

高速増殖大型炉機器・配管に対する 欠陥評価指針の検討（その１）

－ クリープ疲労き裂進展評価手法の整備 －

（研究報告）



2000年6月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

高速増殖大型炉機器・配管に対する
欠陥評価指針の検討（その1）
－クリープ疲労き裂進展評価手法の整備－
（研究報告）

若井隆純*, 青砥紀身*

要 旨

機器・構造安全工学グループでは、高速増殖大型炉の機器・配管に対する欠陥評価指針に関する検討を実施している。これは、高速炉配管に対する漏えい先行型破損（LBB）成立性評価への適用を前提として、機器・配管に欠陥が存在する場合の構造健全性を、主として破壊力学に基づいて評価する手法を提示しようとするものである。

本報では、指針の枢要部となるクリープ疲労による欠陥の成長を評価する手法を線形和概念に基づき提案した。評価に必要な破壊力学パラメータ及び材料特性についても典型的な対象について付録した。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 機器・構造安全工学グループ

A Study on the Guideline of Defect Assessment Procedures
for Large Scale Fast Reactor Components (1)
—Development of Creep-fatigue Crack Growth Assessment Procedure—

Takashi WAKAI*, Kazumi AOTO*

Abstract

Structure Safety Engineering Group of JNC/OEC makes efforts to develop the guideline for the defect assessment procedures for large scale fast breeder reactor(FBR) components based on the fracture mechanics. The guideline will be applied to the leak before break(LBB) assessment of the piping system of FBR with flaws.

A creep-fatigue crack growth assessment procedure as the principal content of the guideline is proposed based on the linear damage summation concept in this report. For some typical flaw model, fracture mechanics parameters and material strength properties are also appended to the report.

*Structure Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒 言	1
2. 欠陥成長評価	4
2.1 クリープ疲労き裂進展評価	4
2.2 疲労き裂進展評価	4
2.2.1 応力拡大係数範囲	4
2.2.2 有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff}	7
2.2.3 弾性J積分範囲 ΔJ_e の算出	7
2.2.4 塑性変形の考慮	8
2.3 クリープき裂進展評価	10
2.3.1 応力拡大係数の算出	10
2.3.2 弾性J積分値の算出	12
2.3.3 等価クリープJ積分範囲の算出	13
2.3.4 応力緩和の考慮	14
3. 結 言	20
[参考文献]	21
付録A 応力拡大係数解	A-1
付録B 正味断面形状関数	B-1
付録C 材料特性	C-1

List of tables

<i>Table 2.1</i>	<i>Correction factors for membrane and bending stresses</i>	<i>17</i>
<i>Table 2.2</i>	<i>Correction factors to account for heterogeneous stress distribution under small scale yielding condition</i>	<i>17</i>

List of figures

<i>Fig.1.1</i>	<i>A draft of the contents for the defect assessment procedures</i>	<i>2</i>
<i>Fig. 2.1</i>	<i>Membrane, bending and parabolic stresses</i>	<i>17</i>
<i>Fig.2.2</i>	<i>Estimation of σ_m accounting for elastoplastic deformation</i>	<i>18</i>
<i>Fig.2.3</i>	<i>Procedures to determine σ_b accounting for elastoplastic deformation</i>	<i>18</i>
<i>Fig.2.4</i>	<i>Stress relaxation process during holding period</i>	<i>19</i>

付 録 目 次

付録A. 応力拡大係数解

A1. 平板	A-1
A1.1 半楕円表面き裂付き平板	A-1
A1.2 片側き裂付き平板	A-6
A1.3 貫通き裂付き平板	A-10
参考文献	A-10
A2. 周方向き裂付き円筒	A-12
A2.1 内面周方向半楕円表面き裂付き円筒	A-12
A2.2 外面周方向半楕円表面き裂付き円筒	A-14
A2.3 内面全周き裂付き円筒	A-16
A2.4 外面全周き裂付き円筒	A-18
A2.5 周方向貫通き裂付き円筒	A-19
参考文献	A-19
A3. 軸方向き裂付き円筒	A-31
A3.1 内面軸方向半楕円表面き裂付き円筒	A-31
A3.2 外面軸方向半楕円表面き裂付き円筒	A-33
A3.3 内面軸方向片側き裂付き円筒	A-35
A3.4 外面軸方向片側き裂付き円筒	A-37
A3.5 軸方向貫通き裂付き円筒	A-38
参考文献	A-39

付録B. 正味断面形状関数

B1. 平板	B-1
B1.1 荷重制御引張を受ける平板	B-1
B1.1.1 荷重制御引張を受ける半楕円表面き裂付き平板	B-1

B1.1.2	荷重制御引張を受ける片側き裂付き平板	·····	B-1
B1.1.3	荷重制御引張を受ける貫通き裂付き平板	·····	B-1
B1.2	荷重制御曲げを受ける平板	·····	B-2
B1.2.1	荷重制御曲げを受ける半楕円表面き裂付き平板	·····	B-2
B1.2.2	荷重制御曲げを受ける片側き裂付き平板	·····	B-2
B1.2.3	荷重制御曲げを受ける貫通き裂付き平板	·····	B-3
B1.3	変位制御引張を受ける平板	·····	B-3
B1.3.1	変位制御引張を受ける半楕円表面き裂付き平板	·····	B-3
B1.3.2	変位制御引張を受ける片側き裂付き平板	·····	B-3
B1.3.3	変位制御引張を受ける貫通き裂付き平板	·····	B-3
B1.4	変位制御曲げを受ける平板	·····	B-3
B1.4.1	変位制御曲げを受ける半楕円表面き裂付き平板	·····	B-3
B1.4.2	変位制御曲げを受ける片側き裂付き平板	·····	B-4
B1.4.3	変位制御曲げを受ける貫通き裂付き平板	·····	B-4
B2.	周方向き裂付き円筒	·····	B-6
B2.1	荷重制御引張を受ける周方向き裂付き円筒	·····	B-6
B2.1.1	荷重制御引張を受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒	·····	B-6
B2.1.2	荷重制御引張を受ける全周き裂付き円筒	·····	B-6
B2.1.3	荷重制御引張を受ける周方向貫通き裂付き円筒	·····	B-7
B2.2	荷重制御曲げを受ける周方向き裂付き円筒	·····	B-8
B2.2.1	荷重制御曲げを受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒	·····	B-8
B2.2.2	荷重制御曲げを受ける全周き裂付き円筒	·····	B-9
B2.2.3	荷重制御曲げを受ける周方向貫通き裂付き円筒	·····	B-10
B2.3	変位制御引張を受ける周方向き裂付き円筒	·····	B-10
B2.3.1	変位制御引張を受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒	·····	B-10
B2.3.2	変位制御引張を受ける全周き裂付き円筒	·····	B-11
B2.3.3	変位制御引張を受ける周方向貫通き裂付き円筒	·····	B-11
B2.4	変位制御曲げを受ける周方向き裂付き円筒	·····	B-11
B2.4.1	変位制御曲げを受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒	·····	B-11
B2.4.2	変位制御曲げを受ける全周き裂付き円筒	·····	B-12

B2.4.3	変位制御曲げを受ける周方向貫通き裂付き円筒	B-12
B3.	軸方向き裂付き円筒	B-17
B3.1	荷重制御膜応力を受ける軸方向き裂付き円筒	B-17
B3.1.1	荷重制御膜応力を受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒	B-17
B3.1.2	荷重制御膜応力を受ける軸方向片側き裂付き円筒	B-17
B3.1.3	荷重制御膜応力を受ける軸方向貫通き裂付き円筒	B-17
B3.2	荷重制御曲げを受ける軸方向き裂付き円筒	B-18
B3.2.1	荷重制御曲げを受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒	B-18
B3.2.2	荷重制御曲げを受ける軸方向片側き裂付き円筒	B-18
B3.2.3	荷重制御曲げを受ける軸方向貫通き裂付き円筒	B-18
B3.3	変位制御膜応力を受ける軸方向き裂付き円筒	B-18
B3.3.1	変位制御膜応力を受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒	B-18
B3.3.2	変位制御膜応力を受ける軸方向片側き裂付き円筒	B-18
B3.3.3	変位制御膜応力を受ける軸方向貫通き裂付き円筒	B-19
B3.4	変位制御曲げを受ける軸方向き裂付き円筒	B-19
B3.4.1	変位制御曲げを受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒	B-19
B3.4.2	変位制御曲げを受ける軸方向片側き裂付き円筒	B-19
B3.4.3	変位制御曲げを受ける軸方向貫通き裂付き円筒	B-19
付録C.	材料特性	C-1
C1.	SUS304鋼	C-1
C1.1	ヤング率, ポアソン比	C-1
C1.2	繰返し応力ひずみ式	C-1
C1.3	クリープひずみ式	C-1
C1.4	き裂進展則	C-1
C1.4.1	疲労き裂進展則	C-1
C1.4.2	クリープき裂進展則	C-2
C2.	316FR	C-3
C2.1	ヤング率, ポアソン比	C-3

C2.2	繰返し応力ひずみ式	C-3
C2.3	クリープひずみ式	C-3
C2.4	き裂進展則	C-3
C2.4.1	疲労き裂進展則	C-3
C2.4.2	クリープき裂進展則	C-3
C3.	$2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼	C-4
C3.1	ヤング率, ポアソン比	C-4
C3.2	繰返し応力ひずみ式	C-4
C3.3	クリープひずみ式	C-4
C3.4	き裂進展則	C-4
C3.4.1	疲労き裂進展則	C-4
C3.4.2	クリープき裂進展則	C-5
C4.	Mod.9Cr-1Mo鋼	C-6
C4.1	ヤング率, ポアソン比	C-6
C4.2	繰返し応力ひずみ式	C-6
C4.3	クリープひずみ式	C-6
C4.4	き裂進展則	C-6
C4.4.1	疲労き裂進展則	C-6
C4.4.2	クリープき裂進展則	C-7

1. 緒 言

高速増殖炉の実用化に向けて、軽水炉と経済的に競合できるプラント概念の抽出が行われているが、これとともに、合理的な安全論理の構築による過度の保守性の除去が必要と考えられる。

配管における漏えい先行型破損成立性の可否を示すことは、その主要なもののひとつであり、そのためには、高速炉の特徴を考慮した漏えい先行型破損成立性評価手法を確立する必要がある。

機器・構造安全工学グループでは、高速増殖大型炉の一部の機器・配管に対する漏えい先行型破損成立性評価への適用を前提とした、欠陥評価指針の開発／整備を行っている。同指針では、大型炉の主要構造材料を対象とし、破壊に至る3つの過程、すなわち、

- (1) 欠陥成長
- (2) 冷却材漏えい
- (3) 不安定破壊

を想定し、これらのそれぞれについて、

- (1) クリープ疲労き裂進展評価手法
- (2) 漏えい率評価手法
- (3) 延性不安定破壊評価手法

を提案する予定である。その出来上がりイメージの一助とするため、欠陥評価指針の目次案をFig.1.1に示す。

本報告書は、同指針の主要な一部分をなすクリープ疲労による欠陥の成長を評価する手法について述べるものである。

欠 陥 評 価 指 針 目 次 案

1. 目 的
2. 適用範囲
 - 2.1 適用材料と適用温度
 - 2.2 適用構造とそのモデル化
 - 2.3 適用欠陥とそのモデル化
3. き裂発生過程に対する考え方
4. 欠陥成長評価
 - 4.1 想定初期欠陥
 - 4.2 荷重条件
 - 4.3 クリープ疲労き裂進展評価
 - 4.4 疲労き裂進展評価
 - 4.4.1 応力拡大係数範囲
 - 4.4.2 弾性J積分範囲
 - 4.4.3 弾塑性J積分範囲
 - 4.5 クリープき裂進展評価
 - 4.5.1 応力拡大係数値
 - 4.5.2 弾性J積分値
 - 4.5.3 等価クリープJ積分範囲
 - 4.5.4 応力緩和の考慮

Fig.1.1 A draft of the contents for the defect assessment procedures

5. 冷却材漏えい評価

5.1 想定貫通欠陥

5.2 荷重条件

5.3 き裂開口評価

5.3.1 開口形状

5.3.2 膜応力に対するき裂開口

5.3.3 曲げ応力に対するき裂開口

5.3.4 クリープのき裂開口への寄与

5.4 漏えい率評価

6. 不安定破壊評価

6.1 評価対象欠陥

6.2 荷重条件

6.3 オーステナイト鋼に対する不安定破壊評価

6.4 フェライト鋼に対する不安定破壊評価

[参考文献]

付録A 構造のモデル化

付録B 欠陥のモデル化

付録C 応力拡大係数

付録D 正味断面形状関数

付録E 材料特性

付録F 破断前漏えい評価の考え方

別冊 解説

Fig.1.1(contd.) A draft of the contents for the defect assessment procedures

2. 欠陥成長評価

本章では、構造物中の欠陥の成長挙動を評価する手順について述べるが、次の前提を設ける。

- 構造物中に欠陥が一個存在すると仮定する。
- これを成長させる機構としては、クリープおよび疲労による開口型（モードⅠ）き裂進展を考える。

以下では、この前提に立ち、構造物中の欠陥の成長挙動を、破壊力学手法により評価する手順について述べる。

2.1 クリープ疲労き裂進展評価

本評価法では、疲労損傷とクリープ損傷の相互作用がき裂進展挙動に及ぼす影響は無視し、次式によりき裂進展速度 da/dN を計算する。

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_f + \left(\frac{da}{dN} \right)_c \quad (2.1.1)$$

ここで、 $(da/dN)_f$ は疲労き裂進展速度、 $(da/dN)_c$ はクリープき裂進展速度である。

2.2 疲労き裂進展評価

本節では、疲労き裂進展を評価する手順について述べる。

疲労き裂進展速度 $(da/dN)_f$ は、次式によって計算する。

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_f = C_f \cdot (\Delta J_f)^{m_f} \quad (2.2.1)$$

ここで、 C_f および m_f は材料および環境条件により決定される定数である。これらの値は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す C_f および m_f を用いてもよい。

また、 ΔJ_f は J 積分範囲であり、以下に述べる手順で計算する。

2.2.1 応力拡大係数範囲

応力拡大係数範囲 ΔK は、応力拡大係数の負荷サイクル中における最大値と最小値の差を

として、次式により定義する；

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.2.2)$$

最大および最小の応力拡大係数の値は、次式によって算出する。

$$K_{max} = (F_m \cdot \sigma_{m-max} + F_b \cdot \sigma_{b-max} + F_p \cdot \sigma_{p-max}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.2.3)$$

$$K_{min} = (F_m \cdot \sigma_{m-min} + F_b \cdot \sigma_{b-min} + F_p \cdot \sigma_{p-min}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

ここで、

σ_{m-max} , σ_{b-max} , σ_{p-max} : 最大負荷時点における膜・曲げ・放物線ピーク応力

σ_{m-min} , σ_{b-min} , σ_{p-min} : 最小負荷時点における膜・曲げ・放物線ピーク応力

F_m , F_b , F_p : 膜・曲げ・放物線ピーク応力に対応する影響係数

(無次元化応力拡大係数。これらの数値は対象欠陥位置での応力分布から求められなければならない。ただし、適用条件が妥当であるならば、付録Aに示す方法にしたがってこれらを決定してもよい)

a : き裂寸法

なお、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b および放物線ピーク応力 σ_p は、弾性的に得られる板厚内応力分布を、Fig.2.1に示すように2次までの応力成分で近似し、膜応力 S_m 、曲げ応力 S_b および放物線ピーク応力 S_p から、弾塑性変形の影響を考慮して、それぞれ以下のように求める。

(1) 膜応力 σ_m

弾性的に得られる膜応力 S_m と、材料の使用最高温度における繰返し応力ひずみ曲線($\Delta\sigma/2-\Delta\varepsilon/2$ 関係式)、および弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} を用いて、Fig.2.2のように計算する。

材料の繰返し応力ひずみ曲線は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録C

に示す繰返し応力ひずみ曲線を適用してもよい。

弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} は、負荷形態を考慮して決定されなければならない。荷重制御型負荷に対しては $q_{ep}=\infty$ 、変位制御型負荷に対して $q_{ep}=1.0$ となる。

(2) 曲げ応力 σ_b

膜応力 σ_m が負荷された状態に、弾性的に得られる曲げ応力 S_b を重ね合わせ、材料の使用最高温度における繰返し応力ひずみ曲線 ($\Delta\sigma/2-\Delta\varepsilon/2$ 関係式)、および弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} を用いて、Fig.2.3(a)のように、正側および負側の膜+曲げ応力点 σ_{m+b} および σ_{m-b} を求める。

材料の繰返し応力ひずみ曲線は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す繰返し応力ひずみ曲線を適用してもよい。

弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} は、負荷形態に依存する定数であり、荷重制御型負荷に対しては $q_{ep}=\infty$ 、変位制御型負荷に対して $q_{ep}=1.0$ となる。

求められた σ_{m+b} および σ_{m-b} から、厚さ2の板厚内応力分布をFig.2.3(b)のように仮定し、この応力分布に対応する正側および負側の等価曲げモーメントを、次式によって計算する。

$$\begin{aligned} M_{+b} &= \int_0^t [f\{\varepsilon_m + (\varepsilon_{m+b} - \varepsilon_m)x\} - \sigma_m] x dx \\ M_{-b} &= \int_{-1}^0 [f\{\varepsilon_m + (\varepsilon_m - \varepsilon_{m-b})x\} - \sigma_m] x dx \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

これらより、弾塑性曲げモーメント M_{ep} を次式により計算する。

$$M_{ep} = \text{Min.}[(M_{+b} + M_{-b}), M_e] \quad (2.2.5)$$

ここで、 M_e は弾性曲げモーメントであり、

$$M_e = \int_{-1}^1 (S_b x) x dx = \frac{2}{3} S_b \quad (2.2.6)$$

で与えられる。弾塑性変形を考慮した曲げ応力 σ_b は、

$$\sigma_b = \frac{6M_{ep}}{2W \cdot t^2} = \frac{3}{2} M_{ep} \quad (2.2.7)$$

で計算する.

(3) 放物線ピーク応力 σ_p

放物線ピーク応力 σ_p については,

$$\sigma_p = S_p \quad (2.2.8)$$

であるとし, 弾塑性変形を考慮しない.

2.2.2 有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff}

(2.2.2)式で定義した応力拡大係数範囲 ΔK を用いて, 有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を次式によって定義する.

$$\Delta K_{eff} = q_{clos} \cdot \Delta K \quad (2.2.9)$$

ここで, q_{clos} は, き裂閉口を考慮する係数であり, 応力比 R の関数として次式で与えられる[1].

$$q_{clos} = (1 - R)^{n-1} \quad (2.2.10)$$

(ただし, $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$)

本手法では, 繰返し負荷における圧縮応力はき裂進展に寄与しないと仮定して, 指数 n に次の値を用いることを推奨する.

$$\begin{aligned} R \geq 0 & : \quad n=1 \quad (\text{したがって, } q_{clos}=1) \\ R < 0 & : \quad n=0 \quad (\text{したがって, } q_{clos}=1/(1-R)) \end{aligned}$$

2.2.3 弾性J積分範囲 ΔJ_e の算出

2.2.2で算出した有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} をもとに, 平面応力あるいは平面ひずみを仮定して, 次式により弾性J積分範囲 ΔJ_e を算出する.

平面応力の場合：

$$\Delta J_e = \frac{\Delta K_{eff}^2}{E} \quad (2.2.11 a)$$

平面ひずみの場合：

$$\Delta J_e = \frac{\Delta K_{eff}^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (2.2.11 b)$$

ここで、 E および ν は、それぞれ最高使用温度における材料の縦弾性定数およびポアソン比である。これらの値は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す値を用いてもよい。

2.2.4 塑性変形の考慮

(2.2.1)式による疲労き裂進展計算に用いる疲労 J 積分範囲 ΔJ_f は、弾塑性補正係数 f_{ep} を用いて、次のように計算する。

$$\Delta J_f = f_{ep} \cdot \Delta J_e \quad (2.2.12)$$

弾塑性補正係数 f_{ep} は、参照応力法[2]に基づいて、

$$f_{ep} = \frac{\sigma_{ref}^3}{2\sigma_y^2 \cdot E \cdot \epsilon_{ref}} + \frac{E \cdot \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} \quad (2.2.13)$$

と定義する。上式において σ_{ref} は参照応力、 ϵ_{ref} は材料の繰返し応力ひずみ曲線（ $\Delta\sigma/2-\Delta\epsilon/2$ 関係式）上で参照応力 σ_{ref} に対応する参照ひずみ、 σ_y は材料の繰返し応力ひずみ曲線から求められる0.2%耐力、 E は材料の縦弾性定数である。

材料の繰返し応力ひずみ曲線、およびそれから得られる0.2%耐力、材料の縦弾性定数は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す繰返し応力ひずみ曲線を適用して決定してもよい。

参照応力 σ_{ref} は、次の簡易式を用いて決める。

$$\sigma_{ref} = F_{net} \cdot (p_m \cdot \sigma_m + p_b \cdot \sigma_b)$$

ここで,

F_{net} : 正味断面形状関数

(正味断面形状関数は構造形状, 欠陥形状, および負荷形態などを考慮して決定されなければならない. ただし, 適用条件が妥当であるならば, 付録Bにしたがってこれらを決定してもよい)

p_m : 膜応力補正係数 (推奨値については, Table 2.1参照)

p_b : 曲げ応力補正係数 (推奨値については, Table 2.1参照)

σ_m : 膜応力 (2.2.1(1)に示す手順に従って弾塑性変形を考慮した値)

σ_b : 曲げ応力 (2.2.1(2)に示す手順に従って弾塑性変形を考慮した値)

である. (2.2.14)式からも明らかなように, 参照応力の算出においては, 放物線ピーク応力の影響を考慮しない.

2.3 クリープき裂進展評価

本節では、クリープき裂進展を評価する手順について述べる。

クリープき裂進展速度 $(da/dN)_c$ は、次式によって計算する。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_c = C_c \cdot (\Delta J_c)^{m_c} \quad (2.3.1)$$

ここで、 C_c および m_c は材料および環境条件により決定される定数である。これらの値は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す C_c および m_c を用いてもよい。

また、 ΔJ_c は等価クリープ J 積分範囲であり、以下に述べる手順で計算する。

2.3.1 応力拡大係数の算出

応力拡大係数値 K は、次式によって算出する。

$$K = (F_m \cdot \sigma_m + F_b \cdot \sigma_b + F_p \cdot \sigma_p) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.3.2)$$

ここで、

$\sigma_m, \sigma_b, \sigma_p$: 保持開始時点における膜・曲げ・放物線ピーク応力

F_m, F_b, F_p : 膜・曲げ・放物線ピーク応力に対応する影響係数

(無次元化応力拡大係数。これらの数値は対象欠陥位置での応力分布から求められなければならない。ただし、適用条件が妥当であるならば、付録Aに示す方法にしたがってこれらを決定してもよい)

a : き裂寸法

なお、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b および放物線ピーク応力 σ_p は、弾性的に得られる板厚内応力分布を、Fig.2.1に示すように2次までの応力成分で近似し、膜応力 S_m 、曲げ応力 S_b および放物線ピーク応力 S_p から、弾塑性変形の影響を考慮して、それぞれ以下のように求める。

(1) 膜応力 σ_m

弾性的に得られる膜応力 S_m と、材料の使用最高温度における繰返し応力ひずみ曲線 ($\Delta\sigma/2-\Delta\varepsilon/2$ 関係式)、および弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} を用いて、Fig.2.2のように計算する。

材料の繰返し応力ひずみ曲線は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す繰返し応力ひずみ曲線を用いてもよい。

弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} は、負荷形態を考慮して決定されなければならない。荷重制御型負荷に対しては $q_{ep}=\infty$ 、変位制御型負荷に対して $q_{ep}=1.0$ となる。

(2) 曲げ応力 σ_b

膜応力 σ_m が負荷された状態に、弾性的に得られる曲げ応力 S_b を重ね合わせ、材料の使用最高温度における繰返し応力ひずみ曲線 ($\Delta\sigma/2-\Delta\varepsilon/2$ 関係式)、および弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} を用いて、Fig.2.3(a)のように、正側および負側の膜+曲げ応力点 σ_{m+b} および σ_{m-b} を求める。

材料の繰返し応力ひずみ曲線は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す繰返し応力ひずみ曲線を用いてもよい。

弾塑性変形に対する弾性追従係数 q_{ep} は、負荷形態に依存する定数であり、荷重制御型負荷に対しては $q_{ep}=\infty$ 、変位制御型負荷に対して $q_{ep}=1.0$ となる。

求められた σ_{m+b} および σ_{m-b} から、厚さ2の板厚内応力分布をFig.2.3(b)のように仮定し、この応力分布に対応する正側および負側の等価曲げモーメントを、次式によって計算する。

$$\begin{aligned} M_{+b} &= \int_0^t [f\{\varepsilon_m + (\varepsilon_{m+b} - \varepsilon_m)x\} - \sigma_m] x dx \\ M_{-b} &= \int_{-t}^0 [f\{\varepsilon_m + (\varepsilon_m - \varepsilon_{m-b})x\} - \sigma_m] x dx \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

これらより、弾塑性曲げモーメント M_{ep} を次式により計算する。

$$M_{ep} = \text{Min.}[(M_{+b} + M_{-b}), M_e] \quad (2.3.4)$$

ここで、 M_e は弾性曲げモーメントであり、

$$M_e = \int_{-l}^l (S_b x) x dx = \frac{2}{3} S_b \quad (2.3.5)$$

で与えられる。弾塑性変形を考慮した曲げ応力 σ_b は、

$$\sigma_b = \frac{6M_{ep}}{2w \cdot t^2} = \frac{3}{2} M_{ep} \quad (2.3.6)$$

で計算する。

(3) 放物線ピーク応力 σ_p

放物線ピーク応力 σ_p については、

$$\sigma_p = S_p \quad (2.3.7)$$

であるとし、弾塑性変形を考慮しない。

2.3.2 弾性J積分値の算出

保持開始時点の応力に対応する応力拡大係数 K に対して、平面応力あるいは平面ひずみを仮定して、次式により弾性J積分値 J_e を計算する。

平面応力の場合：

$$J_e = \frac{K^2}{E} \quad (2.3.8 a)$$

平面ひずみの場合：

$$J_e = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (2.3.8 b)$$

ここで、 E および ν は、それぞれ最高使用温度における材料の縦弾性定数およびポアソン比である。これらの値は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す値を用いてもよい。

2.3.3 等価クリープJ積分範囲の算出

(2.3.1)式によるクリープき裂進展計算に用いる等価クリープJ積分範囲 ΔJ_c は、次式により計算する。

$$\Delta J_c = \int_0^{t_H} J'(t) dt \quad (2.3.9)$$

ここで、 t_H は保持時間、 $J'(t)$ は時間の関数として次式で与えられるクリープJ積分である。

$$J'(t) = f_c(t) \cdot J_e \quad (2.3.10)$$

ここで、 $f_c(t)$ は時間の関数として次式で与えられるクリープ補正係数である。

$$f_c(t) = \frac{E \cdot \dot{\varepsilon}_{c-ref}(t)}{\sigma_{c-ref}} \quad (2.3.11)$$

ここで、 E は最高使用温度における材料の縦弾性定数、 σ_{c-ref} は保持開始時点の参照応力、 $\varepsilon_{c-ref}(t)$ は保持開始時点の参照応力 σ_{c-ref} に対応する材料のクリープ曲線から得られる参照クリープひずみ速度である。材料の縦弾性定数およびクリープ曲線は、材料、試験片の採取位置、環境その他の因子を考慮した試験データから決定されなければならない。ただし、適用条件が妥当であれば、付録Cに示す値あるいは曲線を用いてもよい。

保持開始時点の参照応力 σ_{c-ref} は、保持開始時点における膜応力と曲げ応力を、(2.2.14)式に適用して計算される σ_{ref} と、材料の繰返し応力ひずみ関係から得られる0.2%耐力である σ_y の大小関係によって場合分けし、次の簡易式を用いて決める。これは、小規模降伏($\sigma_{ref} < \sigma_y$)状態における不均一な応力分布により、正味断面応力よりもき裂近傍の応力が著しく大きくなる現象を考慮するための措置である。一方、大規模降伏の場合には、全断面塑性の状態が考えられるので、このような不均一な応力分布は考慮する必要がないと考えられる。それぞれの場合に対して、

$\sigma_{ref} < \sigma_y$ (小規模降伏) の場合：

$$\sigma_{c-ref} = \sigma_{ref} \cdot \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{ref}} \right)^p \quad (2.3.12 a)$$

$\sigma_{ref} \geq \sigma_y$ (大規模降伏) の場合 :

$$\sigma_{c-ref} = \sigma_{ref} \quad (2.3.12 b)$$

(2.3.12 a)式において, 指数 p はき裂寸法に依存するパラメータとして, 次式で定義する.

$$p = p_1 + p_2 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (2.3.13)$$

ここで, a はき裂深さ, t は板厚である. また, p_1 および p_2 は構造物の形状等を考慮して決定されるパラメータである. なお, 推奨値は Table 2.2 に与えられる[3].

2.3.4 応力緩和の考慮

保持時間中の参照応力は, 以下の3段階に分けて応力緩和を考慮しながら参照される.

- (1) 保持開始時点の参照応力 σ_{c-ref} から参照応力 σ_{ref} まで緩和する過程
- (2) 参照応力 σ_{ref} から一次応力 σ_I まで緩和する過程
- (3) 一次応力 σ_I が保持される過程

応力緩和量は, 次式により計算される.

$$d\sigma_{relax} = \frac{E \cdot d\epsilon_c}{q_c} \quad (2.3.14)$$

ここで, $d\epsilon_c$ は, 保持開始時点の参照応力 σ_{c-ref} に対応する材料のクリープ曲線から得られるクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c(t)$ を, 時刻 t から $t+dt$ まで積分して得られるクリープひずみ増分であり, 次式で与えられる.

$$d\epsilon_c = \int_t^{t+dt} \dot{\epsilon}_c(t) dt \quad (2.3.15)$$

- (1) 保持開始時点の参照応力 σ_{c-ref} から参照応力 σ_{ref} まで緩和する過程

この過程は, $\sigma_{c-ref} < \sigma_y$ の場合, すなわち小規模降伏が仮定される場合 (2.3.3節参照) にのみ考慮される過程である. 保持開始時点の参照応力 σ_{c-ref} から参照応力 σ_{ref} まで緩和するか, あるいは保持時間 t_H が経過するまで, 以下のように応力緩和を考慮する.

(2.3.14)式において、パラメータ q_c は次式で与えられる。

$$q_c = \text{Min.}[\sqrt{q_c}, 3.0] \quad (2.3.16 a)$$

ここで、 q_c はクリープパラメータであり、

$$\text{荷重制御条件} \quad : \quad q_c = \infty$$

$$\text{ひずみ制御／変位制御条件} \quad : \quad q_c = 1.0 \quad (2.3.16 b)$$

$$\text{一般的な条件} \quad : \quad \infty > q_c > 0$$

荷重制御条件に対してさえも、応力緩和を考慮することになるが、これは以下の理由による。すなわち、小規模降伏条件における不均一な応力分布は、保持開始後のひずみの再配分によって速やかに解消するとの仮定に立つものである。

(2) 参照応力 σ_{ref} から一次応力 σ_I まで緩和する過程

この過程は、参照応力 σ_{ref} から一次応力 σ_I まで緩和するか、あるいは保持時間 t_H が経過するまで、以下のように応力緩和を考慮する。

(2.3.14)式において、パラメータ q_c は次式で与えられる。

$$q_c = q_c \quad (2.3.17 a)$$

ここで、 q_c はクリープパラメータであり、

$$\text{荷重制御条件} \quad : \quad q_c = \infty$$

$$\text{ひずみ制御／変異制御条件} \quad : \quad q_c = 1.0 \quad (2.3.17 b)$$

$$\text{一般的な条件} \quad : \quad \infty > q_c > 0$$

(3) 一次応力 σ_I が保持される過程

この過程は、参照応力 σ_I が保持される過程であり、応力緩和は考慮されない。

以上の3過程を、荷重制御条件、ひずみ制御／変位制御条件および一般的な条件について、Fig. 2.4に図示する。

Table 2.1 Correction factors for membrane and bending stresses

	proposed value	
for membrane stress	p_m	1.0
for bending stress	p_b	1.0

Table 2.2 Correction factors to account for heterogeneous stress distribution under small scale yielding condition

proposed value	
p_1	0.2
p_2	0.2

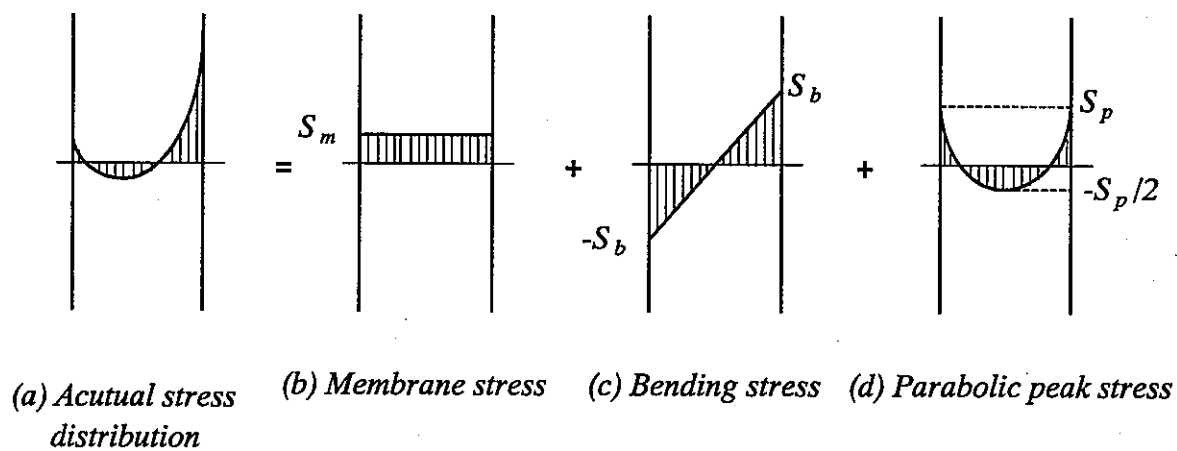
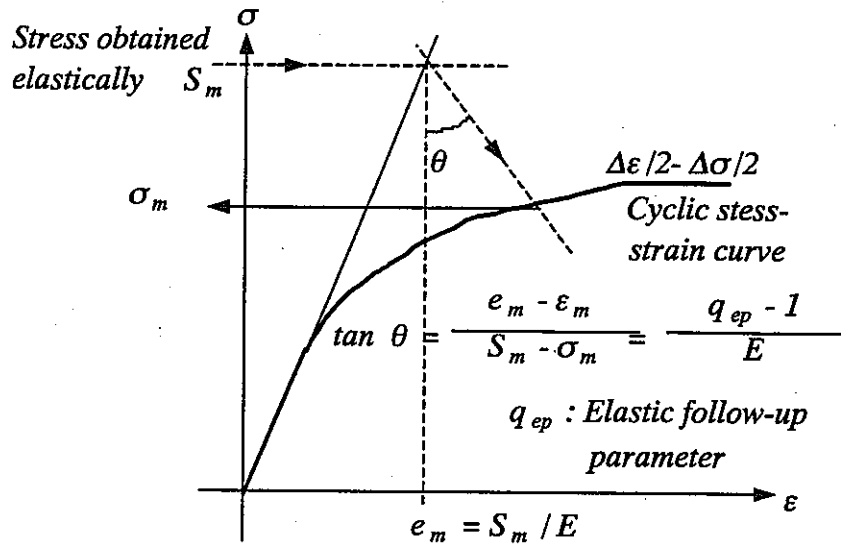
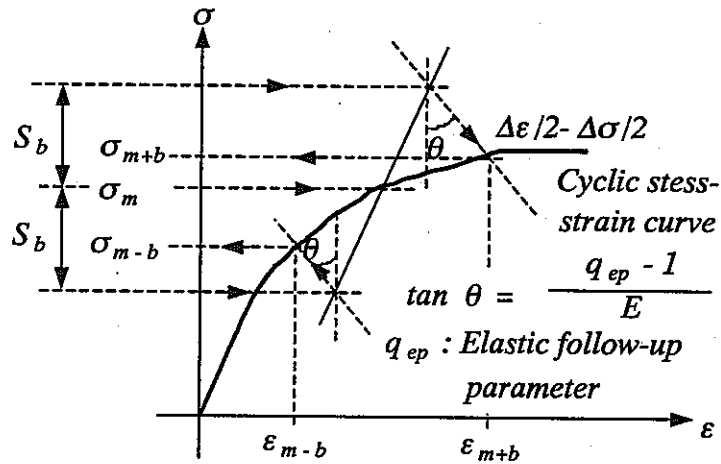
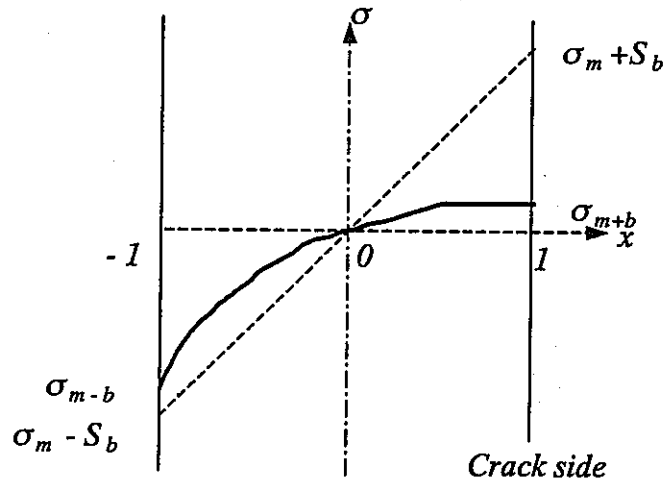


Fig.2.1 Membrane, bending and parabolic stresses

Fig.2.2 Estimation of σ_m accounting for elastoplastic deformation(a) Estimation of σ_{m+b} and σ_{m-b} accounting for elastoplastic deformation

(b) Assumed stress distribution through the wall thickness

Fig.2.3 Procedures to determine σ_b accounting for elastoplastic deformation

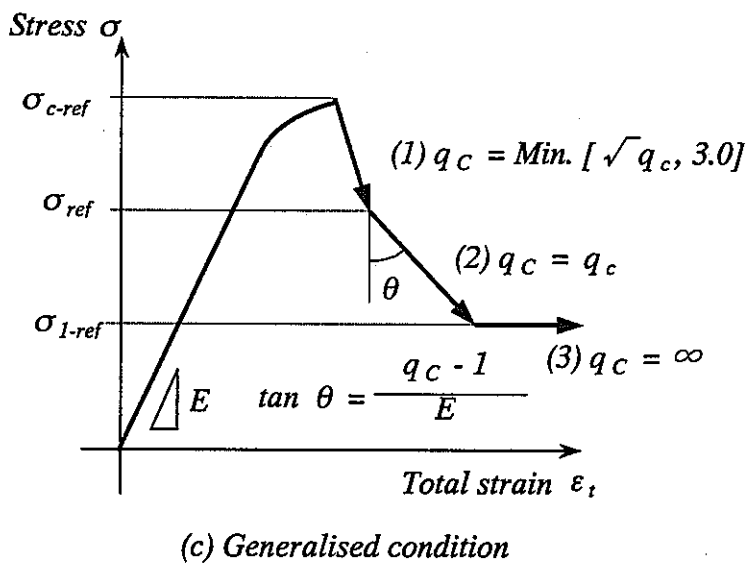
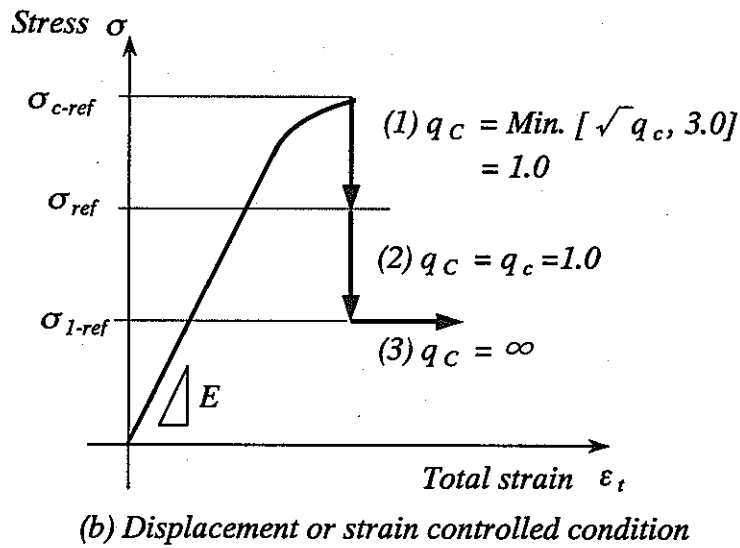
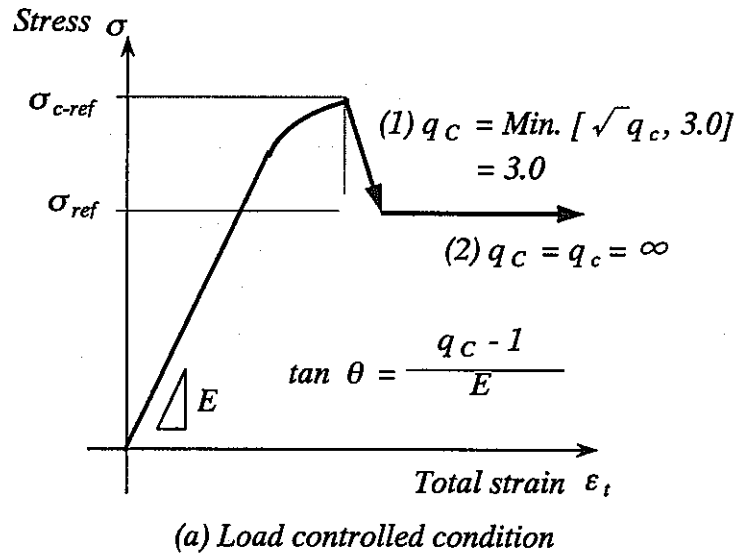


Fig.2.4 Stress relaxation process during holding period

3. 結 言

高速増殖大型炉の一部の機器・配管に対する漏えい先行型破損成立性評価への適用を前提とした、欠陥評価指針の開発／整備の一環として、クリープ疲労による欠陥の成長を評価する手法を提案した。

ここに提案したクリープ疲労き裂進展評価手法については、独自の検討ならびに周辺の情報収集を通じて高度化を図る計画である。

また、今後、同指針の主要な構成要素である；

(1) 漏えい率評価手法

(3) 延性不安定破壊評価手法

を提案する予定である。

[参考文献]

- [1] K.Walker, *The Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum*, ASTM STP 462, pp.1-14 (1970).
- [2] I.Milne et al., *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*, IJPVP, Vol.32, pp.3-104 (1988).
- [3] 古橋, 渡士, 高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究 (IV) ークリーブ疲労き裂進展評価法の検討一, PNC TN9410 90-136, 1990年7月.

付録A. 応力拡大係数解

A1. 平板

A1.1 半楕円表面き裂付き平板

き裂無し断面の板厚方向応力分布（き裂面に垂直に作用する応力成分）を放物線近似し、Fig.A1.1-1のように、膜応力成分 σ_m 、曲げ応力成分 σ_b 、および放物線ピーク応力成分 σ_p の和で表す。き裂最深部の応力拡大係数 K_A およびき裂表面部の応力拡大係数 K_C は、それぞれ次の式で与えられるものとする。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_{m,A} + \sigma_b \cdot F_{b,A} + \sigma_p \cdot F_{p,A}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A1.1-1 a)$$

$$K_C = (\sigma_m \cdot F_{m,C} + \sigma_b \cdot F_{b,C} + \sigma_p \cdot F_{p,C}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A1.1-1 b)$$

ここで、 $F_{i,j}$ は無次元応力拡大係数であり、その1番目の添字 m, b, p は、それぞれ膜、曲げ、ピーク応力成分に対応していることを示し、2番目の添字 A, C は、それぞれき裂最深部、き裂表面部での値であることを示している。

NewmanとRajuは、深さ a 、長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する幅 $2w$ 、厚さ t の平板に対するパラメトリックな有限要素法解析を実施し、き裂形状（無次元き裂深さ a/t 、無次元き裂長さ c/w およびアスペクト比 a/c ）およびき裂前縁における位置（角度 ϕ ）の関数として、膜応力 σ_m および曲げ応力 σ_b に対する応力拡大係数解を以下のように与えた[A1.1]。その適用範囲は：

$$0 \leq a/c \leq 2$$

$$0 < c/w \leq 0.5$$

$$a/t < 1.25 \cdot (a/c + 0.6) \quad (0 \leq a/c \leq 0.2)$$

$$a/t < 1 \quad (0.2 \leq a/c \leq 2)$$

である。

膜応力に対する無次元応力拡大係数：

$$F_m(\phi) = \frac{\left\{ M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right\} \cdot g \cdot f_w \cdot f}{\sqrt{Q}} \quad (A1.1-2 a)$$

曲げ応力に対する無次元応力拡大係数：

$$F_b(\phi) = H(\phi) \cdot F_m(\phi) \quad (A1.1-2 b)$$

ここに、 ϕ は、き裂前縁における位置を表すパラメータである。 $\phi=\pi/2$ がき裂最深部、 $\phi=0$ が表面部に対応するので、これらの位置における無次元応力拡大係数の値は：

$$F_{m,A} = F_m\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$F_{m,C} = F_m(0)$$

$$F_{b,A} = F_b\left(\frac{\pi}{2}\right) = H_2 \cdot F_{m,A}$$

$$F_{b,C} = F_b(0) = H_1 \cdot F_{m,C}$$

である。 $H(\phi)$ は、曲げ応力に対する補正係数であり、次式で表される：

$$H(\phi) = H_1 + (H_2 - H_1) \cdot \sin^p \phi \quad (A1.1-3)$$

f_w は、有限平板に対する板幅補正係数であり、

$$f_w = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{w} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}}\right)} \quad (A1.1-4)$$

また、 Q は、第2種完全楕円積分で、次式で近似することができる。

$$Q = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (A1.1-5)$$

(A1.1-1)～(A1.1-3)式中のその他の係数については、以下のように与えられる。

・ $0 \leq a/c \leq 1$ に対して：

f_x : 位置補正係数

$$f_x = \left\{ \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right\}^{1/4} \quad (A1.1-6 a)$$

g : 有限要素解析解にフィッティングさせるための補正係数

$$g = 1 + \left\{ 0.1 + 0.35 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right\} \cdot (1 - \sin \phi)^2 \quad (A1.1-6 b)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \quad (A1.1-6 c)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \left(\frac{a}{c} \right)} \quad (A1.1-6 d)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \left(\frac{a}{c} \right)} + 14 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{a}{c} \right) \right\}^{24} \quad (A1.1-6 e)$$

$$p = 0.2 + \left(\frac{a}{c} \right) + 0.6 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (A1.1-6 f)$$

$$H_1 = 1 - 0.34 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) - 0.11 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (A1.1-6 g)$$

$$H_2 = 1 + G_{21} \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + G_{22} \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \quad (A1.1-6 h)$$

$$G_{21} = -1.22 - 0.12 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \quad (A1.1-6 i)$$

$$G_{22} = 0.55 - 1.05 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{0.75} + 0.47 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1.5} \quad (A1.1-6 j)$$

・ $1 \leq a/c \leq 2$ に対して :

$$f_x = \left\{ \left(\frac{c}{a} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right\}^{1/4} \quad (A1.1-7 a)$$

$$g = 1 + \left\{ 0.1 + 0.35 \cdot \left(\frac{c}{a} \right) \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right\} \cdot (1 - \sin \phi)^2 \quad (A1.1-7 b)$$

$$M_1 = \left\{ 1 + 0.04 \cdot \left(\frac{c}{a} \right) \right\} \cdot \sqrt{\frac{c}{a}} \quad (\text{A1.1-7 c})$$

$$M_2 = 0.2 \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^4 \quad (\text{A1.1-7 d})$$

$$M_3 = -0.11 \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^4 \quad (\text{A1.1-7 e})$$

$$p = 0.2 + \left(\frac{a}{c} \right) + 0.6 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (\text{A1.1-7 f})$$

$$H_1 = 1 + G_{11} \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + G_{12} \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \quad (\text{A1.1-7 g})$$

$$H_2 = 1 + G_{21} \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + G_{22} \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \quad (\text{A1.1-7 h})$$

$$G_{11} = -0.04 - 0.41 \cdot \left(\frac{c}{a} \right) \quad (\text{A1.1-7 i})$$

$$G_{12} = 0.55 - 1.93 \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^{0.75} + 1.38 \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^{1.5} \quad (\text{A1.1-7 j})$$

$$G_{21} = -2.11 + 0.77 \cdot \left(\frac{c}{a} \right) \quad (\text{A1.1-7 k})$$

$$G_{22} = 0.55 - 0.72 \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^{0.75} + 0.14 \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^{1.5} \quad (\text{A1.1-7 l})$$

なお、放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数については、白鳥らによって求められた放物線ピーク応力に対する補正係数を用いる[A1.2].

$$F_{p,A} = \left\{ 1 + P_{A1} \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + P_{A2} \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \quad (\text{A1.1-8})$$

$$F_{p,C} = \left\{ 1 + P_{C1} \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + P_{C2} \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right\} \cdot F_{m,C} \quad (\text{A1.1-9})$$

ここで、係数 P_{A1} , P_{A2} , P_{C1} , P_{C2} はアスペクト比 a/c の関数として、以下のように与えられる。

・ $0 \leq a/c < 1$ に対して：

$$P_{A1} = -2.788 - 2.164 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) + 0.800 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^2 \quad (\text{A1.1-10 a})$$

$$P_{A2} = 1.944 + 2.079 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) - 0.679 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^2 \quad (\text{A1.1-10 b})$$

$$P_{C1} = 0.054 - 2.594 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^{0.5} + 1.541 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (\text{A1.1-10 c})$$

$$P_{C2} = -0.702 + 1.457 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^{0.5} - 0.464 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^2 \quad (\text{A1.1-10 d})$$

・ $0 \leq a/c < 1$ に対して :

$$P_{A1} = -3.504 - 0.648 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (\text{A1.1-11 a})$$

$$P_{A2} = 2.520 + 0.824 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (\text{A1.1-11 b})$$

$$P_{C1} = -1.151 + 0.152 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (\text{A1.1-11 c})$$

$$P_{C2} = 0.337 - 0.046 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (\text{A1.1-11 d})$$

A1.2 片側き裂付き平板

深さ a の片側き裂を有する厚さ t の平板に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数値 K_A は次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_m + \sigma_b \cdot F_b + \sigma_p \cdot F_p) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A1.2-1)$$

膜応力、曲げ応力に対する無次元応力拡大係数 F_m 、 F_b は、次式に従って計算する[A1.3]。

$$F_m = \sqrt{\frac{\tan \theta}{\theta}} \cdot \frac{0.752 + 2.02 \cdot \left(\frac{a}{t}\right) + 0.37 \cdot (1 - \sin \theta)^3}{\cos \theta} \quad (A1.2-2)$$

$$F_b = \sqrt{\frac{\tan \theta}{\theta}} \cdot \frac{0.923 + 0.199 \cdot (1 - \sin \theta)^4}{\cos \theta} \quad (A1.2-3)$$

ここで、 $\theta = \pi a / 2t$ である。なお、上式の適用範囲は、

$$0 < a/t < 1$$

である。

放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数については、平板中の片側き裂に対する重み関数の近似数値解から、以下のように求めた。

片側き裂面に任意の分布荷重 $\sigma(x)$ が作用する場合の応力拡大係数値は、重み関数 $W(x, a)$ を用いて次式で与えられる。

$$K = \int_0^a \sigma(x) \cdot W(x, a) dx \quad (A1.2-4)$$

参照荷重に対する参照応力拡大係数 K_{ref} と、参照変位分布 $u_{ref}(x, a)$ が既知であれば、重み関数 $W(x, a)$ は、次式により求められる。

$$M(x, a) = \frac{E^*}{K_{ref}} \cdot \frac{\partial u_{ref}(x, a)}{\partial a} \quad (A1.2-5)$$

ここで、 E^* は、

$$\text{平面応力状態に対して} \quad : \quad E^* = E$$

(A1.2-6)

$$\text{平面ひずみ状態に対して} \quad : \quad E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$$

である。き裂先端近傍 ($x \rightarrow a$) では、変位 $u_{ref}(x, a)$ は、次式に漸近することが一般に知られている。

$$u_{ref}(x, a) = \frac{4K_{ref}}{E^*} \cdot \sqrt{\frac{a-x}{2\pi}} = \frac{4\sigma_0}{E^* \sqrt{2}} \cdot F_{ref} \cdot \sqrt{a \cdot (a-x)} \quad (A1.2-7)$$

ここで、 F_{ref} は次式で定義される無次元応力拡大係数値である。

$$F_{ref} = \frac{K_{ref}}{\sigma_0 \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (A1.2-8)$$

(A1.2-7)式は、数値解析もしくは実験によってき裂先端近傍の変位を求め、応力拡大係数値を算出する場合にしばしば用いられる。*Petroski-Achenbach* [A1.4]は、(A1.2-7)式に追加項を加えた近似変位分布関数を以下のとおり提案した。

$$u_{ref}(x, a) = \frac{\{4F_{ref} \cdot a^{0.5} \cdot (a-x)^{0.5} + G \cdot a^{-0.5} \cdot (a-x)^{1.5}\} \cdot \sigma_0}{E^* \sqrt{2}} \quad (A1.2-9)$$

(A1.2-5)式を(A1.2-4)式に代入し、 $\sigma(x)$ を参照圧力分布 $\sigma_{ref}(x)$ とすると、(A1.2-4)式は、参照応力拡大係数解 K_{ref} 自身を求める式となり、次式が得られる。

$$\begin{aligned} K_{ref} &= \frac{E^*}{K_{ref}} \cdot \int_0^a \sigma_{ref}(x) \cdot \frac{\partial u_{ref}(x, a)}{\partial a} dx \\ K_{ref}^2 &= \sigma_0^2 \cdot F_{ref}^2 \cdot \pi a = E^* \cdot \int_0^a \sigma_{ref}(x) \cdot \frac{\partial u_{ref}(x, a)}{\partial a} dx \\ \sigma_0^2 \cdot \pi \cdot \int_0^a F_{ref}^2 \cdot a da &= E^* \cdot \int_0^a \sigma_{ref}(x) \cdot u_{ref}(x, a) dx \end{aligned} \quad (A1.2-10)$$

(A1.2-9)式を(A1.2-10)式に代入すると、近似変位分布関数の追加項の無次元関数 G を定めるための式が得られる。

$$G = \frac{(I_1 - 4F_{ref} \cdot \sqrt{a} \cdot I_2) \cdot \sqrt{a}}{I_3} \quad (A1.2-11)$$

ここで,

$$I_1 = \sigma_0 \cdot \pi \sqrt{2} \cdot \int_0^a F_{ref}^2 \cdot a da \quad (A1.2-12 a)$$

$$I_2 = \int_0^a \sigma_{ref}(x)^2 \cdot \sqrt{a-x} dx \quad (A1.2-12 b)$$

$$I_3 = \int_0^a \sigma_{ref}(x)^2 \cdot (a-x)^{1.5} dx \quad (A1.2-12 c)$$

である. $\sigma_{ref}(x) = \sigma_0$ (一定) の場合は, (A1.2-12 b), (A1.2-12 c)式は容易に積分できて, 次式が得られる.

$$G = \frac{5\pi}{a^2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \int_0^a F_{ref}^2 \cdot a da - \frac{20}{3} F_{ref} \quad (A1.2-13)$$

このようにして近似変異分布関数(A1.2-9)式を決定することができる. (A1.2-9)式を(A1.2-6)式に代入すると次式が得られる.

$$W(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2p(a-x)}} \cdot w\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{t}\right) \quad (A1.2-14)$$

ここで, $m(x, a)$ は, 無次元重み関数であり, 次式で与えられる.

$$w\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{t}\right) = 1 + w_1\left(\frac{a}{t}\right) \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right) + w_2\left(\frac{a}{t}\right) \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right)^2 \quad (A1.2-15)$$

$$w_1\left(\frac{a}{t}\right) = 1 + \frac{2F_{ref}'}{F_{ref}} \cdot \frac{a}{t} + \frac{3G}{4F_{ref}} \quad (A1.2-16 a)$$

$$w_2\left(\frac{a}{t}\right) = \frac{G'}{2F_{ref}} \cdot \frac{a}{t} - \frac{G}{4F_{ref}} \quad (A1.2-16 b)$$

膜応力に対する無次元応力拡大係数解(A1.2-1)式を参照解 F_{ref} として(A1.2-13)式および(A1.2-16)式により,

$$0 < a/t \leq 0.9$$

の範囲で重み関数 w_1 , w_2 の数値解を求め, これらを多項式近似することにより, 次式を

得る.

$$w_1\left(\frac{a}{t}\right) = 0.673 + 19.74 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 15.09 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4 + 68.49 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^8 \quad (\text{A1.2-17 a})$$

$$w_2\left(\frac{a}{t}\right) = 0.121 - 1.035 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 43.50 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4 + 521.1 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^8 \quad (\text{A1.2-17 b})$$

(A1.2-17)式の値を用いれば、無限遠方で板厚方向に任意の応力分布が生じる場合の応力拡大係数値を、(A1.2-5)式から求めることができる。放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数 F_p は、

$$F_p = 6 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot F_2 + \frac{6a}{t} \cdot \left(1 - \frac{2a}{t}\right) \cdot F_1 + \left\{1 - \frac{6a}{t} + 6 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2\right\} \cdot F_0 \quad (\text{A1.2-18})$$

ここで、

$$F_0 = 1 + \frac{w_1}{3} + \frac{w_2}{5} \quad (\text{A1.2-19 a})$$

$$F_1 = \frac{1}{3} + \frac{w_1}{5} + \frac{w_2}{7} \quad (\text{A1.2-19 b})$$

$$F_2 = \frac{1}{5} + \frac{w_1}{7} + \frac{w_2}{9} \quad (\text{A1.2-19 c})$$

(A1.2-2), (A1.2-3)および(A1.2-18)式の値をTable A1.2-1に示す。

A1.3 貫通き裂付き平板

貫通き裂付き平板に対しては、曲げ応力および放物線ピーク応力の影響は無視できるものとする。

長さ $2c$ の貫通き裂を有する幅 $2w$ 、厚さ t の平板に対する応力拡大係数 K_C は、次式で与えられる。

$$K_C = \sigma_m \cdot F_m \cdot \sqrt{\pi \cdot c} \quad (\text{A1.3-1})$$

平板中央の貫通き裂に対する無次元応力拡大係数 F_m は、次式に従って計算する[A1.3]。

$$F_m = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot c}{2w}\right)} \quad (\text{A1.3-21})$$

ここで、 $2w$ は平板の幅である。なお、上式の適用範囲は、

$$c/w < 1$$

である。

[参考文献]

[A1.1] J.C.Newman, Jr. and I.S.Raju, *Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three Dimensional Finite Bodies Subjected to tension and bending Loads*, NASA Technical Memorandum 85793, April 1984.

[A1.2] 白鳥正樹, 影響関数法による応力拡大係数の解析, 日本機械学会 (No.900-2) 表面き裂—その解析と評価—講習会教材 (1990.01.17, 東京)。

[A1.3] 岡村弘之, 「線形破壊力学入門」, 培風館, 1976。

[A1.4] H.J.Petroski and J.D.Achenbach, *Computation of the Weight Function from a Stress Intensity Factor*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.10. 1978, pp.257-266.

Table A1.2-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for the Edge Crack on a Plate

a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
F_m	0.000	1.196	1.367	1.655	2.108	2.827	4.043	6.376	11.993	34.719
F_b	0.000	1.041	1.035	1.098	1.234	1.475	1.898	2.716	4.674	12.469
F_p	1.222	0.799	0.567	0.396	0.269	0.180	0.133	0.147	0.301	1.132

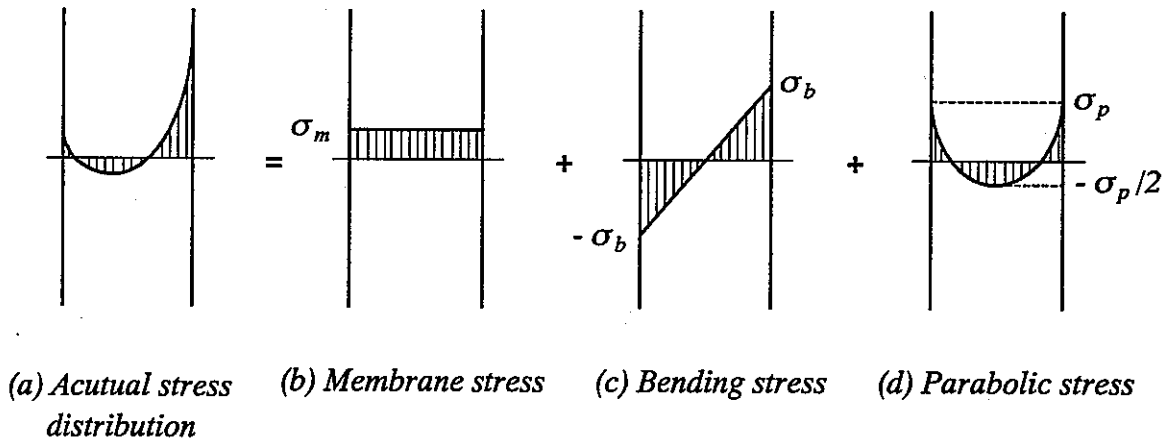


Fig.A1.1-1 Membrane, bending and parabolic stresses

A2. 周方向き裂付き円筒

A2.1 内面周方向半楕円表面き裂付き円筒

内面に深さ a 、長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_{m,A} + \sigma_b \cdot F_{b,A} + \sigma_p \cdot F_{p,A}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A2.1-1 a)$$

$$K_C = (\sigma_m \cdot F_{m,C} + \sigma_b \cdot F_{b,C} + \sigma_p \cdot F_{p,C}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A2.1-1 b)$$

$F_{m,A}$ 、 $F_{b,A}$ 、 $F_{p,A}$ 、 $F_{m,C}$ 、 $F_{b,C}$ 、 $F_{p,C}$ は無次元応力拡大係数であり、白鳥らによる以下の値を使用する。

白鳥らは、内面周方向半楕円表面き裂を有する円筒に対してパラメトリックな有限要素解析を実施し、Fig.A2.1-1に示すようなき裂面に任意の分布荷重が作用する場合の、き裂前縁の応力拡大係数値を計算してデータベース化した[A2.1]。本手法では、同データベースをもとに、膜応力・曲げ応力および放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数をTable A2.1-1のとおり整理し、これを使用することを推奨する。Table A2.1-1の適用範囲は；

円筒形状	$10.0 \leq R/t \leq 1.67$
き裂深さ	$0.0 < a/t < 1.0$
アスペクト比	$0.0 < a/c \leq 1.0$

である。

- (1) $a/t=0$ の値は、膜応力に対しては $a/t=0.1$ 、 0.2 の値の線形外挿値、曲げ応力および放物線ピーク応力に対しては、膜応力の外挿値に等しいとした。
- (2) 扁平なき裂 ($a/c \rightarrow 0$) に対する外挿精度の向上を目的として、A2.3節に述べる円筒内表面全周き裂に対する応力拡大係数値を $a/c=0$ の値としてTable A2.1-1に加えた。
- (3) Table A2.1-1に示した値は、線形内挿の精度向上を目的として、最深部の無次元応力拡大係数 $F_{m,A}$ 、 $F_{b,A}$ 、 $F_{p,A}$ については $Q^{0.5}$ を乗じ、また、表面部の無次元応力拡大係数 $F_{m,C}$ 、 $F_{b,C}$ 、 $F_{p,C}$ については $(Qc/a)^{0.5}$ を乗じてある。なお、 Q は第2種完全楕円積分であり、次の近似式で表される。

$$Q = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (A2.1-2)$$

- (4) 内挿および外挿について、本手法では、 F_{mA} と F_{pA} の $a/t > 0.4$ の領域についてのみ、 a/t について放物線内挿を行い、その他については a/t 、 a/c について、ともに線形内外挿を行うことを推奨する。 R/t については、全定義域において線形内挿を推奨し、範囲外への外挿は推奨しない。

A2.2 外面周方向半楕円表面き裂付き円筒

外面に深さ a 、長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_{m,A} + \sigma_b \cdot F_{b,A} + \sigma_p \cdot F_{p,A}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A2.2-1 a})$$

$$K_C = (\sigma_m \cdot F_{m,C} + \sigma_b \cdot F_{b,C} + \sigma_p \cdot F_{p,C}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A2.2-1 b})$$

F_{ij} は無次元応力拡大係数であり、白鳥らによる以下の値を使用する。

白鳥らは、外面周方向半楕円表面き裂を有する円筒に対してパラメトリックな有限要素解析を実施し、Fig.A2.1-1に示すようなき裂面に任意の分布荷重が作用する場合の、き裂前縁の応力拡大係数値を計算してデータベース化した[A2.1]。本手法では、同データベースをもとに、膜応力・曲げ応力および放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数をTable A2.2-1のとおり整理し、これを使用することを推奨する。Table A2.2-1の適用範囲は；

円筒形状 $10.0 \leq R/t \leq 2.5$

き裂深さ $0.0 < a/t < 1.0$

アスペクト比 $0.0 < a/c \leq 1.0$

である。

- (1) $a/t=0$ の値は、膜応力に対しては $a/t=0.1$ 、 0.2 の値の線形外挿値、曲げ応力および放物線ピーク応力に対しては、膜応力の外挿値に等しいとした。
- (2) 扁平なき裂 ($a/c \rightarrow 0$) に対しては、前節のように円筒内表面全周き裂に対する応力拡大係数値を $a/c=0$ の値を用いることはせず、 $0 < a/c < 0.2$ の領域においては $a/t=0.2$ と $a/t=0.4$ の値を線形外挿して用いた。
- (3) Table A2.2-1に示した値は、線形内挿の精度向上を目的として、最深部の無次元応力拡大係数 $F_{m,A}$ 、 $F_{b,A}$ 、 $F_{p,A}$ については $Q^{0.5}$ を乗じ、また、表面部の無次元応力拡大係数 $F_{m,C}$ 、 $F_{b,C}$ 、 $F_{p,C}$ については $(Q \cdot c/a)^{0.5}$ を乗じてある。なお、 Q は第2種完全楕円積分であり、次の近似式で表される。

$$Q = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (\text{A2.2-2})$$

- (4) 内挿および外挿について、本手法では、 F_{mA} と F_{pA} の $a/t > 0.4$ の領域についてのみ、 a/t について放物線内挿を行い、その他については a/t , a/c について、ともに線形内外挿を行うことを推奨する。 R/t については、全定義域において線形内挿を推奨し、範囲外への外挿は推奨しない。

A2.3 内面全周き裂付き円筒

内面に深さの全周き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_m + \sigma_b \cdot F_b + \sigma_p \cdot F_p) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A2.3-1})$$

F_m 、 F_b 、 F_p は無次元応力拡大係数であり、Xue-Ren Wuらによる以下の値を使用する。

Xue-Ren Wuらは円筒内面全周き裂に対して変位分布解；

$$u_{ref}(x, a) = \frac{\{4F_{ref} \cdot a^{0.5} \cdot (a-x)^{0.5} + G \cdot a^{-0.5} \cdot (a-x)^{1.5}\} \cdot \sigma_0}{E^* \sqrt{2}} \quad (\text{A1.2-8 再})$$

を仮定し、軸方向引張に対する参照応力拡大係数解を用いて、重み関数の数値解を求めた[A2.2]。これをもとに、膜応力・曲げ応力・放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数を計算した。その適用範囲は、

$$\begin{array}{ll} \text{円筒形状} & 2.33 \leq R/t \leq 9.0 \\ \text{き裂深さ} & 0.0 < a/t < 1.0 \end{array}$$

である。

さらに、Labbenらは、円筒内面の全周き裂に対する有限要素解析を実施し、き裂面の任意深さ位置に対応する円周上に線荷重を与えた場合のき裂面のコンプライアンスを計算し、き裂深さおよび線荷重を与える位置を変えた場合のコンプライアンスの変化から、重み関数の値を計算する手法を提案し、これを用いてき裂面に0～3次の圧力分布が作用する場合の無次元応力拡大係数を求めた[A2.3]。これをもとに、膜応力・曲げ応力・放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数を計算した。その適用範囲は、

$$\begin{array}{ll} \text{円筒形状} & R/t = 10.0 \\ \text{き裂深さ} & 0.0 < a/t < 1.0 \end{array}$$

である。

本手法では、Xue-Ren Wuの解とLabbensらの解をつなぎ合わせて、Table A2.3-1のとおり、無次元応力拡大係数を整理した。

内挿および外挿について、本手法では、 $a/t \leq 0.4$ の領域では a/t について線形内挿、 $0.4 < a/t < 1.0$ の領域では a/t について放物線内外挿、さらに R/t については全定義域について線形内挿することを推奨する。また、 R/t について範囲外への外挿は推奨しない。

A2.4 外面全周き裂付き円筒

外面に深さの全周き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_m + \sigma_b \cdot F_b + \sigma_p \cdot F_p) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A2.2-1})$$

F_m 、 F_b 、 F_p は無次元応力拡大係数であり、Xue-Ren Wuらによる以下の値を使用する。

Xue-Ren Wuらは円筒外面全周き裂に対して軸方向引張に対する参照応力拡大係数解を用いて、重み関数の数値解を求めた[A2.2]。これをもとに、膜応力・曲げ応力・放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数値をTable A2.4-1のように求めた。なお、その適用範囲は、

円筒形状	$2.33 \leq R/t \leq 9.0$
き裂深さ	$0.0 < a/t < 1.0$

である。

内挿および外挿について、本手法では、 $a/t \leq 0.4$ の領域では a/t について線形内挿、 $0.4 < a/t < 1.0$ の領域では a/t について放物線内外挿、さらに R/t については全定義域について線形内挿することを推奨する。また、 R/t について範囲外への外挿は推奨しない。

A2.5 周方向貫通き裂付き円筒

周方向貫通き裂付き円筒に対しては、曲げ応力および放物線ピーク応力の影響は無視できるものとする。

長さ $2c$ の周方向貫通き裂を有する平均半径 R_m ，板厚 t の円筒に対する応力拡大係数 K_C は、次式で与えられる。

$$K_C = \sigma_m \cdot F_m \cdot \sqrt{\pi \cdot c} \quad (\text{A2.5-1})$$

無次元応力拡大係数 F_m としては、*Sanders*の解[A2.4]を関数近似した次式を用いる[A2.5]。

$$F_m = 1 + A \cdot \left(5.3303 \cdot \xi^{1.5} + 18.773 \cdot \xi^{4.24} \right) \quad (\text{A2.5-2})$$

ここで、 A および ξ は、形状パラメータであり、次式で与えられる。

$5 \leq R_m \leq 10$ の場合；

$$A = \left(0.125 \cdot \frac{R_m}{t} - 0.25 \right)^{0.25} \quad (\text{A2.5-3 a})$$

$10 < R_m \leq 20$ の場合；

$$A = \left(0.4 \cdot \frac{R_m}{t} - 3.0 \right)^{0.25} \quad (\text{A2.5-3 b})$$

$$\xi = \frac{c}{\pi \cdot R_i} \quad (\text{A2.5-4})$$

なお、(A2.5-2)式の適用範囲は、

$$\xi \leq 0.55$$

である。本手法では、 ξ について範囲外への外挿を推奨しない。

[参考文献]

[A2.1] 白鳥正樹，影響関数法による応力拡大係数の解析，日本機械学会 (No.900-2) 表面き裂—その解析と評価—講習会教材 (1990.01.17，東京)。

[A2.2] Xue-Ren Wu and A.J.Carlsson, Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions,

1991, ISBN 0-08-041702-7, PERGAMON PRESS.

[A2.3] R.Labbens et al., Practical Method for Calculating Stress Intensity Factors Through Weight Functions, *ASTM STP 590*, 1976, pp.368-384.

[A2.4] J.L.Sanders, Jr., Circumferential Through-Crack in a Cylindrical Shell under Combined Bending and tension, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol.50, No.1, 1983, pp.221.

[A2.5] A.Zahoor, Closed Form Expressions for Fracture Mechanics Analysis of Cracked Pipes, *Journal of PVT*, Vol.107, 1985, pp.203-205.

Table A2.1-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Inner Surface of a Cylinder

(a) $R/t = 10.0$ $F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$

a/c	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1200	1.1420	1.2170	1.5500	2.0400	2.6740
0.2	1.0720	1.0906	1.1092	1.2914	1.4467	1.6542
0.4	0.9343	1.0151	1.0959	1.1666	1.2483	1.3316
0.6	0.8505	0.9531	1.0557	1.1028	1.1574	1.2026
1.0	0.8646	0.9000	0.9354	1.0434	1.0709	1.1089

 $F_{m,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$

a/c	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9658	1.1298	1.2938	1.4600	1.7128	1.9650
0.2	0.9658	1.1298	1.2938	1.4600	1.7128	1.9650
0.4	1.0683	1.1493	1.2303	1.3713	1.5557	1.7579
0.6	0.9053	1.0250	1.1447	1.2510	1.4244	1.5675
1.0	0.9621	0.9725	0.9829	1.1430	1.2223	1.3334

 $F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$

a/c	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1200	1.0090	0.9360	0.8830	0.8140	0.6000
0.2	1.0720	0.9645	0.8436	0.7002	0.4844	0.2086
0.4	0.9343	0.8902	0.8280	0.5985	0.3526	0.0470
0.6	0.8505	0.8306	0.7854	0.5373	0.2757	-0.0384
1.0	0.8646	0.7741	0.6763	0.4624	0.1736	-0.1467

 $F_{b,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$

a/c	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9658	1.1000	1.2378	1.2883	1.3875	1.3967
0.2	0.9658	1.1000	1.2378	1.2883	1.3875	1.3967
0.4	1.0683	1.1129	1.1514	1.1857	1.2121	1.2111
0.6	0.9053	0.9912	1.0681	1.0755	1.1077	1.0876
1.0	0.9621	0.9401	0.9155	0.9868	0.9644	0.9526

 $F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$

a/c	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1200	0.7730	0.4490	0.1200	-0.1190	-0.2180
0.2	1.0720	0.7399	0.4325	0.0383	-0.1799	-0.1830
0.4	0.9343	0.6685	0.4128	-0.0209	-0.2200	-0.1855
0.6	0.8505	0.6142	0.3706	-0.0637	-0.2490	-0.1921
1.0	0.8646	0.5528	0.2844	-0.1341	-0.3055	-0.2061

 $F_{p,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$

a/c	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9658	1.4290	1.1349	1.0158	0.9524	0.8016
0.2	0.9658	1.4290	1.1349	1.0158	0.9524	0.8016
0.4	1.0683	1.0437	1.0102	0.8964	0.7666	0.6428
0.6	0.9053	0.9271	0.9316	0.8045	0.6993	0.5858
1.0	0.9621	0.8789	0.7962	0.7446	0.6266	0.5390

Table A2.1-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Inner Surface of a Cylinder
(b) $R/t = 5.0$

$$F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.0330	1.1330	1.2160	1.4430	1.7510	2.2340
0.2	1.0751	1.0852	1.0953	1.2429	1.3706	1.6074
0.4	0.9362	1.0122	1.0882	1.1448	1.2220	1.3352
0.6	0.8513	0.9520	1.0527	1.0930	1.1465	1.2224
1.0	0.8645	0.9009	0.9373	1.0464	1.0784	1.1329

$$F_{m,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9730	1.1281	1.2832	1.4064	1.5682	1.8216
0.2	0.9730	1.1281	1.2832	1.4064	1.5682	1.8216
0.4	1.0712	1.1477	1.2242	1.3415	1.4664	1.6270
0.6	0.9063	1.0238	1.1413	1.2345	1.3839	1.5034
1.0	0.9630	0.9722	0.9814	1.1371	1.2095	1.3034

$$F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.0330	0.9630	0.8940	0.7600	0.6010	0.3710
0.2	1.0751	0.9595	0.8315	0.6643	0.4356	0.1813
0.4	0.9362	0.8873	0.8211	0.5818	0.3327	0.0404
0.6	0.8513	0.8295	0.7825	0.5290	0.2660	-0.0367
1.0	0.8645	0.7748	0.6776	0.4625	0.1731	-0.1454

$$F_{b,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9730	1.0984	1.2286	1.2485	1.2976	1.3242
0.2	0.9730	1.0984	1.2286	1.2485	1.2976	1.3242
0.4	1.0712	1.1113	1.1461	1.1632	1.1528	1.1360
0.6	0.9063	0.9900	1.0651	1.0628	1.0805	1.0460
1.0	0.9630	0.9397	0.9141	0.9817	0.9545	0.9282

$$F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.0330	0.7910	0.4940	0.0470	-0.1670	-0.2040
0.2	1.0751	0.7354	0.4236	0.0203	-0.1959	-0.2071
0.4	0.9362	0.6660	0.4075	-0.0300	-0.2255	-0.1909
0.6	0.8513	0.6131	0.3680	-0.0692	-0.2545	-0.1897
1.0	0.8645	0.5532	0.2846	-0.1367	-0.3080	-0.2030

$$F_{p,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9730	1.0415	1.1281	0.9955	0.9296	0.7892
0.2	0.9730	1.0415	1.1281	0.9955	0.9296	0.7892
0.4	1.0712	1.0423	1.0061	0.8845	0.7439	0.6237
0.6	0.9063	0.9261	0.9292	0.7972	0.6882	0.5717
1.0	0.9630	0.8786	0.7949	0.7410	0.6210	0.5275

Table A2.1-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Inner Surface of a Cylinder
(c) $R/t = 2.5$

$$F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1270	1.1330	1.1690	1.3110	1.5210	1.9240
0.2	1.0785	1.0753	1.0721	1.1808	1.3045	1.6294
0.4	0.9383	1.0065	1.0747	1.1131	1.1846	1.3759
0.6	0.8530	0.9499	1.0468	1.0785	1.1358	1.2624
1.0	0.8639	0.9025	0.9411	1.0529	1.0947	1.1878

$$F_{m,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9840	1.1249	1.2658	1.3407	1.4600	1.5733
0.2	0.9840	1.1249	1.2658	1.3407	1.4600	1.5733
0.4	1.0755	1.1444	1.2133	1.2969	1.3900	1.5219
0.6	0.9085	1.0214	1.1343	1.2080	1.3264	1.4216
1.0	0.9644	0.9715	0.9786	1.1272	1.1900	1.2802

$$F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1270	0.9610	0.8530	0.6640	0.4770	0.2440
0.2	1.0785	0.9502	0.8113	0.6174	0.3893	0.1795
0.4	0.9383	0.8820	0.8091	0.5570	0.3061	0.0425
0.6	0.8530	0.8274	0.7768	0.5162	0.2536	-0.3440
1.0	0.8639	0.7761	0.6800	0.4634	0.1740	-0.1406

$$F_{b,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9840	1.0954	1.2133	1.1992	1.2361	1.1810
0.2	0.9840	1.0954	1.2133	1.1992	1.2361	1.1810
0.4	1.0755	1.1083	1.1364	1.1294	1.1046	1.0692
0.6	0.9085	0.9878	1.0588	1.0421	1.0409	0.9921
1.0	0.9644	0.9391	0.9113	0.9732	0.9384	0.9085

$$F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1270	0.6630	0.4250	0.0340	-0.1920	-0.2050
0.2	1.0785	0.7273	0.4086	-0.0041	-0.2144	-0.2043
0.4	0.9383	0.6612	0.3981	-0.0440	-0.2402	-0.2010
0.6	0.8530	0.6110	0.3628	-0.0782	-0.2633	-0.2051
1.0	0.8639	0.5540	0.2850	-0.1412	-0.3155	-0.2203

$$F_{p,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.9840	1.0388	1.1166	0.9695	0.9021	0.7536
0.2	0.9840	1.0388	1.1166	0.9695	0.9021	0.7536
0.4	1.0755	1.0396	0.9988	0.8660	0.7272	0.6018
0.6	0.9085	0.9241	0.9242	0.7850	0.6707	0.5514
1.0	0.9644	0.8779	0.7924	0.7347	0.6108	0.5159

Table A2.1-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Inner Surface of a Cylinder
(d) $R/t = 1.667$

$$F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1360	1.1240	1.1400	1.2460	1.4270	1.8110
0.2	1.0789	1.0663	1.0537	1.1444	1.2779	1.6567
0.4	0.9388	1.0011	1.0634	1.0916	1.1718	1.4277
0.6	0.8542	0.9479	1.0416	1.0691	1.1343	1.3096
1.0	0.8648	0.9048	0.9448	1.0594	1.1081	1.2378

$$F_{m,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.0991	1.1219	1.2529	1.3040	1.3950	1.4828
0.2	0.0991	1.1219	1.2529	1.3040	1.3950	1.4828
0.4	1.0785	1.1412	1.2039	1.2662	1.3389	1.4697
0.6	0.9104	1.0191	1.1278	1.1911	1.2918	1.3846
1.0	0.9686	0.9722	0.9758	1.1195	1.1745	1.2658

$$F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1360	0.9500	0.8280	0.6210	0.4260	0.1970
0.2	1.0789	0.9417	0.7952	0.5890	0.3655	0.2958
0.4	0.9388	0.8769	0.7989	0.5396	0.2928	0.0471
0.6	0.8542	0.8254	0.7718	0.5072	0.2468	-0.0294
1.0	0.8648	0.7780	0.6823	0.4646	0.1741	-0.1365

$$F_{b,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.0991	1.0925	1.2021	1.1725	1.1850	1.1121
0.2	0.0991	1.0925	1.2021	1.1725	1.1850	1.1121
0.4	1.0785	1.1053	1.1282	1.1059	1.0701	1.0337
0.6	0.9104	0.9856	1.0530	1.0288	1.0162	0.9624
1.0	0.9686	0.9396	0.9086	0.9663	0.9254	0.8913

$$F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	1.1360	0.6710	0.4080	0.0130	-0.2010	-0.2080
0.2	1.0789	0.7198	0.3963	-0.0203	-0.2280	-0.1566
0.4	0.9388	0.6566	0.3901	-0.0544	-0.2491	-0.2129
0.6	0.8542	0.6091	0.3582	-0.0854	-0.2706	-0.2149
1.0	0.8648	0.5553	0.2853	-0.1450	-0.3226	-0.2299

$$F_{p,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$\frac{a}{c} \backslash \frac{a}{t}$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.0991	1.0362	1.1081	0.9568	0.8840	0.6914
0.2	0.0991	1.0362	1.1081	0.9568	0.8840	0.6914
0.4	1.0785	1.0369	0.9924	0.8527	0.7129	0.5882
0.6	0.9104	0.9221	0.9195	0.7769	0.6588	0.5366
1.0	0.9686	0.8783	0.7899	0.7292	0.6022	0.5039

Table A2.2-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Outer Surface of a Cylinder

(a) $R/t = 10.0$ $F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0683	1.1005	1.1327	1.3773	1.6439	1.9654
0.4	0.9320	1.0206	1.1092	1.2049	1.3256	1.4221
0.6	0.8489	0.9551	1.0613	1.1192	1.1875	1.2240
1.0	0.8656	0.8983	0.9310	1.0353	1.0586	1.0751

 $F_{m,C} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4285	0.5061	0.5837	0.6765	0.8331	0.9899
0.4	0.6743	0.7286	0.7829	0.8886	1.0444	1.2340
0.6	0.7003	0.7956	0.8909	0.9839	1.1434	1.2974
1.0	0.9610	0.9730	0.9850	1.1489	1.2377	1.3656

 $F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0683	0.9738	0.8640	0.7633	0.6051	0.3693
0.4	0.9320	0.8954	0.8398	0.6279	0.4037	0.1057
0.6	0.8489	0.8326	0.7908	0.5516	0.2998	-0.0113
1.0	0.8656	0.7727	0.6735	0.4608	0.1765	-0.1380

 $F_{b,C} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4285	0.4928	0.5580	0.5938	0.6629	0.6851
0.4	0.6743	0.7054	0.7325	0.7662	0.8055	0.8318
0.6	0.7003	0.7693	0.8311	0.8449	0.8853	0.8906
1.0	0.9610	0.9406	0.9176	0.9924	0.9773	0.9764

 $F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0683	0.7479	0.4475	0.0693	-0.1455	-0.1582
0.4	0.9320	0.6731	0.4221	-0.0048	-0.2020	-0.1699
0.6	0.8489	0.6161	0.3755	-0.0539	-0.2371	-0.1802
1.0	0.8656	0.5520	0.2838	-0.1296	-0.2938	-0.1936

 $F_{p,C} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4285	0.4672	0.5110	0.4636	0.4399	0.3722
0.4	0.6743	0.6615	0.6423	0.5760	0.4987	0.4211
0.6	0.7003	0.7195	0.7247	0.6305	0.5535	0.4679
1.0	0.9610	0.8795	0.7983	0.7494	0.6350	0.5506

Table A2.2-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Outer Surface of a Cylinder

(b) $R/t = 5.0$

$$F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0699	1.1039	1.1379	1.3805	1.6487	1.9931
0.4	0.9325	1.0226	1.1127	1.2096	1.3424	1.4639
0.6	0.8489	0.9558	1.0627	1.1205	1.1921	1.2472
1.0	0.8663	0.8976	0.9289	1.0295	1.0509	1.0651

$$F_{m,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4298	0.5061	0.5824	0.6598	0.7602	0.8730
0.4	0.6752	0.7290	0.7828	0.8818	1.0098	1.1765
0.6	0.7006	0.7961	0.8916	0.9805	1.1307	1.2750
1.0	0.9609	0.9731	0.9853	1.1463	1.2309	1.3449

$$F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0699	0.9769	0.8685	0.7657	0.6067	0.3854
0.4	0.9325	0.8972	0.8430	0.6319	0.4136	0.1299
0.6	0.8489	0.8332	0.7923	0.5535	0.3048	0.0062
1.0	0.8663	0.7721	0.6720	0.4583	0.1764	-0.1317

$$F_{b,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4298	0.4927	0.5570	0.5817	0.6190	0.6319
0.4	0.6752	0.7059	0.7325	0.7615	0.7831	0.8014
0.6	0.7006	0.7697	0.8319	0.8428	0.8782	0.8785
1.0	0.9609	0.9407	0.9180	0.9909	0.9742	0.9639

$$F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0699	0.7507	0.4508	0.0704	-0.1466	-0.1743
0.4	0.9325	0.6748	0.4247	-0.0022	-0.1959	-0.1650
0.6	0.8489	0.6168	0.3770	-0.0518	-0.2338	-0.1683
1.0	0.8663	0.5516	0.2833	-0.1285	-0.2900	-0.1802

$$F_{p,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4298	0.4671	0.5103	0.4580	0.4304	0.3691
0.4	0.6752	0.6619	0.6423	0.5741	0.4912	0.4160
0.6	0.7006	0.7199	0.7254	0.6301	0.5525	0.4664
1.0	0.9609	0.8796	0.7988	0.7494	0.6356	0.5477

Table A2.2-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-elliptical Crack on the Outer Surface of a Cylinder

(c) $R/t = 2.5$ $F_{m,A} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0719	1.1094	1.1469	1.3929	1.6849	2.1515
0.4	0.9329	1.0257	1.1185	1.2195	1.3634	1.5500
0.6	0.8489	0.9568	1.0647	1.1232	1.2015	1.2768
1.0	0.8675	0.8964	0.9253	1.0200	1.0372	1.0503

 $F_{m,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4315	0.5059	0.5803	0.6370	0.7104	0.7279
0.4	0.6766	0.7296	0.7826	0.8720	0.9893	1.1252
0.6	0.7013	0.7968	0.8923	0.9753	1.1119	1.2408
1.0	0.9609	0.9733	0.9857	1.1423	1.2195	1.3324

 $F_{b,A} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0719	0.9821	0.8762	0.7744	0.6261	0.5559
0.4	0.9329	0.9002	0.8483	0.6400	0.4294	0.1776
0.6	0.8489	0.8343	0.7944	0.5570	0.3142	0.0312
1.0	0.8675	0.7711	0.6695	0.4544	0.1759	-0.1194

 $F_{b,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4315	0.4926	0.5552	0.5653	0.5896	0.5396
0.4	0.6766	0.7065	0.7323	0.7546	0.7725	0.7747
0.6	0.7013	0.7705	0.8325	0.8395	0.8677	0.8618
1.0	0.9609	0.9409	0.9185	0.9887	0.9687	0.9621

 $F_{p,A} \cdot Q^{0.5}$

$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	1.0719	0.7552	0.4564	0.0742	-0.1441	-0.1161
0.4	0.9329	0.6775	0.4289	0.0026	-0.1927	-0.1563
0.6	0.8489	0.6179	0.3792	-0.0483	-0.2281	-0.1670
1.0	0.8675	0.5509	0.2825	-0.1267	-0.2836	-0.1779

 $F_{p,C} \cdot (Qc/a)^{0.5}$

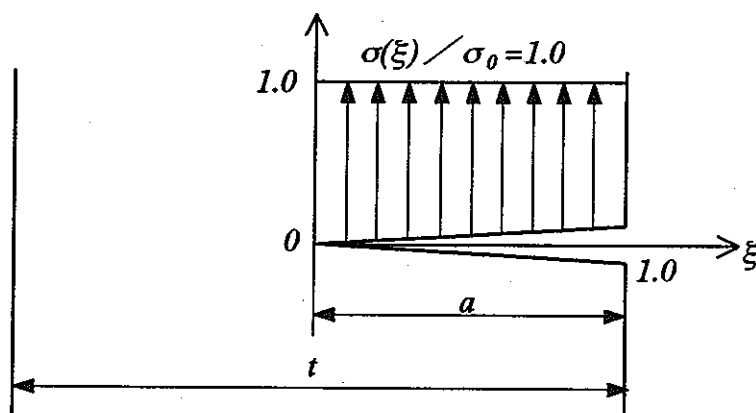
$a/c \backslash a/t$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	0.4315	0.4670	0.5091	0.4502	0.4211	0.3244
0.4	0.6766	0.6624	0.6424	0.5713	0.4905	0.4121
0.6	0.7013	0.7206	0.7261	0.6293	0.5508	0.4651
1.0	0.9609	0.8798	0.7995	0.7495	0.6361	0.5522

Table A2.3-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circular Crack on the Inner Surface of a Cylinder

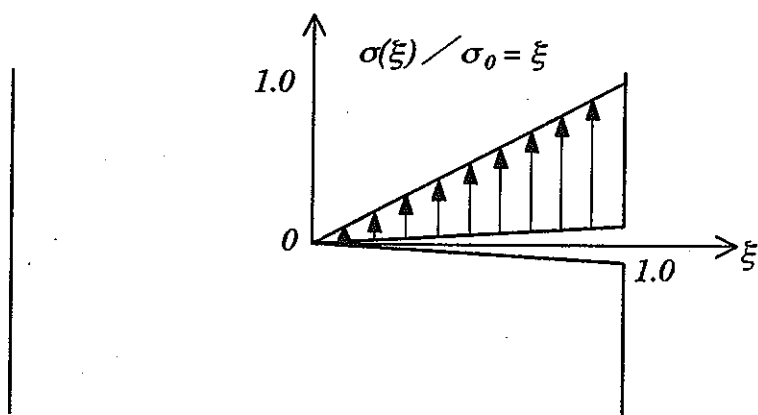
R/t	a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10.0	F_m	1.1200	1.1420	1.2170	1.3835	1.5500	1.7950	2.0400	2.3240	2.6740	3.2740
	F_b	1.1200	1.0090	0.9360	0.9095	0.8830	0.8485	0.8140	0.7260	0.6000	0.4500
	F_p	1.1200	0.7730	0.4990	0.3095	0.1200	0.0005	-0.1190	-0.1970	-0.2180	-0.1020
9.0	F_m	1.1200	1.1580	1.2530	1.3920	1.5680	1.7790	2.0250	2.2710	2.5170	2.7630
	F_b	1.1200	1.0178	0.9576	0.9170	0.8820	0.8440	0.7962	0.7484	0.7006	0.6528
	F_p	1.1200	0.7696	0.5009	0.2846	0.1092	-0.0269	-0.1194	-0.2119	-0.3044	-0.3969
4.0	F_m	1.1200	1.1380	1.1980	1.2861	1.3969	1.5291	1.6880	1.8469	2.0058	2.1647
	F_b	1.1200	0.9994	0.9112	0.8355	0.7625	0.6859	0.6030	0.5201	0.4372	0.3543
	F_p	1.1200	0.7541	0.4688	0.2397	0.0585	-0.0759	-0.1624	-0.2489	-0.3354	-0.4219
2.3333	F_m	1.1200	1.1190	1.1500	1.2030	1.2750	1.3660	1.4880	1.6100	1.7320	1.8540
	F_b	1.1200	0.9819	0.8708	0.7716	0.6774	0.5834	0.4870	0.3906	0.2942	0.1978
	F_p	1.1200	0.7393	0.4409	0.2044	0.0226	-0.1071	-0.1870	-0.2669	-0.3468	-0.4267

Table A2.4-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Circular Crack on the Outer Surface of a Cylinder

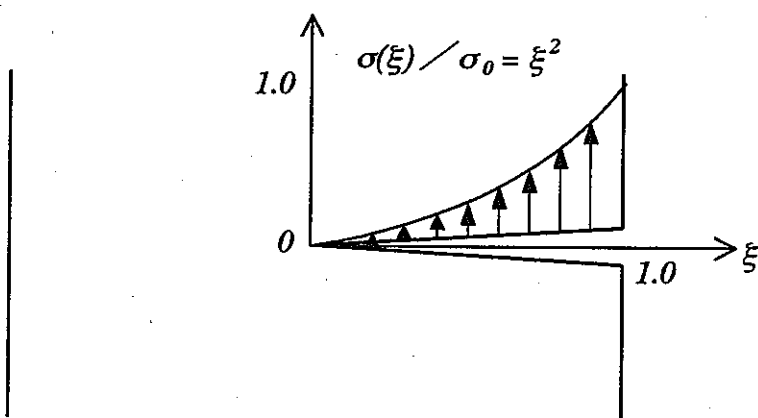
R/t	a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
9.0	F_m	1.1248	1.1735	1.2846	1.4425	1.6406	1.8782	2.1529	2.4276	2.7023	2.9770
	F_b	1.1110	1.0320	0.9844	0.9561	0.9328	0.9072	0.8673	0.8274	0.7875	0.7476
	F_p	1.0838	0.7815	0.5193	0.3065	0.1309	-0.0065	-0.1055	-0.2045	-0.3035	-0.4025
4.0	F_m	1.1245	1.1692	1.2608	1.3815	1.5328	1.7090	1.9179	2.1268	2.3357	2.5446
	F_b	1.1107	1.0281	0.9642	0.9112	0.8572	0.7988	0.7321	0.6654	0.5987	0.5320
	F_p	1.0836	0.7782	0.5056	0.2817	0.0985	-0.0421	-0.1365	-0.2309	-0.3253	-0.4197
2.3333	F_m	1.1241	1.1680	1.2471	1.3498	1.4752	1.6268	1.8180	2.0092	2.2004	2.3916
	F_b	1.1104	1.0270	0.9527	0.8846	0.8166	0.7458	0.6718	0.5978	0.5238	0.4498
	F_p	1.0831	0.7774	0.4978	0.2666	0.0805	-0.0600	-0.1536	-0.2472	-0.3408	-0.4344



(a) Uniform



(b) Linear



(c) Parabolic

Fig.A2.1-1 Stress distribution on the crack surface

A3. 軸方向き裂付き円筒

A3.1 内面軸方向半楕円表面き裂付き円筒

深さ a 、長さ $2c$ の内面軸方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_{m,A} + \sigma_b \cdot F_{b,A} + \sigma_p \cdot F_{p,A}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A3.1-1 a)$$

$$K_C = (\sigma_m \cdot F_{m,C} + \sigma_b \cdot F_{b,C} + \sigma_p \cdot F_{p,C}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (A3.1-1 b)$$

無次元応力拡大係数 $F_{m,A}$ 、 $F_{b,A}$ 、 $F_{p,A}$ 、 $F_{m,C}$ 、 $F_{b,C}$ 、 $F_{p,C}$ については、以下に示すRajuとNewmanによる解を用いる。

RajuとNewmanは、円筒内面の軸方向半楕円表面き裂について、パラメトリックな有限要素解析を実施し、き裂面に0～3次の圧力分布与えられた場合の応力拡大係数解を示した[A3.1]。

$$F_{m,A} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,A} \quad (A3.1-2 a)$$

$$F_{m,C} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,C} \quad (A3.1-2 b)$$

$$F_{b,A} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,A} - 2 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,A} \quad (A3.1-3 a)$$

$$F_{b,C} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,C} - 2 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,C} \quad (A3.1-3 b)$$

$$F_{p,A} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,A} - 6 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,A} + 6 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot G_{2,A} \quad (A3.1-4 a)$$

$$F_{p,C} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,C} - 6 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,C} + 6 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot G_{2,C} \quad (A3.1-4 b)$$

ここで、 $G_{0,j}$ は影響係数と呼ばれる。添字 m 、 b 、 p は、それぞれ膜応力、曲げ応力、放物線ピーク応力に対応することを示し、添字 A 、 C は、それぞれき裂最深部、き裂表面部の値であることを示す。影響係数 $G_{0,j}$ およびき裂の最深部・表面部における無次元応力拡大係数値をTable A3.1-1に示す。

本手法では、これらの表に示した離散値を、

$$4.0 \leq R/t \leq 10.0$$

$$0.0 < a/t < 1.0$$

$$0.0 < a/c \leq 1.0$$

の領域に内挿あるいは外挿する以下の多項式を用いる． $a/c \rightarrow 0.0$ への外挿については，A3.3節に示す内面軸方向片側き裂に対する応力拡大係数解[A3.2, A3.3]を用いて外挿を行った．

$$F_{m,A} = \frac{M_{A1} + M_{A2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_{A3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{Q}} \quad (\text{A3.1-5})$$

$$F_{m,C} = \left\{ M_{C1} + M_{C2} \cdot \frac{a}{t} + M_{C3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \cdot \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (\text{A3.1-6})$$

$$F_{b,A} = \left\{ B_{A1} + B_{A2} \cdot \frac{a}{t} + B_{A3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \quad (\text{A3.1-7})$$

$$F_{b,C} = \left\{ B_{C1} + B_{C2} \cdot \frac{a}{t} + B_{C3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,C} \quad (\text{A3.1-8})$$

$$F_{p,A} = \left\{ P_{A1} + P_{A2} \cdot \frac{a}{t} + P_{A3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \quad (\text{A3.1-9})$$

$$F_{p,C} = \left\{ P_{C1} + P_{C2} \cdot \frac{a}{t} + P_{C3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,C} \quad (\text{A3.1-10})$$

係数 M_{A1} ， M_{A2} ， M_{A3} ， M_{C1} ， M_{C2} ， M_{C3} ， B_{A1} ， B_{A2} ， B_{A3} ， B_{C1} ， B_{C2} ， B_{C3} ， P_{A1} ， P_{A2} ， P_{A3} ， P_{C1} ， P_{C2} ， P_{C3} の値を，Table A3.1-2に示す．

なお，正確には，(A3.1-2)～(A3.1-4)式によって与えられる無次元応力拡大係数解は，2個のき裂が円筒内面に 180° 離れて位置する場合について求められたものである．一般に円筒の軸方向き裂では，単独き裂の場合よりも応力拡大係数値は大きくなる．

A3.2 外面軸方向半楕円表面き裂付き円筒

深さ a 、長さ $2c$ の外面軸方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_{m,A} + \sigma_b \cdot F_{b,A} + \sigma_p \cdot F_{p,A}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A3.2-1 a})$$

$$K_C = (\sigma_m \cdot F_{m,C} + \sigma_b \cdot F_{b,C} + \sigma_p \cdot F_{p,C}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A3.2-1 b})$$

無次元応力拡大係数 $F_{m,A}$ 、 $F_{b,A}$ 、 $F_{p,A}$ 、 $F_{m,C}$ 、 $F_{b,C}$ 、 $F_{p,C}$ については、以下に示すRajuとNewmanによる解を用いる。

RajuとNewmanは、円筒内面の軸方向半楕円表面き裂について、パラメトリックな有限要素解析を実施し、き裂面に0～3次の圧力分布与えられた場合の応力拡大係数解を示した[A3.1]。

$$F_{m,A} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,A} \quad (\text{A3.2-2 a})$$

$$F_{m,C} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,C} \quad (\text{A3.2-2 b})$$

$$F_{b,A} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,A} - 2 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,A} \quad (\text{A3.2-3 a})$$

$$F_{b,C} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,C} - 2 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,C} \quad (\text{A3.2-3 b})$$

$$F_{p,A} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,A} - 6 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,A} + 6 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot G_{2,A} \quad (\text{A3.2-4 a})$$

$$F_{p,C} \cdot \sqrt{Q} = G_{0,C} - 6 \cdot \frac{a}{t} \cdot G_{1,C} + 6 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot G_{2,C} \quad (\text{A3.2-4 b})$$

ここで、 $G_{0,j}$ は影響係数と呼ばれる。添字 m 、 b 、 p は、それぞれ膜応力、曲げ応力、放物線ピーク応力に対応することを示し、添字 A 、 C は、それぞれき裂最深部、き裂表面部の値であることを示す。影響係数 $G_{0,j}$ およびき裂の最深部・表面部における無次元応力拡大係数値をTable A3.2-1に示す。

本手法では、これらの表に示した離散値を、

$$4.0 \leq R/t \leq 10.0$$

$$0.0 < a/t < 1.0$$

$$0.0 < a/c \leq 1.0$$

の領域に内挿あるいは外挿する以下の多項式を用いる。 $a/c \rightarrow 0.0$ への外挿については、A3.4 節に示す外面軸方向片側き裂に対する応力拡大係数解[A3.2]を用いて外挿を行った。

$$F_{m,A} = \frac{M_{A1} + M_{A2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_{A3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{Q}} \quad (\text{A3.2-5})$$

$$F_{m,C} = \left\{ M_{C1} + M_{C2} \cdot \frac{a}{t} + M_{C3} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \cdot \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (\text{A3.2-6})$$

$$F_{b,A} = \left\{ 1 + B_{A1} \cdot \frac{a}{t} + B_{A2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \quad (\text{A3.2-7})$$

$$F_{b,C} = \left\{ 1 + B_{C1} \cdot \frac{a}{t} + B_{C2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,C} \quad (\text{A3.2-8})$$

$$F_{p,A} = \left\{ 1 + P_{A1} \cdot \frac{a}{t} + P_{A2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,A} \quad (\text{A3.2-9})$$

$$F_{p,C} = \left\{ 1 + P_{C1} \cdot \frac{a}{t} + P_{C2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right\} \cdot F_{m,C} \quad (\text{A3.2-10})$$

係数 M_{A1} , M_{A2} , M_{A3} , M_{C1} , M_{C2} , M_{C3} , B_{A1} , B_{A2} , B_{C1} , B_{C2} , P_{A1} , P_{A2} , P_{C1} , P_{C2} の値を、Table A3.2-2に示す。

なお、正確には、(A3.2-2)～(A3.2-4)式によって与えられる無次元応力拡大係数解は、2個のき裂が円筒内面に 180° 離れて位置する場合について求められたものである。一般に円筒の軸方向き裂では、単独き裂の場合よりも応力拡大係数値は大きくなる。

A3.3 内面軸方向片側き裂付き円筒

深さ a の内面軸方向片側き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数 K_A は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_m + \sigma_b \cdot F_b + \sigma_p \cdot F_p) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A3.3-1})$$

無次元応力拡大係数 F_m 、 F_b 、 F_p については、以下に示すXue-Ren Wuによる重み関数解[A3.2]およびLabbensらによる重み関数解[A3.3]をもとに計算した値を用いる。

Xue-Ren Wuは、円筒内面の軸方向片側き裂に対して変位分布解；

$$u_{ref}(x, a) = \frac{\{4F_{ref} \cdot a^{0.5} \cdot (a-x)^{0.5} + G \cdot a^{-0.5} \cdot (a-x)^{1.5}\} \sigma_0}{E^* \sqrt{2}} \quad (\text{A1.2-8 再})$$

を仮定し、既知の参照応力拡大係数解を用いて、重み関数の数値解を求めた。これをもとに、膜応力・曲げ応力・放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数値を計算した。なお、その適用範囲は、

$$\text{円筒形状} \quad 1.0 \leq R/t \leq 4.0$$

$$\text{き裂深さ} \quad 0.0 < a/t < 1.0$$

である。

さらに、Labbensらは、円筒内面の軸方向片側き裂の重み関数解を求め、これを用いてき裂面に0～3次の圧力分布が作用する場合の無次元応力拡大係数値を求めた。これらの数値をもとに、膜応力・曲げ応力・放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数値を計算した。なお、その適用範囲は、

$$\text{円筒形状} \quad R/t = 10.0$$

$$\text{き裂深さ} \quad 0.0 < a/t < 1.0$$

である。

本手法では、Xue-Ren Wuの解とLabbensらの解をつなぎ合わせて、Table A3.3-1のとおり、無次元応力拡大係数を整理した。

内挿および外挿について、本手法では、 $a/t \leq 0.6$ の領域では a/t について線形内挿、 $0.6 < a/t$

<1.0の領域では a/t について放物線内外挿, さらに R/t については全定義域について線形内挿することを推奨する. また, R/t について範囲外への外挿は推奨しない.

A3.4 外面軸方向片側き裂付き円筒

深さ a の外面軸方向片側き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に、膜応力 σ_m 、曲げ応力 σ_b 、放物線ピーク応力 σ_p が作用する場合の応力拡大係数 K_A は、次式で与えられる。

$$K_A = (\sigma_m \cdot F_m + \sigma_b \cdot F_b + \sigma_p \cdot F_p) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{A3.4-1})$$

無次元応力拡大係数 F_m 、 F_b 、 F_p については、以下に示すXue-Ren Wuによる重み関数解をもとに計算した値を用いる[A3.2]。

Xue-Ren Wuは、円筒外面の軸方向片側き裂に対して変位分布解；

$$u_{ref}(x, a) = \frac{\{4F_{ref} \cdot a^{0.5} \cdot (a-x)^{0.5} + G \cdot a^{-0.5} \cdot (a-x)^{1.5}\} \cdot \sigma_0}{E^* \sqrt{2}} \quad (\text{A1.2-8 再})$$

を仮定し、既知の参照応力拡大係数解を用いて、重み関数の数値解を求めた。これをもとに、膜応力・曲げ応力・放物線ピーク応力に対する無次元応力拡大係数値をTable A3.4-1のように求めた。なお、その適用範囲は、

$$\text{円筒形状} \quad 1.0 \leq R/t \leq 4.0$$

$$\text{き裂深さ} \quad 0.0 < a/t < 1.0$$

である。

内挿および外挿について、本手法では、 $a/t \leq 0.6$ の領域では a/t について線形内挿、 $0.6 < a/t < 1.0$ の領域では a/t について放物線内外挿、さらに R/t については全定義域について線形内挿することを推奨する。また、 R/t について範囲外への外挿は推奨しない。

A3.5 軸方向貫通き裂付き円筒

軸方向貫通き裂付き円筒に対しては、曲げ応力および放物線ピーク応力の影響は無視できるものとする。

長さ $2c$ の軸方向貫通き裂を有する平均半径 R_m ，板厚 t の円筒に対する応力拡大係数 K_C は，次式で与えられる。

$$K_C = \sigma_m \cdot F_m \cdot \sqrt{\pi \cdot c} \quad (\text{A3.5-1})$$

無次元応力拡大係数 F_m としては、内圧を受ける円筒の軸方向貫通き裂に対して、*Tada*と*Paris*によって与えられた次式[A3.4]を用いる。

$0 < \lambda \leq 1$ に対して；

$$F_m = \sqrt{1 + 1.25\lambda^2} \quad (\text{A3.5-2 a})$$

$1 < \lambda \leq 5$ に対して；

$$F_m = 0.6 + 0.9\lambda \quad (\text{A3.5-2 b})$$

ここで、 λ は次式で与えられる形状パラメータである。

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{R_m \cdot t}} \quad (\text{A3.5-3})$$

[参考文献]

[A3.1] I.S.Raju and J.C.Newman,Jr., *Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels*, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.104, pp.293-298, Nov. 1982.

[A3.2] Xue-Ren Wu and A.J.Carlsson, *Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions*, 1991, ISBN 0-08-041702-7, PERGAMON PRESS.

[A3.3] R.Labbens et al., *Practical Method for Calculating Stress Intensity Factors Through Weight Functions*, ASTM STP 590, 1976, pp.368-384.

[A3.4] P.C.Paris and H.Tada, *The Application of Fracture Proof Design Methods Using Tearing Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through Wall Cracks*, NUREG/Cr-3464, Section II-1, 1983.

Table A3.1-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Crack on the Inner Surface of a Cylinder

(a) at the deepest point, $R/t = 10.0$

$R/t=10$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
G_0	0°	0.607	0.791	1.179	0.777	0.936	1.219	1.140	1.219	1.348
	90°	1.115	1.427	1.872	1.072	1.217	1.393	1.015	1.050	1.090
G_1	0°	0.079	0.138	0.253	0.125	0.176	0.259	0.197	0.221	0.255
	90°	0.673	0.783	0.960	0.672	0.723	0.806	0.715	0.729	0.760
G_2	0°	0.023	0.052	0.104	0.043	0.069	0.106	0.074	0.085	0.099
	90°	0.514	0.571	0.671	0.523	0.549	0.601	0.588	0.596	0.618

(b) at the deepest point, $R/t = 4.0$

$R/t=4$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
G_0	0°	0.606	0.797	1.201	0.770	0.924	1.219	1.128	1.191	1.316
	90°	1.097	1.405	1.959	1.057	1.193	1.443	1.090	1.041	1.105
G_1	0°	0.079	0.141	0.262	0.123	0.174	0.263	0.194	0.214	0.248
	90°	0.666	0.776	0.996	0.666	0.715	0.828	0.713	0.726	0.768
G_2	0°	0.023	0.054	0.108	0.042	0.068	0.109	0.072	0.082	0.097
	90°	0.511	0.567	0.692	0.520	0.545	0.614	0.588	0.594	0.623

Table A3.1-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Crack on the Inner Surface of a Cylinder

(c) at the surface point, $R/t = 10.0$

$R/t=10$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{m,A} Q^{0.5}$		1.115	1.427	1.872	1.072	1.217	1.393	1.015	1.050	1.090
$F_{m,C} Q^{0.5}$		0.607	0.791	1.179	0.777	0.936	1.219	1.140	1.219	1.348
$F_{b,A} Q^{0.5}$		0.846	0.644	0.336	0.803	0.494	0.103	0.729	0.321	-0.126
$F_{b,C} Q^{0.5}$		0.575	0.653	0.774	0.727	0.760	0.805	1.061	0.998	0.940
$F_{p,A} Q^{0.5}$		0.431	-0.066	-0.159	0.391	-0.129	-0.168	0.298	-0.243	-0.185
$F_{p,C} Q^{0.5}$		0.518	0.455	0.364	0.637	0.512	0.383	0.921	0.684	0.504

(d) at the surface point, $R/t = 4.0$

$R/t=4$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{m,A} Q^{0.5}$		1.097	1.405	1.959	1.057	1.193	1.443	1.090	1.041	1.105
$F_{m,C} Q^{0.5}$		0.606	0.797	1.201	0.770	0.924	1.219	1.128	1.191	1.316
$F_{b,A} Q^{0.5}$		0.831	0.629	0.365	0.791	0.478	0.118	0.805	0.315	-0.124
$F_{b,C} Q^{0.5}$		0.574	0.656	0.782	0.721	0.750	0.798	1.050	0.977	0.919
$F_{p,A} Q^{0.5}$		0.420	-0.073	-0.165	0.383	-0.135	-0.174	0.376	-0.246	-0.189
$F_{p,C} Q^{0.5}$		0.517	0.455	0.358	0.632	0.504	0.375	0.912	0.672	0.498

Table A3.1-2 Fitting Coefficients for Long Crack on the Inner Surface of a Cylinder

(a) $R/t = 10.0$

$R/t=10$	$0.0 < a/t \leq 0.5$				$0.5 < a/t < 1.0$			
a/c	0.0	0.2	0.4	1.0	0.0	0.2	0.4	1.0
M_{A1}	1.12180	1.04983	1.04039	1.00726	1.12180	1.04983	1.04039	1.00726
M_{A2}	4.55806	1.65231	0.80609	0.19765	4.55806	1.65231	0.80609	0.19765
M_{A3}	3.69271	-0.57448	-0.39866	-0.10684	3.69271	-0.57448	-0.39866	-0.10684
M_{C1}	1.28399	1.28399	1.15354	1.11903	1.28399	1.28399	1.15354	1.11903
M_{C2}	-0.49641	-0.49641	-0.14593	-0.02158	-0.49641	-0.49641	-0.14593	-0.02158
M_{C3}	0.81472	0.81472	0.54194	0.21083	0.81472	0.81472	0.54194	0.21083
B_{A1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00640	0.98341	0.98412	0.98831
B_{A2}	-1.06887	-1.06887	-1.29870	-1.42260	-1.21200	-1.16311	-1.18756	-1.34078
B_{A3}	0.21933	0.21933	0.22100	0.06800	0.48000	0.19778	0.06222	-0.04889
B_{C1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00228	1.00228	1.00244	1.00014
B_{C2}	-0.20650	-0.20650	-0.28600	-0.33577	-0.22244	-0.22244	-0.30311	-0.33678
B_{C3}	-0.28500	-0.28500	-0.18000	-0.05367	-0.26222	-0.26222	-0.15556	-0.05222
P_{A1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.53000	0.89403	0.93189	0.96954
P_{A2}	-3.29667	-3.29667	-3.81950	-4.24480	-1.38167	-2.97567	-3.34272	-4.03161
P_{A3}	2.80833	2.80833	3.21500	3.56400	0.85833	2.19000	2.53389	3.25944
P_{C1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.04537	1.04537	1.02389	1.00554
P_{C2}	-0.65527	-0.65527	-0.89767	-1.01563	-0.97283	-0.97283	-1.06489	-1.05444
P_{C3}	-0.38867	-0.38867	-0.01667	0.27567	0.06500	0.06500	0.22222	0.33111

Table A3.1-2(contd.) Fitting Coefficients for Long Crack on the Inner Surface of a Cylinder

(b) $R/t = 4.0$

$R/t=4$	$0.0 < a/t \leq 0.5$				$0.5 < a/t < 1.0$			
a/c	0.0	0.2	0.4	1.0	0.0	0.2	0.4	1.0
M_{A1}	1.12155	1.03756	1.03099	1.00310	1.12155	1.03756	1.03099	1.00310
M_{A2}	4.59444	1.48897	0.65081	0.14672	4.59444	1.48897	0.65081	0.14672
M_{A3}	1.44270	-0.07692	-0.01099	0.01954	1.44270	-0.07692	-0.01099	0.01954
M_{C1}	1.25158	1.25158	1.12455	1.11201	1.25158	1.25158	1.12455	1.11201
M_{C2}	-0.15863	-0.15863	0.09380	0.00663	-0.15863	-0.15863	0.09380	0.00663
M_{C3}	0.38467	0.38467	0.21267	0.11506	0.38467	0.38467	0.21267	0.11506
B_{A1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.87624	0.99092	0.99598	0.99416
B_{A2}	-1.21489	-1.28443	-1.29843	-1.42430	-0.08310	-1.22089	-1.27028	-1.38339
B_{A3}	0.47324	0.35967	0.19967	0.05900	0.20046	0.26889	0.15944	0.00056
B_{C1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00332	1.00332	1.00153	0.99830
B_{C2}	-0.20413	-0.20413	-0.27893	-0.33623	-0.22739	-0.22739	-0.28967	-0.32433
B_{C3}	-0.29933	-0.29933	-0.19533	-0.04633	-0.26611	-0.26611	-0.18000	-0.06333
P_{A1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.74445	0.89656	0.93936	1.97587
P_{A2}	-3.96438	-3.73983	-3.82990	-4.24827	-7.04132	-3.01572	-3.40539	-4.07233
P_{A3}	2.48072	3.27167	3.20700	3.55133	5.65782	2.23722	2.60056	3.30000
P_{C1}	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.04646	1.04646	1.02511	1.00387
P_{C2}	-0.65203	-0.65203	-0.88733	-1.01477	-0.97722	-0.97722	-1.06311	-1.04183
P_{C3}	-0.41233	-0.41233	-0.04333	0.28633	0.05222	0.05222	0.20778	0.32500

Table A3.2-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Crack on the Outer Surface of a Cylinder

(a) at the deepest point, $R/t = 10.0$

$R/t=10$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
G_0	0°	0.612	0.806	1.262	0.788	0.984	1.378	1.156	1.266	1.453
	90°	1.147	1.584	2.298	1.096	1.310	1.565	1.025	1.078	1.118
G_1	0°	0.080	0.142	0.277	0.128	0.192	0.309	0.202	0.236	0.286
	90°	0.685	0.839	1.099	0.680	0.755	0.858	0.718	0.738	0.765
G_2	0°	0.023	0.053	0.114	0.045	0.076	0.129	0.076	0.092	0.113
	90°	0.521	0.600	0.739	0.528	0.565	0.625	0.590	0.600	0.619

(b) at the deepest point, $R/t = 4.0$

$R/t=4$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
G_0	0°	0.612	0.786	1.160	0.793	0.994	1.400	1.163	1.286	1.498
	90°	1.162	1.640	2.510	1.109	1.360	1.727	1.030	1.094	1.156
G_1	0°	0.080	0.134	0.242	0.130	0.195	0.318	0.204	0.243	0.302
	90°	0.691	0.861	1.178	0.685	0.773	0.914	0.720	0.743	0.777
G_2	0°	0.023	0.049	0.097	0.045	0.078	0.134	0.077	0.096	0.122
	90°	0.524	0.613	0.782	0.530	0.575	0.653	0.591	0.603	0.625

Table A3.2-1(contd.) Non-dimensional Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Crack on the Outer Surface of a Cylinder

(c) at the surface point, $R/t = 10.0$

$R/t=10$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{m,A} Q^{0.5}$		1.147	1.584	2.298	1.096	1.310	1.565	1.025	1.078	1.118
$F_{m,C} Q^{0.5}$		0.612	0.806	1.262	0.788	0.984	1.378	1.156	1.266	1.453
$F_{b,A} Q^{0.5}$		0.873	0.745	0.540	0.824	0.555	0.192	0.738	0.340	-0.106
$F_{b,C} Q^{0.5}$		0.580	0.664	0.819	0.737	0.792	0.884	1.075	1.030	0.995
$F_{p,A} Q^{0.5}$		0.450	-0.033	-0.139	0.407	-0.108	-0.153	0.305	-0.236	-0.177
$F_{p,C} Q^{0.5}$		0.522	0.460	0.370	0.645	0.522	0.390	0.932	0.696	0.514

(d) at the surface point, $R/t = 4.0$

$R/t=4$	a/c	0.2			0.4			1.0		
	a/t	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{m,A} Q^{0.5}$		1.162	1.640	2.510	1.109	1.360	1.727	1.030	1.094	1.156
$F_{m,C} Q^{0.5}$		0.612	0.786	1.160	0.793	0.994	1.400	1.163	1.286	1.498
$F_{b,A} Q^{0.5}$		0.886	0.779	0.625	0.835	0.587	0.265	0.742	0.351	-0.087
$F_{b,C} Q^{0.5}$		0.580	0.652	0.773	0.741	0.799	0.891	1.081	1.043	1.015
$F_{p,A} Q^{0.5}$		0.459	-0.024	-0.142	0.414	-0.096	-0.153	0.308	-0.231	-0.174
$F_{p,C} Q^{0.5}$		0.522	0.458	0.371	0.648	0.526	0.388	0.937	0.701	0.517

Table A3.2-2 Fitting Coefficients for Long Crack on the Outer Surface of a Cylinder

	$R/t=10$				$R/t=4$			
a/c	0.0	0.2	0.4	1.0	0.0	0.2	0.4	1.0
M_{A1}	1.22240	1.05959	1.04915	1.01241	1.22240	1.07019	1.05695	1.01538
M_{A2}	4.60231	2.20187	1.19577	0.32480	4.60231	2.29815	1.31810	0.37523
M_{A3}	1.42494	-0.41696	-0.60868	-0.24970	1.42494	-0.07571	-0.42368	-0.24298
M_{C1}	1.31080	1.31080	1.18820	1.14040	1.28598	1.28598	1.17016	1.13922
M_{C2}	-0.75016	-0.75016	-0.42766	-0.15033	-0.61661	-0.61661	-0.31023	-0.13272
M_{C3}	0.80833	0.80833	0.85333	0.43666	0.37611	0.37611	0.56223	0.41056
B_{A1}	-1.19661	-1.24759	-1.26284	-1.38649	-1.19661	-1.25010	-1.27775	-1.39503
B_{A2}	0.45720	0.36391	0.20797	0.02253	0.45720	0.38935	0.27410	0.06346
B_{C1}	-0.20584	-0.20584	-0.28946	-0.33681	-0.21216	-0.21216	-0.28781	-0.33483
B_{C2}	-0.29146	-0.29146	-0.19881	-0.07102	-0.25636	-0.25636	-0.20810	-0.08546
P_{A1}	-3.22570	-3.38022	-3.58146	-4.13136	-3.22570	-3.35923	-3.55270	-4.11308
P_{A2}	2.48797	2.56830	2.76145	3.35447	2.48797	2.54884	2.74050	3.34434
P_{C1}	-0.58061	-0.58061	-0.97127	-1.04261	-0.76928	-0.76928	-0.97202	-1.04715
P_{C2}	-0.58493	-0.58493	0.09399	0.29354	-0.10141	-0.10141	0.08570	0.28555

Table A3.3-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Long Axial Crack on the Inner Surface of a Cylinder

R/t	a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
10.0	F_m	1.1200	1.1500	1.3300	1.6500	1.9700	2.5700	3.1700	4.2700	4.9350
	F_b	1.1200	1.0010	1.0570	1.1255	1.1940	1.3135	1.4330	1.7100	1.8180
	F_p	1.1200	0.7680	0.6020	0.4270	0.2520	0.1420	0.0320	-0.0570	-0.1015
4.0	F_m	1.1200	1.1688	1.3038	1.5066	1.7828	2.1332	2.5492	3.0152	3.2587
	F_b	1.1200	1.0277	1.0006	1.0054	1.0326	1.0700	1.0994	1.1006	1.0847
	F_p	1.1200	0.7779	0.5308	0.3336	0.1736	0.0464	-0.0482	-0.1012	-0.1055
2.0	F_m	1.1200	1.1473	1.2473	1.3902	1.5694	1.7713	1.9893	2.2402	2.3852
	F_b	1.1200	1.0079	0.9531	0.9158	0.8838	0.8417	0.7785	0.6960	0.6516
	F_p	1.1200	0.7613	0.4983	0.2840	0.1110	-0.0239	-0.1197	-0.1670	-0.1648
1.3333	F_m	1.1200	1.1269	1.1995	1.3012	1.4251	1.5647	1.7170	1.8953	2.0013
	F_b	1.1200	0.9891	0.9127	0.8476	0.7829	0.7107	0.6240	0.5233	0.4703
	F_p	1.1200	0.7454	0.4701	0.2469	0.0683	-0.0649	-0.1526	-0.1879	-0.1815
1.0	F_m	1.1200	1.1076	1.1567	1.2323	1.3245	1.4298	1.5518	1.7064	1.8042
	F_b	1.1200	0.9714	0.8765	0.7947	0.7131	0.6256	0.5298	0.4266	0.3636
	F_p	1.1200	0.7304	0.4449	0.2180	0.0396	-0.0912	-0.1732	-0.2016	-0.1938

Table A3.4-1 Non-dimensional Stress Intensity Factors for Long Axial Crack on the Outer Surface of a Cylinder

R/t	a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
4.0	F_m	1.1200	1.1873	1.3263	1.5372	1.8314	2.2205	2.7281	3.3653	3.7051
	F_b	1.1200	1.0458	1.0215	1.0310	1.0682	1.1233	1.1913	1.2633	1.2851
	F_p	1.1200	0.7951	0.5486	0.3509	0.1910	0.0599	-0.0415	-0.0967	-0.1031
3.0	F_m	1.1200	1.1892	1.3132	1.5047	1.7688	2.1083	2.5257	3.0271	3.3024
	F_b	1.1200	1.0475	1.0100	1.0057	1.0238	1.0525	1.0777	1.0873	1.0762
	F_p	1.1200	0.7964	0.5398	0.3366	0.1710	0.0377	-0.0639	-0.1247	-0.1332
2.0	F_m	1.1200	1.1856	1.3049	1.4742	1.6979	1.9773	2.3086	2.7025	2.9431
	F_b	1.1200	1.0442	1.0033	0.9826	0.9747	0.9701	0.9554	0.9203	0.8971
	F_p	1.1200	0.7938	0.5357	0.3244	0.1511	0.0129	-0.0884	-0.1493	-0.1601
1.3333	F_m	1.1200	1.1855	1.2930	1.4390	1.6261	1.8540	2.1288	2.4735	2.6825
	F_b	1.1200	1.0441	0.9934	0.9554	0.9245	0.8918	0.8512	0.8033	0.7781
	F_p	1.1200	0.7937	0.5291	0.3091	0.1297	-0.0120	-0.1128	-0.1647	-0.1675
1.0	F_m	1.1200	1.1854	1.2838	1.4160	1.5826	1.7862	2.0333	2.3450	2.5420
	F_b	1.1200	1.0440	0.9856	0.9378	0.8940	0.8486	0.7971	0.7378	0.7068
	F_p	1.1200	0.7936	0.5237	0.2996	0.1166	-0.0258	-0.1243	-0.1738	-0.1778

付録B. 正味断面形状関数

B1. 平板

B1.1 荷重制御引張を受ける平板

B1.1.1 荷重制御引張を受ける半楕円表面き裂付き平板

荷重制御引張を受ける深さ a 、長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する幅 $2w$ 、板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は、平板の断面積 A とき裂の面積 A_c ；

$$A = 2w \cdot t \quad (B1.1-1 a)$$

$$A_c = \frac{\pi \cdot a \cdot c}{2} \quad (B1.1-1 b)$$

を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{A}{A - A_c} = \frac{4w \cdot t}{4w \cdot t - \pi \cdot a \cdot c} \quad (B1.1-2)$$

B1.1.2 荷重制御引張を受ける片側き裂付き平板

荷重制御引張を受ける深さ a の片側き裂を有する幅 $2w$ 、板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は、平板の断面積 A とき裂の面積 A_c ；

$$A = 2w \cdot t \quad (B1.1-3 a)$$

$$A_c = 2w \cdot a \quad (B1.1-3 b)$$

を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{A}{A - A_c} = \frac{2w \cdot t}{2w \cdot t - 2w \cdot a} = \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{t}\right)} \quad (B1.1-4)$$

B1.1.3 荷重制御引張を受ける貫通き裂付き平板

荷重制御引張を受ける長さ $2c$ の貫通き裂を有する幅 $2w$ 、板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は、平板の断面積 A とき裂の面積 A_c ；

$$A = 2w \cdot t \quad (B1.1-5 a)$$

$$A_c = 2c \cdot t \quad (B1.1-5 b)$$

を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{A}{A - A_c} = \frac{2w \cdot t}{2w \cdot t - 2c \cdot t} = \frac{1}{\left(1 - \frac{c}{w}\right)} \quad (B1.1-6)$$

B1.2 荷重制御曲げを受ける平板

B1.2.1 荷重制御曲げを受ける半楕円表面き裂付き平板

荷重制御板曲げを受ける深さ a 、長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する幅 $2w$ 、板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂形状をFig. B1.2-1のように矩形近似することにより、次式で与えられる。

き裂深さ $a \leq \frac{w \cdot t}{2w - c}$ に対して、中立軸深さ $s = \frac{w \cdot t + a \cdot c}{2w} \geq a$ となり、

$$F_{net} = \frac{t^2}{3 \left[(t-s)^2 + (s-a)^2 + \left\{ s^2 - (s-a)^2 \right\} \left(1 - c/w \right) \right]} \quad (B1.2-1 a)$$

き裂深さ $a > \frac{w \cdot t}{2w - c}$ に対して、中立軸深さ $s = \frac{w \cdot t - a \cdot c}{2 \cdot (w - c)} < a$ となり、

$$F_{net} = \frac{t^2}{3 \left[(t-s)^2 - (a-s)^2 + \left\{ s^2 + (a-s)^2 \right\} \left(1 - c/w \right) \right]} \quad (B1.2-1 b)$$

B1.2.2 荷重制御曲げを受ける片側き裂付き平板

荷重制御板曲げを受ける深さ a の片側き裂を有する幅 $2w$ 、板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{2}{3 \cdot \left(1 - \frac{a}{t} \right)^2} \quad (B1.2-2)$$

B1. 2. 3 荷重制御曲げを受ける貫通き裂付き平板

荷重制御板曲げを受ける長さ $2c$ の貫通き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は, 次式で与えられる.

$$F_{net} = \frac{2}{3 \cdot \left(1 - \frac{c}{w}\right)} \quad (B1.2-3)$$

B1. 3 変位制御引張を受ける平板

B1. 3. 1 変位制御引張を受ける半楕円表面き裂付き平板

変位制御引張を受ける深さ a , 長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は, 次式で与えられる.

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B1.3-1)$$

B1. 3. 2 変位制御引張を受ける片側き裂付き平板

変位制御引張を受ける深さ a の片側き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は, 次式で与えられる.

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B1.3-2)$$

B1. 3. 3 変位制御引張を受ける貫通き裂付き平板

変位制御引張を受ける長さ $2c$ の貫通き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は, 次式で与えられる.

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B1.3-3)$$

B1. 4 変位制御曲げを受ける平板

B1. 4. 1 変位制御曲げを受ける半楕円表面き裂付き平板

変位制御曲げを受ける深さ a , 長さ $2c$ の半楕円表面き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対

する断面形状関数 F_{net} は, 等価き裂深さ a_{eq} を,

$$a_{eq} = \frac{\pi \cdot a \cdot c}{4w} \quad (B1.4-1)$$

として, 次式で与えられる.

$$F_{net} = \frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{a_{eq}}{t} \right) \quad (B1.4-2)$$

B1. 4. 2 変位制御曲げを受ける片側き裂付き平板

変位制御曲げを受ける深さ a の片側き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は,

$$F_{net} = \frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{a}{t} \right) \quad (B1.4-3)$$

B1. 4. 3 変位制御曲げを受ける貫通き裂付き平板

変位制御曲げを受ける長さ $2c$ の貫通き裂を有する幅 $2w$, 板厚 t の平板に対する断面形状関数 F_{net} は,

$$F_{net} = \frac{2}{3} \quad (const.) \quad (B1.4-4)$$

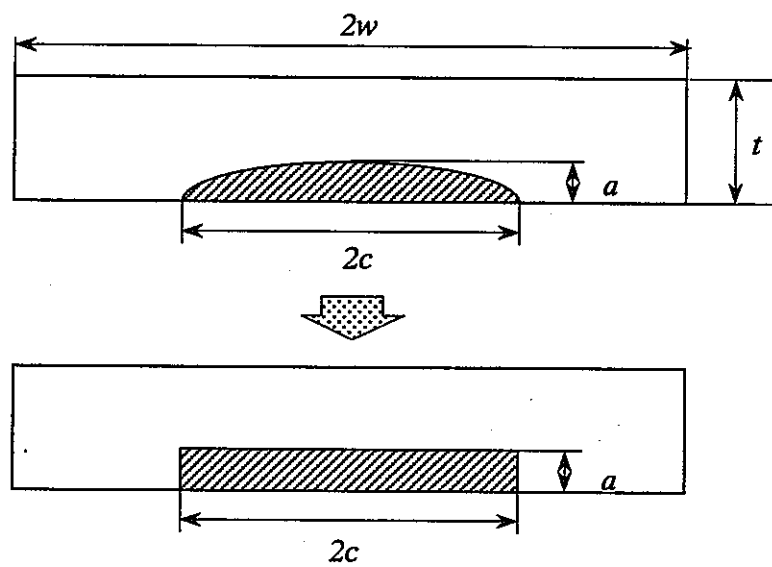


Fig.B1.2-1 Simplification of crack shape for the crack in a bending plate

B2. 周方向き裂付き円筒

B2.1 荷重制御引張を受ける周方向き裂付き円筒

B2.1.1 荷重制御引張を受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒

荷重制御引張を受ける深さ a 、長さ $2c$ の周方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂形状をFig. B2.1-1のように扇型近似することにより、円筒の断面積 A およびき裂の面積 A_c ；

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot (R+t)^2 - \pi \cdot R^2 \\ &= \pi \cdot (2R+t) \cdot t \end{aligned} \quad (B2.1-1)$$

・ き裂が内面にある場合

$$\begin{aligned} A_c &= \frac{2\theta}{2\pi} \cdot \left\{ \pi \cdot (R+a)^2 - \pi \cdot R^2 \right\} \\ &= \theta \cdot a \cdot (2R+a) \\ &= a \cdot c \cdot \left(2 + \frac{a}{R} \right) \end{aligned} \quad (B2.1-2 a)$$

・ き裂が外面にある場合

$$\begin{aligned} A_c &= \frac{2\theta}{2\pi} \cdot \left\{ \pi \cdot (R+t)^2 - \pi \cdot (R+t-a)^2 \right\} \\ &= \theta \cdot a \cdot \{ 2 \cdot (R+t) - a \} \\ &= a \cdot c \cdot \left(2 - \frac{a}{R+t} \right) \end{aligned} \quad (B2.1-2 b)$$

を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{A}{A - A_c} \quad (B2.1-3)$$

B2.1.2 荷重制御引張を受ける全周き裂付き円筒

荷重制御引張を受ける深さ a の全周き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、円筒の断面積 A とき裂の面積 A_c ；

$$\begin{aligned}
 A &= \pi \cdot (R+t)^2 - \pi \cdot R^2 \\
 &= \pi \cdot (2R+t) \cdot t
 \end{aligned}
 \tag{B2.1-4}$$

・ き裂が内面にある場合

$$\begin{aligned}
 A_c &= \pi \cdot (R+a)^2 - \pi \cdot R^2 \\
 &= a \cdot (2R+a)
 \end{aligned}
 \tag{B2.1-5 a}$$

・ き裂が外面にある場合

$$\begin{aligned}
 A_c &= \pi \cdot (R+t)^2 - \pi \cdot (R+t-a)^2 \\
 &= a \cdot \{2 \cdot (R+t) - a\}
 \end{aligned}
 \tag{B2.1-5 b}$$

を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{A}{A - A_c} \tag{B2.1-6}$$

B2. 1. 3 荷重制御引張を受ける周方向貫通き裂付き円筒

荷重制御引張を受ける長さ $2c$ の周方向貫通き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、円筒の断面積 A とき裂の面積 A_c ；

$$\begin{aligned}
 A &= \pi \cdot (R+t)^2 - \pi \cdot R^2 \\
 &= \pi \cdot (2R+t) \cdot t
 \end{aligned}
 \tag{B2.1-5 a}$$

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{2\theta}{2\pi} \left\{ \pi \cdot (R+t)^2 - \pi \cdot R^2 \right\} \\
 &= \theta \cdot (2R+t) \cdot t
 \end{aligned}
 \tag{B2.1-5 b}$$

を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{A}{A - A_c} = \frac{\pi}{\pi - \theta} \tag{B2.1-6}$$

B2.2 荷重制御曲げを受ける周方向き裂付き円筒

B2.2.1 荷重制御曲げを受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒

荷重制御軸曲げを受ける深さ a 、長さ $2c$ の周方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂無し断面の断面係数 Z と、き裂有り断面の断面係数 Z_c を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{Z}{Z_c} \quad (B2.2-1)$$

き裂無し断面の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{\pi \cdot \{ (R+t)^4 - R^4 \}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.2-2)$$

で与えられ、一方、き裂有り断面の断面係数 Z_c はき裂形状をFig. B2.2-1のように扇型近似することにより、次式で与えられる。

・き裂が内面にある場合；

$$\begin{aligned} \text{き裂角度 } \theta &\leq \frac{\pi \cdot \{ (R+t)^2 - R^2 \}}{2 \cdot (R+t)^2 - (R+a)^2 - R^2} \quad \text{に対して} \\ \text{中立軸角度 } \phi &= \theta \cdot \frac{(R+a)^2 - R^2}{2 \cdot \{ (R+t)^2 - R^2 \}} \quad \text{となり、} \\ Z_c &= \frac{4}{3} \cdot \{ (R+t)^3 - R^3 \} \cdot \cos \phi - \frac{2}{3} \cdot \{ (R+a)^3 - R^3 \} \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (B2.2-3 a)$$

$$\begin{aligned} \text{き裂角度 } \theta &> \frac{\pi \cdot \{ (R+t)^2 - R^2 \}}{2 \cdot (R+t)^2 - (R+a)^2 - R^2} \quad \text{に対して} \\ \text{中立軸角度 } \phi &= (\pi - \theta) \cdot \frac{(R+a)^2 - R^2}{2 \cdot \{ (R+t)^2 - (R+a)^2 \}} \quad \text{となり、} \\ Z_c &= \frac{4}{3} \cdot \{ (R+t)^3 - (R+a)^3 \} \cdot \cos \phi + \frac{2}{3} \cdot \{ (R+a)^3 - R^3 \} \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (B2.2-3 b)$$

・き裂が外面にある場合；

$$\text{き裂角度 } \theta \leq \frac{\pi \cdot \{ (R+t)^2 - R^2 \}}{(R+t)^2 + (R+t-a)^2 - 2R^2} \quad \text{に対して}$$

中立軸角度 $\phi = \theta \cdot \frac{(R+t)^2 - (R+t-a)^2}{2 \cdot \{(R+t)^2 - R^2\}}$ となり、

$$Z_c = \frac{4}{3} \cdot \{(R+t)^3 - R^3\} \cdot \cos \phi - \frac{2}{3} \cdot \{(R+t)^3 - (R+t-a)^3\} \cdot \sin \theta \quad (B2.2-4 a)$$

き裂角度 $\theta > \frac{\pi \cdot \{(R+t)^2 - R^2\}}{(R+t)^2 + (R+t-a)^2 - 2R^2}$ に対して

中立軸角度 $\phi = (\pi - \theta) \cdot \frac{(R+t)^2 - (R+t-a)^2}{2 \cdot \{(R+t-a)^2 - R^2\}}$ となり、

$$Z_c = \frac{4}{3} \cdot \{(R+t-a)^3 - R^3\} \cdot \cos \phi + \frac{2}{3} \cdot \{(R+t)^3 - (R+t-a)^3\} \cdot \sin \theta \quad (B2.2-4 b)$$

B2.2.2 荷重制御曲げを受ける全周き裂付き円筒

荷重制御軸曲げを受ける深さ a の全周き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂無し断面の断面係数 Z と、き裂有り断面の断面係数 Z_c を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{Z}{Z_c} \quad (B2.2-5)$$

き裂無し断面の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{\pi \cdot \{(R+t)^4 - R^4\}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.2-6)$$

で与えられ、一方、き裂有り断面の断面係数 Z_c は、次式で与えられる。

- ・ き裂が内面にある場合；

$$Z_c = \frac{\pi \cdot \{(R+t)^4 - (R+a)^4\}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.2-7)$$

- ・ き裂が外面にある場合；

$$Z_c = \frac{\pi \cdot \{(R+t-a)^4 - R^4\}}{4 \cdot (R+t-a)} \quad (B2.3-8)$$

B2.2.3 荷重制御曲げを受ける周方向貫通き裂付き円筒

荷重制御軸曲げを受ける長さ $2c$ の周方向貫通き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂無し断面の断面係数 Z と、き裂有り断面の断面係数 Z_c を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{Z}{Z_c} \quad (B2.2-9)$$

き裂無し断面の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{\pi \cdot \left\{ (R+t)^4 - R^4 \right\}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.2-10)$$

で与えられ、一方、き裂有り断面の断面係数 Z_c はき裂形状をFig. B2.2-2のように扇型近似することにより、次式で与えられる。

き裂角度 $\theta \leq \pi/2$ に対して、中立軸角度 $\phi = \frac{\theta}{2}$ となり、

$$Z_c = \frac{4}{3} \cdot \left\{ (R+t)^3 - R^3 \right\} \cdot \cos \phi - \frac{2}{3} \cdot \left\{ (R+t)^3 - R^3 \right\} \cdot \sin \theta \quad (B2.2-11 a)$$

き裂角度 $\theta > \pi$ に対して、中立軸角度 $\phi = \theta - \frac{\pi}{2}$ となり、

$$Z_c = \frac{2}{3} \cdot \left\{ (R+t)^3 - R^3 \right\} \cdot \sin \theta \quad (B2.2-11 b)$$

B2.3 変位制御引張を受ける周方向き裂付き円筒

B2.3.1 変位制御引張を受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒

変位制御引張を受ける深さ a 、長さ $2c$ の周方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

・き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B2.3-1)$$

B2.3.2 変位制御引張を受ける全周き裂付き円筒

変位制御引張を受ける深さ a の全周き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

- ・き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B2.3-2)$$

B2.3.3 変位制御引張を受ける周方向貫通き裂付き円筒

変位制御引張を受ける長さ $2c$ の周方向貫通き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B2.3-3)$$

B2.4 変位制御曲げを受ける周方向き裂付き円筒

B2.4.1 変位制御曲げを受ける周方向半楕円表面き裂付き円筒

変位制御軸曲げを受ける深さ a 、長さ $2c$ の周方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂無し断面の断面係数 Z と、き裂有り断面の断面係数 Z_c を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{Z}{Z_c} \quad (B2.4-1)$$

き裂無し断面の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{\pi \cdot \left\{ (R+t)^4 - R^4 \right\}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.4-2)$$

で与えられ、一方、き裂有り断面の断面係数 Z_c はき裂無し断面の塑性断面係数として、次式で与えられる。

- ・き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$Z_c = \frac{4}{3} \cdot \left\{ (R+t)^3 - R^3 \right\} \quad (B2.4-3)$$

B2.4.2 変位制御曲げを受ける全周き裂付き円筒

変位制御軸曲げを受ける深さ a の全周き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂無し断面の断面係数 Z と、き裂有り断面の断面係数 Z_c を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{Z}{Z_c} \quad (B2.4-4)$$

き裂無し断面の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{\pi \cdot \left\{ (R+t)^4 - R^4 \right\}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.4-5)$$

で与えられ、一方、き裂有り断面の断面係数 Z_c はき裂無し断面の塑性断面係数として、次式で与えられる。

- ・き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$Z_c = \frac{4}{3} \cdot \left\{ (R+t)^3 - R^3 \right\} \quad (B2.4-6)$$

B2.4.3 変位制御曲げを受ける周方向貫通き裂付き円筒

変位制御軸曲げを受ける長さ $2c$ の周方向貫通き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、き裂無し断面の断面係数 Z と、き裂有り断面の断面係数 Z_c を用いて、次式で与えられる。

$$F_{net} = \frac{Z}{Z_c} \quad (B2.4-7)$$

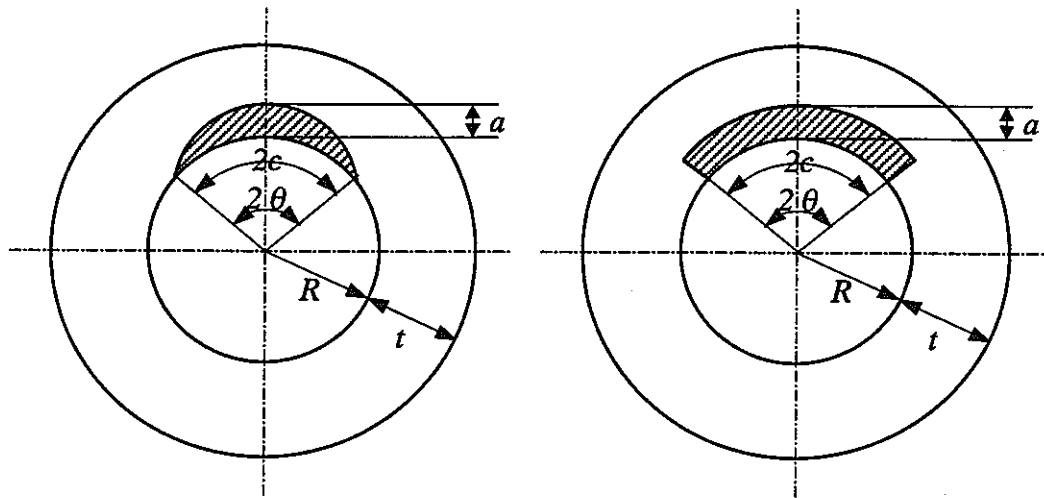
き裂無し断面の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{\pi \cdot \left\{ (R+t)^4 - R^4 \right\}}{4 \cdot (R+t)} \quad (B2.4-8)$$

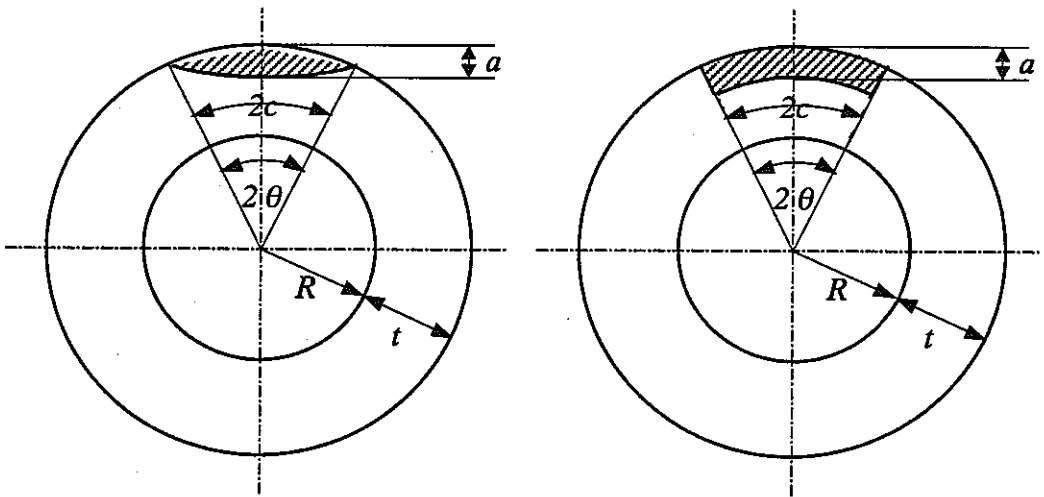
で与えられ、一方、き裂有り断面の断面係数 Z_c はき裂無し断面の塑性断面係数として、次式で与えられる。

- ・ き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$Z_c = \frac{4}{3} \cdot \left\{ (R+t)^3 - R^3 \right\} \quad (B2.4-9)$$



(a) Internal crack



(b) External crack

Fig.B2.1-1 Simplification of crack shape for the circumferential surface crack in a tube subjected to tensile load

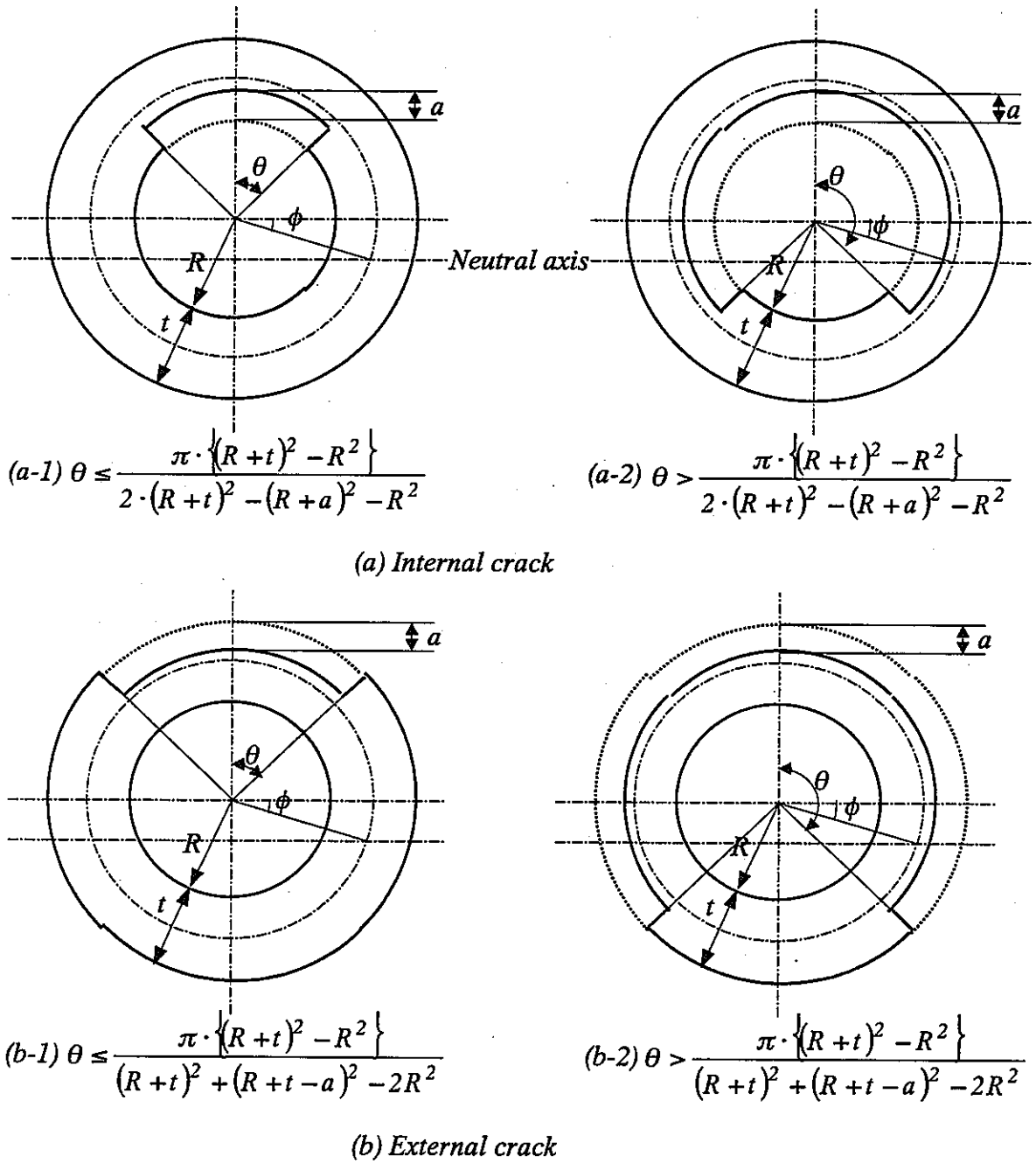


Fig.B2.2-1 Simplification of crack shape for the circumferential surface crack in a tube subjected to bending load

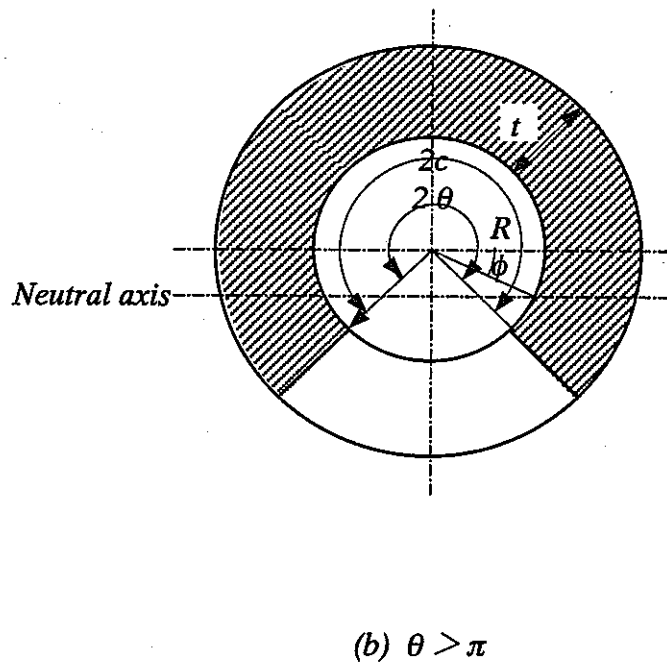
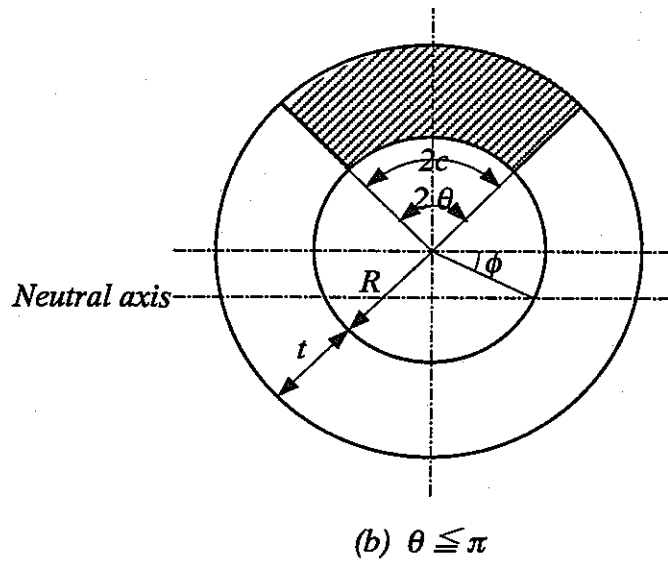


Fig.B2.2-2 Simplification of crack shape for the circumferential penetrated crack in a tube subjected to bending load

B3. 軸方向き裂付き円筒

B3.1 荷重制御膜応力を受ける軸方向き裂付き円筒

B3.1.1 荷重制御膜応力を受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒

荷重制御膜応力を受ける深さ a 、長さ $2c$ の軸方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

- ・き裂が内面にある場合、き裂がある場合とも；

$$F_{net} = \frac{1 - \frac{a}{f \cdot t}}{1 - \frac{a}{t}} \quad (B3.1-1)$$

ここで、 f は次式で与えられる形状パラメータである。

$$f = \sqrt{\frac{1 + 1.61 \cdot c^2}{R \cdot t}} \quad (B3.1-2)$$

B3.1.2 荷重制御膜応力を受ける軸方向片側き裂付き円筒

荷重制御膜応力を受ける深さ a の軸方向片側き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

- ・き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$F_{net} = \frac{1}{1 - \frac{a}{t}} \quad (B3.1-3)$$

B3.1.3 荷重制御膜応力を受ける軸方向貫通き裂付き円筒

荷重制御膜応力を受ける深さ a 、長さ $2c$ の軸方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

- ・き裂が内面にある場合、き裂がある場合とも；

$$F_{net} = f \quad (B3.1-4)$$

ここで、 f は次式で与えられる形状パラメータである。

$$f = \sqrt{\frac{1 + 1.61 \cdot c^2}{R \cdot t}} \quad (B3.1-5)$$

B3.2 荷重制御曲げを受ける軸方向き裂付き円筒

B3.2.1 荷重制御曲げを受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒

現在検討中

B3.2.2 荷重制御曲げを受ける軸方向片側き裂付き円筒

現在検討中

B3.2.3 荷重制御曲げを受ける軸方向貫通き裂付き円筒

現在検討中

B3.3 変位制御膜応力を受ける軸方向き裂付き円筒

B3.3.1 変位制御膜応力を受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒

変位制御膜応力を受ける深さ a 、長さ $2c$ の軸方向半楕円表面き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

- ・ き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B3.3-1)$$

B3.3.2 変位制御膜応力を受ける軸方向片側き裂付き円筒

変位制御膜応力を受ける深さ a の軸方向片側き裂を有する内半径 R 、板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は、次式で与えられる。

- ・ き裂が内面にある場合、外面にある場合とも；

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B3.3-2)$$

B3. 3. 3 変位制御膜応力を受ける軸方向貫通き裂付き円筒

変位制御膜応力を受ける長さ $2c$ の貫通き裂を有する内半径 R , 板厚 t の円筒に対する断面形状関数 F_{net} は, 次式で与えられる.

$$F_{net} = 1.0 \quad (const.) \quad (B3.3-3)$$

B3. 4 変位制御曲げを受ける軸方向き裂付き円筒

B3. 4. 1 変位制御曲げを受ける軸方向半楕円表面き裂付き円筒

現在検討中

B3. 4. 2 変位制御曲げを受ける軸方向片側き裂付き円筒

現在検討中

B3. 4. 3 変位制御曲げを受ける軸方向貫通き裂付き円筒

現在検討中

付録C. 材料特性

C1. SUS304鋼

C1.1 ヤング率, ポアソン比

温度 T が,

$$20 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なSUS304鋼のヤング率, ポアソン比をTable C1.1-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲内において, 温度について線形内挿することを推奨する. 適用温度範囲外への外挿は推奨しない.

C1.2 繰返し応力ひずみ式

温度 T が,

$$425 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なSUS304鋼の繰返し応力ひずみ関係式をTable C1.2-1に示す.

本指針は, 425~650℃の範囲外への外挿を推奨しない.

C1.3 クリープひずみ式

温度 T が,

$$425 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なSUS304鋼のクリープひずみ関係式をTable C1.3-1に示す.

本指針は, 425~650℃の範囲外への外挿を推奨しない.

C1.4 き裂進展則

C1.4.1 疲労き裂進展則

温度 T が,

$$450 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なSUS304鋼の疲労き裂進展則は、次式で表されるParis則で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = C_f \cdot (\Delta J_f)^{m_f} \quad (\text{C1.4-1})$$

(da/dN (mm/cyc.), ΔJ_f (N/mm))

$$C_f = 1.4935 \times 10^{-5}$$

$$m_f = 1.8158$$

本指針は、適用温度範囲外への適用を推奨しない。

C1.4.2 クリープき裂進展則

温度 T が、

$$450 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なSUS304鋼のクリープき裂進展則は、次式で表されるParis則で与えられる。

$$\frac{da}{dt} = C_c \cdot (J')^{m_c} \quad (\text{C1.4-2})$$

(da/dt (mm/hour), J' (N/mm/hour))

$$C_c = 2.2874 \times 10^{-2}$$

$$m_c = 0.94487$$

本指針は、適用温度範囲外への適用を推奨しない。

C2. 316FR

C2.1 ヤング率, ポアソン比

温度 T が,

$$375 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な316FRのヤング率, ポアソン比をTable C2.1-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲内において, 温度について線形内挿することを推奨する. 適用温度範囲外への外挿は推奨しない.

C2.2 繰返し応力ひずみ式

温度 T が,

$$425 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な316FRの繰返し応力ひずみ関係式をTable C2.2-1に示す.

本指針は, 425~650℃の範囲外への外挿を推奨しない.

C2.3 クリープひずみ式

温度 T が,

$$425 \leq T \leq 650 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な316FRのクリープひずみ関係式をTable C2.3-1に示す.

本指針は, 425~650℃の範囲外への外挿を推奨しない.

C2.4 き裂進展則

C2.4.1 疲労き裂進展則

暫定的に, C1. 4. 1節に示すSUS304鋼の疲労き裂進展則を適用する.

C2.4.2 クリープき裂進展則

暫定的に, C1. 4. 2節に示すSUS304鋼のクリープき裂進展則を適用する.

C3. $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼

C3.1 ヤング率, ポアソン比

温度 T が,

$$20 \leq T \leq 600 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼のヤング率, ポアソン比をTable C3.1-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲内において, 温度について線形内挿することを推奨する. 適用温度範囲外への外挿は推奨しない.

C3.2 繰返し応力ひずみ式

温度 T が,

$$375 \leq T \leq 550 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼の繰返し応力ひずみ関係式をTable C3.2-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲外への外挿を推奨しない.

C3.3 クリープひずみ式

温度 T が,

$$375 \leq T \leq 550 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼のクリープひずみ関係式をTable C3.3-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲外への外挿を推奨しない.

C3.4 き裂進展則

C3.4.1 疲労き裂進展則

温度 T が,

$$500 \leq T \leq 550 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼の疲労き裂進展則は、次式で表される $Paris$ 則で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = C_f \cdot (\Delta J_f)^{m_f} \quad (\text{C3.4-1})$$

(da/dN (mm/cyc.), ΔJ_f (N/mm))

$$C_f = 1.1987 \times 10^{-3}$$

$$m_f = 1.4118$$

本指針は、適用温度範囲外への適用を推奨しない。

C3.4.2 クリープき裂進展則

温度 T が、

$$500 \leq T \leq 550 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能な $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼のクリープき裂進展則は、次式で表される $Paris$ 則で与えられる。

$$\frac{da}{dt} = C_c \cdot (J')^{m_c} \quad (\text{C3.4-2})$$

(da/dt (mm/hour), J' (N/mm/hour))

$$C_c = 7.7893 \times 10^{-2}$$

$$m_c = 0.9836$$

本指針は、適用温度範囲外への適用を推奨しない。

C4. Mod. 9Cr-1Mo鋼

C4.1 ヤング率, ポアソン比

温度 T が,

$$375 \leq T \leq 600 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なMod.9Cr-1Mo鋼のヤング率, ポアソン比をTable C4.1-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲内において, 温度について線形内挿することを推奨する. 適用温度範囲外への外挿は推奨しない.

C4.2 繰返し応力ひずみ式

温度 T が,

$$375 \leq T \leq 550 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なMod.9Cr-1Mo鋼の繰返し応力ひずみ関係式をTable C4.2-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲外への外挿を推奨しない.

C4.3 クリープひずみ式

温度 T が,

$$375 \leq T \leq 600 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なMod.9Cr-1Mo鋼のクリープひずみ関係式をTable C4.3-1に示す.

本指針は, 適用温度範囲外への外挿を推奨しない.

C4.4 き裂進展則

C4.4.1 疲労き裂進展則

温度 T が,

$$500 \leq T \leq 600 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なMod.9Cr-1Mo鋼の疲労き裂進展則は、次式で表されるParis則で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = C_f \cdot (\Delta J_f)^{m_f} \quad (C4.4-1)$$

(da/dN (mm/cyc.), ΔJ_f (N/mm))

$$C_f = 5.0107 \times 10^{-4}$$

$$m_f = 1.8342$$

本指針は、適用温度範囲外への適用を推奨しない。

C4. 4. 2 クリープき裂進展則

温度 T が、

$$500 \leq T \leq 550 \quad (T(^\circ\text{C}))$$

である場合に適用可能なMod.9Cr-1Mo鋼のクリープき裂進展則は、次式で表されるParis則で与えられる。

$$\frac{da}{dt} = C_c \cdot (J')^{m_c} \quad (C4.4-2)$$

(da/dt (mm/hour), J' (N/mm/hour))

$$C_c = 3.7308 \times 10^{-2}$$

$$m_c = 1.0131$$

本指針は、適用温度範囲外への適用を推奨しない。

Table C1.1-1 Young's modulus and Poisson's ratio for SUS304 stainless steel

<i>Temperature</i> <i>T</i> (°C)	<i>Young's modulus</i> <i>E</i> (MPa)	<i>Poisson's ratio</i> <i>ν</i>
20	1.94E+05	0.266
50	1.92E+05	0.268
100	1.90E+05	0.272
150	1.87E+05	0.275
200	1.84E+05	0.279
250	1.80E+05	0.283
300	1.76E+05	0.287
350	1.72E+05	0.291
400	1.69E+05	0.295
450	1.64E+05	0.298
500	1.59E+05	0.302
550	1.54E+05	0.306
600	1.49E+05	0.310
650	1.44E+05	0.314

Table C1.2-1 Cyclic stress-strain relationship for type 304 stainless steel

(1) For $\Delta\sigma \leq 2\sigma_p$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / E$$

(2) For $\Delta\sigma > 2\sigma_p$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$$

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E$$

$$\Delta\varepsilon_p = \left\{ \frac{\Delta\sigma - 2\sigma_p}{10^{A_0}} \right\}^{(1/A_1)}$$

※ T : Temperature, °C (Applicable range : $425 \leq T \leq 650$)

$\Delta\sigma$: Stress range, MPa

$\Delta\varepsilon$: Total strain range, mm / mm

$\Delta\varepsilon_e$: Elastic strain range, mm / mm

$\Delta\varepsilon_p$: Plastic strain range, mm / mm

E : Young's modulus, MPa

σ_y : Yield stress, Mpa

σ_p : Proportional limit, MPa

$$E = 2.06031 \times 10^5 - 9.52457 \times 10^1 \times T$$

$$\sigma_y = 2.50542 \times 10^2 - 5.47758 \times 10^{-1} \times T + 1.02296 \times 10^{-3} \times T^2 - 7.27684 \times 10^{-7} \times T^3$$

$$\sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m$$

$$K = 4.34207 \times 10^2 - 1.75354 \times 10^{-1} \times T$$

$$m = 2.79395 \times 10^{-1} + 7.74900 \times 10^{-5} \times T$$

$$A_0 = 1.968789 + 6.446708 \times 10^{-3} \times T - 4.675557 \times 10^{-6} \times T^2 - 3.724201 \times 10^{-9} \times T^3$$

$$A_1 = 3.690128 - 1.847969 \times 10^{-2} \times T + 3.544927 \times 10^{-5} \times T^2 - 2.297822 \times 10^{-8} \times T^3$$

Table C1.3-1 Creep curve for type 304 stainless steel

$$\varepsilon_c = c_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + c_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t$$

where,

$$r_1 = 103.37 \dot{\varepsilon}_m^{-0.72607}, \quad r_2 = 17.255 \dot{\varepsilon}_m^{-0.86775}$$

$$c_1 = 1.2692 \dot{\varepsilon}_m^{0.74491} / r_1, \quad c_2 = 0.48449 \dot{\varepsilon}_m^{0.81155} / r_2$$

$$\dot{\varepsilon}_m = F t_R^{-1.1335}$$

$$\log_{10} t_R = B_0 + B_1 \log_{10} \sigma + B_2 (\log_{10} \sigma)^2 \quad (\text{for } 0.98 \leq \sigma \leq 372.65)$$

$$\log_{10} t_R = \{B_0 - B_2 (\log_{10} 0.1)^2\} + (B_1 + 2B_2 \log_{10} 0.1) \log_{10} \sigma \quad (\text{for } 0.10 \leq \sigma < 0.98)$$

$$\text{for } \sigma < 0.10 \quad r_1 = r_2 = c_1 = c_2 = \dot{\varepsilon}_m = 0$$

※ T : temperature, °C (Applicable range $425 \leq T \leq 650$)

ε_c : Creep strain, mm / mm

σ : Stress, MPa

t : Time, hour

$$F = 62.416 \exp\left\{-\frac{4.0812 \times 10^4}{8.31 (T+273.15)}\right\}$$

$$B_0 = -1.75430 \times 10^1 + 3.18835 \times 10^4 / (T+273.15)$$

$$B_1 = -5.26179 \times 10^3 / (T+273.15)$$

$$B_2 = -4.25001 \times 10^2 / (T+273.15)$$

Table C2.1-1 Young's modulus and Poisson's ratio for FBR grade type 316 stainless steel

<i>Temperature T (°C)</i>	<i>Young's modulus E (MPa)</i>	<i>Poisson's ratio ν</i>
20		
50		
100		
150		
200		
250		
300		
350		
400	1.69E+05	0.300
450	1.64E+05	0.300
500	1.59E+05	0.302
550	1.54E+05	0.306
600	1.49E+05	0.310
650	1.44E+05	0.314

Table C2.2-1 Cyclic stress-strain relationship for FBR grade type 316 stainless steel

(1) For $\Delta\sigma \leq 2\sigma_p$ $\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / E$ (2) For $\Delta\sigma > 2\sigma_p$ $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$ $\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E$ $\Delta\varepsilon_p = \left\{ \frac{\Delta\sigma - 2\sigma_p}{10^{A_0}} \right\}^{(1/A_1)}$ ※ T : Temperature, °C (Applicable range : $315 \leq T \leq 650$) $\Delta\sigma$: Stress range, MPa $\Delta\varepsilon$: Total strain range, mm / mm $\Delta\varepsilon_e$: Elastic strain range, mm / mm $\Delta\varepsilon_p$: Plastic strain range, mm / mm E : Young's modulus, MPa σ_y : Yield stress, Mpa σ_p : Proportional limit, MPa
$E = 2.00056 \times 10^5 - 7.84532 \times 10^1 \times T \quad (\text{For } 315 \leq T < 400)$ $E = 2.08489 \times 10^5 - 9.92923 \times 10^1 \times T \quad (\text{For } 400 \leq T \leq 650)$
$\sigma_y = 2.67450 \times 10^2 - 6.26983 \times 10^{-1} \times T + 1.00310 \times 10^{-3} \times T^2 - 5.49404 \times 10^{-7} \times T^3$
$\sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m$
$K = 4.64907 \times 10^2 - 1.65068 \times 10^{-1} \times T$
$m = 2.53309 \times 10^{-1} + 1.06027 \times 10^{-4} \times T$
$A_0 = 4.27332 - 3.13844 \times 10^{-3} \times T + 4.76051 \times 10^{-6} \times T^2 - 2.49679 \times 10^{-9} \times T^3$
$A_1 = 8.19459 \times 10^{-1} - 7.55358 \times 10^{-4} \times T - 9.45753 \times 10^{-7} \times T^2 + 1.94239 \times 10^{-9} \times T^3$

Table C2.3-1 Creep curve for FBR grade type 316 stainless steel

$$\epsilon_c = c_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + c_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\epsilon}_m t$$

where,

$$r_1 = 103.37 \dot{\epsilon}_m^{-0.72607}, \quad r_2 = 17.255 \dot{\epsilon}_m^{-0.86775}$$

$$c_1 = 1.2692 \dot{\epsilon}_m^{0.74491} / r_1, \quad c_2 = 0.48449 \dot{\epsilon}_m^{0.81155} / r_2$$

$$\dot{\epsilon}_m = F t_R^{-1.1032}$$

$$\log_{10} t_R = B_0 + B_1 \log_{10} \sigma + B_2 (\log_{10} \sigma)^2 \quad (\text{for } 6.86 \leq \sigma)$$

※ T : temperature, °C (Applicable range $425 \leq T \leq 650$)

ϵ_c : Creep strain, mm / mm

σ : Stress, MPa

t : Time, hour

$$F = 241.33 \exp\left\{-\frac{5.1222 \times 10^4}{8.31 (T+273.15)}\right\}$$

$$B_0 = -25.82042 \times 10^1 + 2.88487 \times 10^4 / (T+273.15)$$

$$B_1 = 6.86482 \times 10^3 / (T+273.15)$$

$$B_2 = -3.48180 \times 10^3 / (T+273.15)$$

Table C3.1-1 Young's modulus and Poisson's ratio for 2¹/₄Cr-1Mo steel

<i>Temperature</i> <i>T</i> (°C)	<i>Young's modulus</i> <i>E</i> (MPa)	<i>Poisson's ratio</i> <i>ν</i>
20	2.06E+05	0.266
50	2.05E+05	0.268
100	2.03E+05	0.272
150	2.00E+05	0.275
200	1.97E+05	0.279
250	1.94E+05	0.283
300	1.90E+05	0.287
350	1.85E+05	0.291
400	1.80E+05	0.295
450	1.73E+05	0.298
500	1.66E+05	0.302
550	1.55E+05	0.306
600	1.36E+05	0.310

Table C3.2-1 Cyclic stress-strain relationship for 2¹/₄Cr-1Mo steel(1) For $\Delta\sigma \leq 2\sigma_p$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / E$$

(2) For $\Delta\sigma > 2\sigma_p$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$$

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E$$

$$\Delta\varepsilon_p = \left\{ \frac{\Delta\sigma - 2\sigma_p}{10^{A_0}} \right\}^{(1/A_1)}$$

※ T : Temperature, °C (Applicable range : $300 \leq T \leq 550$)

$\Delta\sigma$: Stress range, MPa

$\Delta\varepsilon$: Total strain range, mm / mm

$\Delta\varepsilon_e$: Elastic strain range, mm / mm

$\Delta\varepsilon_p$: Plastic strain range, mm / mm

E : Young's modulus, MPa

σ_y : Yield stress, Mpa

σ_p : Proportional limit, MPa

$$300 \leq T \leq 375 : E = 2.267 \times 10^4 - 10.8000 \times T$$

$$375 < T < 450 : E = 2.010 \times 10^4 - 4.0000 \times T$$

$$450 \leq T \leq 550 : E = 2.164011 \times 10^4 - 7.060216 \times T \\ + 3.684193 \times 10^{-3} \times T^2 - 1.014639 \times 10^{-5} \times T^3$$

$$\sigma_y = 3.51902 \times 10^1 - 3.29051 \times 10^{-2} \times T + 6.01783 \times 10^{-5} \times T^2 - 6.32549 \times 10^{-8} \times T^3$$

$$\sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m$$

$$K = 8.30 \times 10^1 - 8.75 \times 10^{-2} \times T$$

$$m = 4.17 \times 10^{-1} + 5.125 \times 10^{-4} \times T$$

$$A_0 = 1.968789 + 6.446708 \times 10^{-3} \times T - 4.675557 \times 10^{-6} \times T^2 - 3.724201 \times 10^{-9} \times T^3$$

$$A_1 = 3.690128 - 1.847969 \times 10^{-2} \times T + 3.544927 \times 10^{-5} \times T^2 - 2.297822 \times 10^{-8} \times T^3$$

Table C3.3-1 Creep curve for type 2¹/₄Cr-1Mo steel

$$\epsilon_c = c_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + c_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\epsilon}_m t$$

where,

$$r_1 = 45.2986 \dot{\epsilon}_m^{-0.56858} t_R^{-0.82278}, \quad r_2 = 14.3245 \dot{\epsilon}_m^{-0.82278} t_R^{-0.82278}$$

$$c_1 = 0.30546 \dot{\epsilon}_m^{0.59235} / r_1, \quad c_2 = 0.26505 \dot{\epsilon}_m^{0.81657} / r_2$$

$$\dot{\epsilon}_m = F t_R^{-1.09319}$$

$$\log_{10} t_R = B_0 + B_1 \log_{10} \sigma + B_2 (\log_{10} \sigma)^2 \quad (\text{for } 13.72 \leq \sigma \leq 343.0)$$

$$\log_{10} t_R = \{B_0 - B_2 (\log_{10} 0.1)^2\} + (B_1 + 2B_2 \log_{10} 0.1) \log_{10} \sigma \quad (\text{for } 0.10 \leq \sigma < 13.72)$$

$$\text{for } \sigma < 0.10 \quad r_1 = r_2 = c_1 = c_2 = \dot{\epsilon}_m = 0$$

※ T : temperature , °C (Applicable range $375 \leq T \leq 550$)

ϵ_c : Creep strain , mm / mm

σ : Stress , MPa

t : Time , hour

$$F = 13.5699 \exp\left\{-\frac{3.3435 \times 10^4}{8.31 (T+273.15)}\right\}$$

$$B_0 = -1.5956105 \times 10^1 + 1.8600626 \times 10^4 / (T+273.15)$$

$$B_1 = 6.5976676 \times 10^2 / (T+273.15)$$

$$B_2 = -2.6557865 \times 10^3 / (T+273.15)$$

Table C4.1-1 Young's modulus and Poisson's ratio of Mod.9Cr-1Mo steel

<i>Temperature</i> <i>T</i> (°C)	<i>Young's modulus</i> <i>E</i> (MPa)	<i>Poisson's ratio</i> <i>ν</i>
20		
50		
100		
150		
200		
250		
300		
350		
400	1.91E+05	0.300
450	1.86E+05	0.300
500	1.81E+05	0.302
550	1.75E+05	0.306
600	1.69E+05	0.310

Table C4.2-1 Cyclic stress-strain relationship for Mod.9Cr-1Mo steel

(1) For $\Delta\sigma \leq 2\sigma_p$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / E$$

(2) For $\Delta\sigma > 2\sigma_p$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$$

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E$$

$$\Delta\varepsilon_p = \left\{ \frac{\Delta\sigma - 2\sigma_p}{10^{A_0}} \right\}^{(1/A_1)}$$

※ T : Temperature, °C (Applicable range : $425 \leq T \leq 650$)

$\Delta\sigma$: Stress range, MPa

$\Delta\varepsilon$: Total strain range, mm / mm

$\Delta\varepsilon_e$: Elastic strain range, mm / mm

$\Delta\varepsilon_p$: Plastic strain range, mm / mm

E : Young's modulus, MPa

σ_y : Yield stress, Mpa

σ_p : Proportional limit, MPa

$$E = 2.06031 \times 10^5 - 9.52457 \times 10^1 \times T$$

$$\sigma_y = 2.50542 \times 10^2 - 5.47758 \times 10^{-1} \times T + 1.02296 \times 10^{-3} \times T^2 - 7.27684 \times 10^{-7} \times T^3$$

$$\sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m$$

$$K = 4.34207 \times 10^2 - 1.75354 \times 10^{-1} \times T$$

$$m = 2.79395 \times 10^{-1} + 7.74900 \times 10^{-5} \times T$$

$$A_0 = 1.968789 + 6.446708 \times 10^{-3} \times T - 4.675557 \times 10^{-6} \times T^2 - 3.724201 \times 10^{-9} \times T^3$$

$$A_1 = 3.690128 - 1.847969 \times 10^{-2} \times T + 3.544927 \times 10^{-5} \times T^2 - 2.297822 \times 10^{-8} \times T^3$$

Table C4.3-1 Creep curve for type Mod.9Cr-1Mo steel

$$\varepsilon_c = c_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + c_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t$$

where,

$$r_1 = 317.0902 \dot{\varepsilon}_m^{-0.56858}, \quad r_2 = 14.3245 \dot{\varepsilon}_m^{-0.82278}$$

$$c_1 = 2.13822 \dot{\varepsilon}_m^{0.59235} / r_1, \quad c_2 = 0.92768 \dot{\varepsilon}_m^{0.81657} / r_2$$

$$\dot{\varepsilon}_m = F t_R^{-1.0778}$$

$$\log_{10} t_R = B_0 + B_1 \log_{10} \sigma + B_2 (\log_{10} \sigma)^2 \quad (\text{for } 19.3 \leq \sigma)$$

※ T : temperature, °C (Applicable range $375 \leq T \leq 600$)

ε_c : Creep strain, mm / mm

σ : Stress, MPa

t : Time, hour

$$F = 0.77322 \exp\left\{-\frac{1.6956 \times 10^4}{8.31 (T+273.15)}\right\}$$

$$B_0 = -2.91146 \times 10^1 + 3.180882 \times 10^4 / (T+273.15)$$

$$B_1 = -3.05552 \times 10^3 / (T+273.15)$$

$$B_2 = -5.148248 \times 10^3 / (T+273.15)$$