

自由突出テーパプレート の 圧縮強度

ULTIMATE STRENGTH OF OUTSTANDING TAPERED PLATES IN COMPRESSION

村上茂之*, 西村宣男**, 堀田毅***

Shigeyuki MURAKAMI, Nobuo NISHIMURA and Tsuyoshi HOTTA

* 工博 大阪大学助手 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

** 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

*** 大日本コンサルタント(株) 構造部 (〒550 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

Tapered plate is continuously varying its thickness in longitudinal direction and gives variable cross-section of girder without butt-welding process. So using of tapered flange plate is seemed one of effective means on the rational design of steel bridges suggested in Design Guideline of the Steel Highway Bridges.

Tapered flange plate can be modeled as the outstanding tapered plate of that the stress ratio between both loaded edges is defined constant. To keep this stress condition, the additional shear deformations and stresses with some relations to the thickness ratio, the stress ratio and aspect ratio are considered. In this report, the analytical algorithm for outstanding tapered plate in compression is suggested and the results of the ultimate strength and effects of above ratios to the strength are discussed.

Key words: tapered outstanding plate, stress ratio, thickness ratio, equivalent thickness

1. まえがき

近年、鋼橋の設計、製作、施工工程の合理化・省力化が望まれており、建設省により鋼道路橋設計ガイドライン(案)¹⁾が示された。このような流れの中で、特に設計の合理化と施工工程の省力化を実現する一手法として、圧延テーパプレートをプレートガーダーやボックスガーダーのフランジに採用し板継ぎ溶接の工程を省略する方法が考えられている。このテーパプレートは欧州で初めて開発された鋼材であり、圧延方向に板厚を変化させることができるため、鋼桁のフランジプレートとして使用すれば曲げモーメントの増大に対応してフランジ厚を連続的に変化させることができる。既に欧州では、Somme橋など40橋程度の圧延テーパプレートの適用例が報告されている²⁾。我が国でも、造船用鋼板としての使用実績のほか、道路橋のフランジや斜張橋の主塔など軸方向に圧縮力が変化する部材に対する圧延テーパプレートの適用例が報告されている³⁾。

実橋梁にテーパプレートを適用するにあたって、テーパプレートの耐荷力を適切に評価する方法あるいは設計法が確立されておらず、フランジの局部座屈に関して最小板厚を用いた安全側の評価が行われている。橋梁設計の合理化のためにテーパプレートを用いることを考えれば、テーパプレートの適切な耐荷力評価法の確立が望まれる。

鋼桁のフランジとして使用されるテーパプレートでは、軸方向の圧縮応力が一定となる場合が最も効率的な使用方法であるといえる。このような応力状態のテーパプレートは、軸方向に板厚が変化しているために、軸方向応力とせん断応力が同時に作用することによって力の釣り合いが満足されていると考えることができる。これまで行われた変厚板に関する研究^{4,5)}は、一定軸力状態での座屈解析であり、テーパフランジの座屈強度を与えるものではない。また、テーパフランジと同様の応力状態の鋼板の座屈特性に関する研究として、不

等圧縮状態の等厚鋼板、つまり圧縮とせん断を同時に受ける等厚鋼板の座屈解析⁶⁾があるが、等厚板を対象としていることからテーパフランジの耐荷力の評価に関するものではない。テーパフランジを用いた場合の強度評価法の確立のためにも、一定応力比状態のテーパフランジの耐荷力特性を明らかにする必要がある。

2. 自由突出テーパプレート の 有限要素解析手法

2. 1 解析アルゴリズムの概要

圧縮フランジとして用いられる板要素は一定の応力比の状態にあると考えられる。このような応力状態にある変厚板要素では、異なる板厚を有する断面での軸方向力が一定ではなく、軸方向応力と付加的なせん断応力によって、断面内および板要素全体での力の釣り合い条件を満足させる必要がある。一定応力比状態のテーパプレートの耐荷力解析においては、この付加せん断応力の評価法が重要となってくる。

通常、耐荷力解析においては変位制御の手法が多用されている。ところが一定応力比状態のテーパプレートには、先に述べたように、軸応力の大きさによって変化する付加せん断応力が存在している。つまり強制変位を与えると同時に、軸応力の作用状態に応じた付加せん断応力を作用させる必要がある。このため、これまで用いられてきた変位制御の手法を単独で用いるだけでは、このような応力状態のテーパプレートの耐荷力解析を行うことは困難である。そこで、通常の変位制御の計算過程に、荷重制御によって付加せん断応力とこのせん断応力に対応する強制せん断変形を考慮する解析手法を開発した。この解析手法のアルゴリズムを、図-1に示す。このアルゴリズムを概説すると、以下のようになる。

まず、鋼板載荷辺での作用応力を計算する。次に、計算された作用応力とモデルの板厚比、設定応力比から板要素載荷辺および非載荷辺に沿った付加せん断流分布

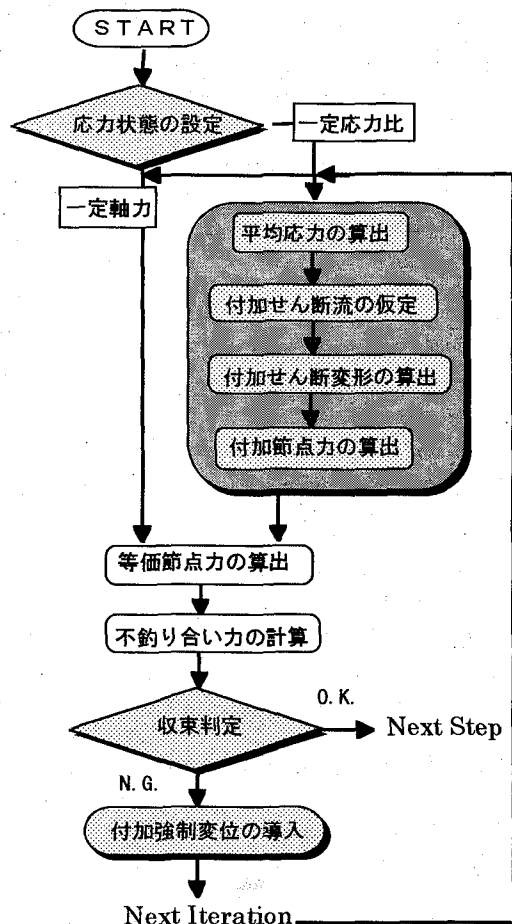
を仮定する。このせん断流から板要素のせん断応力および付加せん断変形を計算し、載荷辺の付加強制変位を計算する。ここで、各節点における不釣り合い力を計算し、これが許容誤差範囲内に収束するまで繰り返し計算を行う。

通常の変位制御の手法では、要素の応力から計算される等価節点力を不釣り合い力として載荷することによって繰返し計算が実行されるが、一定応力比状態のテーパプレートに耐荷力解析の場合は、付加せん断流の影響を考慮するために、付加せん断流から計算される節点力（付加等価節点力）を載荷する必要がある。本解析法では、等価節点力から付加等価節点力を除去した節点力を不釣り合い力として処理することによって、この付加せん断流の影響を考慮している。

以上のように、本解析法は、通常の変位制御法と荷重制御法を、それぞれ独立に展開させるのではなく、それぞれの制御法で得られる変位、応力、等価節点力を相互にフィードバックさせながら繰り返し計算を行う解析法である。

2.2 有限要素モデル

板厚が連続的に変化するテーパプレートの形状的特性を考慮するために、要素として8節点のアイソパラメトリックシェル要素を用いた。解析には、本研究室で開発した弾塑性有限変位プログラム（NASHEL）⁷⁾に、2.1で述べた計算アルゴリズムを付加したプログラム（NASTAP：NASHEL for Tapered Plate）を用いた。



図一1 解析アルゴリズム

各節点は5自由度であり、変位としては面内の回転変位が、ひずみおよび応力としては板厚方向の成分がそれぞれ消去されている。

2.3 自由突出テーパプレートの解析手法

(1) 付加せん断流の算出

図-2に示す板厚が軸方向に連続的に変化する自由突出テーパプレートについて考える。いま、このテーパプレートが一定応力比状態にあると仮定する。このとき、板の軸方向に生じる軸力は等しくなく、全体での釣り合いが保たれない。そこで、軸応力比および板厚比に応じたせん断流およびせん断変形を付加し、全体での力の釣り合いを保たせる必要がある。

力の釣り合いより、載荷辺および非載荷辺におけるせん断流は図-3のようになる。ここで、両載荷辺における応力を σ_0 、 σ_1 、板厚を t_0 、 t_1 とし、

$$\text{応力比: } r = \sigma_0 / \sigma_1 \quad (1)$$

$$\text{板厚比: } c = t_0 / t_1 \quad (2)$$

とすると、非載荷辺におけるせん断流 q_{add} は次式で計算される。

$$q_{add} = \frac{b}{a} t_0 \sigma_0 \left(\frac{1-rc}{rc} \right) \quad (3)$$

次に、載荷辺に沿うせん断流を求める。

今、非載荷支持辺から y の距離にある点での載荷辺に沿ったせん断流 q_x については、図-4に示す微小区間での釣り合い条件より次式で計算される。

$$\begin{aligned} q_x &= \int_y^b \{ (\sigma_0 + d\sigma_x)(t_0 + dt) - \sigma_0 t_0 \} d\eta \\ &= \frac{dt}{dx} \int_y^b \sigma_0 d\eta + t_0 \int_y^b \frac{d\sigma_x}{dx} d\eta \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 付加せん断変形および付加強制変位の算出

(1)で計算された付加せん断流は、載荷辺の板厚を

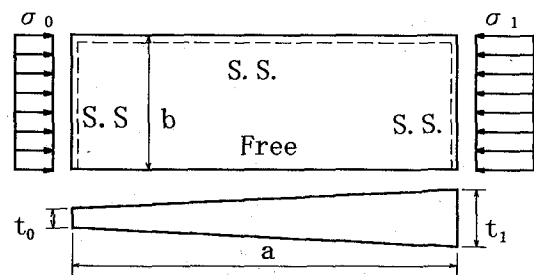


図-2 自由突出テーパプレート概念図

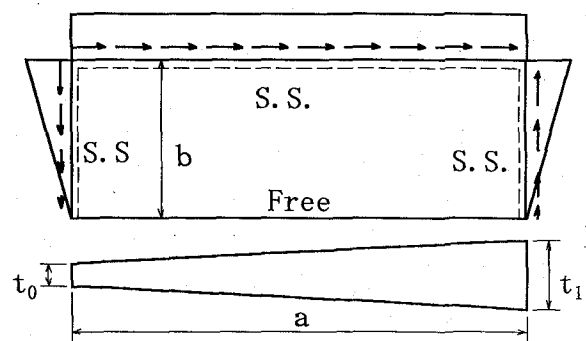


図-3 付加せん断流概念図

用いて付加せん断応力 ($\tau_{add.}$) に変換でき、さらにこれより付加せん断ひずみ ($\gamma_{add.}$) が計算される。

$$\tau_{add.} = \frac{q_{add.}}{t_{cal.}} \quad (5)$$

$$\gamma_{add.} = \frac{1+\nu}{E} \tau_{add.} \quad (6)$$

ここに、 $t_{cal.}$ はせん断応力を求める載荷辺での板厚。
ここで、載荷辺において $\gamma_{add.}$ なる付加せん断ひずみを生じさせるために、載荷辺に付加的な強制変位を与える。このとき、非載荷支持辺から y 離れた点における軸方向の付加強制変位 ($\Delta u_{add.}$) は次式で与えられる。

$$\Delta u_{add.} = \gamma_{add.} \cdot y \quad (7)$$

これを図示すると、図-5 のようになる。

(3) 収束判定

一定応力状態にあるテーパプレートに耐荷力を本手法を用いて解析する場合、等価節点力ベクトル F_i^n から付加せん断変形および付加せん断応力から計算される付加節点力 P_i^n を除去して不釣り合い力 U_i^n を求める必要がある。これは、付加節点力が、軸方向の応力比を一定に保つために導入される付加外力であるためである。従って、強制変位の手法により繰り返し計算収束判定を行う場合には次式によって不釣り合い力ベクトルを計算することになる。また、式中の F_0 は、残留応力が存在した場合に、初期状態での釣り合いを満足するための初期仮想外力である。

不釣り合い力は、

$$U_i^n = F_i^n - P_i^n - F_0 \quad (8)$$

で計算され、収束の判定は不釣り合い力ベクトルのユークリッドノルムを用いて、次式により行う。

$$\left\| (U_i^n)^2 \right\| \ll \text{err.} \quad (9)$$

ここに、err. は許容誤差範囲。

(4) 断面の塑性化の影響と精度の検証

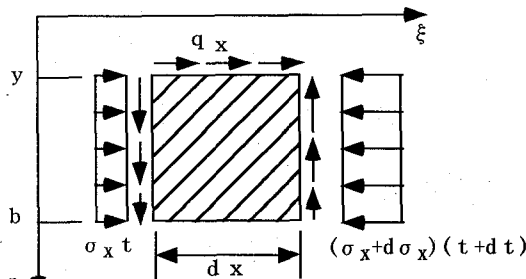


図-4 微小領域における釣り合い条件

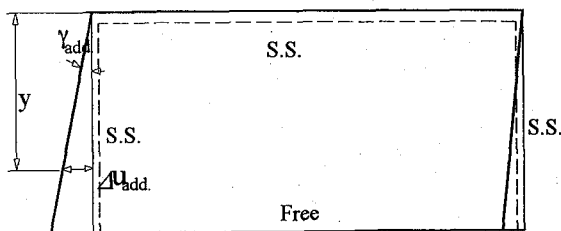


図-5 付加強制変位の概念図

式(3)～式(7)で示されたせん断流およびせん断変形は、鋼板が弾性である場合を想定して定式化されている。自由突出テーパプレートの圧縮強度を考える場合には、載荷辺に塑性化が生じた場合について検討する必要がある。特に、載荷辺に沿った付加せん断流は、載荷辺の一部が塑性化した場合、式(4)で計算することはできないといえる。仮に、付加せん断流が計算されたとすると、付加せん断ひずみは、式(6)ではなく、次式に従って計算することができる。

$$\gamma_{add.} = \sum_{i=1}^5 D_{3,i}^{-1} \sigma_i \quad (10)$$

ここで、 $D_{3,i}^{-1}$ は弾性の応力—ひずみマトリックスのうち面内のせん断ひずみに関する行であり、 σ は、応力ベクトルである。塑性化が生じていない場合には、弾性の応力—ひずみマトリックスを用いることによって、式(8)は式(6)に一致する。

また、付加強制変位に関しても、式(7)で示すように非載荷支持辺からの距離の一次関数として計算することはできなくなる。ところが、付加強制変位は付加せん断流および付加せん断変形を考慮するために導入された仮想的な変位であることから、載荷辺が直線を保持した状態で考慮する必要がある。本研究では、断面の塑性化が生じた場合の不具合を解消するために、付加せん断ひずみおよび付加強制変位を計算する際に、載荷辺各部での応力—ひずみマトリックスの平均値を用いることとした。

図-6に、解析手法の精度の検証として、板幅 $b = 200\text{mm}$ 、板長 $a = 1000\text{mm}$ 、最小板厚 $t_0 = 10\text{mm}$ 、最大板厚 $t_1 = 13\text{mm}$ 、設定応力比 $r = 1.0$ とした場合の、両載荷辺の応力比の変化を示す。載荷辺が全て弾性の場合には、応力比はほぼ1.0であり、載荷辺が弾性である場合の本解析法の妥当性が確認できる。一方、載荷辺に塑性化が生じた以降は、応力比に乱れが生じ1.0とはならないが、設定値との誤差は2.0%以内であった。塑性化が生じた場合には、軸方向力の増加に対してはせん断応力の増加によって抵抗すると考えられる。塑性化が生じた以降、応力比が設定値に等しくならない理由として、上記のような点が考えられる。

3. テーパープレートの解析モデル

3.1 解析モデルの諸元

解析を行った自由突出テーパプレートの構造諸元

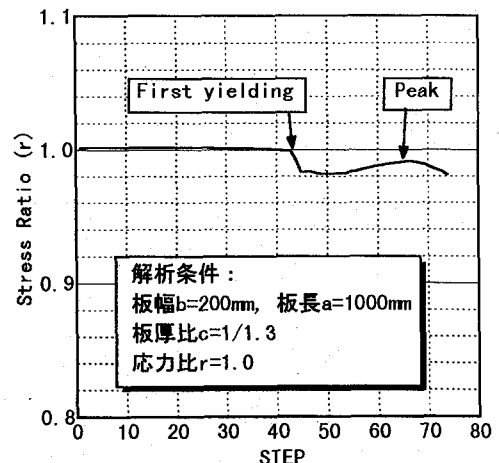


図-6 応力比に関する精度の検証

を表－1 および図－7 に示す。

テーパープレートの最小板厚を全て10 mmとし、最大幅厚比パラメータ(最小板厚断面での幅厚比パラメータ)が0.7, 0.9, 1.1, 1.3となるように板幅 b を、さらにアスペクト比 α ($=a/b$) $=5.0$ となるように板長 a を決定した。板厚が t で与えられた断面の幅厚比パラメータは、板幅、板厚、ポアソン比(ν)、弾性係数(E)および降伏応力(σ_Y)を用いて次式で与えられる。

$$\bar{\lambda}_P = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\kappa\pi^2} \frac{\sigma_Y}{E}} \quad (11)$$

最大板厚を変化させることによって、板厚比の逆数($1/c$)が1.1, 1.2, 1.3, 1.4の4種類を与えられる。また、テーパープレートの応力比は、最も効率的なテーパープレートの利用状態といえる $r=1.0$ から $r=1/c$ までを5段階に分割し与えている。

材料は鋼種がSS400、弾性係数 $E=206$ GPaの完全弾塑性体とする。板厚による降伏応力度の変化については明らかでは無いため、板厚に関係無くSS400材の公称値で一定とした。

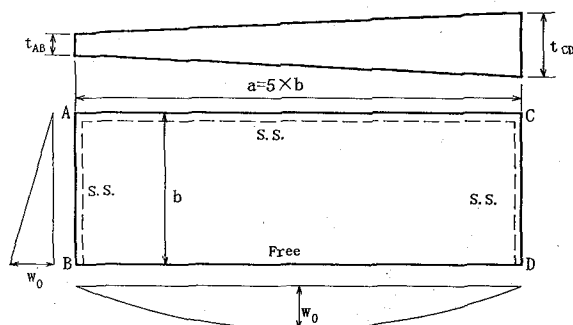
3.2 初期たわみおよび残留応力

初期たわみとして、次式で与えられる波形を与えた。

$$w_0 = \frac{b}{100} \frac{y}{b} \sin\left(\frac{x}{a} \pi\right) \quad (12)$$

初期たわみの最大値である $w_{0,max} = b/100$ は、文献8), 9) で用いられている値であり、実測データにおいては $\mu + 0.12\sigma$ に相当する⁸⁾。

テーパープレートをフランジに用いた桁の残留ひずみ測定¹⁰⁾では、図－8に示すように、軸方向成分は板厚に関わらず圧延方向に一樣な分布となる結果が得られている。ところが軸方向成分だけでは力の釣り合いが満



図－7 自由突出テーパープレートの解析モデル

表－1 解析モデルの構造諸元

鋼種	SS400
最小板厚	10mm
最大板厚	11mm, 12mm, 13mm, 14mm
最大幅厚比パラメータ	0.7, 0.9, 1.1, 1.3
板厚比(c)	1/1.1, 1/1.2, 1/1.3, 1/1.4
$\beta=(r-1)/(1-1/c)$	1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0.0
アスペクト比	5.0
初期たわみ w_0/t_0	$b/100$
残留応力 σ_{rt}	σ_Y
残留応力 σ_{rc}	$-0.2\sigma_Y$
残留応力 σ_{rr}	$0.2\sigma_Y$

足されず、せん断成分を考慮する必要がある。そこで、図－8に示す軸方向成分から図－9のようなせん断流成分を仮定し、先に示した解析アルゴリズムに従いせん断成分を解析的に求めた。付録にせん断成分の計算方法を示す。以上の結果得られた軸方向成分およびせん断成分を、テーパープレートに有する残留応力として与える。図－10に残留応力モデルを示す。

4. 自由突出テーパープレートの圧縮強度特性

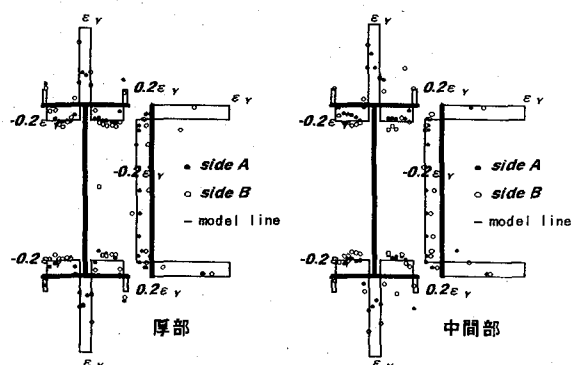
4.1 板強度曲線の設定

文献9)に、自由突出板の板強度に対する平均値相当曲線および下限値相当曲線に対し、次式の各係数 C および n が与えられている。

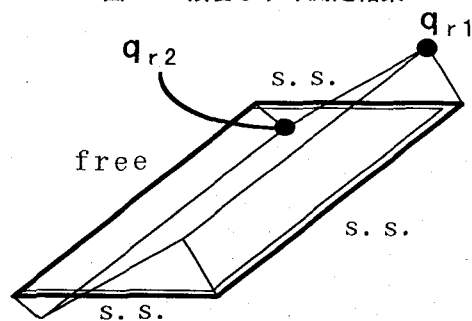
$$(N/N_Y) = (C/\bar{\lambda}_P)^n \quad (13)$$

ここに、 N_Y は、断面の降伏強度。

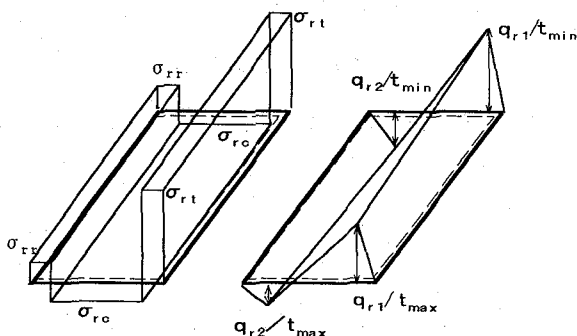
文献9)で与えられた初期不整と3.2で考慮した初期不整が異なるため、与えられる自由突出板の板強度が異なると考えられる。強度評価に用いる板強度曲線が強度評価結果に影響を与えることは明らかであるため、テーパープレートの解析に先立ち、3.2に示す初期不整



図－8 残留ひずみ測定結果



図－9 残留せん断流分布



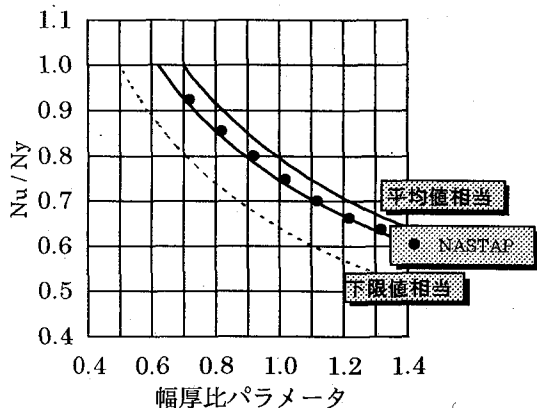
図－10 残留応力分布モデル (板面内)

を有する等厚自由突出板の圧縮強度解析を行い、板強度曲線を求めた。図一11 に圧縮強度解析結果を示す。今回の初期不整モデルが平均値相当曲線を下回る強度を与えることがわかる。表一2 に平均値相当曲線、下限値相当曲線および等厚板の解析結果を回帰した曲線に対する係数を示す。以降の圧縮強度評価では、この解析結果の回帰曲線を板強度曲線として用いる。

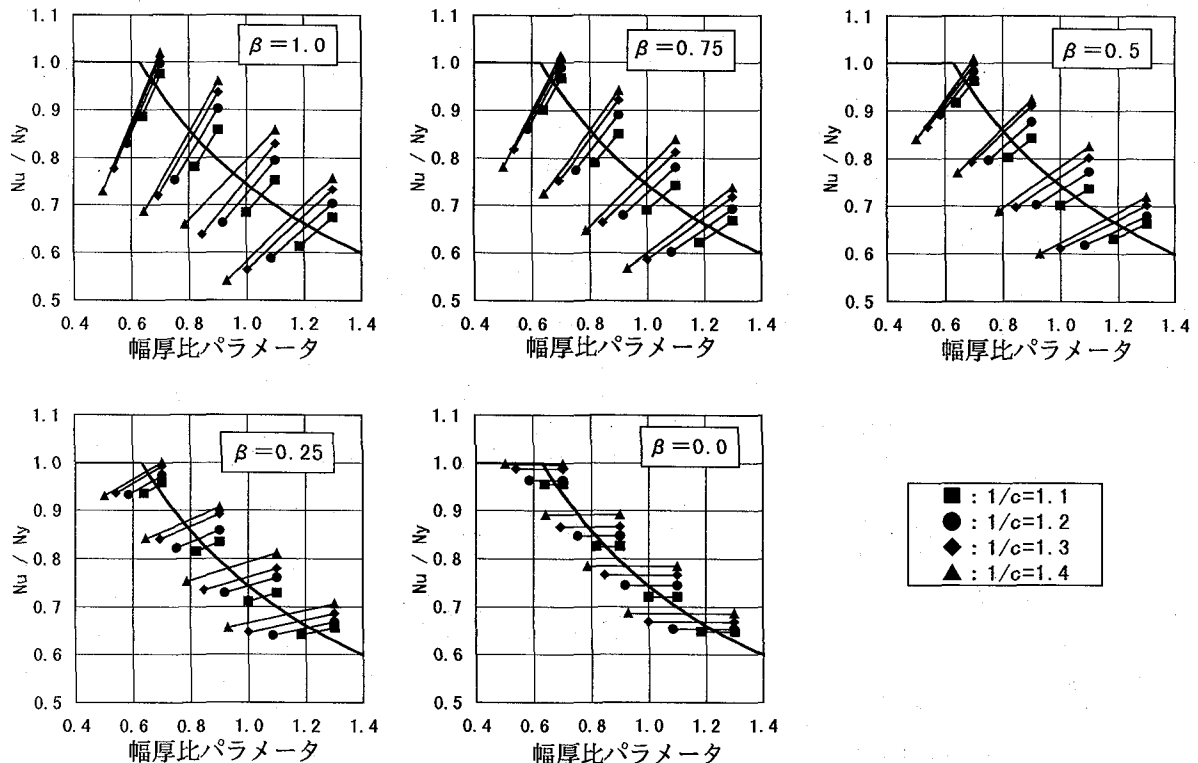
4.2 圧縮強度解析結果

応力比および板厚比が異なるテーパプレート形状の特性と力学的特性を統一的に示すパラメータとして、式(13)で与えられるパラメータ β を考える。 β は板厚比と応力比の関数として与えられ、テーパプレートの最大板厚断面での応力余裕量を表している。板厚比に関わらず $\beta = 1.0$ の場合は一定軸力状態のテーパプレートを表し、 $\beta = 0.0$ の場合は一定応力状態のテーパプレートを表す。

$$\beta = \frac{r-1}{1-c}c \quad (14)$$



図一11 等厚板の板強度曲線の決定



図一12 自由突出テーパプレートの圧縮強度（最小板厚断面および最大板厚断面で強度評価した場合）

図一12 は、自由突出テーパプレートの圧縮強度を、最小板厚断面および最大板厚断面を用いて評価した結果であり、各断面の幅厚比パラメータ（ λ_p ）および降伏強度（ N_y ）が異なるために、圧縮強度は線分で与えられる。また、図は前出のパラメータ β を用いて、厚部での応力余裕量に関して整理してある。

$\beta = 0.0$ のモデルは、板要素内での応力比が板厚比の逆数に等しく、厚部側での応力余裕量が小さなモデルであり、最大板厚断面の降伏強度で無次元化された最大板厚断面での圧縮強度と、同様にして求められる最小板厚断面での圧縮強度は等しくなる。これに対し、 β が大きくなり厚部側での応力余裕量が大きくなると、最大板厚断面で評価した圧縮強度は小さくなり、逆に最小板厚断面での圧縮強度は大きくなる。つまり、最小板厚断面で評価した場合の圧縮強度の板強度曲線に対する偏差に関しては、厚部側での応力余裕量が影響するといえる。また、 β の値が同じ場合は、板厚比が大きくなるに従って最大板厚と最小板厚の差が小さくなり、相対的に厚部側での応力余裕量が小さくなる。このため、テーパプレートの圧縮強度の、最小板厚断面における板強度曲線に対する余裕量も小さくなる。また、全てのモデルで、最小板厚断面では板強度曲線を上回る圧縮強度で、最大板厚断面では板強度曲線を下回る圧縮強度となっている。このことから、最大板厚断面で圧縮強度を評価した

表一2 板強度曲線における係数

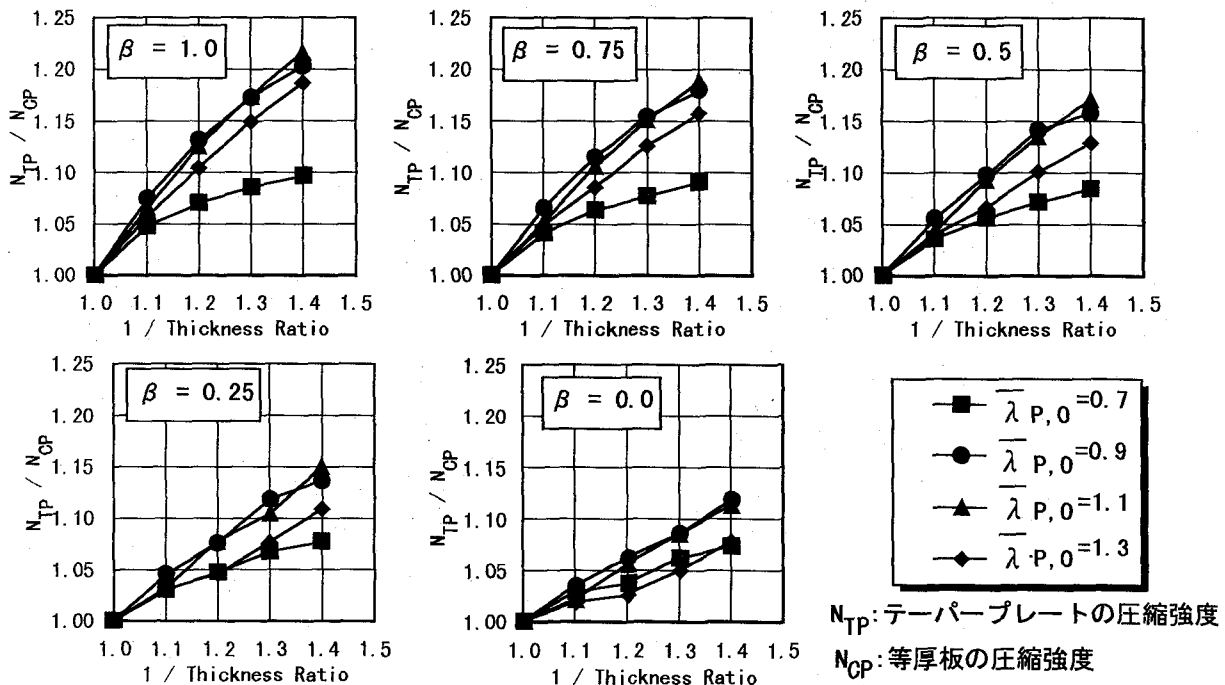
	降伏強度限界	係数
	C	n
平均値相当曲線	0.7	0.64
下限値相当曲線	0.5	0.64
NASTAP	0.62	0.64

点と最小板厚断面で圧縮強度を評価した点を結んだ線分と、板強度曲線の交点を用いることによって、テーパフランジの圧縮強度を既往の板強度曲線を用いて評価する事が可能になるとと思われる。

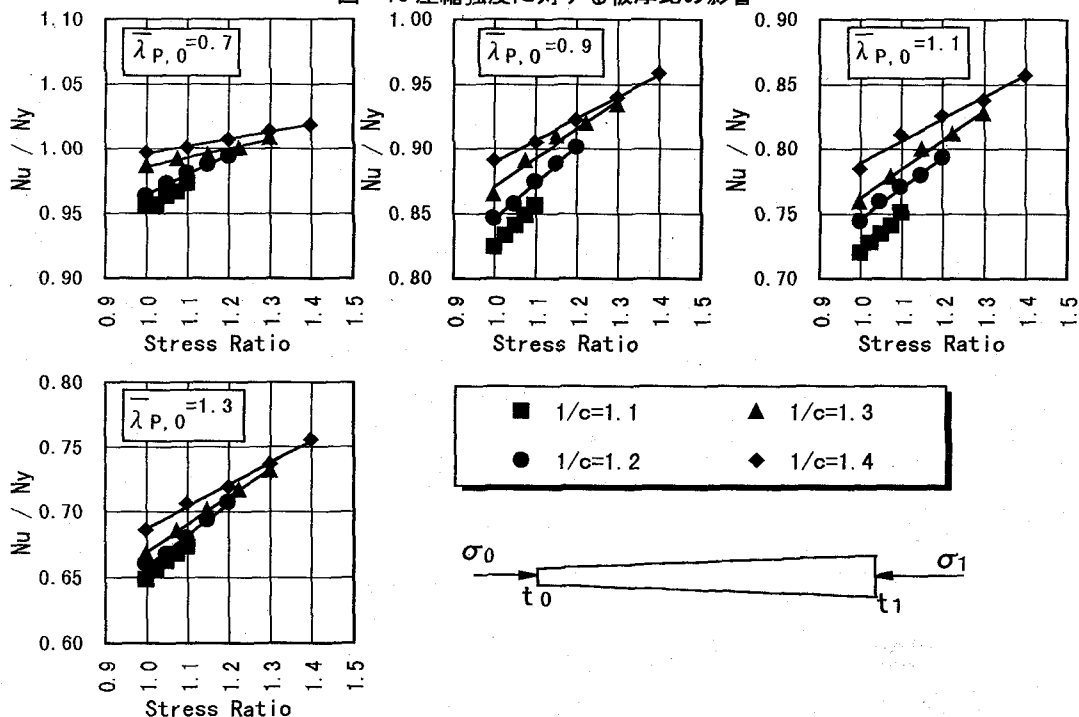
4.2 板厚比の影響

図—13に、板厚変化による圧縮強度を示す。横軸は板厚比の逆数であり、縦軸はテーパプレートで最小板厚断面での圧縮強度である。板厚差が大きくなるに従い、圧縮強度が線形的に上昇していることがいえる。また、最小板厚断面での幅厚比パラメータ(最大幅厚比パラメータ: $\bar{\lambda}_{P,0}$) が小さな $\bar{\lambda}_{P,0}=0.7$ のモデルでは、等厚板に

対する圧縮強度の上昇量が、他の幅厚比パラメータのモデルに比べて小さくなっている。薄部側での幅厚比パラメータが小さくなり、最大板厚断面と最小板厚断面の圧縮強度が共に降伏強度にほぼ等しくなるようなテーパプレートでは、厚部側断面の薄部側断面に対する局部座屈強度の増加量も小さくなり、厚部側の応力余裕量が相対的に小さくなる。この結果、他の幅厚比のテーパプレートに比べて、圧縮強度に対する板厚変化の影響が小さくなる。また、幅厚比パラメータが降伏強度限界より小さい場合には、圧縮強度が降伏強度で一定となる。ここでいう降伏強度限界とは、圧縮強度が全断面降伏強度以上で与えられる断面の幅厚比パラメータのうち最



図—13 圧縮強度に対する板厚比の影響



図—14 圧縮強度に対する応力比の影響

大となる値であり、式(12)の定数Cに相当する。このため、幅厚比パラメータが降伏強度限界より小さい領域では、板厚が増しても圧縮強度は増加せず、最大板厚断面での応力余裕量は、降伏強度限界断面での応力余裕量に等しいといえる。従って、強度評価を行う場合には、最小幅厚比パラメータ(最大板厚断面での幅厚比パラメータ： $\bar{\lambda}_{p,1}$)と降伏強度限界の関係についても考慮する必要があるといえる。

4.3 応力比の影響

図一14は、板厚比毎に応力比と最小板厚断面で評価した圧縮強度の関係を示したものである。応力比が小さくなり、厚部での応力余裕量が小さくなると圧縮強度は低下する。逆に、応力比が大きくなり、厚部における応力余裕量が大きくなると、圧縮強度は上昇する。応力比が変化することによって圧縮強度は線形的に変化している。最大幅厚比パラメータが小さな $\bar{\lambda}_{p,0}=0.7$ のモデルは他の幅厚比パラメータのモデルに比べて、圧縮強度に

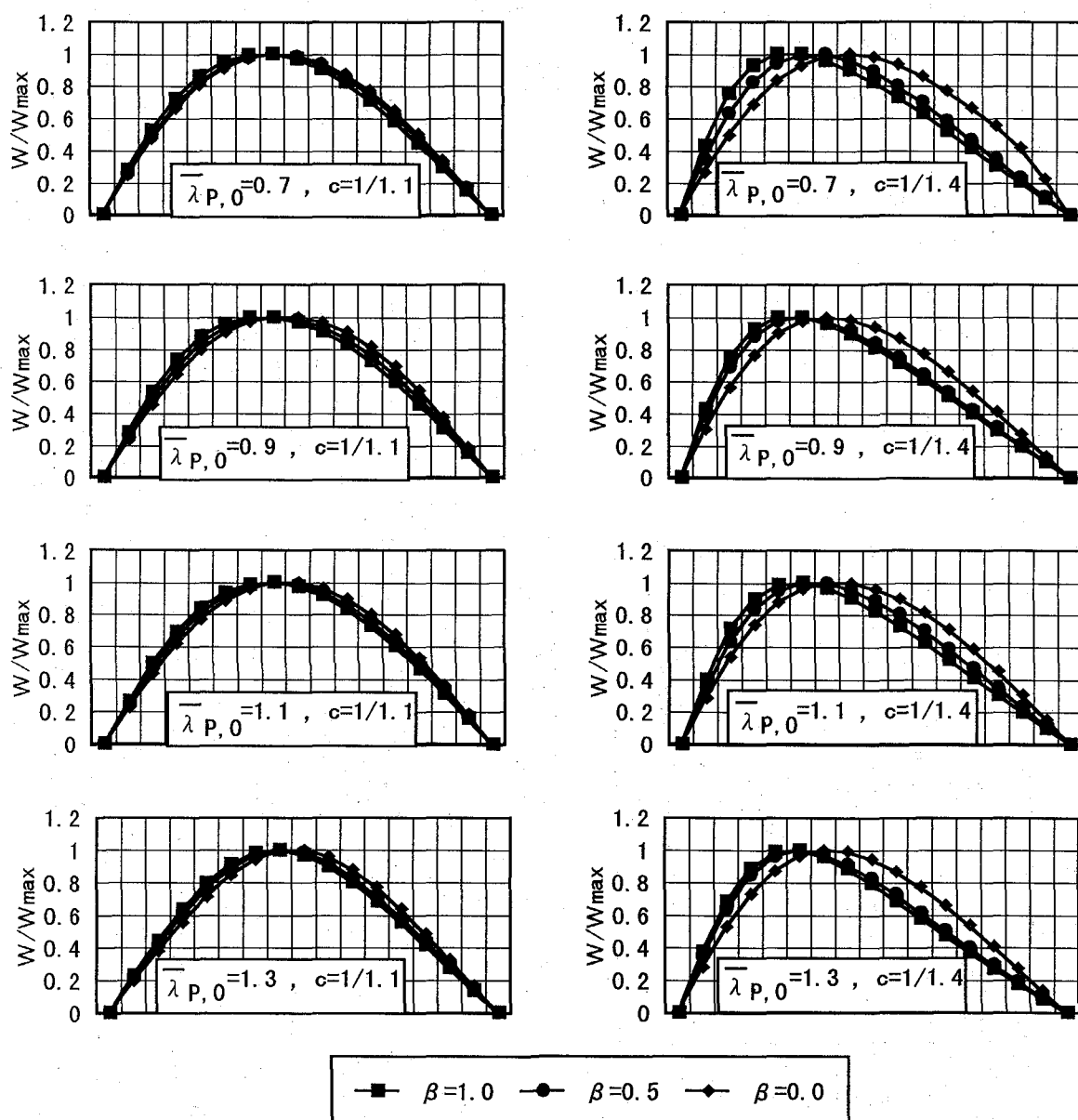
対する応力比の影響が小さくなっていることがわかる。また、その他の幅厚比パラメータのモデルは、圧縮強度の変化率が、ほぼ一定であり、応力比の影響がほぼ同程度であることがいえる。

4.4 自由辺の変形形状

図一15に極限強度時の自由辺における変形形状を示す。図には、各幅厚比パラメータに対し、板厚比が1/1.1および1/1.4のモデルで $\beta=1.0, 0.5, 0.0$ のケースについて図示されている。板厚比が1/1.1の場合、応力比が1.0と一定軸力状態に近づくに従い、若干ではあるが最大たわみ位置が薄部側に移動している。板厚比が1/1.4の場合、この傾向が顕著となっている。この傾向は幅厚比パラメータに関係なく同様である。また、応力比が0.0と一定応力状態となると、最大たわみ位置は、ほぼ自由辺中央となり、等厚板と類似した挙動を示すと考えられる。

5. 自由突出テーパプレート圧縮強度評価法

5.1 等価板厚と等価幅厚比パラメータ



図一15 自由辺の変形形状(最大荷重時)

一般に、等厚板の耐荷力評価では、鋼種や幅厚比の影響を考慮した幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_P$ が用いられている¹¹⁾。つまり、幅厚比パラメータを用いることによって、鋼種に関らず統一的な強度評価が可能となっている。設計時の簡便性を考えれば、変厚板に対しても同様の強度評価が可能であることが望ましい。

今、板厚が t_0 から t_1 に連続的に変化しているテーパプレートを考える。仮に、テーパプレートの代表板厚として最小板厚を用いると、強度パラメータおよび幅厚比パラメータが次式で与えられる。

$$(N_u/N_Y)_0 = N_u/(\sigma_Y \cdot b \cdot t_0) \quad (15)$$

$$\bar{\lambda}_{P,0} = \frac{b}{t_0} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k\pi^2} \frac{\sigma_Y}{E}} \quad (16)$$

実際には、テーパプレートの板厚は軸方向(圧延方向)に変化しており、変厚板の幅厚比パラメータとして式(16)を用いることは適切ではない。変厚板の代表板厚として、等価板厚(t_{eq})すなわち変厚板の座屈強度と等価な座屈強度を有する等厚板に置き換えた場合の板厚を用いると、等価幅厚比パラメータ($\bar{\lambda}_{P,eq}$)が、等価板厚を用いて次式で与えられる。

$$\bar{\lambda}_{P,eq} = \frac{b}{t_{eq}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k\pi^2} \frac{\sigma_Y}{E}} \quad (17)$$

また、等価板厚を用いた場合の降伏強度(N_Y)_{eq}および強度パラメータ(N_u/N_Y)_{eq}は、次式で与えられる。

$$(N_Y)_{eq} = \sigma_Y \cdot b \cdot t_{eq} \quad (18)$$

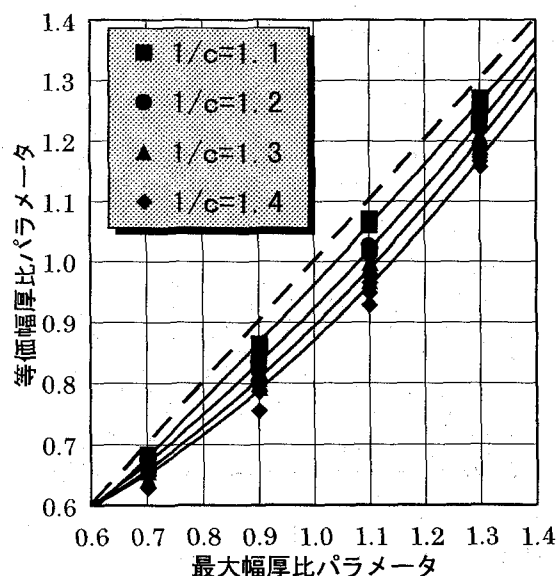
$$(N_u/N_Y)_{eq} = N_u/(\sigma_Y \cdot b \cdot t_{eq}) \quad (19)$$

式(15)～式(19)より、

$$(N_u/N_Y)_{eq} = \frac{t_0}{t_{eq}} (N_u/N_Y)_0 \quad (20)$$

$$\bar{\lambda}_{P,eq} = \frac{t_0}{t_{eq}} \bar{\lambda}_{P,0} \quad (21)$$

なる関係が得られる。式(20)、(21)より、変厚板



図—16 最大幅厚比パラメータと等価幅厚比パラメータ

の等価強度パラメータと等価幅厚比パラメータは、最少板厚を用いた場合の強度パラメータ、幅厚比パラメータおよび等価板厚から求められる。従って、等価板厚評価式を作成するにあたり、等価強度パラメータと等価幅厚比パラメータが等厚板の板強度曲線を満足する点に留意すれば、等価板厚を用いて、変厚板の座屈強度を等厚板の板強度曲線を利用して評価できる。

5.2 等価幅厚比パラメータおよび等価板厚の算出

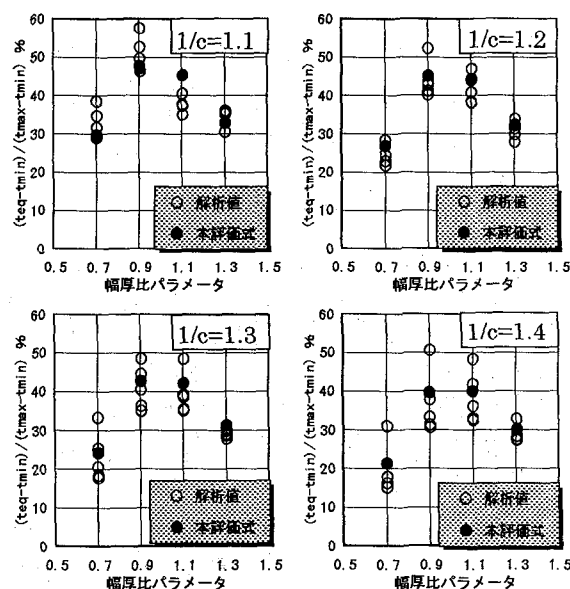
等価幅厚比パラメータを求める式(15)から式(21)のルーチンは、図—12に示す圧縮強度の評価線分と板強度曲線の交点を求めるルーチンに他ならない。この考えに基づいて、図—12の交点として求められた等価幅厚比パラメータと最大幅厚比パラメータの関係を示したものが図—16である。最大幅厚比パラメータが0.7と小さく、全断面降伏強度に近い圧縮強度を有するテーパプレートでは、板厚比が変化しても等価幅厚比パラメータはあまり変化しない。一方、最大幅厚比パラメータが比較的大きなテーパプレートでは、板厚比によって等価幅厚比パラメータが大きく変化している。また、板厚比の影響と比べて、等価幅厚比パラメータに対する応力比の影響は小さいことがいえる。ここで、等価幅厚比パラメータを、板厚比をパラメータとして最大幅厚比パラメータの関数として回帰し、さらに式(21)から等価板厚評価式を次式で与える。

$$\bar{\lambda}_{P,eq} = A\bar{\lambda}_{P,0}^2 + B\bar{\lambda}_{P,0} + C \quad (22)$$

$$\frac{t_{eq}}{t_0} = \frac{\bar{\lambda}_{P,0}}{\bar{\lambda}_{P,eq}} \quad (23)$$

ここに、A、B、Cは、回帰曲線の係数。

式(23)で与えられる等価板厚と、解析結果から算出される等価板厚を比較した結果を図—17示す。図—17縦軸は後述する式(24)に示される係数 α に相当する。式(23)がほぼ解析結果の平均値に相当する値を与えることがわかる。また、解析結果および式(23)共に、最大幅厚比パラメータが小さく板厚変化の影響が小さなモデルでは、等価板厚を小さく評価し、また最大幅厚比パラメータが大きくなり、板厚の増加による圧縮強度上



図—17 等価板厚に関する解析値と評価式の比較

昇量が小さくなるモデルにおいても、等価板厚を小さく評価していることがわかる。

5.3 等価板厚評価式

1. において、テーパプレートと同様の応力状態の鋼板として不等圧縮を受ける鋼板をあげた。BS5400では、このような不等圧縮を受ける鋼板の強度評価は、最大応力作用断面から、パネル長（ a ）の0.4倍（ $0.4a$ ）だけ離れた断面での作用応力を用いて局部座屈に対する照査を行うように規定している¹¹⁾。軸応力とそれに応じた付加せん断応力を同時に受け、一定応力比状態にある自由突出テーパプレートの強度評価を行う場合に、BS5400と同様の条件を考え、最小板厚断面からパネル長の α 倍離れた断面での板厚を用いて強度評価を行うとすると、自由突出テーパプレートの等価板厚評価式が次式で与えられる。

$$t_{eq} = t_{min} + \alpha(t_{max} - t_{min}) \quad (24)$$

ここで、 t_{min} はパネル内の最小板厚であり、 t_{max} は同じく最大板厚を意味する。また、ある断面における幅厚比パラメータが降伏強度限界（ $\bar{\lambda}_{p,yield}$ ）を超える場合には、パネルの最大板厚として降伏強度限界断面における板厚（ t_{yield} ）を用いることとする。従って、次式のような条件が付加されることになる。

$$t_{max} \leq t_{yield} = \frac{\bar{\lambda}_{p,yield}}{b} \sqrt{\frac{k\pi^2}{12(1-u^2)} \frac{E}{\sigma_Y}} \quad (25)$$

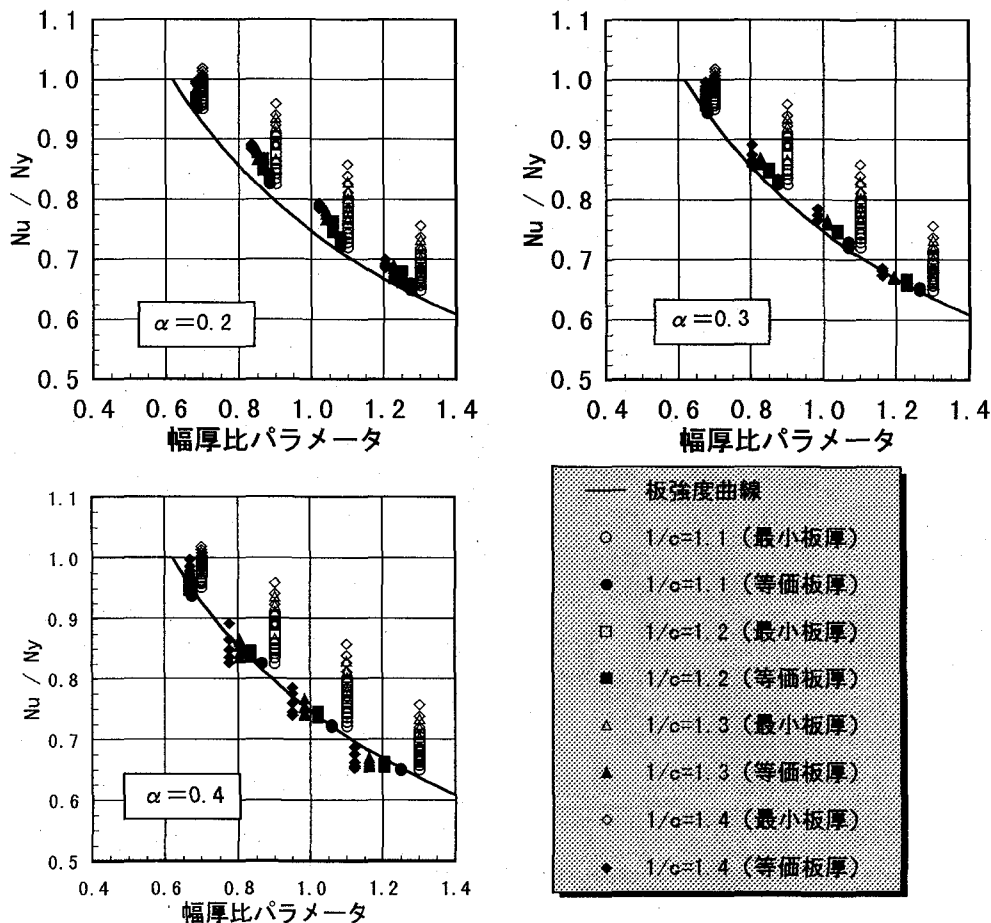
式（23）で等価板厚を評価する場合には、係数 α が重

要となってくる。そこで、図—17から係数 α として以下の3種類を与えて強度評価を行い、その妥当性について検討した。

- 1) 全解析データの下限值として、 $\alpha=0.2$
- 2) 板厚比の影響が大きな領域での下限値として、 $\alpha=0.3$
- 3) BS5400に準ずる場合として、 $\alpha=0.4$

図—18、 α として上記の3ケースを考えて、自由突出テーパプレートの等価板厚を与え、強度評価した結果を示す。図中の白抜き記号は、最小板厚を用いて評価された圧縮強度であり、板厚比に関わらず幅厚比パラメータおよび降伏強度が一定であるため、評価点は縦一列に分布する。一方、黒く塗りつぶされた記号は等価板厚を用いて評価された圧縮強度であり、板厚比によって幅厚比パラメータおよび降伏強度が変化するため、板強度曲線付近に分布する。

最小板厚を用いて圧縮強度を評価した場合は、全体的に、特に板厚比が小さく板厚差が大きなモデルにおいて安全側の強度評価となることがわかる。これは、厚部側の影響を無視して圧縮強度の評価を行っているためであり、テーパプレートの特性を考慮した強度評価とは言えない。 $\alpha=0.2$ として求めた等価板厚を用いた場合は、依然として全体的に安全側の評価となっている。これは、板厚比の影響が小さいモデルを含めたモデルの下限值相当の等価板厚を用いるためであり、この場合でも、テーパプレートの特性を十分に考慮した強度評価とはいえない。一方、 $\alpha=0.4$ とした場合は、板厚比が大きく板厚差が小さなモデルでは適切に圧縮



図—18 等価板厚を用いた圧縮強度評価

強度を評価できるが、板厚差が大きくなると危険側の評価となり、板厚変化の影響を過大評価しているといえる。これに対し、両者の中間的なケースであり、 $\alpha=0.3$ として板厚比の影響が大きなテーパプレートの下限值相当の等価板厚を用いた場合は、ほぼ全てのデータで等厚板に対する板強度曲線を用いて、テーパプレートの特性を考慮した強度評価が可能となるといえる。

6. 結論

本論文では、圧延テーパプレートが鋼 I 断面桁の圧縮フランジに適用された場合を想定し、その局部座屈強度評価に関する基礎的な検討を行った。以下に得られた成果をまとめる。

- 1) 軸方向応力に対応した付加せん断応力を考慮することによって、任意応力比状態の鋼板に対する圧縮強度解析手法を開発し、自由突出テーパプレートの圧縮強度を解析した。
- 2) 自由突出テーパプレートの圧縮強度は、板厚比や応力比によって変化するが、板厚比の影響が応力比の影響より大きいことを示した。
- 3) 圧縮強度に対する各パラメータの影響を考慮し、さらに設計上の簡便性を考慮した上で、最小板厚と板厚差の α 倍の板厚の和として、自由突出テーパプレートの等価板厚を与える評価式の提案を行った。さらに、 $\alpha=0.3$ とすることにより、簡便に圧縮強度が評価できることを示した。

付録 残留せん断応力成分の算出方法

微小要素内で軸方向の残留応力 (σ_r) は一定であると考え、軸方向の力の釣り合い条件から、

$$\sigma_r \left(t + \frac{dt}{dx} \Delta x \right) \Delta y - \sigma_r t \Delta y = \left(q + \frac{dq}{dy} \Delta y \right) \Delta x - q \Delta x \quad (A1)$$

$$\frac{dq}{dy} = \sigma_r \frac{dt}{dx} \quad (A2)$$

となる。微小要素内のモーメントの釣り合いを考えれば、式 (A1)、(A2) より板幅方向任意点でのせん断流 q_y は、次式で与えられる。

$$q_y = \frac{dt}{dx} \int \sigma_r(\eta) d\eta \quad (A3)$$

残留応力の軸方向成分の分布を次のように仮定し (図-10 参照) ,

$$\sigma_r(y) = \begin{cases} \sigma_{r,t} = \sigma_Y & (y_1 \leq y \leq b) \\ \sigma_{r,c} = -0.2\sigma_Y & (y_2 \leq y \leq y_1) \\ \sigma_{r,x} = 0.2\sigma_Y & (0 \leq y \leq y_2) \end{cases} \quad (A4)$$

非載荷支持辺にはせん断流は発生しないと仮定すると、載荷辺に沿ったせん断流は次式で求められる。

$$q_y = \begin{cases} \frac{\sigma_Y}{c} (b-y) & (y_1 \leq y \leq b) \\ -\frac{0.2\sigma_Y}{c} (y_1-y) + q_{r,1} & (y_2 \leq y \leq y_1) \\ \frac{0.2\sigma_Y}{c} (y_2-y) + q_{r,2} & (0 \leq y \leq y_2) \end{cases} \quad (A5)$$

ここに、 $q_{r,1}, q_{r,2}$ は図-10 に示すせん断流の不連続点

の値である。

以上より、鋼板内任意点におけるせん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_r = \begin{cases} \frac{\sigma_Y}{ct_x} (b-y) & y_1 \leq y \leq b \\ -\frac{0.2\sigma_Y}{ct_x} (y_1-y) + \frac{q_{r,1}}{t_x} & y_2 \leq y \leq y_1 \\ \frac{0.2\sigma_Y}{ct_x} (y_2-y) + \frac{q_{r,2}}{t_x} & 0 \leq y \leq y_2 \end{cases} \quad (A6)$$

ここに、 t_x は鋼板内の任意点での板厚。

初期たわみを有する鋼板に対しては、式 (A6) で与えられた残留応力を初期値として与え、繰り返し計算を実行することによってせん断応力成分を求める。

参考文献

- 1) 建設省：鋼道路橋設計ガイドライン (案)，1995年。
- 2) GARRIGUES, G., GRANBOULAN, J. et MAZOU, J. : Un Product Nouveau Pour la Construction Metallique, les Toles a Epaisseur Variable, Symp. De L'association Internationale des Ponts et Charpentes, Association Francaise Pour la Construction, Leingard, USSR, Sep., 1991.
- 3) 緒方辰男, 林辰一, 上高原正弘, 板橋壮吉：テーパプレートの橋梁への適用—上信越道 深沢川橋—, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, I - 306, pp.612-613, 平成7年9月。
- 4) Wittrick, W. H. and Ellen, C. H. : Buckling of Tapered Rectangular Plates in Compression., Aero Quart., Vol. 33, No. 4, pp. 308-326, 1962.
- 5) KOBAYASHI, H. and SONODA, K. : Buckling of Rectangular Plates with Tapered Thickness., Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 5, pp.1278-1289, 1990.
- 6) Scheer, J. : Der stabilisierende Einfluß von Zugspannungen auf die Beulung schubbeanspruchter, unausgesteifter Rechteckplatten., Stahlbau, Bd. 31, Nr. 8, S.233-238, 1962.
- 7) NISHIMURA, N., MURAKAMI, S. and TAKEUCHI, S. : Elasto-Plastic Finite Displacement Analysis of Thin-Walled Shells, Technology Reports of the Osaka University, Vol.45, No. 2231, pp.213-220, October, 1995.
- 8) KOMATSU, S. and KITADA, T. : Statistical Study on Compression Flange Plates, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 2, pp.404-417, 1983.
- 9) 福本秀士ら：鋼骨組構造物の極限強度の統一的評価に関する総合的研究, 科学研究費補助金 (総合研究 A) 研究成果報告書, 平成2年3月。
- 10) 西村宣男, 堀田毅, 滝英明：テーパプレートを用いた I 断面桁の耐荷力実験, 関西支部年次学術講演会講演概要集, 平成8年5月。
- 11) BSI : BS5400 Part3, "Code of practice for design of steel bridges, Steel, Concrete and Composite Bridges.", 1982.

(1996年9月6日受付)