

幅方向テーパを有する鋼板の 極限強度および変形性能に関する解析的検討

熊野拓志¹・鈴木康夫²・山口隆司³・杉浦邦征⁴・渡邊英一⁵

¹正会員 川鉄橋梁鉄構株式会社 橋梁事業本部 技術部 (〒111-0051 東京都台東区蔵前2-17-4)

²正会員 博士(工学) 京都大学大学院 研修員 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博士(工学) 大阪市立大学大学院 助教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁴正会員 Ph.D 京都大学大学院 助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵フェロー Ph.D (財)大阪地域計画研究所 理事長 (〒561-0834 豊中市庄内栄町2-21-1)

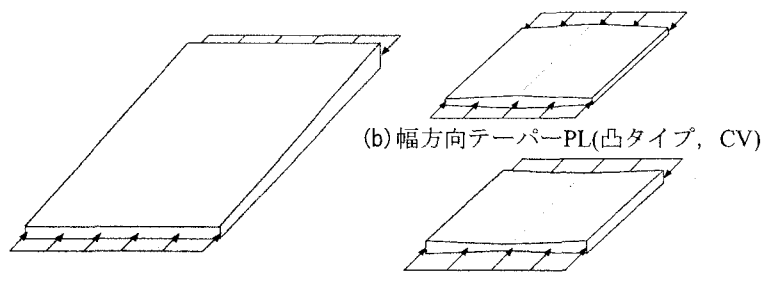
1. はじめに

板厚が連続的に変化する鋼板として、圧延時の圧下力を調整して製造するテーパプレート (Longitudinally Profiled Steel Plate, LP 鋼板, 図-1(a))^{1)~3)}があり、鋼橋合理化の一手法として鋼桁の上下フランジへの適用性に関する研究がなされ、実橋梁に適用されている^{4)~6)}。また、1995年兵庫県南部地震以後、鋼製橋脚の耐震性に関する検討も進み^{7),8)}、曲げモーメント、せん断力および軸力を受ける柱部材である鋼製橋脚への適用を目的とした研究もなされている^{9)~12)}。これらは部材の長さ方向に板厚が変化するテーパ鋼板 (軸方向テーパプレート) を用いることにより、抵抗断面力の変化を作用断面力の変化により近づけ、構造の合理化、すなわち使用鋼材量の削減や、あるいは変形性能の向上を図るものである。

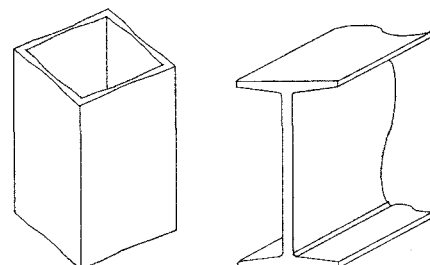
一方、部材軸方向の板厚が変化する軸方向テーパプレートを利用するのではなく、断面内の応力分布性状に着目し、図-1(b)(c)に示すような板幅方向の板厚変化 (幅方向テーパプレート) の利用を検討した研究も行われている^{13),14)}。奈良ら¹³⁾は、桁高

方向に板厚が連続的に変化する鋼桁腹板の座屈設計法について検討している。これは、引張応力を受ける腹板下部の板厚を薄くし、圧縮応力を受ける腹板上部の板厚を厚くすることにより、水平補剛材の省略と鋼重低減を図ったものである。

本研究では、部材軸方向の板厚変化 (軸方向テーパ) を利用するのではなく、圧縮力を受ける鋼板の強度評価のための有効幅理論に基づいて、側辺での高い応力集中を積極的に活用することを目的に、板幅方向の板厚変化 (幅方向テーパ) が極限強度と変形性能およびエネルギー吸収能に及ぼす影響を弾塑性有限変位解析により検討した。まず、幅方向テーパプレートを図-2に示すように箱形断面圧縮フランジに適用することを想定し、幅方向テーパを有する正方形周辺単純支持板の解析を行った。次に、幅方向テーパプレートを鋼製 I 形桁のフランジに適用することを想定し、幅方向テーパを有する 1 辺自由 3 辺単純支持の正方形板に対して同様の解析を行った。さらに、実構造物に対する適用事例として図-2に示すような箱形断面橋脚柱の荷重-変形関係を求め、幅方向テーパプレートの圧縮部材へ適用性・有効性について議論した。



(a) 軸方向テーパ PL (b) 幅方向テーパ PL (凸タイプ, CV)
(c) 幅方向テーパ PL (凹タイプ, CC)
図-1 テーパー鋼板の利用方法



(a) 箱断面部材 (b) I 桁
図-2 幅方向テーパフランジを有する鋼部材

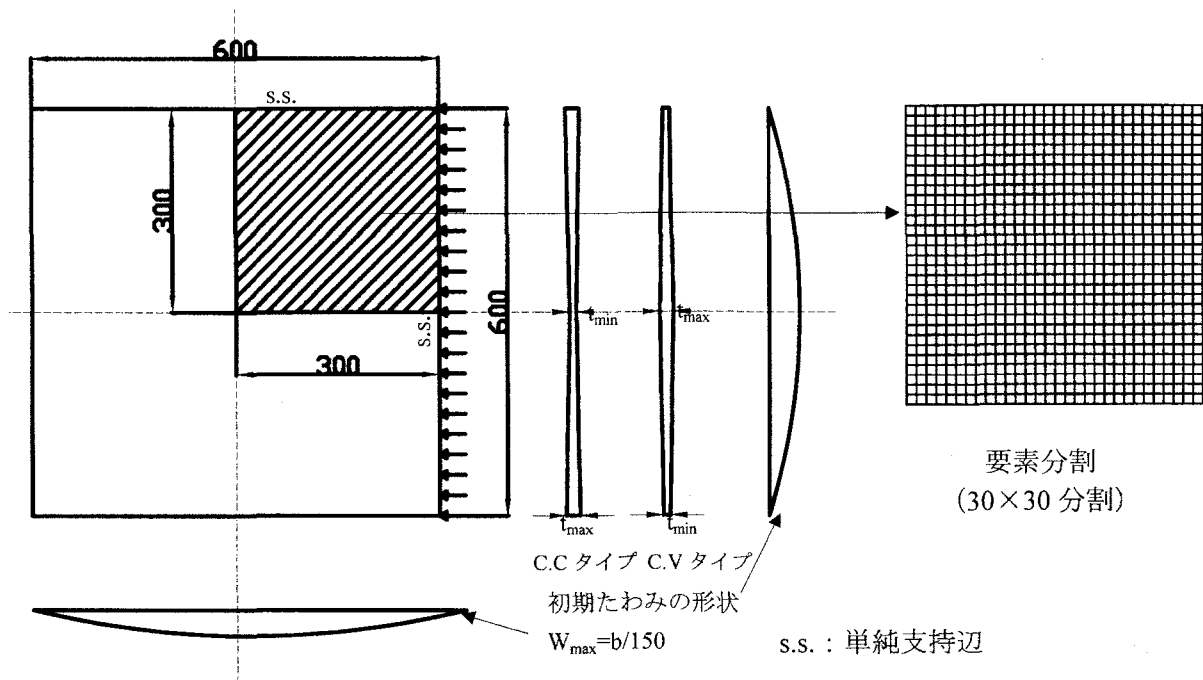


図-3 解析モデルの概要 (寸法単位: mm)

2. 幅方向テーパを有する単純支持板

(1) 弾塑性有限変位解析モデルの概要

対象とする周辺単純支持正方形板 (アスペクト比 $\alpha = 1$) の概要, および有限要素解析における要素分割状況を図-3 に示す. 断面形状としては, 側辺に近い方が板厚の厚い凹型 (concavity, C.C タイプ) と, 側辺で最も板厚が薄い凸型 (convexity, C.V タイプ) の2種類を設定した. なお, 凸型は, 板中央部に縦方向補剛材を一本配置する補剛板を想定している. 解析には汎用構造解析コード ABAQUS を用い, 低減積分4節点シェル要素 (S4R) により正方形板をモデル化した¹⁵⁾. 解析モデルは対称性を考慮して1/4モデル (図-3 の斜線部) とし, 幅方向テーパ, すなわち荷重載荷方向と直角の方向に板厚が変化するように設定した. また, 要素分割数については, 別途解析的検討を行い, 図中に示すように 30×30 分割とすることとした. 境界条件は4辺単純支持とし, 荷重は強制変位によることとした. また, 初期不整として道路橋示方書・同解説¹⁶⁾で規定される製作基準の許容値を参考に, 図-3 中に示すような sin 半波形の初期たわみを考慮した. 残留応力については, 現時点において, データ数も不足しており明らかでないと判断されることから, 本研究では考慮していない.

解析モデルにおいて設定した鋼材は SS400 相当とし, 表-1 に示す機械的性質を用いた. 解析ではひずみ硬化を考慮して, 図-4 に示すようなトリリニアモデルでモデル化した応力-ひずみ関係を用いた. な

表-1 鋼材の機械的性質

弾性係数 E (N/mm^2)	降伏点 σ_y (N/mm^2)	ポアソン 比	硬化開始 ひずみ ϵ_{sh}	ひずみ硬 化係数 E_{st} (N/mm^2)
200,000	235	0.3	0.0112	3300

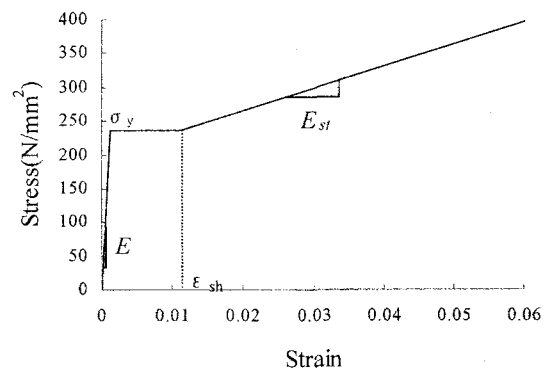


図-4 解析に用いた材料の応力-ひずみ関係

お, 最大荷重点近傍までの範囲であれば, ひずみ硬化効果による影響は比較的小さいことを別途確認している.

(2) 解析ケース

本解析では, 極限圧縮強度や変形性能に与える板厚変化の影響を調べるために幅厚比パラメータおよびテーパ率を変化させたパラメトリック解析を行った. ここで, 幅厚比パラメータ (R), テーパ率 (TPR) は, それぞれ次式で定義される. なお, テーパ鋼板に対する幅厚比パラメータは, 平均板厚で評価した.

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad (1)$$

$$TPR = \frac{t_{max} - t_{min}}{b} \quad (2)$$

k : 座屈係数 (=4.0)

ここで、 t_{max} 、 t_{min} 、 b は、最大板厚、最小板厚、板幅をそれぞれ表す。

解析ケースの設定にあたっては、テーパー率が零である平板(板厚が一定)を基本モデルに、その断面積を一定のまま側辺部と中央部の板厚を調整し、テーパー率を変化させた。また、幅厚比パラメータの影響を調べるために、平均板厚として 6, 9, 15, 27, 50mm を設定し、幅厚比パラメータを 1.80, 1.20, 0.72, 0.40, 0.22 と変化させた。板厚の変化形状については、板厚が側辺に近づくほど大きくなる凹型のモデル (concave type, C.C タイプ) と板厚が側辺に近づくほど小さくなる凸型(convex type, C.V タイプ) のモデルの 2 つを設定した。

解析ケースの最初の英字群は板厚の変化形状を表し、凸型のモデルを TP-CV、凹型のモデルを TP-CC、テーパー率が零である基本モデルは TP とした。最初の英字群に続く 2 つの数字群は幅厚比パラメータとテーパー率を 1000 倍した数字であり、これらの順に記述されている。例えば、解析ケース TP-CV-0.4-4 は中央部が厚い凸型で、幅厚比パラメータが 0.4、テーパー率が 4/1000 のケースを表している。

(3) 解析結果および考察

a) 荷重-変位関係

圧縮荷重と面内変位(縮み)の関係の一例として、幅厚比パラメータが 0.72 および 1.20 の解析結果を図-5(a) および図-5(b) にそれぞれ示す。同図より、い

ずれのケースも凹型の TP-CC モデルではテーパー率が大きいものほど最大圧縮力が大きく、凸型の TP-CV モデルではテーパー率が大きくなるほど最大圧縮力が小さくなっている。この傾向は他の幅厚比パラメータのケースにおいても同様であった。また、幅厚比パラメータが大きくなるほど、すなわち、板の後座屈強度が期待できるような場合ほど、テーパー率の変化することによって生じる最大圧縮力の変化量は大きくなる傾向にある。

このように、同じ平均板厚であっても、幅方向の板厚を変化させた場合に最大圧縮力に違いが生じるのは、側辺での板の塑性化の進行によるものと考えられる。4 辺単純支持板の場合、一般に側辺部から塑性化が始まることが知られている。TP-CC モデルでは側辺部の板厚が厚く側辺部近傍が負担する荷重が大きいため、最大圧縮力は増大する。逆に TP-CV モデルではテーパー率が大きくなると側辺がより薄くなり、最大圧縮力は減少したものと考えられる。

b) 耐荷力曲線

本解析で得られた結果と耐荷力曲線との比較を図-6 に示す。図中には弾性座屈曲線、道路橋示方書で規定される耐荷力曲線¹⁶⁾、また有効幅を考慮した von Karman, Winter および Lind による耐荷力曲線¹⁷⁾、小松・北田らによる弾塑性有限変位解析に基づく耐荷力曲線¹⁸⁾を示した。

同図より、解析ケース数が少ないものの、幅厚比パラメータ R が 1.8 の場合にテーパー率の変化による圧縮耐力の変化が最も大きいことがわかる。後座屈強度が期待できる幅厚比パラメータでは、テーパー率の変化の影響を強く受けると言える。また、側辺近傍が厚い凹タイプの TP-CC モデルでは幅厚比パラメータ R が 1.8 の場合、耐荷力は有効幅を考慮した Winter および Lind の耐荷力曲線と上限値である von

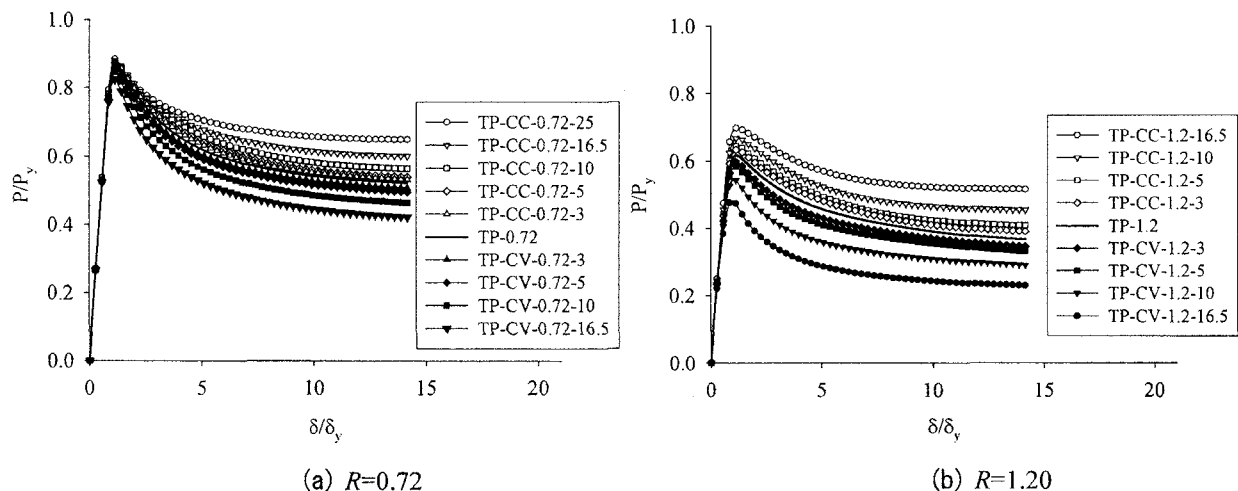


図-5 圧縮力-縮み関係

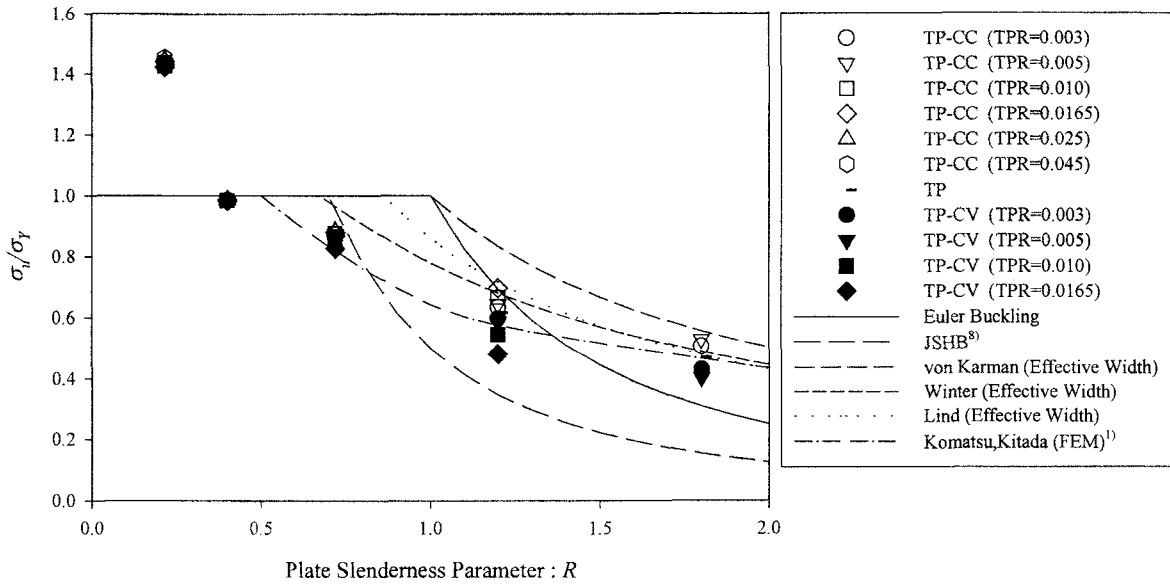


図-6 耐荷力曲線

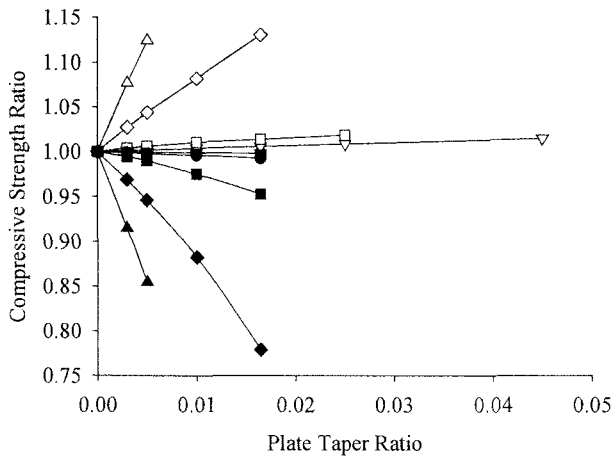


図-7 最大圧縮強度とテーパ率の関係

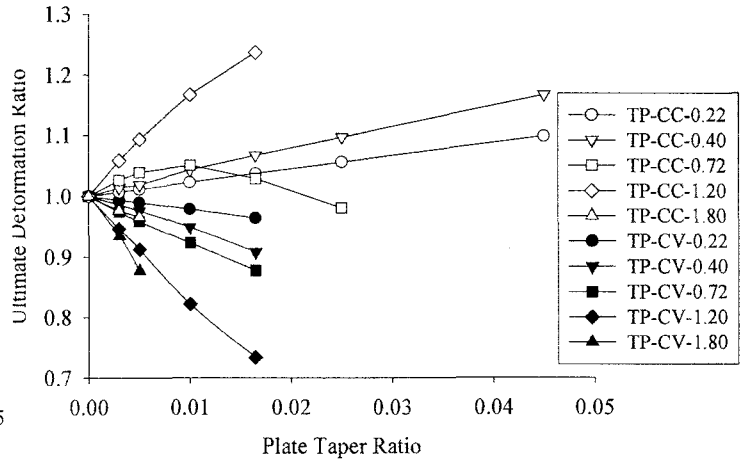


図-8 変形性能とテーパ率の関係

Karmanの耐荷力曲線との間にあることがわかる。一方、幅厚比パラメータ R が0.72以下の場合では、テーパ率および板形状の違いによる圧縮耐力の差異は小さくなっている。ひずみ硬化による圧縮耐力の向上が見られる R に対しては、逆に耐力に若干の変動が見られる。これは、座屈によるたわみが大きくなる前に、板が全断面降伏状態になるためと考えられる。また、幅厚比パラメータが0.72のケースでは小松・北田らによる弾塑性有限変位解析の結果によく一致し、他の幅厚比パラメータケースにおいても解析結果の平均値程度で一致していることがわかる。

c) 圧縮強度・変形性能およびエネルギー吸収性能による比較

全解析ケースの最大圧縮力と変形能として95%耐力時の変形量の比較は、図-7および図-8に示す通りである。図中の縦軸は解析によって得られた最大圧縮力、または変形量をそれぞれの幅厚比パラメータ

におけるテーパ率が零の板（基本ケース）の最大圧縮力、または変形量によりそれぞれ除した無次元化量である。また図中の横軸はテーパ率 TPR を表している。

図-7より、最大圧縮力については、中央部分が厚い凸型のTP-CVモデルでは、幅厚比パラメータが大きくなるほど、テーパ率が大きくなるほど、(グラフは示していないが)板厚比が小さくなるほど、最大圧縮力は小さくなる傾向にある。ただし、幅厚比パラメータが小さいTP-CV-0.22, TP-CV-0.40については、最大圧縮力の低下はほとんど見られない。一方、側辺近傍が厚い凹型のTP-CCモデルでは、幅厚比パラメータが大きくなるほど最大圧縮力は大きくなる傾向にある。また、テーパ率が大きくなるほど、(グラフは示していないが)板厚比が小さくなるほど、最大圧縮力は大きくなる傾向にある。ただし、比較的厚い板厚を有する幅厚比パラメータが0.22,

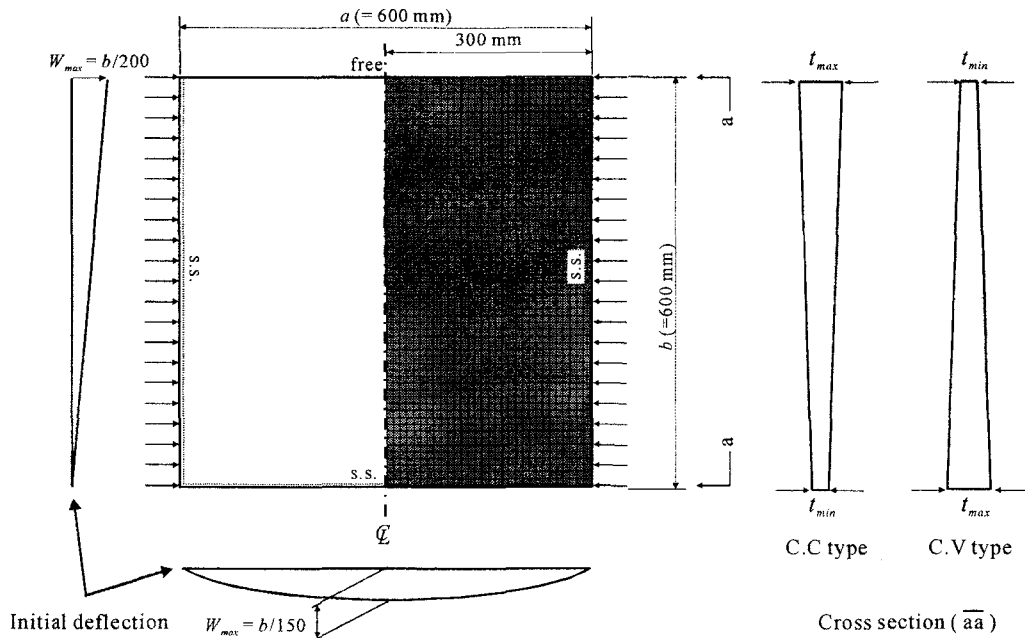


図-9 自由突出板解析モデルの概要

0.40, 0.72のTP-CC-0.22, TP-CC-0.40, TP-CC-0.72のケースにおいては大きな最大圧縮力の変化は見られない。特に、TP-CC-0.40のケースでは最大圧縮力の変化はないと言える。

変形能については、図-8より基本的には最大圧縮力と同様の傾向が認められる。しかしながら、TP-CCモデルでは、最大圧縮力の示す傾向と異なる傾向も見られる。具体的には、幅厚比パラメータが0.22, 0.40および1.20であるTP-CC-0.22, TP-CC-0.40, TP-CC-1.20のケースではテーパ率が大きくなるに伴って変形能が大きく増大するが、幅厚比パラメータが1.80であるTP-CC-1.80のケースでは変形性能が減少している。また、幅厚比パラメータが0.72であるTP-CC-0.72のケースでは、テーパ率が0.01より大きい範囲で変形能が減少している。これは側辺部が厚いTP-CCタイプであっても、幅厚比パラメータが大きい、すなわち板厚の薄い板の場合では、変形能の向上効果が見られず、低下する場合もあることを示している。

また、本論文ではグラフを示していないものの、エネルギー吸収能については変形能とほぼ同じ傾向を示していた。

3. 幅方向テーパを有する自由突出板

(1) 弾塑性有限変位解析モデルの概要

解析対象とする1辺自由3辺単純支持正方形板(アスペクト比 $\alpha = 1$)の概要、および有限要素解析における要素分割状況を図-9に示す。断面形状としては単純支持辺で板厚が薄い凹型(concavity,

C.Cタイプ)のものと、単純支持辺で最も板厚が厚い凸型(convexity, C.Vタイプ)の2種類を設定した。

解析には単純支持板の場合と同様に汎用構造解析コードABAQUS¹⁵⁾を用い、低減積分4節点シェル要素(S4R)により正方形板をモデル化した。

解析モデルは対称性を考慮して1/2モデル(図-9の斜線部)とし、幅方向テーパ、すなわち荷重載荷方向と直角の方向に板厚が変化するように設定した。また、分割は図中に示すように60×30分割を基本とした。境界条件は1辺自由3辺単純支持とし、載荷は強制変位によることとした。また、初期不整については、道路橋示方書・同解説¹⁶⁾で規定される製作基準の許容値を参考に、図-9中に示すように幅方向には線形に幅直角方向にはsin半波形の初期たわみを導入した。残留応力については、単純支持板の場合と同様に今回は考慮しないこととした。

また鋼材の機械的性質、および応力-ひずみ関係についても単純支持板の場合と同一とした。

(2) 解析ケース

本解析でも極限圧縮強度や変形性能に与える板厚変化の影響を調べるために幅厚比パラメータおよびテーパ率を変化させたパラメトリック解析を行った。解析ケースの設定にあたっては、2章と同様にテーパ率が零である平板(板厚が一定)を基本モデルに、その断面積を一定のまま単純支持側辺部と自由辺部の板厚を調整し、テーパ率を変化させた。また、幅厚比パラメータの影響を調べるために、平均板厚として18.4, 27.6, 46.0, 83.0mmを設定し、

幅厚比パラメータを1.80, 1.20, 0.72, 0.40と変化させた。板厚の変化形状については、板厚が単純支持辺に近づくほど小さくなる凹型のモデル (concave type, C.Cタイプ) と板厚が単純支持辺に近づくほど大きくなる凸型(convex type, C.Vタイプ)のモデルの2つを設定した (図-9参照)。また、解析ケース名の表記方法は単純支持板の場合と同様とした。

ここで、幅厚比パラメータ (R)、テーパー率 (TPR) はそれぞれ式(1),(2)で定義される。なお、自由突出板 (幅 b , 長さ a) の座屈係数については、式(3)のように与える場合¹⁹⁾もあるが、ここでは、文献20)を参照し、 $k=0.425$ としている。

$$k = 0.42 + \frac{b^2}{a^2} \quad (3)$$

(3) 自由突出板の解析結果および考察

a) 荷重-変位関係

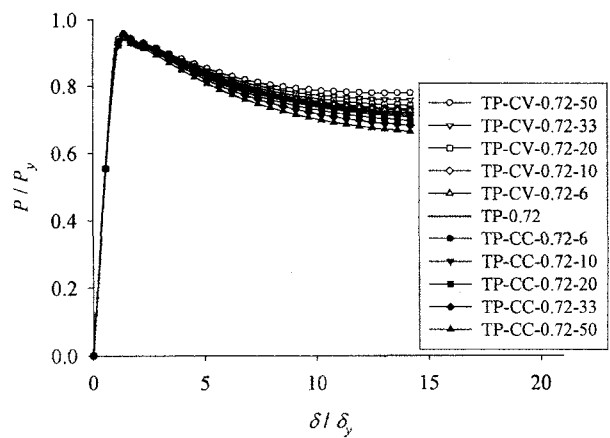
圧縮荷重と面内変位 (縮み) の関係の一例として、幅厚比パラメータが 0.72, 1.20, および 1.80 の解析結果を図-10 に示す。同図より、3 ケースとも凸型の TP-CV モデルではテーパー率が大きいものほど最大圧縮力が大きく、凹型の TP-CC モデルではテーパー率が大きくなるほど最大圧縮力が小さくなっている。この傾向は、他の幅厚比パラメータのケースにおいても同様であった。また、幅厚比パラメータが大きくなるほど、すなわち、板の後座屈強度が期待できるような場合ほど、テーパー率が変化することによって生じる最大圧縮力の変化量は大きくなる傾向がある。

このように、同じ平均板厚であっても、幅方向の板厚を変化させた場合に最大圧縮力に違いが生じるのは、単純支持側辺部での板の塑性化の進行によるものと考えられる。1辺自由3辺単純支持板の場合、一般に単純支持側辺部から塑性化が始まる。TP-CV モデルでは単純支持側辺部の板厚が厚く、単純支持側辺部近傍が負担する荷重が大きいため、最大圧縮力は増大する。逆に、TP-CC モデルではテーパー率が大きくなると、単純支持側辺部がより薄くなるため最大圧縮力は減少したと考えられる。また、支持側辺部の形状に着目すれば、単純支持板の解析結果とほぼ同様の傾向にあることがわかった。

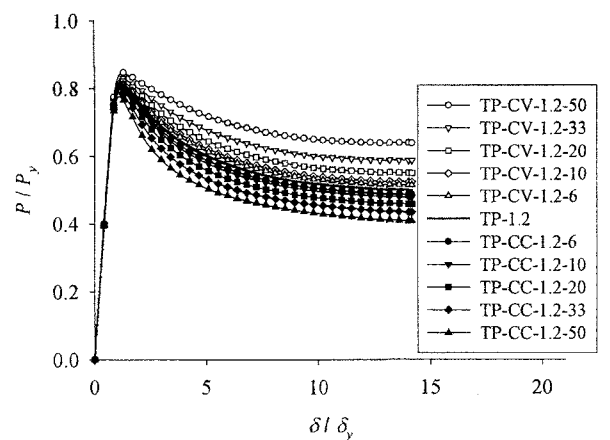
b) 耐荷力曲線

本解析で得られた結果と耐荷力曲線との比較を図-11 に示す。図中には Euler の弾性座屈曲線、道路橋示方書¹⁶⁾で規定される耐荷力曲線、および座屈設計ガイドライン²⁰⁾に示される耐荷力曲線も併せて示した。

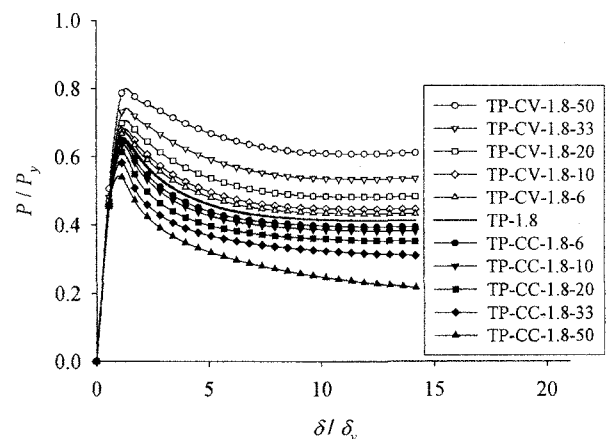
単純支持板の場合と同様に、幅厚比パラメータ R



(a) $R=0.72$



(b) $R=1.20$



(c) $R=1.80$

図-10 圧縮力-縮み関係

が 1.8 の場合にテーパー率の変化による圧縮耐力の変化が最も大きいことがわかる。後座屈強度が期待できる幅厚比パラメータでは、テーパー率の変化の影響を強く受けると言える。また、幅厚比パラメータ R が 0.72 以下の場合では、テーパー率および板形状の違いによる圧縮耐力の差異は小さくなっている。ひずみ硬化による圧縮耐力の向上が見られる R

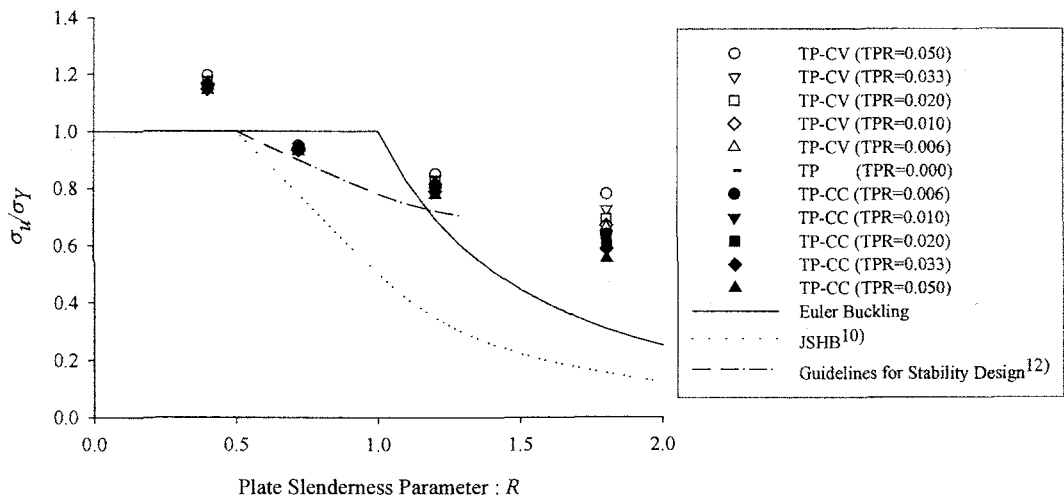


図-11 耐力力曲線

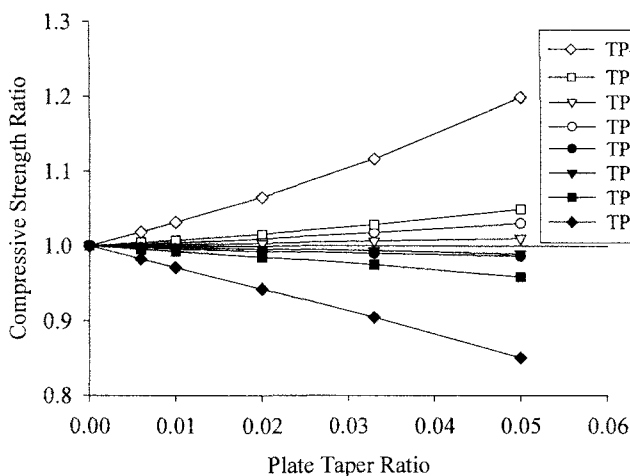


図-12 最大圧縮強度とテーパ率の関係

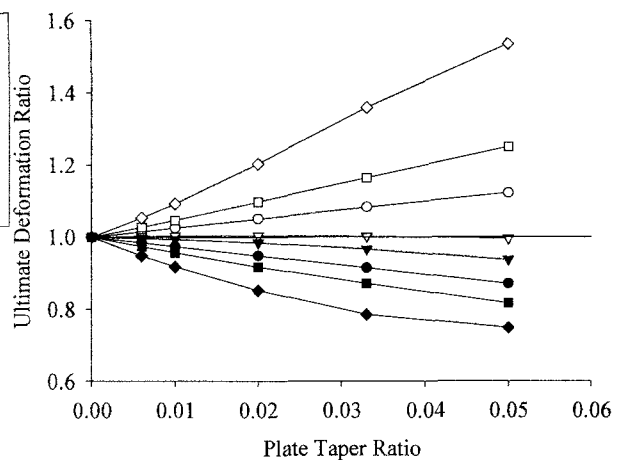


図-13 変形性能とテーパ率の関係

に対しては、逆に耐力に若干の変動が見られる。これは、座屈によるたわみが大きくなる前に、板が全断面降伏状態となるためと考えられる。

c) 圧縮強度・変形性能およびエネルギー吸収性能による比較

全解析ケースの最大圧縮力、および変形能として95%耐力時の変形量の比較を図-12、図-13に示す。図中の縦軸は解析によって得られた最大圧縮力、または変形量をそれぞれの幅厚比パラメータにおけるテーパ率が零の板（基本ケース）の最大圧縮力、または変形量によりそれぞれ除した無次元化量である。また図中の横軸はテーパ率 TPR を表している。

図-12 より最大圧縮力については、支持辺が厚い TP-CV モデルでは、幅厚比パラメータが大きくなるほど、テーパ率が大きくなるほど、また（グラフは示していないが）板厚比が小さくなるほど最大圧縮力が大きくなる傾向にある。一方、支持辺が薄い TP-CC モデルでは幅厚比パラメータが大きくなるほど最大圧縮力は小さくなる傾向にある。また、テ

ーパー率が大きくなるほど、（グラフは示していないが）板厚比が小さくなるほど、最大圧縮力は小さくなる傾向にある。ただし、比較的厚い板厚を有する幅厚比パラメータが 0.40、0.72 の TP-CC-0.40、TP-CC-0.72 のケースにおいては大きな最大圧縮力の変化は見られない。特に、TP-CC-0.72 のケースでは最大圧縮力の変化はないと言える。

変形能については、図-13 より基本的には最大圧縮力と同様の傾向にあることが認められる。エネルギー吸収能については、本論文ではグラフを示していないものの、変形能とほぼ同じ傾向を示していた。

4. 幅方向テーパフランジを有する箱形断面橋脚柱の荷重-変形関係

(1) 弾塑性有限変位解析モデルの概要

対象とする箱形断面橋脚柱モデルの概要を図-14に示す。

本解析モデルは、フランジ幅 145.8mm、ウェブ幅

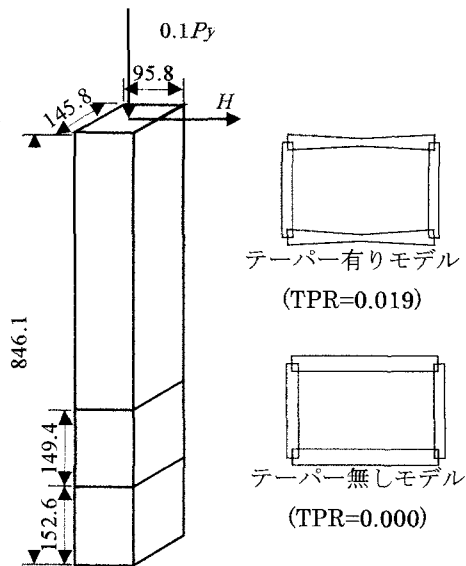


図-14 解析モデル (寸法単位 : mm)

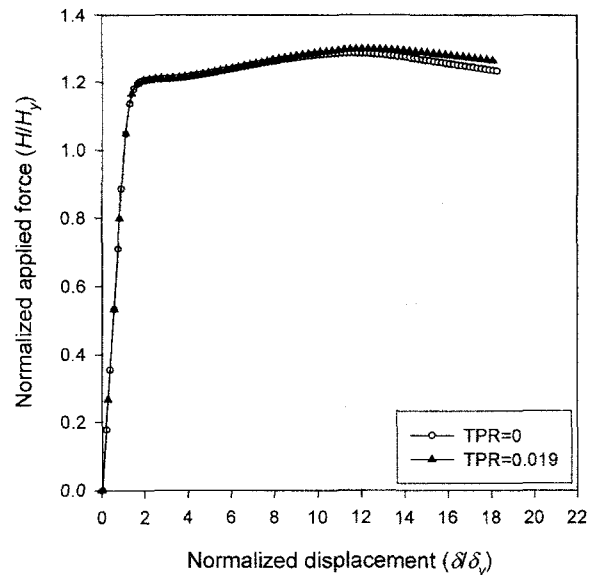


図-15 水平荷重-水平変位関係 ($R=0.4$)

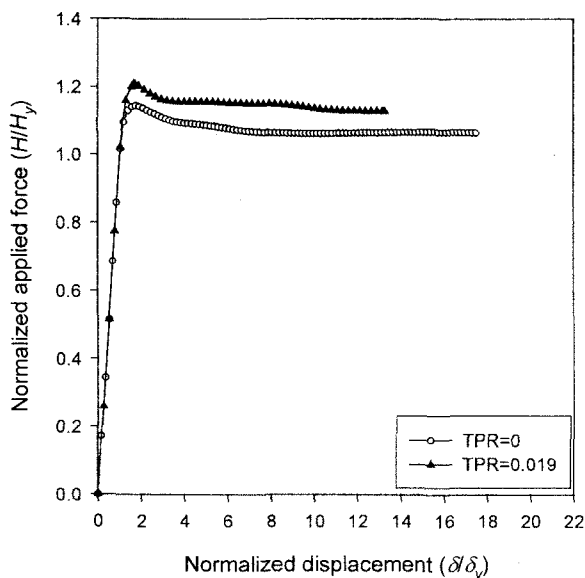


図-16 水平荷重-水平変位関係 ($R=1.2$)

95.8mmの長方形断面を有し、高さは846.1mmである。フランジ断面形状をパラメータ(等厚板と変厚板)とし、等厚モデルのフランジ板の幅厚比パラメータ(R)を0.4および1.2と設定した。また、細長比パラメータは、0.4であり、降伏軸力の10%の軸圧縮力を与えた。一方、変厚モデルは、2.と同様に、等厚モデルと断面積が等しくなるように最大板厚および最小板厚を決定し、フランジ中央部の板厚が小さい凹型(C.Cタイプ)とし、テーパー率として0.019を有している。また、ウェブ板厚は一定とし、等厚モデル、変厚モデルで同一であり、ウェブ板の降伏・座屈が支配的にならないよう、幅厚比パラメータは、十分小さく0.22とし、変厚モデルの最大板厚を採用している。

なお、本解析で用いた材料定数は、鋼板の解析に用いた表-1および図-4に示す通りである。

(2) 解析結果および考察

水平荷重と水平変位の関係を、等厚モデル($TPR=0$)および変厚モデル($TPR=0.019$)の結果を比較して、幅厚比パラメータ $R=0.4$ および $R=1.2$ のそれぞれのケースについて、図-15および図-16に示す。図-15より、幅厚比パラメータ $R=0.4$ 場合、変厚モデル($TPR=0.019$)の場合の最大水平耐力および最大耐力時の水平変位は、等厚モデル($TPR=0$)の場合のそれらより約1%および6.3%程度それぞれ上昇している。また、図-16より、幅厚比パラメータ $R=1.2$ の場合においても、変厚モデル($TPR=0.019$)の場合の最大水平耐力は、等厚モデル($TPR=0$)のそれより、約5.6%上昇している。このように、凹型フランジを用いることにより水平保有耐力ならびに変形能が向上することがわかる。

5. 結論

本研究では、板幅方向にテーパーを有する鋼製の周辺単純支持板と自由突出板の圧縮強度、変形性能およびエネルギー吸収性能を検討するために、テーパー率、幅厚比パラメータを変化させ、弾塑性有限変位解析を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 周辺単純支持板では、側辺の板厚が厚く中央部が薄い凹型のTP-CCタイプにおいて、テーパー率の増加に伴って圧縮耐力、変形能およびエネルギー

一吸収能の増大が見られた。一方、側辺の板厚を薄く、中央部を厚くした凸型の TP-CV タイプでは、テーパ率の増加に伴いそれらは減少した。

- (2)自由突出板では、単純支持側辺部の板厚を厚く、自由辺部を薄くした凸型の TP-CV タイプにおいて、テーパ率の増加に伴って圧縮耐力、変形能およびエネルギー吸収能の増大が見られた。一方、自由辺部の板厚を厚く、対辺の単純支持辺部を薄くした凹型の TP-CC タイプでは、テーパ率の増加に伴いそれらは減少した。
- (3)単純比較はできないものの、支持辺部の形状に着目すれば、周辺単純支持板と自由突出板の圧縮強度、変形性能およびエネルギー吸収能は同様の傾向を示す。
- (4)本研究では、正方形板を対象とし幅方向テーパ鋼板の有用性を確認した。今後は他のアスペクト比に対しても同様にパラメトリック解析を行い、幅方向テーパを有する周辺単純支持板、自由突出板の耐荷力を定量的に評価する必要がある。
- (5)本解析では、初期不整として初期たわみのみを考慮した。初期不整としての鋼板残留応力の設定方法については、圧延時ならびに溶接時に導入される残留応力の実計測を基に設定する必要がある。

なお、今後は、本研究で対象とした幅方向テーパ鋼板を用いた鋼桁・鋼製脚を対象とし、解析および載荷実験により、組合せ荷重作用下における力学的挙動を明らかにした上で、耐荷力、変形性能およびエネルギー吸収能に与えるテーパの効果について幅広い視点から検討し、その有用性を確認する必要がある。

5. 謝辞：本研究で行った自由突出板の FEM 解析では、神鋼鋼線株式会社の橋本国太郎氏（当時大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程 2 回生）に多大な協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会・合理化桁の設計法研究小委員会：合理化桁に関するデザインマニュアル，pp. 205-260，2000.
- 2) 堀田毅，谷俊寛，工藤純一，西村宣男：鋼橋への LP 鋼板の適用，橋梁と基礎，pp.11-14，2000.4.
- 3) 例えば，JFE カタログ：JFE の LP 鋼板（テーパプレート），JFE スチール，Cat.No.C1J-014-00.
- 4) 堀田毅，西村宣男，村上茂之，滝英明：テーパプレートフランジ桁の耐荷力特性と設計法，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，第 4 巻，pp. 257-264，1996.
- 5) 奈良敬，村上茂之，都竹哲朗，森脇幸次，庄司真：圧延変厚鋼板をフランジに用いた鋼 I 桁の曲げ載荷試験，鋼構造論文報告集，日本鋼構造協会，第 10 巻，pp. 181-188，2002.
- 6) 例えば，谷俊寛，西前博一，岡村公司：テーパプレートをフランジ材に用いた I 桁の施工試験—上信越自動車道深沢川橋（鋼上部工）工事—，高田機工技報，No.11，pp.16-21，1995.
- 7) 建設省土木研究所，首都高速道路公団，阪神高速道路公団，名古屋高速道路公社，(社)鋼材倶楽部，(社)日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(I)～(VII)，1997 年 4 月.
- 8) 宇佐美勉：ハイダクティリティー鋼製橋脚，橋梁と基礎，pp.30-36，1997 年 6 月.
- 9) 上野谷実，中村雅樹，福本晴士，山本定弘：板厚テーパ箱形断面柱の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.9，No.33，pp.25-35，2002 年 3 月.
- 10) 上野谷実，中村雅樹，佐野裕之，福本晴士，山本定弘：板厚テーパ補剛板を用いた箱形断面柱の繰返し性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.115-125，2003 年 3 月.
- 11) 酒造敏廣，川田真也：部分テーパ付きはり一柱の弾塑性履歴性状に関する基礎的実験，土木学会論文集，No.647/I-51，pp.331-342，2000 年 4 月.
- 12) 熊野拓志，青木徹彦，塚本芳正，K.A.S.SUSANTHA：テーパ鋼板（LP 鋼板）を有する鋼製橋脚の強度と変形性能に関する実験的研究，土木学会論文集，No.794/I-72，pp.267-280，2005 年 5 月.
- 13) 奈良敬，蓑島茂樹：変厚鋼板を腹板に用いた鋼桁断面の極限曲げ強度，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，第 5 巻，pp. 255-260，1997.
- 14) 杉浦邦征，山口隆司，熊野拓志，渡邊英一：板幅方向にテーパを有する鋼製周辺単純支持板の圧縮強度と変形能，土木学会論文集，No. 780/I-70，pp. 231-239，2005.
- 15) Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. : ABAQUS/Standard User's Manual Volume I-III Version 6.3, 2002.
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，丸善，2002.
- 17) 長谷川彰夫，宇佐美勉：鋼板要素の座屈後における有効幅理論と設計への適用，土木学会論文報告集，土木学会，第 315 号，pp.157-160，1981. 11.
- 18) 小松定夫・北田俊行：初期不整を有する圧縮版の極限強度特性に関する研究，土木学会論文集，No.270，pp.17-30，1978.2.
- 19) Column Research Committee of Japan : Handbook of structural stability, Corona Publishing Company,

1971.

20) 土木学会:座屈設計ガイドライン(改訂第2版 2005年版), 鋼構造シリーズ 12, 2005.