

円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈に関する 設計評価法の検討

1993年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈に関する設計評価法の検討

岩田 耕司*

要 旨

「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」に規定されている円筒殻の軸圧縮荷重および曲げ荷重による座屈の防止基準をより合理的なものにするために、解析的方法ならびに既存の実験データを活用して、座屈強度評価式ならびに安全係数の見直しを図った。

ここで基本とした座屈設計評価の考え方は、座屈強度を解析的に評価するもので、まず、当該材料の規格最下限の強さを持つ材料を仮定した上で、材料の塑性および初期形状不整の影響をそれぞれ最大限に考慮して最下限の座屈荷重を解析により求める。つぎに、こうして求めた座屈荷重に、その他の不確かさ要因に対する余裕度として、適切な安全係数を取り入れて許容座屈荷重を算出する、というものである。

本研究は、この方法論に基づき、具体的に円筒殻の軸圧縮および曲げによる座屈に対する設計評価法を策定したものであり、得られた成果は以下の通りである。

- 1) 円筒殻の軸圧縮座屈および曲げ座屈について、材料の塑性および初期形状不整による効果を解析的に考慮し、簡便な座屈強度評価式を導いた。この評価式は、材料特性が与えられれば、あらゆる材料に適用でき、また、設計に使用する最下限の座屈強度値は設計降伏応力を用いることにより容易に定められる。
- 2) 当該座屈の既存の実験データを可能な限り収集し、このデータベースを用いて許容座屈荷重評価式の信頼性を評価して、合理的に安全係数を設定することを試みた。この実データに基づく信頼性解析を通して、従来懸案となっていた弾塑性（非時間依存）座屈の安全係数を低減できる見通しを得た。この安全係数は任意の殻構造の弾塑性座屈にそのまま適用できる。

*大洗工学センター 機器構造開発部

IMPROVEMENT OF BUCKLING DESIGN CRITERION FOR CYLINDRICAL SHELLS
SUBJECTED TO AXIAL COMPRESSION AND BENDING

Koji Iwata *

ABSTRACT

The buckling design criterion for cylindrical shells subjected to axial compression and bending, which is prescribed in the "Structural Design Guide for Class 1 Components of Prototype Fast Breeder Reactor for Elevated Temperature Service", was improved to secure the more appropriate safety against buckling collapse in the structural design.

The design-by-analysis methodology is basically adopted in the buckling evaluation. The minimum buckling strength is evaluated analytically by taking into account, to the full, the effects of both the plasticity of material and the initial geometrical imperfection in structures and assuming the weakest material meeting standards. Appropriate safety factors, which are margins to other uncertainties influencing the buckling strength, are introduced to obtain allowable buckling loads.

In accordance with this methodology, the author developed a buckling design criterion concretely for cylindrical shells subjected to axial compression and bending. The main results obtained are stated as

1. A buckling strength equation with a simple form was derived analytically for cylindrical shells subjected to axial compression and bending, taking into account the effects of the plasticity and the initial imperfection. The equation can be applied to any kind of material, if its properties are known, and the minimum buckling strength can easily determined by use of the design yield stress.
2. Safety factors to be used were determined through the evaluation of the probability of buckling resulting from design according to the proposed buckling strength equation. The statistical evaluation based on the buckling test data available in the literature revealed that the currently used large safety factors for the elastic-plastic buckling can be reduced. The reduced safety factors can be used in the buckling design of general structures, not limited to cylindrical shells.

*Oarai Engineering Center, Systems and Components Division

目 次

1. 緒 言	1
2. 円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈の評価基準改訂案	3
3. 円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈評価式と安全係数の策定	5
3.1 円筒殻の軸圧縮座屈および曲げ座屈に関する従来の研究	5
3.2 座屈評価式の改訂方法	7
3.3 G e l l i nの円筒殻軸圧縮座屈解析の概要	10
3.4 塑性および初期不整による低減係数	15
3.5 曲げ座屈の軸圧縮座屈に対する強度比	23
3.6 座屈評価式と既存の実験データとの比較	32
3.7 座屈安全係数	46
3.8 他の座屈設計基準との比較	62
3.9 座屈評価の一般化	67
4. 結 言	71
謝 辞	72
参考文献	73
付録A 各種座屈設計基準の概要 — 円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈 —	76
付録B 円筒殻の軸圧縮座屈および曲げ座屈の収集データ一覧	82

List of Tables

Table 1	Values of parameter α for SUS304 and 2¼Cr-1Mo(NT)	18
Table 2	Comparison of safety factors for axial compressive buckling of cylindrical shells	58
Table 3	Values of parameters in the proposed buckling equations for SUS304 at 500°C and SG49 at the room temperature	63
Table A.1	Summary of the design criteria for axial compressive buckling in various design standards	79
Table A.2	Summary of the design criteria for bending buckling in various design standards	81
Table B.1	List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression	83
Table B.2	List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending	93

List of Figures

Fig.1 Typical buckling behaviors of cylindrical shells under axial compression or bending	6
Fig.2 Illustration of the basic buckling design methodology	9
Fig.3 Flow of buckling analysis for an axially compressed cylindrical shell by Gellin	11
Fig.4 Ramberg-Osgood type stress-strain relation	13
Fig.5 Buckling stress P_c / P_c^0 versus initial imperfection $\bar{\xi} / t$	14
Fig.6 Buckling stress P_c / P_c^0 versus parameter $\sigma_{cr}^0 / \sigma_{0.1E}$	14
Fig.7 Plasticity reduction factor η according to Bijlaard's equation	16
Fig.8 Plasticity reduction factor η versus R/t	19
Fig.9 Capacity reduction factor α using Gellin's results	20
Fig.10 Capacity reduction factor α versus R/t	22
Fig.11 Variation of λ with a	24
Fig.12 Capacity reduction factor for SUS304 and 2 1/4Cr-1Mo(NT)	25
Fig.13 Evaluation of bending buckling of a cylindrical shell using the y factor	26
Fig.14 Bending buckling moment for long and short cylindrical shells (from Gellin's study)	28

Fig.15 The γ factor for bending buckling	31
Fig.16 Number of buckling test data on cylindrical shells	33
Fig.17 Comparison of predicted and experimental buckling stresses	34
for cylindrical shells under axial compression	
Fig.18 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	35
between predicated and experimental values for materials with $0.75 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 1.0 \times 10^{-3}$	
Fig.19 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	36
between predicated and experimental values for materials with $1.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 1.25 \times 10^{-3}$	
Fig.20 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	37
between predicated and experimental values for materials with $1.25 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 1.5 \times 10^{-3}$	
Fig.21 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	38
between predicated and experimental values for materials with $1.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 2.0 \times 10^{-3}$	
Fig.22 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	39
between predicated and experimental values for materials with $2.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 2.5 \times 10^{-3}$	
Fig.23 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	40
between predicated and experimental values for materials with $2.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 3.0 \times 10^{-3}$	
Fig.24 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$	41
between predicated and experimental values for materials with $3.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 3.5 \times 10^{-3}$	

Fig. 25 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ 42
 between predicated and experimental values for materials with
 $3.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 4.0 \times 10^{-3}$

Fig. 26 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ 43
 between predicated and experimental values for materials with
 $4.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 4.5 \times 10^{-3}$

Fig. 27 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ 44
 between predicated and experimental values for materials with
 $5.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 6.0 \times 10^{-3}$

Fig. 28 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ 45
 between predicated and experimental values for materials with
 $6.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 8.0 \times 10^{-3}$

Fig. 29 Comparison of predicted and experimental buckling stresses 47
 for cylindrical shells in bending

Fig. 30 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 48
 predicated and experimental values for materials with
 $1.25 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 1.5 \times 10^{-3}$

Fig. 31 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 49
 predicated and experimental values for materials with
 $1.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 2.0 \times 10^{-3}$

Fig. 32 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 50
 predicated and experimental values for materials with
 $2.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 2.5 \times 10^{-3}$

Fig. 33 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 51
 predicated and experimental values for materials with
 $2.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 3.0 \times 10^{-3}$

Fig. 34 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 52
 predicated and experimental values for materials with
 $3.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 3.5 \times 10^{-3}$

Fig. 35 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 53
 predicated and experimental values for materials with
 $3.5 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 4.0 \times 10^{-3}$

Fig. 36 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 54
 predicated and experimental values for materials with
 $4.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 5.0 \times 10^{-3}$

Fig. 37 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 55
 predicated and experimental values for materials with
 $5.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 6.0 \times 10^{-3}$

Fig. 38 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^{\circ}$ between 56
 predicated and experimental values for materials with
 $6.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 8.0 \times 10^{-3}$

Fig. 39 Probability of buckling when the present equation is used 60
 - axially compressed cylindrecal shells -

Fig. 40 Probability of buckling when the present equation is used 61
 - cylindrical shells in bending -

Fig. 41 Comparison of buckling reduction factor $\alpha \eta$ in various 64
 design standards

Fig. 42 Comparison of reference (minimum) buckling stresses at 550°C 65
 for SUS304 - axial compressive buckling -

Fig. 43 Comparison of design allowable buckling stresses at 550°C for 66
SUS304 in the operating condition IV
- axial compressive buckling -

Fig. 44 Comparison of design allowable buckling stresses at 20°C for 68
SG49 (containment vessel material)

Fig. 45 Comparison of reference (minimum) buckling stresses at 550°C 69
for SUS304 - bending buckling -

Fig. 46 Comparison of design allowable buckling stresses at 550°C for 70
SUS304 in the operating condition IV
- bending buckling -

第 1 章 緒 言

本報告は、「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」¹⁾ (昭和56年11月発行。以下「高温構造設計方針」という) に規定されている円筒殻に対する軸圧縮および曲げによる座屈防止基準をより合理的なものにするために、解析的方法ならびに既存の実験データを活用して、座屈強度評価式ならびに安全係数の見直しを図ったものである*。

「高温構造設計方針」の座屈に対する一般的な規定は、ASME Code Case N-47²⁾と同様に、「解析による設計」を基本としており、座屈の様式や荷重の状態に応じた安全係数を定めたものとなっている。一般的な規定のほかに、外圧、軸圧縮荷重および(または)曲げ荷重を受ける円筒殻および管の非時間依存座屈のような特別な場合については「公式による設計」の方法を定めている。このうち、今回の見直しは、円筒殻の軸圧縮および(または)曲げによる非時間依存座屈に対する評価式(付録G. 1)および関連する安全係数(別表2.4)について行うものである。

現行の「高温構造設計方針」の円筒殻の座屈規定は、軸圧縮については、塑性座屈応力の基準として材料の設計降伏応力を採用し、これに特定の座屈安全係数を導入して、適度な設計余裕を持たせたものとなっている。また、曲げの座屈応力は、軸圧縮の座屈応力に適切な曲げ補正係数を乗じて定めている。ところで、現行「高温構造設計方針」が暫定案として策定された昭和53年以降、内外の座屈設計基準に大幅な変化が見られた。すなわち、昭和55年の「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(昭和55年通商産業省告示501号、以下「告示501号」という)の改訂において、機器のクラス分けや運転状態区分のような新しい概念が導入された。昭和56年には、原子力発電所の耐震設計基準(案)³⁾が通産省内規(以下「耐震内規」)として新たに制定された。また、1981年には、米国において金属製格納容器を対象としたASME Code Case N-284が刊行された。これらの座屈基準はすべて、実験下限値に相当する座屈応力を基準値にとり、これに安全係数を考慮するという設計の考え方に基づいている。この考え方は基本的には妥当と考えられるが、座屈基準値の策定と安全係数の設定に関して考え方が統一されていないのが実情である。従来の方法に関して指摘しておきたい点は、第1に、座屈基準値が利用可能な実験データの範囲内で決められデータベースに依存し易いこと、第2に、安全係数が従来明確な根拠をもって定められていないこと、換言すれば、座屈荷重評価式の策定と安全係数の設定の間に一貫した考え方が欠けていることである。

* 本研究は、昭和58~59年の間、高速炉の座屈設計基準の見直しを目的として実施されたものである。検討結果は、最終的には、当時の「もんじゅ」の設工認審査過程における状況判断から、実機に直接適用されるには至らなかった。このため、成果報告書としての発行を控えてきたが、今後の大型炉用の合理的な座屈設計基準の開発の参考に供するため、本報告書を印刷・発行することにした。

以上の観点から、「高温構造設計方針」において座屈評価式ならびに安全係数を見直す必要性があった。現行規定においては、円筒殻の軸圧縮座屈応力として用いている設計降伏応力は座屈応力として若干大きすぎる反面、安全係数は他の基準のそれに比較して保守的すぎると考えられる。このことは、科学技術庁の委託調査「もんじゅ原子炉施設の設工認基準に関する調査」⁶⁾（昭和58年、日本溶接協会）においても指摘されてきた。

そこで、今回の見直しでは、座屈設計の方法論として「解析による設計」を基本とすることとし、円筒殻の座屈強度評価式については、材料の塑性による効果および初期形状不整（以下、単に初期不整ということがある）による効果を解析的に評価し、収集した既存の実験データの下限を十分な信頼性をもって表すことのできる簡便な表示式を開発する。また、座屈安全係数については、収集した実験データベースを用いて許容座屈荷重評価式の信頼性を評価し、合理的な方法でその値を設定することとし、これにより従来から懸案となっている安全係数の低減化を図る。なお、本研究は、一般の殻構造の弾塑性域の座屈設計を解析により行う方法論を円筒殻の当該座屈問題に具体的に適用したものであって、この方法論の妥当性を実験データに基づき実証したものと見なすことができる。

第2章 円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈の評価基準改訂案

本章では、円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈防止に関して規定した「高温構造設計方針」の付録G. 1および別表2.4について見直し検討を行った結果、最終的に得られた改訂案をまず示すことにする。付録G. 1については全面改訂、別表2.4については荷重制御型の時間に依存しない座屈に関する荷重安全係数の部分改訂を行っている。

【付録G. 1改訂案】

付録G. 1 円筒殻の軸圧縮及び（又は）曲げ座屈の評価

円筒殻が軸方向の圧縮荷重及び（又は）曲げ荷重を受ける場合にあつては、次の不等式を満足する場合は、時間に依存しない座屈は生じないとすることができる。

$$F_c / A + M / (yZ) \leq \sigma_s / f_B \quad (G.1)$$

ここで

- F_c : 軸方向の圧縮荷重 (kg)
 M : 曲げモーメント (kg・mm)
 A : 円筒殻の断面積 (mm^2) = $2\pi Rt$
 Z : 円筒殻の断面係数 (mm^3) = $(\pi/32) \{D_o^4 - (D_o - 2t)^4\} / D_o$
 f_B : 荷重制御型の時間に依存しない座屈に対して別表2.4に定める値

$$\sigma_s = \text{Min} (\alpha \eta \sigma_{cr}, S_y) \quad (G.2)$$

$$y = 1.08 + 0.22 \exp \{-8.9 a(R/t)\} - 0.07 \exp \{-28.0 a(R/t)\} \quad (G.3)$$

ただし

$$\sigma_{cr} = E (t/R) / \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (G.4)$$

$$\alpha = 0.207 + 0.643 \exp \{-(1/\lambda)(R/t)\} + 0.15 \exp \{-(1/40)(R/t)\} \quad (G.5)$$

$$\eta = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} 1.508 a(R/t) + 0.038 [1 - \exp \{-33.0 a(R/t)\}], \\ 1 - 0.713 \{a(R/t) - 1.167\}^2 \end{array} \right. \quad (G.6)$$

$$\eta = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} 1.508 a(R/t) + 0.038 [1 - \exp \{-33.0 a(R/t)\}], \\ 1 - 0.713 \{a(R/t) - 1.167\}^2 \end{array} \right. \quad (G.7)$$

$$\lambda = 46.67 + 0.5333/(a + 5.5 \times 10^{-4}) \quad (G.8)$$

- a : 材料に応じて以下に定める値

{	5.5×10^{-4}	SUS304	(425~600°C)
}	1.0×10^{-3}	2¼Cr-1Mo(NT)	(375~550°C)

E : 考えている状態の板厚平均温度に対して別表1.8に定める値 (kg/mm^2)

ν : 上記温度に対して別表1.9に定める値

S_y : 設計降伏点であり、別表1.4に定める値 (kg/mm^2)

R : 円筒殻の平均半径 (mm) = $(D_o - t)/2$

D_o : 円筒殻の外径 (mm)

t : 円筒殻の板厚 (mm)

ただし、軸長が著しく長い場合には別途オイラー型の座屈の評価も行うものとする。

【別表 2. 4 改訂案】

別表 2. 4 座屈に関する安全係数

	荷重制御型座屈に関する荷重の安全係数		ひずみ制御型座屈に関するひずみの安全係数 ¹⁾	
	時間に依存しない座屈	時間に依存する座屈	時間に依存しない座屈	時間に依存する座屈
設計条件	2. 0	—	1. 6 7	—
運転状態 I	2. 0	1. 5	1. 6 7	1. 0
運転状態 II	2. 0	1. 5	1. 6 7	1. 0
運転状態 III	1. 6 7	1. 5	1. 4	1. 0
運転状態 IV	1. 3 4	1. 2 5	1. 1	1. 0
試験状態	1. 6 7	—	1. 6 7	—

注 1) 顕著な弾性追従が生じる可能性がある場合は、ひずみ制御型座屈に対しても荷重制御型座屈に関する安全係数を適用するものとする。

第3章 円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈評価式と安全係数の策定

3.1 円筒殻の軸圧縮座屈および曲げ座屈に関する従来の研究

軸圧縮あるいは曲げを受ける円筒殻の座屈挙動は、Fig.1 に示すように半径 R と板厚 t の比 R/t によって様相が異なる。 R/t が大きい場合は弾性座屈が生じるが、 R/t が小さくなるに従って座屈応力は高くなり材料の比例限を超えると塑性座屈が生じる。炭素鋼のような弾完全塑性に近い材料では、 R/t の小さい領域で座屈応力が頭打ちの傾向を示すので、塑性座屈の領域は容易に識別できる。これに対して加工硬化の大きい材料では、塑性座屈と弾性座屈の境界は明確には現れない。また、座屈挙動の特徴として、 R/t の小さい塑性座屈から R/t の大きい弾性座屈に移行するにつれて、Fig.1 に示すように、座屈における荷重-変位関係は屈服型から分岐型へ、座屈波形は軸対称型から非軸対称型のダイヤモンドパターンへと変化していくことが知られている。「高温構造設計方針」で対象とするオーステナイト系ステンレス鋼や $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼は顕著な加工硬化特性を有し、塑性座屈の領域が広く、実用の R/t の範囲ではほとんど塑性座屈を示すと考えられる。

軸圧縮を受ける円筒殻の塑性座屈の研究は、Timoshenko⁶⁾ によって初めて行われた。これは弾性座屈理論式の中の縦弾性係数（ヤング率）の代わりに換算係数（reduced modulus）を導入して塑性座屈の式を得たもので、柱に対する von Karman の理論と同じ考え方に基づくものであった。しかし、この換算係数に基づく塑性座屈理論は、1947年の有名な Shanley⁷⁾ の論文によってその非保守性が指摘された。

Bijlaard⁸⁾ は Engesser の接線係数理論（tangent modulus theory）に基づき、軸圧縮を受ける無限長の完全な円筒殻に対する塑性座屈の解析解を求めた。解はつりあい方程式から導かれた特性方程式を解く方法によって得られた。Bijlaard は、座屈モードとして軸対称型および非軸対称型を取り扱ったが、非軸対称の座屈荷重が軸対称のものより若干高いこと、および、塑性の変形理論（deformation theory）に基づく座屈荷重の解が実験値に近いことを示した。

その後、Gerard⁹⁾ が再びこの問題を考察し、Bijlaard と本質的に同じ結果を得た。両者の相違は、Gerard の座屈荷重の式が Bijlaard の式よりやや単純な形をしているだけであった。

軸圧縮を受ける円筒殻の弾性座屈に関して、実験で得られる座屈荷重が理論値を極端に下回ることはよく知られているが、この主な原因が初期不整にあるということが、Koiter の漸近座屈理論¹⁰⁾ によって初めて究明された。Koiter は、軸対称の初期不整を仮定し、この理論およびそれを特別化した理論により弾性座屈領域での座屈荷重に対する初期不整感性を定量的に明らかにした^{10, 11)}。塑性座屈に対する Bijlaard や

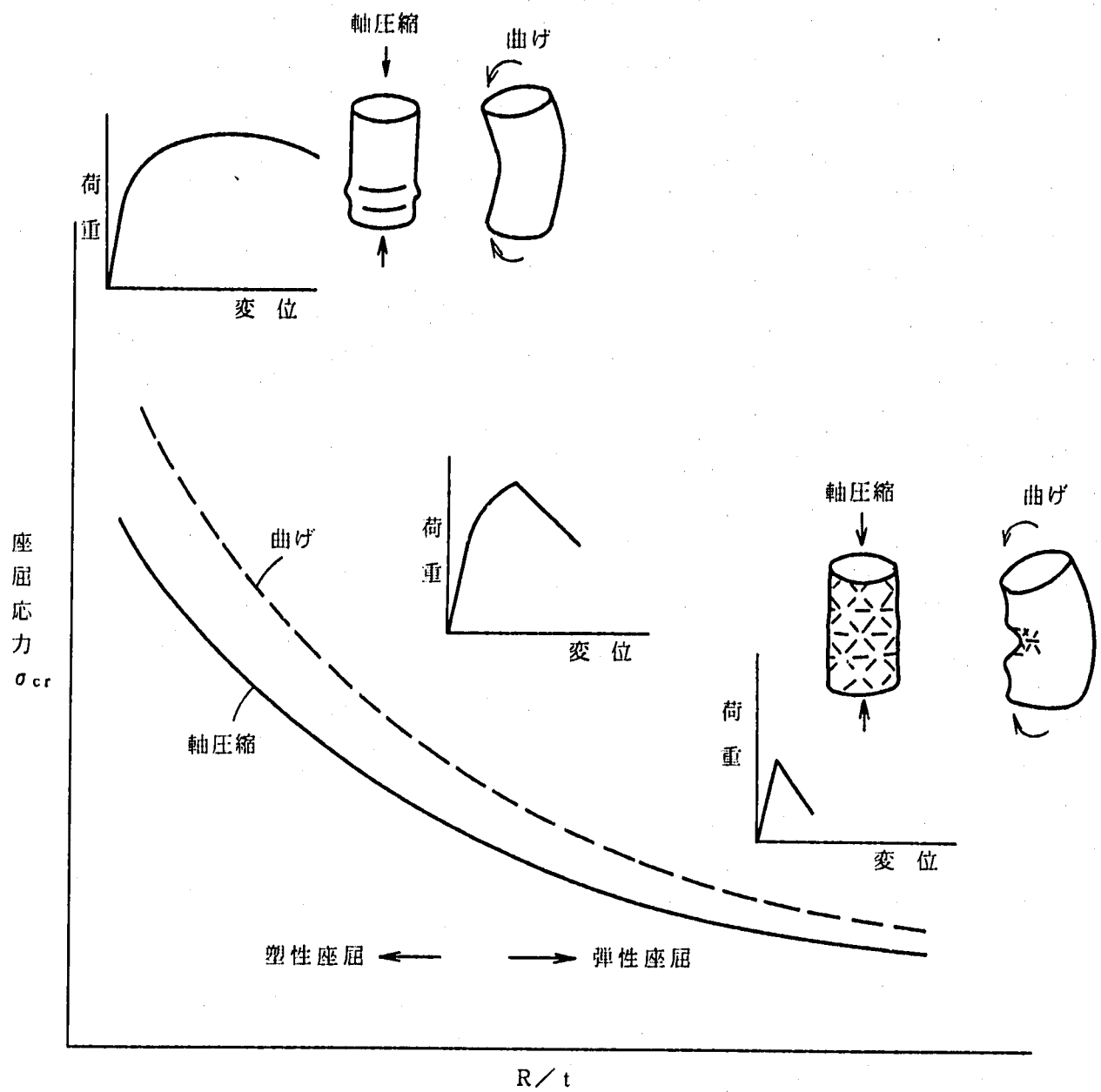


Fig.1 Typical buckling behaviors of cylindrical shells under axial compression or bending

Gerard の解析解は初期不整の影響を考慮していないけれども、一部の実験データとかなり良い一致を示すことが報告されてきた。また一般に、塑性座屈の領域での初期不整の影響は弾性座屈のそれより相対的に小さいと考えられた。円筒殻の軸圧縮座屈に対して初期不整の影響を広く定量的に明らかにしたのは Gellin^{12, 13)} である。Gellin はこの問題を広範囲の材料（応力-ひずみ関係）と形状（R/t）に対して、初期不整量をパラメータとした解析を行い、塑性領域でも初期不整の影響がそれほど小さいものでないことを示した。この結果は、R/t が大きい弾性座屈領域では Koiter の結果に一致するもので、既存の実験データを包括的に説明する上で非常に有効であると考えられる。

一様な曲げを受ける円筒殻の座屈に関しては、軸圧縮の場合と同様な殻の局部座屈と、断面の偏平化による耐荷能力の低下をもたらす座屈の 2 つの現象がある。R/t が小さい領域では主として断面の偏平化による屈服座屈を示すが、R/t が大きい薄肉の領域では局部（分岐）座屈が支配的になり（Fig. 1 参照）、これらの中間の R/t 領域では座屈は両者が組み合わさって起きる。

弾性座屈の領域では、多くの研究者が曲げを受ける円筒殻の座屈応力を軸圧縮の場合の座屈応力と比較してきた。この中で、Flügge¹⁴⁾、Timoshenko⁸⁾ らは曲げの場合が若干高い座屈荷重を示すとしているが、その後の研究では、理論的には両者の差はほとんどないことが分かっている^{15, 16)}。しかしながら、実験によれば曲げ座屈応力は軸圧縮座屈応力よりも大きくなっている。この理由は、実験において座屈応力を低下させる主要因である初期不整が、曲げの場合には最大応力点でのみ効くものに対して、軸圧縮の場合はすべての点で効くことになり、その結果軸圧縮の場合の方が座屈応力の低下の可能性が大きいためと考えられる。塑性座屈の領域においては、R/t が小さくなるとともに曲げによる座屈荷重が軸圧縮の場合より大きくなり、その差が徐々に大きくなることが実験により知られている¹⁷⁾。

3.2 座屈評価式の改訂方法

軸圧縮および（または）曲げを受ける一様に長い円筒殻の座屈は、基本的にはすべて軸圧縮座屈に置き換えて次式により評価するものとする。

$$\sigma_c + \sigma_b / y \leq \sigma_{cr} / f_B \quad (1)$$

ここで、

σ_c : 軸方向の圧縮応力

σ_b : 曲げモーメントにより断面表皮に生じる弾性計算に基づく最大応力（曲げモーメントを断面係数で除した値）

- y : 曲げ座屈強度の軸圧縮強度に対する比
 σ_{cr} : 円筒殻の軸圧縮座屈応力
 f_B : 運転状態に応じて定める座屈安全係数

現行の「高温構造設計方針」では、式(1)の右辺の σ_{cr} と f_B は以下のように定められている。

$$\sigma_{cr} = S_y \quad (\text{設計降伏応力})$$

$$f_B = \begin{cases} 3.0 & (\text{設計条件, 運転状態 I, II}) \\ 2.5 & (\text{運転状態 III}) \\ 1.5 & (\text{運転状態 IV}) \\ 2.25 & (\text{試験状態}) \end{cases} \quad (3)$$

円筒殻の軸圧縮座屈に対する上記安全係数は、「解析による設計」を基本とする ASME Code Case N-47 にならったもので、3.7 に述べるように他の座屈基準類に較べると大きめである。安全係数が大きめに設定されたことと関連して、 σ_{cr} は既存の座屈データを代表するデータとしては逆に若干大きめの塑性崩壊に対応する設計降伏応力 S_y に設定されている。

今回の改訂に際して、座屈設計の基本的な考え方を Fig. 2 に示す。まず、完全な円筒殻に対しては、弾性座屈の(古典)理論値、あるいはこれが比例限を超える場合は塑性の効果を考慮した理論解(Bijlaard)が基本となる。実験データは通常これらの理論値よりかなり低いレベルに分布する。基準とする座屈応力(安全係数を含まないもので、ここでは基準座屈応力とよぶ)は、他の多くの座屈基準と同様に実験データの下限に設定するのが適当と考えられる。この設定に当たっては、実験データが座屈理論値から低下する主たる原因は材料のばらつきを除けば初期不整にあるので、実験データの下限を包絡するように適当な初期不整を仮定して基準座屈応力を定める。設計許容応力はこの基準座屈応力に安全係数を導入して規定される。

上記考え方にに基づき、今回の改訂では、座屈安全係数 f_B について他の座屈基準並に改訂する一方、基準座屈応力 σ_{cr} と係数 y について次の方針で見直しを行うものとした。

- i) 塑性座屈の理論解(Bijlaard)をベースにして初期不整による座屈荷重の低下効果を評価した Gellin の解析結果¹³⁾ を利用して σ_{cr} を次式のように表す。

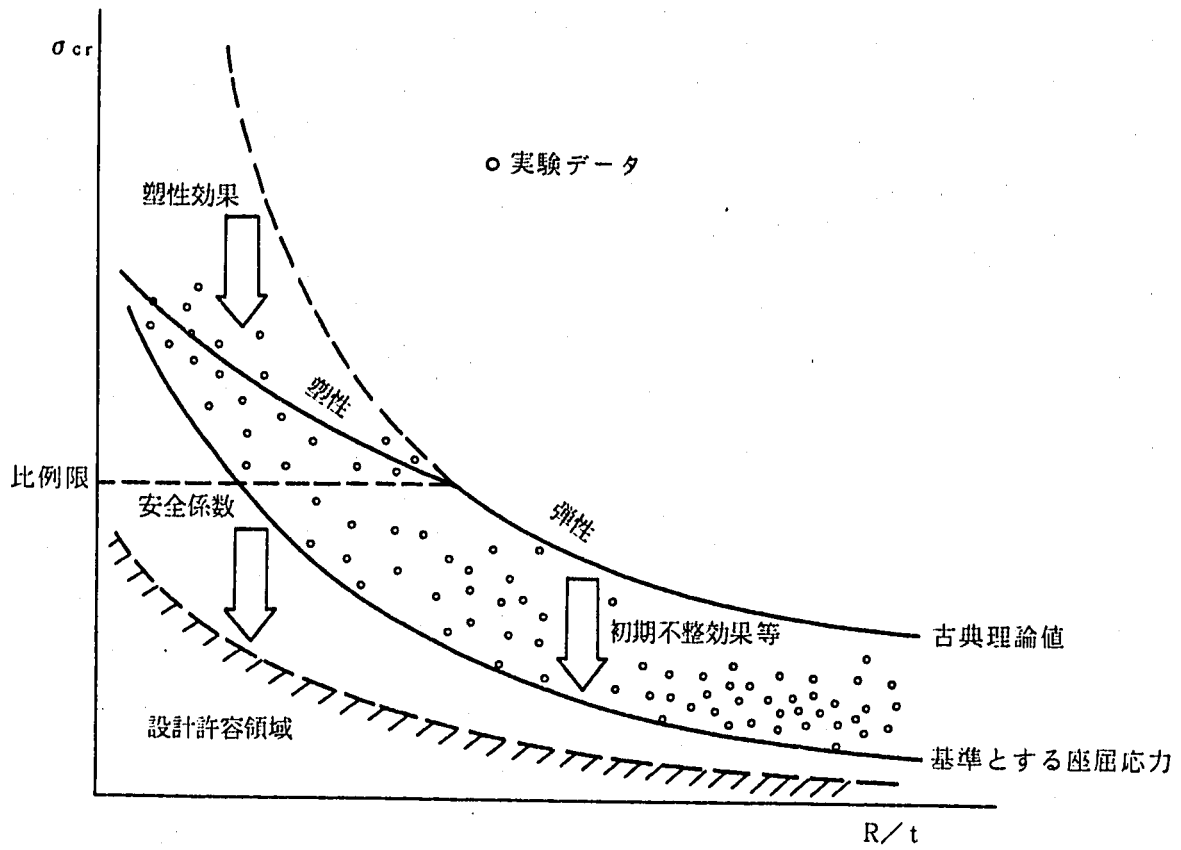


Fig.2 Illustration of the basic buckling design methodology

$$\sigma_{cr} = \alpha \eta \sigma_{cr}^0 \quad (4)$$

ここで、 σ_{cr}^0 は弾性座屈応力理論値 $Et/(R\sqrt{3(1-\nu^2)})$ である。ただし、 E と ν はそれぞれ縦弾性係数およびポアソン比である。 η は塑性による低減係数、 α は初期不整による低減係数であり、いずれも形状パラメータ R/t と材料の塑性特性の関数として定式化するものとする。ここでは、 η は最小の応力ひずみ関係を用いて定めるものとし、また α は、製作時の許容不整量（別途規定が必要）に対応させて規定することにする。

- ii) 従来軸圧縮による円筒殻の塑性座屈実験データを可能なかぎり収集・分析し、
 - i) で求めた σ_{cr} が十分な信頼性で実験データの下限を包絡することを確認する。
- iii) 曲げ座屈についても、従来塑性座屈データを収集し、軸圧縮座屈データとの比較、ならびに解析による検討を行った上で γ 係数を与える。

座屈荷重評価式の中に塑性低減係数 η および初期不整低減係数 α を取り入れる方法は、各係数の決め方、表示法等に相違があるものの、他の座屈基準でも採用しているものである（3.8 参照）。Gellin の解析結果は、塑性の効果と、軸対称の初期不整という仮定の下ではあるが、初期不整の効果を厳密に評価したもので、既存の実験データの傾向との対応が良好であるならば、設計評価に十分利用できる。また、Gellin の結果は R/t の大きい弾性座屈領域で既存の実験データを十分包絡しているとされている Koiter の結果 ($\sigma_{cr} \approx 0.2 \sigma_{cr}^0$) と矛盾がなく、弾性座屈および塑性座屈を含む広範囲の R/t の領域で適切に座屈応力を評価できると考えられる。

3.3 Gellin の円筒殻軸圧縮座屈解析の概要

ここでは、円筒殻の軸圧縮座屈評価式作成の基礎となった Gellin の解析の概要を述べる。なお、この解析については、Gellin の論文^{12, 13)} に従って別途追解析を実施し、結果が妥当であることを確認した。

Gellin は円筒殻の軸圧縮座屈の塑性域での初期不整効果を数値解析に基づき定量的に評価している。解析としては、Fig. 3 に示すように、軸圧縮荷重を変数として、軸対称の平衡状態（基本経路）を Newton-Raphson 法により求め、次に非軸対称の平衡状態が存在する荷重レベル（分岐座屈荷重）を固有値解析を実施して求めるという方法を採用している。解析モデルは、Fig. 3 に示すように半径 R 、板厚 t の円筒殻に圧縮荷重 P が作用して座屈するときの座屈波長分 $2\pi/p$ を考える。初期不整量としては Koiter が仮定したのと同じ次式で表される軸対称の初期不整を仮定した。

$$\bar{w} = \bar{\xi} \cos px \quad (6)$$

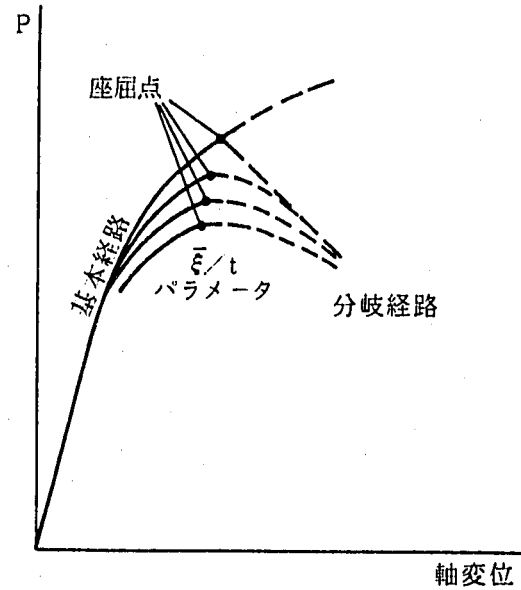
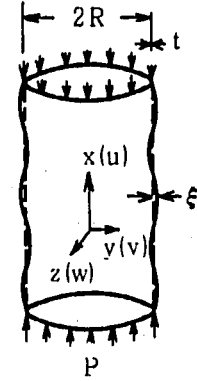
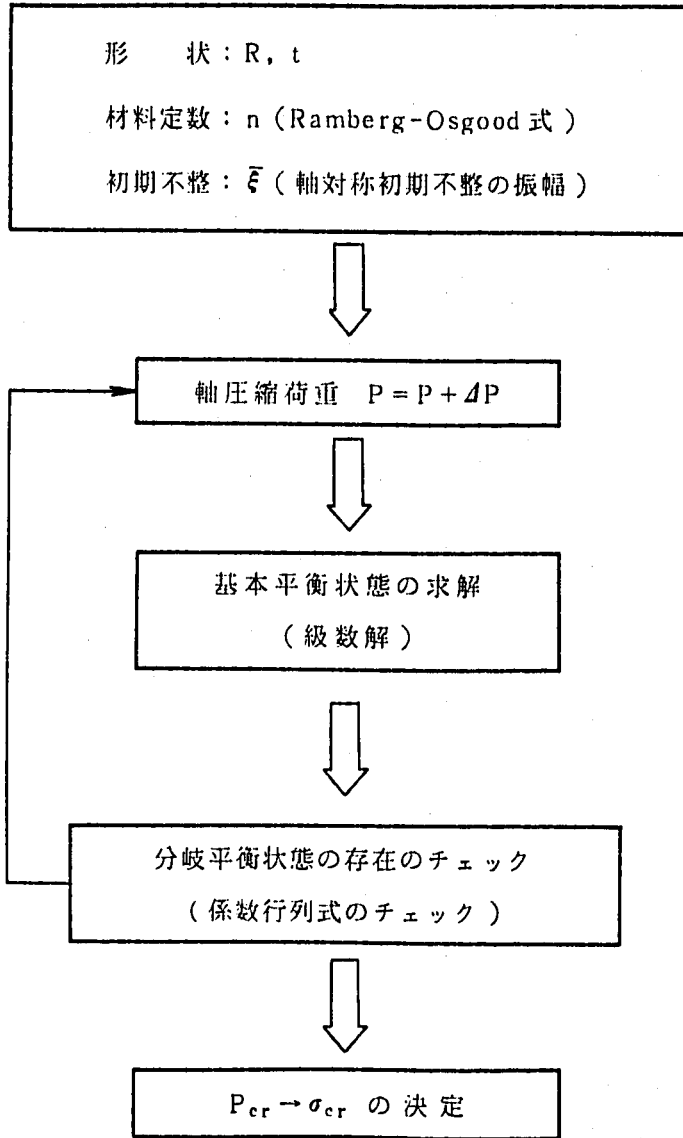


Fig. 3 Flow of buckling analysis for an axially compressed cylindrical shell by Gellin

座屈前の軸対称の変位を、外向き半径方向、軸方向についてそれぞれ

$$\begin{cases} w_0 = a_0 + \sum_{i=1,2} (a_i \cos ipx) \\ u_0 = -b_0 x + \sum_{i=1,2} (b_i \sin ipx) \end{cases} \quad (7)$$

とおき、座屈前の軸対称の平衡状態を満足するような係数 a_0, a_1, b_1 ($i=0,2$) を、荷重係数 b_0 を変数として Newton-Raphson 法の繰返しによって求める。

次に、軸対称な平衡状態が安定かどうかを、周方向に座屈波形を生じる非軸対称変位として

$$\begin{cases} \bar{w} = \cos sy \sum_{i=1,2} w_i \cos[(2i-1)px/2] \\ \bar{u} = \cos sy \sum_{i=1,2} u_i \sin[(2i-1)px/2] \\ \bar{v} = \cos sy \sum_{i=1,2} v_i \cos[(2i-1)px/2] \end{cases} \quad (8)$$

を与えて、係数 w_i, u_i, v_i に対して非軸対称の平衡状態が存在する固有値解析を周方向座屈波数 s を変数として実施すれば分岐座屈荷重が求まることになる。

円筒殻の材料としては、Ramberg-Osgoodタイプの応力ひずみ関係式で表される一般的な材料を仮定する。すなわち

$$\varepsilon = (\sigma / E) \{ 1 + (3/7)(\sigma / \sigma_{0.7E})^{n-1} \} \quad (9)$$

ここで、 E は縦弾性係数、 $\sigma_{0.7E}$ は Fig. 4 のように応力-ひずみ曲線と $(7/10)E$ の勾配の直線との交点の応力に相当する材料定数、他の 1 つのパラメータ n は曲線の滑らかさを表す材料定数である。

Gellin は、以上のような数値解析を実施して得た結果を無次元化表示して整理している。すなわち、完全な円筒殻の座屈荷重に対する初期不整を有する円筒殻の座屈荷重 p_c / p_{c0} が、初期不整量の板厚に対する割合 $\bar{\xi} / t$ および $\sigma_{0.7E}$ の弾性座屈応力理論値 $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr0}$ をパラメータとしてまとめられている。加工硬化を表す材料パラメータは $n=3, 5, 10$ の場合について解析されている。 $n=10$ の場合の結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。本研究はこの結果を利用して座屈評価式を作成している。

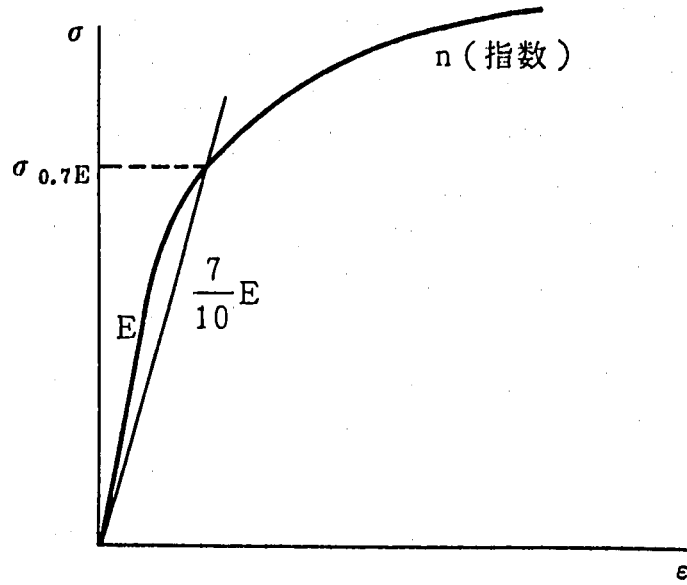


Fig.4 Ramberg-Osgood type stress-strain relation

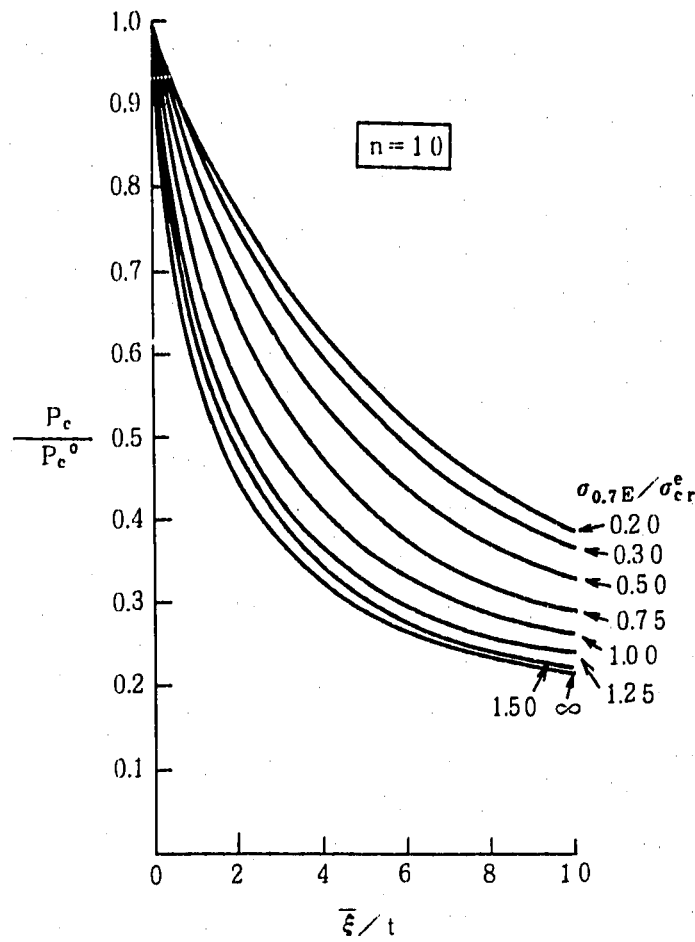


Fig.5 Buckling stress P_c / P_c^0 versus initial imperfection $\bar{\xi} / t$

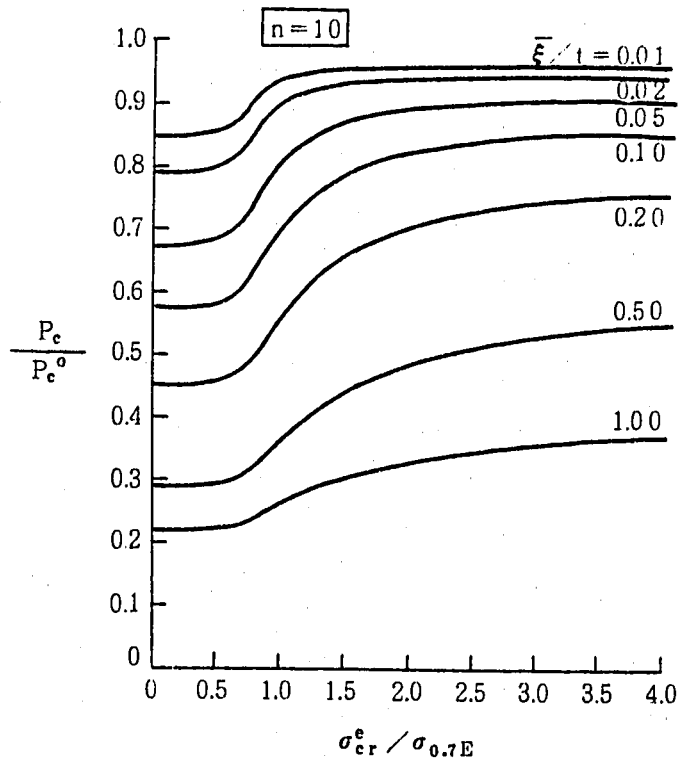


Fig.6 Buckling stress P_c / P_c^0 versus parameter $\sigma_{cr}^e / \sigma_{0.7E}$

3.4 塑性および初期不整による低減係数

円筒殻の軸圧縮座屈評価式は、前述のように次式で表すものとする。

$$\sigma_{cr} = \alpha \eta \sigma_{cr}^0$$

塑性低減係数 η および初期不整低減係数 α は、SUS304 と 2¼Cr-1Mo鋼に対して以下に述べるように決定した。なお、座屈評価式は最小の応力ひずみ関係を用いて作成する。

A. 塑性低減係数 η

塑性低減係数 η は Bijlaard (あるいは Gerard) により理論的に求められており、Gellinの研究もこれに基づいている。Gerardにより提案された式は Bijlaardの式と数値的にはほとんど差がなく、表示がやや簡単なだけである。Bijlaardの式は次のように表される。

$$\eta = (E_t / E) \sqrt{(1 - \nu^2) / (1 - \nu_d^2)} \quad (9)$$

ただし

$$\nu_d^2 = \nu_t^2 + 0.75(1 - E_t / E_s) \quad (10)$$

$$\nu_t^2 = 0.5 + (\nu - 0.5) E_t / E \quad (11)$$

ここで、 E_t は接線係数、 E_s はセカント係数、 ν は弾性のポアソン比である。

材料の応力-ひずみ関係式として、Ramberg-Osgoodタイプの表示式(5)を用いると、Schilling¹³⁾ や Gellin¹³⁾ の得た無次元化表示の座屈応力チャートを作成することができる。すなわち、Fig.7 に示すように、縦軸に塑性低減係数 η (初期不整のない円筒殻の塑性座屈応力を弾性理論値 σ_{cr}^0 で無次元化したもの)、横軸に $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr}^0$ をとると、材料パラメータ n のみに依存した座屈応力チャートが得られる。横軸の $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr}^0$ は次のように表すことができる。

$$\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr}^0 = \sqrt{3(1 - \nu^2)} a R/t \quad (12)$$

ただし

$$a = \sigma_{0.7E} / E \quad (13)$$

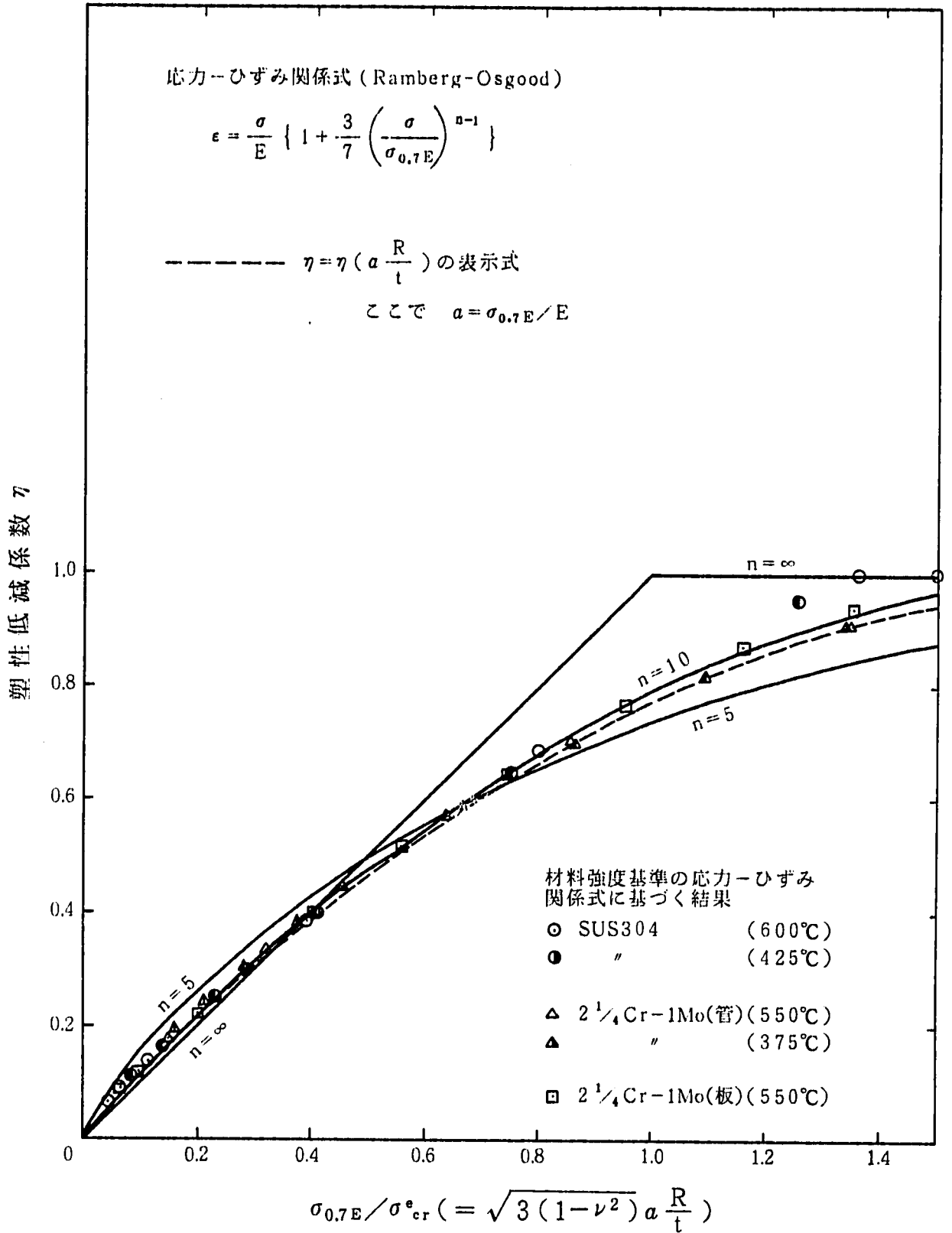


Fig.7 Plasticity reduction factor η according to Bijlaard's equation

式(13)のパラメータ a は材料の応力-ひずみ関係から定まる材料定数である。したがって、 $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr.0}$ は材料定数と形状 R/t の両者を考慮できるパラメータとなっている。

今回対象とする SUS304 と 2¼Cr-1Mo鋼(NT)の最小応力-ひずみ曲線に対する材料パラメータ n 値は、2つの材料とも対象温度領域 (SUS304 : 425 - 600°C, 2¼Cr-1Mo鋼(NT) 375 - 550°C)において、 $n=10$ 程度である。Fig.7 は実際の最小応力-ひずみ関係式を用いた結果も示しているが、ここで対象とした $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr.0} < 0.6$ の領域では、 $n=10$ の曲線を用いることが妥当であることが分かる。 η の表示式は、 $n=10$ の曲線に対応して次式のように定めた。

$$\eta = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} 1.508 a(R/t) + 0.038[1 - \exp \{ - 33.0 a (R/t) \}], \\ 1 - 0.713 \{ a(R/t) - 1.167 \}^2 \end{array} \right. \quad (14)$$

式(14)の a 値は材料、温度に応じた最小応力-ひずみ曲線から Table 1のように定まる。表から明らかなように、 a 値は温度依存性が大きくないので、各材料ごとに対象温度領域で座屈応力を保守的に代表できる次の値とすることができる。

$$a = \begin{cases} 5.5 \times 10^{-4} & \text{for SUS304 (425 - 600°C)} \\ 1.0 \times 10^{-3} & \text{for 2¼Cr-1Mo鋼(NT) (375 - 550°C)} \end{cases} \quad (15)$$

以上のようにして定めた a 値を使って、各材料に対する η と R/t の関係を表すと、Fig.8 のようになる。これらの材料では塑性による座屈応力の低下効果は顕著であり、実用の R/t のほとんどの領域でこれを考慮する必要があることが分かる。参考までに、図中に座屈実験データの多いアルミ合金 (室温) の場合の曲線を示したが、 $R/t > 300$ では弾性座屈を示し、SUS304や 2¼Cr-1Mo鋼(NT)とは著しく異なっている。また、SUS304と 2¼Cr-1Mo鋼(NT)の比較では、SUS304の方が塑性の効果が大いことが分かる。

B. 初期不整低減係数 α

初期不整低減係数 α の決定においては、Gellinの解析結果 (Fig.5および Fig.6) より作成される α と $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr.0}$ の関係 (Fig.9) が基礎になる。Fig.9は、図中に示すような初期不整量 ξ を板厚 t で無次元化した ξ / t をパラメータとして、 α と $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr.0}$ の関係を整理したものである。解析においては、現実に存在する初期不整の効果をも、このような正弦状の初期不整に置き換えて評価しようとする方法が採られることが多く、従来この方法で、実際の座屈荷重データの理論値からの低下をかなりよ

Table 1 Values of parameter α for SUS304 and 2¼Cr-1Mo(NT)

材 料	温 度	α
S U S 3 0 4	4 0 0 °C	5.53×10^{-4}
	6 0 0 °C	5.77×10^{-4}
2¼Cr-1Mo(NT) (板)	3 7 5 °C	1.39×10^{-3}
	5 5 0 °C	1.36×10^{-3}
2¼Cr-1Mo(NT) (管)	3 7 5 °C	1.01×10^{-3}
	5 5 0 °C	1.07×10^{-3}

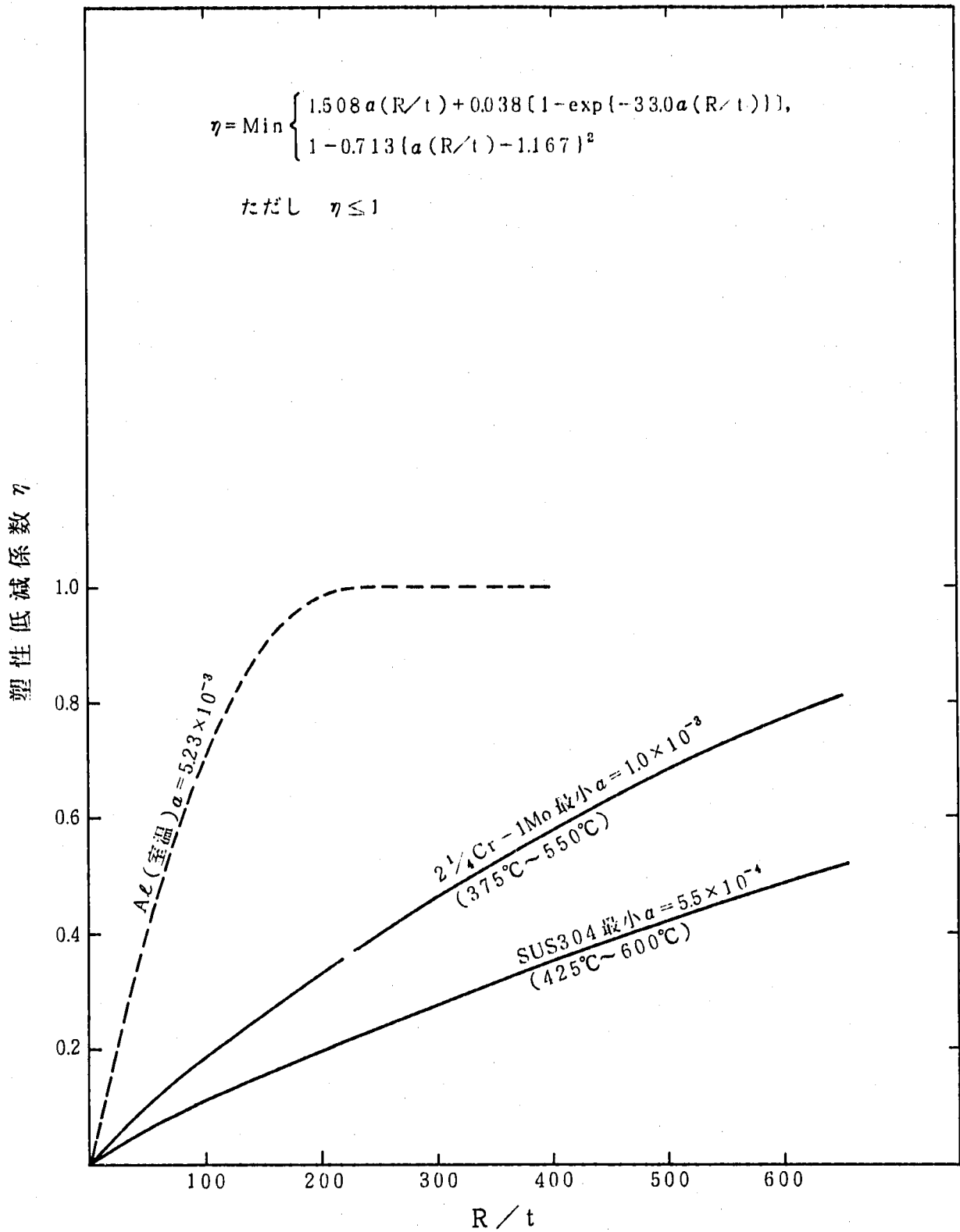


Fig.8 Plasticity reduction factor η versus R/t

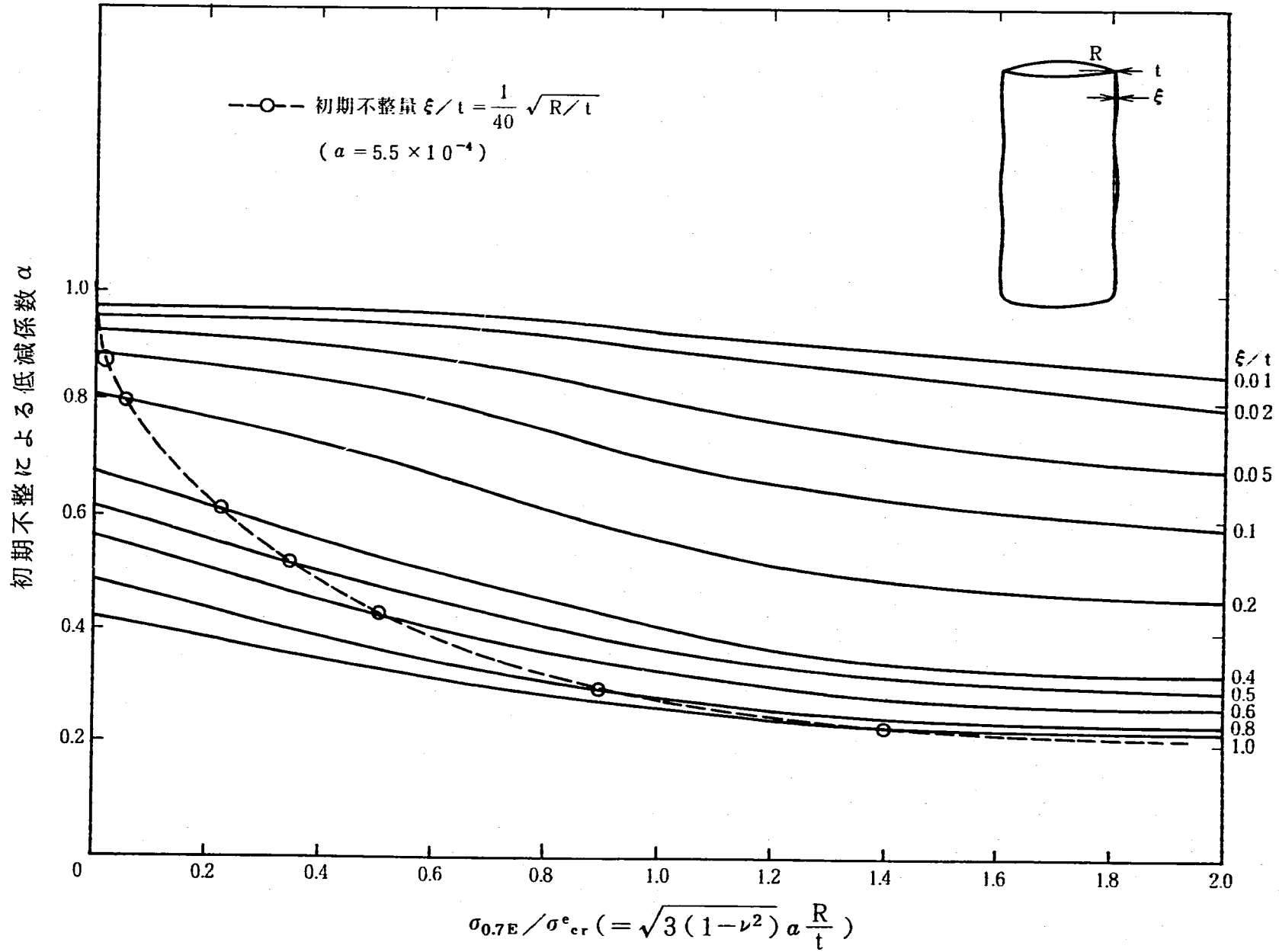


Fig. 9 Capacity reduction factor α using Gellin's results

く説明することができた。想定する初期不整量に関しては、結果として得られる座屈評価式が、既存の座屈実験データを十分包絡できる程度に見込んでおく必要がある。また、初期不整量の大小は製作精度に関係しており、 R/t が小さいほど初期不整量は小さくなると考えるのが妥当であり、ここでは DnV 基準（付録A）にならって次式を用いることにした。

$$\xi / t = (1/C)\sqrt{R/t} \quad (16)$$

ここで、 C は定数であり、 DnV 基準では $C = 30$ としている。この初期不整は、厳密な意味での製作上の規制というより、むしろ、現実に見込むべき座屈荷重理論値（弾塑性）からの低下の程度を説明するために導入すると考えるのが適当であろう。式（16）における初期不整の大きさに関するパラメータ C は、 DnV 基準では $C = 30$ としているが、ここでは試行の結果、 $C = 40$ を用いることにより、最終的に得られる基準座屈応力が既存の座屈実験データの下限を十分な信頼度でもって表示できていることを確認した（3.6 および 3.7 参照）。

Fig. 9 に示した破線は、 $a = 5 \times 10^{-4}$ の材料（SUS304 はこれに相当）に対して、 $\xi/t = (1/C)\sqrt{R/t}$ の初期不整（ $C = 40$ ）を仮定した上で、座屈応力の初期不整感性をプロットしたものである。このプロットを得る手順は以下の通りである。

- i) 初期不整 ξ/t の値を（例えば 0.5 のように）仮定する。
- ii) この初期不整に対応する R/t の値を $R/t = (C \xi/t)^2$ により求める。
- iii) Fig. 9 のグラフの横軸の位置を、 $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr} = \sqrt{3(1-\nu^2)} a R/t$ に当該材料の a 値を代入して求める。
- iv) 対応する α 曲線（ $\xi/t = 0.5$ ）上の iii) で求めた位置が求めるプロット点となる。
- v) ξ/t 値を変化させて i) から iv) までの操作を繰返し、一連の初期不整感性の曲線（Fig. 9 の破線）が得られる。

以上の手順に従って、SUS304、2¼Cr-1Mo鋼(NT)、アルミ合金等を想定し、 a 値の異なる材料に対して同様のプロットを行い、これを α と R/t の関係にプロットし直したのが Fig. 10 である。この図をもとにして、 α と R/t の関係の傾向を考慮して、各材料に対してほぼ統一的に適用できる次の表示式を得た。

$$\alpha = 0.207 + 0.643 \exp \{-(1/\lambda)(R/t)\} + 0.15 \exp \{-(1/40)(R/t)\} \quad (17)$$

上式では、 $R/t = 0$ で $\alpha = 1$ 、 $R/t \rightarrow \infty$ で Koiter の弾性での解 $\alpha = 0.207$

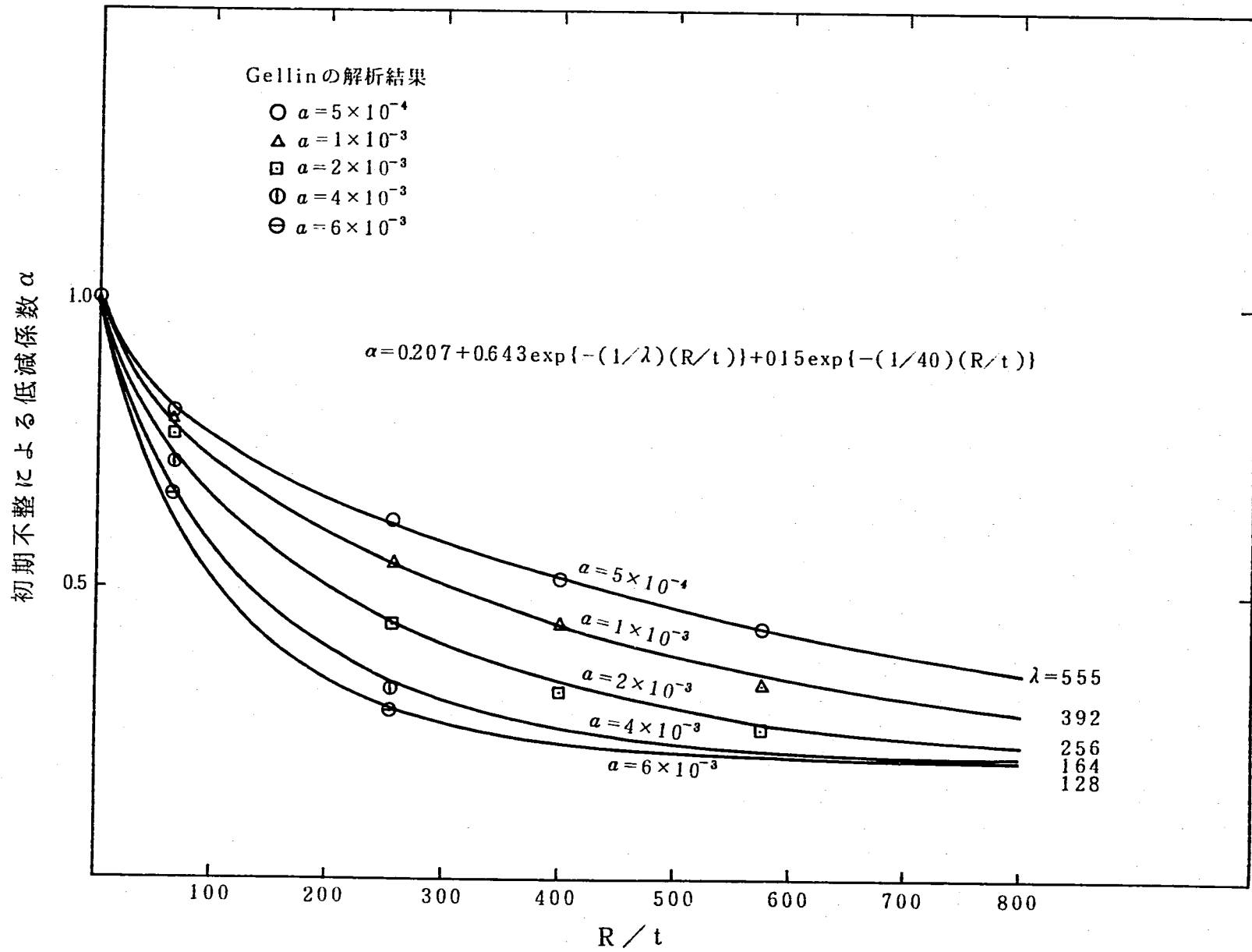


Fig.10 Capacity reduction factor α versus R/t

に一致するように関数形を定めている。λ値は材料ごとに（a値に対応して）定められるようになっており、Fig.10に示す通りである。Fig.11は、aとλの関係をプロットしたものであり、λは次の近似式で表すことにする。

$$\lambda = 46.67 + 0.5333 / (a + 5.5 \times 10^{-4}) \quad (18)$$

式(17)および(18)は、いろいろな材料に対してa値が与えられれば、αとR/tの関係、すなわち、R/tに応じた座屈応力の初期不整効果を与えることになる。

SUS304および2¼Cr-1Mo鋼(NT)に対しては、それぞれの対象温度領域で式(15)のa値を使えば安全側である。このようにして、2つの材料に対するαはFig.12に示すような結果となる。

3.5 曲げ座屈の軸圧縮座屈に対する強度比

A. y係数の定義

「高温構造設計方針」では円筒殻の曲げ座屈強度は軸圧縮座屈強度に割増し係数yを乗じて評価することになっている（Fig.13参照）。この係数yの定義は次式による。

$$y = \sigma_{cr}^B / \sigma_{cr}^C = (M_{cr} / Z) / \sigma_{cr}^C \quad (19)$$

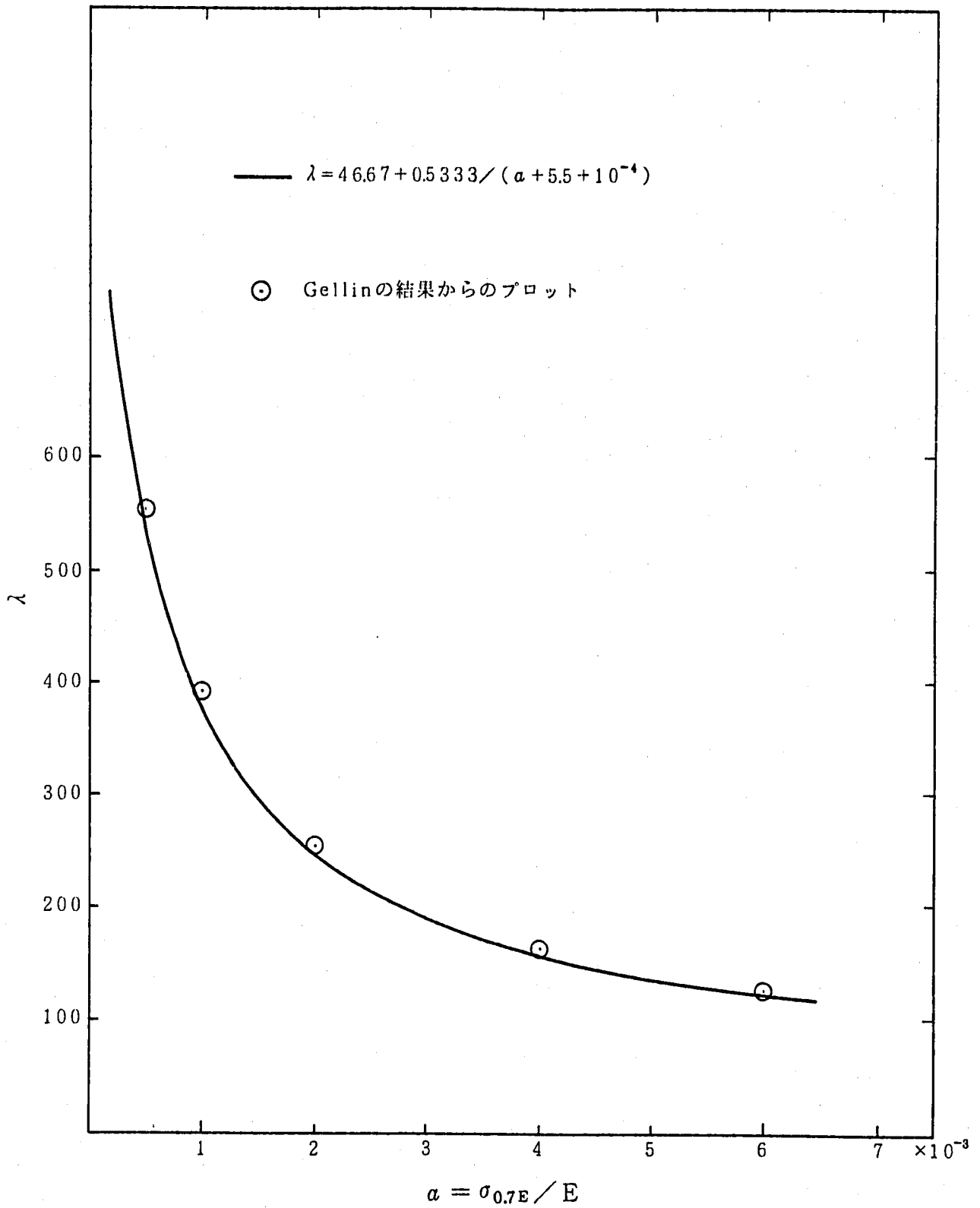
ここで

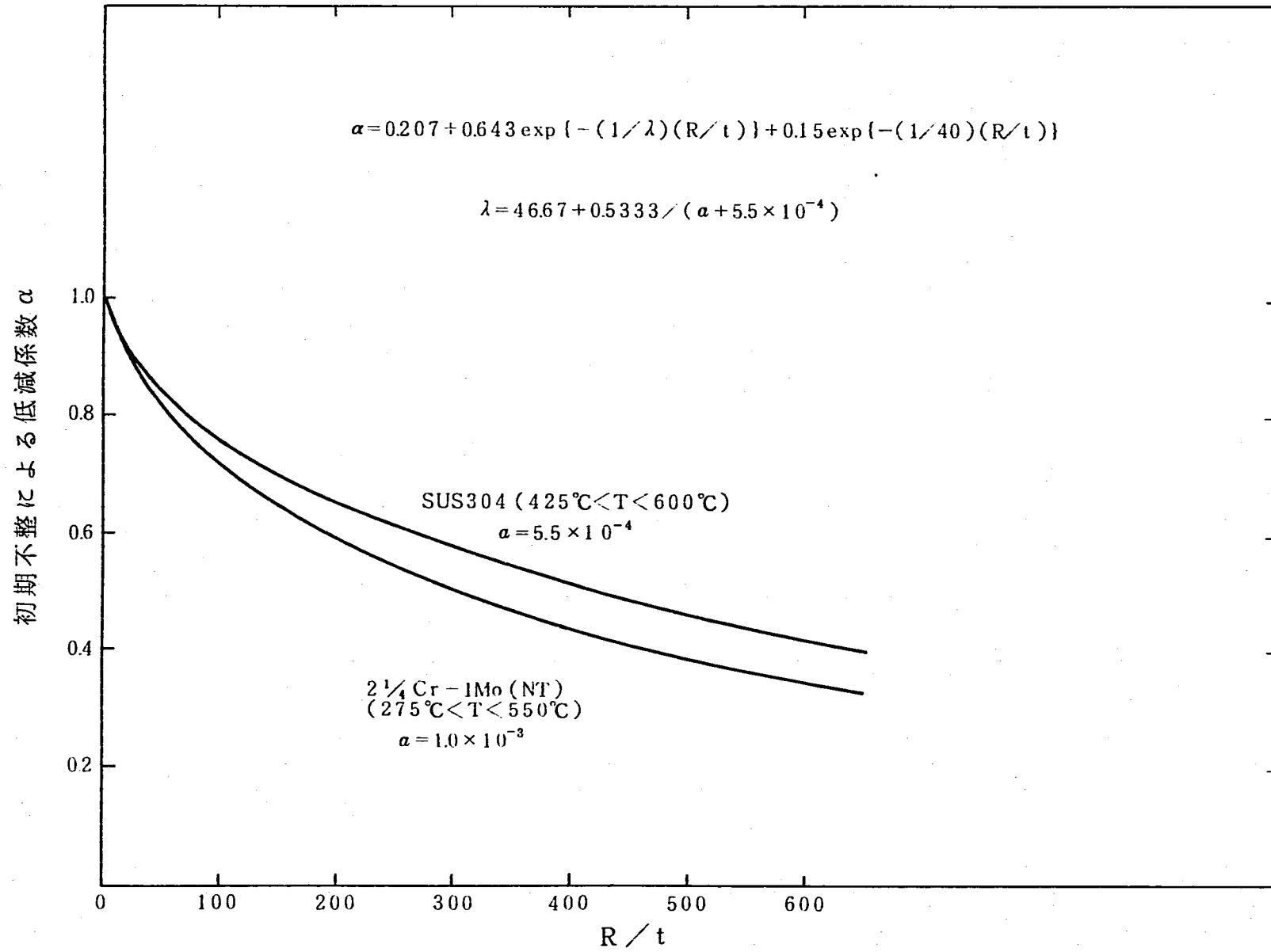
- M_{cr} : 曲げ座屈モーメント
- Z : 断面係数 ($= \pi R^2 t$)
- σ_{cr}^C : 軸圧縮座屈応力
- σ_{cr}^B : 弾性を仮定した見かけの曲げ座屈応力 ($= M_{cr} / Z$)

σ_{cr}^B は弾性座屈の場合は曲げ座屈時に断面表皮の真の応力を示すが、塑性座屈の場合は断面内で応力が非線形分布するため真の応力でなく、断面内で応力の線形分布（弾性）を仮定した上で評価した見かけの応力にすぎないことに注意する必要がある。

B. 従来の研究

円筒殻が一様に長い場合の弾性座屈は Brazier座屈¹⁰⁾として知られるもので、断面の偏平化によりモーメントの極大値で屈服座屈を生じる。この場合、座屈時のモーメント M_{cr} および応力 σ_{cr}^B は次式で表される。

Fig.11 Variation of λ with α

Fig.12 Capacity reduction factor for SUS304 and $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}(\text{NT})$

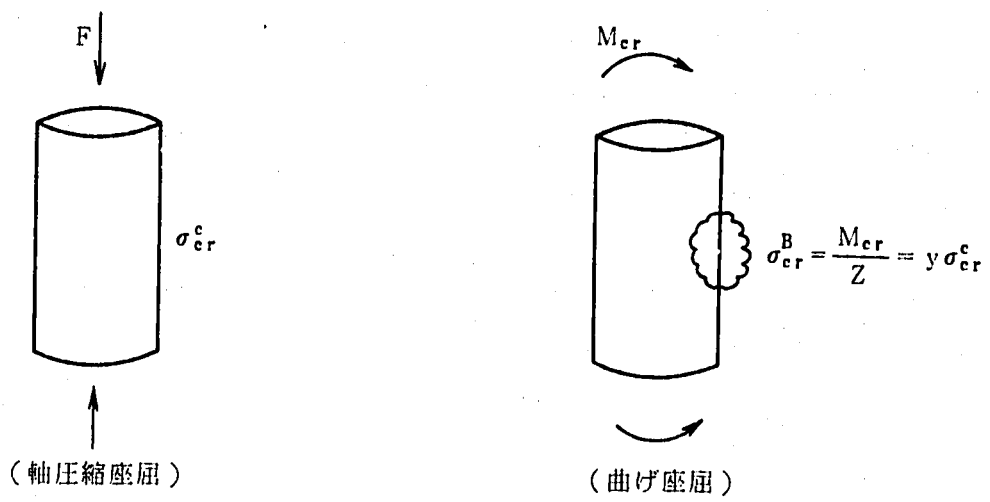


Fig.13 Evaluation of bending buckling of a cylindrical shell using the y factor

$$M_{cr} = (2\sqrt{2}/9) E \pi R t^2 / \sqrt{(1-\nu^2)} = 0.329 E \pi R t^2 \quad (20)$$

$$\sigma_{cr}^B = M_{cr}/Z = (2\sqrt{2}/9) E(t/R) / \sqrt{(1-\nu^2)} = 0.329 E(t/R) \quad (21)$$

曲げ座屈応力は、軸圧縮座屈応力の弾性理論値

$$\sigma_{cr}^B = E(t/R) \sqrt{3(1-\nu^2)} = 0.6 E(t/R) \quad (22)$$

に較べて約45%小さく、 $y = 0.55$ である。

一方、円筒殻が比較的短い場合は、断面の偏平化の効果は少なく、軸圧縮と同様のメカニズムで座屈を生じる。SeideとWeingartenの理論的研究¹⁵⁾により、弾性の曲げ座屈応力は軸圧縮座屈応力にほぼ等しく（僅か1~2%曲げ応力の方が大きい）、 $y \approx 1$ であることが分かっている。

円筒殻の長さとの曲げ座屈応力の関係については、Akselrad²⁰⁾、Almroth, Starnesら^{21, 22)}の研究がある。Akselrad²⁰⁾は、細長比が増すに伴い、軸圧縮座屈と同様の分岐座屈 ($M_{cr} / (E \pi R t^2) = 0.6$, すなわち $y = 1$) から、偏平化による屈服座屈 ($M_{cr} / (E \pi R t^2) = 0.329$, すなわち $y = 0.55$) へと移行する様子を明らかにし、 $L/R > 2.5 \sqrt{R/t}$ の長い円筒殻では完全に屈服座屈が生じることを示した。通常の容器等の長さの円筒殻（例えば $L/R = 5$ 程度）では端部の影響により偏平化が抑制され、軸圧縮と同様の分岐座屈を示すと考えられる。

以上は弾性曲げ座屈についての理論的研究であるが、塑性曲げ座屈についてはGellinにより詳細な検討が行われており¹³⁾、短い円筒（偏平化なし）と長い円筒（偏平化考慮）に対して Fig. 14のような結果を得ている。図の横軸 σ_y / σ_{cr}^e は R/t および σ_y / E （ここで σ_y は降伏応力）に比例するパラメータであり、縦軸 M_{cr} / M_{cr}^e 塑性による座屈モーメントの低減係数を示している。ただし、 M_{cr}^e は短い円筒殻の弾性の理論座屈モーメント ($M_{cr}^e = Z \sigma_{cr}^e$) である。この図から、「高温構造設計方針」の対象材料（SUS304, 2¼Cr-1Mo鋼で、図中の $n=10$ に相当）と実用の R/t の領域 ($R/t < 1000$) では塑性による座屈荷重の低減効果は極めて大きいことが分かる。また、 $\sigma_y / \sigma_{cr}^e < 0.3$ の領域（SUS304 では $R/t < 350$ ）においては、円筒殻の長さによらず同じ座屈モーメント（ y 係数に換算すると $y = 1.15 \sim 1.24$ 程度）を示し、偏平化の効果（長い円筒殻と短い円筒殻の座屈荷重の差）は徐々に現れ、弾性座屈の領域では、Gellinの結果は、SeideとWeingartenの結果（長い円筒殻、偏平化無視）¹⁵⁾ および Brazierの結果（長い円筒殻、偏平化考慮）¹⁹⁾とも矛盾していないことを示している。また、Gellinは短い円筒殻では塑性座屈の場合においても、弾性座屈の場合と同

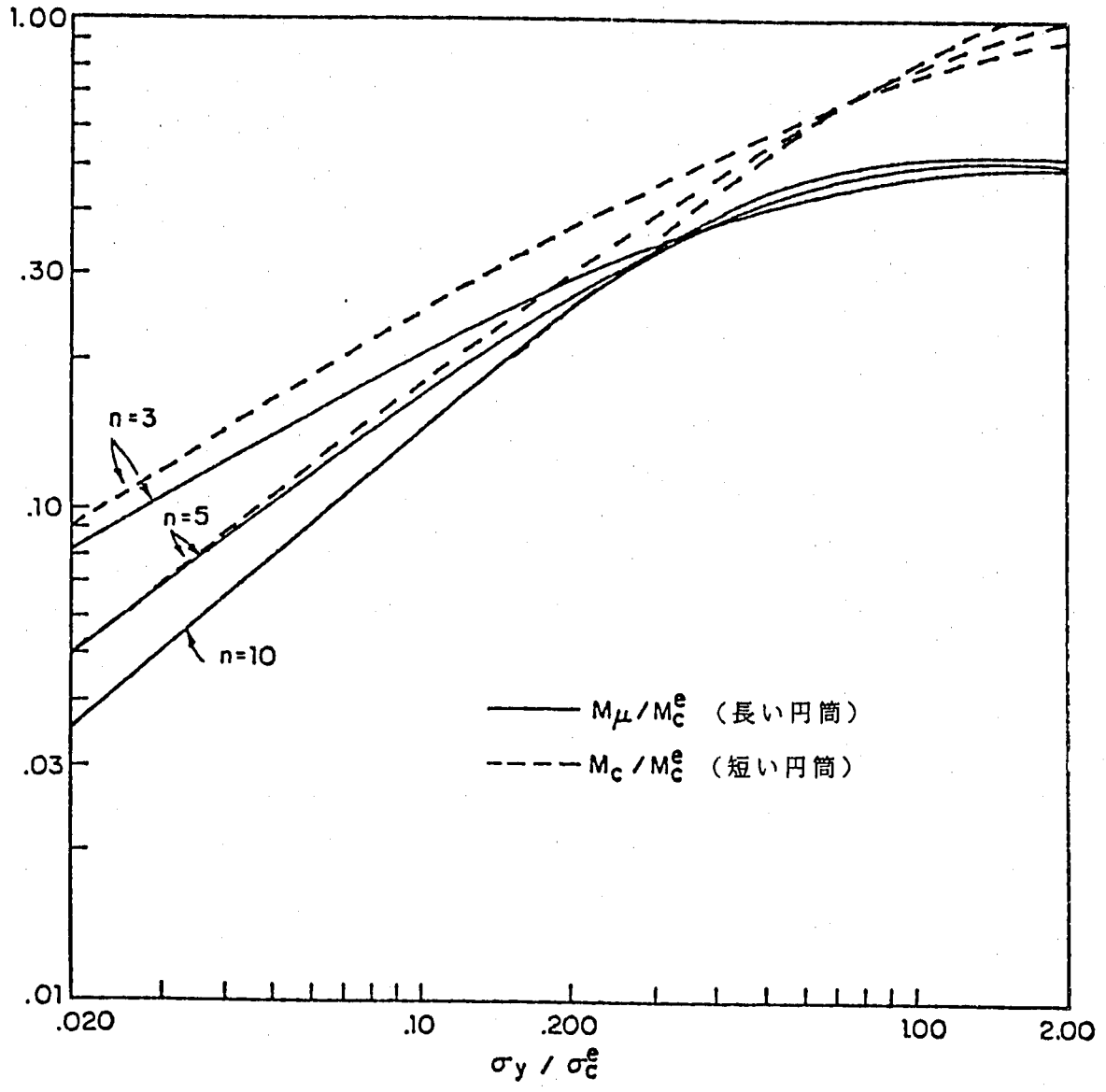


Fig.14 Bending buckling moment for long and short cylindrical shells
 (from Gellin's study)

様に、曲げ座屈応力（見かけの座屈応力 $\sigma_{cr}^B = M_{cr} / Z$ ではなく、真の座屈応力）は軸圧縮座屈応力にほぼ等しいことを示している。

一方、円筒殻の曲げ座屈の実験からは、従来、以下に述べるような知見が得られてきた。1950年以前のデータとしては、Donnell²³⁾が鋼製および真ちゅう製の試験体（ $R/t = 158 \sim 1500$, $L/R = 2.1 \sim 25.5$ ）により曲げ座屈応力と軸圧縮応力の比、すなわち y 係数を評価しており、ばらつきはあるものの平均値として $y = 1.46$ を得ている。また、Lundquist²⁴⁾はジュラルミン製試験体（ $R/t = 323 \sim 1430$, $L/R = 0.5 \sim 5.0$ ）を用いて曲げおよび軸圧縮座屈試験を行い、それぞれの座屈応力の平均傾向を比較して $y = 1.4$ 程度の値を得ている。

Suer, Harris, Skene & Benjamin²⁵⁾は1950年代後半に、18-8ステンレス鋼の試験を実施し、それまでのデータと併せて整理し、軸圧縮および曲げの設計曲線を提案しているが、これから概算すると $y = 1.25$ （ R/t の大きい領域） ~ 1.6 （ R/t の大きい領域）程度である。

Seide, Weingarten & Morgan²⁶⁾は1960年、軸圧縮および曲げ座屈に関する過去のデータに、自らのデータを追加して整理し、実験下限式（NASAの基準式であり、「耐震内規」にも採用されている。主として弾性座屈対象）を求めている。これから、 y 係数を評価すると、例えば $100 < R/t < 1000$ では $y = 1.14$ （ $R/t=100$ ） ~ 1.65 （ $R/t=1000$ ）となる。

上記のデータはいずれも R/t が比較的大きく、ほとんど弾性座屈の領域であるが、 R/t が100以下のデータに着目した整理では平均的には $y = 1.2$ 程度であるようだ。

以上のように、曲げ座屈の実験データは明らかに、見かけの曲げ座屈応力 σ_{cr}^B が軸圧縮座屈応力 σ_{cr}^C を上回っていること、すなわち $y > 1$ を示している。 R/t が小さい領域での塑性座屈の場合は断面内の応力の非線形分布による割増し（上限は $y = 1.27$ ）が予想されるけれども、 R/t の大きい領域においてさえも $y > 1$ となっているのは、軸圧縮座屈と曲げ座屈に及ぼす初期不整の効果の差が主たる原因となっていると考えられる。すなわち、実験において座屈応力を低下させる初期不整が、曲げの場合には最大応力点でのみ有効であるのに対して、軸圧縮の場合はすべての点で初期不整が影響し、このため軸圧縮の場合のほうが座屈応力低下の可能性が大きいとめと考えられる。

C. y 係数の提案

「高温構造設計方針」の円筒殻の座屈基準の y 係数について、以下の検討を行い改訂案を作成した。

- i) 座屈実験データを可能なかぎり収集し、同一鋼種による見かけの曲げ座屈応力 (M_{cr}/Z) と軸圧縮座屈応力の平均傾向の比による y 係数の評価
- ii) 塑性による断面内の非線形応力分布を考慮した上で、断面表皮の真の曲げ座屈応力が軸圧縮座屈応力に等しくなったときに曲げ座屈が生じるとの仮定に基づく y 係数の評価 (簡易解析)
- iii) 有限要素法を用いた詳細解析による y 係数の評価

Fig. 15は上記の検討結果ならびにそれに基づく y 係数の提案式を示している。実験データはアルミ合金 (A1) および Cr-Mo鋼の平均傾向の比を3次式で当てはめた結果である。横軸には Gellinの解析と同様の $\sigma_{0.7E}/\sigma_{cr}^*$ が用いられた。上記 ii) の簡易解析による y 係数は Gellinの解析結果から算出した値とほとんど一致しており、 R/t の小さくなる領域 ($R/t \rightarrow 0$) では $y = 1.23$ 程度、 R/t が大きくなるにつれて $y = 1$ に漸近している。この一致は、Gellinの得た結論の1つ、 $\sigma_r/\sigma_{cr}^* < 0.33$ では断面の扁平化の効果は少ないという結論からも十分予想できる。すなわち、断面扁平化を無視し、曲げ座屈応力 (真の応力) は軸圧縮座屈応力と等しいとの仮定に基づく簡易解析法は妥当であるといえよう。Clarkと Rolf¹⁷⁾ も同じ簡易解析法が R/t の小さい領域で実験データと比較的よく合うことを報告している。ただし、これらの評価はすべて完全な円筒殻について行ったものである。

Gellinの解析結果から y 係数を算出する方法は次式によった。

$$\begin{aligned} y &= (M_{cr}/Z) / \sigma_{cr} = \{ M_{cr} / (Z \sigma_{cr}^*) \} (\sigma_{cr}^* / \sigma_{cr}) \\ &= (M_{cr} / M_{cr}^*) (\sigma_{cr}^* / \sigma_{cr}) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 M_{cr} / M_{cr}^* は Fig. 13より、 $\sigma_{cr}^* / \sigma_{cr}$ は Fig. 7より得られる。

有限要素法による詳細解析の結果は、簡易解析ならびに Gellinの解析から得られたものより若干高めであるが、傾向的にはよく似ている。改訂案は、これらの検討結果を包絡するように次式で表すものとした。

$$y = 1.08 + 0.22 \exp \{ - 8.9 a(R/t) \} - 0.07 \exp \{ - 28.0 a(R/t) \} \quad (24)$$

このようにして定めた y 係数の妥当性は、最終的には実際の曲げ座屈データと座屈応力評価式とを対比して実証するほかなく、3.6で収集データとの比較結果を示し、十分保守的に設定されていることを確認することにする。

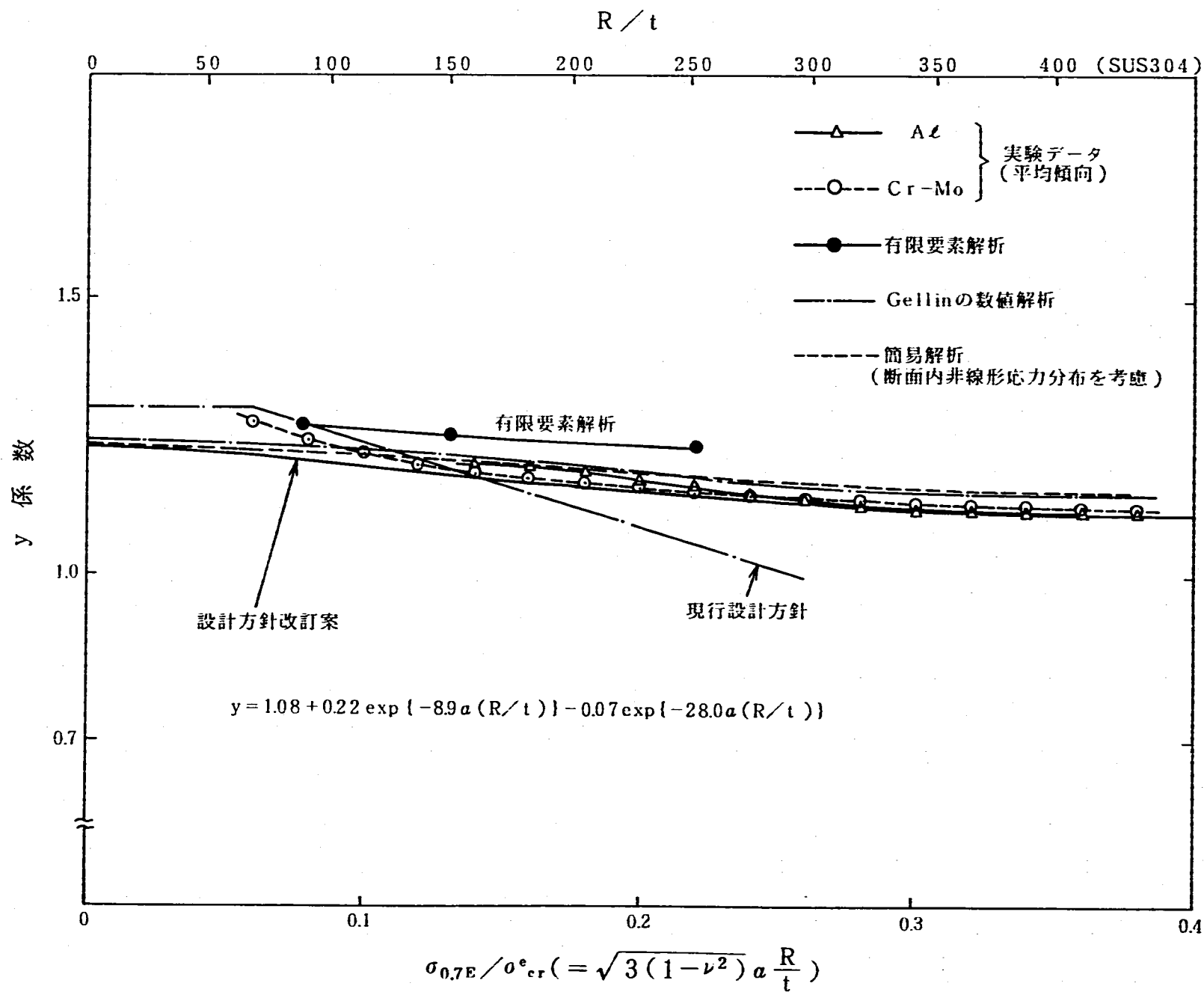


Fig.15 The y factor for bending buckling

3.6 座屈評価式と既存の実験データとの比較

円筒殻の軸圧縮座屈および曲げ座屈の実験データはこれまで多数取得され発表されている。ここでは公開文献から「高温構造設計方針」の主たる対象である塑性座屈領域の実験データを可能なかぎり収集し、これらと比較することにより、前節までに作成した座屈評価式の妥当性を総合的に評価する。

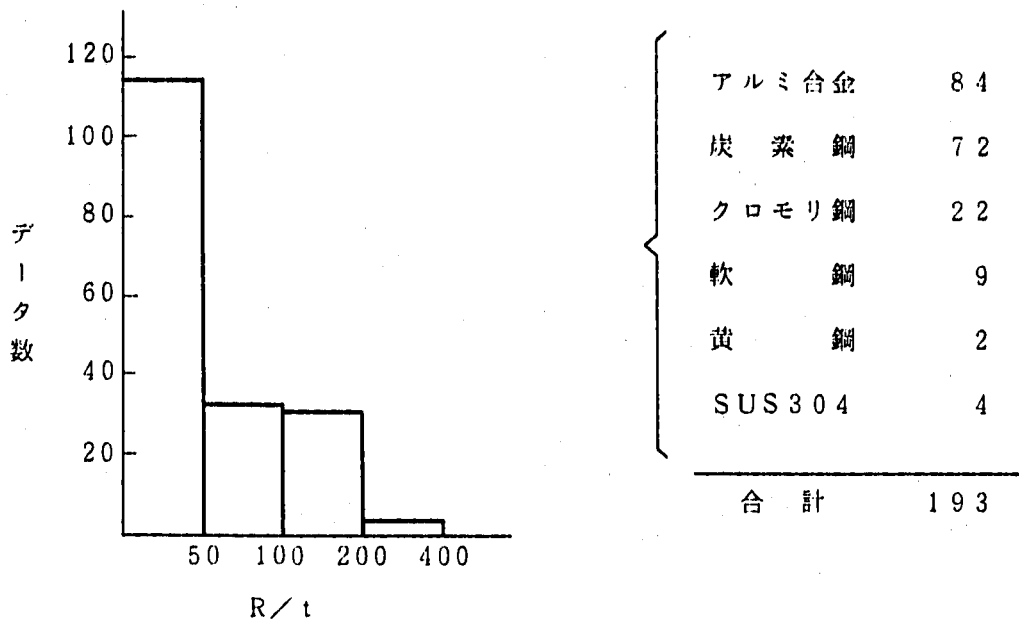
公開文献等より収集した軸圧縮座屈および曲げ座屈の実験データの詳細を付録Bに載せる。実験データはその中からさらに選別したが、選別基準としては、 $R/t < 400$ の範囲で塑性のはっきりしたデータであること、材料の降伏応力のデータがあること、塑性座屈の目安として座屈応力が降伏応力のおよそ $1/2$ 以上であること、明らかに異常な結果を示していないこと、とした。また、データ収集は出来るかぎりオリジナルの文献によることにした。最終的に選別した座屈データ数は、軸圧縮座屈が193点、曲げ座屈が150点であり、鋼種としてはアルミ合金、炭素鋼、クロモリ鋼、軟鋼、黄銅、SUS304が含まれる。 R/t に関するデータの内訳は、Fig. 16に示す通りであり、 $R/t < 50$ のデータが多数を占めている。曲げのデータには $R/t > 75$ のものはなかった。

既存の座屈データの中には、「高温構造設計方針」で対象とする材料（SUS304および $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼）のデータはごく僅かしかなく、ここで提案する座屈評価式のこれらの材料に対する妥当性を直接的に実証することは困難である。しかしながら、基礎となる評価式は鋼種を問わず適用できるように作成されているので、収集された全座屈データと比較、評価することによって、SUS304および $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼に対する妥当性も検証されることになる。

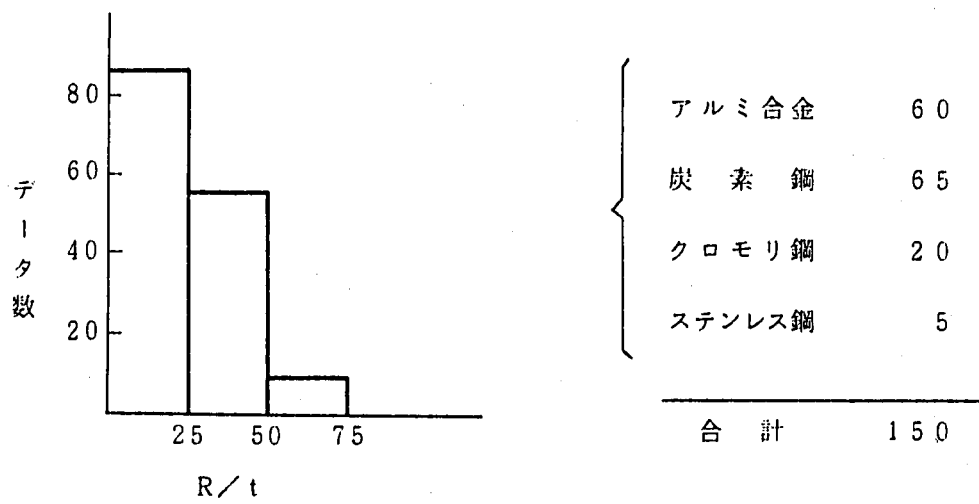
A. 軸圧縮座屈データに関する比較

Fig. 17は、全実験データについて、実験座屈応力と提案した基準座屈応力（評価値）との比をプロットしたものである。全体的に見て、基準座屈応力は、実験データの下限を適切に表しているといえる。 R/t の小さい領域で、基準座屈応力は若干余裕があり過ぎるように見えるけれども、これは、基準座屈応力の上限を材料の降伏応力値としたためである。座屈応力の実験値と評価値の比が対数正規分布すると仮定し、基準座屈応力評価式（安全係数を含めない）を用いた場合の座屈発生確率を評価してみると、約2%程度であった（後述の図に示される）。なお、図中のS.F. = 1.34, 1.67, 2.0の直線（水平）は、後述の安全係数（S.F.）を導入した場合の位置を参考までに示している。

つぎに、円筒殻の弾性域の軸圧縮座屈データの整理法としてしばしば用いられる $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^0$ と R/t の関係について、実験データと基準座屈応力評価式との比較を行った。この関係は、塑性座屈の領域では材料によって著しく異なったものとなるので、



a) 軸圧縮座屈



b) 曲げ座屈

Fig.16 Number of buckling test data on cylindrical shells

BUCKLING DATA (COMP.)

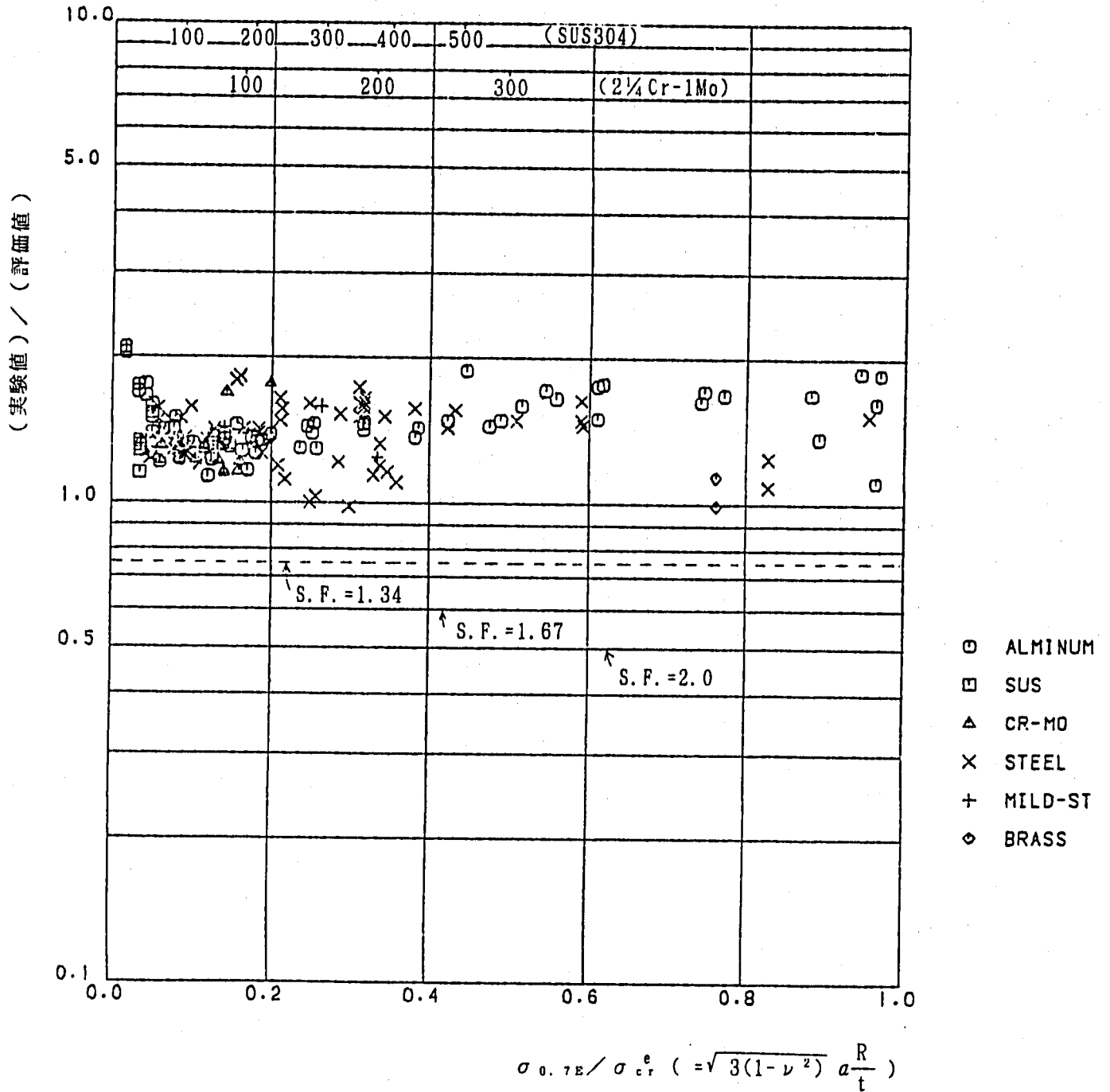


Fig.17 Comparison of predicted and experimental buckling stresses for cylindrical shells under axial compression

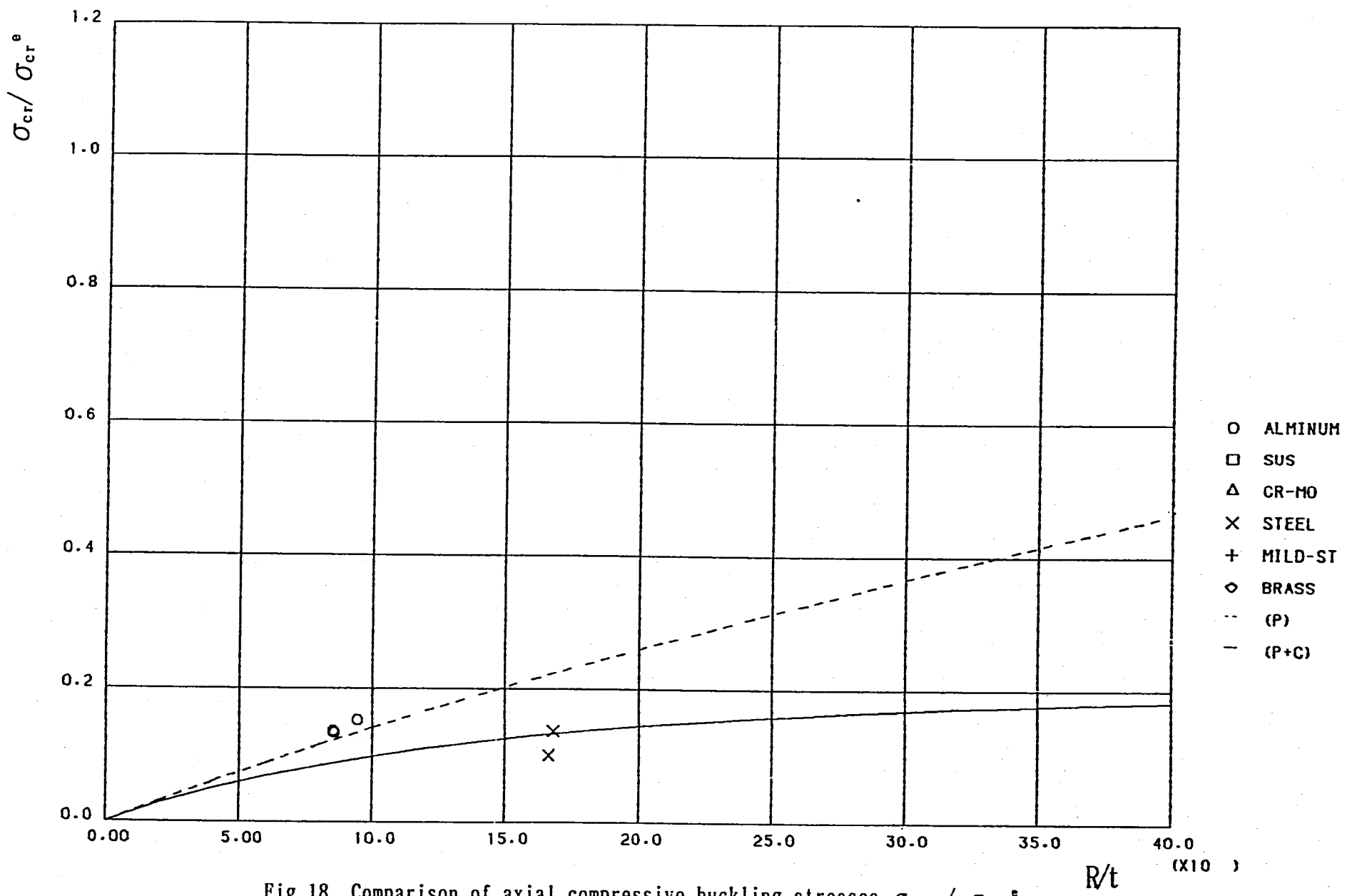


Fig.18 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $0.75 \times 10^{-3} < (\sigma_v / E) < 1.0 \times 10^{-3}$

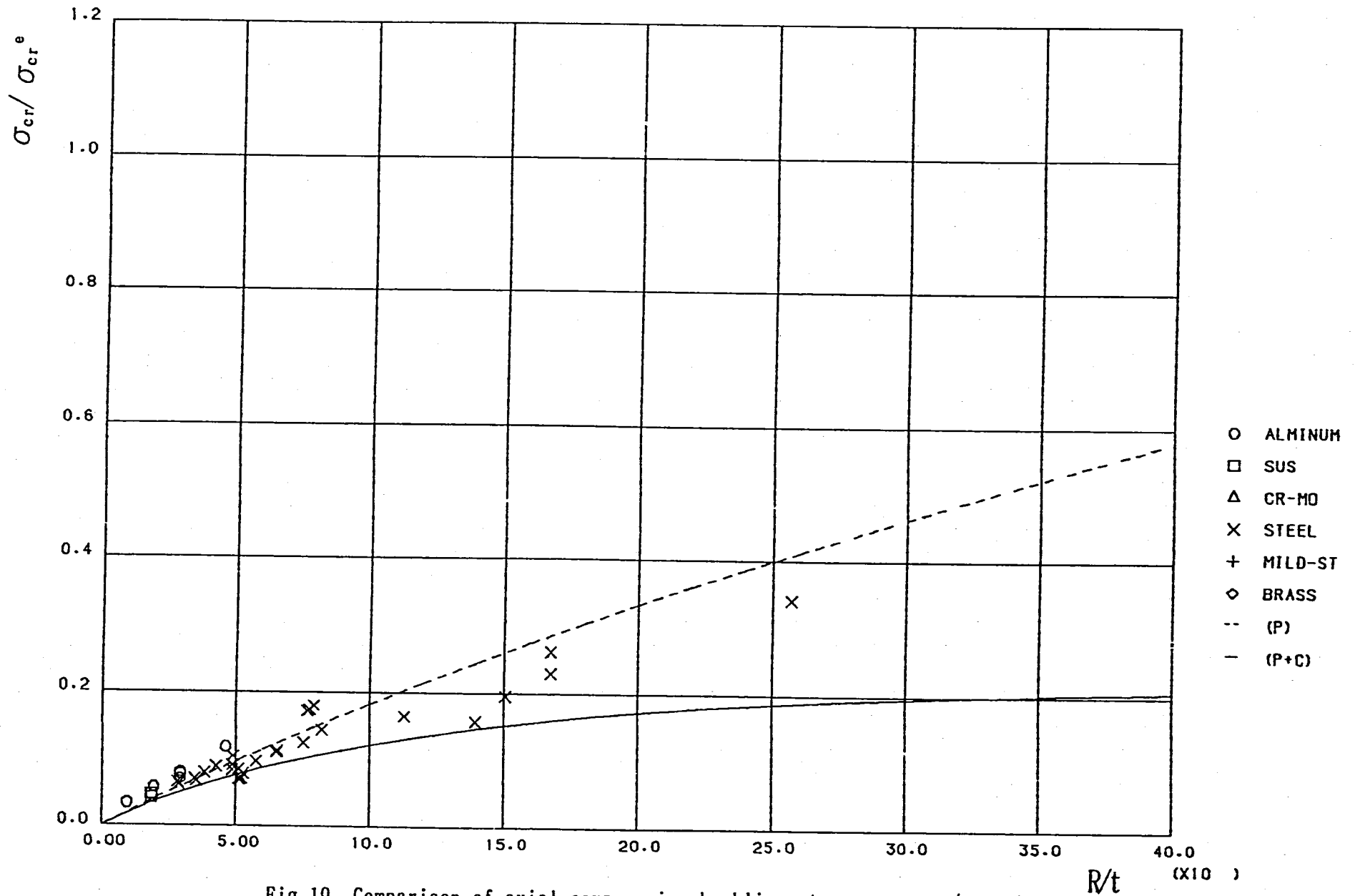


Fig. 19 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $1.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 1.25 \times 10^{-3}$

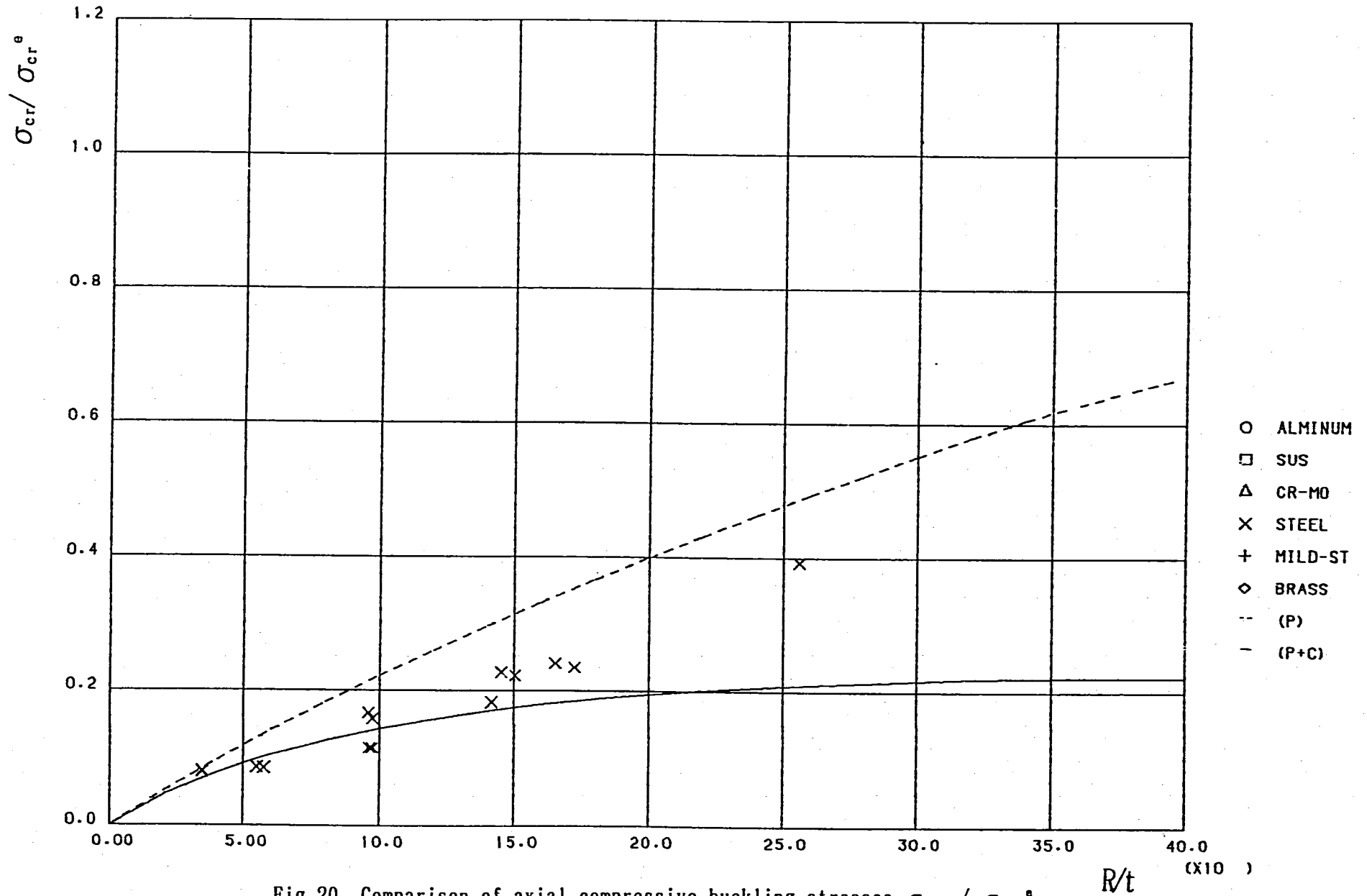


Fig. 20 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $1.25 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 1.5 \times 10^{-3}$

R/t (x10)

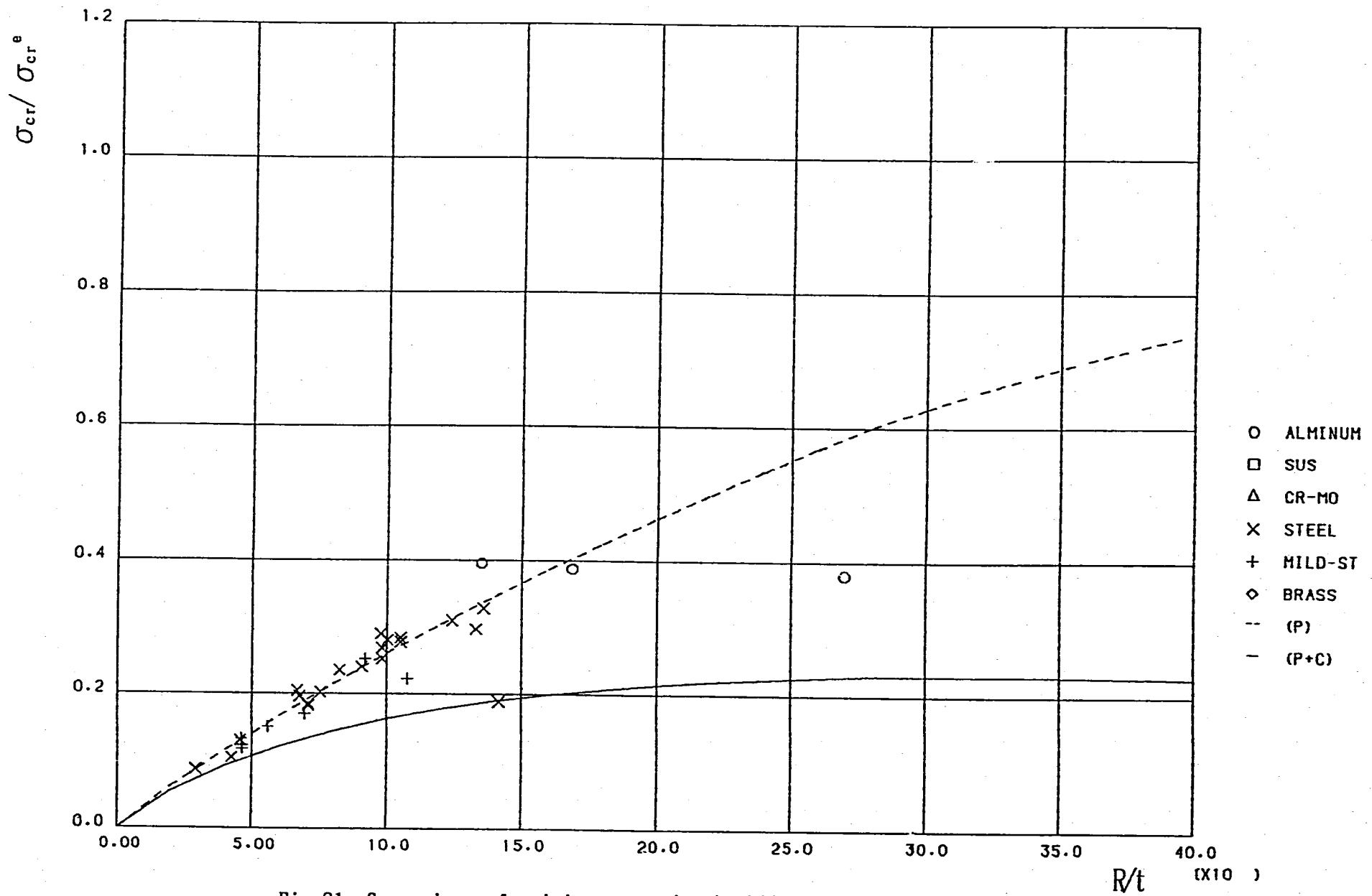


Fig. 21 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $1.5 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 2.0 \times 10^{-3}$

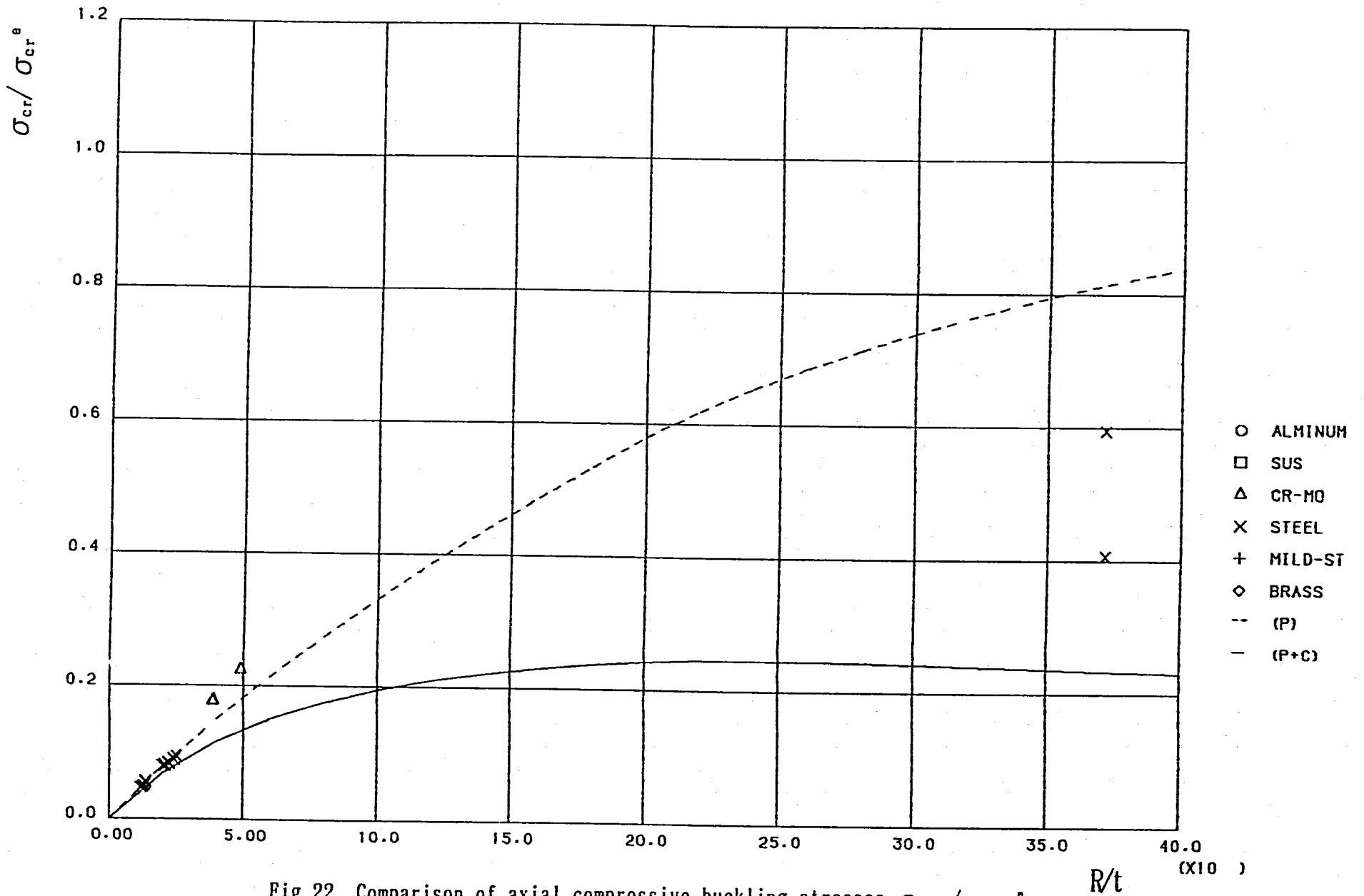


Fig. 22 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $2.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 2.5 \times 10^{-3}$

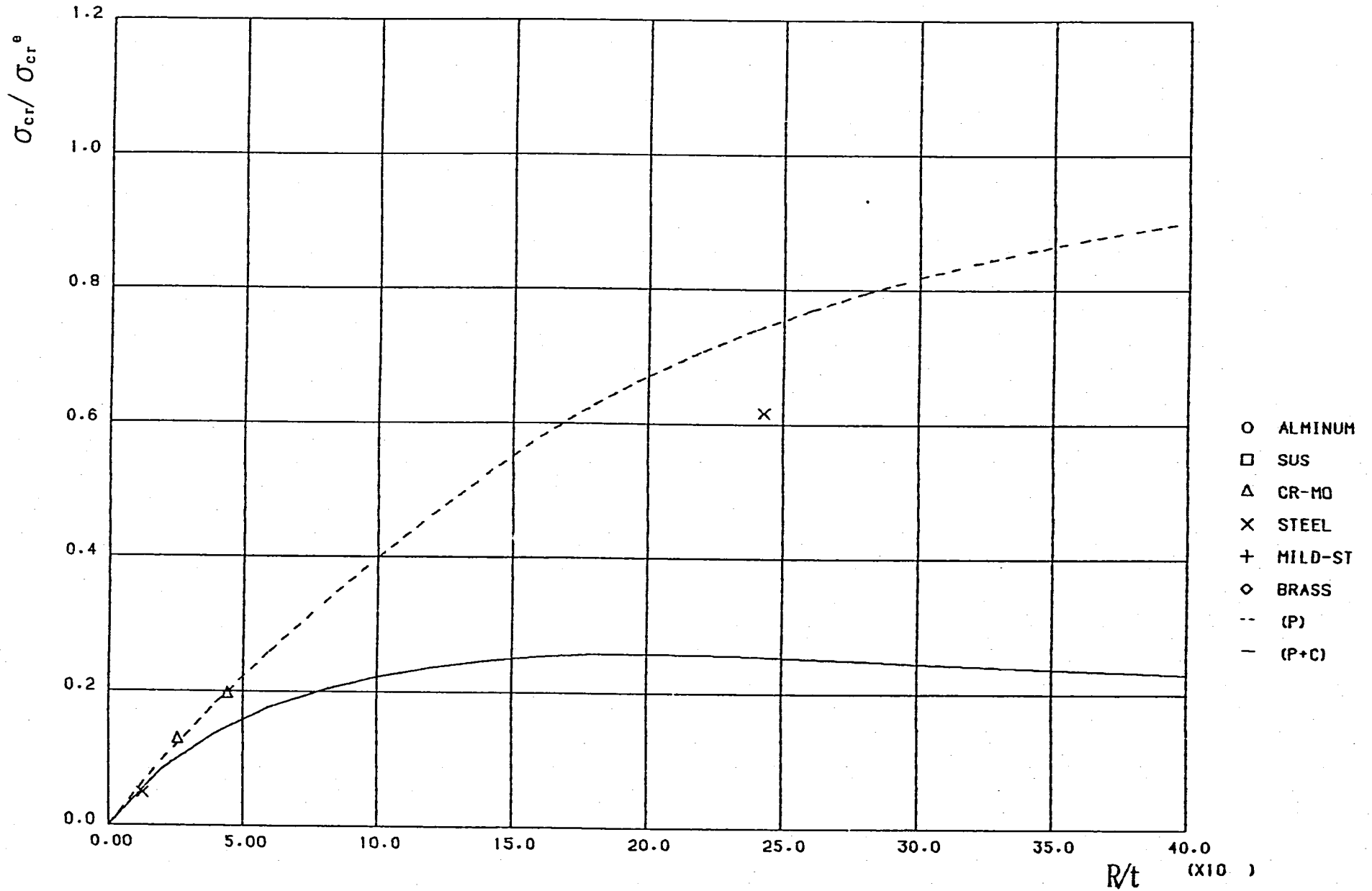


Fig. 23 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $2.5 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 3.0 \times 10^{-3}$

R/t (x10⁻³)

- ALMINUM
- SUS
- △ CR-MO
- × STEEL
- + MILD-ST
- ◇ BRASS
- (P)
- (P+C)

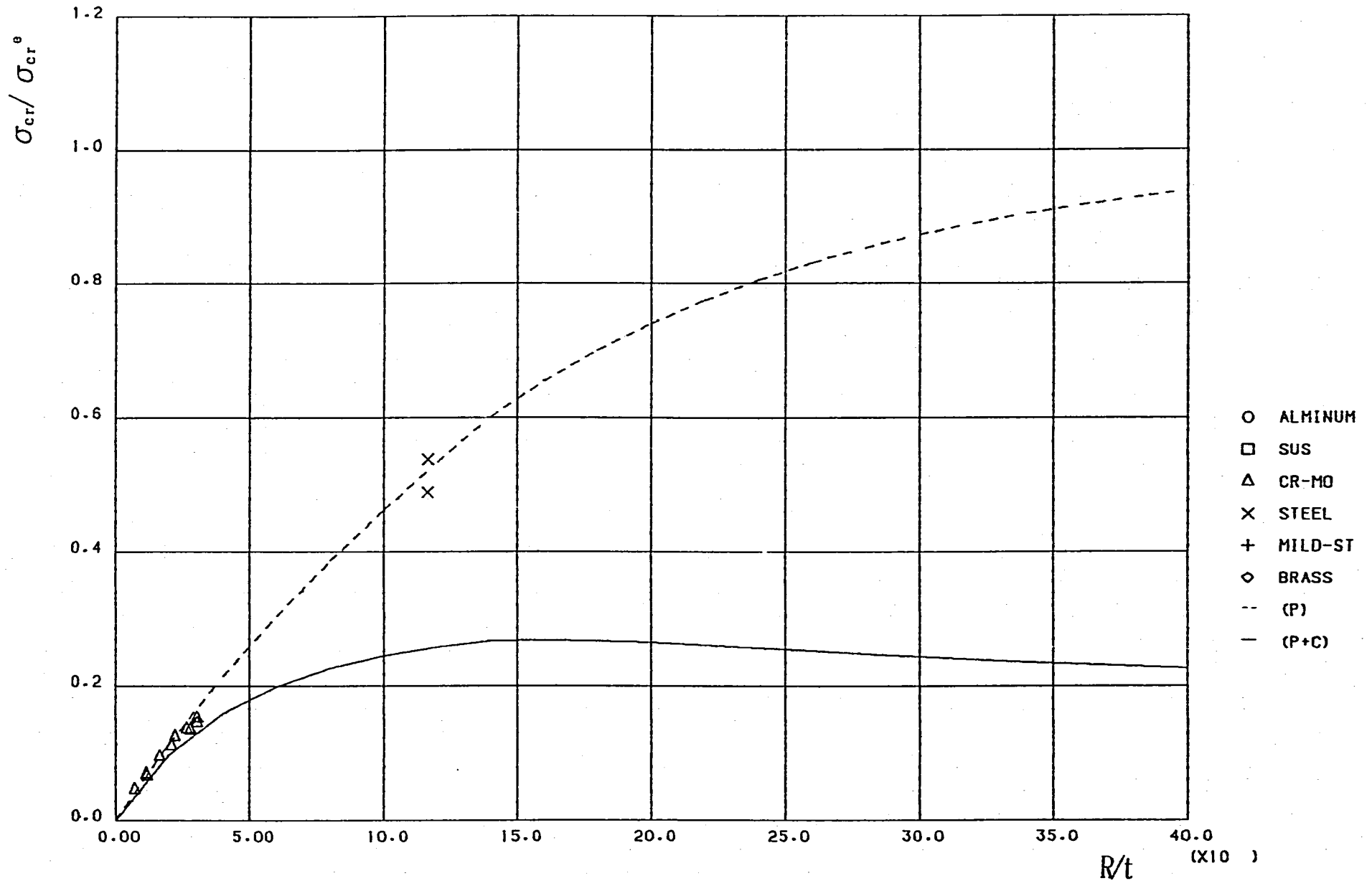


Fig.24 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^0$ between predicated and experimental values for materials with $3.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 3.5 \times 10^{-3}$

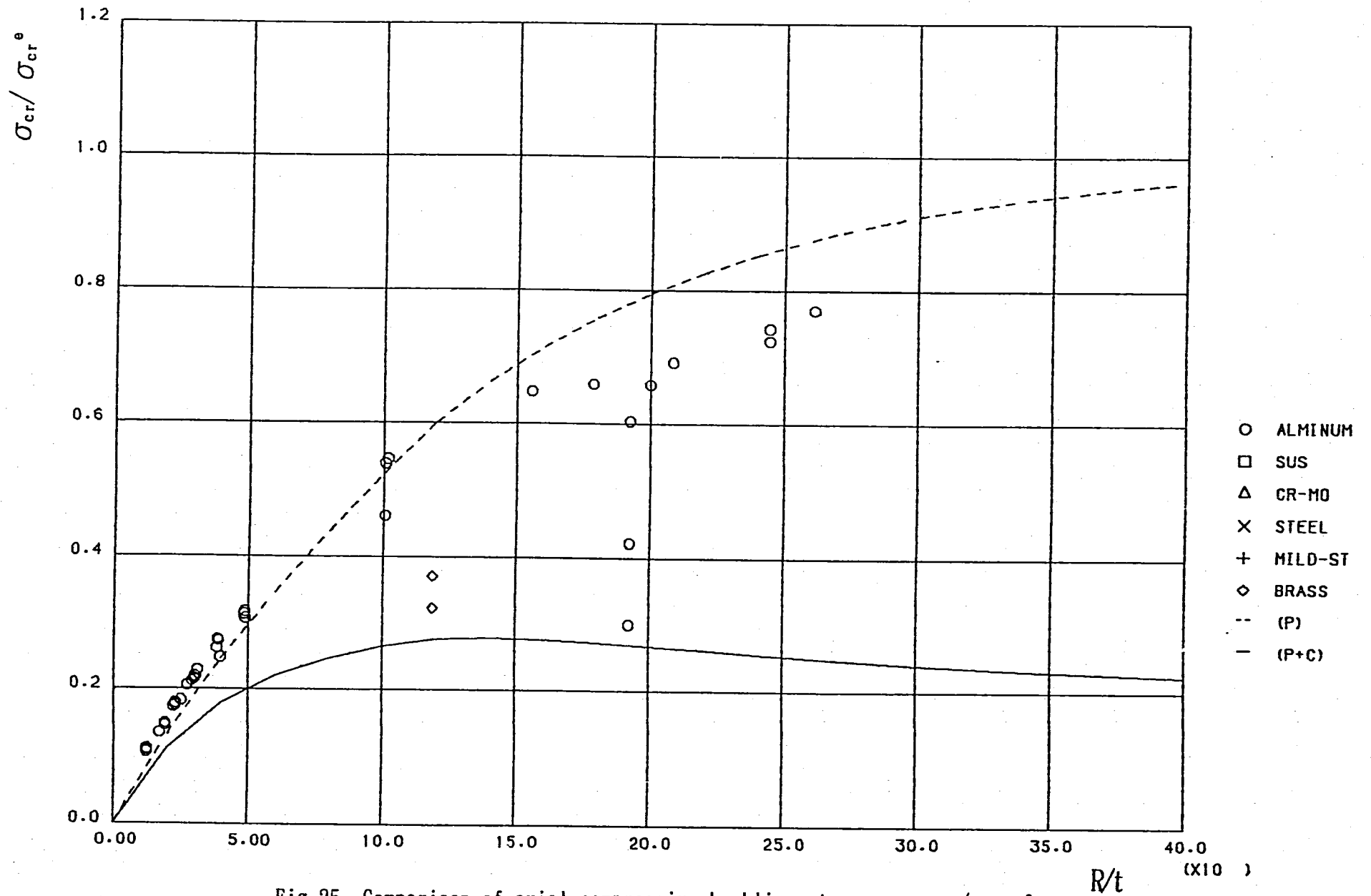


Fig. 25 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $3.5 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 4.0 \times 10^{-3}$

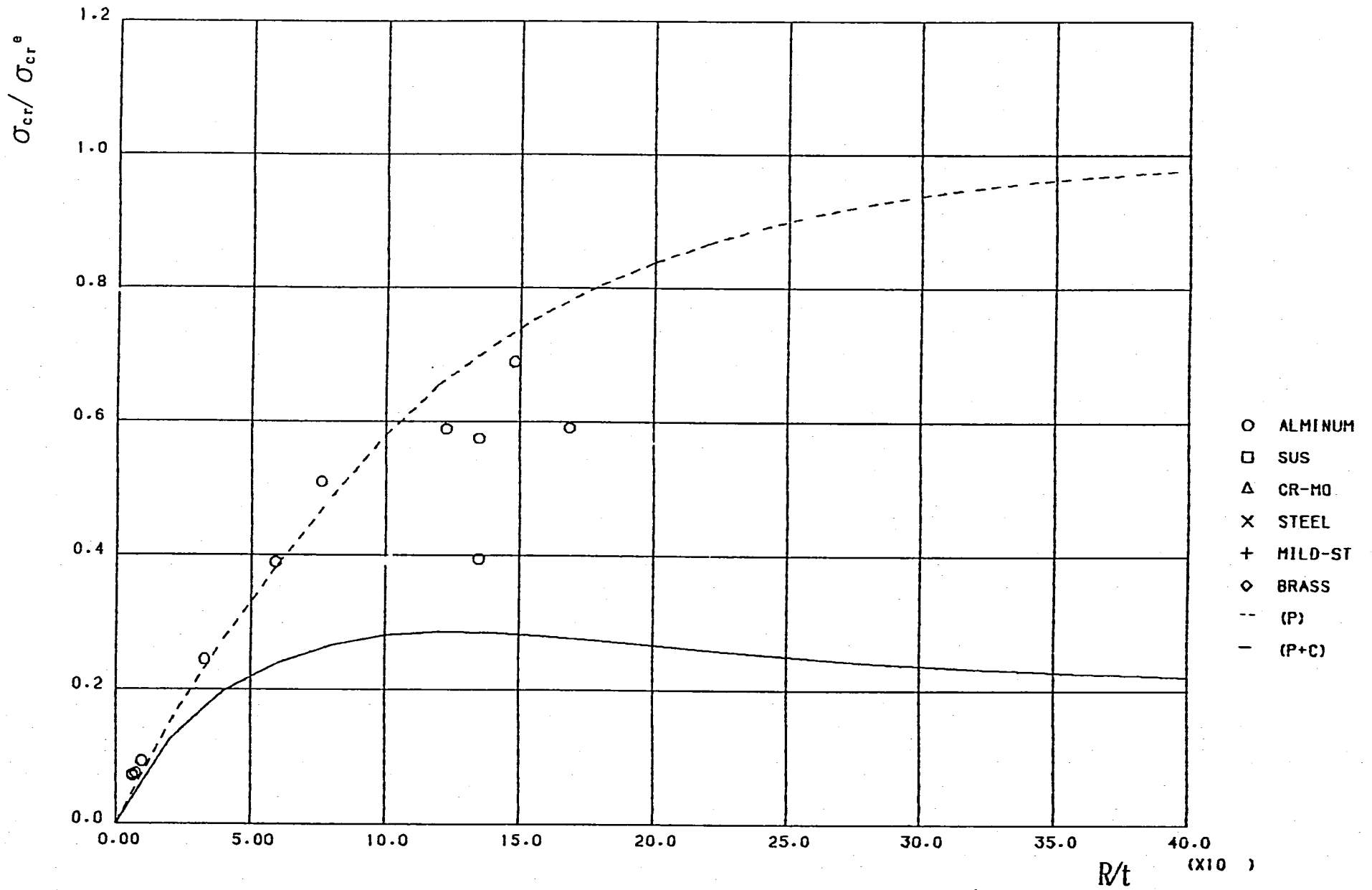


Fig.26 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $4.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 4.5 \times 10^{-3}$

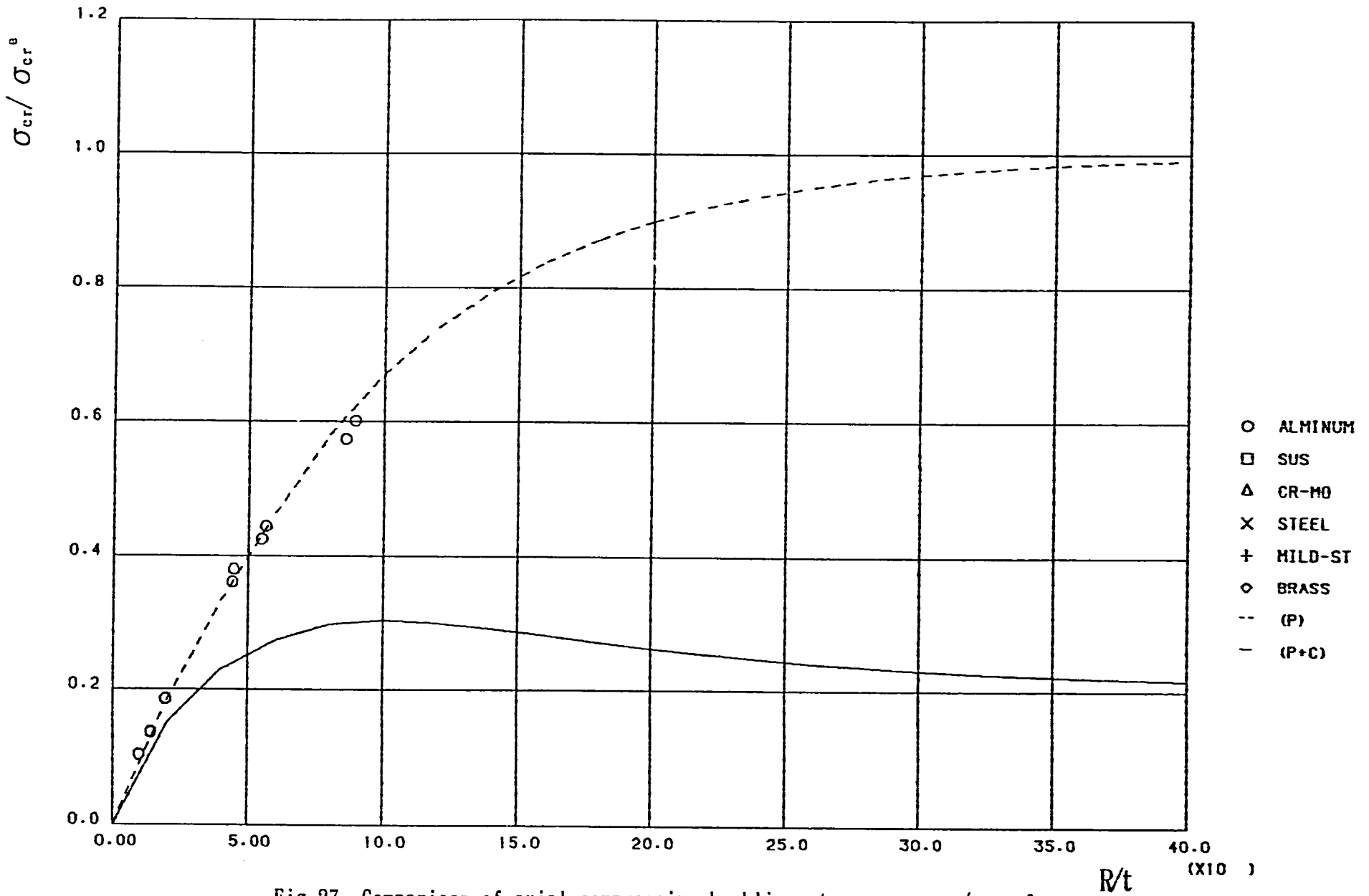


Fig. 27 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^0$ between predicated and experimental values for materials with $5.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 6.0 \times 10^{-3}$

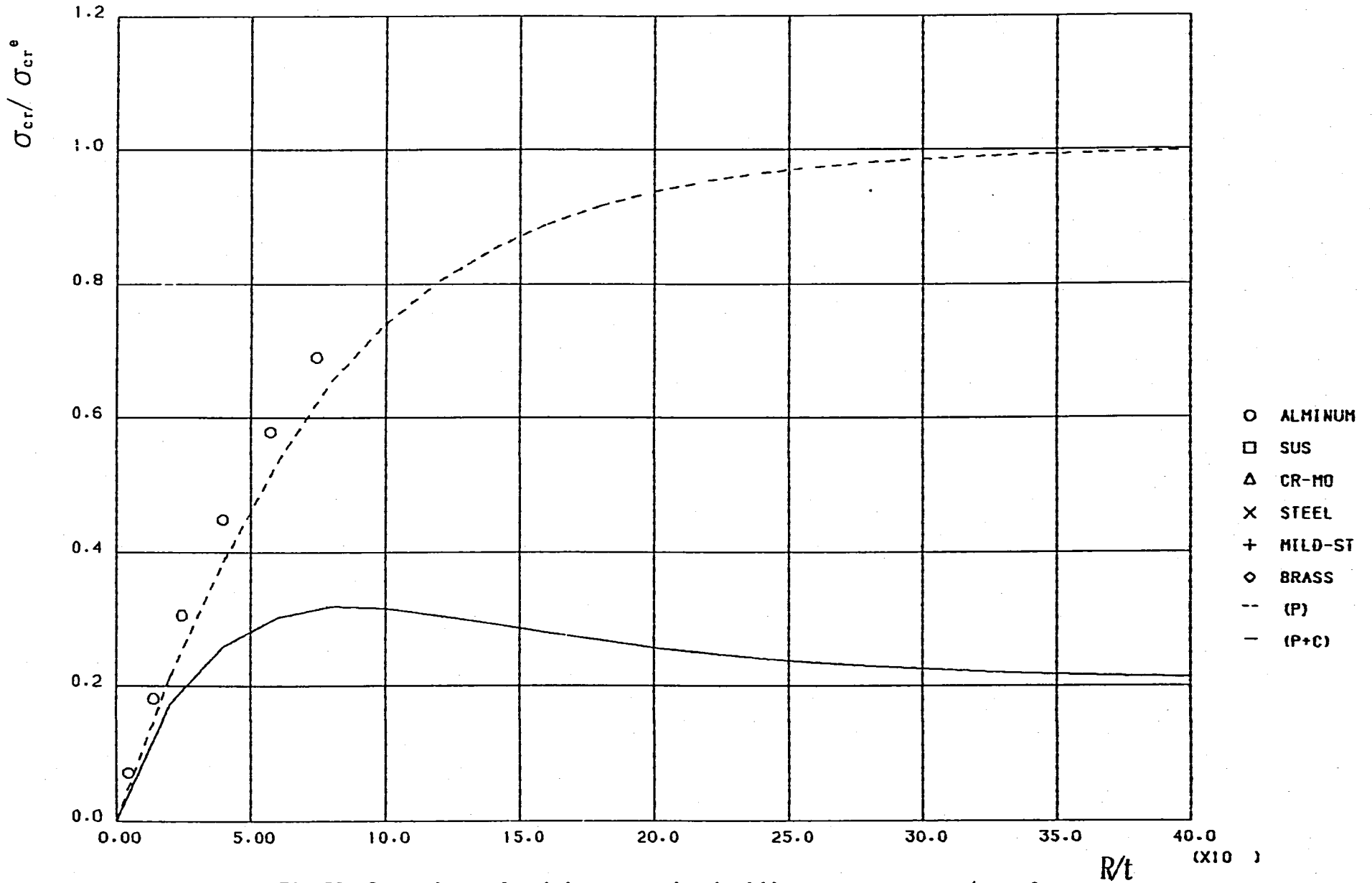


Fig.28 Comparison of axial compressive buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $6.0 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 8.0 \times 10^{-3}$

Fig. 18 - 28 のように、塑性特性パラメータ a 値 ($= \sigma_{0.1E} / E$) の範囲に応じて比較を行った。実験データに関しては、 $\sigma_{0.1E}$ 値が不明であることが多いので、 $\sigma_{0.1E}$ の代わりに σ_y (0.2% オフセットひずみで定義される降伏応力) を用いた。また、座屈応力評価式に関しては、各図の a の範囲の小さい方の値 (例えば $0.75 \times 10^{-3} < a < 1.0 \times 10^{-3}$ では 0.75×10^{-3}) を用いて曲線を描き実験データと比較した。破線は η の曲線、実線は $a \eta$ の曲線を表している。座屈応力評価式はほとんど総ての実験データの下限を包絡していることが分かる。図によっては (例えば Fig. 27, 28) 実験データが η 曲線 (破線) 上に並んで初期不整による低減効果が見られないものもあるが、全般的には評価式は適切な座屈応力の基準 (下限) を与えているといえる。

B. 曲げ座屈データに関する比較

曲げ座屈に関しても、軸圧縮座屈の場合と同様の比較を行った。Fig. 29 は、全実験データについて、実験座屈応力と基準座屈応力 (評価値) との比をプロットしたものである。基準座屈応力の実験データに対する保守性の程度は、軸圧縮の場合に較べて若干大きいようである。ここでも、参考までに、後述の安全係数 (S.F.) を導入した場合の縦軸位置を示した。

基準座屈応力評価式 (安全係数を含めない) を用いた場合の座屈発生確率を評価してみると、約 1% 程度である (後述の図に示される)。

Fig. 30 - 38 は、 $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^* (= y a \eta)$ と R/t の関係を材料の塑性特性パラメータ a 値の範囲に応じて表している。破線は $y \eta$ の曲線、実線は $y a \eta$ の曲線を表している。曲げ座屈の実験データは、軸圧縮の場合に較べて初期不整の影響を受けにくい特長を表しているが、全体としては、軸圧縮の基準座屈応力に y 係数を乗じる方法により曲げ座屈応力を適切に評価できることが分かった。

3.7 座屈安全係数

現行の「高温構造設計方針」の評価法では、円筒殻の軸圧縮および曲げによる塑性座屈に対しては、基準座屈応力として設計降伏応力 (塑性崩壊に相当) を用い、それに従来から経験的に使われている安全係数を用いて十分な保守性を確保することになっている。「高温構造設計方針」以降に制定された「耐震内規」やその他の海外の座屈基準では、基準座屈応力として当該座屈の実験値下限に相当する座屈応力を用いる考え方が定着してきた。一方、座屈安全係数に関しては、基準座屈応力の設定の仕方と無関係に、従来から経験的に決められた値 (大きさも統一されていない) が依然として用いられている。

BUCKLING DATA (BEND.)

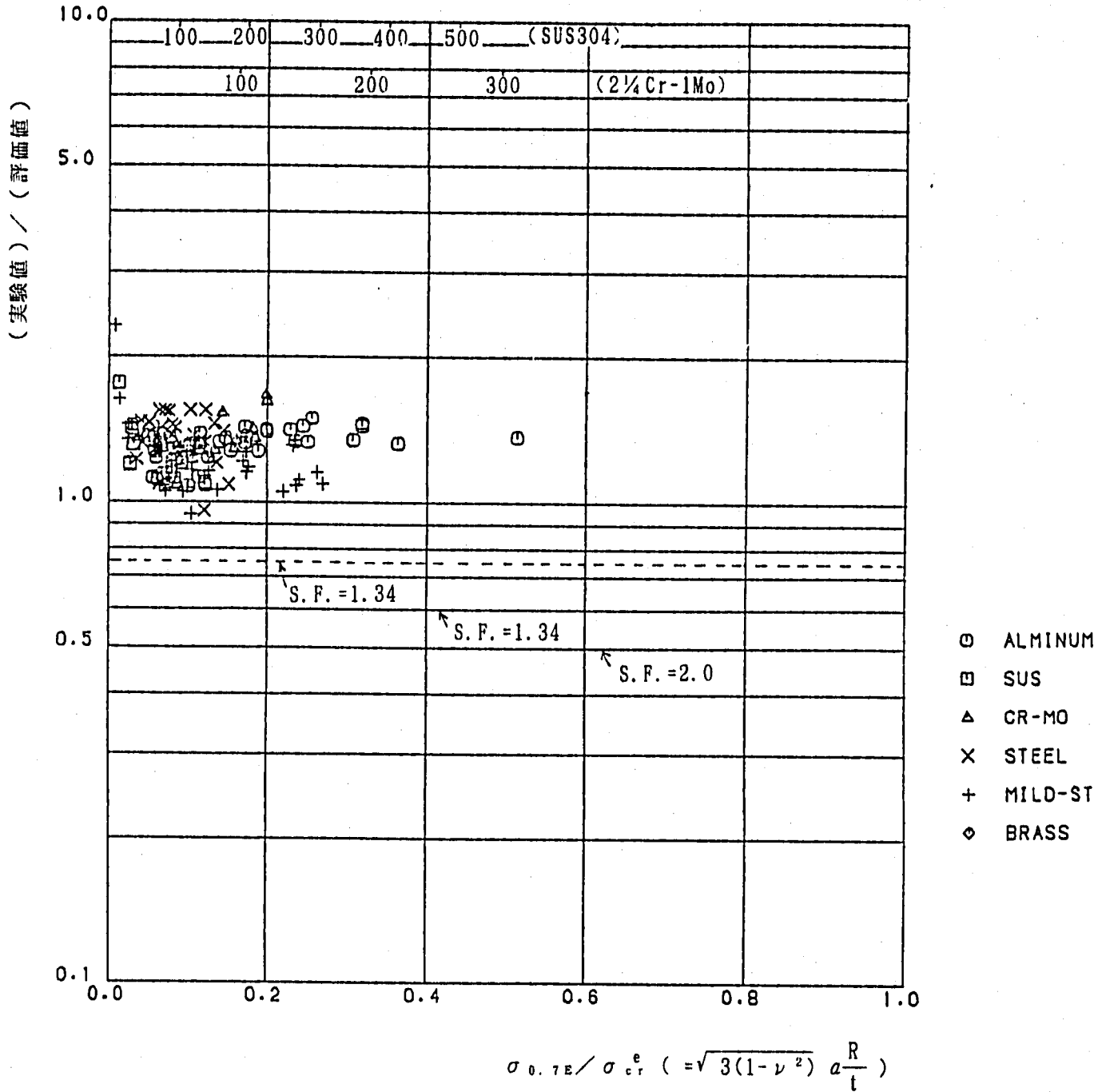


Fig. 29 Comparison of predicted and experimental buckling stresses for cylindrical shells in bending

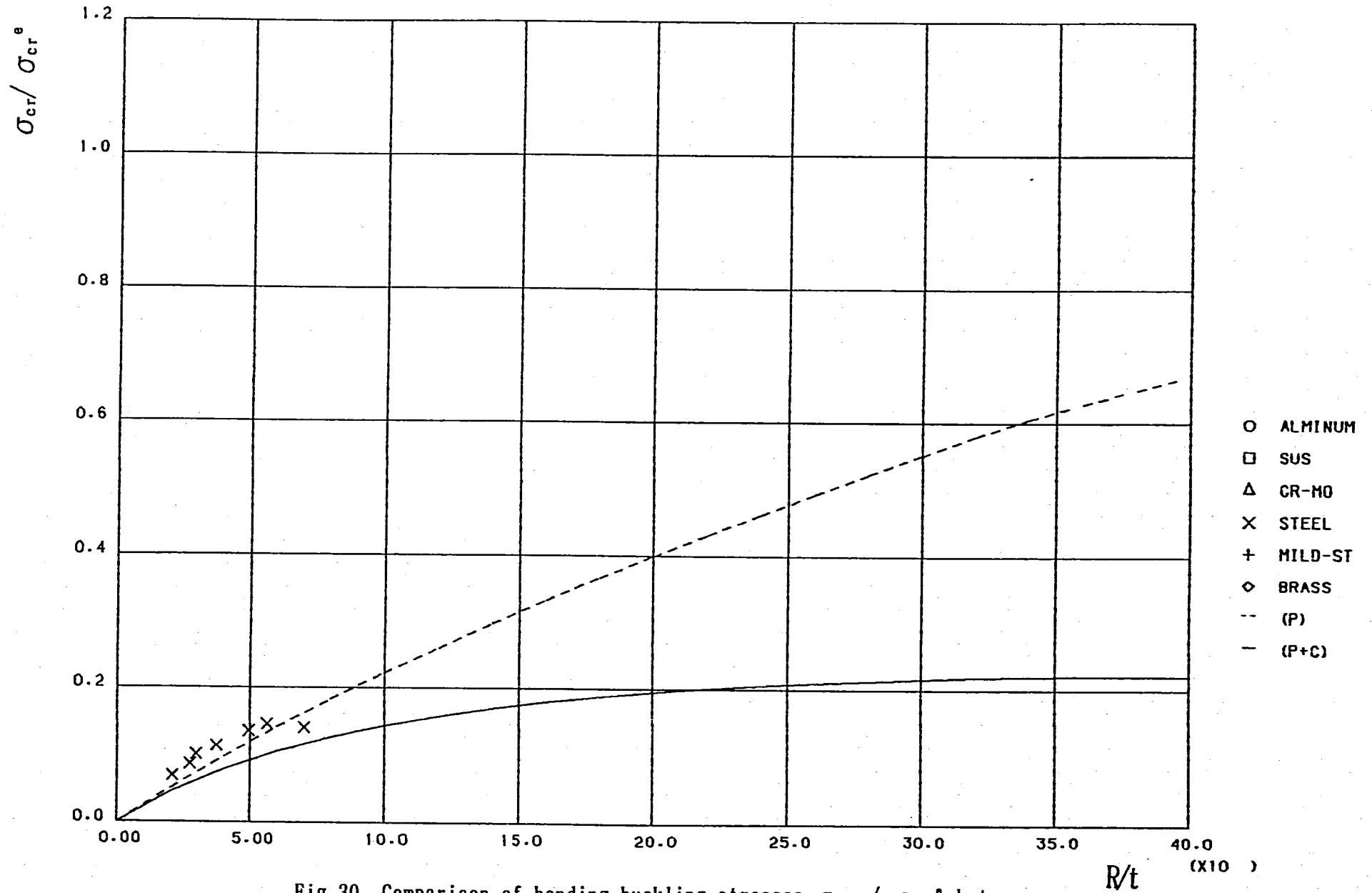


Fig. 30 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $1.25 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 1.5 \times 10^{-3}$

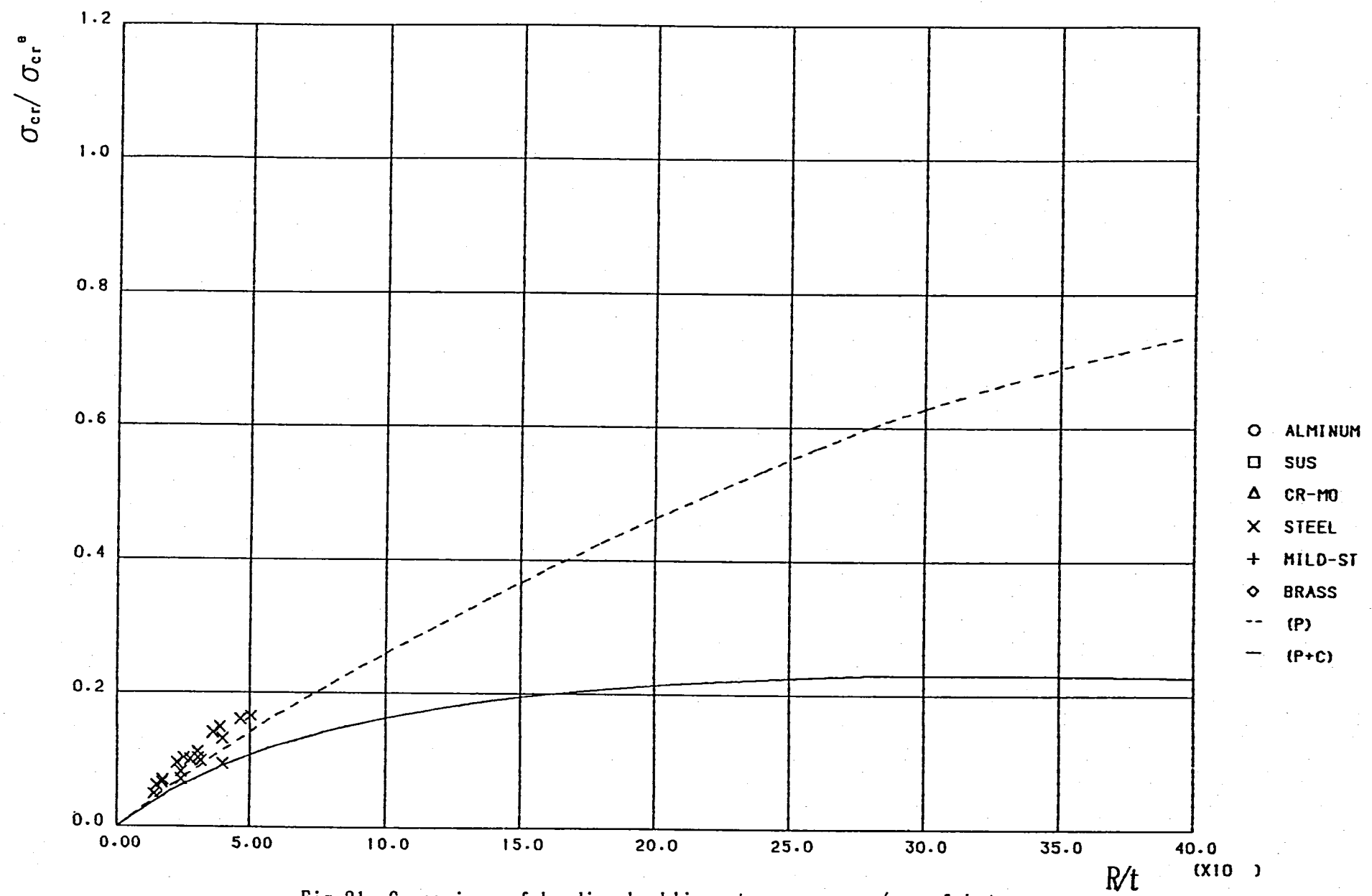


Fig. 31 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $1.5 \times 10^{-3} < (\sigma_r / E) < 2.0 \times 10^{-3}$

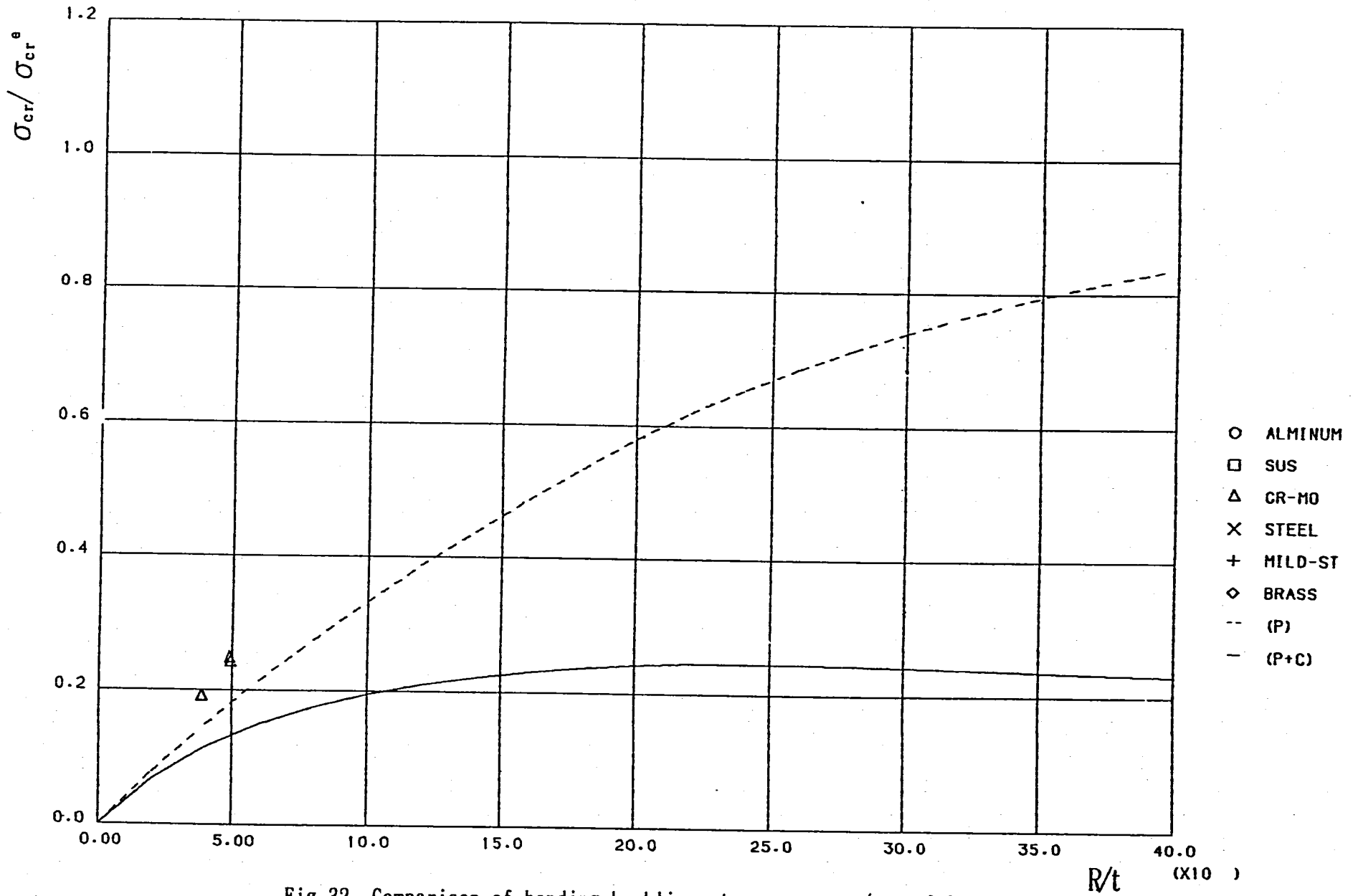


Fig. 32 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $2.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 2.5 \times 10^{-3}$

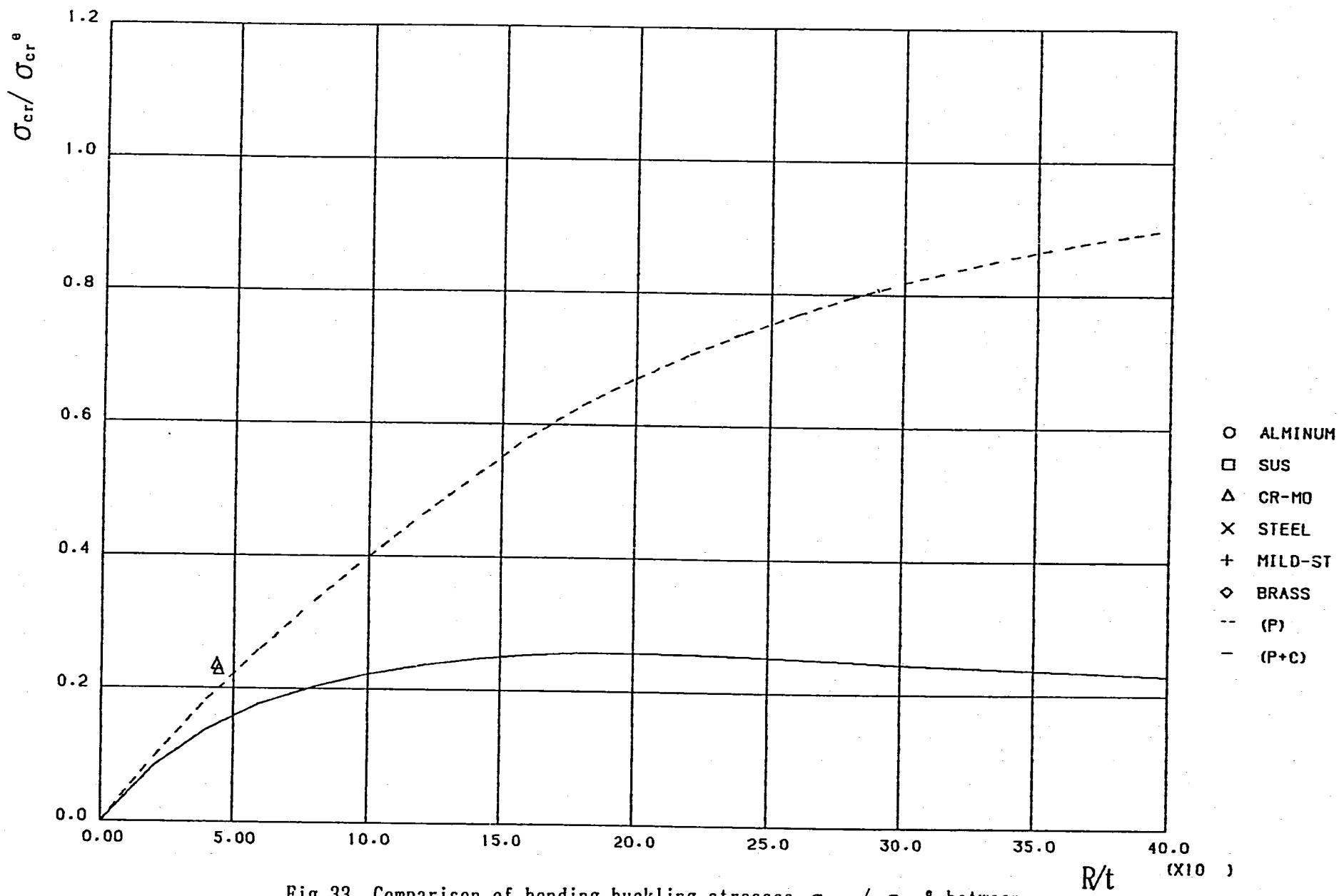


Fig.33 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^0$ between predicted and experimental values for materials with $2.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 3.0 \times 10^{-3}$

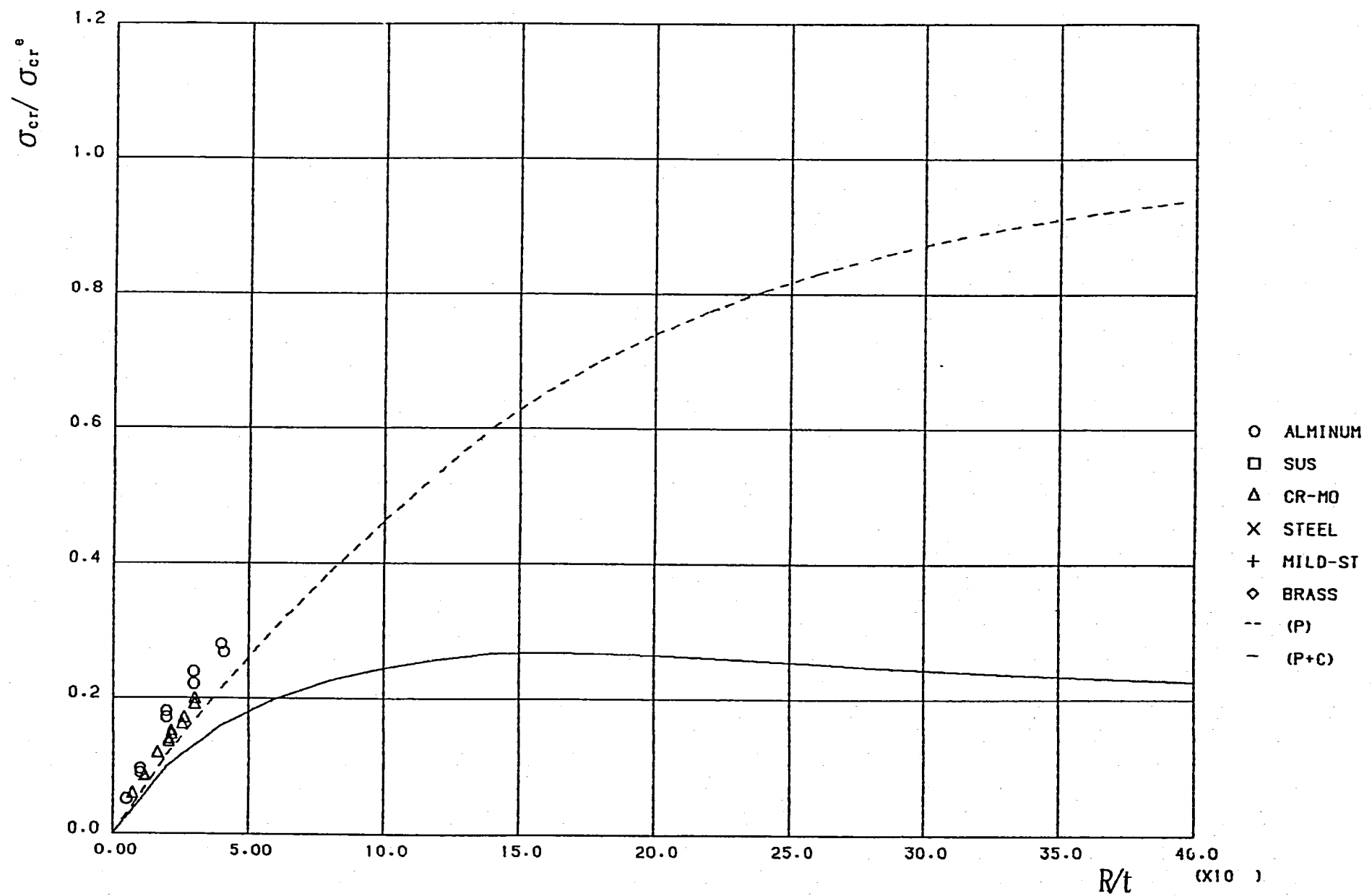


Fig.34 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $3.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 3.5 \times 10^{-3}$

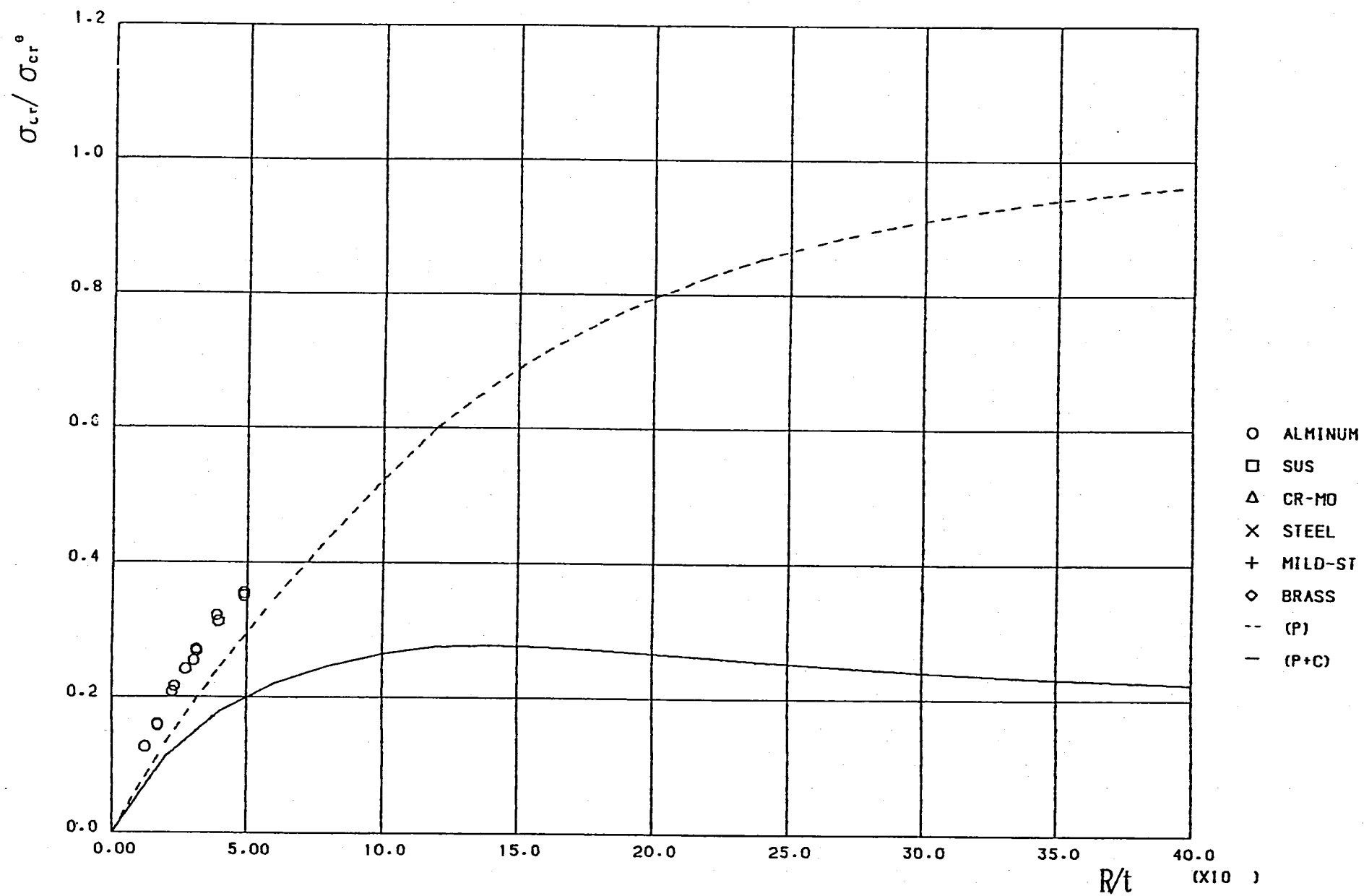


Fig.35 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicated and experimental values for materials with $3.5 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 4.0 \times 10^{-3}$

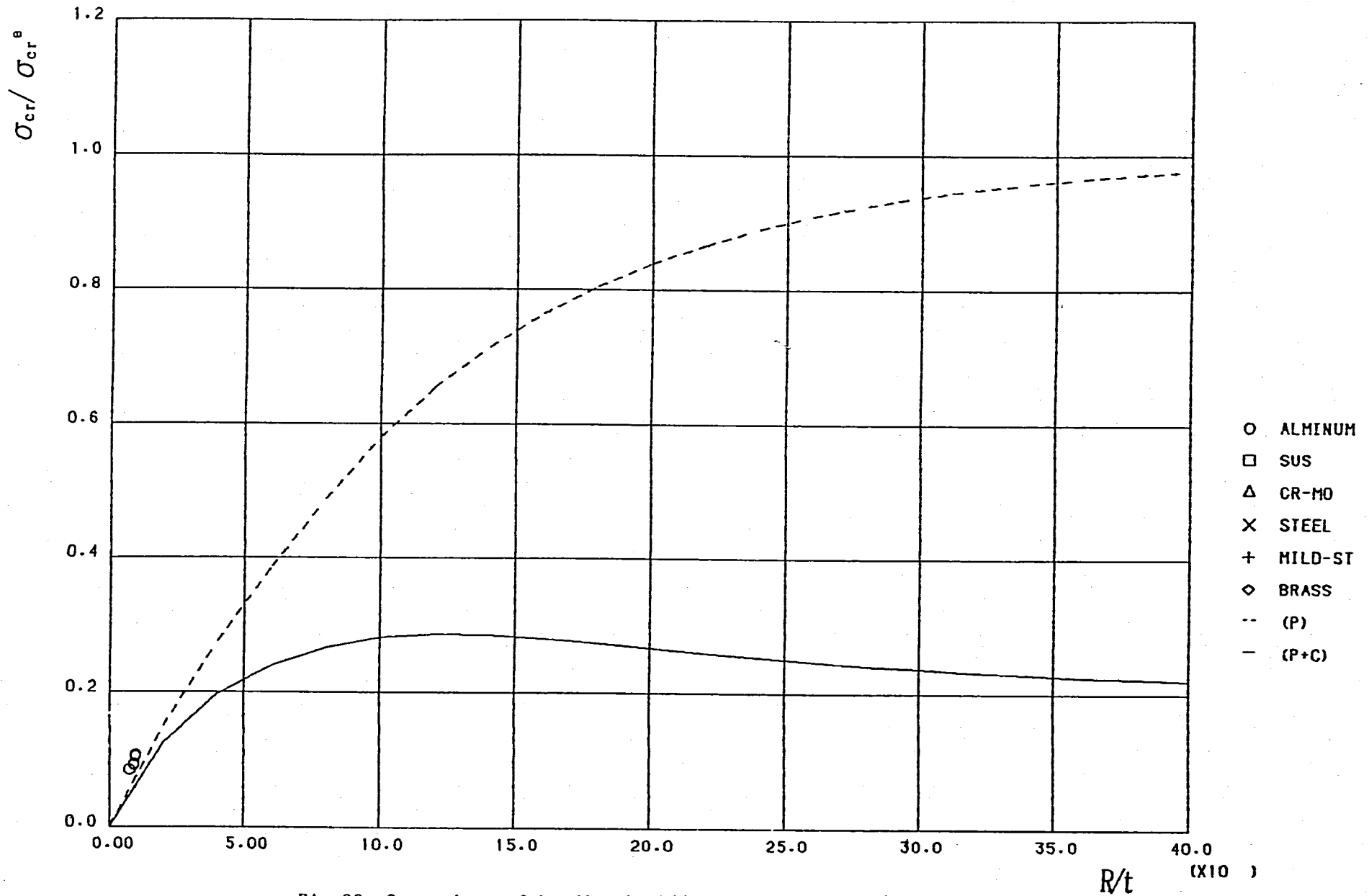


Fig. 36 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^0$ between predicted and experimental values for materials with $4.0 \times 10^{-3} < (\sigma_c / E) < 5.0 \times 10^{-3}$

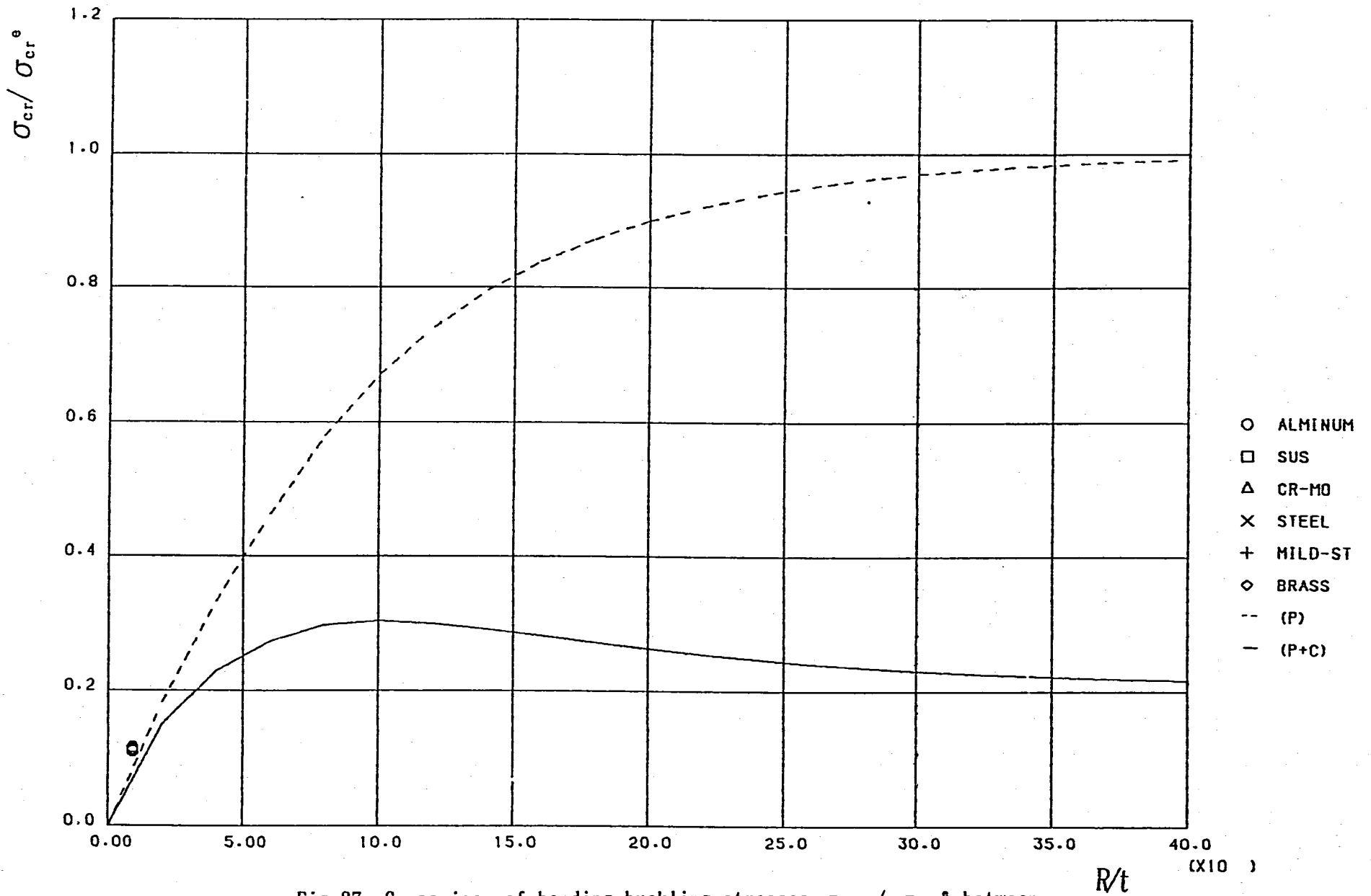


Fig. 37 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $5.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 6.0 \times 10^{-3}$

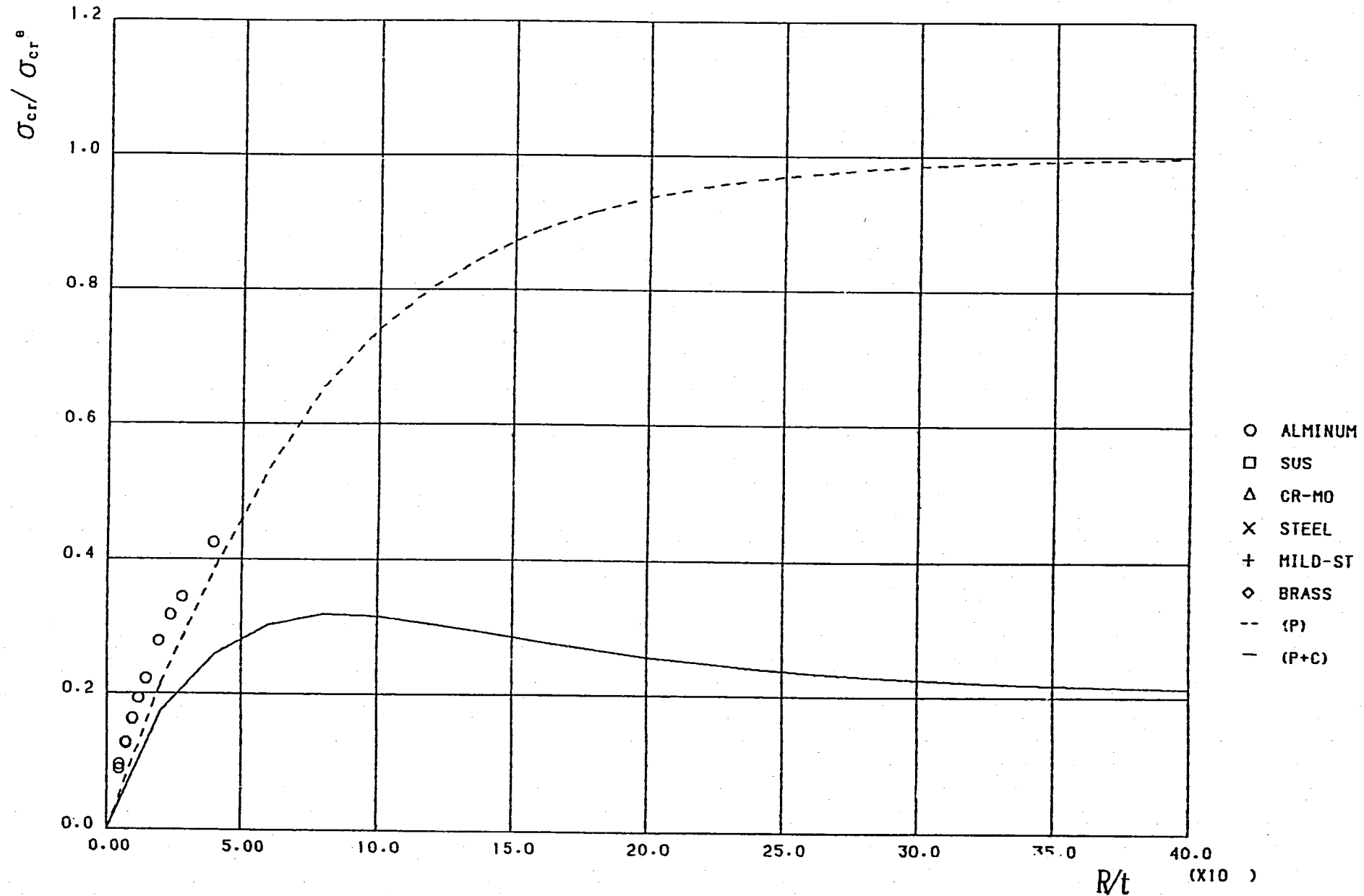


Fig.38 Comparison of bending buckling stresses $\sigma_{cr} / \sigma_{cr}^e$ between predicted and experimental values for materials with $6.0 \times 10^{-3} < (\sigma_y / E) < 8.0 \times 10^{-3}$

Table 2 は、各種設計基準における円筒殻の軸圧縮座屈に対する安全係数を比較したものである。原子力施設を対象にした ASME Code では、Code Case N-47 を除き、運転状態 I, II, III, IV に対して 2 で始まる安全係数 (2, 2, 1.67, 1.34) を採っている。N-47 のみが 3 で始まる安全係数 (3, 3, 2, 1.67) を採っており、「高温構造設計方針」もこれにならって定めている。

近年、ASME Code 委員会の中で、実験値下限相当の基準座屈応力を用いた場合 Code Case N-47 に規定している弾塑性の座屈安全係数は大きすぎるとの意見が多く、改訂が具体的に検討されている。ところが、座屈安全係数の希望値（低減した値）は提案されるものの、何ら根拠が示されず改訂は行き詰まっている状況にあるようだ。著者の考えでは、ASME での検討の最大の問題点は、座屈設計の考え方（解析による座屈設計の方法論）を明確にしていないこと、特に、座屈安全係数を基準座屈応力の設定法と込みで考えていないこと、また、座屈実験データで実証しないで安全係数の低減化を図ろうとしていること、にあるように思われる。

本研究では、実験値下限相当の座屈応力を基準として、これに安全係数を導入して座屈発生確率を適切なレベル以下に抑えるという考え方をとり、当該座屈問題に適用して具体化を図った。基準座屈応力は前節までに導いた評価式によることとし、座屈発生確率は収集した座屈実験データに照らして統計解析による評価を行った。

Fig. 39 は、軸圧縮座屈に対して収集した全実験データについて座屈応力実験値/座屈応力設計評価値を求め、この比の値の分布状況を示したものである。ここで、座屈応力設計評価値とは、基準座屈評価式に安全係数 (S.F. = 1.0, 1.34, 1.67 を設定) を取り入れた場合の座屈応力である。この場合の座屈発生確率は、実験値/設計評価値の比の値が対数正規分布すると仮定すると、この比の値が 1 (座屈が生じる) となる確率としてグラフ上から読み取ることができる。このようにすると、座屈発生確率は、S.F. = 1.0 ではおよそ 10^{-2} 、S.F. = 1.34 では 5×10^{-5} 、S.F. = 1.67 ではさらに数オーダー低い値となっている。Fig. 40 は、曲げ座屈に対して収集した全実験データについて、軸圧縮座屈の場合と同様、座屈応力実験値/座屈応力設計評価値を求め、この比の値の分布状況を示したものである。曲げ座屈の場合の座屈発生確率も、S.F. = 1.0, 1.34, 1.67 に対して、それぞれ軸圧縮座屈の場合とほぼ同程度の数値を示した。

運転状態 IV のような極めて稀な事象に対して、座屈発生確率をどの程度に抑えればよいかについては、まだコンセンサスは存在しない。ここでは、告示 501 号の安全係数に揃える観点と、許容座屈応力を既存の弾性域の座屈基準（「耐震内規」）と整合させる観点から、運転状態 IV に対して S.F. = 1.34 を推奨する。このときの座屈発生確率は 5×10^{-5} であり、十分過ぎる程度といえよう。S.F. = 1.34 は、既存の基準と整合させることを前提にした推奨値であり、座屈発生確率のみから考えれば、S.F. = 1.1 (予想で

Table 2 Comparison of safety factors for axial compressive buckling of cylindrical shells

座屈設計基準	安全計数
告示501号	運転状態 I, II 2.0 運転状態 III 1.67 (2.0/1.2) 運転状態 IV 1.34 (2.0/1.5)
ASME Sec III -NB, NE*)	Design, Level A, B 2.0 Level C 1.67 (2.0/1.2) Level D 1.34 (2.0/1.5)
ASME Code Case N-284	Level A, B 2.0 Level C 1.67 (2.0/1.2) Level D 1.34 (2.0/1.5)
通産省 耐震内規	(運転状態 I, II 1.5 ~ 2.25)**) 運転状態 III, IV 1.0 ~ 1.5)****)
DAS t 013	1.5 ~ 2.0 ***
ECCS	1.5 ~ 2.0 ***
DnV	1.66 ~ 2.16 ***
現行「設計方針」	設計, 運転状態 I, II 3.0 運転状態 III 2.0 運転状態 IV 1.5 運転状態 2.25

*) ASME Sec III NB-3133, NE-3133

**) 運転状態 I, II については定められていないので1.5倍している。

***) R/tによって異なっている。

は 10^{-3} 程度),あるいは S.F. = 1.2 (予想では 5×10^{-4} 程度)まで低減することも可能と考えられる。

他の運転状態については,座屈発生確率が極めて微小な値となるため,このような数値から安全係数を定めることは適当とはいえないので,告示501号と同一値を与えるものとする。最終的に弾塑性座屈に対して以下の安全係数を提案する。

運 転 状 態	現 行	改 訂 案
設計条件, 運転状態 I, II	3. 0	2. 0
運転状態 III	2. 5	1. 6 7
運転状態 IV	1. 5	1. 3 4
試験状態	2. 2 5	2. 0

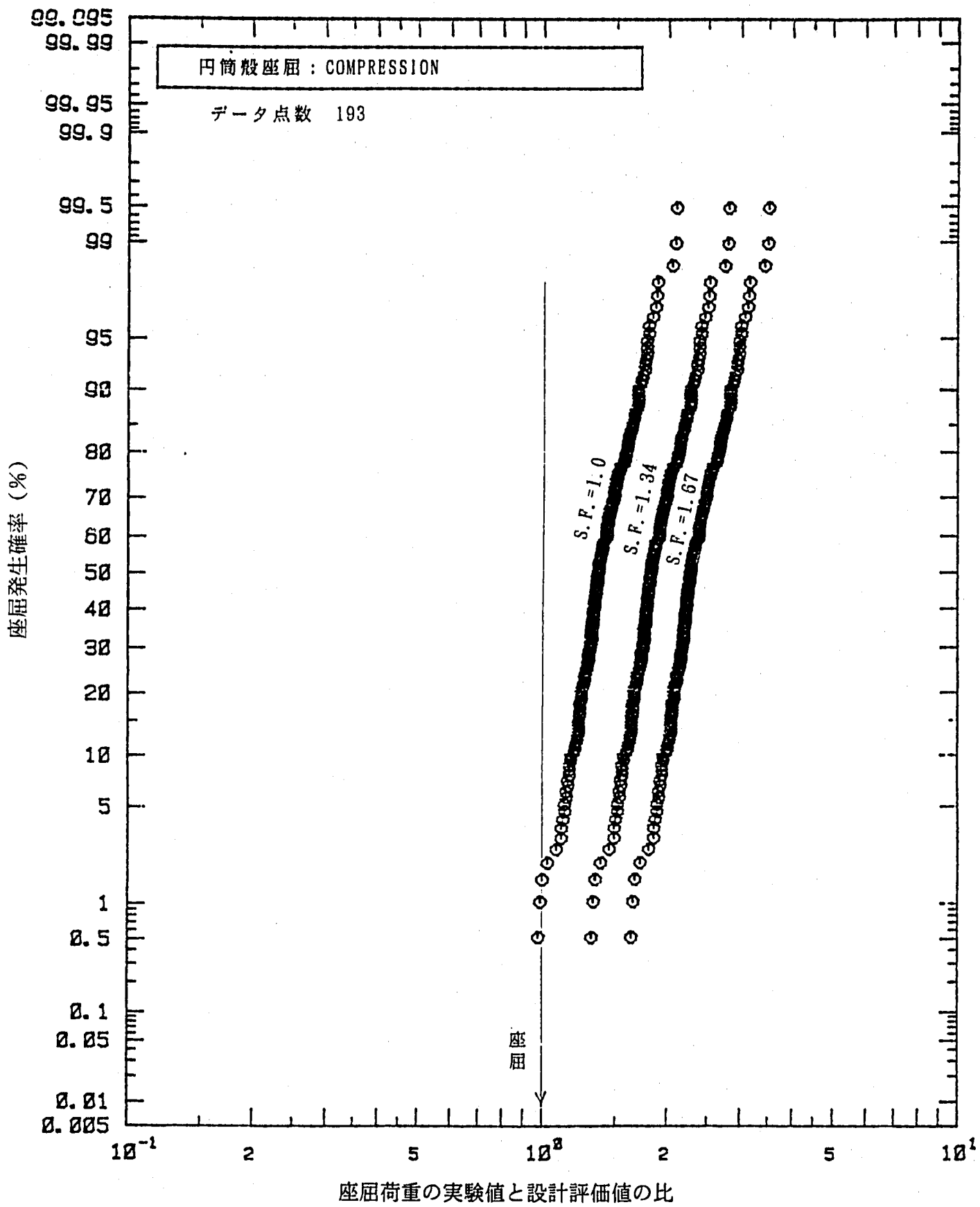


Fig. 39 Probability of buckling when the present equation is used
- axially compressed cylindrical shells -

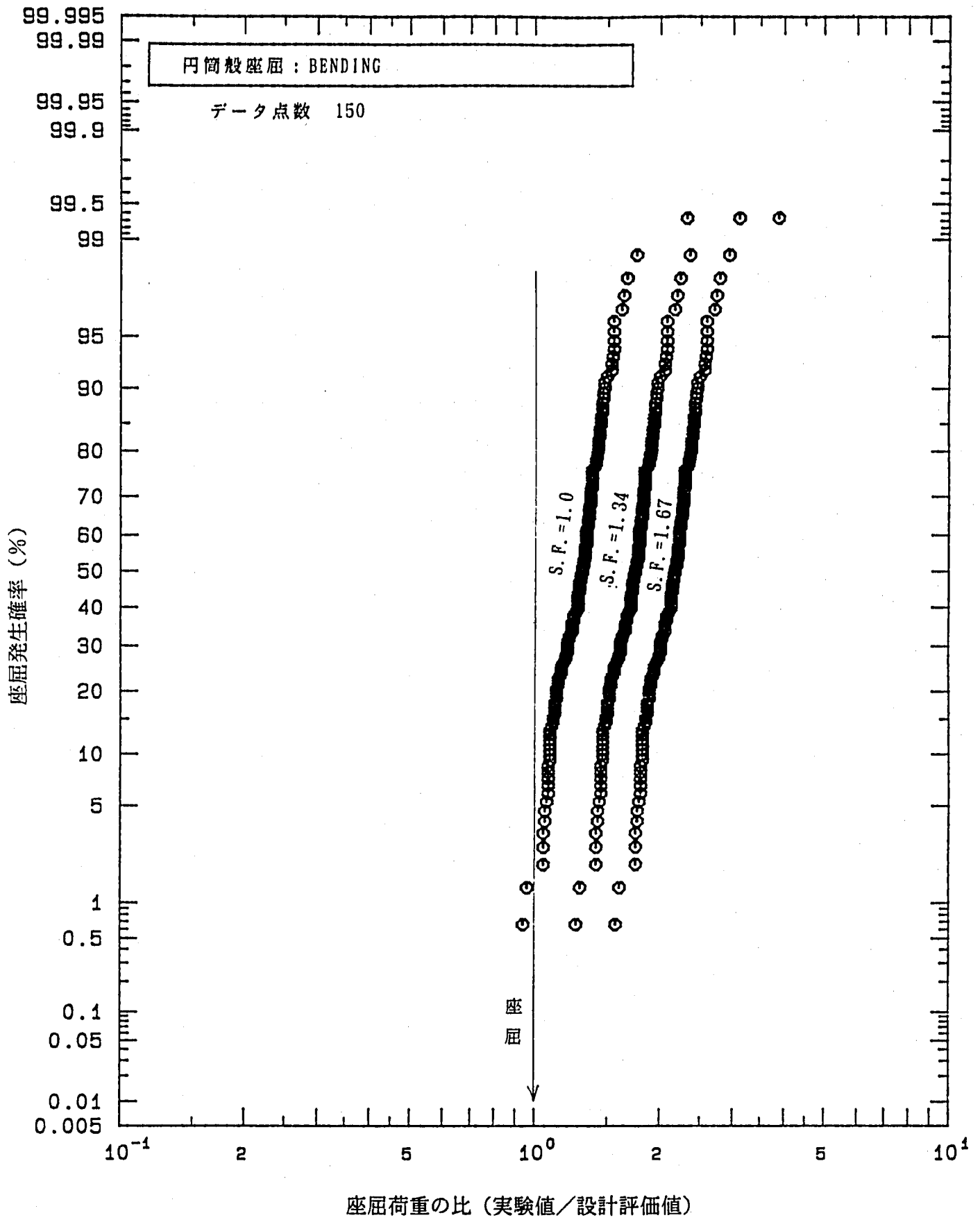


Fig. 40 Probability of buckling when the present equation is used
 - cylindrical shells in bending -

3.8 他の座屈設計基準との比較

前節までに提案した円筒殻の座屈評価式を、以下に示す設計基準のそれらと比較・検討する。なお、各基準の評価式の概要は付録Aにまとめてある。

- 1) 告示501号(第1種機器)およびASME Sec. III NB
- 2) MITI耐震内規
- 3) ASME Sec. III Code Case N-284
- 4) DAST 013 (Deutscher Ausschuss für Stahlbau)
- 5) DnV (Det norske Veritas)
- 6) ECCS (European Convention for Constructional Steelwork)

ここでの検討は、材料はSUS304(550°C)および軽水炉や高速炉の格納容器材料として用いられているSGV49(室温)を対象とした。これらの材料の、本提案座屈評価式で用いられる縦弾性係数、ポアソン比、塑性低減係数、初期不整低減係数をTable3にまとめた。ここで、SGV49は弾完全塑性材料に近い応力ひずみ関係を持つので、評価式はその特性を考慮して定めている(基本は同一式)。

円筒殻の塑性領域での軸圧縮座屈応力は、弾性座屈理論値 σ_{cr} に塑性および初期不整の効果を表す2つの低減係数 α 、 η を乗じた形で与えられることが多い。しかし、基準間で各低減係数の意図するところが揃っていないため、直接数値を比較することには無理がある。そこで、Fig.41においてSUS304の500°Cにおける2つの低減係数の積 $\alpha \cdot \eta$ の基準間の比較を行った。座屈安全係数が含まれない $\alpha \cdot \eta$ の比較では、本改訂案は他の基準に較べてR/tが500以下の範囲で最も小さい値を与えている。この図から、MITI「耐震内規」は他の基準に較べて、かなり大きめ目の値を与えていることも分かる。Fig.42は、SUS304の500°Cにおける基準座屈応力の比較である。現行の「高温構造設計方針」は、基準座屈応力をR/tに依存させないで S_y としており、基準として改善すべきことが明らかである。また、MITI「耐震内規」の基準座屈応力は他の基準に較べて30~100%程度も高めに設定されていることが分かる。告示501号、ASME Sec. III, ASME Code Case N-47では $0.5 S_y \sim 0.6 S_y$ 以下の応力での座屈を弾性座屈として扱っている。このため、SUS304の場合、許容座屈応力がR/t=300~400のところでは不連続となっているのに対して、弾塑性遷移域を精密に表現した(比例限以上で塑性を考慮)本改訂案にはこのような不連続はなくなる。Fig.43は、SUS304の500°Cにおける運転状態Ⅳの設計座屈応力(許容)の比較である。ここでは、安全係数が考慮されるため、基準ごとにその違いの影響が出てくる。原子力以外の施設を対象とするECCS, DAST, DnVには運転状態

Table 3 Values of parameters in the proposed buckling equation for SUS304 at 500°C and SG49 at the room temperature

項目 材質	ヤング率, 降伏応力	塑性低減係数 η	初期不整低減係数 α
SUS304 (500°C)	E = 16200 kg/mm ² Sy = 11.1 kg/mm ²	$\eta = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} 1.033 \times 10^{-3} \frac{R}{t} + 0.038(1 - e^{-0.0226 \frac{R}{t}}) \\ 1 - 0.713(6.85 \times 10^{-4} \frac{R}{t} - 1.167)^2 \end{array} \right.$	$\alpha = 0.207 + 0.643e^{-\frac{1}{433} \frac{R}{t}}$ $+ 0.15e^{-\frac{1}{40} \frac{R}{t}}$
SGV49 (室温)	E = 19600 kg/mm ² Sy = 27 kg/mm ²	$\eta = \text{Min} \left(a \sqrt{3(1 - \nu^2)} \frac{R}{t}, 1 \right)$ $a = \frac{S_y}{E} = 1.378 \times 10^{-3}$	$\alpha = 0.207 + 0.643e^{-\frac{1}{323} \frac{R}{t}}$ $+ 0.15e^{-\frac{1}{40} \frac{R}{t}}$

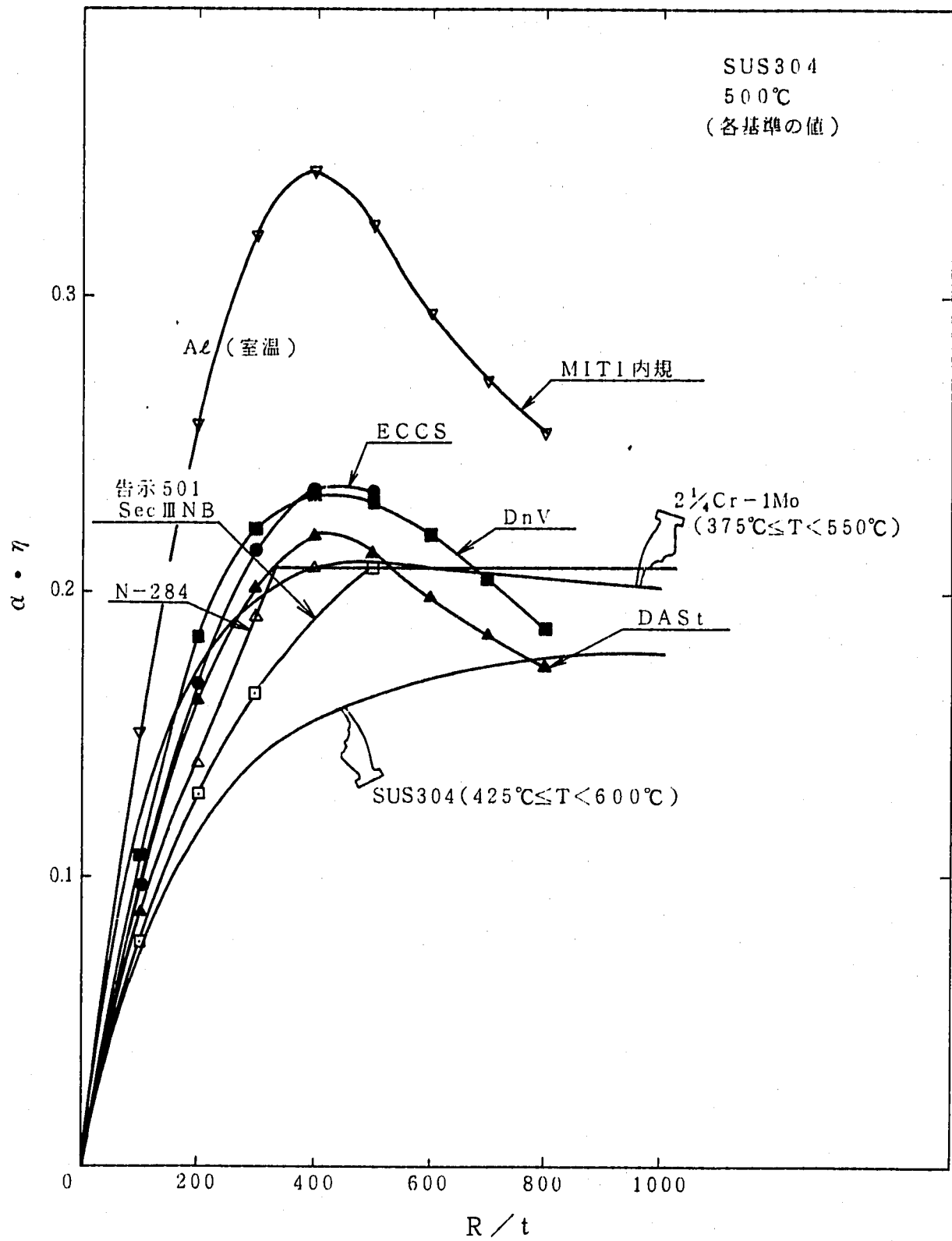


Fig.41 Comparison of buckling reduction factor $\alpha \cdot \eta$ in various design standards

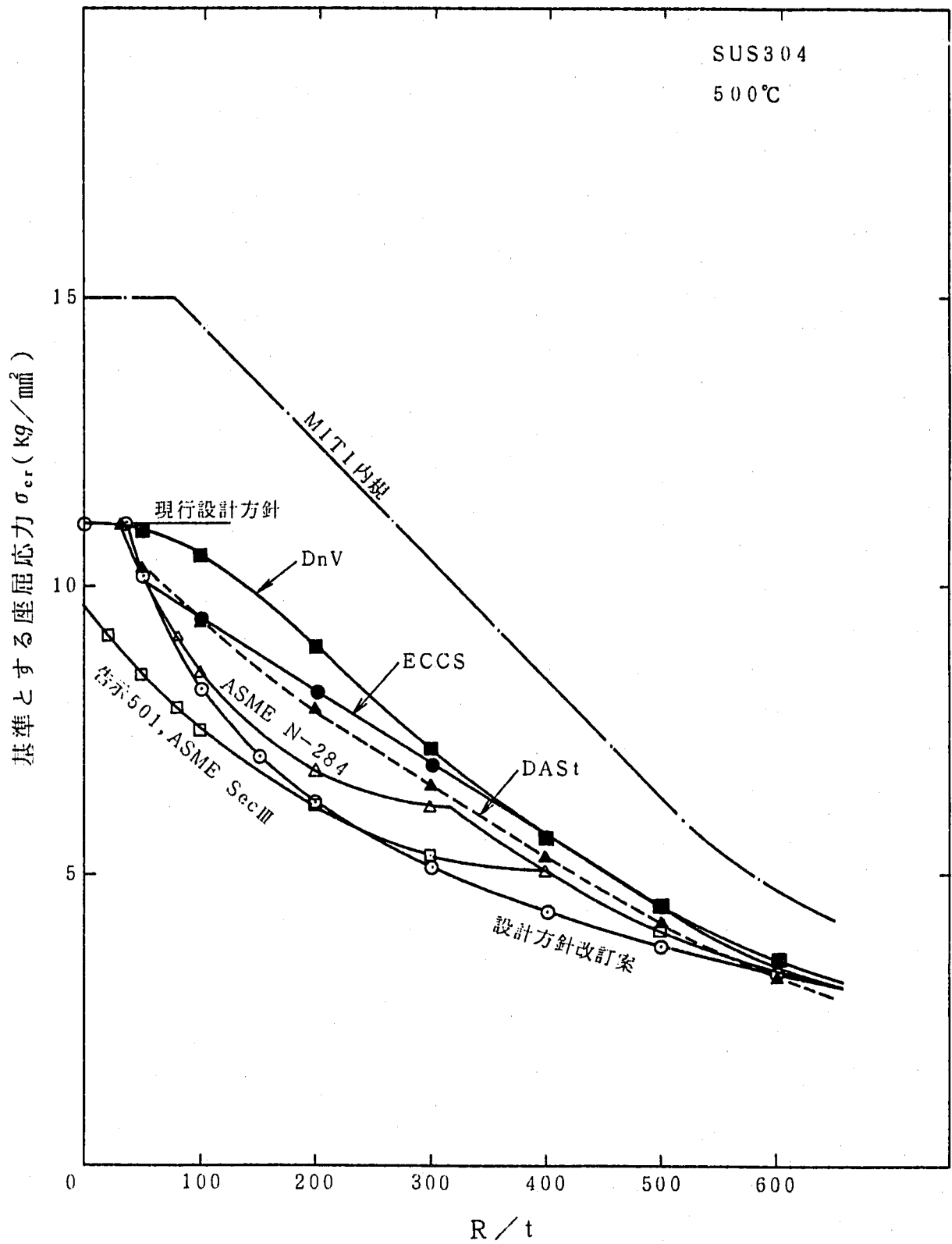


Fig.42 Comparison of reference (minimum) buckling stresses at 550°C for SUS304 - axial compressive buckling -

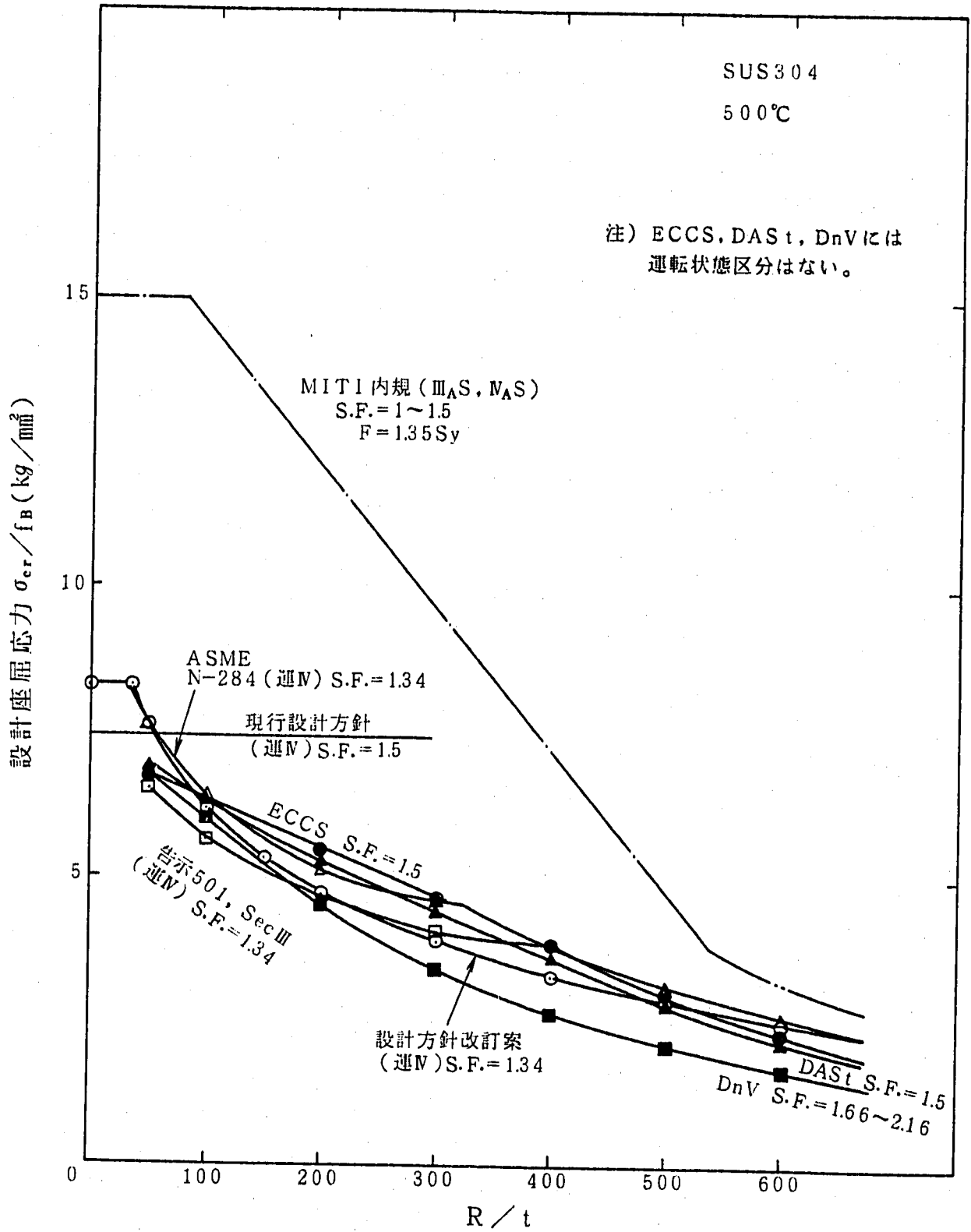


Fig. 43 Comparison of design allowable buckling stresses at 550 °C for SUS304 in the oprating condition IV
- axial compressive buckling -

区分というものがなく一律の安全係数が適用される。MITI「耐震内規」の許容座屈応力が一段と大きい以外は、各基準とも許容値の差はそれほど大きくない。その他の基準に較べて、本改訂案は $R/t < 100$ では同程度、 $100 < R/t < 500$ では相対的に低め、 $R/t > 500$ では相対的に大きめの許容値を与えており、基準としても均衡がとれているといえる。

Fig. 44は、原子炉格納容器材料としてよく用いられる構造材料SGV 49製円筒殻の軸圧縮座屈に本評価式を適用した結果を参考までに示す。この材料は弾完全塑性材料に近い弾塑性の境界が明確に表れる。許容応力値は、 $R/t > 450$ （弾性座屈、実機格納容器はこの範囲）ではMITI「耐震内規」の値とよく一致しているが、 $R/t < 450$ では（塑性座屈）「耐震内規」の値より大幅に小さくなる。塑性座屈領域における基準座屈応力および許容応力の相違は、「耐震内規」が塑性座屈に対する考慮が十分なされていないことによる。

最後に、曲げ座屈に対するSUS 304、500°Cの基準座屈応力と許容座屈応力を、他の基準と比較しながら、Fig. 45およびFig. 46に示す。本評価式は、 $R/t > 100$ で他の基準に較べて小さめの基準座屈応力値を与えるが、許容応力値としては適度な設定となっている。「耐震内規」や現行の「高温構造設計方針」の許容値が高すぎるのは、前述と同様の理由で、塑性座屈に対する考慮が十分でないためである。

3.9 座屈評価の一般化

原子炉容器等一般の殻構造の弾塑性域の座屈設計評価を解析により行う方法論は、本研究で円筒殻に対して展開してきた方法論そのものに他ならない。すなわち、当該材料の規格最下限の強さを持つ材料を仮定した上で、材料の塑性および初期形状不整の影響をそれぞれ最大限に考慮して解析により求めた最下限座屈荷重を基準座屈荷重として、これに適切な安全係数を取り入れて許容座屈荷重を設定することである。このような方法で求めた基準座屈荷重（応力）は、円筒殻の軸圧縮座屈および曲げ座屈応力に関して、弾性域と塑性域を問わず既存の全実験データの下限を99%程度の信頼度で表していることが実証された。さらに、弾塑性座屈の安全係数として、運転状態IVに対して1.34を用いるとすれば、 10^{-4} オーダーの座屈発生確率に抑えられることが分かった。

本研究で円筒殻に対して導いた簡易評価式は、有限要素法等の数値解析によって求めたのと実質的に同じであり、より一般的な構造に対しては有限要素法等を直接に用いることができる。また、円筒殻の軸圧縮座屈は、実験データのばらつきが顕著なことで知られており、ここで提案した座屈安全係数の値は、その意味で一般性を有しており、他の座屈問題に適用して同等以上の確率で座屈防止が図れるものと考えてよい。

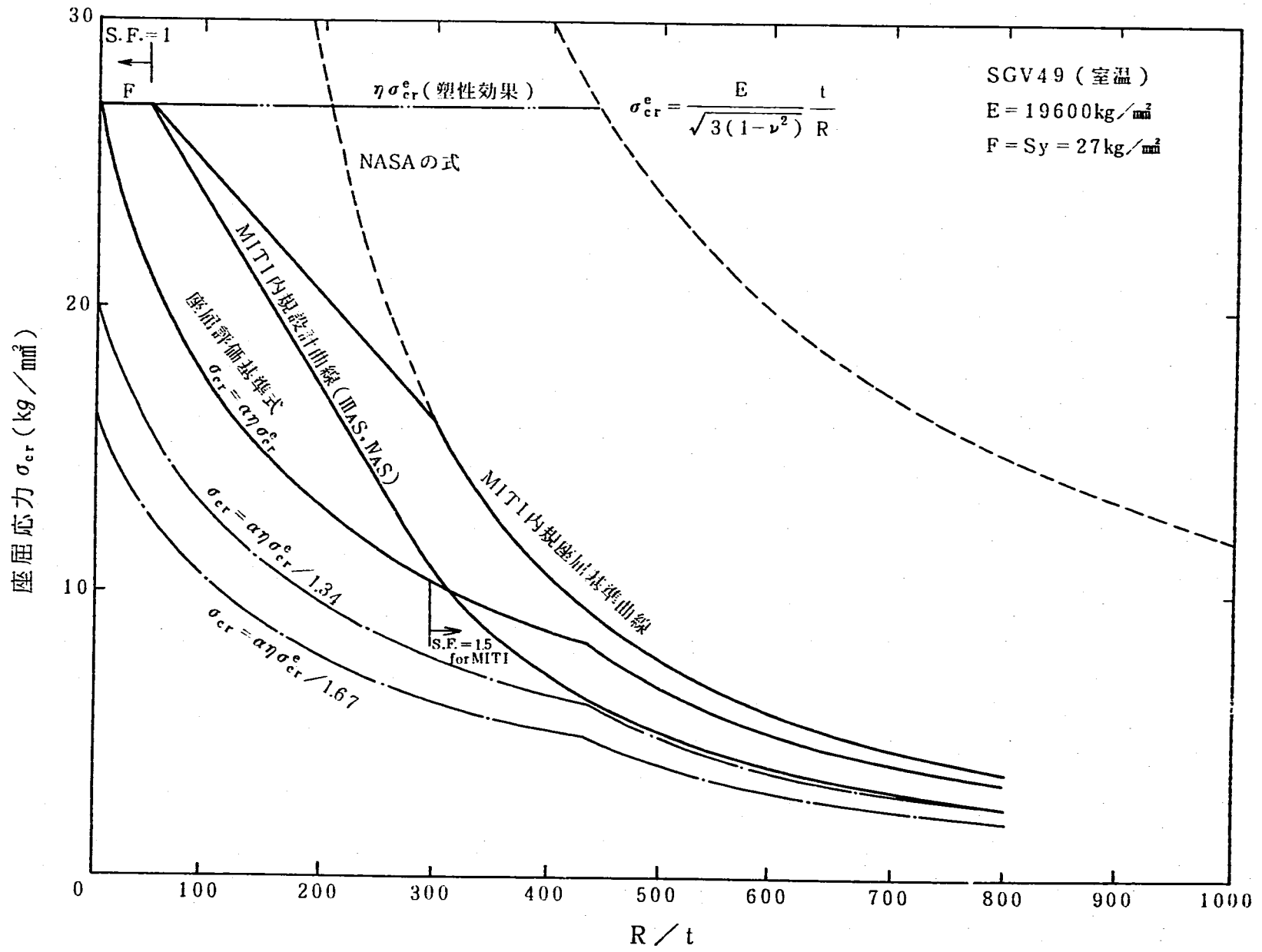


Fig.44 Comparison of design allowable buckling stresses at 20°C for SG49 (containment vessel material)

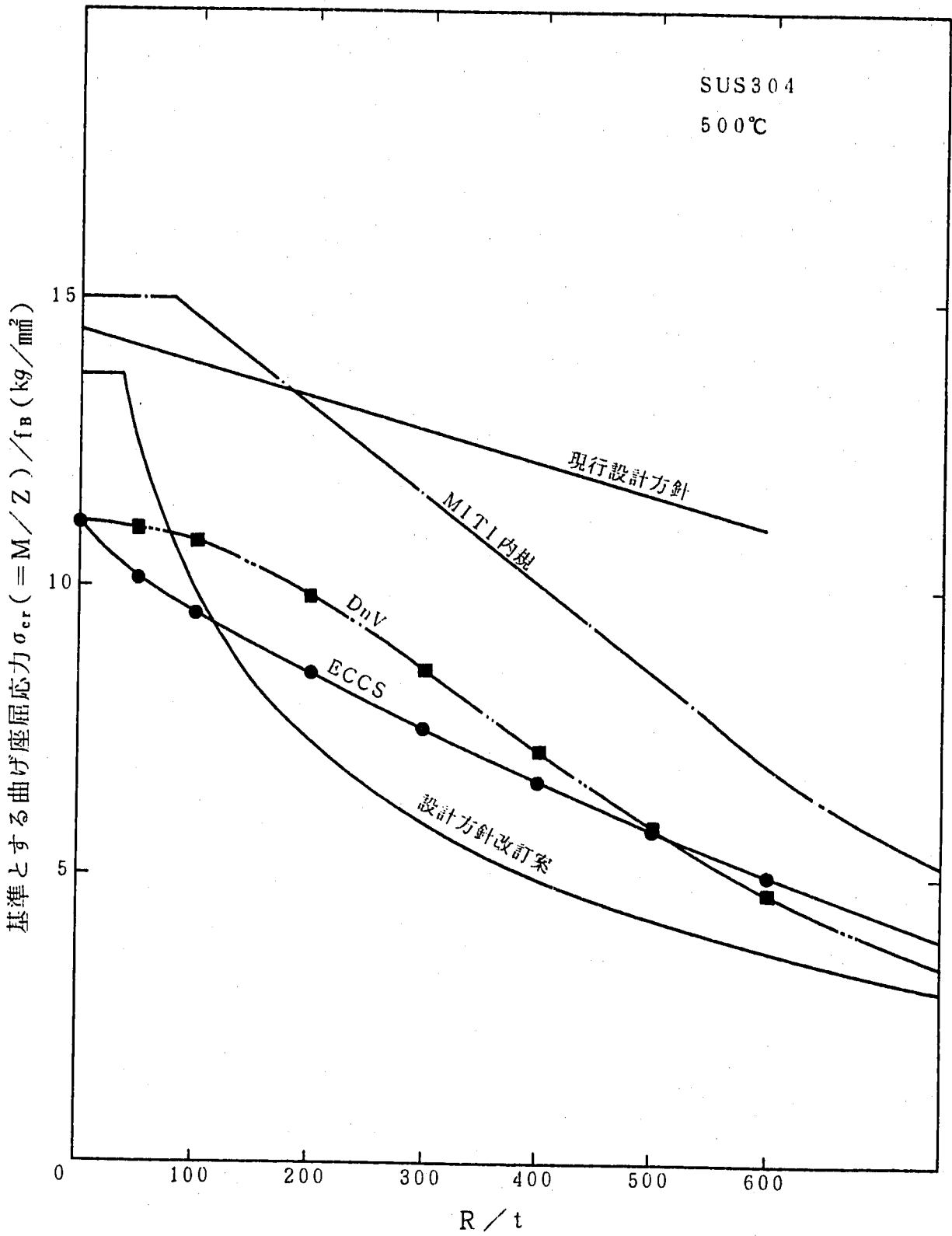


Fig.45 Comparison of reference (minimum) buckling stresses at 550°C for SUS304 - bending buckling -

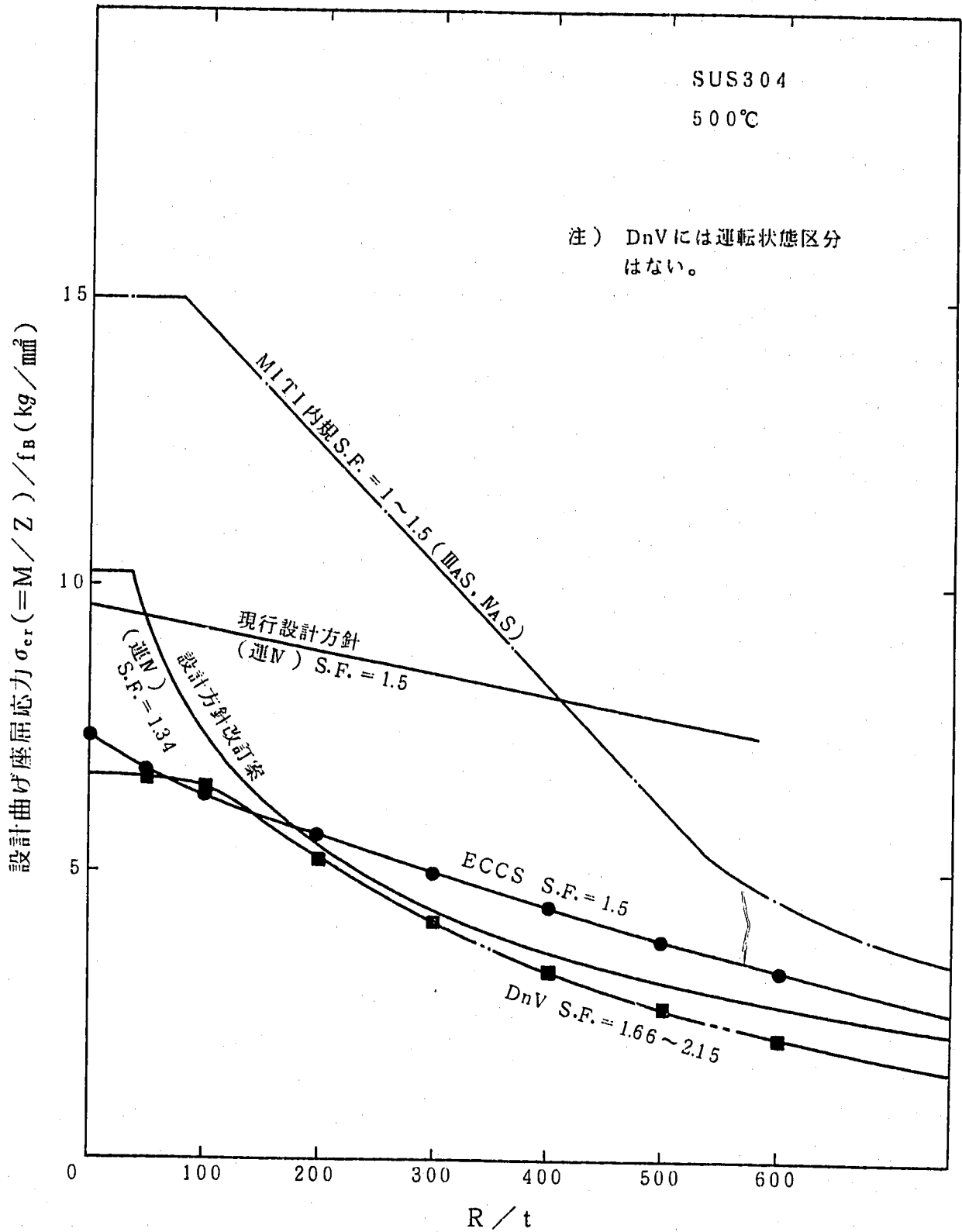


Fig. 46 Comparison of design allowable buckling stresses at 550 °C for SUS304 in the oprating condition IV
- bending buckling -

第 4 章 結 言

円筒殻の軸圧縮および曲げによる座屈の防止基準案を新しく提案した。本研究は、単にこの座屈問題のみに止まらず、原子炉容器等の殻構造一般の弾塑性域の座屈設計評価を解析により行う方法論の確立の一環として位置づけることができる。

本方法論は、当該材料の規格最下限の強さを持つ材料を仮定した上で、材料の塑性および初期形状不整の影響をそれぞれ最大限に考慮して求めた最下限座屈荷重に、適切な安全係数を取り入れて許容座屈荷重を設定するものである。この評価の考え方の基本は、従来の ASME Code Case N-47 等と同様であるが、本研究で着目した点は、まず第 1 に、このような方法論が妥当であることを実証したデータが従来なかったこと、第 2 に、安全係数が従来明確な根拠をもって定められていないこと、換言すれば、座屈荷重評価式の策定と安全係数の設定の間に一貫した考え方が欠けていたことである。本研究は、円筒殻の軸圧縮および曲げによる座屈問題についての解析的検討と既存の実験データによる分析を通して、上記の 2 つの問題点の解決を図ることができた。

本研究の主な成果は以下の通りである。

- 1) 円筒殻の軸圧縮および曲げによる座屈について、材料の塑性および初期形状不整による効果を解析的に考慮し、簡便な座屈強度評価式を導いた。この評価式は、材料特性が与えられれば、あらゆる材料に適用でき、また、設計に使用する最下限の座屈強度値は設計降伏応力を用いることにより容易に定められる。
- 2) 当該座屈の既存の実験データを可能な限り収集し、このデータベースを用いて許容座屈荷重評価式の信頼性を評価して、合理的に安全係数を設定することを試みた。このような実データに基づく信頼性解析を通して、従来懸案となっていた弾塑性座屈の安全係数を低減（例えば運転状態Ⅳに対して従来の 1.5 から 1.34 のように）できる見通しを得た。この安全係数は任意の殻構造の弾塑性座屈にそのまま適用できる。

ここでは「高温構造設計方針」の円筒殻の軸圧縮と曲げの組み合わせによる座屈を対象としたが、大型炉において比較的短い円筒殻が採用される場合には、曲げ座屈からせん断座屈へと座屈様式が移行していくので、せん断座屈に対する考慮が重要となろう。そのような場合の簡便な座屈評価式も、本報告書の方法にならって作成することができると考えられる。さらに、一般的な殻構造の座屈設計においても、有限要素解析により最下限の座屈荷重を算出し、ここで提案したのと同じ安全係数を用いて評価することができると考えられる。

謝 辞

本研究は、元・高速増殖炉開発本部に設けられた設計基準ワーキンググループ/座屈・崩壊タスクグループ（グループリーダー：岩田）における検討作業として進められた。本提案を作成する過程で、ご協力いただいたワーキンググループのメンバー、大矢弘史（石川島播磨重工業(株)）、秋元修平（パコック 日立(株)）、榎田義勝（(株)日立製作所）、岡田敬三、竹中誠（以上、三菱重工業(株)）の各氏に感謝したい。とくに、文献からの座屈試験データの収集では大矢氏に、各国座屈基準の調査では秋元氏に、G e r a r d式等の確認計算では竹中氏に、またG e l l i nの解析結果の確認計算では榎田氏に負うところが大きかったことを記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 高速原型炉第 1種機器の高温構造設計方針, PNC N241 81-25(1), 動燃事業団, 昭和56年.
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-47-28, ASME, 1988.
- 3) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (昭和55年通商産業省告示501号), 通商産業省, 昭和55年.
- 4) 原子力発電所の耐震設計基準 (案), 通商産業省資源エネルギー庁, 昭和56年.
- 5) もんじゅ原子炉施設の設工認基準に関する調査, MCS小委員会(主査: 鶴戸口英善), 日本溶接協会, 昭和58年, pp. 2-35
- 6) Timoshenko, S. P.: Theory of Elastic Stability, 1st ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., 1936.
- 7) Shanley, F. R.: Inelastic Column Theory, J. Aero. Sci. Vol. 16, No. 7, 1949, pp. 405-408.
- 8) Bijlaard, P. P.: Theory and Tests on the Plastic Stability of Plates and Shells, J. Aero. Sci., Vol. 16, No. 9, 1949, pp. 529-541.
- 9) Gerard, G.: Compression and Torsional Buckling of Thin-wall Cylinders in Yield Region, NACA TN3726, 1956.
- 10) Koiter, W. T.: Over de Stabiliteit van het Elastisch Evenwicht, Thesis, Delft, H. J. Paris, Amsterdam, 1945, (English Translation) NASA TT F-10, 833, 1967, and AFFDL-TR-70-25, 1970.
- 11) Koiter, W. T.: Effect of Axisymmetric Imperfections on the Buckling of Cylindrical shells under Axial Compression, Proc. Kon. Ned. Ak. Wet., Vol. 66, B, 1963, pp. 265-279.

- 12) Gellin, S. : Effect of Axisymmetric Imperfection on the Plastic Buckling of an Axially Compressed Cylindrical Shell, J. Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol.46, No.1, 1979, pp.125-131.
- 13) Gellin, S. : Buckling of Cylindrical Shells in the Plastic Range, Ph.D. Thesis, Harvard University, Nov. 1976.
- 14) Flugge, W. : Die Stabilitat der Krieszylinderschale, Ingenieur-Archiv, Vol.3, 1932, pp.463-506.
- 15) Seide, p. and Weingarten, V.I. : On the Buckling of Circular Cylindrical Shells under Pure Bending, J. Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol.28, No.1, 1961, pp.112-116.
- 16) Yao, J.C. : Large Deflection Analysis of Buckling of a Cylinder under bending, J. Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol.4, No.4, 1962, p.708.
- 17) Clark, J.W. and Rolf, R.L. : Design of Aluminum Tubular Members, Proc. ASCE, Vol.90, No.ST6, 1964, pp.259-289.
- 18) Schilling, C.G. : Buckling Strength of Circular Tubes, Proc. ASCE, J. Struct. Di., Vol.91, No.ST5, 1965, pp.325-347.
- 19) Brazier, L.G. : On the Flexure of Thin Cylindrical Shells and Other Thin Sections, Proc. of the Royal Society London, Series A, Vol.116, 1927, p.104.
- 20) Akselrad, E.L. : Refinement of the Upper Critical Loading of Pipe Bending Taking Account of the Geometrical Nonlinearity, Izvestiia Akademiia Nauk, Mekhanika, SSSR, No.4, 1965, p.133.
- 21) Almroth, B.O. and Starnes, J.H., Jr., : The Computer in Shell Stability Analysis, J. Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol.101, 1975, p.873.

- 22) Stephens, W. B., Starnes, J. H., Jr. and Almroth, B. O. : Collapse of Long Cylindrical Shells under Combined Bending and Pressure Loads, AIAA Journal, Vol. 13, 1975, p. 20.
- 23) Donnell, L. H. : A New Theory for the Buckling of Thin Cylinders under Axial Compression and Bending, Trans. of the ASME, Vol. 56, 1934, p. 795.
- 24) Lundquist, E. E. : Strength Tests of Thin-walled Duralumin in Cylinders in Pure Bending, NACA TN-479, 1933.
- 25) Suer, H. S., Harris, L. A., Skene, W. T. and Benjamin, R. J. : The Bending Stability of Thin-walled Unstiffened Circular Cylinders Including the Effects of Internal Pressure, J. Aeronautical Sciences, Vol. 25, 1958, pp. 281
- 26) Seide, P., Weingarten, V. I. and Morgan, E. J. : Final Report on the Development of Design Criteria for Elastic Stability of Thin Shell Structures, AFBMD/TR-61-7, 1960.

付録 A. 各種座屈設計基準の概要
－円筒殻の軸圧縮および曲げ座屈－

円筒殻の軸圧縮座屈に対する各種設計基準の概要をTable A.1 に、曲げ座屈に対するものをTable A.2 にまとめる。ここで取り上げた基準は下記の通りである。

- 1) 「高温構造設計方針」付録G. 1
- 2) 告示501号(第1種機器)およびASME Sec. III NB
- 3) MITI耐震内規
- 4) ASME Sec. III Code Case N-284
- 5) DAST 013 (Deutscher Ausschuss für Stahlbau)
- 6) DnV (Det norske Veritas)
- 7) ECCS (European Convention for Constructional Steelwork)

このうち、「高温構造設計方針」付録G. 1, 告示501号, ASME Sec. III NB, MITI耐震内規, Code Case N-284は原子力機器を対象としたものである。ここで「高温構造設計方針」付録G. 1は高温の第1種容器に、告示501号とASME Sec. III NBは低温の第1種機器に適用される。また、MITI耐震内規とCode Case N-284は主として格納容器に適用される。ただし、MITI耐震内規は支持構造物にも適用される。

一方、DAST 013およびECCSは日本の鋼構造設計基準に相当するドイツおよびヨーロッパの統一規格であると考えられる。また、DnVはノルウェーの海洋構造物を対象とした基準である。

各基準の円筒殻の軸圧縮座屈強度基準を定める基本的な考え方は、ASME Sec. III Code Case N-284に明確な形で表現されているように、弾性理論値をベースにして、理論値と実験値との比、 α (Capacity Reduction Factor, 初期形状不整効果) および塑性領域における補正係数、 η (Plasticity Reduction Factor) または ϕ を考慮し、さらに安全係数SFを取り入れ座屈許容値を設定するものである。これを定式化すると次のようになる。

$$\sigma_a = \alpha \eta \sigma_{cr}^e / SF$$

ここで

σ_a	: 許容座屈応力
σ_{cr}^e	: 弾性理論座屈応力
α	: 初期不整効果による係数
η	: 塑性効果による係数
SF	: 安全係数

したがって、各基準の相違は、基準の作成に用いた座屈試験データの相違、および対象機器の相違（一般構造物と原子力機器の差）による塑性効果、初期不整効果、安全係数の考慮の仕方の差あるいは考え方の差に由来しているようである。例えば、初期不整効果の係数 α の設定方法に関して、他の基準が実験データに基づいて決めているのに対して、DnVではKoiterの理論解析をベースとし製作上の許容初期形状不整量と関連づけている点に特長がある。このDnVの方式によると、座屈評価式（安全係数を含まない）が座屈試験データに依存せずに定まるという利点があり、今後の座屈基準が指向すべき方向であると考えられる。このような理由から本報告書でもこのアプローチを採っている。

【参考文献】

告示501号（第1種機器）およびASME Sec. III NB

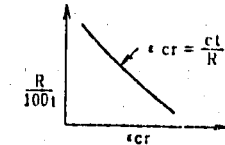
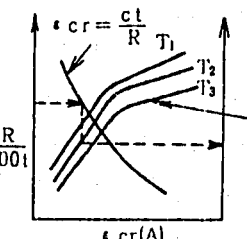
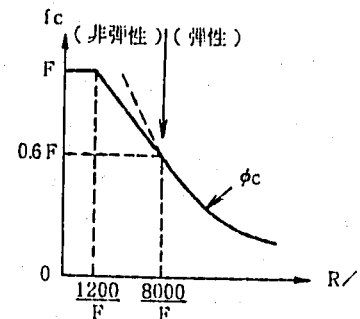
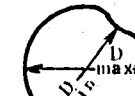
1. 「解説 原子力設備の技術基準」通産省資源エネルギー庁編，電力新報社，1986.
2. 安藤・岡林：原子力プラントの構造設計，東京大学出版会，1987.

MITI耐震内規

3. 鋼構造座屈設計指針，日本建築学会，
4. 塔状鋼構造設計指針・同解説，日本建築学会

Code Case N-284, DAST 013, DnVおよびECCS

5. Galletly, G.D.: Buckling of Fabricated Cylinders subjected to Compressive Axial Loads and/or external pressure - A Comparison of Several Codes -, in Pressure Vessel Technology: Design Technology, A Decade of Progress, ASME, 1982.

高温構造設計方針 付録G. 1 (現行)	告示501, ASME Sec III-NB, NE*	MITI 内規	C. C. N-284*
$\frac{F_c}{A} + \frac{D_o M}{2yl} \leq \frac{S_y}{f_b}$ <p>at $D_o/t < \frac{2E}{5S_y}$ (弾塑性屈領域) $(\sigma = 0.2 \frac{Et}{R} > S_y)$</p>	$\sigma_\phi \leq \text{Min} (S_m, B/100)$ <p>at $5 \leq R/t \leq 5000$</p>	$\frac{\alpha(P/A)}{f_c} + \frac{\alpha(M/Z)}{f_b} \leq 1.0$ $f_c = \begin{cases} F^* & \dots R/t \leq \eta_1 \\ F \times (1 - \frac{1}{6800} (F - \phi_c [\eta_2]) (\eta - \eta_1)) & \dots \eta_1 < R/t \leq \eta_2 \\ \phi_c & \dots \eta_2 < R/t \leq 800 \end{cases}$ <p>$\eta_1 = 1200/F$ $\eta_2 = 8000/F$</p>	$\sigma_\phi \leq \frac{\alpha_{\phi L}}{SF} \sigma_{\phi L}$ <p>ただし $\frac{\sigma_\phi \cdot SF}{\sigma_y} \geq 0.55$ の場合 $\sigma_\phi \leq \eta$</p> <p>at $R/t \leq 1000, \ell/\sqrt{Rt} > 1.5$</p>
<p>—————</p>	$\sigma_{c1} = 0.605 \frac{E_1 \cdot t}{R}$	$\sigma_{c1} = 0.605 \frac{Et}{R}$	$\sigma_{c1} = 0.605 \frac{Et}{R} (= \sigma_{\phi L})$
<p>D. I_p, II_p : 3.0 III_p : 2.0 (3/15) IV_p : 1.5 (3/2)</p>	<p>D. I_p, II_p** : 2.0 III_p : 1.67 (3/1.2) IV_p : 1.34 (2/1.5)</p>	<p>III_p, IV_p</p> $SF = \begin{cases} 1.0 & \dots R/t \leq \eta_1 \\ 1.0 + \frac{F}{13600} (\frac{R}{t} - \frac{1200}{F}) & \dots \eta_1 < R/t < \eta_2 \\ 1.5 & \dots R/t \geq \eta_2 \end{cases}$	<p>I_p, II_p : 2.0 III_p : 1.67 (2/1.2) IV_p : 1.34 (2/1.5)</p>
<p>Capacity Reduction (初期不整等) の効果が基準上どのように反映されているか不明確。 結果的にGerard式によるσ_oをS_yにおきかえる際の差がαに対応するとの解釈が可能。</p> $\alpha_h = \frac{S_y}{\sigma_o}$	$\sigma'_{cr} = C \frac{Et}{R} = 0.125 \frac{Et}{R}$ $\alpha_{\phi L} = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr}} = \frac{0.125}{0.605} = 0.207$ 	$\phi_c = 0.6 [1 - 0.901 (1 - \exp(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}))] \frac{Et}{R}$ $= \alpha_{\phi L} \sigma_{cr}$ $\therefore \alpha_{\phi L} = 1 - 0.901 (1 - \exp(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}))$	$\alpha_{\phi L} = \max (\text{㉔}, \text{㉕})$ <p>㉔ $\alpha_{\phi L} = 0.207$</p> $\alpha_{\phi L} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1.52 - 0.473 \log_{10} (R/t) \\ 1 \times 10^{-5} \times S_y - 0.033 \end{array} \right.$ <p>㉕ $\alpha_{\phi L} = 0.837 - 0.14M \dots 1.5 \leq M < 1.73$ $\alpha_{\phi L} = 0.826 / M^{0.6} \dots 1.73 \leq M < 1.9$ $\alpha_{\phi L} = 0.207 \dots M \geq 1.9$</p> <p>($M = \ell/\sqrt{Rt} > 1.5$)</p>
<p>Plasticityの効果はGerard式により表現されると見なしてよい。</p> $\sigma_o = \frac{\sqrt{Et \cdot E_s}}{\sqrt{3(1-\nu_p^2)}} \frac{t}{R}$ $\eta_\phi = \frac{\sigma_o}{\sigma_{cr}} = \sqrt{\frac{Et}{Es}} \cdot \frac{Es}{E} \sqrt{\frac{1-\nu_p^2}{1-\nu_p^2}}$ <p>(初期不整無, R/t=80の解析により検証)</p>	$\frac{B}{100} = \frac{1}{2} \times 0.125 \frac{E_1 \cdot t}{R}$  <p>$E_1(\epsilon, T) \dots$ をチャート化することにより考慮</p> <p>$\frac{B}{100} = \frac{\epsilon_{cr} \cdot E_1(\epsilon, T)}{2}$</p> <p>2: SF値に相当</p>	 <p>$f_c > 0.6$ では非弾性域と定義</p>	$\eta_\phi = 0.18 / (1 - \frac{0.45\sigma_y}{\sigma_\phi \cdot SF}) \dots 0.55$ $\eta_\phi = 1.31 - 1.15 (\frac{\sigma_\phi \cdot SF}{\sigma_y}) \dots 0.733$ $\eta_\phi = 1.0 \dots \frac{\sigma_\phi \cdot SF}{\sigma_y}$
<p>規定なし (告示501号にて制限)</p>	<p><第1種容器> $D_{max} - D_{min} \leq \min \left(\frac{D+1270}{200}, \frac{D}{100} \right)$</p> <p><第2, 3種容器> $D_{max} - D_{min} \leq \frac{D}{100}$</p> 	<p>規定なし (告示501号にて制限)</p>	$D_{max} - D_{min} \leq \frac{D}{100}$

$$\sigma_\phi \leq \frac{\alpha_{\phi L} \sigma_{\phi L}}{SF} = \frac{\sigma_k}{SF}$$

$\frac{\sigma_\phi}{\alpha_{\phi L}} > 0.4 \sigma_r$ の場合

$$\sigma_\phi \leq \frac{1}{SF} (\phi \sigma_r)$$

$$\sigma_\phi \leq \frac{\alpha \sigma_{\phi L}}{SF}$$

$$\sigma_\phi \leq \frac{\phi \cdot \sigma_y}{SF}$$

$$\sigma_\phi \leq \frac{\alpha_{\phi L} \sigma_{\phi L}}{SF} \times \frac{3}{4} = \frac{\sigma_k}{SF}$$

$\alpha_{\phi L} \cdot \sigma_{\phi L} > 0.5 \sigma_r$ の場合

$$\sigma_\phi \leq \frac{1}{SF} (\phi \sigma_r)$$

$$\sigma_{cr} = 0.605 \frac{Et}{R} (= \sigma_{\phi L})$$

$$\sigma_{cr} = 0.605 \frac{Et}{R} (= \sigma_{\phi L})$$

$$\sigma_{cr} = 0.605 \frac{Et}{R} (= \sigma_{\phi L})$$

SF = 1.5

$$SF = \frac{\gamma_r \cdot \gamma_m \cdot \kappa}{\phi}$$

SF = 1.5

γ_r : 荷重係数 κ : 初期不整影響係数*
 γ_m : 材料係数 ϕ : ポストバックリングに対する係数

$$\alpha_{\phi L} = \frac{0.52}{\sqrt{1 + 0.01 (R/t)}}$$

$$\alpha = 0.35 - 0.0002 (R/t) \dots Z > 20$$

($Z = (L/R)^2 (R/t) \sqrt{1 - \nu^2}$)

$$\alpha_{\phi L} = \frac{0.83}{\sqrt{1 + 0.01 (R/t)}} \dots R/t < 212$$

$$\alpha_{\phi L} = \frac{0.70}{\sqrt{1 + 0.01 (R/t)}} \dots R/t > 212$$

$$\phi = 1.0 + 0.434 (0.2 - \lambda) \dots \lambda < \sqrt{2.5}$$

$$\phi = \frac{1}{\lambda^2} \dots \lambda > \sqrt{2.5}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_r}{\alpha_{\phi L} \sigma_{\phi L}}}$$

($\eta_\phi = \frac{\phi \sigma_r}{\alpha_\phi \sigma_{\phi L}}$) (弾性域)

$$\phi = 1 / (\sqrt{1 + \lambda^4}) \dots \text{all region}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_r}{\sigma_{\phi L}}}$$

($\eta_\phi = \frac{\phi \sigma_r}{\alpha_\phi \sigma_{\phi L}}$)

$$\phi = 1 - 0.4123 \bar{\lambda}^{1.2} \dots \bar{\lambda} < \sqrt{2}$$

$$\phi = \frac{0.75}{\bar{\lambda}^2} (\sigma_k = \frac{\alpha_{\phi L} \sigma_{\phi L}}{4/3}) \dots \bar{\lambda} < \sqrt{2}$$

(弾性域)

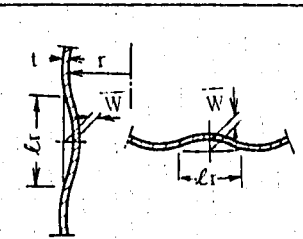
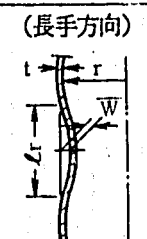
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_r}{\alpha_{\phi L} \sigma_{\phi L}}}$$

($\eta_\phi = \frac{\phi \sigma_r}{\alpha_\phi \sigma_{\phi L}}$)

$$D_{max} - D_{min} \leq \frac{D}{100}$$

$$\frac{\bar{W}}{t} \leq \frac{1}{30} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

($Lr = 4\sqrt{rt}$)



$$\frac{W}{t} \leq \frac{1}{25} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

(ただし $\alpha \rightarrow \frac{\alpha}{2}$ とした場合)

$$\frac{W}{t} \leq \frac{2}{25} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

<p> $\frac{P_c}{A} + \frac{D_o M}{2yI} \leq \frac{S_y}{f_b}$ </p> <p> f_b : 安全率 y : 曲げ座屈強度割増係数 </p>	<p> $\frac{\alpha (P/A)}{f_c} + \frac{\alpha (M/Z)}{f_b} \leq 1$ </p> <p> α : 安全率 f_c : 軸圧縮座屈強度 f_b : 曲げ座屈強度 </p>	<p> $\sigma_\phi \leq \eta \cdot \frac{\alpha}{SF} \cdot \phi \sigma_{\phi, L}$ </p> <p> ただし $\frac{\sigma_\phi \cdot SF}{\sigma_y} \leq 0.55$ のとき $\eta = 1.0$ </p> <p> η : 塑性効果係数 α : 初期不整効果係数 $\phi_{\phi, L}$: 弾性理論値 </p>	<p> $\sigma_\phi \leq \frac{\phi \sigma_y}{SF}$ </p> <p> ここで </p> <p> $\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_y}{\alpha \cdot \sigma_{e, i}} \right)^2}}$ </p> <p> α : 初期不整効果係数 $\sigma_{e, i}$: 弾性理論値 </p>
<p> $\frac{D_o}{t} \leq 140$: $y = 1.3$ $140 < \frac{D_o}{t} < \frac{2E}{5S_y}$: $y = 1.3 - 0.3 \left(\frac{D_o}{t} - 140 \right) / \left(\frac{2E}{5S_y} - 140 \right)$ </p> <p> 塑性域における臨界モーメントの増加を考慮。 </p>	<p> 弾性域においては </p> <p> $f_c = \alpha_c \sigma_{e, i}$ $= [1 - 0.901 (1 - \exp(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}))] \sigma_{e, i}$ </p> <p> $f_b = \alpha_b \sigma_{e, i}$ $= [1 - 0.731 (1 - \exp(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}))] \sigma_{e, i}$ </p> <p> よって初期不整効果係数を曲げと軸圧縮で変えている。 $(\alpha_b / \alpha_c \approx 1.4 \sim 1.5)$ </p> <p> ただし塑性域では発生応力を降伏応力で制限しており、曲げの割増しは考えていない。 </p>	<p> 軸圧縮座屈と曲げ座屈の区別はつけていない。 考え方としては下記の通り。 </p> <p> When the applied loading causes static or quasi-static stresses which vary in longitudinal and/or circumferential directions within particular area of interest, each set of stress components along any circumference may be assumed to act uniformly over the entire circumference. </p> <p> For three-dimensional thin shell bifurcation analysis, the actual stress fields may be used. </p>	<p> 初期不整係数を軸圧縮と曲げに対し変えている。 </p> <p> $\alpha_c = 0.35 - 0.0002 R/t$ (軸圧縮) $\alpha_b = 0.5 - 0.0003 R/t$ (曲げ) </p> <p> 総合的な座屈応力の比は $\sigma_{e, i} = \phi \sigma_y$ で評価 弾性域では曲げ座屈応力の軸圧縮座屈応力に対する程度となる </p>

付録 B. 円筒殻の軸圧縮座屈および 曲げ座屈の収集データ一覧

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending

【円筒殻軸圧縮および曲げ座屈データ出典】

【表中の記号説明】

NO	: データ番号 (C= 軸圧縮, B=曲げ)
REF	: 文献番号
MAT	: 材料種別 (A=アルミ合金, S, C=炭素鋼, M=クロモリ軟鋼, O=軟鋼, U=304 ステンレス鋼, B=黄銅)
R	: 半径(R) mm
T	: 板厚(t) mm
L	: 長さ(L) mm
R/T	: 半径/板厚比(R/t)
E	: 縦弾性係数(E) kg/mm ²
SY	: 降伏応力 (0.2%耐力 S_y) または $\sigma_{0.7E}$ (表中* 印) kg/mm ²
SY/E	: S_y / E または $\sigma_{0.7E} / E$
SCR	: 座屈応力実験値 ($\sigma_{cr, exp}$) kg/mm ²
SCR/SCRE	: 座屈応力実験値の弾性理論値に対する比 ($\sigma_{cr, exp} / \sigma_{cr}^e$)
SY/SCRE	: S_y / σ_{cr}^e または $\sigma_{0.7E} / \sigma_{cr}^e$
FAB	: 供試体の製作法 (W= 溶接, M=機械加工)

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (1/10)

NO	REF	HAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C 1	(1)	S	1016.00	6.0706	72.00	167.36	0.2046E+05	25.01	0.122E-02	17.04	0.230	0.338	W
C 2	(1)	S	1016.00	5.8928	72.00	172.41	0.2011E+05	25.37	0.126E-02	16.61	0.235	0.359	W
C 3	(1)	S	1016.00	6.1468	72.00	165.29	0.2088E+05	26.59	0.127E-02	18.41	0.241	0.348	W
C 4	(1)	S	1016.00	6.0706	72.00	167.36	0.2039E+05	25.37	0.124E-02	19.30	0.262	0.344	W
C 5	(1)	S	127.00	0.7645	30.00	166.11	0.2018E+05	17.96	0.890E-03	7.31	0.099	0.244	W
C 6	(1)	S	127.00	0.7569	30.00	167.79	0.2116E+05	19.02	0.899E-03	10.41	0.136	0.249	W
C 7	(1)	S	431.80	3.0988	420.00	139.34	0.2067E+05	23.06	0.112E-02	14.06	0.157	0.257	W
C 8	(1)	S	431.80	2.8702	420.00	150.44	0.1983E+05	22.78	0.115E-02	15.61	0.196	0.286	W
C 9	(1)	S	431.80	3.0480	240.00	141.67	0.2018E+05	31.74	0.157E-02	16.31	0.189	0.368	W
C 10	(1)	S	431.80	3.0480	240.00	141.67	0.2095E+05	26.79	0.128E-02	16.38	0.183	0.299	W
C 11	(1)	S	431.80	2.8702	72.00	150.44	0.2116E+05	28.09	0.133E-02	18.91	0.222	0.330	W
C 12	(1)	S	431.80	2.9718	72.00	145.20	0.2046E+05	28.83	0.141E-02	19.33	0.227	0.338	W
C 13	(2)	S	154.30	3.0226	360.00	51.05	0.2109E+05	24.47	0.116E-02	20.95	0.084	0.098	W
C 14	(2)	S	153.92	2.9972	360.00	51.36	0.2109E+05	23.90	0.113E-02	17.37	0.070	0.096	W
C 15	(2)	S	153.92	2.7940	360.00	55.09	0.2109E+05	27.42	0.130E-02	19.83	0.086	0.118	W
C 16	(2)	S	154.81	2.6924	360.00	57.50	0.2109E+05	26.72	0.127E-02	18.77	0.085	0.120	W
C 17	(2)	S	153.16	1.5748	360.00	97.26	0.2109E+05	28.12	0.133E-02	15.05	0.115	0.214	W
C 18	(2)	S	153.92	1.6002	360.00	96.19	0.2109E+05	28.12	0.133E-02	15.33	0.115	0.212	W
C 19	(2)	S	609.60	12.5476	360.00	48.58	0.2109E+05	24.26	0.115E-02	23.55	0.090	0.092	W
C 20	(2)	S	609.60	12.5222	360.00	48.68	0.2109E+05	23.90	0.113E-02	21.72	0.083	0.091	W
C 21	(2)	S	153.67	2.9464	360.00	52.16	0.2109E+05	22.50	0.107E-02	17.37	0.071	0.092	W
C 22	(2)	S	153.67	2.9464	360.00	52.16	0.2109E+05	23.90	0.113E-02	17.44	0.071	0.098	W
C 23	(2)	S	153.67	3.0226	360.00	50.84	0.2109E+05	21.80	0.103E-02	17.65	0.070	0.087	W
C 24	(2)	S	155.57	2.9464	360.00	52.80	0.2109E+05	23.20	0.110E-02	18.84	0.078	0.096	W
C 25	(2)	S	431.80	12.2936	360.00	35.12	0.2109E+05	22.50	0.107E-02	24.43	0.067	0.062	W

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (2/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C 26	(2)	S	431.80	12.4714	360.00	34.62	0.2109E+05	22.85	0.108E-02	25.69	0.070	0.062	W
C 27	(2)	S	609.60	9.3726	360.00	65.04	0.2109E+05	22.50	0.107E-02	21.51	0.110	0.115	W
C 28	(2)	S	609.60	9.3218	360.00	65.40	0.2109E+05	23.20	0.110E-02	22.15	0.113	0.119	W
C 29	(2)	S	609.60	6.2484	360.00	97.56	0.2109E+05	28.47	0.135E-02	20.72	0.158	0.218	W
C 30	(2)	S	609.60	6.3500	360.00	96.00	0.2109E+05	27.84	0.132E-02	22.25	0.167	0.209	W
C 31	(3)	S	354.30	8.3490	2050.00	42.44	0.2227E+05	35.02	0.157E-02	32.95	0.104	0.110	W
C 32	(3)	S	366.50	8.0370	2050.00	45.60	0.2227E+05	28.04	0.171E-02	38.35	0.130	0.129	W
C 33	(3)	S	590.80	8.3490	3050.00	70.76	0.2227E+05	35.02	0.157E-02	34.64	0.182	0.184	W
C 34	(3)	S	590.80	8.3490	2030.00	70.76	0.2227E+05	35.02	0.157E-02	35.33	0.185	0.184	W
C 35	(3)	S	604.50	8.0370	3050.00	75.21	0.2227E+05	38.04	0.171E-02	36.17	0.202	0.212	W
C 36	(3)	S	889.90	7.1650	3030.00	124.20	0.2227E+05	41.39	0.186E-02	33.68	0.310	0.381	W
C 37	(3)	S	762.90	7.2620	3030.00	105.05	0.2227E+05	40.83	0.183E-02	36.30	0.283	0.318	W
C 38	(3)	S	597.90	7.2620	3030.00	82.33	0.2227E+05	40.83	0.183E-02	38.41	0.235	0.249	W
C 39	(3)	S	762.90	7.2620	2440.00	105.05	0.2227E+05	40.83	0.183E-02	35.59	0.277	0.318	W
C 40	(3)	S	762.70	6.5530	2440.00	116.39	0.2227E+05	68.33	0.307E-02	62.32	0.538	0.590	W
C 41	(4)	S	380.00	9.9400	2.03	38.23	0.2227E+05	26.22	0.118E-02	27.69	0.079	0.074	
C 42	(4)	S	386.60	6.7300	2.03	57.44	0.2227E+05	22.36	0.100E-02	22.45	0.096	0.095	
C 43	(4)	S	566.60	6.7300	3.05	75.27	0.2227E+05	22.36	0.100E-02	22.34	0.125	0.125	
C 44	(4)	S	761.60	6.7300	3.05	113.16	0.2227E+05	22.36	0.100E-02	19.67	0.165	0.188	
C 45	(4)	S	285.10	9.7300	1.22	29.30	0.2227E+05	36.82	0.165E-02	39.37	0.086	0.080	
C 46	(5)	S	276.00	8.0000	760.00	34.50	0.2326E+05	33.79	0.145E-02	32.52	0.080	0.083	W
C 47	(5)	S	276.00	8.0000	1100.00	34.50	0.2326E+05	33.79	0.145E-02	33.08	0.081	0.083	W
C 48	(5)	S	276.00	8.0000	1100.00	34.50	0.2326E+05	33.79	0.145E-02	32.38	0.079	0.083	W
C 49	(1)	S	46.33	0.5639	7.47	82.16	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	22.08	0.144	0.165	W
C 50	(1)	S	46.63	0.9525	7.45	46.96	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	26.79	0.104	0.099	W

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (3/10)

NG	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C 51	(1)	S	47.22	1.6485	7.00	28.64	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	27.00	0.062	0.058	W
C 52	(1)	S	46.36	0.5969	7.51	77.66	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	28.09	0.174	0.156	W
C 53	(1)	S	46.81	1.0998	7.50	42.56	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	25.87	0.088	0.086	W
C 54	(1)	S	46.94	1.6561	6.97	28.34	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	28.61	0.065	0.057	W
C 55	(1)	S	46.69	0.6071	3.50	76.90	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	28.12	0.172	0.155	W
C 56	(1)	S	46.69	0.5893	1.52	79.22	0.2074E+05	25.28	0.122E-02	28.54	0.180	0.160	W
C 57	(1)	S	49.40	0.5029	1.75	98.23	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	34.73	0.268	0.312	M
C 58	(1)	S	49.40	0.5055	3.75	97.74	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	37.61	0.289	0.311	M
C 59	(1)	S	49.40	0.5029	5.75	98.23	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	32.62	0.252	0.312	M
C 60	(1)	S	49.43	0.5461	7.75	90.51	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	33.75	0.240	0.288	M
C 61	(1)	S	49.40	0.4928	19.87	100.26	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	35.58	0.280	0.319	M
C 62	(1)	S	49.53	0.7442	7.50	66.55	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	39.02	0.204	0.211	M
C 63	(1)	S	49.35	0.3708	7.54	133.08	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	28.40	0.297	0.423	M
C 64	(1)	S	49.53	0.7341	7.54	67.47	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	36.98	0.196	0.214	M
C 65	(1)	S	49.35	0.3632	7.53	135.87	0.2102E+05	40.43	0.192E-02	30.72	0.328	0.432	M
C 66	(6)	D	34.77	0.7544	6.01	46.09	0.1976E+05	35.51	0.180E-02	31.64	0.122	0.137	
C 67	(6)	D	34.65	0.7518	6.00	46.08	0.1976E+05	37.19	0.188E-02	31.64	0.122	0.143	
C 68	(6)	D	34.77	0.7544	6.16	46.09	0.1976E+05	34.38	0.174E-02	31.92	0.123	0.133	
C 69	(6)	D	34.42	0.3200	4.75	107.54	0.1976E+05	37.19	0.188E-02	24.68	0.222	0.335	
C 70	(6)	D	34.26	0.3734	5.40	91.77	0.1976E+05	34.38	0.174E-02	32.83	0.252	0.264	
C 71	(6)	D	34.77	0.7544	6.15	46.09	0.1976E+05	36.56	0.185E-02	34.24	0.132	0.141	
C 72	(6)	D	34.34	0.6147	4.75	55.87	0.1976E+05	36.56	0.185E-02	32.06	0.150	0.171	
C 73	(6)	D	34.70	0.7493	0.00	46.31	0.1976E+05	30.23	0.153E-02	30.23	0.117	0.117	
C 74	(6)	D	34.39	0.4953	0.00	69.44	0.1976E+05	31.15	0.158E-02	29.11	0.169	0.181	
C 75	(7)	M	7.25	1.0000	0.00	7.25	0.2074E+05	62.14	0.304E-02	79.10	0.046	0.036	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (4/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C 76	(7)	M	7.30	1.0000	0.00	7.30	0.2074E+05	63.14	0.304E-02	79.38	0.046	0.037	
C 77	(7)	M	11.50	1.0000	0.00	11.50	0.2109E+05	67.92	0.322E-02	77.06	0.069	0.061	
C 78	(7)	M	11.50	1.0000	0.00	11.50	0.2109E+05	67.92	0.322E-02	76.56	0.069	0.061	
C 79	(7)	M	11.80	1.0000	0.00	11.80	0.2109E+05	64.40	0.305E-02	71.36	0.066	0.060	
C 80	(7)	M	16.50	1.0000	0.00	16.50	0.2116E+05	66.37	0.314E-02	74.03	0.095	0.086	
C 81	(7)	M	16.50	1.0000	0.00	16.50	0.2116E+05	66.37	0.314E-02	73.66	0.095	0.086	
C 82	(7)	M	20.85	1.0000	0.00	20.85	0.2123E+05	64.75	0.305E-02	68.13	0.111	0.105	
C 83	(7)	M	22.10	1.0000	0.00	22.10	0.2074E+05	65.95	0.318E-02	70.94	0.125	0.116	
C 84	(7)	M	22.10	1.0000	0.00	22.10	0.2074E+05	65.95	0.318E-02	70.52	0.124	0.116	
C 85	(7)	M	25.85	1.0000	0.00	25.85	0.2081E+05	60.67	0.292E-02	61.80	0.127	0.125	
C 86	(7)	M	26.55	1.0000	0.00	26.55	0.2130E+05	64.89	0.305E-02	66.09	0.136	0.134	
C 87	(7)	M	27.85	1.0000	0.00	27.85	0.2137E+05	65.60	0.307E-02	62.01	0.134	0.141	
C 88	(7)	M	27.95	1.0000	0.00	27.95	0.2144E+05	65.60	0.306E-02	62.92	0.136	0.141	
C 89	(7)	M	30.40	1.0000	0.00	30.40	0.2130E+05	67.99	0.319E-02	64.33	0.152	0.160	
C 90	(7)	M	30.40	1.0000	0.00	30.40	0.2123E+05	66.86	0.315E-02	61.31	0.145	0.158	
C 91	(7)	M	38.70	1.0000	0.00	38.70	0.2109E+05	47.04	0.223E-02	58.28	0.177	0.143	
C 92	(7)	M	39.05	1.0000	0.00	39.05	0.2109E+05	47.04	0.223E-02	58.07	0.178	0.144	
C 93	(7)	M	44.40	1.0000	0.00	44.40	0.2144E+05	54.07	0.252E-02	57.09	0.195	0.185	
C 94	(7)	M	44.40	1.0000	0.00	44.40	0.2144E+05	54.07	0.252E-02	57.02	0.195	0.185	
C 95	(7)	M	49.15	1.0000	0.00	49.15	0.2123E+05	51.96	0.245E-02	58.78	0.225	0.199	
C 96	(7)	M	49.20	1.0000	0.00	49.20	0.2130E+05	51.96	0.244E-02	58.85	0.225	0.198	
C 97	(8)	S	11.91	1.0000	0.00	11.91	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	50.06	0.047	0.044	
C 98	(8)	S	12.72	1.0000	0.00	12.72	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	48.16	0.048	0.047	
C 99	(8)	S	13.33	1.0000	0.00	13.33	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	48.16	0.050	0.049	
C100	(8)	S	13.84	1.0000	0.00	13.84	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	53.01	0.057	0.051	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (5/10)

NG	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C101	(8)	S	13.84	1.0000	0.00	13.84	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	50.06	0.054	0.051	
C102	(8)	S	20.15	1.0000	0.00	20.15	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	50.06	0.079	0.074	
C103	(8)	S	20.96	1.0000	0.00	20.96	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	49.57	0.081	0.077	
C104	(8)	S	20.96	1.0000	0.00	20.96	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	48.37	0.079	0.077	
C105	(8)	S	22.39	1.0000	0.00	22.39	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	47.95	0.084	0.083	
C106	(8)	S	22.39	1.0000	0.00	22.39	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	46.61	0.082	0.083	
C107	(3)	S	24.02	1.0000	0.00	24.02	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	47.74	0.090	0.089	
C108	(8)	S	24.53	1.0000	0.00	24.53	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	46.05	0.088	0.091	
C109	(8)	S	25.34	1.0000	0.00	25.34	0.2109E+05	47.11	0.223E-02	46.89	0.093	0.094	
C110	(9)	U	43.33	2.3114	5.00	18.75	0.2215E+05	25.66	0.116E-02	32.90	0.046	0.036	
C111	(9)	U	43.33	2.3622	5.01	18.34	0.2215E+05	25.66	0.116E-02	33.61	0.046	0.035	
C112	(9)	U	43.33	2.3622	10.01	18.34	0.2215E+05	25.66	0.116E-02	34.31	0.047	0.035	
C113	(9)	U	43.21	2.3368	4.99	18.49	0.2215E+05	25.66	0.116E-02	29.53	0.041	0.035	
C114	(10)	A	34.80	3.5865	4.00	9.70	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	48.95	0.103	0.084	
C115	(10)	A	35.59	2.5375	2.00	14.02	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	45.07	0.138	0.121	
C116	(10)	A	35.20	1.7856	1.00	19.72	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	43.30	0.186	0.170	
C117	(10)	A	34.75	0.7772	2.00	44.71	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	39.01	0.380	0.386	
C118	(10)	A	34.59	0.6121	1.00	56.51	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	36.12	0.444	0.489	
C119	(10)	A	34.49	0.3861	2.00	89.34	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	30.90	0.601	0.772	
C120	(10)	A	34.80	3.5662	4.00	9.76	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	49.21	0.104	0.084	
C121	(10)	A	34.77	3.5636	1.50	9.76	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	48.74	0.103	0.084	
C122	(10)	A	34.80	3.5662	1.00	9.76	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	49.10	0.104	0.084	
C123	(10)	A	35.56	2.5527	1.00	13.93	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	44.85	0.136	0.120	
C124	(10)	A	35.20	1.7907	2.00	19.66	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	43.22	0.185	0.170	
C125	(10)	A	34.67	0.7849	1.00	44.17	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	37.53	0.361	0.382	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (6/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C126	(10)	A	34.59	0.6299	2.00	54.92	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	35.60	0.425	0.475	
C127	(10)	A	34.49	0.4013	1.00	85.95	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	30.72	0.574	0.743	
C128	(10)	A	34.82	3.5890	4.00	9.70	0.7593E+04	39.72	0.523E-02	48.67	0.103	0.084	
C129	(11)	A	23.37	0.2743	3.00	85.19	0.6328E+04	6.33	0.100E-02	6.10	0.136	0.141	
C130	(11)	A	23.52	0.2743	3.00	85.74	0.6328E+04	6.33	0.100E-02	5.94	0.133	0.142	
C131	(11)	A	23.42	0.2743	3.00	85.37	0.6328E+04	6.33	0.100E-02	5.98	0.133	0.141	
C132	(11)	A	23.72	0.2515	3.00	94.34	0.6328E+04	6.33	0.100E-02	6.19	0.152	0.156	
C133	(12)	A	49.83	0.4953	6.00	100.62	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	20.30	0.461	0.611	
C134	(12)	A	49.86	0.4953	4.00	100.67	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	23.69	0.539	0.611	
C135	(12)	A	49.86	0.4902	2.00	101.71	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	23.77	0.546	0.617	
C136	(12)	A	49.76	0.3200	4.00	155.48	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	18.46	0.648	0.944	
C137	(12)	A	32.21	1.6637	1.90	19.36	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	33.96	0.149	0.125	
C138	(12)	A	32.21	1.6637	3.47	19.36	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	23.23	0.146	0.125	
C139	(12)	A	32.21	1.6637	5.70	19.36	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	33.40	0.146	0.125	
C140	(12)	A	32.03	1.2700	3.63	25.22	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	32.13	0.183	0.163	
C141	(12)	A	31.90	1.0541	2.06	30.27	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	32.15	0.220	0.196	
C142	(12)	A	31.72	0.6477	3.05	48.98	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	27.77	0.307	0.317	
C143	(12)	A	31.98	1.0922	2.88	29.28	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	32.06	0.212	0.190	
C144	(12)	A	31.83	0.8001	2.73	39.76	0.7312E+04	28.69	0.392E-02	27.63	0.248	0.258	
C145	(13)	A	1127.76	7.6200	110.00	148.00	0.4781E+04	20.74	0.434E-02	13.50	0.690	1.061	
C146	(13)	A	1249.68	10.1600	150.00	123.00	0.4781E+04	20.74	0.434E-02	13.85	0.589	0.882	
C147	(13)	A	1158.24	15.2400	150.00	76.00	0.4781E+04	20.74	0.434E-02	19.40	0.510	0.545	
C148	(13)	A	1198.88	20.3200	100.00	59.00	0.4781E+04	20.74	0.434E-02	19.12	0.390	0.423	
C149	(13)	A	1173.48	35.5600	100.00	33.00	0.4781E+04	20.74	0.434E-02	21.44	0.245	0.237	
C150	(14)	A	49.73	1.7618	19.89	29.22	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	7.56	0.080	0.050	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (7/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C151	(14)	A	49.15	2.5400	19.83	19.35	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	8.03	0.056	0.033	
C152	(14)	A	47.70	5.0800	19.72	9.39	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	9.65	0.033	0.016	
C153	(14)	A	49.78	1.7018	11.94	29.25	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	7.24	0.077	0.050	
C154	(14)	A	49.28	2.5400	11.93	19.40	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	8.28	0.058	0.033	
C155	(14)	A	47.65	5.0800	11.86	9.38	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	9.91	0.034	0.016	
C156	(14)	A	50.32	1.0922	8.00	46.07	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	7.11	0.118	0.079	
C157	(14)	A	49.63	1.7018	7.93	29.16	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	6.60	0.070	0.050	
C158	(14)	A	49.23	2.5400	7.95	19.38	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	8.01	0.056	0.033	
C159	(14)	A	47.55	5.0800	7.88	9.36	0.4570E+04	4.74	0.104E-02	9.88	0.033	0.016	
C160	(15)	A	19.66	4.3663	6.00	4.50	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	69.81	0.071	0.059	
C161	(15)	A	18.11	1.3081	6.00	13.84	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	57.86	0.181	0.180	
C162	(15)	A	17.83	0.7315	6.00	24.37	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	55.61	0.306	0.318	
C163	(15)	A	17.68	0.4470	6.00	39.55	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	50.27	0.449	0.515	
C164	(15)	A	17.63	0.2073	6.00	57.26	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	44.64	0.579	0.747	
C165	(15)	A	17.58	0.2362	6.00	74.41	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	41.06	0.690	0.969	
C166	(7)	A	6.25	1.0000	0.00	6.25	0.7171E+04	29.04	0.405E-02	50.97	0.073	0.042	
C167	(7)	A	6.25	1.0000	0.00	6.25	0.7171E+04	29.04	0.405E-02	48.30	0.070	0.042	
C168	(7)	A	7.35	1.0000	0.00	7.35	0.7453E+04	30.79	0.413E-02	45.98	0.075	0.050	
C169	(7)	A	9.55	1.0000	0.00	9.55	0.7382E+04	30.30	0.410E-02	42.89	0.092	0.065	
C170	(7)	A	9.60	1.0000	0.00	9.60	0.7382E+04	30.30	0.410E-02	43.10	0.093	0.065	
C171	(7)	A	12.30	1.0000	0.00	12.30	0.7453E+04	29.25	0.392E-02	38.74	0.106	0.080	
C172	(7)	A	12.40	1.0000	0.00	12.40	0.7171E+04	27.07	0.277E-02	38.74	0.111	0.077	
C173	(7)	A	12.45	1.0000	0.00	12.45	0.7453E+04	29.25	0.392E-02	39.44	0.109	0.081	
C174	(7)	A	12.45	1.0000	0.00	12.45	0.7242E+04	27.07	0.374E-02	38.25	0.109	0.077	
C175	(7)	A	17.15	1.0000	0.00	17.15	0.7453E+04	26.72	0.358E-02	35.51	0.135	0.102	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (8/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C176	(7)	A	17.15	1.0000	0.00	17.15	0.7453E+04	26.72	0.358E-02	35.51	0.135	0.102	
C177	(7)	A	22.45	1.0000	0.00	22.45	0.7453E+04	27.84	0.374E-02	34.94	0.174	0.139	
C178	(7)	A	22.45	1.0000	0.00	22.45	0.7453E+04	27.84	0.374E-02	34.87	0.174	0.139	
C179	(7)	A	23.15	1.0000	0.00	23.15	0.7593E+04	29.18	0.384E-02	34.94	0.176	0.147	
C180	(7)	A	23.20	1.0000	0.00	23.20	0.7523E+04	28.97	0.385E-02	35.08	0.179	0.148	
C181	(7)	A	27.40	1.0000	0.00	27.40	0.7523E+04	29.11	0.387E-02	34.31	0.206	0.175	
C182	(7)	A	27.45	1.0000	0.00	27.45	0.7523E+04	28.97	0.385E-02	34.03	0.205	0.175	
C183	(7)	A	30.20	1.0000	0.00	30.20	0.7523E+04	27.28	0.363E-02	32.34	0.215	0.181	
C184	(7)	A	30.25	1.0000	0.00	30.25	0.7523E+04	27.21	0.362E-02	32.48	0.216	0.181	
C185	(7)	A	30.25	1.0000	0.00	30.25	0.7523E+04	27.28	0.363E-02	32.34	0.215	0.181	
C186	(7)	A	30.60	1.0000	0.00	30.60	0.7523E+04	27.77	0.369E-02	32.55	0.219	0.187	
C187	(7)	A	31.35	1.0000	0.00	31.35	0.7523E+04	29.11	0.387E-02	33.33	0.229	0.200	
C188	(7)	A	31.35	1.0000	0.00	31.35	0.7523E+04	28.97	0.385E-02	33.04	0.228	0.199	
C189	(7)	A	38.55	1.0000	0.00	38.55	0.7453E+04	29.52	0.396E-02	30.65	0.262	0.252	
C190	(7)	A	38.70	1.0000	0.00	38.70	0.7453E+04	29.67	0.398E-02	32.06	0.275	0.255	
C191	(7)	A	39.10	1.0000	0.00	39.10	0.7523E+04	28.69	0.381E-02	31.78	0.273	0.246	
C192	(7)	A	48.45	1.0000	0.00	48.45	0.7523E+04	29.67	0.394E-02	29.46	0.313	0.316	
C193	(7)	A	48.70	1.0000	0.00	48.70	0.7453E+04	29.53	0.396E-02	29.39	0.317	0.319	
C194	(4)	S	761.73	6.5500	1960.00	116.29	0.2227E+05	68.33	0.307E-02	56.65	0.489	0.590	W
C195	(22)	S	190.50	0.3810	7.98	500.00	0.2011E+05	20.18	0.100E-02	9.63	0.395	0.829	
C196	(22)	S	190.50	0.3810	8.98	500.00	0.2011E+05	20.18	0.100E-02	8.42	0.346	0.829	
C197	(22)	S	190.75	0.3861	6.99	494.08	0.2109E+05	24.68	0.117E-02	12.43	0.481	0.955	
C198	(22)	S	190.50	0.7417	8.75	256.85	0.2081E+05	24.96	0.120E-02	16.70	0.341	0.509	
C199	(22)	S	190.50	0.7442	8.72	255.97	0.2081E+05	29.11	0.140E-02	19.31	0.393	0.592	
C200	(22)	S	191.26	0.7874	8.46	242.90	0.2081E+05	55.54	0.267E-02	31.99	0.617	1.071	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (9/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C201	(22)	S	190.75	0.5131	9.31	371.78	0.2053E+05	46.47	0.226E-02	13.62	0.407	1.391	
C202	(22)	S	190.75	0.5131	9.31	371.78	0.2053E+05	46.47	0.226E-02	19.90	0.595	1.391	
C203	(12)	A	49.76	0.2489	4.00	199.90	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	14.57	0.658	1.213	
C204	(12)	A	49.68	0.2032	6.00	244.50	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	13.11	0.724	1.484	
C205	(12)	A	49.76	0.1905	4.00	261.20	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	13.06	0.771	1.585	
C206	(12)	A	49.68	0.2032	2.00	244.50	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	13.45	0.743	1.484	
C207	(12)	A	49.50	0.1041	6.00	475.37	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	4.42	0.474	2.885	
C208	(12)	A	49.53	0.0838	3.50	590.91	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	2.33	0.312	3.586	
C209	(12)	A	49.53	0.0787	2.00	629.03	0.7312E+04	26.86	0.367E-02	1.48	0.210	3.618	
C210	(23)	A	137.16	1.0160	24.00	135.00	0.7171E+04	14.34	0.200E-02	12.75	0.396	0.446	
C211	(23)	A	137.16	0.8128	24.00	168.75	0.7171E+04	14.34	0.200E-02	9.97	0.388	0.558	
C212	(23)	A	137.16	0.5080	24.00	270.00	0.7171E+04	14.34	0.200E-02	6.11	0.380	0.692	
C213	(23)	A	137.16	1.0160	24.00	135.00	0.7242E+04	31.29	0.432E-02	12.81	0.395	0.964	
C214	(23)	A	137.16	0.8128	24.00	168.75	0.7242E+04	31.29	0.432E-02	15.35	0.591	1.205	
C215	(23)	A	137.16	0.5080	24.00	270.00	0.7242E+04	31.29	0.432E-02	8.01	0.493	1.927	
C216	(23)	A	137.16	0.5080	24.00	270.00	0.7242E+04	31.29	0.432E-02	11.74	0.723	1.927	
C217	(23)	A	137.16	1.0160	24.00	135.00	0.7242E+04	31.29	0.432E-02	18.68	0.575	0.964	
C218	(23)	A	31.75	0.1651	4.00	192.31	0.7031E+04	26.72	0.380E-02	9.34	0.422	1.207	H
C219	(23)	A	31.75	0.1651	4.00	192.31	0.7031E+04	26.72	0.380E-02	13.37	0.604	1.207	H
C220	(23)	A	31.75	0.1778	4.00	178.57	0.7031E+04	26.72	0.380E-02	15.71	0.659	1.121	H
C221	(23)	A	31.75	0.1651	4.00	192.31	0.7031E+04	26.72	0.380E-02	6.63	0.300	1.207	H
C222	(23)	A	31.75	0.1524	4.00	208.33	0.7031E+04	26.72	0.380E-02	14.13	0.692	1.308	H
C223	(23)	A	31.75	0.0508	9.50	625.00	0.7031E+04	28.12	0.400E-02	1.04	0.153	4.131	
C224	(23)	A	31.75	0.0508	9.50	625.00	0.7031E+04	28.12	0.400E-02	1.63	0.240	4.131	
C225	(23)	B	60.33	0.5080	10.90	118.75	0.1076E+05	41.63	0.389E-02	17.72	0.323	0.763	

Table B.1 List of collected buckling test data for cylindrical shells under axial compression (10/10)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
C226	(23)	B	60.33	0.5080	10.90	118.75	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	20.34	0.371	0.763	
C227	(23)	B	60.33	0.2286	10.90	263.69	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	13.91	0.564	1.696	
C228	(23)	B	60.33	0.2286	10.90	263.89	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	10.43	0.423	1.696	
C229	(23)	B	60.33	0.1270	10.90	475.00	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	4.30	0.314	3.052	
C230	(23)	B	60.33	0.1270	10.90	475.00	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	7.92	0.578	3.052	
C231	(23)	B	60.33	0.1016	10.90	593.75	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	3.22	0.294	3.815	
C232	(23)	B	60.33	0.1016	10.90	593.75	0.1076E+05	41.83	0.389E-02	5.16	0.471	3.815	

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending (1/6)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
B 1	(16)	C	54.10	6.0198	24.00	8.99	0.0000E+00	35.86	0.000E+00	63.70	0.000	0.000	
B 2	(16)	C	54.10	6.0198	36.00	8.99	0.0000E+00	35.86	0.000E+00	59.34	0.000	0.000	
B 3	(16)	C	52.83	8.5598	36.00	6.17	0.0000E+00	29.53	0.000E+00	59.34	0.000	0.000	
B 4	(16)	C	50.55	13.4874	36.00	3.75	0.0000E+00	26.72	0.000E+00	76.14	0.000	0.000	
B 5	(16)	C	55.63	3.0480	36.00	18.25	0.0000E+00	43.59	0.000E+00	67.21	0.000	0.000	
B 6	(16)	C	55.63	3.0480	24.00	18.25	0.0000E+00	43.59	0.000E+00	71.15	0.000	0.000	
B 7	(16)	C	55.63	3.0480	12.00	18.25	0.0000E+00	43.59	0.000E+00	75.16	0.000	0.000	
B 8	(16)	U	52.83	8.5598	36.00	6.17	0.0000E+00	28.12	0.000E+00	60.96	0.000	0.000	
B 9	(16)	U	40.64	3.2004	36.00	12.70	0.0000E+00	28.12	0.000E+00	41.20	0.000	0.000	
B 10	(16)	U	53.34	4.2418	36.00	12.57	0.0000E+00	28.12	0.000E+00	41.48	0.000	0.000	
B 11	(16)	U	80.52	6.6802	36.00	12.05	0.0000E+00	33.75	0.000E+00	54.42	0.000	0.000	
B 12	(16)	U	53.34	4.2418	36.00	12.57	0.0000E+00	28.12	0.000E+00	41.48	0.000	0.000	
B 13	(17)	S	55.17	3.9624	144.00	13.92	0.2074E+05	31.50	0.152E-02	43.31	0.068	0.035	
B 14	(17)	S	82.17	3.9624	144.00	20.74	0.2074E+05	31.08	0.150E-02	41.55	0.069	0.051	
B 15	(17)	S	81.76	4.7752	144.00	17.12	0.2074E+05	37.61	0.181E-02	50.83	0.069	0.051	
B 16	(17)	S	250.82	6.3500	204.00	39.50	0.2074E+05	36.25	0.184E-02	29.60	0.093	0.120	
B 17	(17)	S	133.76	5.5626	240.00	24.05	0.2074E+05	31.22	0.151E-02	42.18	0.081	0.060	
B 18	(17)	S	158.75	6.3500	264.00	25.00	0.2074E+05	38.32	0.185E-02	51.18	0.102	0.076	
B 19	(17)	S	174.62	6.3500	264.00	27.50	0.2074E+05	30.37	0.146E-02	39.44	0.086	0.067	
B 20	(17)	S	200.02	6.3500	264.00	31.50	0.2074E+05	31.50	0.152E-02	38.60	0.097	0.079	
B 21	(17)	S	250.82	6.3500	204.00	39.50	0.2074E+05	36.77	0.177E-02	41.69	0.131	0.116	
B 22	(18)	S	133.60	5.9182	0.00	22.58	0.2109E+05	40.07	0.190E-02	52.94	0.094	0.071	
B 23	(18)	S	132.08	8.8900	0.00	14.86	0.2067E+05	24.31	0.166E-02	51.46	0.061	0.041	
B 24	(18)	S	159.26	6.6040	0.00	24.12	0.2109E+05	33.11	0.157E-02	37.05	0.070	0.063	
B 25	(18)	S	199.90	6.6040	0.00	30.27	0.2109E+05	35.22	0.167E-02	46.82	0.111	0.084	

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending (2/6)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
B 26	(18)	S	201.17	6.6040	0.00	30.46	0.2039E+05	33.40	0.164E-02	40.85	0.101	0.082	
B 27	(18)	S	250.70	6.4770	0.00	38.71	0.2039E+05	38.88	0.191E-02	47.11	0.148	0.122	
B 28	(19)	S	133.07	7.7978	144.00	17.07	0.0000E+00	31.01	0.000E+00	39.09	0.000	0.000	W
B 29	(19)	S	134.09	4.9276	144.00	27.21	0.0000E+00	42.96	0.000E+00	52.38	0.000	0.000	W
B 30	(19)	S	134.77	3.5306	144.00	38.17	0.0000E+00	29.39	0.000E+00	33.18	0.000	0.000	W
B 31	(19)	S	135.25	2.4638	144.00	54.90	0.0000E+00	31.57	0.000E+00	35.01	0.000	0.000	W
B 32	(7)	M	7.25	1.0000	0.00	7.25	0.2074E+05	63.14	0.304E-02	98.08	0.057	0.036	
B 33	(7)	M	7.30	1.0000	0.00	7.30	0.2074E+05	63.14	0.304E-02	98.43	0.057	0.037	
B 34	(7)	M	11.50	1.0000	0.00	11.50	0.2109E+05	67.92	0.322E-02	91.33	0.082	0.061	
B 35	(7)	M	11.75	1.0000	0.00	11.75	0.2109E+05	64.40	0.305E-02	90.13	0.083	0.059	
B 36	(7)	M	16.65	1.0000	0.00	16.65	0.2123E+05	66.27	0.313E-02	90.63	0.117	0.086	
B 37	(7)	M	16.65	1.0000	0.00	16.65	0.2125E+05	66.37	0.313E-02	89.85	0.116	0.086	
B 38	(7)	M	20.90	1.0000	0.00	20.90	0.2123E+05	64.75	0.305E-02	84.44	0.137	0.105	
B 39	(7)	M	20.90	1.0000	0.00	20.90	0.2123E+05	64.75	0.305E-02	81.56	0.132	0.105	
B 40	(7)	M	21.95	1.0000	0.00	21.95	0.2074E+05	65.95	0.318E-02	85.35	0.149	0.115	
B 41	(7)	M	21.95	1.0000	0.00	21.95	0.2074E+05	65.95	0.318E-02	82.19	0.144	0.115	
B 42	(7)	M	26.05	1.0000	0.00	26.05	0.2095E+05	63.63	0.304E-02	77.34	0.159	0.131	
B 43	(7)	M	26.70	1.0000	0.00	26.70	0.2130E+05	64.89	0.305E-02	81.63	0.169	0.134	
B 44	(7)	M	30.45	1.0000	0.00	30.45	0.2123E+05	66.86	0.315E-02	79.66	0.189	0.152	
B 45	(7)	M	30.55	1.0000	0.00	30.55	0.2130E+05	67.99	0.319E-02	82.10	0.197	0.161	
B 46	(7)	M	38.70	1.0000	0.00	38.70	0.2109E+05	47.04	0.223E-02	62.43	0.189	0.143	
B 47	(7)	M	39.00	1.0000	0.00	39.00	0.2109E+05	47.04	0.223E-02	62.22	0.190	0.144	
B 48	(7)	M	43.80	1.0000	0.00	43.80	0.2151E+05	54.07	0.251E-02	69.60	0.234	0.182	
B 49	(7)	M	44.40	1.0000	0.00	44.40	0.2144E+05	54.07	0.252E-02	65.95	0.226	0.185	
B 50	(7)	M	49.15	1.0000	0.00	49.15	0.2123E+05	51.96	0.245E-02	64.54	0.247	0.199	

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending (3/6)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
B 51	(7)	H	49.50	1.0000	0.00	49.50	0.2123E+05	51.96	0.245E-02	62.57	0.241	0.200	
B 52	(20)	C	16.48	1.2116	0.00	13.61	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	78.39	0.000	0.000	
B 53	(20)	C	16.46	1.1430	0.00	14.40	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	78.46	0.000	0.000	
B 54	(20)	C	16.28	0.8255	0.00	19.72	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	75.58	0.000	0.000	
B 55	(20)	C	16.28	0.7849	0.00	20.74	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	75.86	0.000	0.000	
B 56	(20)	C	16.18	0.6045	0.00	26.76	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	75.51	0.000	0.000	
B 57	(20)	C	16.21	0.6299	0.00	25.73	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	74.67	0.000	0.000	
B 58	(20)	C	16.15	0.5563	0.00	29.04	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	66.79	0.000	0.000	
B 59	(20)	C	16.10	0.4470	0.00	36.02	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	70.52	0.000	0.000	
B 60	(20)	C	16.10	0.4343	0.00	37.08	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	72.70	0.000	0.000	
B 61	(20)	C	16.10	0.4342	0.00	37.08	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	66.09	0.000	0.000	
B 62	(20)	C	16.05	0.3429	0.00	46.81	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	54.63	0.000	0.000	
B 63	(20)	C	16.05	0.3251	0.00	49.38	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	66.44	0.000	0.000	
B 64	(20)	C	16.03	0.3175	0.00	50.48	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	54.49	0.000	0.000	
B 65	(20)	C	16.03	0.2794	0.00	57.36	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	51.61	0.000	0.000	
B 66	(20)	C	16.03	0.2870	0.00	55.84	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	55.26	0.000	0.000	
B 67	(20)	C	16.03	0.3124	0.00	51.30	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	55.40	0.000	0.000	
B 68	(20)	C	16.43	1.0871	0.00	15.12	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	76.14	0.000	0.000	
B 69	(20)	C	16.48	0.7544	0.00	21.85	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	65.95	0.000	0.000	
B 70	(20)	C	16.10	0.4267	0.00	37.74	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	67.28	0.000	0.000	
B 71	(20)	C	16.05	0.3200	0.00	50.16	0.0000E+00	59.76	0.000E+00	67.49	0.000	0.000	
B 72	(20)	C	250.82	6.3500	0.00	39.50	0.0000E+00	43.66	0.000E+00	50.62	0.000	0.000	
B 73	(20)	C	250.44	7.1374	0.00	35.09	0.0000E+00	37.54	0.000E+00	47.25	0.000	0.000	
B 74	(20)	C	250.19	7.9248	0.00	31.57	0.0000E+00	36.77	0.000E+00	54.91	0.000	0.000	
B 75	(20)	C	249.17	9.5250	0.00	26.16	0.0000E+00	40.64	0.000E+00	53.36	0.000	0.000	

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending (4/6)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
B 76	(20)	C	249.17	9.5250	0.00	26.16	0.0000E+00	47.67	0.000E+00	70.80	0.000	0.000	
B 77	(20)	C	249.43	9.1440	0.00	27.28	0.0000E+00	49.92	0.000E+00	71.50	0.000	0.000	
B 78	(20)	C	248.67	10.5664	0.00	23.52	0.0000E+00	34.21	0.000E+00	52.80	0.000	0.000	
B 79	(20)	C	247.65	12.7000	0.00	19.50	0.0000E+00	40.50	0.000E+00	66.30	0.000	0.000	
B 80	(20)	C	247.65	12.7000	0.00	19.50	0.0000E+00	36.42	0.000E+00	58.14	0.000	0.000	
B 81	(8)	S	17.00	1.0000	0.00	17.00	0.2109E+05	36.56	0.173E-02	48.44	0.065	0.049	
B 82	(8)	S	27.50	1.0000	0.00	27.50	0.2109E+05	36.56	0.173E-02	45.77	0.099	0.079	
B 83	(8)	S	36.10	1.0000	0.00	36.10	0.2109E+05	36.56	0.173E-02	49.36	0.140	0.103	
B 84	(8)	S	46.50	1.0000	0.00	46.50	0.2109E+05	36.56	0.173E-02	44.01	0.160	0.123	
B 85	(8)	S	50.50	1.0000	0.00	50.50	0.2109E+05	36.56	0.173E-02	41.69	0.165	0.145	
B 86	(8)	S	29.70	1.0000	0.00	29.70	0.2109E+05	27.42	0.130E-02	42.96	0.100	0.064	
B 87	(8)	S	37.30	1.0000	0.00	37.30	0.2109E+05	27.42	0.130E-02	38.74	0.113	0.080	
B 88	(8)	S	49.60	1.0000	0.00	49.60	0.2109E+05	27.42	0.130E-02	34.87	0.135	0.107	
B 89	(8)	S	56.40	1.0000	0.00	56.40	0.2109E+05	27.42	0.130E-02	32.90	0.145	0.121	
B 90	(8)	S	70.10	1.0000	0.00	70.10	0.2109E+05	27.42	0.130E-02	25.52	0.140	0.151	
B 91	(21)	A	54.10	6.0198	54.00	8.99	0.7101E+04	32.06	0.451E-02	43.59	0.091	0.067	
B 92	(21)	A	54.10	6.0198	54.00	8.99	0.7101E+04	32.06	0.451E-02	44.36	0.093	0.067	
B 93	(21)	A	54.10	6.0198	54.00	8.99	0.7101E+04	32.06	0.451E-02	44.50	0.093	0.067	
B 94	(21)	A	54.10	6.0198	54.00	8.99	0.7101E+04	37.97	0.535E-02	53.86	0.113	0.079	
B 95	(21)	A	54.10	6.0198	54.00	8.99	0.7101E+04	37.97	0.535E-02	52.45	0.110	0.079	
B 96	(21)	A	54.10	6.0198	54.00	8.99	0.7101E+04	37.97	0.535E-02	55.54	0.116	0.079	
B 97	(21)	A	12.32	0.7620	24.00	16.17	0.0000E+00	32.20	0.000E+00	40.50	0.000	0.000	
B 98	(21)	A	12.32	0.7620	24.00	16.17	0.0000E+00	32.20	0.000E+00	40.00	0.000	0.000	
B 99	(21)	A	12.29	0.8128	24.00	15.12	0.0000E+00	32.20	0.000E+00	42.54	0.000	0.000	
B100	(21)	A	12.29	0.8128	24.00	15.13	0.0000E+00	32.20	0.000E+00	42.54	0.000	0.000	

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending (5/6)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
B101	(21)	A	12.24	0.9144	24.00	13.39	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	41.69	0.000	0.000	
B102	(21)	A	12.24	0.9144	24.00	13.39	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	41.69	0.000	0.000	
B103	(21)	A	12.17	1.0922	24.00	11.14	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	43.59	0.000	0.000	
B104	(21)	A	12.17	1.0922	24.00	11.14	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	42.54	0.000	0.000	
B105	(21)	A	12.09	1.2446	24.00	9.71	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	42.68	0.000	0.000	
B106	(21)	A	12.09	1.2446	24.00	9.71	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	42.68	0.000	0.000	
B107	(21)	A	11.96	1.4732	24.00	8.12	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	43.45	0.000	0.000	
B108	(21)	A	11.96	1.4732	24.00	8.12	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	43.73	0.000	0.000	
B109	(21)	A	11.89	1.6256	24.00	7.31	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	43.94	0.000	0.000	
B110	(21)	A	11.89	1.6256	24.00	7.31	0.0000E+00	32.20	0.0000E+00	44.15	0.000	0.000	
B111	(7)	A	7.35	1.0000	0.00	7.35	0.7453E+04	30.79*	0.413E-02	51.39	0.084	0.050	
B112	(7)	A	9.60	1.0000	0.00	9.60	0.7382E+04	30.20*	0.410E-02	49.43	0.106	0.065	
B113	(7)	A	9.60	1.0000	0.00	9.60	0.7382E+04	30.30*	0.410E-02	48.51	0.104	0.065	
B114	(7)	A	12.45	1.0000	0.00	12.45	0.7453E+04	29.25*	0.392E-02	45.70	0.126	0.081	
B115	(7)	A	12.45	1.0000	0.00	12.45	0.7242E+04	27.07*	0.374E-02	44.43	0.126	0.077	
B116	(7)	A	17.15	1.0000	0.00	17.15	0.7453E+04	26.72*	0.358E-02	41.55	0.158	0.102	
B117	(7)	A	17.15	1.0000	0.00	17.15	0.7453E+04	26.72*	0.358E-02	42.11	0.160	0.102	
B118	(7)	A	22.45	1.0000	0.00	22.45	0.7453E+04	27.84*	0.374E-02	41.76	0.208	0.139	
B119	(7)	A	23.20	1.0000	0.00	23.20	0.7593E+04	29.18*	0.384E-02	42.82	0.216	0.147	
B120	(7)	A	27.40	1.0000	0.00	27.40	0.7523E+04	28.97*	0.385E-02	40.22	0.242	0.174	
B121	(7)	A	30.30	1.0000	0.00	30.30	0.7523E+04	27.14*	0.361E-02	38.25	0.255	0.181	
B122	(7)	A	31.35	1.0000	0.00	31.35	0.7523E+04	28.97*	0.385E-02	39.44	0.272	0.199	
B123	(7)	A	31.35	1.0000	0.00	31.35	0.7523E+04	28.97*	0.385E-02	39.09	0.269	0.199	
B124	(7)	A	31.45	1.0000	0.00	31.45	0.7523E+04	28.97*	0.385E-02	38.88	0.269	0.200	
B125	(7)	A	38.70	1.0000	0.00	38.70	0.7382E+04	29.53*	0.400E-02	37.19	0.322	0.256	

Table B.2 List of collected buckling test data for cylindrical shells in pure bending (6/6)

NO	REF	MAT	R	T	L	R/T	E	SY	SY/E	SCR	SCR/SCRE	SY/SCRE	FAB
B126	(7)	A	29.30	1.0000	0.00	39.30	0.7593E+04	28.69*	0.378E-02	36.63	0.313	0.245	
B127	(7)	A	48.70	1.0000	0.00	48.70	0.7453E+04	29.53*	0.396E-02	32.48	0.351	0.319	
B128	(7)	A	48.70	1.0000	0.00	48.70	0.7453E+04	29.53*	0.396E-02	32.90	0.355	0.319	
B129	(15)	A	18.44	1.9355	10.00	9.53	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	75.30	0.162	0.124	
B130	(15)	A	18.24	1.5469	10.00	11.79	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	72.56	0.193	0.154	
B131	(15)	A	18.06	1.2446	10.00	14.51	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	67.78	0.222	0.189	
B132	(15)	A	17.91	0.9296	10.00	19.26	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	63.91	0.278	0.251	
B133	(15)	A	17.83	0.7544	10.00	23.64	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	59.41	0.317	0.308	
B134	(15)	A	17.75	0.6350	10.00	27.96	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	54.42	0.344	0.364	
B135	(15)	A	17.70	0.4496	10.00	39.38	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	47.81	0.425	0.513	
B136	(15)	A	19.66	4.3688	10.00	4.50	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	86.97	0.088	0.059	
B137	(15)	A	18.82	2.6797	10.00	7.02	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	79.45	0.126	0.092	
B138	(15)	A	14.30	3.1750	6.00	4.50	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	93.51	0.095	0.059	
B139	(15)	A	13.67	1.9558	1.00	6.99	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	81.35	0.128	0.091	
B140	(15)	A	13.67	1.4224	8.00	9.61	0.7312E+04	57.65	0.788E-02	75.02	0.163	0.125	
B141	(21)	A	5.00	1.0000	0.00	5.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	43.52	0.051	0.029	
B142	(21)	A	5.00	1.0000	0.00	5.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	42.75	0.050	0.029	
B143	(21)	A	10.00	1.0000	0.00	10.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	40.78	0.095	0.057	
B144	(21)	A	10.00	1.0000	0.00	10.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	38.04	0.089	0.057	
B145	(21)	A	20.00	1.0000	0.00	20.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	38.60	0.180	0.115	
B146	(21)	A	20.00	1.0000	0.00	20.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	36.77	0.171	0.115	
B147	(21)	A	30.00	1.0000	0.00	30.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	34.24	0.239	0.172	
B148	(21)	A	30.00	1.0000	0.00	30.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	31.71	0.221	0.172	
B149	(21)	A	40.00	1.0000	0.00	40.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	30.09	0.280	0.229	
B150	(21)	A	41.00	1.0000	0.00	41.00	0.7101E+04	24.61	0.347E-02	28.12	0.268	0.235	

【 円筒殻軸圧縮および曲げ座屈データ出典 】 (1 / 3)

- 1) Wilson, W.M. and Newmark, N.M. : The Strength of the Thin Cylindrical Shells as Columns, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin Ser.No. 255, 1933.
- 2) Wilson, W.M. : Tests of Steel Columns, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin Ser.No. 292, 1937.
- 3) Marzullo, M.A. and Ostapenko, A. : Tests of High-Strength Short Tubular Columns, Proc. Annu. Offshore Technol. Conf., No.1, 1978, pp.327.
- 4) Ostapenko, A. and Grimm, D.F. : Local Buckling of Cylindrical Columns Mode of A-36 Steel, Lehigh University, Fritz Engineering Laboratory Report No. 450.7, 1980.
- 5) Chen, W.F. and Ross, D.A. : Tests of Fabricated Tubular Columns, Proc. ASCE, J. Struct. Div., Vol.103, 1977, pp.619.
- 6) Robertson, A. : The Strength of Tubular Struts, Proc. Royal Soc. of London, Series A, Vol.121, 1928, pp.558.
- 7) Osgood, W.R. : The Critical Strength and the Bending Strength of Round Aircraft Tubing, NACA Report No.632, 1938.
- 8) Shilling, C.G. : Buckling Strength of Circular Tubes, Proc. ASCE, J. Struct. Div., No.91, 1965, p.325.
- 9) Sobel, L.H. and Newman, S.Z. : Plastic Buckling of Cylindrical Shells under Axial Compression, J. Pressure Vessel Technology, Vol.102, 1980, p.40.
- 10) Batterman, S.C. : Plastic Buckling of Axially Compressed Cylindrical Shells, AIAA J., Vol.3, 1965, p.316.

【 円筒殻軸圧縮および曲げ座屈データ出典 】 (2 / 3)

- 11) Papirno, R. : Experimental Plastic Buckling of Aluminum Cylinders at 500 ° F, AIAA J., Vol.5, 1967, p.2266.
- 12) Clark, J.W. and Holt, M. : Discussion of " Effect of Imperfections on Buckling of Thin Cylinders and Columns under Axial Compression", J. Applied Mechanics, Vol.17, 1950, p.340.
- 13) Samuelson, A. : An Experimental Investigation of Creep Buckling of Circular Cylindrical Shells, FFA Report No.98, 1964.
- 14) Lee, L.H. : Inelastic Buckling of Initially Imperfect Cylindrical Shells subjected to Axial Compression, J. Aero. Sci., Vol.29, 1962, p.87.
- 15) Moore, R.L. and Clark, J.W. : Torsion, Compression, and Bending Tests of Tubular Sections Macined from 75S-T6 Rolled Round Rod, NACA RM 52125, 1952.
- 16) Gerber, T.L. : Plastic Deformation of Piping due to Pin-whip Loading, ASME Paper No.74-NE-1, 1974.
- 17) Korol, R.M. : Critical Buckling Strains of Round Tubes in Flexure, Int. J. Mech. Sci. Vol.21, 1979, p719.
- 18) Wilhoit, J.C.Jr., Merwin, J.E. and Jirsa, J.O. : Critical Plastic Buckling Parameters for Pipes in Pure Bending, ASME Paper No.72-Pet-29, 1972.
- 19) Sherman, D.R. : Tests of Circular Steel Tubes in Bending, Proc. ASCE, J. Struct. Div., Vol.102, 1976, p.2181.
- 20) Rodabaugh, E.C. and Moore, S.E. : Evaluation of the Plastic Characteristics of Piping Products in relation to ASME Code Criteria, ORNL/Sub-2913/8, 1978.

【 円筒殻軸圧縮および曲げ座屈データ出典 】 (3 / 3)

- 21) Clark, J.W. and Rolf, R.L. : Design of Aluminum Tubular Members, Proc. ASCE, J. Struct. Div., Vol.90, 1964, p.259.
- 22) Miller, C.D. : Buckling of Axially Compressed Cylinders, Proc. ASCE, J. Struct. Div., Vol.103, 1977, p.695.
- 23) Sherbourne, A.N. and Korol, R.M. : Buckling of Cylindrical Shells under Axial Compression, J. Struct. Div., Vol.93, 1967, p.29.