H 形断面短柱の変形性能に及ぼす素材特性の影響に関する研究 その1

EFFECTS OF MATERIAL PROPERTIES ON DEFORMATION CAPACITY OF H-SECTION STUB-COLUMNS PART 1

小野 徹郎*, 吉田 文久**

Tetsuro ONO and Fumihisa YOSHIDA

This paper describes the effects of material properties on the local buckling strength and deformation capacity of H-section stub-columns. The local buckling and the post local buckling behavior of H-section stub-columns are analyzed by the plastic hinge line analysis. The analytical variables are the width-thickness ratios of component plates and the material properties, such as tensile strength, strain at initial strain hardening and strain hardening modulus. In this study, a modified complementary energy is proposed as an important parameter on the energy absorption capacity of the structural member. From the analytical results, the local buckling strength and the deformation capacity of the stub-column are influenced by the modified complementary energy index. In order to evaluate the deformation capacity of structural member, the material properties of the plastic range, such as a modified complementary energy, should be considered.

Keywords: material properties, local buckling, stub-column, deformation capacity, modified complementary energy, plastic hinge line analysis

素材特性、局部座屈、短柱、変形性能、修正補エネルギー、塑性ヒンジ線解析

1. 序

近年、建築の多様化が進むにつれて多くの新素材の開発、既往の素材の建築への適用が進められ、実用化に向けての研究およびデータの蓄積が盛んに行われている¹⁾。鋼構造物に使用される素材は多様化の傾向にあり、従来から用いられている普通鋼に加えて、高張力鋼、低降伏点鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、さらには降伏応力度の上限および降伏比を規定した鋼材や、降伏比の小さい高張力鋼など種々の素材が適用されつつある。これらの素材の応力-歪関係をみると、素材によってそれぞれ異なる曲線を描き、また引張強さ、降伏比、明確な降伏点の有無、塑性流れ域の長さ、歪硬化域での勾配など各素材特性値も素材によって大きな違いが見られる²⁾。従って素材特性を降伏点あるいは引張強さのみで規定した体系では、素材の完全な応力-歪特性が反映されず、構造設計の多様化に対応できない。例えば、地震時のエネルギー吸収能力を高めるための耐震デバイスにおいては、降伏応力度が低く伸び能力の大きい素材として低降伏点鋼の適用が図られている。また大スパン構造物や大地震時でも弾性を保ちたい構造物においては、降伏応力度や引張強さの大きい素材が要求されている^{3), 4)}。構造物に要求される多様な要求性能に対して、各素材の特性を十分に活かして合理的な設計を行うためには、各素材の持つ素材特性を把握するとともに、素材特性と部材の弾塑性挙動の関係を明

確にすることが重要である。

構造部材が局部座屈により終局限界状態に至る場合、座屈耐力と並んで変形性能を把握することが重要となっている。この部材の変形性能に関わる素材特性値とは何か。まず降伏比を上げることができる。降伏比を低く抑えることにより、部材に生じる塑性化領域が拡大し、それに伴い部材の変形性能が向上すると考えられている⁵⁾。しかし塑性化領域が拡大しても、その領域における伸び能力が小さければ、部材の変形性能の向上には繋がらない。従って部材の変形性能に関わる素材特性の指標としては、降伏比ばかりでなく伸び能力についても考慮した指標でなければならない。金属系素材の応力-歪曲線の形は様々であり、降伏比、塑性流れ域の長さ、歪硬化域での勾配など素材特性を規定する諸量もそれぞれ異なる。部材の変形性能を規定する指標としては、それぞれの素材特性値を独立に考えるのではなく、総合的に評価する指標が望ましい^{6), 7)}。

本報(その1)では、金属系素材の素材特性と部材の局部座屈後の最大耐力と変形性能の関係を明らかにすることを目的として、短柱圧縮実験⁸⁾を想定した塑性ヒンジ線理論に基づく解析を行う。この解析では、素材特性として引張強さ、降伏比、塑性流れ域の長さ、歪硬化域における勾配をパラメータとし、部材の弾塑性挙動に対する各素材特性値の関わり方が明確にされる。また部材の局部座屈後の最大耐力

* 名古屋工業大学工学部社会開発工学科建築系 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

** 大和ハウス工業株式会社総合技術研究所 博士(工学)

Daiwa House Industry Co., Ltd., Central Research Laboratory Dr. Eng.

および変形性能に関わる素材特性の指標として修正補エネルギー比を提示する⁹⁾。そして、この修正補エネルギー比と短柱の最大耐力および変形性能の間に強い相関性があることを示し、部材レベルにおける素材特性の指標としての有用性を示す。

2. 解析方法

解析は文献10)と同様に、塑性ヒンジ線を仮定した解析法を用いて行う^{11)~15)}。基本的な解析方法は文献10)と同様である。本解析で基本となる仮定を以下に示す。

1) 解析対象は、断面のせいと幅の等しい広幅のH形断面短柱である。H形断面短柱の局部座屈崩壊メカニズムを図1のように仮定する。短柱の塑性変形は図のグレーで塗られた塑性変形領域における変形と、太線で示される塑性ヒンジ線における回転に集約し、他の部分は剛体と考える。

2) 図2にフランジおよびウェブ要素の局部座屈崩壊メカニズムを示す。短柱および板要素の崩壊メカニズムは、 λ で示される局部座屈半波長および載荷軸方向とヒンジ線DE (HJ) のなす角度 ϕ 、局部座屈半波の数 n により変化すると仮定する。

3) 塑性ヒンジ線における中立軸は、降伏応力 σ_y を受けたときの釣り合いから得られる中立軸で一定と仮定する。また塑性ヒンジ線における板厚方向の歪およびせん断歪は考慮しない。

4) 塑性変形領域では一軸応力の状態で塑性変形すると仮定する。

5) 素材特性は降伏比、塑性流れ域の長さ、歪硬化域における勾配、引張強さをパラメータとし、図3に示すように4直線で表現する。また本解析では真応力-対数歪関係を用いて、計算を行う。

6) 短柱の最大耐力点は、素材の圧縮応力-歪曲線と解析から導かれる崩壊曲線の交点とする。

基本的な解析手順は、まず仮定した崩壊メカニズムに対して軸方向変位 δ を与えた場合の、外力による仕事量と内部仕事量の釣り合いを次式のように表す。

$$\int N d\delta = \sum W_H + \sum W_D \quad (1)$$

ここで N は短柱が受ける軸力、 δ は短柱の軸方向変位、 W_H は塑性ヒンジ線における内部仕事量、 W_D は塑性変形領域における内部仕事量

図1 H形断面短柱の局部座屈崩壊メカニズム

図2 板要素の崩壊メカニズム

表1 塑性ヒンジ線の歪場における歪および体積

	ヒンジ回転角	慣用歪	対数歪	ヒンジの長さ	ヒンジ圧縮側体積	ヒンジ引張側体積
AD	$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\delta}{\lambda}\right)$	$\epsilon_{AD}^{\pm} = \pm \frac{\alpha}{2}$	$a \epsilon_{AD}^{\pm} = \pm \ln\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)$	$l_{AD} = b$	$V_{AD}^{+} = b \eta^2 t^2$	$V_{AD}^{-} = b(1 - \eta)^2 t^2$
BE	$\beta = 2\alpha = 2 \arccos\left(1 - \frac{\delta}{\lambda}\right)$	$\epsilon_{BE}^{\pm} = \pm \alpha$	$a \epsilon_{BE}^{\pm} = \pm \ln(1 + \alpha)$	$l_{BE} = b - \frac{\lambda}{2} \tan \phi$	$V_{BE}^{+} = \left(b - \frac{\lambda}{2} \tan \phi\right) \eta^2 t^2$	$V_{BE}^{-} = \left(b - \frac{\lambda}{2} \tan \phi\right) (1 - \eta)^2 t^2$
DE	$\gamma = \arccos\left(\frac{(\lambda - \delta) \tan \phi}{\sqrt{\lambda^2 \tan^2 \phi + 2\lambda\delta - \delta^2}}\right)$	$\epsilon_{DE}^{\pm} = \pm \frac{\gamma}{2}$	$a \epsilon_{DE}^{\pm} = \pm \ln\left(1 + \frac{\gamma}{2}\right)$	$l_{DE} = \frac{\lambda}{2 \cos \phi}$	$V_{DE}^{+} = \frac{\lambda}{2 \cos \phi} \eta^2 t^2$	$V_{DE}^{-} = \frac{\lambda}{2 \cos \phi} (1 - \eta)^2 t^2$
HK	$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\delta}{\lambda}\right)$	$\epsilon_{HK}^{\pm} = \pm \frac{\alpha}{2}$	$a \epsilon_{HK}^{\pm} = \pm \ln\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)$	$l_{HK} = \frac{d}{2}$	$V_{HK}^{+} = \frac{d}{2} \eta^2 t^2$	$V_{HK}^{-} = \frac{d}{2} (1 - \eta)^2 t^2$
JO	$\beta = 2\alpha = 2 \arccos\left(1 - \frac{\delta}{\lambda}\right)$	$\epsilon_{JO}^{\pm} = \pm \alpha$	$a \epsilon_{JO}^{\pm} = \pm \ln(1 + \alpha)$	$l_{JO} = \frac{d}{2} - \frac{\lambda d}{4b} \tan \phi$	$V_{JO}^{+} = \left(\frac{d}{2} - \frac{\lambda d}{4b} \tan \phi\right) \eta^2 t^2$	$V_{JO}^{-} = \left(\frac{d}{2} - \frac{\lambda d}{4b} \tan \phi\right) (1 - \eta)^2 t^2$
HJ	$\gamma = \arccos\left(\frac{(\lambda b - \delta) \tan \phi}{\sqrt{\lambda^2 \tan^2 \phi + 2\lambda\delta - \delta^2}}\right)$	$\epsilon_{HJ}^{\pm} = \pm \frac{\gamma}{2}$	$a \epsilon_{HJ}^{\pm} = \pm \ln\left(1 + \frac{\gamma}{2}\right)$	$l_{HJ} = \frac{\lambda d}{4b \cos \phi}$	$V_{HJ}^{+} = \frac{\lambda d}{4b \cos \phi} \eta^2 t^2$	$V_{HJ}^{-} = \frac{\lambda d}{4b \cos \phi} (1 - \eta)^2 t^2$

である。軸力 N は式(1)を δ で微分することにより導かれる。

$$N = \sum \frac{dW_H}{d\delta} + \sum \frac{dW_D}{d\delta} \quad (2)$$

すなわち、ある微小変位 $d\delta$ を与えたときに、各塑性ヒンジ線および塑性変形領域における内部仕事量の増分 dW_H 、 dW_D を求め、それらの和を $d\delta$ で除す。軸変位を順次増加させて、各変位ステップ毎にこれを繰り返し行うことにより、局部座屈に伴う短柱の崩壊曲線が導かれる。仮定6)より、この崩壊曲線と素材の圧縮応力-歪曲線の交点を求めることにより、短柱の最大耐力時の応力 σ_{cal} および最大耐力時の歪 ϵ_{cal} が導かれる。

表1に仮定したH形断面短柱について、軸方向変位が δ の場合の各塑性ヒンジ線における回転角 ρ 、歪 ϵ_H 、対数歪 ϵ_{sH} 、各塑性ヒンジ線の長さ l_H 、圧縮側の塑性変形領域の体積 V^+ 、引張側の塑性変形領域の体積 V^- を示す。崩壊メカニズムの対称性から板要素半分について示している。塑性ヒンジ線における内部仕事量および塑性変形領域における内部仕事量の計算の詳細については文献10)に示されている。

3. 素材特性をパラメータとした解析

前節で述べた解析方法を用いて、素材特性について引張強さ、降伏比、塑性流れ域の長さ歪硬化域の勾配を変数としたパラメトリックな解析を行い、短柱の最大耐力および変形性能に対する各素材特性値の関わり方について考察する。

想定する素材の応力-歪関係は、図3に示すように4直線で表された応力-歪モデルである。解析パラメータは、表2に示すように引張強さ σ_u 、降伏比 σ_y/σ_u 、歪硬化係数 E_{st}/E と歪硬化開始点の歪 ϵ_{st}/ϵ_y である。引張強さに対して4つ、その他の変数に対して5つの特性値を設定する。従って本解析では $4 \times 5 \times 5 \times 5 = 500$ 通りの素材特性を想定している。また図3において、グレーで塗られた部分を歪エネルギー SE 、黒塗りの部分を修正補エネルギー CE と定義し、短柱の最大耐力および変形性能を支配する指標と考える。解析対象は $50 \times 50 \times 3 \times 3$ mmの広幅H形断面で、材長は断面せいの3倍の150mmとする。

図4は、引張強さ $\sigma_u = 400 \text{ N/mm}^2$ の解析結果について、短柱の最大耐力時の応力 σ_{cal} と素材の降伏比の逆数 $1/YR$ との関係を示したものである。同じ引張強さを持つ場合、最大耐力時の応力 σ_{cal} は降伏比の逆数 $1/YR$ が大きくなるに従って小さくなる。しかし短柱の最大耐力時の応力は、降伏比ばかりでなく塑性流れ域の長さや歪硬化勾配などの素材特性値にも影響され、降伏比で整理した場合のばらつきは大きい。

図5は全ての解析結果について、引張強さ σ_u に対する最大耐力時の応力 σ_{cal} の比 σ_{cal}/σ_u と、素材の降伏比の逆数 $1/YR$ との関係を示したものである。引張強さ σ_u が変化した場合も、最大耐力時の応力 σ_{cal} は降伏比の逆数 $1/YR$ が大きくなるに従って小さくなるが、降伏比で整理した場合のばらつきは、図4に比較して更

に大きくなる。

図6は引張強さ $\sigma_u = 400 \text{ N/mm}^2$ の解析結果について、最大耐力時の応力 σ_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y との関係を示したものである。修正補エネルギー比は、修正補エネルギー CE を降伏応力 σ_y で無次元化したものである。最大耐力時の応力 σ_{cal} は、修正補エネルギー比 CE/σ_y が大きくなるに従って小さくなる。最大耐力時の応力 σ_{cal} を修正補エネルギー比 CE/σ_y で整理した場合のばらつきは、降伏比の逆数 $1/YR$ で整理した場合に比べて小さく、良い相関関係が見られる。

図7は全ての解析結果について、引張強さ σ_u に対する最大耐力時の応力 σ_{cal} の比 σ_{cal}/σ_u と修正補エネルギー比 CE/σ_y との関係を示したものである。引張強さで無次元化した最大耐力時の応力 σ_{cal}/σ_u は引張強さとは無関係に、修正補エネルギー比 CE/σ_y が大きくなるに従って小さくなり、良い相関関係が見られる。このように最大耐力時の応力 σ_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の間には良い相関関係が見られ、短柱

図3 応力-歪関係のモデル

表2 素材特性パラメータ

	i)	ii)	iii)	iv)	v)
$\sigma_u (\text{N/mm}^2)$	250	400	600	800	...
σ_y/σ_u	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
E_{st}/E	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
ϵ_{st}/ϵ_y	1	5	10	15	20

σ_u : 引張強さ、 σ_y : 降伏応力、 E : 弾性係数、 E_{st} : 歪硬化勾配、 ϵ_y : 降伏歪、 ϵ_{st} : 歪硬化開始時の歪

図4 $\sigma_{cal} - 1/YR$ 関係 ($\sigma_u = 400 \text{ N/mm}^2$)

図5 $\sigma_{cal}/\sigma_u - 1/YR$ 関係

図6 $\sigma_{cal} - CE/\sigma_y$ 関係 ($\sigma_u = 400 \text{ N/mm}^2$)

図7 $\sigma_{cal}/\sigma_u - CE/\sigma_y$ 関係

の最大耐力は修正補エネルギー比 CE/σ_y に強く影響されると考えられる。

図8は、引張強さ $\sigma_u=400\text{N/mm}^2$ の解析結果について、短柱の変形性能 μ_{cal} と降伏比の逆数 $1/YR$ の関係を示したものである。変形性能 μ_{cal} は降伏歪 ε_y に対する短柱の最大耐力時の歪 ε_{cal} の比である。変形性能 μ_{cal} と降伏比の逆数 $1/YR$ は単調増加の関係にあるが、降伏比の逆数が大きくなるに従ってばらつきは大きくなる。短柱の変形性能は降伏比ばかりでなく、塑性流れ域の長さや歪硬化勾配などの素材特性値に影響され、降伏比で整理した場合のばらつきは大きい。

図9は、引張強さ $\sigma_u=400\text{N/mm}^2$ の解析結果について、変形性能 μ_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の関係を示したものである。変形性能 μ_{cal} を修正補エネルギー比 CE/σ_y で整理すると、両者の間には縦軸に切片を持つ単調増加の関係が見られる。ここで現れる切片は、修正補エネルギー比がゼロ、すなわち素材特性を完全弾塑性体と仮定した場合に得られる変形性能である。変形性能 μ_{cal} を修正補エネルギー比 CE/σ_y で整理した場合の関係は、降伏比の逆数 $1/YR$ で整理した場合に比べてそのばらつきは小さい。このように変形性能 μ_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の間には良い相関関係が見られる。

図10は全ての解析結果について、変形性能 μ_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の関係を示したものである。各引張強さごとに変形性能 μ_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の間に単調増加の関係が見られ、それらの切片および傾きは各引張強さごとに異なる値となる。

図11は、最大耐力時の歪 ε_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の関係を示したものである。このように整理すると引張強さとは無関係に、最大耐力時の歪 ε_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の間には縦軸に切片を持つ単調増加の関係が見られる。この切片および傾きは、板要素の幅厚比に関係する量と考えられる。

このように短柱の最大耐力時の歪 ε_{cal} と補エネルギー比 CE/σ_y の間には良い相関関係が見られ、最大耐力時の歪 ε_{cal} は補エネルギー比 CE/σ_y に強く影響されると考えられる。

4. 素材特性と幅厚比をパラメータとした解析

前節では幅厚比を一定とし、素材特性を変化させて解析を行った。そして最大耐力時の歪 ε_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の間には縦軸に切片を持つ単調増加の関係が見られることを示した。本節ではさらに幅厚比をパラメータとした解析を行い、短柱の最大耐力時の歪と幅厚比および素材特性の関係について考察する。そして幅厚比と修正補エネルギー比を変数に持つ、短柱の最大耐力時の歪の予測式を導く。

解析パラメータは幅厚比と素材特性である。解析対象は前節と同様に広幅H形断面とし、フランジ幅厚比

図8 $\mu_{cal} - 1/YR$ 関係 ($\sigma_u=400\text{N/mm}^2$)

図9 $\mu_{cal} - CE/\sigma_y$ 関係 ($\sigma_u=400\text{N/mm}^2$)

図10 $\mu_{cal} - CE/\sigma_y$ 関係

図11 $\varepsilon_{cal} - CE/\sigma_y$ 関係

図12 $a - b/t_f$ 関係

図13 $b - b/t_f$ 関係

図14 $c - b/t_f$ 関係

は、 $b/t_f = 5.0 \sim 15.0$ の間で13種類の幅厚比を設定する。ウェブ幅厚比は、フランジ幅厚比の2倍となるように設定する。それぞれの幅厚比に対して設定する素材特性は、前節と同様に500種類である。

素材特性と幅厚比をパラメータとして解析を行った結果、各幅厚比について図11と同様に最大耐力時の歪 ε_{cal} と修正補エネルギー比 CE/σ_y の間には、縦軸に切片を持つ単調増加の関係が得られた。

ここで ε_{cal} と CE/σ_y の間に次の関係式が成立すると仮定し、回帰式を求めた。

$$\varepsilon_{cal} = a \left(\frac{CE}{\sigma_y} \right)^b + c \quad (3)$$

図11に示す曲線は、幅厚比 $b/t_f = 8.33$ の場合の近似曲線で、図中に示す式は回帰式である。このようにして各幅厚比ごとに回帰を行い未定係数 a 、 b 、 c の値を求めた。

図12は係数 a と幅厚比 b/t_f の関係を示したものである。縦軸に係数 a 、横軸に幅厚比 b/t_f をとっている。係数 a と幅厚比 b/t_f の関係について回帰を行い、次の関係式が得られた。

$$a = 8.13 \left(\frac{1}{b/t_f} \right)^2 \quad (4)$$

図13は係数 b と幅厚比 b/t_f の関係を示したものである。係数 b は幅厚比 b/t_f に関係なくほぼ一定と見なすことができる。 b の平均値は0.615である。

$$b = 0.615 \quad (5)$$

図14は係数 c と幅厚比 b/t_f の関係を示したものである。係数 c と幅厚比 b/t_f の関係について近似を行い、次の関係式が得られた。

$$c = 0.489 \left(\frac{1}{b/t_f} \right)^2 \quad (6)$$

式(4)～(6)を式(3)に代入すると、次式が得られる。

$$\varepsilon_{cal} = \left\{ 8.13 \left(\frac{CE}{\sigma_y} \right)^{0.615} + 0.489 \right\} \left(\frac{1}{b/t_f} \right)^2 \quad (7)$$

式(7)は幅厚比 b/t_f と修正補エネルギー比 CE/σ_y を変数とした、短柱の最大耐力時の歪 ε_{cal} の予測式である。

5. 結

以上、本報では短柱圧縮実験を想定した塑性ヒンジ線理論に基づく解析を行い、部材の局部座屈後の最大耐力および変形性能に及ぼす素材特性の影響についての考察を行った。特に部材の塑性局部座屈に影響を及ぼす素材特性の指標として修正補エネルギー比に着目し、塑性域における短柱の最大耐力および変形性能との関係について考察した。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 短柱の最大耐力時の応力と修正補エネルギー比の間には、強い相関性が見られる。修正補エネルギー比が大きくなるに従って、引張強さで無次元化した短柱の最大耐力時の応力は小さくなる。
- 2) 短柱の最大耐力時の歪と修正補エネルギー比の間には、強い相関性が見られる。修正補エネルギー比が大きくなるに従って、短柱の最大耐力時の歪は大きくなる。
- 3) 解析結果をもとに、幅厚比と修正補エネルギー比を変数とした、短柱の最大耐力時の歪の予測式を導いた。
- 4) 修正補エネルギー比を用いた指標により、各種素材を用いた部材

の変形性能を、塑性域における素材特性を反映した形で評価することが可能となる。鋼構造部材の変形性能を評価するためには、降伏応力度、引張強さや降伏比ばかりでなく、修正補エネルギー比のような塑性域の素材特性を代表する指標が有効である。

続報（その2）では、本研究の一環として行った、素材特性をパラメータとした短柱圧縮実験について報告する予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり貴重な御教示を頂きました、新日本製鐵株式会社・岩田衛博士に感謝申し上げます。また名古屋工業大学大学院生・伊藤直幸氏（現、大蔵省造幣局）、同大学院生・伊藤栄治氏には本研究を進めるに当たり御協力頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省建築研究所、(財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト 建設事業への新素材・新材料利用技術の開発報告書、金属系分科会、平成元年3月～平成5年3月
- 2) 上之郷貴重、小野徹郎、吉田文久、岩田 衛：金属系構造部材の局部座屈挙動における素材特性の影響（その1．素材特性の把握）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.265-266、1996.9
- 3) 岩田 衛：種々の鋼材の耐震設計への応用、*A New Direction in Seismic Design*, pp.171-194、1995.10
- 4) 岩田 衛：被害レベル制御設計法、建築雑誌、Vol.109、pp.42-44、1994.1
- 5) B. Kato : Deformation Capacity of Steel Structures, *New Directions in Steel Structures*, Elsevier Applied Science, pp.33-94、1990.11
- 6) 小野徹郎、尾崎 亮、岩田 衛：歪・補エネルギーによる素材特性と部材変形性能に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1139-1140、1993.9
- 7) 林 賢一、小野徹郎、岩田 衛：建築構造用鋼材の総合評価に関する考察（1）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.1063-1064、1994.9
- 8) Galambos, T. V. : *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 4th Edition, John Wiley & Sons, New York, 1988
- 9) 小野徹郎、上之郷貴重、吉田文久、岩田 衛、林 賢一：金属系素材の素材特性及び履歴挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第498号、pp.137-143、1997.8
- 10) 小野徹郎、石田和人、吉田文久：軸圧縮を受ける箱形断面短柱の局部座屈領域に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第493号、pp.107-114、1997.3
- 11) 加藤 勉、福知保長：板要素の変形能力について、日本建築学会論文報告集、第147号、pp.19-25、1968.5
- 12) Climenhaga J. J. and Johnson P. : Moment-Rotation Curves for Locally Buckling Beams, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol.98 No.ST6, pp.1239-1254, June 1972
- 13) 三谷 勲、牧野 稔、松井千秋：H形鋼柱の局部座屈後の変形状態に関する解析的研究 その1 単調載荷を受ける場合、日本建築学会論文報告集、第296号、pp. 37-47、1980.10、その2 繰返し荷重を受ける場合、日本建築学会論文報告集、第301号、pp. 77-86、1981.3
- 14) Ivanyi M. : *Steel Frame Stability, Stability Problems of Steel Structures*, pp.287-356, CISM, 1992
- 15) 安井信行、井上一朗：軸圧縮力を受ける円形鋼管の塑性局部座屈挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第446号、pp.117-126、1993.4

(1997年6月9日原稿受理、1997年8月20日採用決定)