

低降伏比鋼 H 形断面部材の曲げ変形能力について

STRENGTH AND DUCTILITY OF LOW-YIELD-RATIO HIGH-STRENGTH H-SECTION STEEL MEMBERS SUBJECTED TO BENDING MOMENT

岩坪 要*, 山尾 敏孝**, 崎元 達郎**

Kaname IWATSUBO, Toshitaka YAMAO, Tatsuro SAKIMOTO

*工修 八代工業高等専門学校 助手 土木建築工学科 (〒866 熊本県八代市平山新町 2627 番地)

**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 bending strength and ductility of welded H-section members of high-strength steels subjected to a bending moment about the strong axis are studied theoretically. Specimens with various width-to-thickness ratios of the component plates are used. The analysis is based on a finite element technique which is capable of connecting the plate elements with a beam element. Validity and efficiency of the present method are confirmed. The effect of the yield ratio and strain-hardening strain on the maximum bending strength and ductility of H-section members of high-strength steel were examined. The newly developed low-yield-ratio high-strength steel has better ductility than ordinary high-strength steel.

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

1. まえがき

兵庫県南部地震のような大地震に対して構造物が倒壊しないような設計をするためには、部材が塑性エネルギー吸収量の高い材料で作られているか、また、構造物全体としての終局耐力及び塑性変形能力が大きいか重要な問題となる¹⁾²⁾³⁾。現在、我が国独自の圧延法により、主に降伏比と一様伸びを改善した低降伏比高張力鋼（以下 LYR 鋼と称す）が製造可能な段階にある⁴⁾。しかしながら、実際に鋼材と使用する場合において必要な降伏比（降伏点/引張り強さ）と一様伸びの関係や、断面幅厚比と塑性変形能力の関係など十分に明らかにされているとは言えない⁵⁾。

そこで、著者らはこのような観点から、従来の高張力鋼に比べて降伏比が低い高張力鋼材を、箱形断面や H 形断面の短柱や部材に用いて、圧縮や曲げなどの荷重を作用させて、耐荷力や弾塑性挙動及び塑性域における変形能力を従来の高張力鋼と比較しながら明らかにしてきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。特に、H 形断面部材を対象にして、純圧縮や弱軸回りの曲げを受ける場合の耐荷力や変形能力特性を実験的及び解析的に調べた。その結果、降伏比が小さく、一様伸びが小さいような応力-ひずみ関係をもつ鋼材で、幅厚比が小さい H 形断面に適用すると、ひずみ硬化により耐荷力は上昇し、塑性変形能力が期待できることが分かった。

本研究では、フランジとウェブの幅厚比を変化させた H 形断面部材が、強軸回りの純曲げを受ける場合

の曲げ強度と塑性変形能力について解析的に調べたものである。解析パラメータは、部材断面の幅厚比、材料の降伏比とひずみ硬化開始ひずみを採用して、SM570 鋼と LYR 鋼の材料特性について検討を行った。

2. 解析手法の概要

一般的に薄肉鋼構造物の座屈挙動や耐荷力解析は、有限要素法が使用され、解析対象である構造物全体を有限個の板要素やシェル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している。しかし、板要素やシェル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 9) 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結合解析の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、直接曲げ荷重を棒要素端に作用させる方法である。

図-1 には結合解析モデルを示す。O 点を座標系の原点とし、部材 GH は非常に短い棒要素で、点 H が載荷点、点 G が結合点となる。棒要素の部分では平面保持の法則が成り立ち、板要素の点 G を含む端面に剛板を取り付けたと同様な状況となる。従ってこの

解析方法では、荷重を載荷点 H に Z 軸回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、強軸回りの純曲げを作用させることが可能となる。なお H 点はローラー支点である。

解析対象モデルは、図-2 に示すような強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、実際の部材軸方向の半分の長さである $L/2$ 部分を解析対象とした。要素分割はフランジは 4 分割、ウェブは 8 分割、部材軸方向は 10 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。

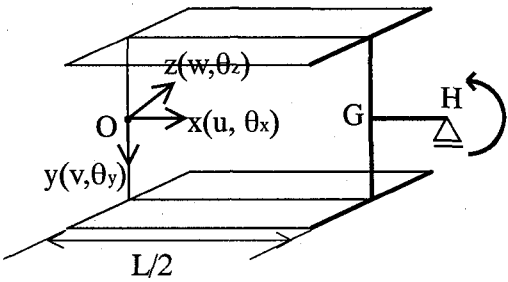


図-1 結合解析モデルの境界辺と座標系

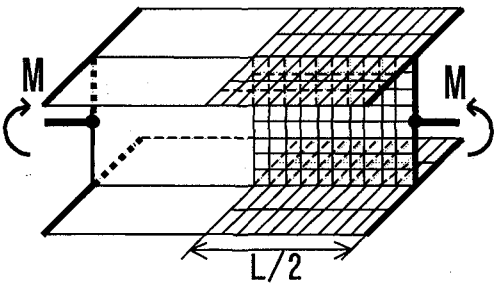


図-2 解析対象モデル

3. 解析法の妥当性の検証

本解析法の妥当性を検証するために文献 10)で行われた実験結果との比較を行った。実験は図-3 に示すような応力-ひずみ関係を有する材料 (LYR 鋼) を用い、表-1 の断面諸元を有する H 形部材を用いて 2 点載荷で行われた。詳細は文献 10)を参照してもらいたい。図-4 は表-1 に示すようなモデルについて実験値と解析値の荷重-たわみ曲線を比較して示したものである。モデルの断面形状は、塑性断面、コンパクト断面、ノンコンパクト断面の 3 つを用いた。なお、図中の P_y は降伏荷重であり、 V_y は P_y を載荷した時の部材中央のたわみを表しており、これらの解を無次元化して用いた。図から分かるように実験で用いた 3 つのモデルでは解析結果と実験結果はよく対応しており、今回採用した解析手法で H 形断面強軸回りの解析が可能であると確認された。

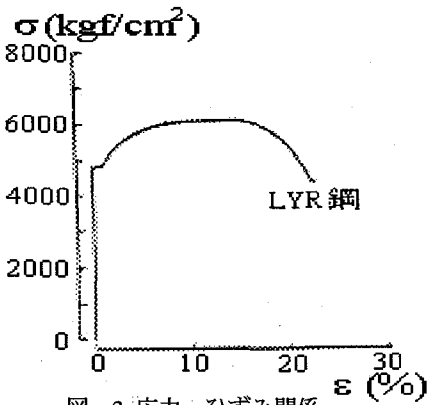
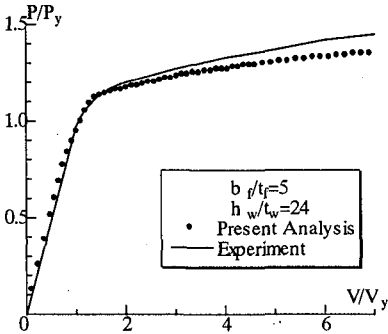


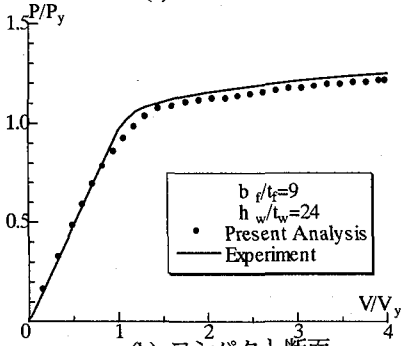
図-3 応力-ひずみ関係

表-1 実験モデルの断面諸元

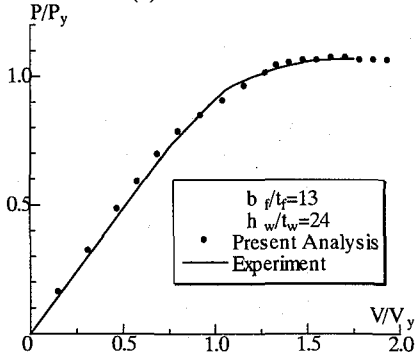
	b_f/t_f	h_w/t_w	L (cm)
塑性断面	5.4	24	80
コンパクト断面	9.3	24	80
ノンコンパクト断面	13.2	24	80



(a) 塑性断面



(b) コンパクト断面



(c) ノンコンパクト断面

図-4 実験値と解析値の比較

表-2 解析モデルの断面諸元

Specimens	b_f/t_f	h_w/t_w	t_f (mm)	t_w (mm)	b (mm)	h (mm)	L (mm)
8-10	8	10	4.5	4.5	76.5	54.0	191.3
8-20	8	20			76.5	99.0	191.3
8-30	8	30			76.5	144.0	191.3
14-30	14	30			130.5	144.0	326.3
20-30	20	30	5.0		184.5	144.0	461.3
8-40	8	40	5.0		84.5	190.0	211.3
8-50	8	50	6.0		100.5	237.0	251.3
14-50	14	50	4.5		130.5	234.0	326.3
20-50	20	50			184.5	234.0	461.3
20-70	20	70			184.5	324.0	461.3

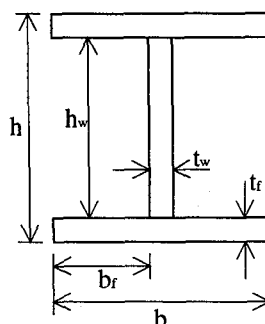


図-5 解析モデルの断面図

4. パラメトリック解析

(a) 解析モデルの断面諸元

解析モデルの断面寸法は文献8)の結果を参照して、フランジの幅厚比 b_f/t_f を 8, 14, 20 の 3 種類、ウェブの幅厚比 h_w/t_w を 10, 20, 30, 50, 70 の 5 種類を組み合わせ合わせた合計 8 種類とした。断面諸元を表-2 にその断面図を図-5 に示す。表中の L は部材長で、全体座屈を起こさないように道路橋示方書¹¹⁾の規定内であるフランジの幅の 2.5 倍とした。供試体名は最初の数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。

(b) 初期不整

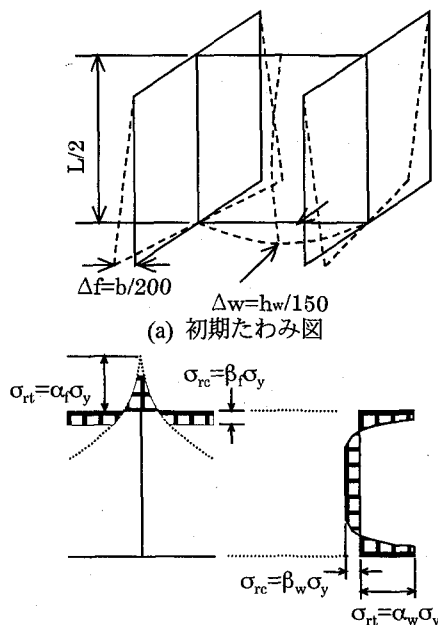
解析モデルには初期不整として構成板の初期たわみ及び溶接残留応力を与えた。初期たわみの最大値は道

路橋示方書¹¹⁾に規定されている許容値とし、軸方向に半波の正弦波で、板幅方向には直線となるように図-6(a)の破線で示す形状で与えた。残留応力分布は文献8)を参考にした。図中の係数の値を表-3 に示す。

表-4 解析に用いた材料定数

	YR	ε_y	ε_{st}	n 乗硬化則の係数	
	(%)	(%)	(%)	m	n
SM570	90	0.2743	1.4	0.91635	0.05359
YR75-0.5	75	0.2286	0.5	0.92760	0.09603
YR75-1.0			1.0	0.83162	0.12494
YR75-1.5			1.5	0.75181	0.15164
YR68-0.5	68	0.2072	0.5	0.89279	0.12874
YR82-0.5	82	0.2499		0.95382	0.06624

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

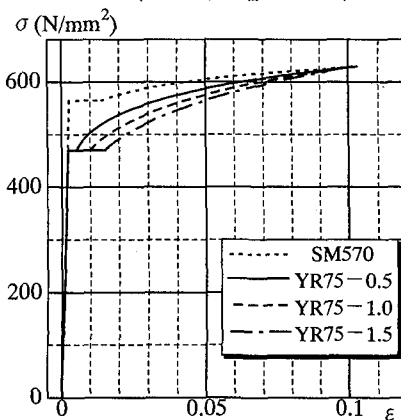


(b) 残留応力分布図

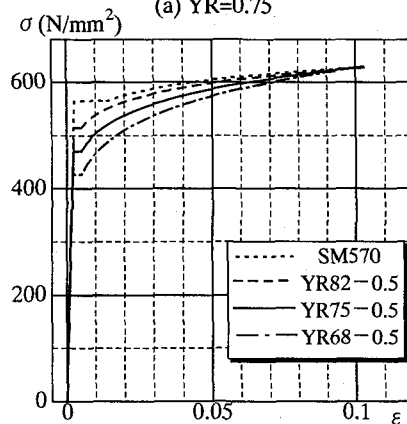
図-6 初期不整

表-3 残留応力の係数

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



(a) YR=0.75



(b) $\varepsilon_{st}=0.005$

図-7 応力-ひずみ関係

(c) 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 3) を参照して決定した。従来型の高張力鋼 (SM570) を比較対象とし、LYR 鋼は降伏比 (YR) 及びひずみ硬化開始ひずみ (ϵ_{sh}) を変化させた 7 種類を採用して合計 8 種類とした。表-4 にその一覧を示す。なお、供試体名の 'YR75-0.5' は降伏比が 0.75 でひずみ硬化開始ひずみが 0.5% であることを示している。またひずみ硬化域における応力-ひずみ関係は次式で表わされる n 乗硬化則に従うものとした。

$$(\sigma/\sigma_y) = m(\epsilon/\epsilon_y)^n \quad (1)$$

図-7 に定義した応力-ひずみ関係の図を示す。(a) は降伏比を一定にし、ひずみ硬化開始ひずみを変化させた図で、(b) はひずみ硬化開始ひずみを一定にし、降伏比を変化させた図である。

5. 解析結果

図-9, 10, 11 は解析から得られた曲げモーメント-回転角曲線を示している。それぞれの図において、縦軸は曲げモーメント M を全塑性曲げモーメント M_p で無次元化した値を、横軸には荷重点の回転角 θ を全塑性曲げモーメントに対応する回転角 θ_p で無次元化した値を表している。ここで、 M_p , θ_p は図-8 よりそれぞれ次式で表される。

$$M_p = \sigma_y \cdot Z \quad (2)$$

$$\theta_p = M_p \cdot L / 2EI \quad (3)$$

ただし、 σ_y : 降伏応力

Z : 塑性断面係数

L : 部材長

E : ヤング係数

I : 断面 2 次モーメント

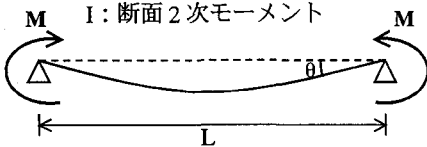
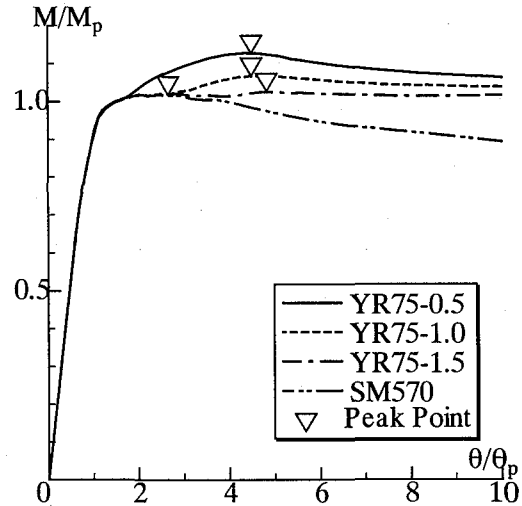


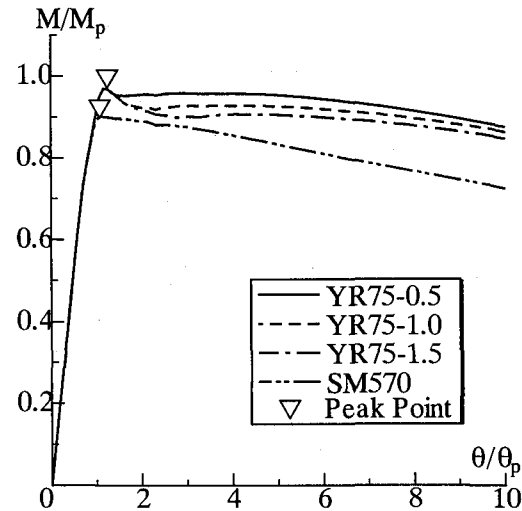
図-8 モーメント荷重と回転角

(a) ひずみ硬化開始ひずみの変化による影響

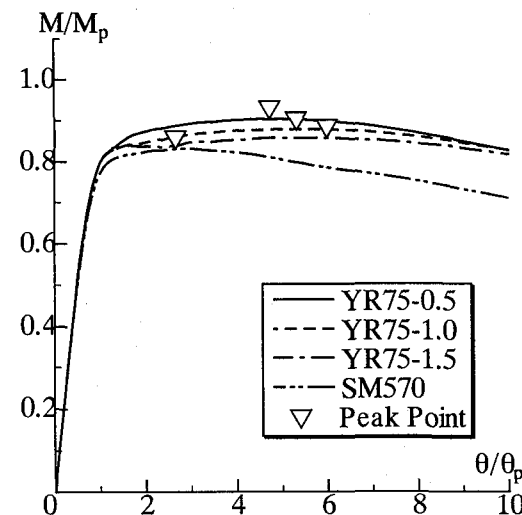
図-9 と図-10 はウェブの幅厚比を一定にし、フランジの幅厚比を変化させたモデルを用いて、降伏比を 0.75 と一定でひずみ硬化開始ひずみを変化させた場合の解析結果を示している。図より、最大曲げ強度に達した後の挙動を比較すると、いずれのモデルにおいても強度低下が著しい SM570 鋼に対して、LYR 鋼の方は緩やかであることがわかる。図-9(a)より、フランジの幅厚比が小さく、ひずみ硬化開始ひずみが小さな供試体は、早期にひずみ硬化の影響を受けるために最大強度は顕著に上昇している。また、この図と図-10(a)の図を比較してみると、同じフランジの幅厚比を有する断面において、同じひずみ硬化開始ひずみ



(a) $b_f/t_f=8, h_w/t_w=30$



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



(c) $b_f/t_f=20, h_w/t_w=30$

図-9 曲げモーメント-回転角曲線 (YR=0.75)

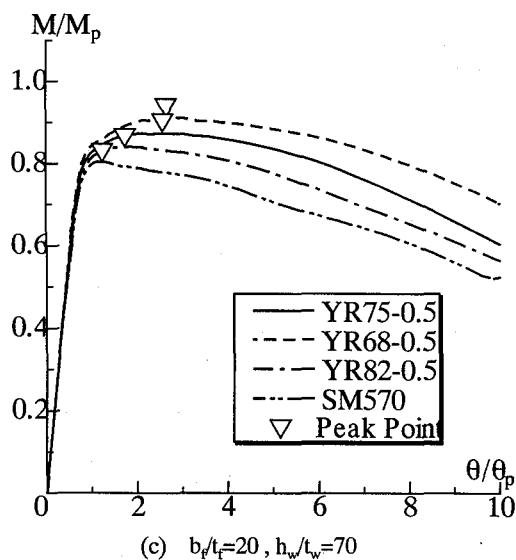
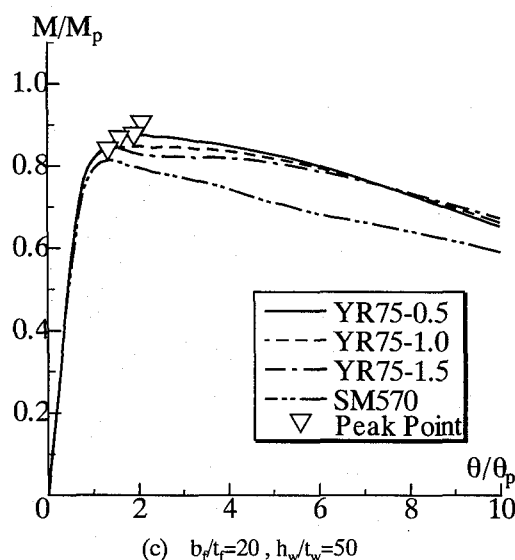
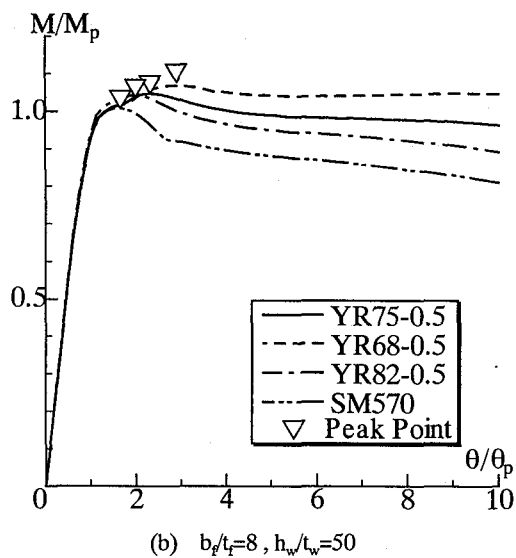
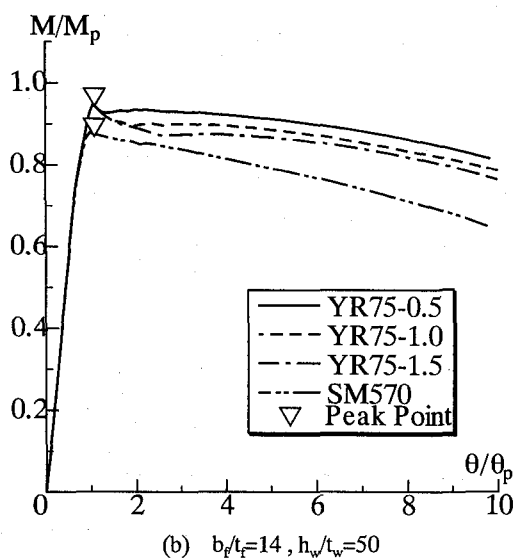
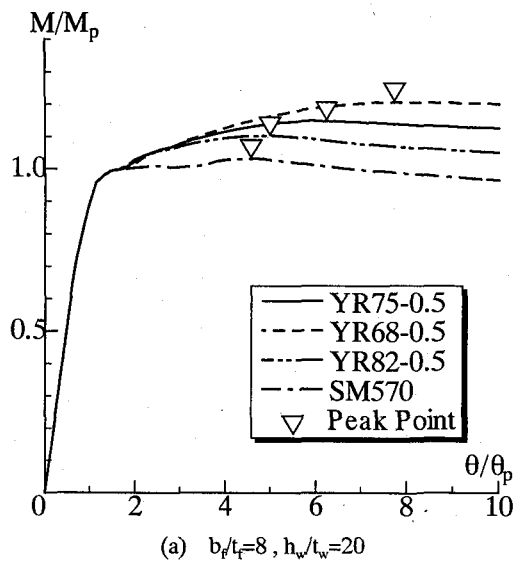
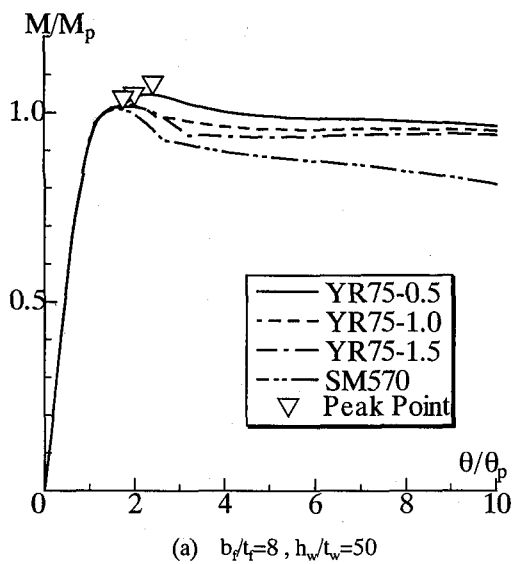


図-10 曲げモーメント-回転角曲線 (YR=0.75)

図-11 曲げモーメント-回転角曲線 ($\epsilon_s=0.005$)

であっても、最大曲げ強度 $M_{\max}/M_p$ に達するまでの挙動が異なっている。さらに、図-9、10の(c)に示すように、フランジの幅厚比が大きい20でウェブの幅厚比が30と50の供試体を比べてみると、最大強度に達するまでの変形能及び最大強度以降の劣化勾配が異なっている。これらはウェブの幅厚比が大きくなったことによる局部座屈の影響によるものと考えられる。従って、降伏比が一定ならば降伏棚の長さも最大強度に影響するが、ウェブの幅厚比の方が大きな影響を与えていることがわかる。

(b)降伏比の変化による影響

図-11にはひずみ硬化開始ひずみを $\epsilon_{st}=0.005$ に固定して、降伏比を変化させた場合の結果を示している。また、SM570鋼は全塑性モーメント M_p ぐらいまでしか耐力はないが、LYR鋼はひずみ硬化のために M_p 以上の耐力を有していることが分かる。さらに、降伏比の変化が最大強度に与える影響は、フランジとウェブ両方の幅厚比が小さな場合は顕著に表れており、降伏比が低いほど最大強度 $M_{\max}/M_p$ 並びに変形能も大きくなっている。従って、従来型の高張力鋼よりも降伏比(YR)を下げることによって、塑性変形能力を期待することが出来ると考えられる。

(c)変形能特性

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 と塑性率 μ を用いた¹²⁾¹³⁾。

$$\tau = M_{\max}/M_y \quad (4)$$

$$\mu = \theta_{\max}/\theta_y \quad (5)$$

但し、 $M_{\max}$: 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

解析結果よりフランジの幅厚比が小さい断面において最大強度の変化が顕著に見られたので、図-12、13にモーメント上昇率と塑性率について、フランジの幅厚比を8と固定して、ウェブの幅厚比を変化させた図を示す。図-12(a)(b)はモーメント上昇率 τ をまとめたものであるが、ウェブの幅厚比が小さいモデルでは、ひずみ硬化開始ひずみよりも降伏比がモーメント上昇率に大きな影響を与えていることが分かる。さらにSM570鋼は、ウェブの幅厚比が変化してもモーメント上昇率はさほど大きな違いはないが、LYR鋼は大きな違いが出ていることが分かる。LYR鋼のウェブの幅厚比の変化による違いは図-13の塑性率 μ でも同様の傾向が見られた。図-13(a)において h_w/t_w が小さくなると、ひずみ硬化開始ひずみが大きな部材の塑性率が大きくなるのは塑性流れの影響と考えられる。従って、ウェブの幅厚比が小さな部材ほどLYR鋼の特徴を生かすことが出来ると考えられる。

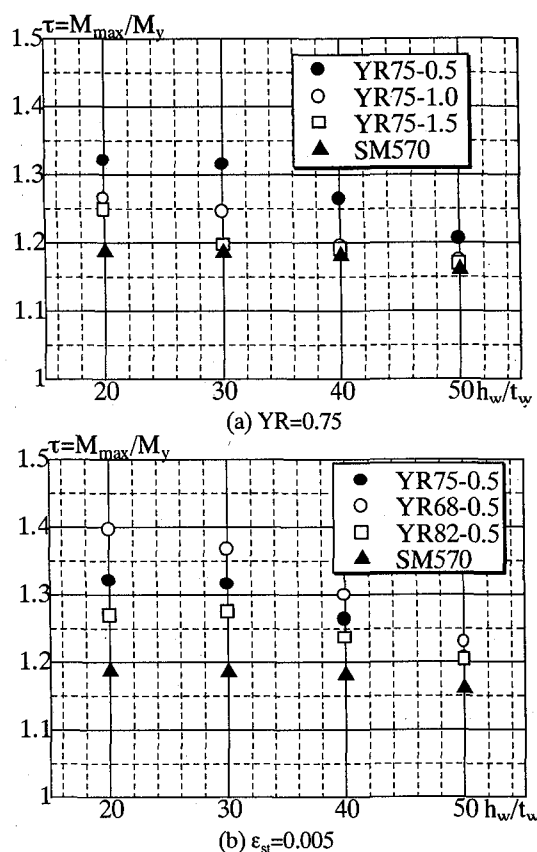


図-12 モーメント上昇率 τ

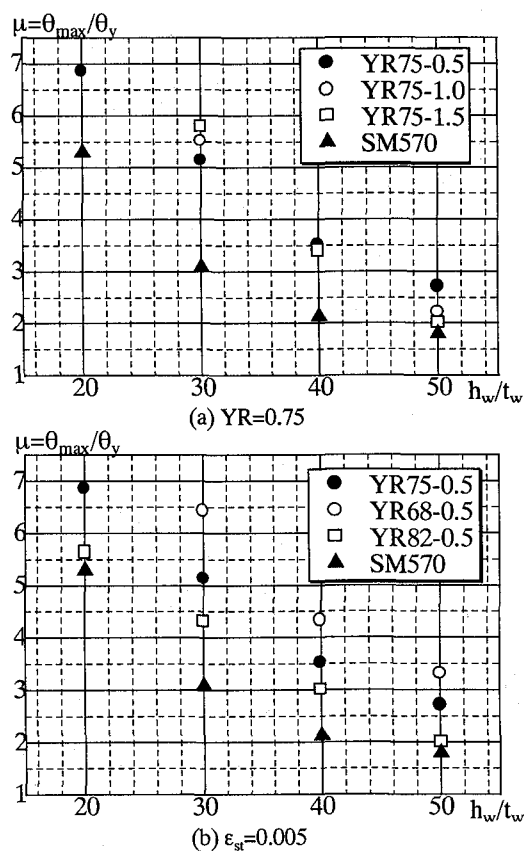


図-13 塑性率 μ

(d)エネルギー吸収量

次にエネルギー吸収量 U を図-14のような面積で定義してまとめた図が図-15である。これらの図もフランジの幅厚比を8に固定して、縦軸に U を、ウェブの幅厚比を横軸に

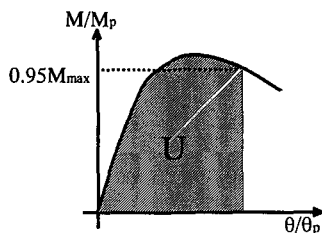


図-14 エネルギー吸収量の定義

として表わした。図-15(a)において h_w/t_w が大きいモデルでは、降伏棚の長さを変えても、エネルギー吸収量に目立った違いは見られなかった。これは降伏比を変化させても同様であることがわかる。(a)(b)の両図より、エネルギー吸収量はひずみ硬化開始ひずみよりも降伏比を変化させた場合の方に大きな差が見られ、降伏比が低いほど LYR 鋼の有利性が見られる。しかも、幅厚比が小さな断面ほど顕著にその影響が見られることが分かる。

なお、今回のエネルギー吸収量は図-14 に示すように、最大強度から 5%低下するところまでの面積で定義したが、定義の仕方によっては結果が大きく異なってくると考えられる。今後、限界状態を考える設計において、塑性変形能力は重要な指標となると思われる。従ってその評価パラメータの1つとしてエネルギー吸収量の定義は重要であると考えられる。

(e)最大曲げ極限強度

図-16 は最大曲げ強度を示した図で、縦軸は最大曲げモーメント M_{max} を全塑性曲げモーメント M_p で無次元化した値を、横軸には次式(6)で定義される幅厚比パラメータ R_w で示したものである。表-5 は、(6)式より各ウェブ幅厚比での R_w を計算した値である。ただしフランジの幅厚比は8のモデルである。

$$R_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad \text{ただし、} k=23.9 \quad (6)$$

表-5 ウェブの幅厚比と R_w

h_w/t_w	R_w			
	YR75	YR68	YR82	SM570
10	0.10	0.10	0.11	0.11
20	0.21	0.20	0.22	0.23
30	0.31	0.30	0.32	0.34
40	0.41	0.39	0.43	0.45
50	0.51	0.49	0.54	0.56

(a)図より、降伏比を $YR=0.75$ と一定にした場合、ひずみ硬化開始ひずみが小さいほど最大強度が上昇している。しかし徐々にひずみ硬化開始ひずみを変化させると、SM570 鋼の強度に近づいている。中でもひずみ硬化開始ひずみが 1.0%のモデルでは R_w が 0.41

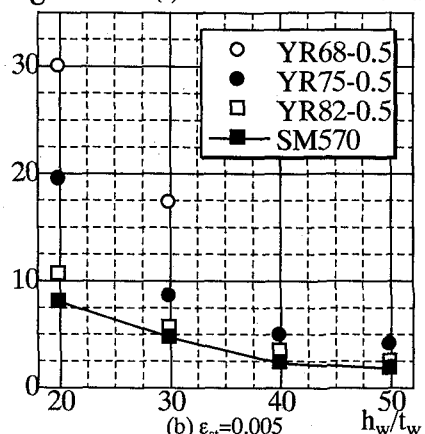
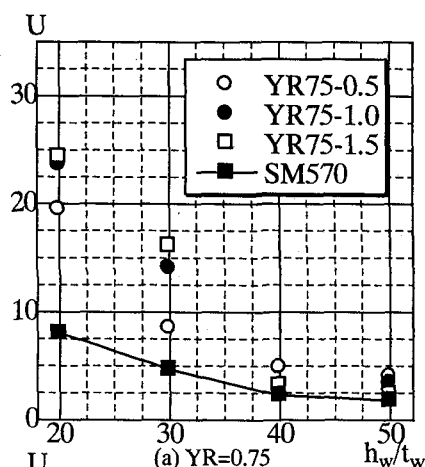


図-15 エネルギー吸収量 U

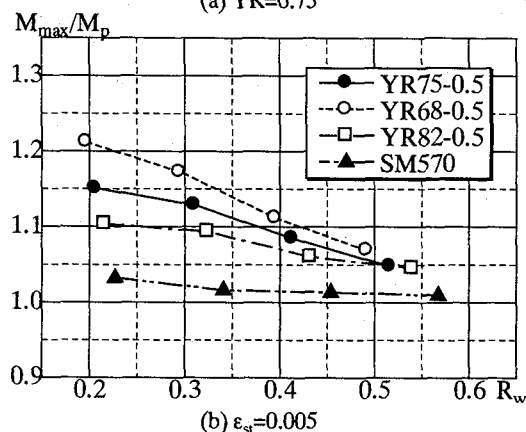
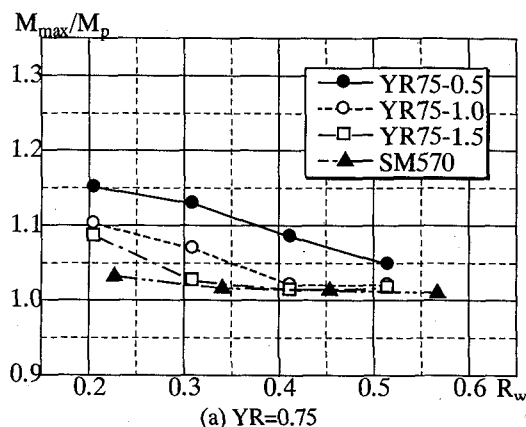


図-16 曲げ極限強度

で、1.5%のモデルでは R_w が0.31の時にほとんどSM570鋼の強度となっている。また(b)図より、ひずみ硬化開始ひずみを $\varepsilon_s=0.005$ と一定にし降伏比を変化させた場合、ひずみ硬化の影響を受け強度が上昇するが、その上昇量は降伏比が低いほど大きくなっている。これは最大強度に達する以前にひずみ硬化の影響を受けるためと考えられる。また、 R_w が大きくなるにつれて最大強度も下がっており、 R_w が0.5近辺になると降伏比を下げたことによる最大強度の上昇は期待できないことがわかる。

6. 結論

本研究より得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1)本論文で用いた解析手法の結果は、文献 10)の断面において実験結果とよく対応しており、この解析法の妥当性が確認された。
- (2)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、モーメント上昇率 τ はひずみ硬化開始ひずみが小さいほど大きくなる。塑性率 μ はウェブの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。
- (3)今回採用した断面において、降伏棚の長さを一定にして降伏比を変化させた場合、降伏比が小さいほどモーメント上昇率 τ が高くなり、ウェブの幅厚比が小さくなるとその傾向が明確に現れる。塑性率 μ についても同様のことが言える。
- (4)強軸の純曲げを受ける H 形断面部材の曲げ極限強度は、SM570 鋼がほぼ全塑性モーメント M_p の強度しか有していないのに対して、LYR 鋼は M_p を超える強度を有していた。特に、幅厚比パラメータ R_w の小さい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に強度の上昇量は大きい。
- (5)以上の結果より、降伏比を下げるにより全塑性曲げモーメント M_p よりも最大曲げ強度 M_{max} を上昇させることができる。しかし、その上昇量は構成板要素の幅厚比に左右されると考えられる。よって、LYR 鋼の特性を生かすような部材としては、幅厚比が小さな断面部材にすることが望ましいことが分かる。

参考文献

- 1)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.
- 2)高梨晃一・孟令樺・福島暁男・桑村仁・鈴木孝彦：低 YR60 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.
- 3)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.
- 4)山口種美：建築構造用鋼材の開発と実用化，新日鐵技法，1955.
- 5)福本 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.
- 6)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 年修士論文，1994.
- 7)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荷力と変形能力に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.43A，pp.147-154，1997.
- 8)岩坪要・小金丸卓也・山尾敏孝・崎元達郎：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，構造工学論文集，Vol.43A，pp.167-176，1997.
- 9)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.
- 10)森脇良一：降伏比の異なる 60 キロ級高張力鋼による溶接組立梁の極限強度と変形性能について，構造工学論文集，Vol.37A，pp.155-165，1991.
- 11)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990.
- 12)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.
- 13)井上哲郎・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.
- 14)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.

(1997 年 9 月 26 日受付)