

低降伏比高張力鋼を用いたH形断面部材の 曲げ強度と塑性変形能力について

BENDING STRENGTH AND DUCTILITY OF H-SECTION MEMBERS MADE OF
HIGH-STRENGTH STEEL WITH LOW-YIELD-RATIO

岩坪 要*, 小金丸 卓也**, 山尾 敏孝***, 崎元 達郎***

Kaname IWATSUBO, Takuya KOGANEMARU, Toshitaka YAMAO and Tatsuro SAKIMOTO

*工修 熊本大学 大学院自然科学研究科 環境科学専攻 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

**工修 第一復建コンサルタンツ(株) (〒812 福岡市博多区博多駅南3丁目5-28)

***工博 熊本大学 教授 工学部 環境システム工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

The ultimate strength and ductility of low-yield-ratio high-strength H-section steel members subjected to bending moment are studied experimentally and theoretically. A total of 16 specimens with various width-to-thickness ratios of the component plate is tested. The analysis method is based on finite element technique which can connect plate elements with beam element. Various types of high-strength steel plates were analyzed. They have the same tensile strength, while their yield-ratios and strain-hardening strains were different. Validity and efficiency of the present method are confirmed. The effect of yield-ratio and strain-hardening strain on the bending strength behavior and ductility of high-strength steel beams were examined.

Key Words: ultimate strength, low-yield-ratio, ductility, high-strength steel

1. まえがき

現在、鋼構造物の設計書式は従来の許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行しつつある。許容応力度設計法では、主として鋼材の降伏応力度が構造物に生じる応力の限界として使用されるため、鋼材の塑性強度を有効に活用できていないと思われる。例えば SM570 鋼は、現行の設計法において実際の強度の約43%しか評価していない^{1) 2) 3)}。一方、限界状態として終局限界を考える終局限界状態設計法は、座屈後の構造物の耐荷力を保証する設計法であるため終局耐力及び塑性変形能力が重要な評価指標となり、使用鋼材は降伏比が低い程よいとされている⁴⁾。

従来の高張力鋼 (SM570 鋼) の降伏比は 0.85~0.95 と高く、塑性変形能力が低くなり脆性的な挙動を示すので耐震用鋼材として使用するには問題があると考えられる^{5) 6)}。この様な背景を踏まえて、鉄鋼メーカーは熱加工制御法 (Thermo-Mechanical Control Process : TMCP) 等の製鋼・圧延技術の発達により鋼材の機械的性質を幅広く制御することがある程度可能になってきており、降伏点を高く保ち降伏比を 0.75 程度に抑えている低降伏比高張力鋼 (以後、LYR 鋼と称する) が開発されつつあ

る。

この LYR 鋼は、建築分野において実際に使用されているが、土木分野で構造部材として使用された実績があまりないことから、今後耐震部材として用いることを目標として研究が進められている。

著者らは、現在までに種々の幅厚比を有する H 形断面薄肉短柱が、純圧縮挙動を受ける場合の耐荷力や変形能について実験及び解析を行って調べてきた^{12) 13)}。そこで、従来用いてきた解析方法の曲げ解析への適用性の検討と、様々な曲げ解析に関するデータの収集の必要性から、本研究では種々の幅厚比を有する LYR 鋼及び SM570 鋼からなる H 形断面部材が弱軸回りの純曲げを受ける場合の強度特性と変形能特性について調べることを目的とするものである。純曲げを受ける H 形部材の解析手法として、部材端に剛棒を取り付けた解析法を提案し、並行して行われた純曲げ実験結果との比較検討を行った。次にこの解析手法を用いて H 形断面供試体を対象にして、降伏比、ひずみ硬化開始ひずみ等をパラメータにしたパラメトリック解析を行い、純曲げを受ける場合の LYR 鋼と SM570 鋼の挙動特性について検討を行った。また、実験及び解析により得られた結果を用いて純曲げを受ける H

形断面鋼部材の最大強度推定式も提案した。

2.解析手法の概要と解析モデル

薄肉鋼構造物の座屈挙動や耐荷力解析は一般に有限要素法が使用され、板構造全体を有限個の板要素の集合体として近似することによって局部座屈現象を解析することが可能となる。しかし、板要素のみで曲げ解析を行うには載荷断面の各要素に曲げ荷重に相当する直応力を分布させ、間接的に曲げを生じさせる方法を探らざるを得ない。このため、この方法では直応力のアンバランスにより軸力が発生したり、載荷点の境界条件を十分に満たすのが非常に困難となる。ここでは文献 11) で用いた板要素に梁要素を結合し、有限変位弾塑性解析を行う手法を用いることにした。つまり、端部断面のウェブとフランジの重心点（結合点）に非常に短い 3 次元の棒要素を剛棒として取り付けることにより、直接曲げ荷重を作用させる方法である。

図-1 には解析モデルを示すが部材 GH は非常に短い棒要素であり、点 H が載荷点、点 G が結合点となる。棒要素を用いた解析法では平面保持の法則が成り立ち、板要素の点 G を含む面もこの法則が成り立つ。従って今回提案した解析方法では、荷重を載荷点 H に Y 軸まわりの強制回転変位を与えることにより、一様相対回転が導入でき、弱軸まわりの純曲げを作用させるようにした。なお、H 点はローラー支点でそり変位は拘束した。

解析対象モデルは、図-2 に示すような弱軸方向に純曲げを受ける溶接 H 形断面を考え、各平面で対称的な挙動を示すものと仮定して、実際の部材の軸方向 L/2 部分

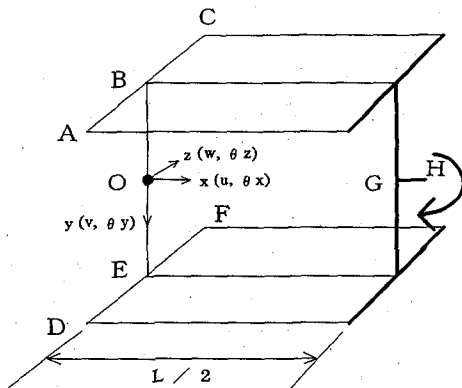


図-1 解析モデルの境界辺と座標系

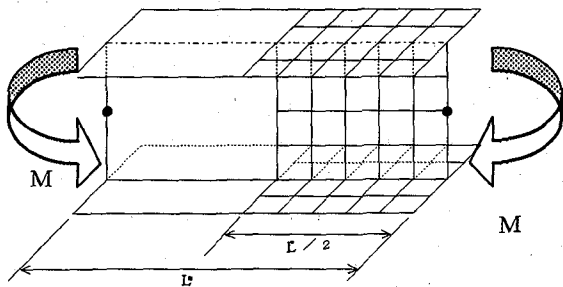


図-2 解析対象モデル

を解析対象とした。板要素分割はフランジは 8 分割、ウェブは 6 分割、部材軸方向は 9 分割して解析を行った。境界条件は、部材中央にて対象条件を満たすように決定した。

3.純曲げ実験の概要

(1)実験供試体の諸元

SM570 鋼と LYR 鋼を使用して図-3 に示すような H 形断面部材を製作し、純曲げ挙動に関する実験を行った。ここではその概要を示す。実験に使用した供試体の寸法諸元を表-1 に示す。なお、表-1 中の R_f は、H 形断面部材のフランジを 3 辺単純支持、1 辺は自由な圧縮板と考えた幅厚比パラメータで、式(1)によって表される。また、表中の供試体名の S は SM570 鋼を、L は LYR 鋼の供試体をそれぞれ表す。

実験で使用した鋼材の機械的性質を表-2 に、その応力-ひずみ関係を図-4 に示す。LYR 鋼には明確な降伏棚が現れなかったため 0.2% 耐力を降伏応力とした。また、初期不整として各供試体の残留応力を応力解放法によって測定し、図-5 に残留応力分布図の一例を示す。なお、測定方法や測定結果の詳細なデータについては、文献 13) を参照されたい。

$$R_f = \frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ただし、 $k=0.425$

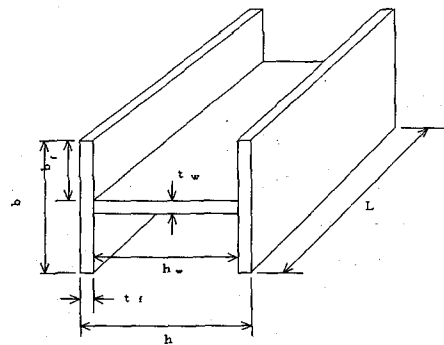


図-3 H形断面供試体図

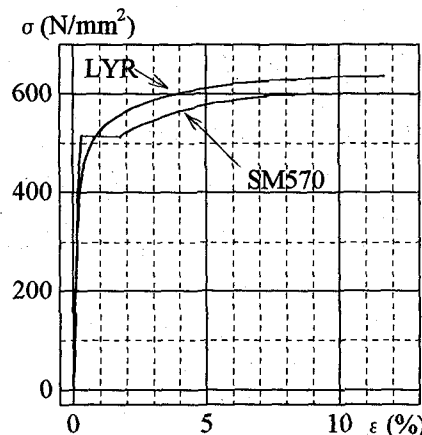


図-4 引張試験より得られた応力-ひずみ関係

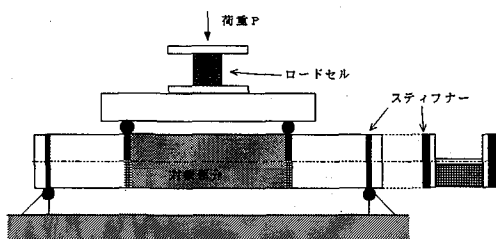
表-1 供試体の諸元

供試体名	h	b	hw/tw	bf/tr	L	Rf
MHS-1	221.3	119.6	35	10	505.9	0.793
MHL-1	221.5	119.5	35	10	506.9	0.752
MHS-2	221.4	192.0	35	16	666.2	1.289
MHL-2	222.0	189.2	35	16	665.9	1.235
MHS-3	311.0	120.8	50	10	461.9	0.808
MHL-3	331.5	120.0	50	10	462.4	0.772
MHS-4	312.9	264.8	50	22	935.8	1.777
MHL-4	311.9	263.7	50	22	935.4	1.732
MHS-5	402.3	192.7	65	16	781.0	1.310
MHL-5	401.8	192.8	65	16	781.6	1.247
MHS-6	402.0	263.4	65	22	1155.8	1.772
MHL-6	402.8	264.8	65	22	1155.7	1.704
MHS-7	134.5	60.7	20	5	238.6	0.376
MHL-7	131.6	60.9	20	5	238.8	0.355
MHS-8	131.5	120.5	20	10	396.1	0.790
MHL-8	132.4	120.0	20	10	396.0	0.731

単位 : (mm)

表-2 鋼材の機械的性質

	SM570 鋼	LYR 鋼
板厚 t (cm)	5.7	5.9
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	522.7	485.3
引張り強さ σ_m (N/mm ²)	609.5	643.6
ヤング率 $E \times 10^5$ (N/mm ²)	2.11	2.08
ポアソン比 ν	0.278	0.288
伸び率 (%)	26.8	27.5
ひずみ硬化開始ひずみ ε_s (%)	2.23	—
降伏ひずみ ε_y (%)	0.2697	0.2336
降伏比 YR (%)	86	75



(a) 正面図 (b) 断面図
図-6 荷重装置

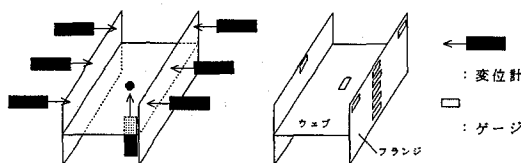
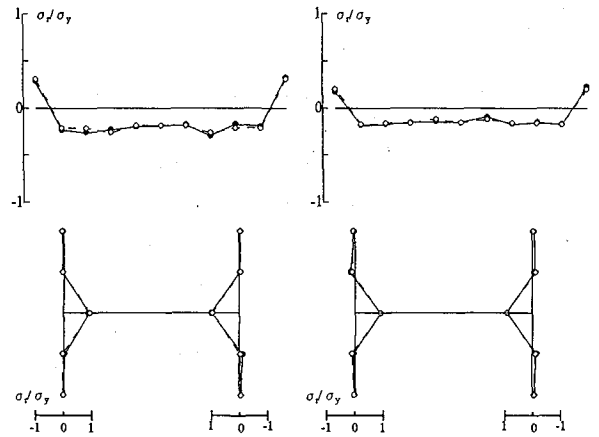


図-7 ゲージ及び変位計の取り付け位置



(a) MHS-3 (b) MHL-3

図-5 残留応力分布図の一例

(2) 純曲げ実験の方法

実験は 300t 長柱試験機を使用し、荷重は 4 等分点荷重で行った。荷重装置は図-6(a)(b)に示すように下側に両支点を固定し、供試体上側の 4 等分点に荷重を載荷させることにした。この時のちょうど部材長 L (対象部分) に弱軸回りの純曲げが作用することになる。

ひずみと変位の測定はひずみゲージと変位計を用いて行った。ひずみゲージは中央断面における応力の分布を知るため、単軸のひずみゲージをフランジ部分に鉛直方向に 5~7 等分点に、ウェブ部分は中央部分にのみ貼った。また実験中の荷重バランス確認のため、上部の両端にもゲージを貼りチェックを行った。変位挙動を測定するため変位計 (精度 100 μ /mm) を用いて、フランジ部分には対象部分の L/4 点の上縁から約 0.5cm の所に 3 箇所、ウェブ中央の鉛直方向に 1 箇所取り付け計 7 箇所測定した。図-7 は、ゲージ及び変位計の取り付け位置図の一例を示す。

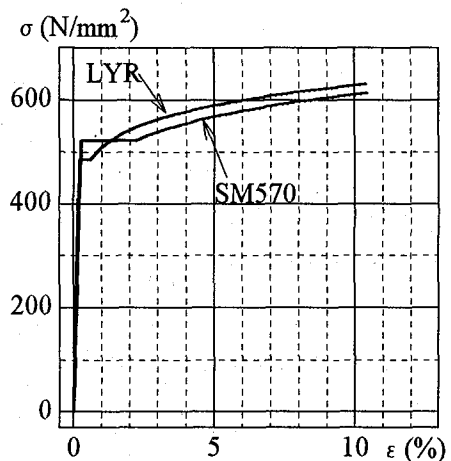
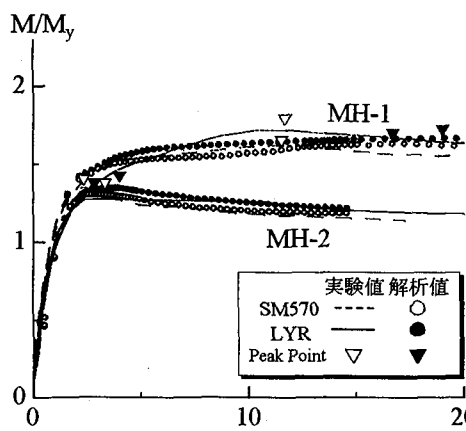
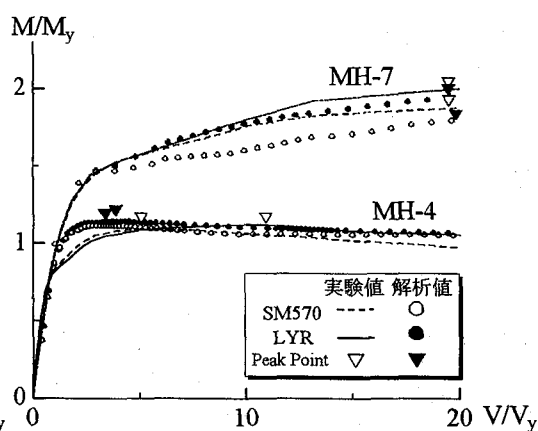


図-8 応力-ひずみ関係のモデル化



(a) MH-1とMH-2



(b) MH-4とMH-7

図-9 曲げモーメント-たわみ図

(3) 実験結果と解析結果の比較検討

本実験では部材の回転角を測定できなかったため、実験と解析の比較を正確に行うために曲げモーメント-たわみ図を用いて評価した。解析モデルには実験供試体を用い、測定した断面寸法及び材料諸元を用いた。また、解析に用いた鋼材の応力-ひずみ関係は図-8に示すように、図-4の引張試験結果をモデル化したものを、初期不整は残留応力の測定結果を用いた。初期たわみは実験では測定しなかったため、図-10(a)中に示す値を用いた。ただし、図-8中においてLYR鋼の降伏点は0.2%耐力で求めたものを用いた。図-9に実験及び解析によって得られた結果の一例を示す。縦軸に曲げモーメント M を降伏曲げモーメント M_y で、横軸に部材中央のたわみ V を降伏たわみ V_y で無次元化して表している。

図より、フランジの幅厚比が小さい場合、LYR鋼の方がひずみ硬化の影響を顕著に受けて最大強度が上昇しており、特に $b/t_f=5$ のMH-7においては $V/V_y=20$ に達しても荷重が低下していない。また、フランジの幅厚比が大きい場合、フランジ部分に局部座屈が早期に生じるため最大強度の上昇はみられないが、最大強度以降の荷重変形曲線に着目するとLYR鋼の方が緩やかであり、塑性変形能力が大きくなることが伺える。

また図から分かるように、解析値の最大強度の値は実験値とよく対応がとれている。しかしMH-4の場合は最大強度までの挙動が解析と差が見られた。これは解析上、

表-3 解析モデルの断面寸法

供試体名 (b/t_f - t_f - h - t_w - hw/t_w)	t_f (mm)	t_w (mm)	b (mm)	h (mm)	l_a (mm)
8-30	4.5	4.5	76.5	144.0	55.7
8-70				324.0	50.0
11-30			103.5	144.0	76.8
14-30			130.5	144.0	96.4
14-70			324.0	95.2	
17-50			157.5	234.0	118.9
20-50			184.5	234.0	139.1
20-70				324.0	139.6

フランジの分割方法や残留応力の入力方法などの問題点が考えられる。その他の供試体についての曲げ挙動は実験値とよく対応している。以上の問題点に注意すれば、今回提案した解析手法及びモデル化を適用できると考えられる。

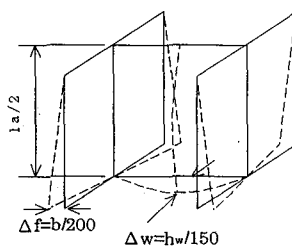
4. 純曲げを受けるH形断面部材のパラメトリック解析

(1) 解析モデル

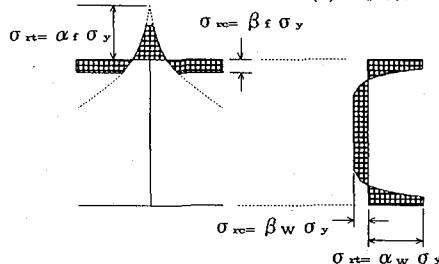
解析モデルとして図-3に示すようなH形断面を有する部材を選んだ。実験同様、モデルのフランジの幅厚比を8, 11, 14, 17, 20の5種類、ウェブの幅厚比を30, 50, 70の3種類を組み合わせると合計8種類の断面を決定し解析モデルとして用いた。断面寸法の詳細は表-3に示す。表中の l_a は部材長であり最小座屈モードの長さ l_0 としている。供試体名は最初の文字がフランジの幅厚比で、次がウェブの幅厚比を表している。

(2) 初期不整

実構造物に対して下限値を与える解析結果を得るため、解析モデルには初期不整として構成板の初期たわみ及び溶接残留応力を与えた。初期たわみの最大値は道路



(a) 初期たわみ図



(b) 残留応力分布図

図-10 初期不整

橋示方書¹⁰⁾に規定されている許容値とし、軸方向に半波の正弦波となり板幅方向は直線となるような図-10(a)の破線で示す形状で与えた。残留応力分布は実験結果の平均値を図-10(b)に示すような分布形状で与えた。図中の $\alpha_t, \beta_t, \alpha_w, \beta_w$ の値を表-4に記す。

表-4 残留応力の平均値

	引張残留応力		圧縮残留応力	
	Flange (α_f)	Web (α_w)	Flange (β_f)	Web (β_w)
SM570	0.834	0.371	0.178	0.186
LYR	0.704	0.408	0.203	0.233

(3) 鋼材の応力-ひずみ関係

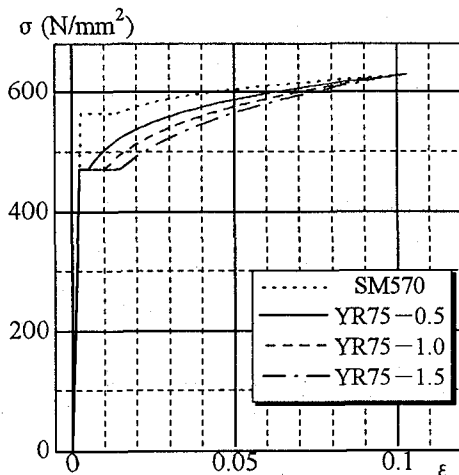
解析に用いた鋼材の応力-ひずみ関係は文献 1)を参考にして表-5 に示すように従来型の高張力鋼として SM570 を、降伏比(YR)及びひずみ硬化開始ひずみ(ε_{st})を変化させた LYR 鋼を 5 種類採用し、合計 6 種類の応力-ひずみ関係を用いて解析を行った。供試体名には降伏比とひずみ硬化開始ひずみのパーセント表示を表しており、例えば 'YR75-0.5' は降伏比が 75%でひずみ硬化開始ひずみが 0.5%である鋼材を示している。応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化域については式(2)に示す式を用い、係数 m と n の値はひずみ硬化開始ひずみ ε_{st} と引張り強さ σ_m を用いて次式により決定した。

$$(\sigma / \sigma_y) = m(\varepsilon / \varepsilon_y)^n \quad (2)$$

表-5 解析に用いた応力-ひずみ関係

	YR (%)	ε_y (%)	ε_{st} (%)	n 乗硬化則の係数	
				m	n
SM570	90	0.2743	1.40	0.91635	0.05359
YR75-0.5	75	0.2286	0.50	0.92760	0.09603
YR75-1.0			1.00	0.83162	0.12494
YR75-1.5			1.50	0.75181	0.15164
YR68-0.5	68	0.2072	0.50	0.89279	0.12874
YR82-0.5	82	0.2499	0.50	0.95382	0.06624

$E: 2.058 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}, \sigma_m: 627.2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



(a) YR=75%に固定

図-11(a)に降伏比を 75%に固定し、ひずみ硬化開始ひずみを 0.5%, 1.0%, 1.5%と変化させた応力-ひずみ関係を、図-11(b)にひずみ硬化開始ひずみを 0.5%に固定し、降伏比を 68%, 75%, 82%と変化させた応力-ひずみ関係を示す。

(4) 解析結果と考察

(a) ひずみ硬化開始ひずみの変化による影響

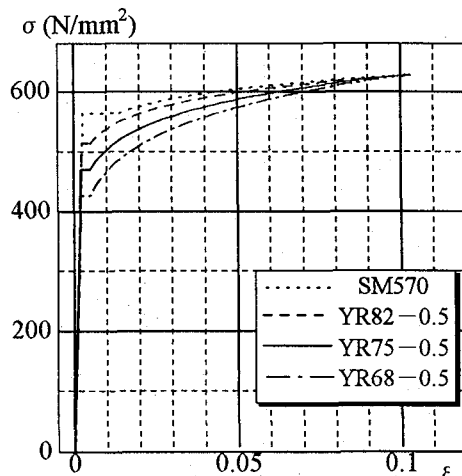
図-12, 図-13 は降伏比を 75%に固定して、ひずみ硬化開始ひずみを 0.5%, 1.0%, 1.5%と変化させた解析結果を断面種類別に示したものである。図の縦軸は曲げモーメント M を全塑性曲げモーメント M_p で、横軸は載荷点の回転角 θ を全塑性モーメントに対応する回転角 θ_p で無次元化して表している。ここで、 M_p, θ_p は次式によって表される。

$$\left. \begin{aligned} M_p &= \sigma_y \cdot Z \\ \theta_p &= M_p \cdot L / 2EI \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 σ_y : 降伏応力 L : 部材長
 Z : 塑性断面係数 E : ヤング係数
 I : 断面 2 次モーメント

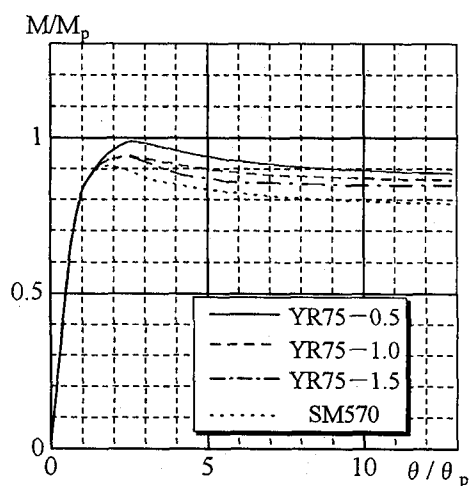
図-12(a), (b)は、フランジの幅厚比を 14 に固定し、ウェブの幅厚比を 30, 70 と変化させたときの図である。ウェブの幅厚比が大きい 70 の方が最大強度がやや低下するものの最大モーメント時の回転角や最大強度以降の劣化曲線に大きな差はみられない。ここには示していないが、他のウェブの幅厚比を有するモデルも同様な結果が得られたことより、ウェブの幅厚比の変化が曲げ挙動に対する影響はほとんど小さいことが分かった。

次に図-13(a)~(d)において、フランジの幅厚比が小さい 8-30, 11-30 では、最大強度に達する前からひずみ硬化の影響を顕著に受けるため強度が上昇し、LYR 鋼の M_{max}/M_p が全て SM570 鋼を上回った。また、フランジの幅厚比が小さいモデルでは、ひずみ硬化開始ひずみ

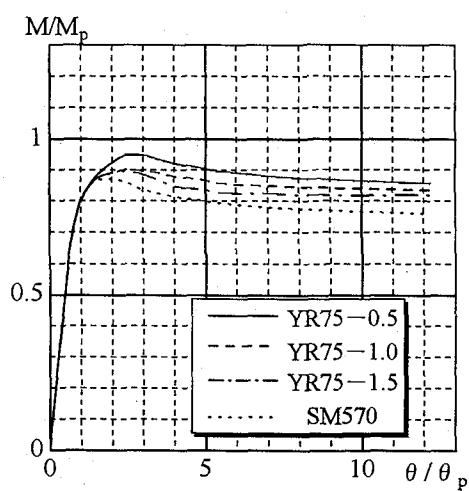


(b) $\varepsilon_{st}=0.5\%$ に固定

図-11 応力-ひずみ関係

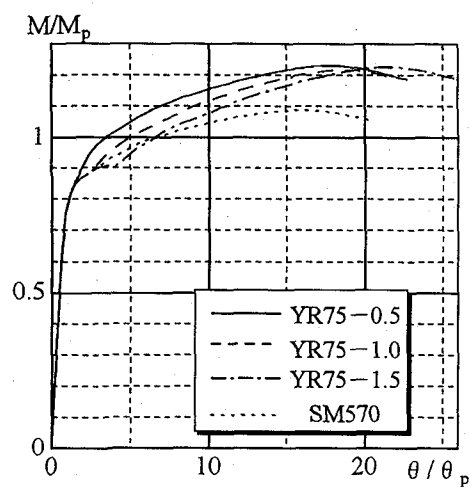


(a) $b/t=14, h_w/t_w=30$

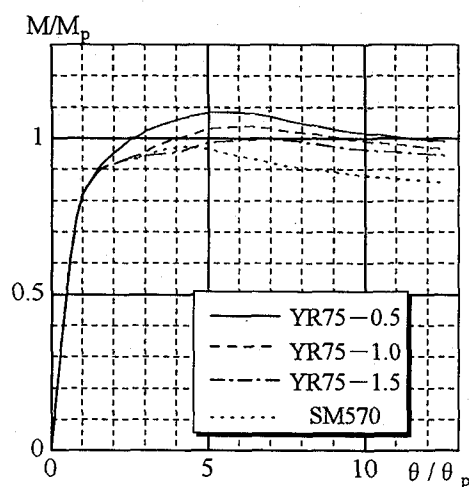


(b) $b/t=14, h_w/t_w=70$

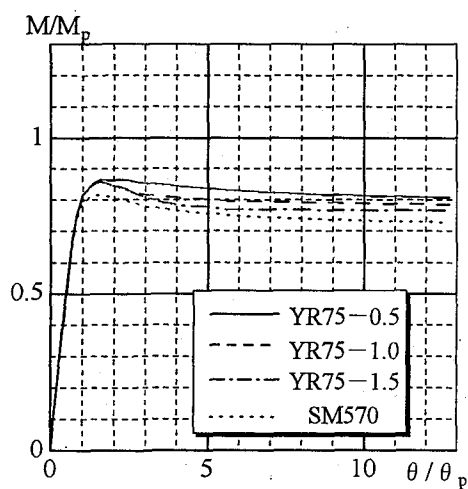
図-12 曲げモーメント-回転角曲線



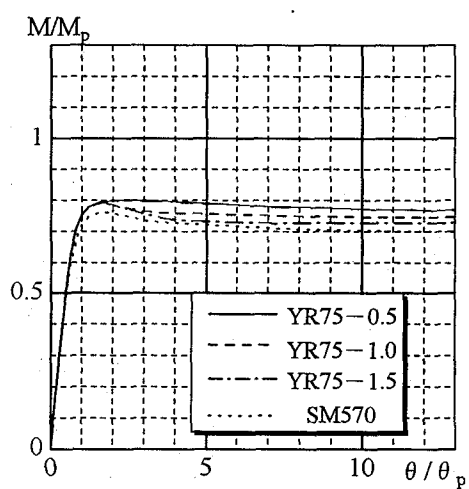
(a) $b/t=08, h_w/t_w=30$



(b) $b/t=11, h_w/t_w=30$



(c) $b/t=17, h_w/t_w=50$



(d) $b/t=20, h_w/t_w=50$

図-13 曲げモーメント-回転角曲線

が大きいとき、つまり降伏棚が長い時、塑性流れの影響を顕著に受けて最大強度時の θ/θ_p (ピークの位置) が大きくなる。しかし、幅厚比が大きな 17-50、20-50 においてはLYR 鋼の方が SM570 より強度が多少上昇するが、最大強度はひずみ硬化開始ひずみの変化に関係なくほぼ同程度となることが分かる。また、ひずみ硬化開始ひずみが小さいほど劣化曲線は緩やかになるため、塑性変形能力が大きくなる。なお、11-30 において、ひずみ硬化開始ひずみが 0.5%のときのみひずみ硬化の影響を受けて最大強度が上昇していることが分かる。

これらの結果より降伏比が一定ならば降伏棚が短いほど、幅厚比が小さい部材では強度が上昇し、逆に幅厚比が大きな部材では劣化曲線が緩やかになることがわかる。

そこで、純曲げを受ける H 形断面部材の塑性変形能特性を表す指標として次に定義するモーメント上昇率 τ 、塑性率 μ ³⁾⁹⁾、及びエネルギー吸収量 U を用いて検討を行った。

$$\tau = M_{\max}/M_y, \quad \mu = \theta_{\max}/\theta_y \quad (4)$$

ここに、 $M_{\max}$: 最大モーメント

M_y : 降伏モーメント

$\theta_{\max}$: 最大モーメント時の部材端回転角

θ_y : 降伏モーメント時の部材端回転角

また、エネルギー吸収量 U についての定義として、ここでは曲げモーメントを受ける場合の $M/M_p - \theta/\theta_p$ 曲線の最大曲げモーメントから 5%低下したところまでの面積を表すことにした (図-14 参照)。

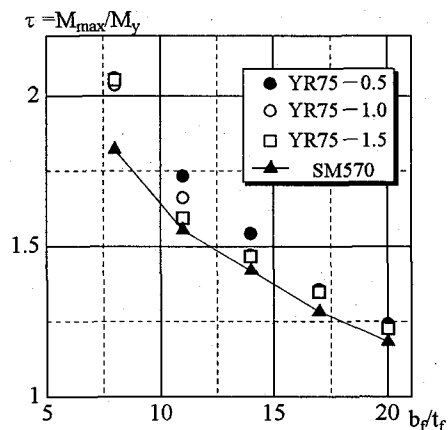
図-15(a), (b)は式(4)で定義したフランジの幅厚比 b_f/t_f に対するモーメント上昇率 τ と塑性率 μ の関係を示したものである。

図-15(a)より、フランジの幅厚比が小さいとき τ は高くなることが確認できる。これは、最大強度に達する前にひずみ硬化の影響を受けるためと考えられる。また、全ての断面形状でLYR 鋼が SM570 鋼を上回っている。図-15(a)で用いた3種類のLYR 鋼に注目してみると、幅厚比によっては、ひずみ硬化開始ひずみを変化させても τ に差は見られない部分がある。従って、ひずみ硬化開始ひずみが τ に与える影響は少ないと考えられる。

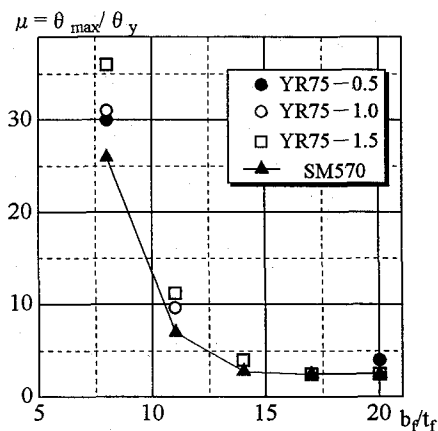
図-15(b)より、モーメント上昇率 τ と同様にフランジの幅厚比が小さいときは μ は高くなり、特にひずみ硬化開始ひずみが大きな場合は塑性流れの影響を顕著に受け

て μ が高くなることが分かる。これは幅厚比が小さな場合によく現れている。従って幅厚比が小さな場合、ひずみ硬化開始ひずみが大きいと、部材の変形量も大きくなると考えられる。

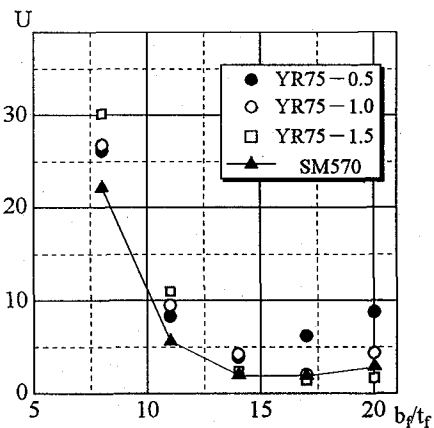
図-15(c)にフランジの幅厚比とエネルギー吸収量 U の関係を示す。幅厚比が小さく、且つひずみ硬化開始ひずみが大きい場合、ひずみ硬化及び塑性流れの影響を顕著に受けるためエネルギー吸収量が大きくなる。また、



(a) モーメント上昇率



(b) 塑性率



(c) エネルギー吸収量

図-15 塑性変形能特性

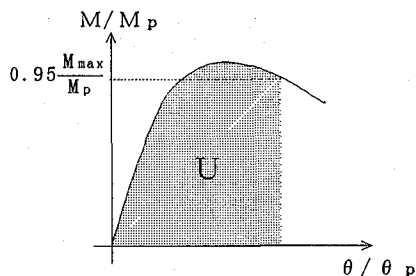


図-14 エネルギー吸収量の定義

幅厚比が大きく、ひずみ硬化開始ひずみが小さい場合は最大強度以降の劣化曲線が緩やかになるためエネルギー吸収量が大きくなる。

降伏比を一定にしてひずみ硬化開始ひずみを変化させた場合のLYR鋼とSM570鋼との比較を行った。この3つのグラフより、幅厚比が小さい部材でひずみ硬化開始ひずみが大きい方がLYR鋼材の特徴を生かすことが出来ると考えられる。弱軸回りの純曲げを受ける場合、フランジの幅厚比が小さい方がひずみ硬化の影響は顕著に出ており、幅厚比が大きい場合もSM570鋼と同等の評価を得ることが出来ている。

(b) 降伏比の変化による影響

図-16 はひずみ硬化開始ひずみを0.5%に固定して降伏比を68%, 75%, 82%と変化させて解析した結果を断面種類別に示したものである。

フランジの幅厚比が小さな部材は、降伏比が低いほどひずみ硬化の影響を顕著に受けるため強度が上昇し、最大強度時の θ/θ_p も大きくなる。また、フランジの幅厚比が大きな部材は、早期に局部座屈が起こるため強度の上昇はないが、最大強度以降にひずみ硬化の影響を受けるため劣化曲線が緩やかになる傾向がみられる。特にフランジの幅厚比が最も大きな20の場合、降伏比が68%のモデルは最大強度以降の荷重の低下が見受けられない。

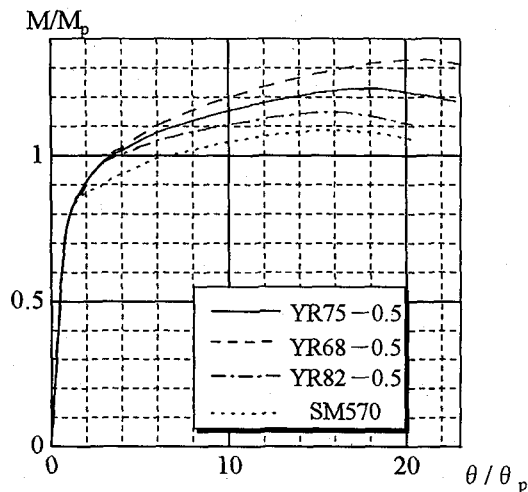
図-17(a), (b)にフランジの幅厚比 b_f/t_f に対するモーメント上昇率 τ と塑性率 μ の関係を示す。幅厚比が小さく、且つ降伏比が小さいほど τ 及び μ が高くなる傾向が見られ、これはひずみ硬化の影響と降伏比の差がそのまま現れたためと思われる。

図-17(c)にフランジの幅厚比 b_f/t_f とエネルギー吸収量 U の関係を示す。幅厚比が小さく、且つ降伏比が低いほどエネルギー吸収量が大きくなる。これは、モーメント上昇率及び塑性率の結果がそのままエネルギー吸収量に現れていると考えられる。

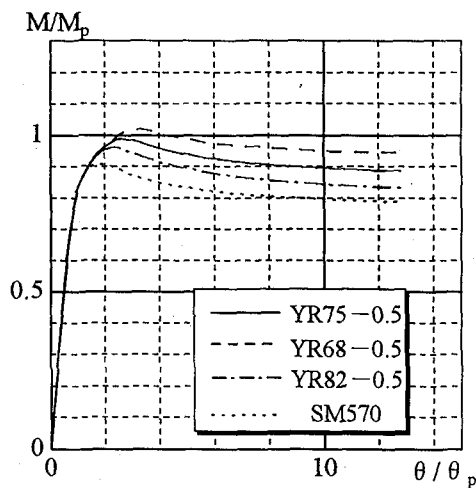
(c) 強度特性

図-18 (a), (b)は、縦軸に最大曲げモーメント M_{max} を式(3)で定義している全塑性モーメント M_p で無次元化したものを、横軸には式(1)で定義している幅厚比パラメータ R_f をとって示したものである。図から $M_{max}/M_p = 1.0$ となる場合の塑性限界幅厚比を算出した。算出方法は文献1)に示すように $M_{max}/M_p = 1.0$ の線を跨ぐ2つのデータ間を直線近似し、その交点を求める方法を用いた。その結果を表-6に示す。

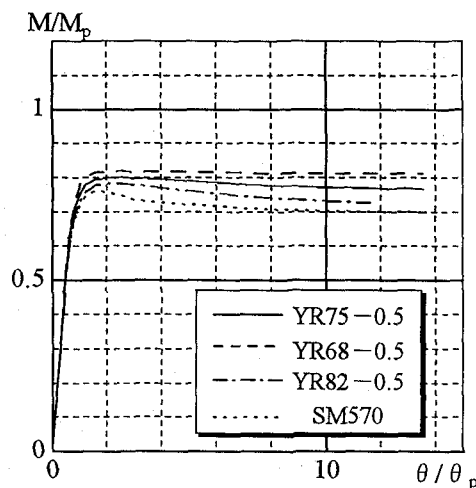
図-18 (a)より、降伏比を75%に固定してひずみ硬化開始ひずみを変化させた場合、幅厚比パラメータが1前後の部材においてひずみ硬化開始ひずみが小さい供試体YR75-0.5の最大強度が上昇している。また、図-18 (b)より、ひずみ硬化開始ひずみを0.5%に固定して降伏比を変化させた場合、塑性限界幅厚比より小さい部材はひず



(a) $b_f/t_f=08$, $h_w/t_w=30$

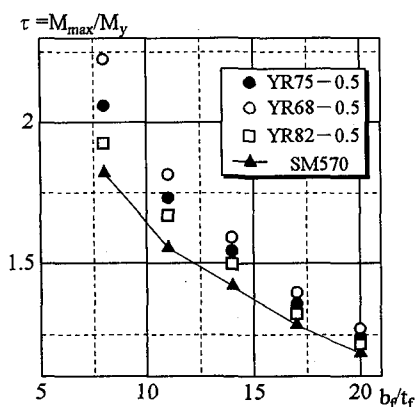


(b) $b_f/t_f=14$, $h_w/t_w=30$

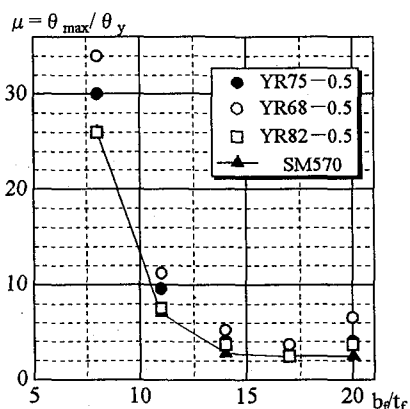


(c) $b_f/t_f=20$, $h_w/t_w=50$

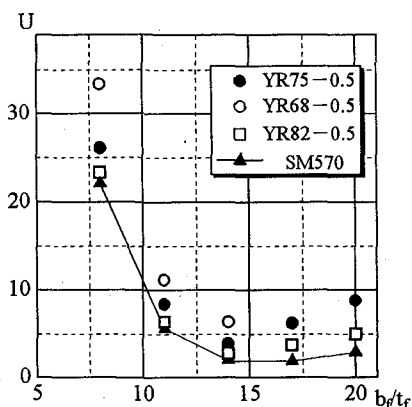
図-16 曲げモーメント-回転角曲線



(a) モーメント上昇率



(b) 塑性率

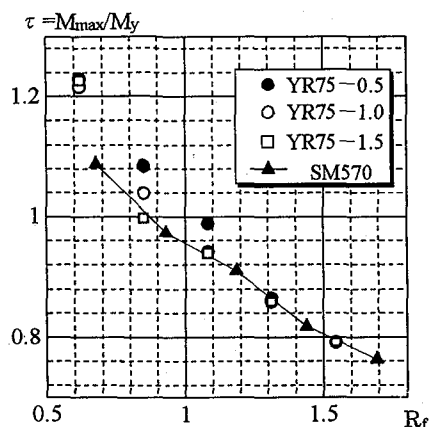


(c) エネルギー吸収量

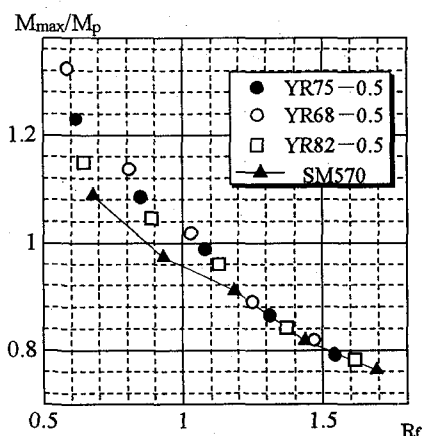
図-17 塑性変形能特性

表-6 鋼種別の塑性限界幅厚比

鋼種	塑性限界幅厚比
SM570	0.876
YR68-0.5	1.063
YR75-0.5	1.055
YR75-1.0	0.947
YR75-1.5	0.846
YR82-0.5	1.020



(a) YR=75%に固定



(b) $\epsilon_{st}=0.5\%$ に固定

図-18 曲げ極限強度

み硬化の影響を受け強度が上昇することがわかる。その上昇量が降伏比の小さい供試体ほど大きくなっているのは、降伏比が小さいほど早期からひずみ硬化の影響を受けることが原因と思われる。また、表-6 より塑性限界幅厚比は降伏比よりもひずみ硬化開始ひずみの大きさにより影響され、ひずみ硬化開始ひずみが小さいと塑性限界幅厚比は大きくなることがわかる。

図-19 は解析及び実験より得られた最大強度 M_{max}/M_p と幅厚比パラメータ R_f の関係を示したものである。実験値と解析値はよく対応していることがわかる。図中の式はこの論文で提案する幅厚比パラメータ R_f を用いた最大強度推定式で、式(5)は全データの平均値をとる強度式であり、式(6)は全データの下限值をとる強度式である。

$$M_{max}/M_p = \{1 + 0.2(R_f - 0.9)\}^{-2} \quad (5)$$

$$M_{max}/M_p = \{1 + 0.2(R_f - 0.75)\}^{-2} \quad (6)$$

なお、ひずみ硬化を生ずるような限界幅厚比より小さい幅厚比を有する部材の場合は、ひずみ硬化の影響で最大強度が上昇するため、解析結果と実験結果の両方とも

ばらついていることが分かる。そのため幅厚比が小さな部材は、提案した平均の最大強度推定式の周りに分布する形となっている。

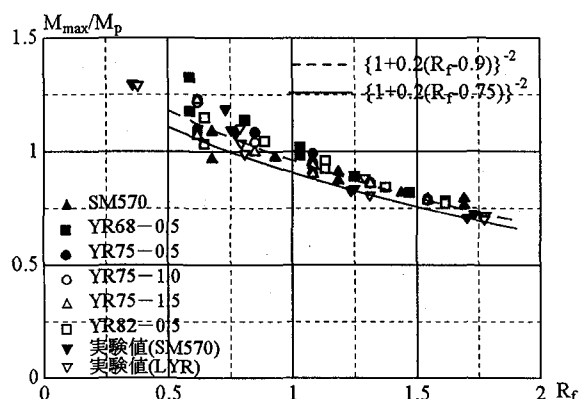


図-19 最大強度と幅厚比パラメータの関係

5. 結論

弱軸の純曲げを受ける H 形断面部材の最大強度や終局挙動をひずみ硬化の影響を考慮できる板要素解析法を用い、実験結果と解析値との比較検討を行って妥当性を確認した。さらに断面形状及び材質を変化させてパラメトリック解析を行った。以上、本研究より得られた結果を要約すると次のようである。

- (1) 本研究で用いた解析手法により得られた結果は実験結果とよく対応しており、この解析手法の妥当性が確認された。
- (2) 弱軸の純曲げを受ける H 形断面部材のモーメント上昇率は、どの断面においても LYR 鋼の方が SM570 鋼よりも高くなった。特に、幅厚比の小さな断面を有する部材はひずみ硬化の影響を顕著に受けるため最大強度が上昇している。
- (3) 降伏比を一定にしてひずみ硬化開始ひずみを変化させた場合、限界幅厚比付近の断面を有する部材の応力上昇率はひずみ硬化開始ひずみが小さい方が大きくなる。塑性率は幅厚比が大きいものについてはひずみ硬化開始ひずみの影響は見られず、幅厚比が小さいものについてはひずみ硬化開始ひずみが大きいほど高くなる。
- (4) エネルギー吸収量は、幅厚比が比較的小さいものは降伏棚が長い方が塑性率が高くなるため大きくなり、幅厚比が大きいものは降伏棚が短い方が劣化曲線が緩やかになるために大きくなる。
- (5) 降伏棚の長さを一定にして降伏比を変化させた場合、降伏比が低いほどモーメント上昇率が高くなり、幅厚比が小さくなるとその傾向が明確に現れる。塑性率についても同様のことが言える。
- (6) 塑性限界幅厚比は降伏比よりもひずみ硬化開始ひず

みにより影響され、ひずみ硬化開始ひずみが小さいと塑性限界幅厚比は大きくなる。

- (7) 弱軸の純曲げを受ける H 形断面部材の強度を十分推定できる幅厚比パラメータ R_f を用いた最大強度推定式を提案した。

参考文献

- 1) 福本孝士：鋼構造の機能性向上から見た高張力鋼の実用化に関する研究，平成3年度科学研究費補助金研究成果報告書，1992。
- 2) 森脇良一：鋼材特性を考慮した圧縮板の極限強度と塑性変形能力について，構造工学論文集，Vol.39A，pp.115-124，1993。
- 3) 山尾敏孝・荒毛徹・崎元達郎：鋼材特性を考慮した薄肉鋼 H 形短柱の耐力と終局挙動について，構造工学論文集，Vol.40A，pp.355-364，1994。
- 4) 高張力鋼ワーキンググループ：建築構造用 60 キロ高張力鋼の機械的性質の目標値について，日本鉄鋼協会構造用鋼材の機械的性質に関する調査研究委員会資料，pp.1-96，1988。
- 5) 高梨晃一・孟令樺・福島暁男・桑村仁・鈴木孝彦：低 YR 60 キロ級高張力鋼 Beam-Column の耐力と変形能力，構造工学論文集，Vol.36b，pp.399-408，1990。
- 6) 加藤勉：建築用鋼材の降伏比について，鉄と鋼，第74年，第6号，pp.11-21，1988。
- 7) 山口種美：建築構造用鋼材の開発と実用化，新日鐵技報，1995。
- 8) 桑村仁：降伏比の異なる高張力鋼を用いた H 形断面短柱の終局強度と変形能力について，構造工学論文集，Vol.34B，pp.151-160，1988。
- 9) 井上哲朗・桑村仁：箱形断面短柱の応力-ひずみ特性，構造工学論文集，Vol.35B，pp.337-350，1989。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1980。
- 11) 山尾敏孝・崎元達郎：板要素とはり要素の結合による薄肉構造物の有限変位弾塑性解析，構造工学論文集，Vol.32A，pp.291-302，1986。
- 12) 日野雅夫：低降伏比高張力鋼を用いた薄肉部材の強度と変形能に関する研究，熊本大学平成5年度修士論文，1994。
- 13) 山尾敏孝・岩坪要・崎元達郎：降伏比が異なる高張力鋼を用いた短柱の耐力と変形能力に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.43A，1997。
- 14) 山尾敏孝・崎元達郎：薄肉 H 形鋼柱の連成座屈に関する実験的研究，土木学会論文集，第380号，pp.383-390，1987。

(1996年9月6日受付)