)

$\frac{q}{2H}$ $\frac{q}{2.2\sqrt{d_p t_p}}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.2	1.0	0.997	0.989	0.991	1.001	0.994	1.010	1.007	0.992	0.999	1.003
0.4	1.0	1.015	1.036	1.040	1.053	1.066	1.049	1.071	1.016	1.021	1.024
0.6	1.0	1.033	1.069	1.086	1.1031	1.128	1.111	1.107	1.105	1.070	1.071
0.8	1.0	1.061	1.124	1.163	1.201	1.222	1.235	1.259	1.255	1.235	1.240
1.0	1.0	1.122	1.239	1.319	1.397	1.466	1.511	1.549	1.557	1.550	1.550
1.2	1.0	1.179	1.367	1.539	1.689	1.813	1.928	2.034	2.091	2.140	2.181
1.4	1.0	1.228	1.473	1.717	1.977	2.227	2.453	2.650	2.807	2.957	3.100
1.6	1.0	1.255	1.560	1.894	2.251	2.665	3.047	3.472	3.742	4.161	4.363
2.0	1.0	1.326	1.700	2.172	2.747	3.319	4.107	5.035	5.925	6.242	8.124
2.5	1.0	1.357	1.792	2.382	3.117	4.091	5.397	6.945	8.888	11.235	13.859
3.0	1.0	1.373	1.868	2.547	3.449	4.629	6.297	8.757	11.850	16.050	19.633
3.5	1.0	1.389	1.950	2.685	3.602	5.174	6.996	10.600	15.236	20.427	29.450
4.0	1.0	1.406	2.009	2.735	3.770	5.497	7.871	11.189	16.408	24.967	39.267
Co	1.0	1.167	1.326	1.477	1.621	1.759	1.889	2.014	2.133	2.247	2.356

Table 3.2 Coefficient α_b ($1.07 \frac{C_o}{C_d}$) (1.5t)

$\frac{q}{2H}$ $\frac{q}{22\sqrt{d_p t_p}}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.2	1.07	1.115	1.130	1.125	1.130	1.131	1.126	1.120	1.111	1.096	1.084
0.4	1.07	1.105	1.113	1.109	1.116	1.118	1.114	1.108	1.101	1.081	1.076
0.6	1.07	1.058	1.063	1.072	1.075	1.080	1.078	1.081	1.075	1.058	1.054
0.8	1.07	1.067	1.039	1.017	0.995	0.995	0.994	1.006	1.004	1.005	1.011
1.0	1.07	1.105	1.104	1.086	1.049	1.010	0.974	0.940	0.915	0.900	0.910
1.2	1.07	1.157	1.207	1.212	1.200	1.166	1.108	1.039	0.987	0.920	0.860
1.4	1.07	1.200	1.294	1.355	1.372	1.370	1.333	1.271	1.186	1.086	0.972
1.6	1.07	1.236	1.370	1.483	1.555	1.613	1.596	1.554	1.458	1.340	1.203
2.0	1.07	1.274	1.467	1.670	1.852	1.986	2.090	2.139	2.119	2.043	1.873
2.5	1.07	1.300	1.548	1.823	2.073	2.330	2.599	2.806	2.934	3.014	2.873
3.0	1.07	1.329	1.619	1.934	2.261	2.569	2.982	3.324	3.633	3.889	4.013
3.5	1.07	1.343	1.656	2.01	2.386	2.817	3.269	3.792	4.319	4.728	5.159
4.0	1.07	1.357	1.696	2.087	2.561	3.044	3.556	4.237	4.870	5.607	6.020
Co	1.0	1.167	1.326	1.477	1.621	1.759	1.889	2.014	2.133	2.247	2.356

Table 3.3 Coefficient α_b ($1.05 \frac{C_o}{C_d}$) (2.0t)

$\frac{q}{2H}$ $\frac{q}{2.2\sqrt{d_p t_p}}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.2	1.05	1.094	1.109	1.104	1.109	1.110	1.105	1.099	1.090	1.076	1.064
0.4	1.05	1.084	1.092	1.088	1.095	1.097	1.093	1.087	1.080	1.061	1.056
0.6	1.05	1.038	1.043	1.052	1.055	1.060	1.058	1.061	1.055	1.038	1.034
0.8	1.05	1.047	1.020	0.998	0.976	0.976	0.975	0.987	0.985	0.986	0.992
1.0	1.05	1.084	1.083	1.066	1.029	0.991	0.956	0.922	0.898	0.883	0.893
1.2	1.05	1.135	1.184	1.189	1.178	1.144	1.087	1.020	0.969	0.903	0.844
1.4	1.05	1.178	1.270	1.330	1.346	1.344	1.308	1.247	1.164	1.066	0.954
1.6	1.05	1.213	1.344	1.455	1.526	1.583	1.566	1.525	1.431	1.315	1.181
2.0	1.05	1.250	1.440	1.639	1.817	1.949	2.051	2.099	2.079	2.005	1.838
2.5	1.05	1.276	1.519	1.789	2.034	2.286	2.550	2.754	2.879	2.958	2.819
3.0	1.05	1.304	1.589	1.898	2.219	2.521	2.926	3.262	3.565	3.816	3.938
3.5	1.05	1.318	1.625	1.970	2.341	2.764	3.208	3.721	4.238	4.640	5.063
4.0	1.05	1.332	1.664	2.048	2.513	2.987	3.490	4.158	4.779	5.502	5.907
C_o	1.0	1.167	1.326	1.477	1.621	1.759	1.889	2.014	2.133	2.247	2.356

Table 3.4 Coefficient α_b ($1.03 \frac{C_o}{C_d}$) (3.0t)

$\frac{q}{2H}$ $\frac{q}{2.2\sqrt{d_p t_p}}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.2	1.03	1.073	1.088	1.083	1.088	1.089	1.084	1.078	1.069	1.056	1.044
0.4	1.03	1.063	1.071	1.067	1.074	1.076	1.072	1.066	1.059	1.041	1.036
0.6	1.03	1.018	1.023	1.032	1.035	1.040	1.038	1.041	1.035	1.018	1.014
0.8	1.03	1.027	1.000	0.979	0.957	0.957	0.956	0.968	0.966	0.967	0.973
1.0	1.03	1.063	1.062	1.046	1.009	0.972	0.938	0.904	0.881	0.866	0.876
1.2	1.03	1.113	1.161	1.166	1.156	1.122	1.066	1.000	0.951	0.886	0.828
1.4	1.03	1.156	1.246	1.305	1.320	1.318	1.283	1.223	1.142	1.046	0.936
1.6	1.03	1.190	1.318	1.427	1.497	1.553	1.536	1.496	1.404	1.290	1.159
2.0	1.03	1.226	1.413	1.608	1.782	1.912	2.012	2.059	2.039	1.967	1.803
2.5	1.03	1.252	1.490	1.755	1.995	2.242	2.501	2.702	2.824	2.902	2.765
3.0	1.03	1.279	1.559	1.862	2.177	2.473	2.870	3.200	3.497	3.743	3.863
3.5	1.03	1.293	1.594	1.932	2.296	2.711	3.147	3.650	4.157	4.552	4.967
4.0	1.03	1.307	1.632	2.009	2.465	2.930	3.424	4.079	4.688	5.397	5.794
C_o	1.0	1.167	1.326	1.477	1.621	1.759	1.889	2.014	2.133	2.247	2.356

Table 3.5 Coefficient β ($1.08 \frac{C_o}{C_f}$)

$\frac{q}{2H} \sqrt{\frac{q}{2.2\sqrt{d_p t_p}}}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.2	1.08	1.077	1.069	1.071	1.081	1.073	1.091	1.088	1.071	1.079	1.083
0.4	1.08	1.096	1.119	1.123	1.137	1.151	1.133	1.157	1.097	1.103	1.106
0.6	1.08	1.115	1.155	1.173	1.191	1.218	1.200	1.195	1.194	1.156	1.157
0.8	1.08	1.146	1.214	1.256	1.297	1.319	1.333	1.359	1.355	1.333	1.339
1.0	1.08	1.212	1.338	1.424	1.509	1.583	1.632	1.673	1.681	1.674	1.674
1.2	1.08	1.273	1.476	1.662	1.824	1.958	2.082	2.197	2.258	2.311	2.356
1.4	1.08	1.327	1.591	1.855	2.135	2.405	2.650	2.862	3.031	3.193	3.348
1.6	1.08	1.355	1.685	2.045	2.432	2.878	3.291	3.750	4.041	4.494	4.712
2.0	1.08	1.432	1.836	2.346	2.967	3.584	4.435	5.438	6.399	6.741	8.774
2.5	1.08	1.466	1.935	2.573	3.367	4.418	5.829	7.500	9.599	12.134	14.968
3.0	1.08	1.483	2.017	2.750	3.725	4.999	6.800	9.457	12.798	17.334	21.204
3.5	1.08	1.500	2.106	2.900	3.890	5.587	7.556	11.448	16.455	22.061	31.806
4.0	1.08	1.519	2.170	2.954	4.071	5.937	8.501	12.084	17.720	26.964	42.408
C_o	1.0	1.167	1.326	1.477	1.621	1.759	1.889	2.014	2.133	2.247	2.356

Table 3.6 Cyclic stress-strain relation for SUS 316--HP stainless steel plate at R.T.

塑性ひずみ ϵ_p (%)	加工硬化係数 $d\sigma/d\epsilon_p$ (kg/mm ²)
縦弾性係数	$E = 19800 \text{ kg/mm}^2$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
比例限度力	$\sigma_y = 21.0 \text{ kg/mm}^2$
0.0	6885.7
0.14	3200
0.215	3548
0.34	3752
0.465	1931.6
0.75	2136.5

金属材料技術研究所疲れデータシート, No.15 (1979) より

Table 3.7 Strain Values Derived from the Simplified Method, FEM and Test

(mm) 板厚 t	(mm) 変位 △e	山形モデル											ベローズ						
		簡易式			F E M 解析						Test		簡易式			F E M 解析			
		渠理論			QFLA4R			BEAM2			T社 O社		EJMA			CONIC2			
		ε _m	ε _b	ε _t	ε _m	ε _b	ε _t	ε _m	ε _b	ε _t	ε _t	ε _t	ε _m	ε _b	ε _t	ε _m	ε _b	ε _t	
1.5	9.0	27	3460	3487	113	3370	3483	30	3426	3456	—	3120	29	3758	3787	172	3384	3556	
					116	3364	3480	20	3428	3448	—	—				198	3402	3600	
					71	3645	3716	18	3654	3672	—	3095				238	3700	3938	
	12	36	4614	4650	152	4492	4644	38	4570	4608	—	5285	39	5011	5050	228	4513	4741	
					154	4486	4640	22	4572	4594	—	—				280	4520	4800	
					52	5166	5218	54	5284	5338	—	5190				358	5138	5496	
	14	42	5383	5425	176	5242	5418	44	5332	5376	—	6435	46	5846	5892	266	5265	5531	
					180	5235	5414	22	5338	5360	—	—				338	5262	5600	
					64	6114	6178	52	6448	6500	—	6542				438	6062	6500	
	20	60	7690	7750	252	7488	7740	64	7616	7680	—	9837	65	8352	8416	382	7520	7902	
					262	7472	7734	14	7628	7642	—	—				534	7466	8000	
					276	8916	9192	34	9590	9624	—	9574				766	9050	9816	
2.0	6	32	3150	3182	129	2982	3111	34	3046	3080	2920	2820	34	3399	3433	100	3066	3166	
					130	2978	3108	30	3044	3074	—	—				112	3071	3183	
					40	3104	3144	30	3236	3266	3171	3010				138	3290	3428	
	8	43	4200	4243	172	3976	4148	46	4060	4106	5004	4098	46	4532	4578	132	4090	4222	
					174	3970	4144	36	4062	4098	—	—				156	4089	4245	
					72	4456	4528	54	4358	4412	5607	4330				208	4640	4848	
	10	53	5250	5303	216	4970	5186	56	5076	5132	6238	—	57	5665	5722	166	5111	5277	
					218	4962	5180	42	5078	5120	6039	—				206	5100	5306	
					102	5754	5856	98	6062	6160	7153	5874				260	5934	6194	
	14	75	7350	7425	302	6958	7260	78	7108	7186	9112	—	80	7931	8011	234	7154	7388	
					310	6942	7252	50	7112	7162	9157	—				314	7114	7428	
					290	8136	8426	168	8868	9036	10220	8527				488	8622	9110	
3.0	4	49	3210	3259	179	2954	3133	50	3046	3096	2433	—	50	3464	3514	36	3108	3144	
					178	2946	3124	44	3050	3094	—	—				44	3107	3151	
					58	3014	3072	50	3236	3286	2453	—				48	3354	3402	
	5.0	60	4013	4073	223	3693	3916	62	3808	3870	3337	—	62	4330	4392	46	3884	3930	
					224	3684	3908	58	3808	3866	—	—				56	3883	3939	
					82	4012	4094	58	4058	4116	3110	—				64	4374	4438	
	7.0	85	5618	5703	313	5170	5483	90	5328	5418	5841	—	87	6062	6149	64	5438	5502	
					316	5160	5476	78	5332	5410	—	—				86	5428	5514	
					188	5812	6000	174	6398	6572	6015	—				110	6402	6512	
	9.0	109	7223	7332	402	6648	7050	114	6852	6966	7998	—	112	7794	7906	82	6992	7074	
					408	6636	7044	96	6856	6952	—	—				122	6968	7090	
					358	7660	8018	226	8574	8800	8499	—				180	8432	8612	

ϵ_m : Membrane strain, ϵ_b : Bending strain, ϵ_t : Total strain ($\mu\epsilon$)

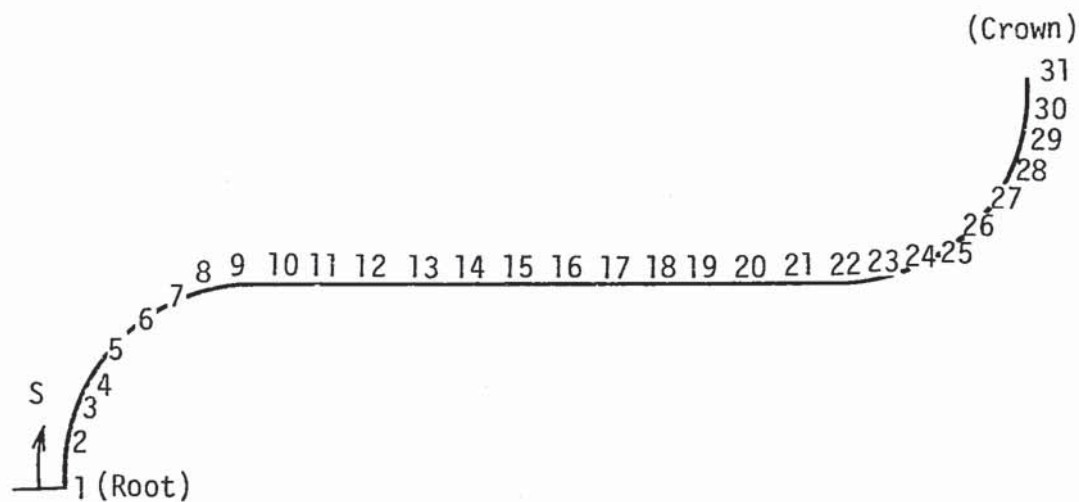
FEM 解析 { 上段 : 弾性微小変形解析
 中段 : 弾性大変形解析
 下段 : 弾塑性大変形解析

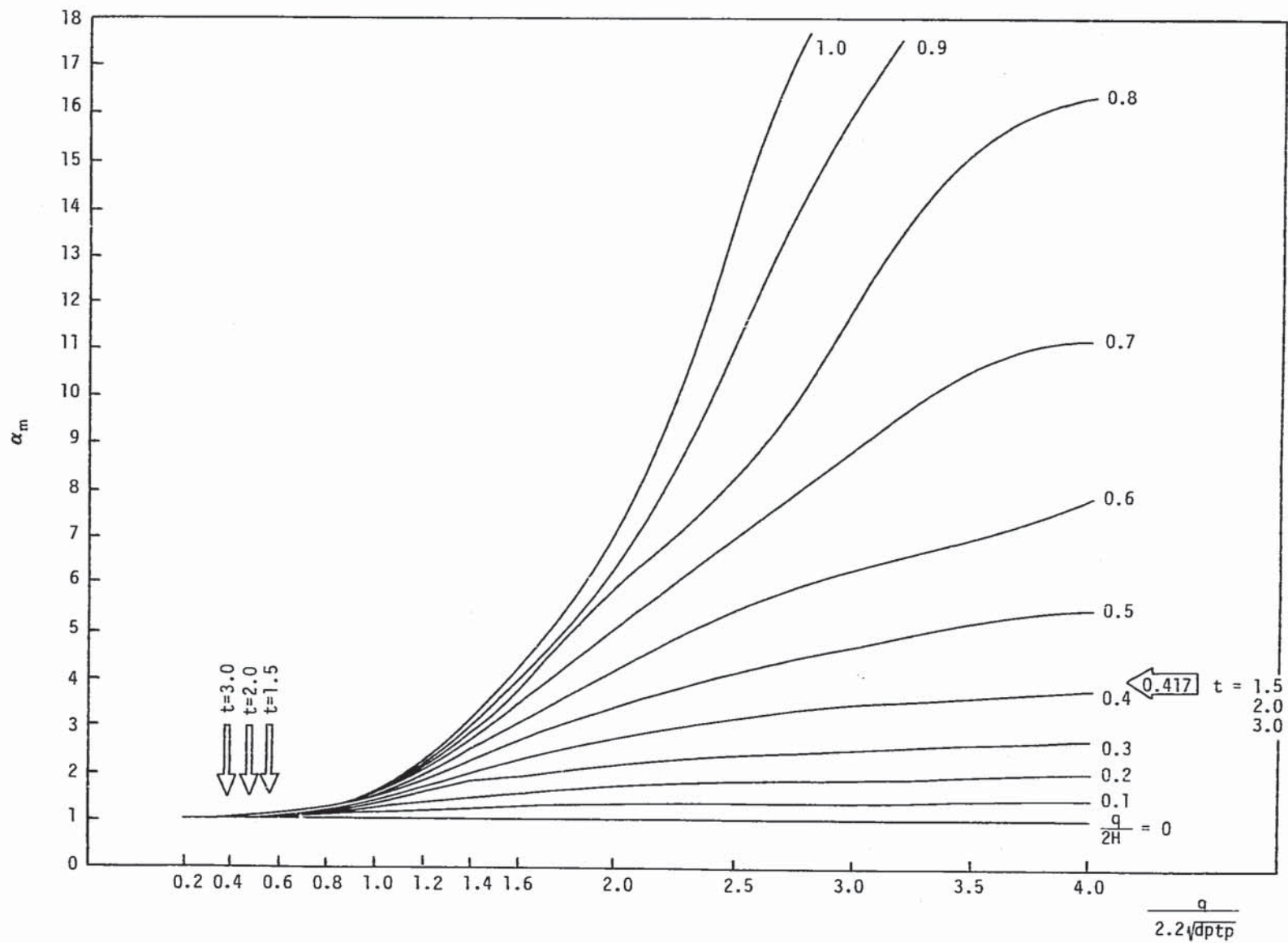
Table 3.8 Thickness Distribution (2.0t)

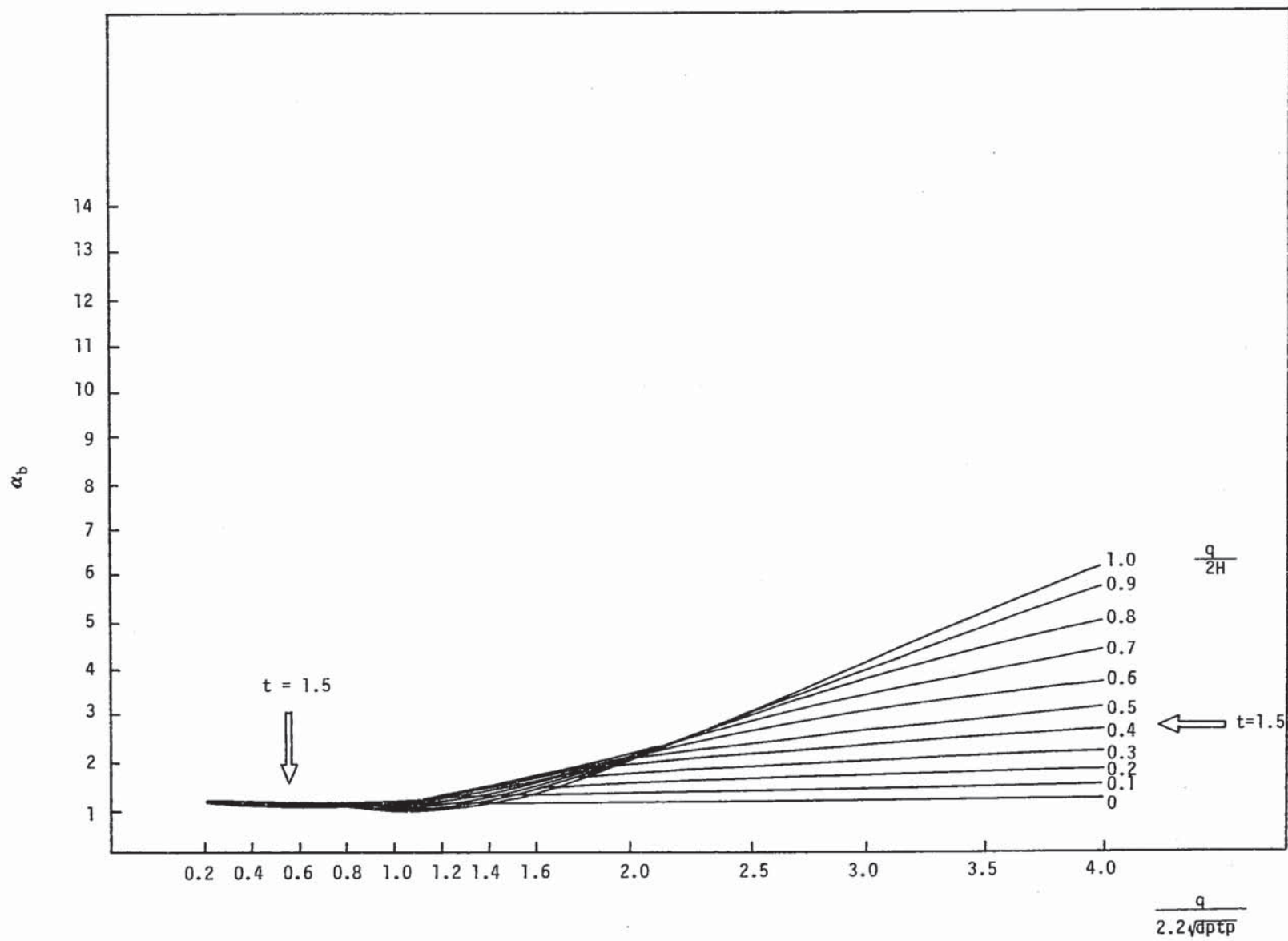
子午線方向長さS (mm)	0.0	1.96349	3.92699	5.89048	7.85398	9.81747	11.78097	13.74446	15.70795	17.67145
板厚(t) (mm)	2.0000	1.99972	1.99889	1.99753	1.99567	1.99338	1.99070	1.98770	1.98448	1.98110

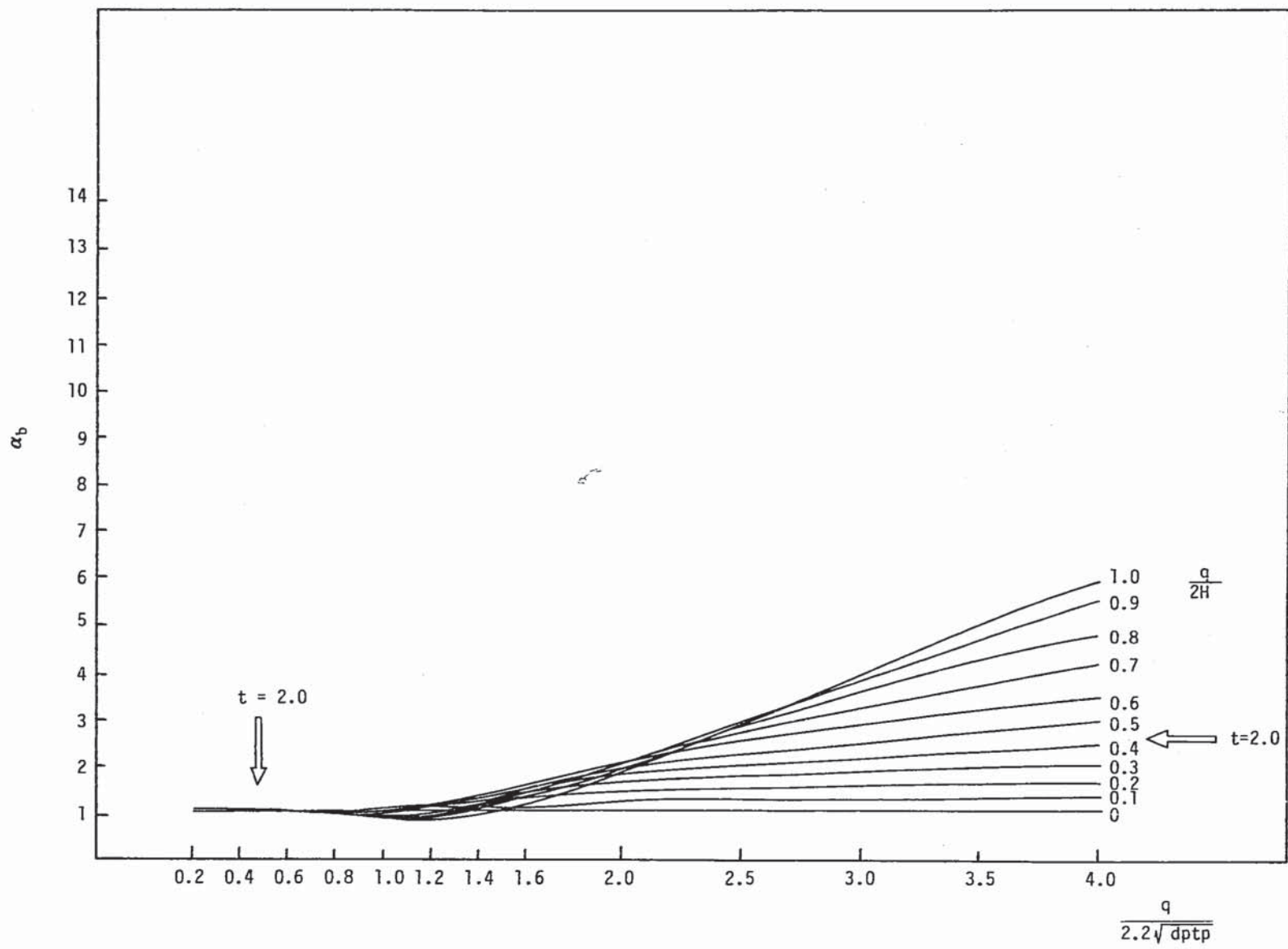
19.63495	23.13495	26.63495	30.13495	33.63495	37.13495	40.63495	44.13495	47.63495	51.13495	54.63495
1.97765	1.97153	1.96546	1.95945	1.95349	1.94759	1.94174	1.93594	1.93020	1.92450	1.91886

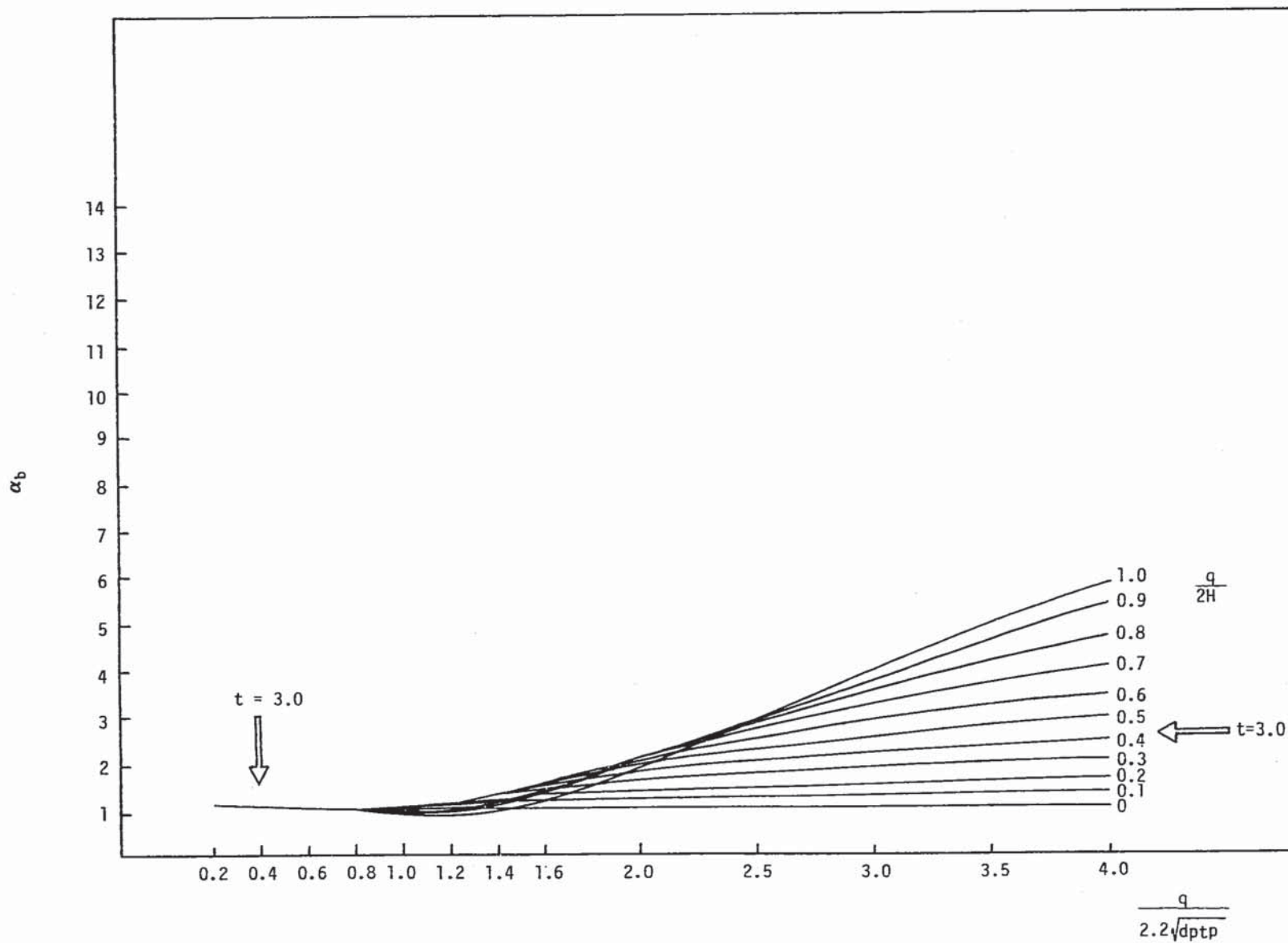
56.59843	58.56194	60.52542	62.48892	64.45241	66.41591	68.37939	70.34290	72.30640	74.26988
1.91572	1.91268	1.90981	1.90716	1.90482	1.90282	1.90122	1.90005	1.89933	1.89909



Fig. 3.1 Coefficient α_m

Fig. 3.2 Coefficient α_b ($1.5t$)

Fig. 3.3 Coefficient α_b ($2.0t$)

Fig. 3.4 Coefficient α_b ($3.0t$)

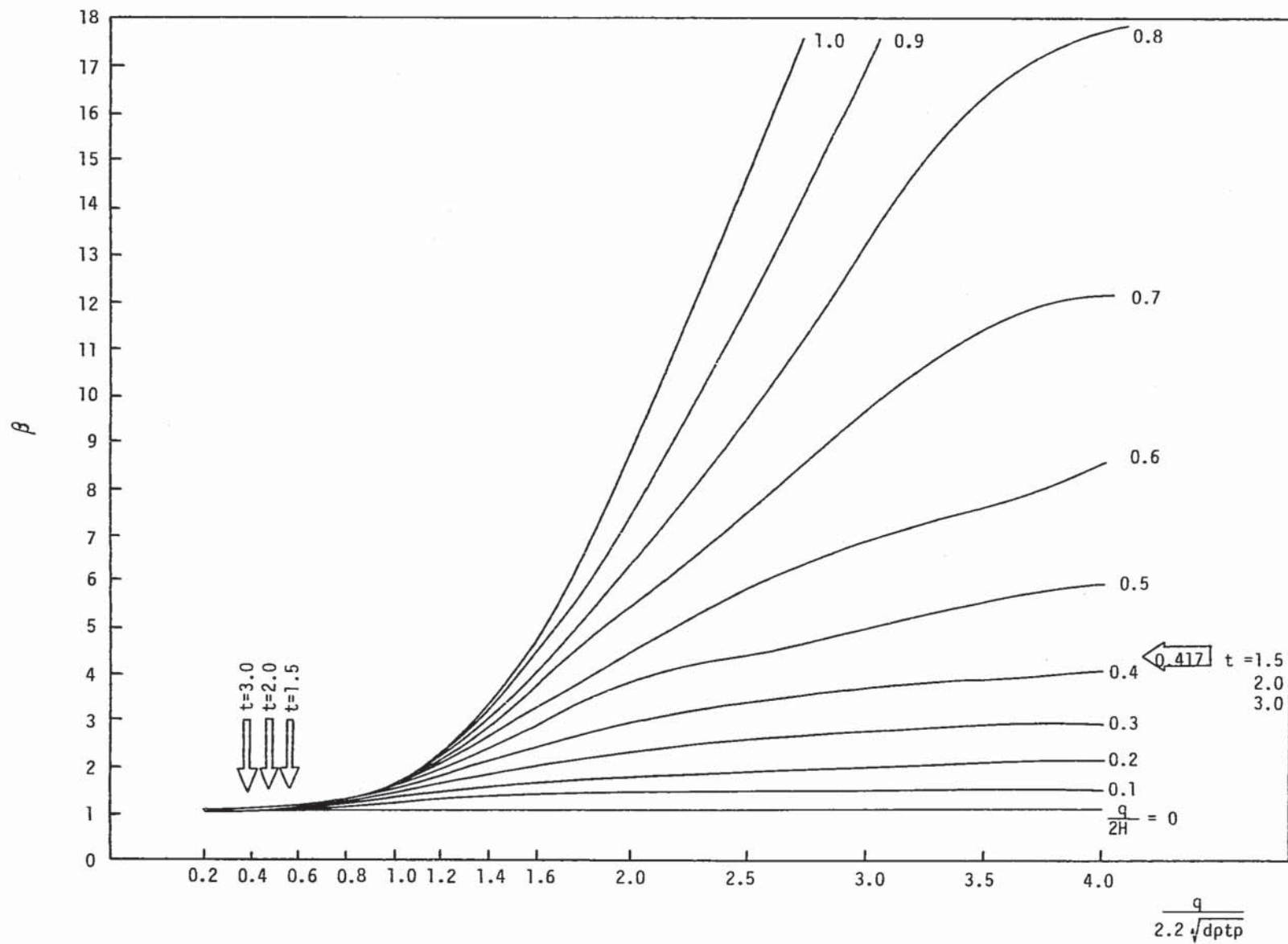


Fig. 3.5 Coefficient β

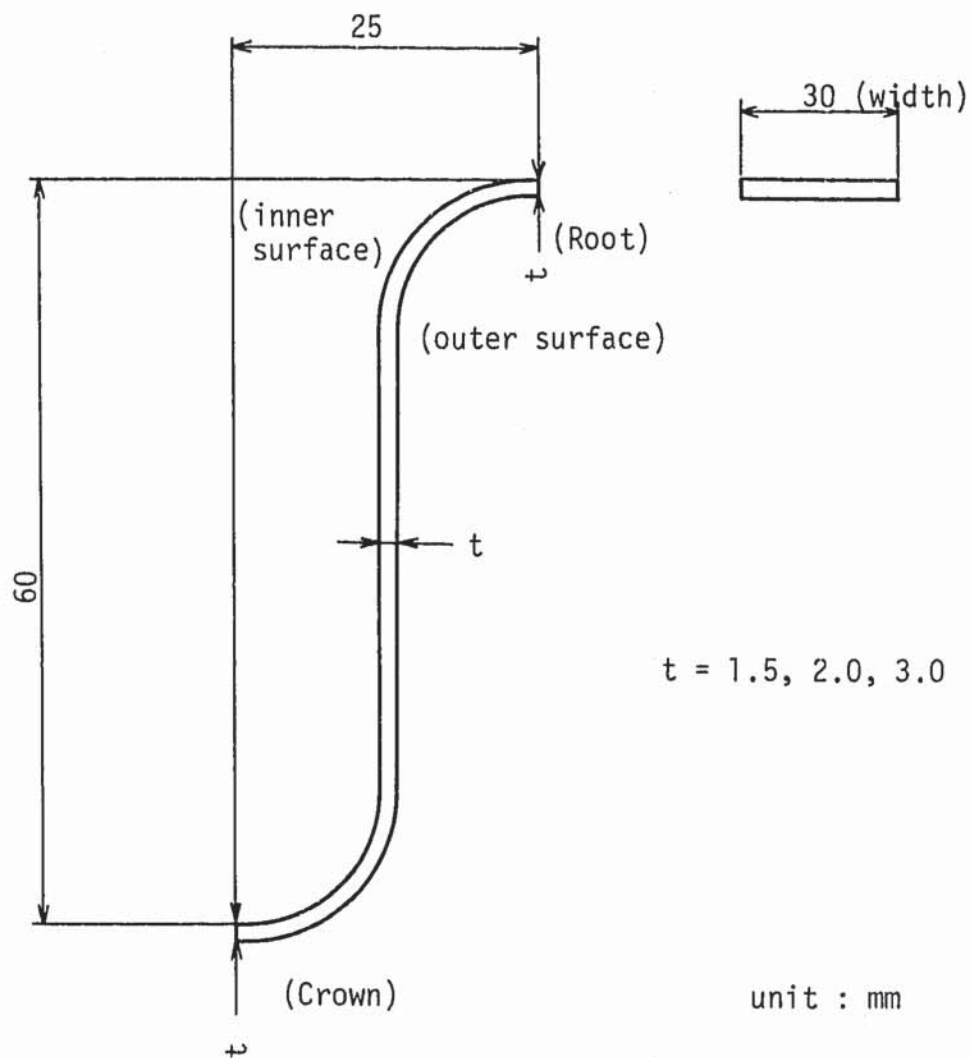


Fig. 3.6 Analysis Model of Single Corrugated Plate T.P.
(QFLA4R, BEAM2)

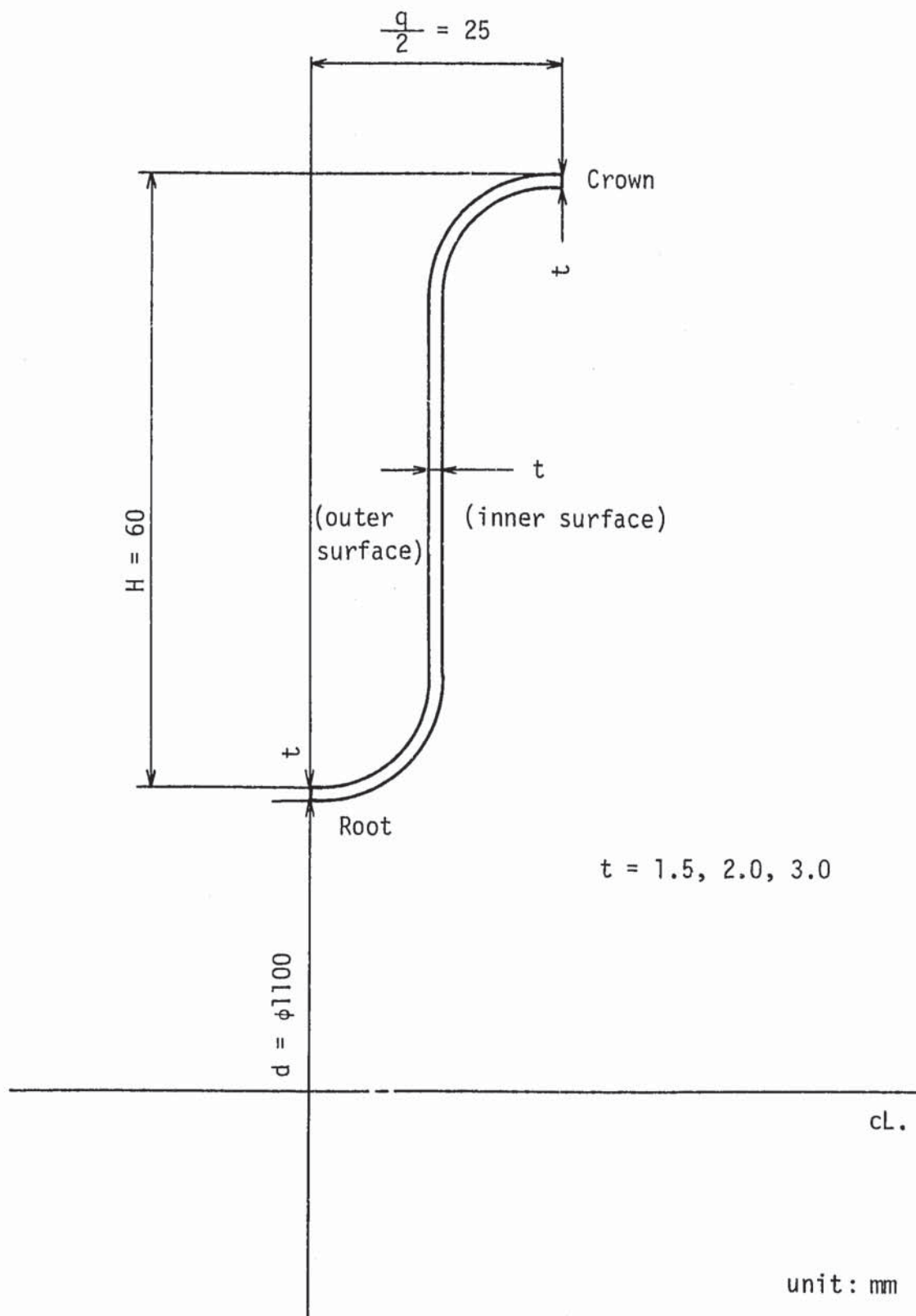
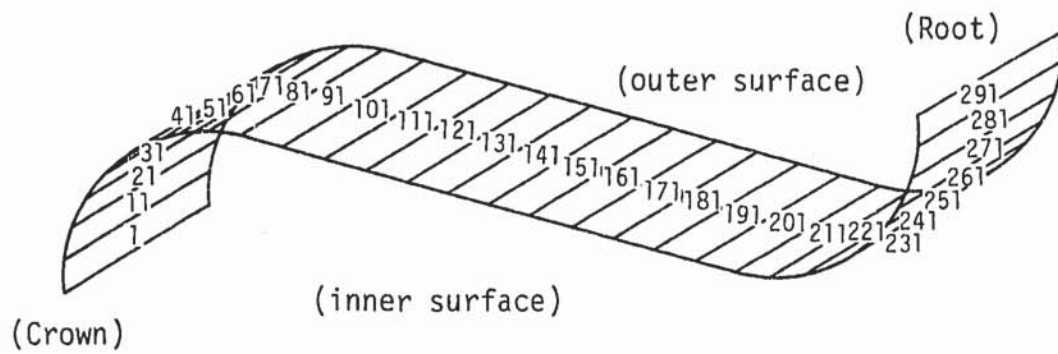
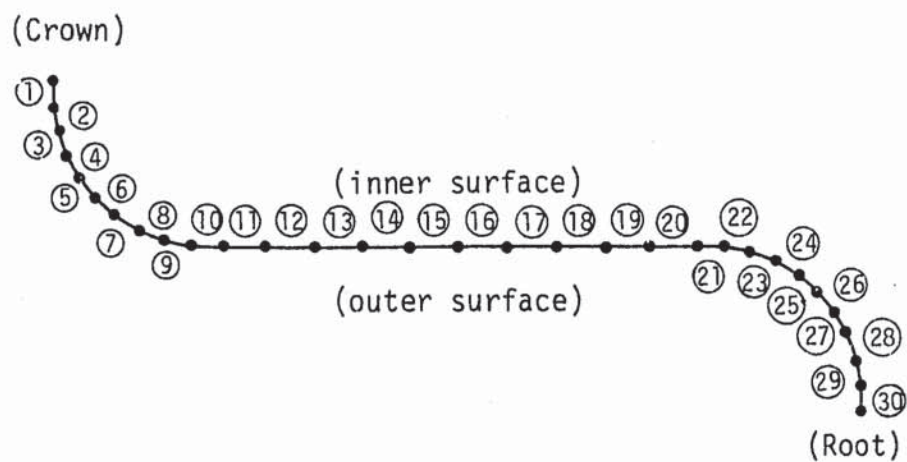


Fig. 3.7 Analysis Model of Bellows Convolution (CONIC 2)



(a) 4 Node Flat Shell Reduced Integration Element (QFLA4R)



(b) 3-Dimensional Rectangular Cross-Section Beam Element (BEAM2)

Fig. 3.8 Finite Element Mesh of Corrugated Plate Model.

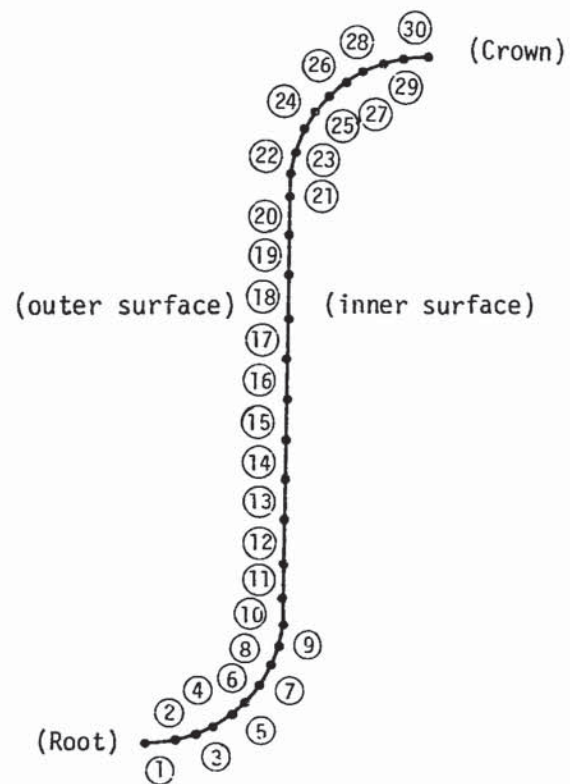


Fig. 3.9 Finite Element Mesh of Bellows Convolution Model.(CONIC2)

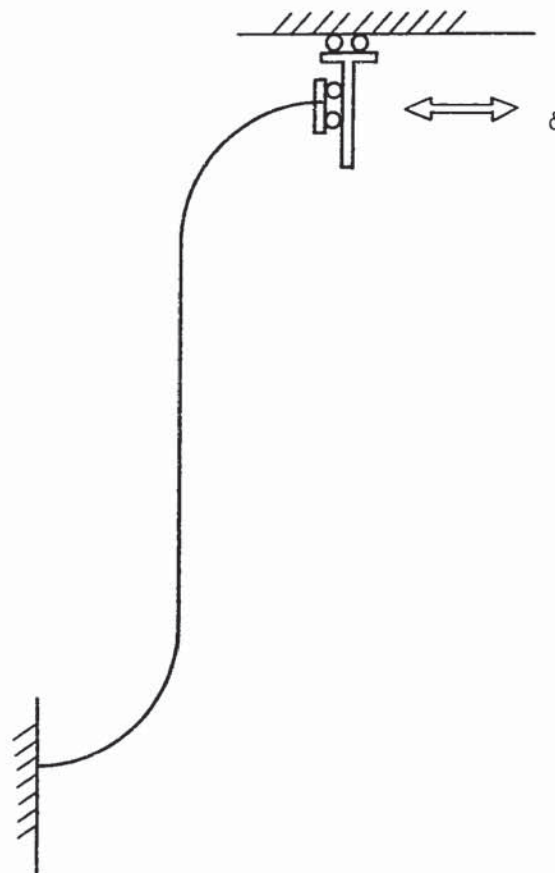


Fig. 3.10 Boundary Condition of Corrugated Plate Model. (QFLA4R, BEAM 2)

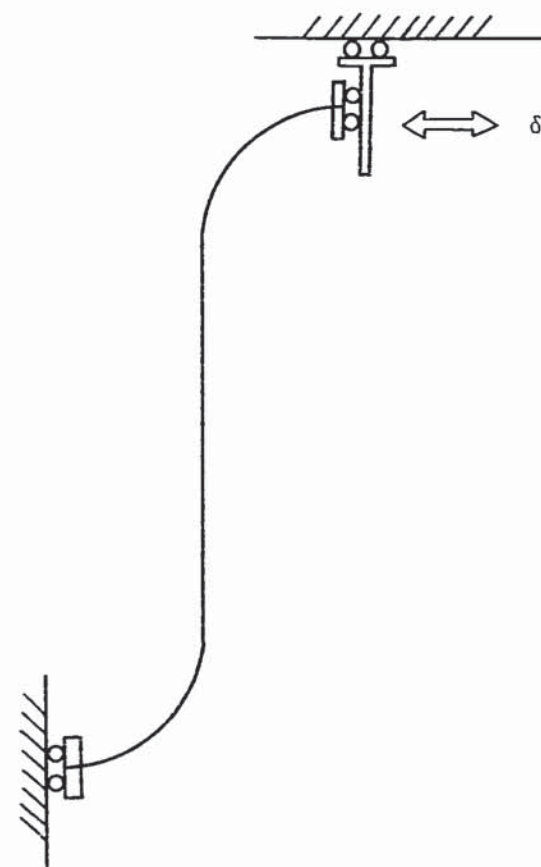
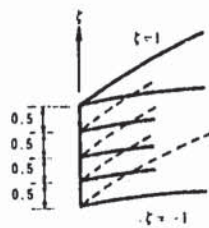
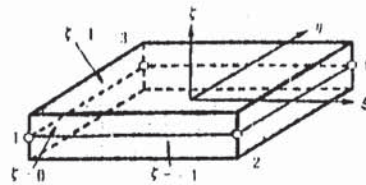


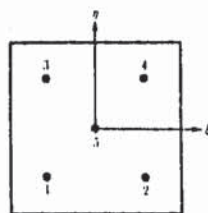
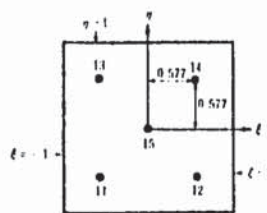
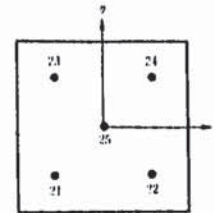
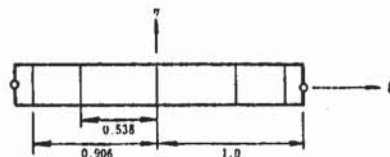
Fig. 3.11 Boundary Condition of Bellows Convolution Model(CONIC2)

QFLA 4 R

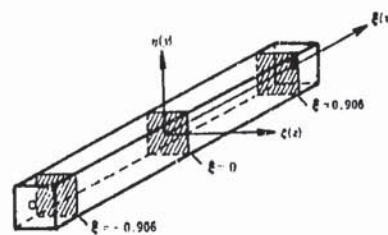
(a) Thickness direction



(b) Normalized co-ordinate

(c) Bottom ($\zeta = -1$)(d) Middle ($\zeta = 0$)(e) Top ($\zeta = 1$)BEAM 2

(a) Axial direction



(b) Normalized co-ordinate

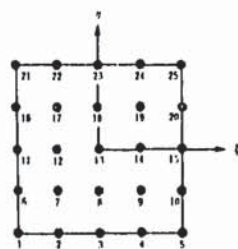
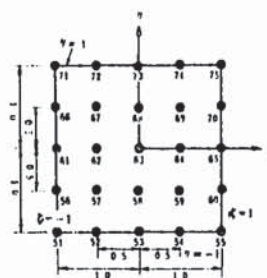
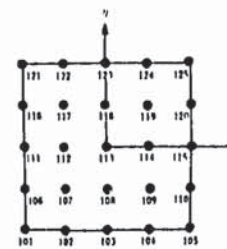
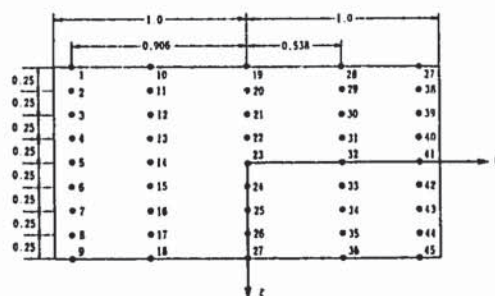
(c) $\zeta = -0.906$ (d) Center ($\zeta = 0$)(e) $\zeta = 0.906$ CONIC 2

Fig. 3.12 Number and Position of Integral Points

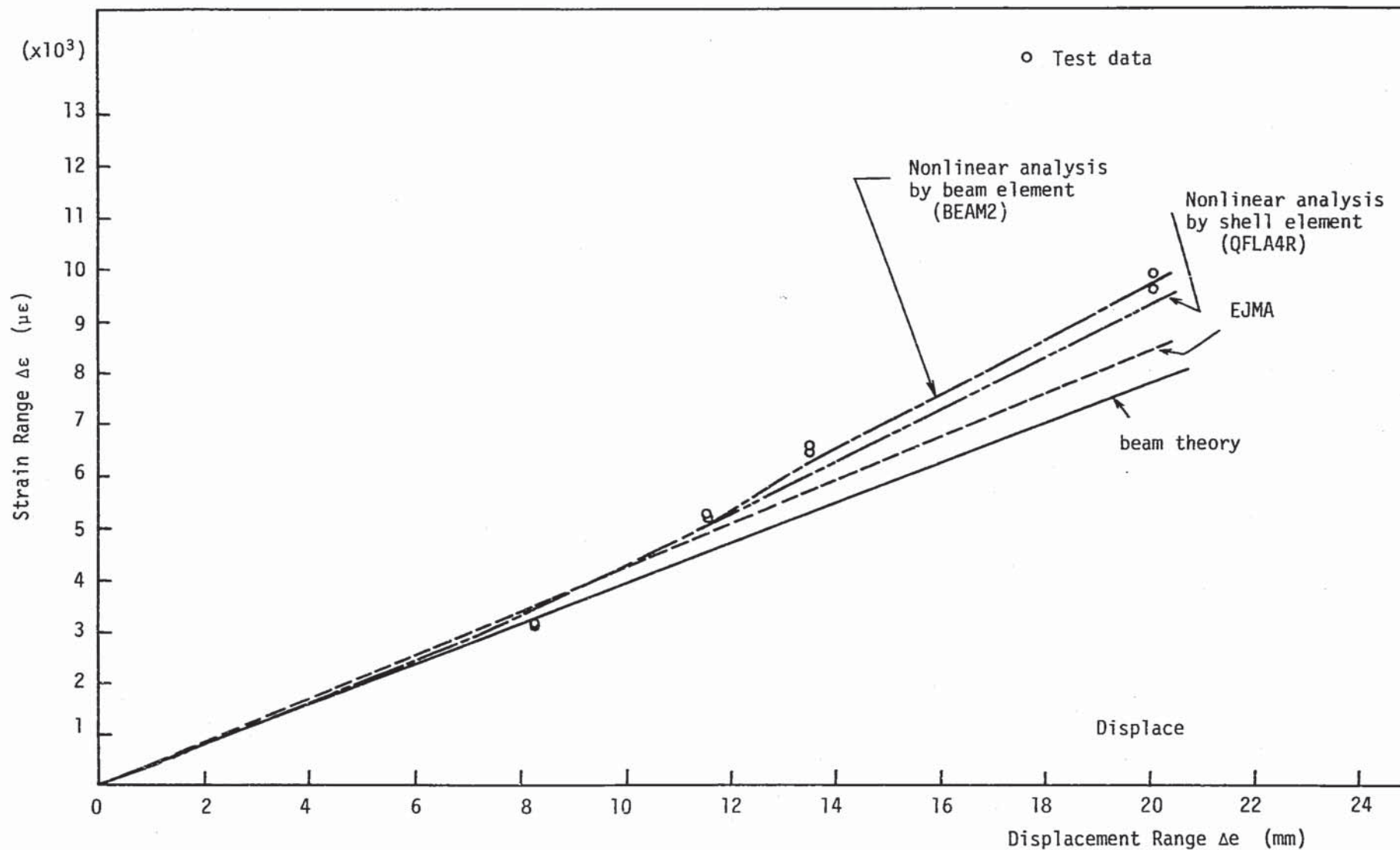


Fig. 3.13 Relation between Strain and Displacement Ranges (1.5t)

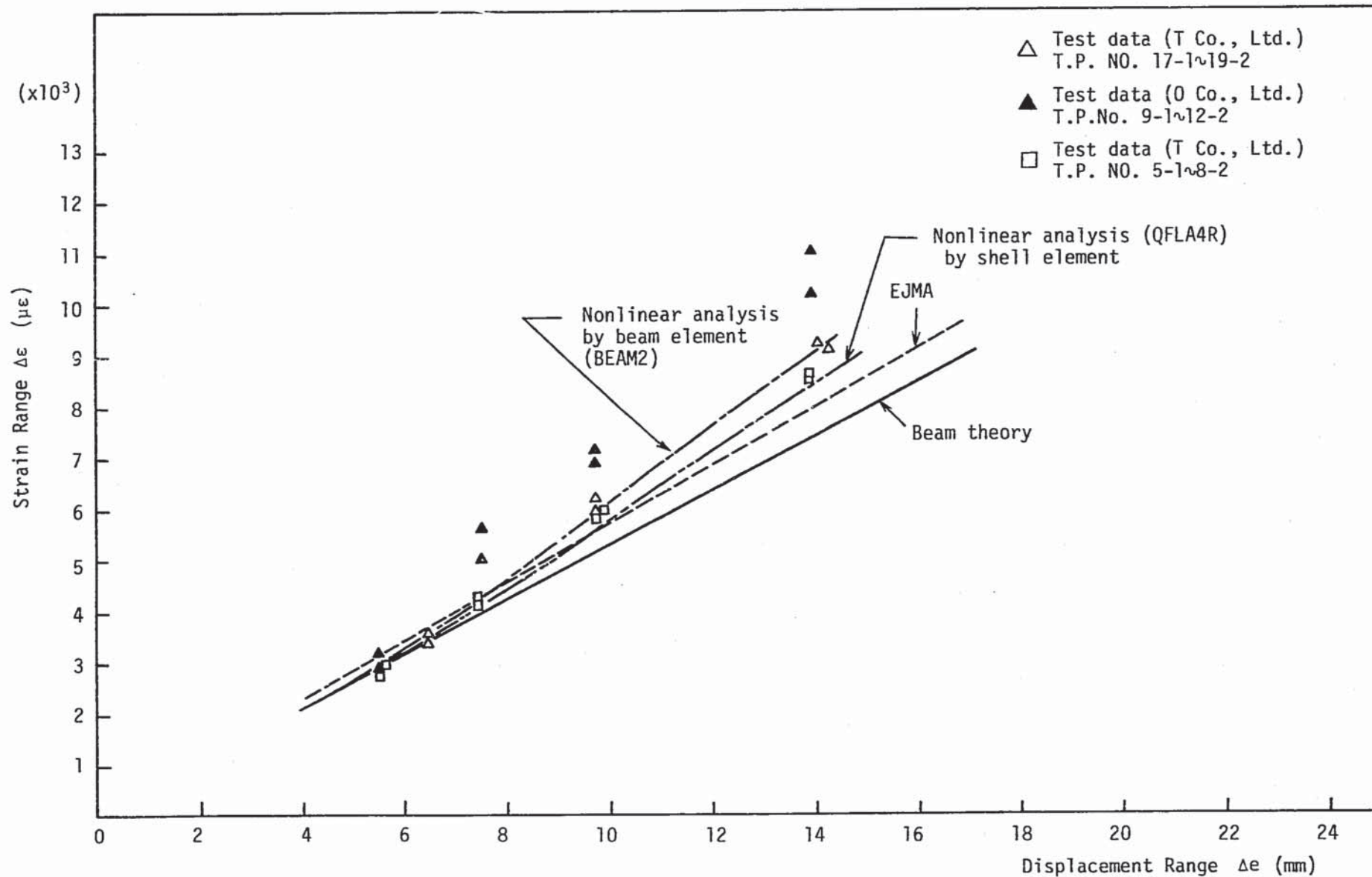


Fig. 3.14 Relation between Strain and Displacement Ranges (2.0t)

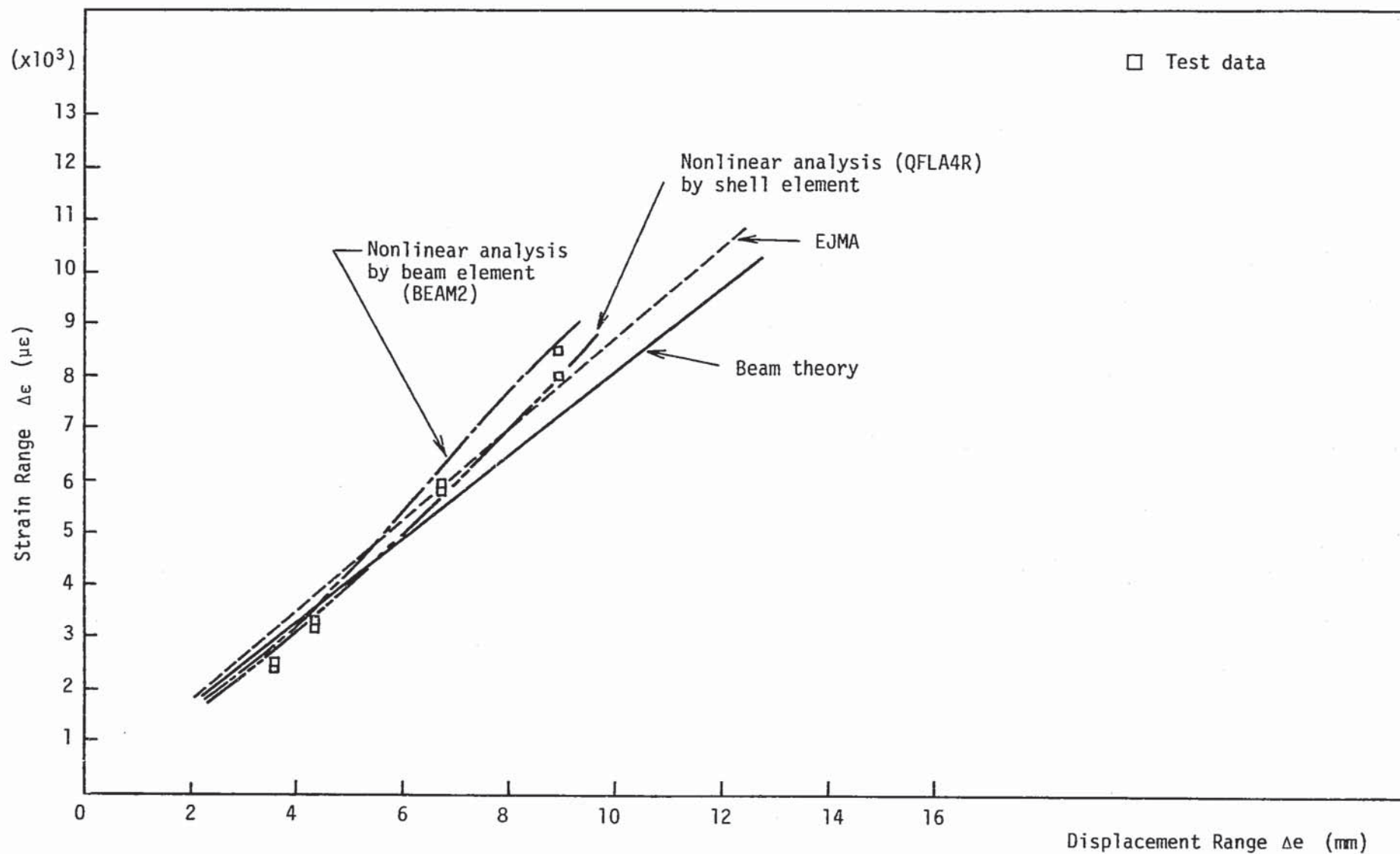


Fig. 3.15 Relation between Strain and Displacement Range (3.0t)

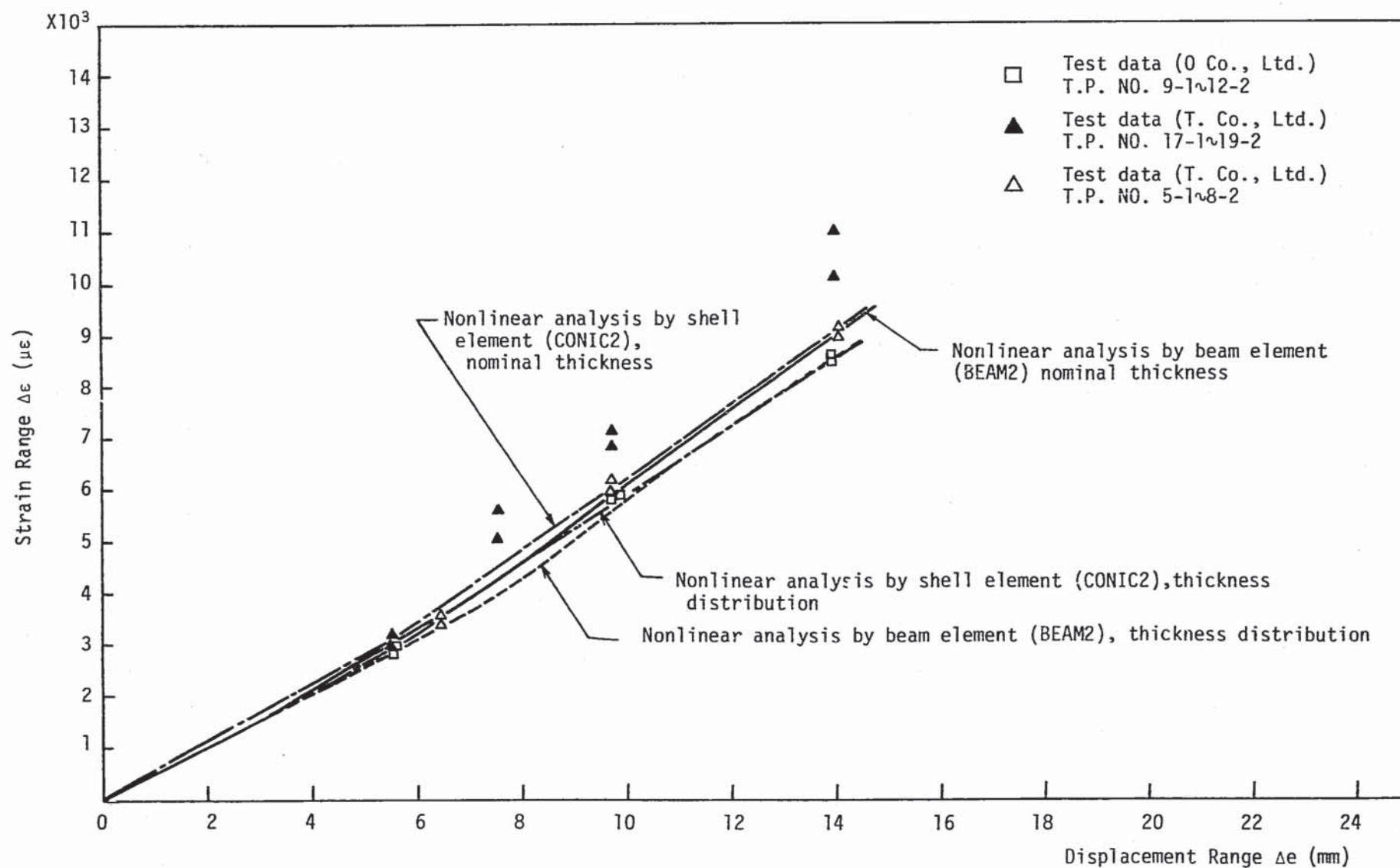


Fig. 3.16 Relation between Strain and Displacement Range (with and without thickness distribution)(2.0t nominal)

4 評価・検討

4.1 ベローズ疲労試験との相関性

(1) 1山モデルにおける理論と試験のひずみの対応

Fig. 3.13 ~ Fig. 3.15 からわかるように、公称寸法による解析では、 $4000 \mu\epsilon$ 程度までのひずみの低いレベルでは試験データよりも若干高くなるが、 $5000 \sim 10000 \mu\epsilon$ 程度のひずみレベルでは、試験データと良く合っている。Fig. 3.16 からわかるように、板厚の分布を考慮した場合、若干板厚の厚い試験データを除き、試験と解析は良く一致する。但し、公称寸法(一定板厚)解析の方が、多少ひずみが高目に出るという意味で安全側の評価となる。

また、同じ解析でも、梁要素による解析の方が、3次元シェル要素よりもひずみが若干高目となる。

なお、ひずみの小さい領域では、薄肉曲がり梁理論解析は数値解析と良好に一致する。

(2) 1山モデルとベローズとのひずみの相関性

1山モデルとベローズ1山に同一変位を加えた場合に発生するひずみの比較については、理論解析的には線形範囲で薄肉曲がり梁理論と EJMA スタンドードによって、数値解析的には、梁要素、三次元シェル要素と軸対称シェル要素による有限要素法解析によって行っている。

Table 4.1 は、これらによるひずみの比を表わしている。

EJMA スタンドードとはり理論によるひずみでは、1割弱前者が大きい。但し、EJMA スタンドードでは、周方向応力を与える式がないため、子午線方向応力を E で除した値で代用している。応力とひずみの関係については付録で言及する。FEM による解析を見ると、弾性解析では同じく軸対称シェル要素 (CONIC 2) の値の方が、はり要素 (BEAM 2) よりも大であるが、違いは、2~3%と小さい。弾塑性解析では、変位が大きくなるにつれ、はりの方が卓越する傾向が現われている。

Table 4.2 は、成形による板厚分布を考慮した場合のひずみと公称寸法ベースのひずみを比較したものである。1山モデルでは、板厚分布を考慮した方が、4~6%程度低く、ベローズについては5~6%程度低くなっている。しかしながら、軸対称シェル要素 (ベローズ) とはり要素 (1山モデル) の比は、公称板厚と板厚分布の間で3%以下の差異である。

Fig. 4.1 は、塑性によるひずみ集中率を示している。但し、試験データについては、子午線方向ひずみを用い、低いレベルの値を外そうして、弾性値 (test data(e)) としている。ベローズ (CONIC 2) と1山モデル (BEAM 2) を比較すると一部、CONIC 2 が上回る領域があるが、他の領域では、BEAM 2 が上回り、試験データに近い値となっている。BEAM 2 の K_e 値は、 $3 (S_n / 3 \bar{S}_m)$ で約 1.25 である。

塑性によるひずみ集中を次式で評価する。⁷⁾

$$K_e' = 1 + (q - 1) \left\{ 1 - \left(\frac{3\bar{S}_m}{S_n} \right) \right\} \quad (4-1)$$

周方向に溝状の圧痕を有するペローズから切出した板厚 2 mm の一部のロットによるデータを除くと、試験データと解析は良く一致し、式(4-1)において、 $q = 1.5$ とおくことにより、データを包含できる。しかしながら、全データを包含するためには、 $q = 2$ まで拡大する必要がある。内圧とクリープの効果が加わると更にひずみ集中率は増大するが、弾塑性変形においては、 $q = 2.0$ 程度でひずみの集中率を評価できると考えられる。なお、溝状の圧痕（不整）を有する波板片験片の疲労強度については、資料5)に譲る。

4.2 疲労寿命の評価及び評価法の検討

(1) 1山モデルの疲労寿命

1山モデルの疲労寿命については、Fig. 2.4 に示されるように、通常の方法試験ベースで評価可能である。

ひずみについては、前項の様にひずみ集中係数として、 K_e を $q = 2.0$ で考慮すれば安全側に弾性解析ベースの評価ができる。

(2) 1山モデルとペローズの疲労寿命の対応

1山モデルとペローズのひずみの関係については、弾性微小変形の場合、はり理論をもとに補正係数 α_m 、 α_b 、 β を導入して EJMA スタンドアードの評価式と結びつけた(3-2)。

Fig. 4.2 は、係数 α_m 、 α_b を用いて、1山モデル疲労試験データを EJMA スタンドアードの寿命評価線図上にプロットしたものである(但し、縦軸は1山相当軸負荷変位に換算している)。1山試験データは、ロットの違いにより、板厚等に若干の差異があるため系統的なばちつきを呈している。同じひずみレベルでは1山モデルよりもペローズの方が変位が小さい($\alpha_m, \alpha_b > 1$)ので、補正後のデータは、補正なしのデータよりも低くなる。従って補正により、特に低寿命側で EJMA のカーブに近づく傾向になる。しかしながら、Table 4.1 に示したように α_m 、 α_b に基くひずみの比(EJMA/理論)が約 1.08 ~ 1.09 であるのに対し、弾性微小変形を仮定した有限要素解による比(CONIC 2/BEAM 2)は、1.02 ~ 1.03 と小さい。また、弾塑性解析で見ると、1山モデルの方が塑性によるひずみ集中の割合が大きいのので、大小関係が逆転し、変位の増大とともにこの傾向は強くなる。従って、1山モデルのデータを係数 α_m 、 α_b を用いて補正することは、安全側の評価となるが、精度上限界があり、妥当であるとは必ずしも言い切れない。むしろ、Fig. 3.1 ~ Fig. 3.4 からわかるように、試験に用いた3種の1山モデル(1.5^t、2.0^t、3.0^t)は、42^B ペローズを想定した場合、大差はない(ほとんど補正の必要はない)という判断に利用すべきであろう。

Table 4.1 Meridional Maximum Strain Ratio
(theory and EFM)

板 厚 (mm)	変 位 (mm)	QFLA 4 R	BEAM 2	CONIC 2	EJMA *
		理 論	理 論	BEAM 2	理 論
1.5	9.0	0.999	0.991	1.029	1.086
		1.066	1.053	1.072	
	12	0.999	0.991	1.029	"
		1.122	1.148	1.029	
	14	0.999	0.991	1.029	"
		1.139	1.198	1.000	
	20	0.999	0.991	1.029	"
		1.186	1.242	1.020	
2.0	6	0.978	0.968	1.028	1.079
		0.988	1.026	1.050	
	8	0.978	0.968	1.028	"
		1.067	1.040	1.099	
	10	0.978	0.968	1.028	"
		1.104	1.162	1.006	
	14	0.978	0.968	1.028	"
		1.135	1.217	1.008	
3.0	4	0.965	0.950	1.016	1.078
		0.943	1.008	1.035	
	5	0.961	0.950	1.016	"
		1.005	1.011	1.078	
	7	0.961	0.950	1.016	"
		1.052	1.152	0.991	
	9	0.961	0.950	1.016	"
		1.094	1.200	0.979	

上段：弾性微小変形解析

QFLA 4 R : 3次元シェル要素

下段：弾塑性大変形解析

BEAM 2 : はり要素

CONIC 2 : 軸対称シェル要素

表中で“理論”とは微小変形はり理論を意味する。

* 子午線方向応力比

Table 4.2 Meridional Strain and Strain Ratio (with and without thickness distribution): $t=2\text{mm}$ (nominal)

(mm) 変位	1 山 モ デ ル							ベ ロ - ズ							CONIC 2	
	BEAM 2 (はり要素)							CONIC 2 (軸対称シェル要素)							BEAM 2	
	公 称 板 厚			板 厚 分 布			板 厚 分 布 ϵ_t	公 称 板 厚			板 厚 分 布			板 厚 分 布 ϵ_t	公 称	板 厚
	ϵ_m	ϵ_b	ϵ_t	ϵ_m	ϵ_b	ϵ_t	公 称 板 厚 ϵ_t	ϵ_m	ϵ_b	ϵ_t	ϵ_m	ϵ_b	ϵ_t	公 称 板 厚 ϵ_t	板 厚 ϵ_t	分 布 ϵ_t
6	30	3236	3266	28	3090	3118	0.955	138	3290	3428	136	3074	3210	0.936	1.050	1.030
8	54	4358	4412	32	4142	4174	0.946	208	4640	4848	202	4392	4594	0.948	1.099	1.101
10	98	6062	6160	84	5730	5772	0.937	260	5934	6194	256	5634	5890	0.951	1.006	1.020
14	168	8868	9036	82	8524	8606	0.952	488	8622	9110	466	8130	8596	0.944	1.008	0.999

 ϵ_m : Membrane strain ($\mu\epsilon$) ϵ_b : Bending strain ($\mu\epsilon$) ϵ_t : Total strain ($\mu\epsilon$)

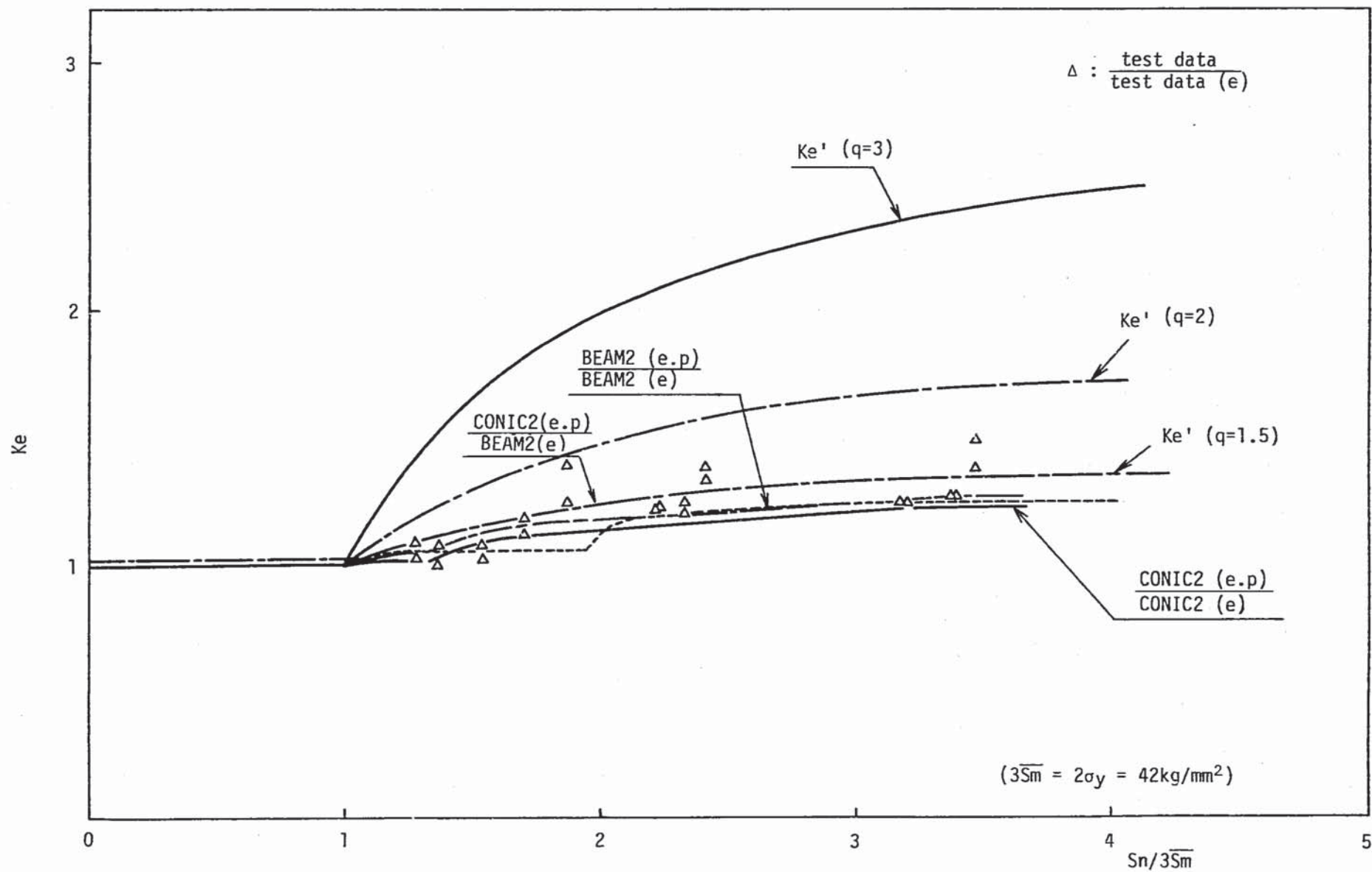
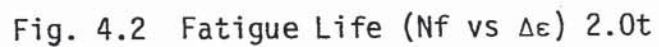


Fig. 4.1 Strain Concentration due to Plasticity



5 結 言

ペローズの疲労及びクリープ疲労試験を支援する目的で基本的な1山モデル（波板試験片）による室温疲労試験及び曲がり梁理論による検討、有限要素法による数値解析を実施した。得られた知見を要約すると以下の様である。

- (1) 1山モデルの疲労試験データは、実測ひずみで整理すると材料試験ベースの疲労カーブと良い相関を示し、ばらつきも少ない。従って、ひずみを精度よく予測することで材料試験データ並の評価が可能である。
- (2) 薄肉曲がり梁理論及び弾性微小変形を仮定した有限要素法解析によるひずみの予測は、弾性範囲で実測ひずみと良く一致する。
- (3) 弾塑性大変形解析により、1山モデルの挙動を良好に把握できる。板厚分布を考慮することにより更に精度は向上する。
- (4) 薄肉曲がり梁理論とEJMAスタンダードの評価式（いずれも弾性）から、1山モデルとペローズを対応づける係数 α_m 、 α_b 、 β を導き、 1.5^t 、 2.0^t 、 3.0^t の試験片について評価したが、 42^B ペローズを想定した場合、ひずみ挙動について両者の間に大差はない。
- (5) 1山モデル疲労寿命は、ロットの違いによるばらつきはあるものの、EJMAスタンダードの疲労曲線と良い対応を示した。
- (6) 1山モデルとペローズ1山の弾塑性大変形解析から、1山モデルの方が塑性によるひずみ集中の割合が大きいことが確認された。ペローズの1山単位の塑性によるひずみ集中は、1山モデルの試験と解析を包含する K_e ($q = 2.0$) で安全側に評価できる。

しかしながら、ここでの一連の試験解析は、1山についての室温での弾塑性変形に限定されており、FBRを対象とした高温供用ペローズを想定すると、クリープによる弾性追従、更に圧力荷重によりこれが促進されること⁸⁾ ペローズの多重連続性なども考慮に入れた寿命評価法を検討していかなければならない。

謝 辞

本試験を実施するに当り、試験装置の運転に協力下さった東興機械工業（株）の皆様へ感謝し、
本解析に当り御協力いただいた当室岩崎良一氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Standards of the Expansion Joint manufacturers Association, Inc, 5th edition, 1980.
- 2) 金属材料 疲労強度の設計資料 IV 低サイクル疲労強度, 日本機械学会, 1983.
- 3) 例えば, 材料力学(上巻), 中原一郎, 養賢堂, 1974.
- 4) PNC 報術レポート ベローズの疲労試験成果報告書(発行予定)
- 5) ベローズ谷部不整の疲労強度に及ぼす影響に関する検討(PNC 19430 86-005)
- 6) 金属材料技術研究所疲れデータシート, No 15 (1979)
- 7) 解説 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針(昭和57年)
(PNC SH 241 82-08)
- 8) FBR 配管用伸縮管継手開発のための調査研究(7)(昭和60年)
(PNC SJ 272 85-02)

付 録

付録 ベローズ谷部の応力とひずみに関する補遺

第4章 4.1 (2) の Table 4.1 にベローズと波板のひずみの比を示したが、簡易的な評価としては、EJMA スタンダードと薄肉はり理論の応力評価式を用いた。これは、EJMA スタンダードに変位による周方向応力評価式が与えられていないためであり、周方向応力を無視した（単軸応力場とみなした）ことに他ならない。

Table Ap. 1 は、ベローズと波板の谷部の子午線方向応力比について数値解析と簡易評価（EJMA スタンダードと薄肉はり理論）を比較したものである。軸対称シェル要素（CONIC 2）解析については、内表面と外表面の2種類あるが、これは、後述するように、ひずみについては内表面の方が高く、応力については、外表面の方が高いため併記したものである。はり要素（BEAM 2）では、応力、ひずみとも外表面（曲率の大きい面）が高い。

Table 4.1（ひずみ比）に比べ Table Ap. 1（応力比）では数値解析と簡易評価の結果がかなり近い値となっていることがわかる。

Table Ap. 2 は、板厚 1.5, 2.0, 3.0 mm, 口径 42^B ベローズの谷内外表面の子午線方向及び周方向の応力とひずみを示している。子午線方向の応力は、外表面が内表面よりも高い。一方、周方向応力は、外表面が内表面よりも圧倒的に大きく、子午線方向応力に比べても無視できる値ではない（形状によるが、子午線方向応力の 40 % を超えている）。子午線方向応力と周方向応力は、内外表面でそれぞれ同じ符号であるので、平面応力場を仮定した表下部のひずみ算出式を用いることによって容易にわかるが（表中のひずみ値は、数値解析による値である）、子午線方向ひずみは、応力とは逆に、内面の方が外面よりも高くなる。従ってベローズにおいて周方向応力を無視して、子午線方向応力から子午線方向ひずみを評価することは精度上問題があると考えられる。また、設計などで、EJMA スタンダードを用いて応力を評価する場合、変位による周方向応力の算出式が与えられていないが、これが子午線方向応力に比べて無視できるほどの値ではないことを念頭に置かなければならない。

List of Tables

Table Ap. 1	Meridional Maximum Stress Ratio (Theory and FEM).....	67
Table Ap. 2	Stresses and Strains at Root (FEM)	68

Table Ap. 1 Meridional Maximum Stress Ratio
(theory and FEM)

板 厚 (mm)	変位/山 (mm)	QFLA 4 R 理 論	BEAM 2 理 論	CONIC2(内表面) BEAM2(外表面)	CONIC 2 (外表面) BEAM 2 (外表面)	EJMA 理 論
1.5	9	0.989	0.912	1.065	1.087	1.086
		0.762	0.662	1.112	1.161	
	12	0.989	0.912	1.065	1.087	1.086
		0.668	0.581	1.109	1.148	
	14	0.989	0.912	1.065	1.087	1.086
		0.614	0.534	1.106	1.145	
	20	0.989	0.912	1.065	1.087	1.086
		0.456	0.397	1.216	1.243	
2.0	6	0.974	0.902	1.080	1.107	1.079
		0.789	0.704	1.115	1.159	
	8	0.974	0.902	1.080	1.107	1.079
		0.691	0.592	1.158	1.194	
	10	0.974	0.902	1.080	1.107	1.079
		0.624	0.548	1.120	1.154	
	14	0.974	0.902	1.080	1.107	1.079
		0.480	0.444	1.137	1.157	
3.0	4	0.948	0.886	1.083	1.123	1.078
		0.763	0.689	1.128	1.167	
	5	0.948	0.886	1.083	1.123	1.078
		0.687	0.600	1.162	1.199	
	7	0.948	0.886	1.083	1.123	1.078
		0.568	0.497	1.187	1.217	
	9	0.948	0.886	1.083	1.123	1.078
		0.484	0.423	1.200	1.226	

上段：弾性微小変形解析

QFLA 4 R : 3次元シェル要素

下段：弾塑性大変形解析

BEAM 2 : はり要素

CONIC 2 : 軸対称はり要素 (42 B ペローズ)

表中で“理論”とは微小変形はり理論を意味する。

Table Ap. 2 Stresses and Strains at Root (FEM)

Bellows Size	Thickness (mm)	Disp. (mm)	Stress (kg/mm ²)				inner surface / outer surface		Strain (μ ϵ)				inner surface / outer surface	
			inner surface		outer surface		σ_M	σ_C	ϵ_M	ϵ_C	ϵ_M	ϵ_C	ϵ_M	ϵ_C
			σ_M	σ_C	σ_M	σ_C								
42 ^B	1.5	10.0	-81.28	- 5.60	82.26	43.47	0.988	0.129	-4000	944	3478	944	1.150	1.0
	2.0	7.0	-77.11	-10.69	78.70	36.06	0.980	0.296	-3714	625	3411	626	1.088	0.998
	3.0	4.5	-75.02	-14.94	77.57	30.84	0.967	0.484	-3545	380	3433	380	1.033	0.1

 σ_M : Meridional stress, σ_C : Circumferential stress ϵ_M : Meridional strain, ϵ_C : Circumferential strain

$$\epsilon_M = \frac{1}{E} (\sigma_M - \nu \sigma_C), \quad \epsilon_C = \frac{1}{E} (\sigma_C - \nu \sigma_M)$$

