

H形鋼柱の塑性変形能力改善に関する研究

林原光司郎・三谷 勲

(受理 平成8年5月31日)

IMPROVEMENT ON PLASTIC-ROTATION CAPACITY OF H-SHAPED STEEL BEAM-COLUMNS

Koushiro HAYASHIHARA and Isao MITANI

It is well known that plastic-rotation capacity of H-shaped steel members deteriorate due to local and/or lateral buckling. But, it is possible to increase the capacity if the buckling is prevented by partial reinforcement to that part of the member which has severe stress.

In this paper, eight cantilever beam tests using H-shaped steel are carried out. Four of them have cover plate on both flanges. Two cases of the length of the reinforcement from the fixed end are considered: 10% and 20% of the specimen length. The other four beams have stiffener on the web, the length being 20% and 40% of the specimen length. Based on the experimental results, the effects of reinforcement to the elastic-plastic behavior and plastic-rotation capacity of H-shaped steel beam are discussed.

1. 序

H形鋼部材の塑性変形能力は、局部座屈や横座屈により低下することが良く知られており、この観点より塑性設計においては、塑性変形能力を確保するために、板要素の幅厚比や横補剛間隔が制限されている。しかしながら、塑性変形能力のみを維持するためだけなら部材全体の板要素の板厚を上げる必要はなく、大きな応力が作用する部分のみに補剛を施すのみで十分である。

建物を構成する主要部材の中で、柱は任意の位置に横補剛を設けることができない等、はりに比べて制約が多い。従って局部的な補剛（幅厚比を減少、ねじれ剛性及びそり剛性を高める）により変形能力を向上させることができれば、柱にたいする設計の自由度が増し、経済的で耐震性に優れた柱の設計が容易になろう。また、局部的な補剛で塑性変形能力を高めることが可能となれば、耐震設計上問題のある既存の建築物でも、その耐震性能を容易に改善できよう。

塑性変形能力改善に関する既往の研究として、H形鋼ばりに関しては、ウェブ上に帯板、X型、H型のカバープレートを添接し補強を施した研究¹⁾、溝形のプレートをウェブにボルト接合した研究²⁾等が報告されている。また、柱に関しては角形鋼管柱の材軸方向にスチフナを施し塑性変形能力の向上を計った研究^{3, 4, 5)}が報告されているが、H形鋼柱の柱脚部での部分補強により塑性変形能力の改善を試みた研究は著者らの研究^{6, 7, 8)}以外には報告されていない。

本研究は、H形鋼柱の塑性変形能力の改善を目的とした補強方法、及び補強量と補強効果の関係を定量的に明らかにすることを目的とするもので、今回は軸力が零の場合で、H形鋼のフランジをカバープレートで補強したもの（フランジ幅厚比の減少、構面外剛性の増大）、及びウェブを材軸方向スチフナで補強したもの（ウェブ幅厚比の減少、構面外剛性の増大）の2種類について実験を行った。

本報では、これらの実験結果、及び文献9)の実験結果（無補強）に基づいて補強効果の検討を行った。

2. 実験計画

2.1 試験体

実験に用いた試験体の形状を図1に、実験条件を表1に示す。試験体は市販の軽量H形鋼(材質SWH400)を用い、フランジに補強を施した試験体(以下、フランジ補強試験体と略す)F1AB(A(3桁))は横補剛

間隔 lb/iy を、B(1桁)は補強長さ割合を示す)を4体、ウェブに補強を施した試験体(以下、ウェブ補強試験体と略す)W1ABを4体、計8体製作した。補強板はフランジと同じ機械的性質の鋼材で、母材に溶接接合されている。補強長さの材長に対する割合をフランジ補強試験体では10%(B=1)と20%(B=2)、ウェブ補強試験体では20%(B=1)と40%

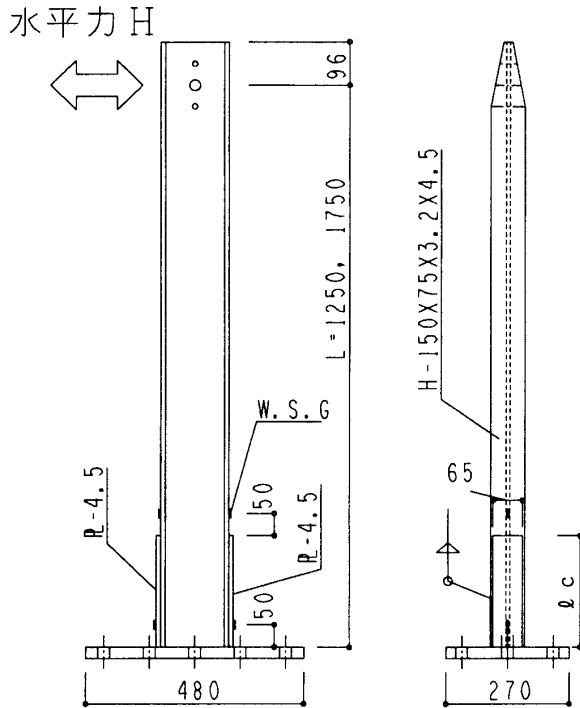


図1(a) フランジ補強試験体

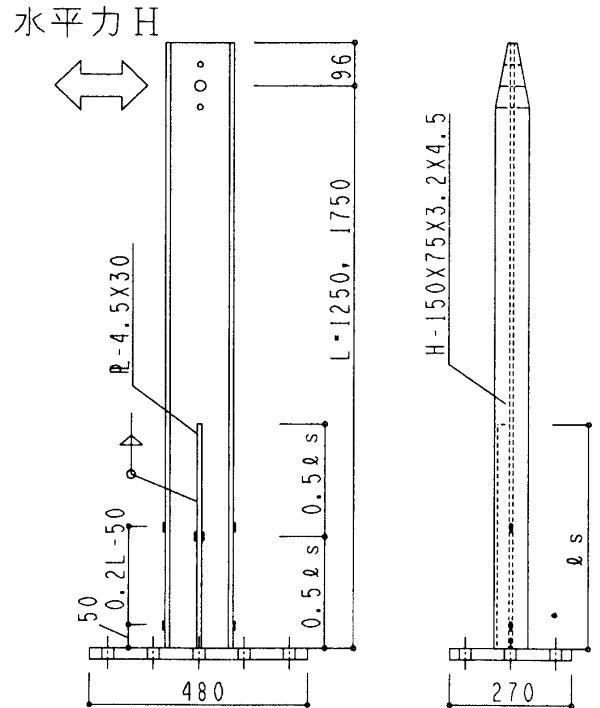


図1(b) ウェブ補強試験体

表1 実験条件および材料の機械的性質

NAME	L=lb (cm)	d(cm)	B(cm)	tf(cm)	tw(cm)	lb/ix	lb/iy	σ_y (t/cm ²)		Est/E (%)		α (%)	lc, ls (cm)
								Flange	Web	Flange	Web		
W10751	125	14.97	7.54	0.435	0.340	20.40	75.48	3.10	2.95	1.90	1.83	2.38	25
W10752	125	14.90	7.52	0.434	0.338	20.48	75.53	3.10	2.95	1.90	1.83	4.79	50
W11051	175	15.06	7.52	0.438	0.339	28.42	105.92	3.05	2.95	1.76	2.14	2.37	35
W11052	175	14.92	7.54	0.441	0.341	28.62	105.26	3.05	2.95	1.76	2.14	4.72	70
F10751	125	15.00	7.53	0.437	0.339	20.37	75.21	3.10	2.95	1.90	1.83	2.57	12.5
F10752	125	14.95	7.52	0.435	0.339	20.44	75.59	3.10	2.95	1.90	1.83	5.17	25
F11051	175	15.01	7.53	0.435	0.337	28.48	105.80	3.10	2.95	1.90	1.83	2.58	17.5
F11052	175	15.05	7.54	0.436	0.339	28.44	105.74	3.10	2.95	1.90	1.83	5.14	35
075000*	125	14.97	7.49	0.424	0.302	20.19	74.7	2.87	2.79	1.19	1.48	0	0
105000*	175	14.97	7.43	0.423	0.294	28.18	104.0	2.87	2.79	1.19	1.48	0	0

L: 試験体長 lb: 横補剛支点間距離 d: 断面せい B: フランジ幅 tf: フランジ板厚
tw: ウェブ板厚 ix, iy: 強軸, 弱軸回りの断面二次半径 σ_y : 降伏応力度 E: ヤング係数
Est: ひずみ硬化域での接線係数 α : 補強材の体積/無補強試験体の体積
lc, ls: カバープレートおよびスチフナ補強材の長さ *) 無補強部材(文献9参照)

(B=2)とした。

lb/iy は日本建築学会「鋼構造塑性設計指針」の制限値 (≤ 95) の範囲内のもの ($lb/iy=75$) と制限値を超えているもの ($lb/iy=105$) の2種とした。なお、引張試験より得られた使用鋼材の応力度-ひずみ度曲線は、フランジ材では塑性流れ域が認められないバイリニア型に近いものであり、ウェブ材では、塑性流れ域が認められるトリリニア型に近いものであった。表1中には無補強部材075000 ($lb/iy=75$) 及び105000 ($lb/iy=105$) 実験条件等も併記している (文献9参照)。

2.2 実験方法

加力装置は文献9) で用いたものと同じである。試験体は柱脚部にてロ型フレームに高力ボルトを用いて固定され、上端部には構面外変位拘束、構面外回転自由となるような水平加力装置が取り付けられている。試験体、及び荷重測定用のロードセルに、水平力装置の自重による曲げの影響が入るのを防ぐため、カウンターバランスを設けている。

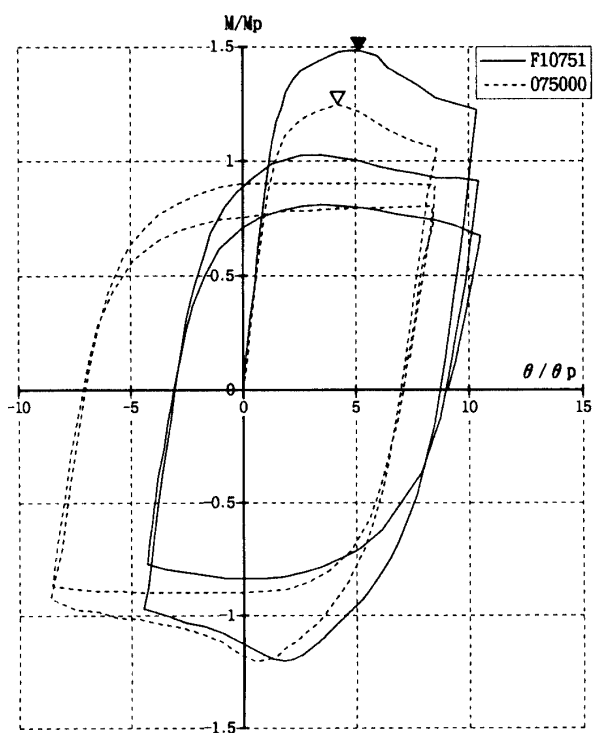
上端部で構面内変位を、 $L/3$ (L =試験体長) の点で構面内変位、ねじれ角、及び構面外変位を測定した。

3. 実験結果及びその考察

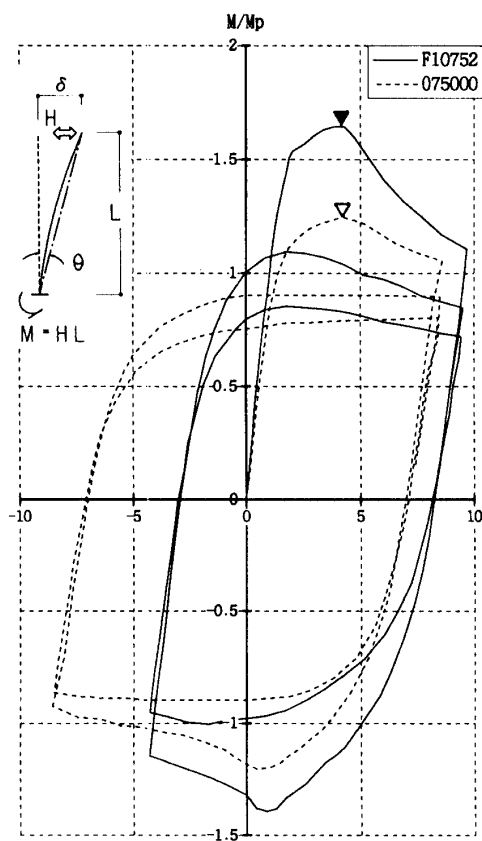
3.1 フランジ補強試験体

M/Mp ($M=H \times L$, H : 水平力, Mp : 無補強断面の全塑性モーメント) と $\theta/\theta p$ ($\theta: \delta/L$, δ : 加力点での水平変位, $\theta p: Mp$ に対応する無補強部材の弾性回転角) との関係を図2 (a)~(d)に示す。なお、図2各図には補強効果の比較のため、無補強試験体の実験結果を点線で示した。図中、 ∇ 、 \blacktriangledown は各々無補強及び補強を施した試験体の最大耐力位置を示している。

無補強の場合に比べ、フランジ補強を施した試験体の耐力は高くなっている。しかし、最大耐力時の変形量、及び最大耐力以後の耐力低下の様子は無補強の場合と同程度であり、塑性変形能力の改善は改められないことが図2 (a)~(d)よりわかる。これは、カバープレート部分は降伏せず、カバープレート外で降伏したため、同一水平変位に対しフランジ補強試験体の塑性回転量が無補強の場合に比べ大きくなることによる



(a) F10751 (フランジ補強, $lb/iy=75$)



(b) F10752 (フランジ補強, $lb/iy=75$)

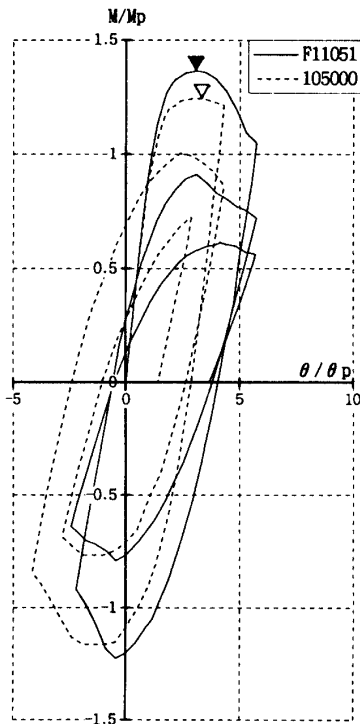
図2 荷重-変形関係

と推定される。

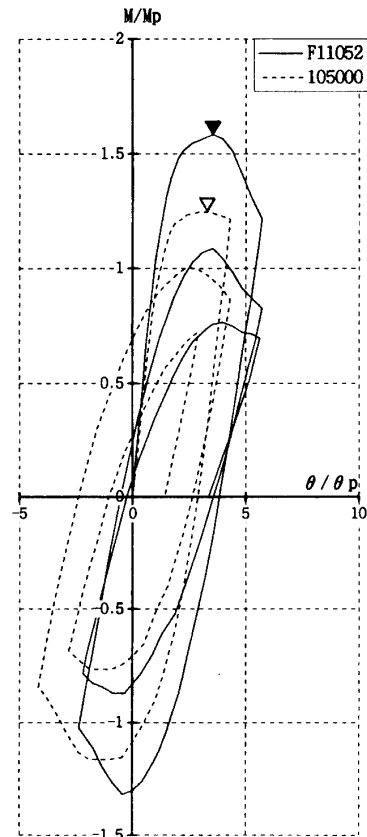
このことより、フランジ補強によって塑性変形能力を改善するためには、カバープレート部分が降伏するか、または、カバープレートより柱脚部側に無補強部分を設け、その部分が降伏するように設計する必要があると推定される。

3.2 ウェブ補強試験体

$M/M_p - \theta/\theta_p$ 関係を図2(e)~(h)に示す。図からわかるように、最大耐力に関しては、 $l_b/i_y=75$ の場合5%程無補強の場合に比べ高くなっているが、 $l_b/i_y=105$ の場合にはほぼ同程度である。最大耐力時の変形量に関しては、 $l_b/i_y=75$ の場合無補強の場合に比べ35%程増加しているのに対し、 $l_b/i_y=105$ の場合にはほとんど増加していない。また、最大耐力以後の耐力低下に関しては、 $l_b/i_y=75$ の場合、無補強の場合に比べ著しく低下が少なくなっているが、 $l_b/i_y=105$ の場合は無補強の場合と同程度である。これは、 l_b/i_y の値に拘わらず同一断面のスチフナを設けたため、 l_b/i_y の値によって構面外の補剛効果が異なることによると推定される。



(c) F 11051 (フランジ補強, $l_b/i_y=105$)



(d) F 11052 (フランジ補強, $l_b/i_y=105$)

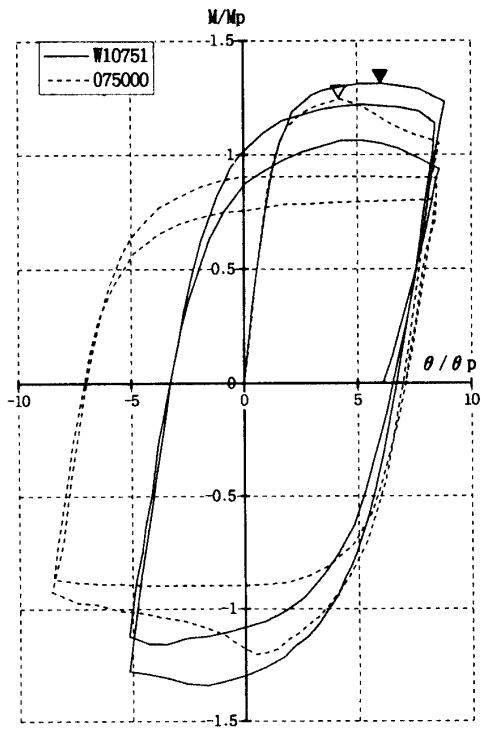
3.3 繰り返し加力に伴う耐力低下について

繰り返し加力に伴う耐力低下の様子を比較する目的で、荷重領域で正側の実験曲線を順次つないで得られる $M/M_p - \theta/\theta_p$ 曲線を求めた。その結果を図3(a)~(d)に示す。同図(a), (b)はフランジ補強試験体で、(a)は $l_b/i_y=75$, (b)は $l_b/i_y=105$ の場合であり、同図(c)及び(d)はウェブ補強試験体で、(c)は $l_b/i_y=75$, (d)は $l_b/i_y=105$ の場合である。また、図3(a)~(d)には比較のため、無補強試験体の実験結果を点線で示した。

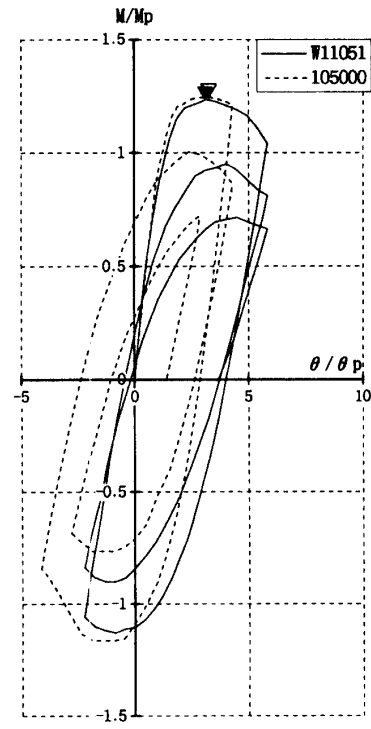
図3(a), (b)より、フランジ補強試験体では、1) l_b/i_y の値に拘わらず、無補強試験体に比べ繰り返し加力に伴う耐力低下が大きいこと、2) 繰り返し加力に伴う耐力低下は補強長さが長い程大きいこと(同図中、実線と一点鎖線参照)がわかる。上記1)および2)の現象は、前述したように、本試験体ではカバープレートが降伏しないためであると推察される。

図3(c), (d)より、ウェブ補強試験体では、 l_b/i_y

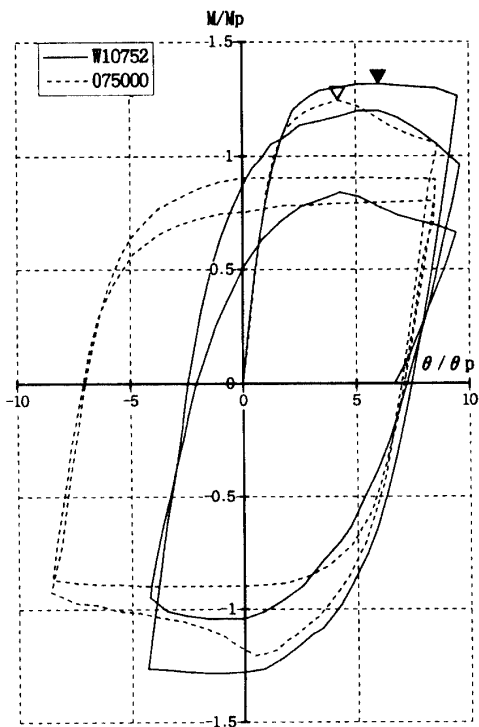
図2 荷重-変形関係 (つづき)



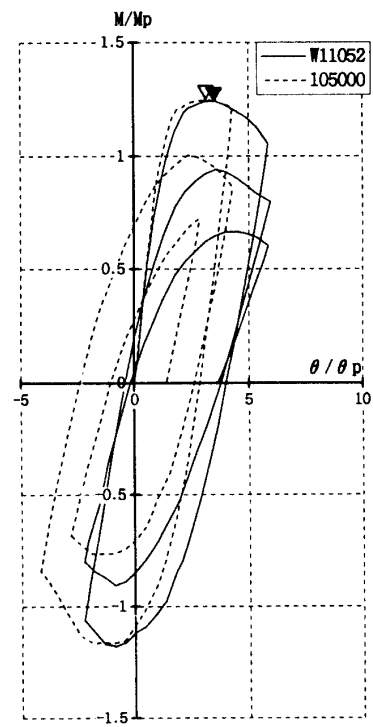
(e) W10751 (ウェブ補強, $lb/iy=75$)



(g) W11051 (ウェブ補強, $lb/iy=105$)

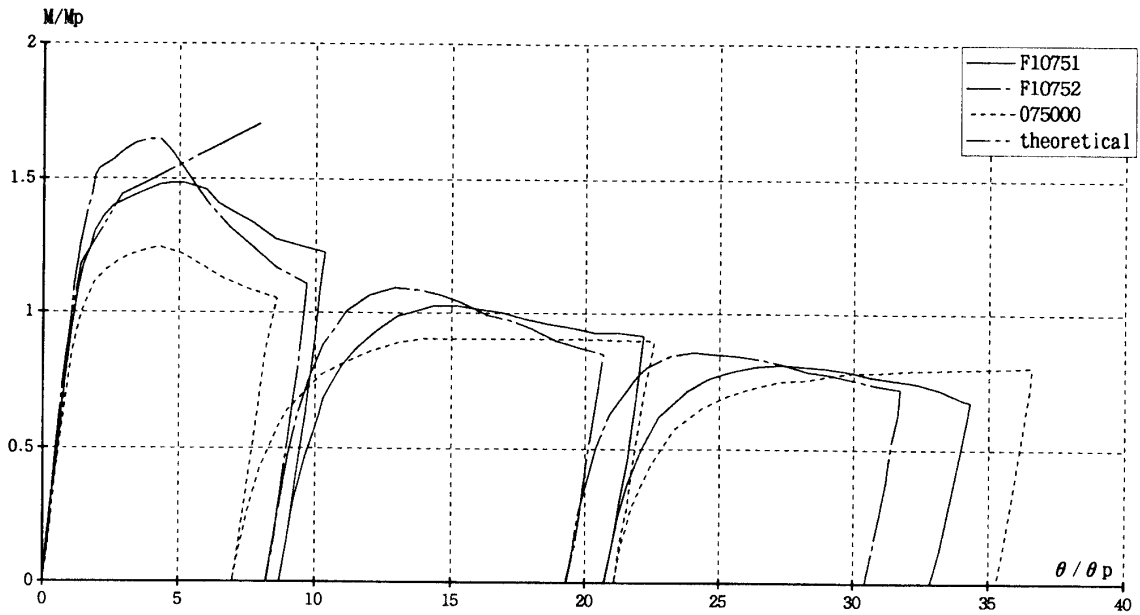


(f) W10752 (ウェブ補強, $lb/iy=75$)

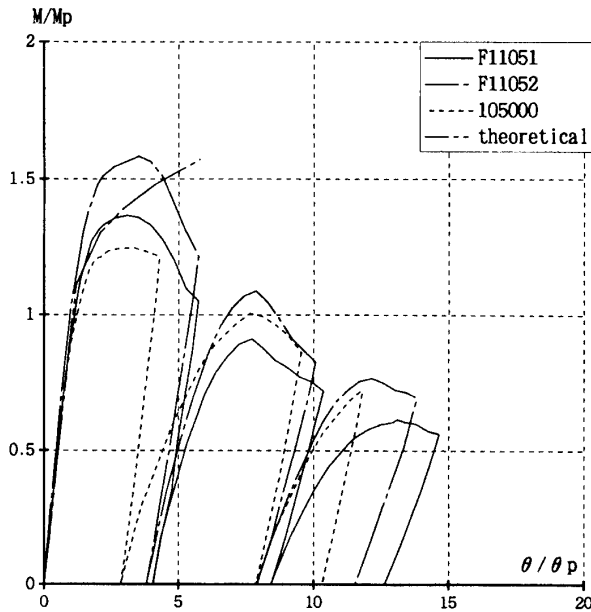


(h) W11052 (ウェブ補強, $lb/iy=105$)

図2 荷重-変形関係 (つづき)



(a) $lb/iy=75$ (フランジ補強)



(b) $lb/iy=105$ (フランジ補強)

図3 荷重で正側の M- θ 曲線を順次つないだ実験曲線

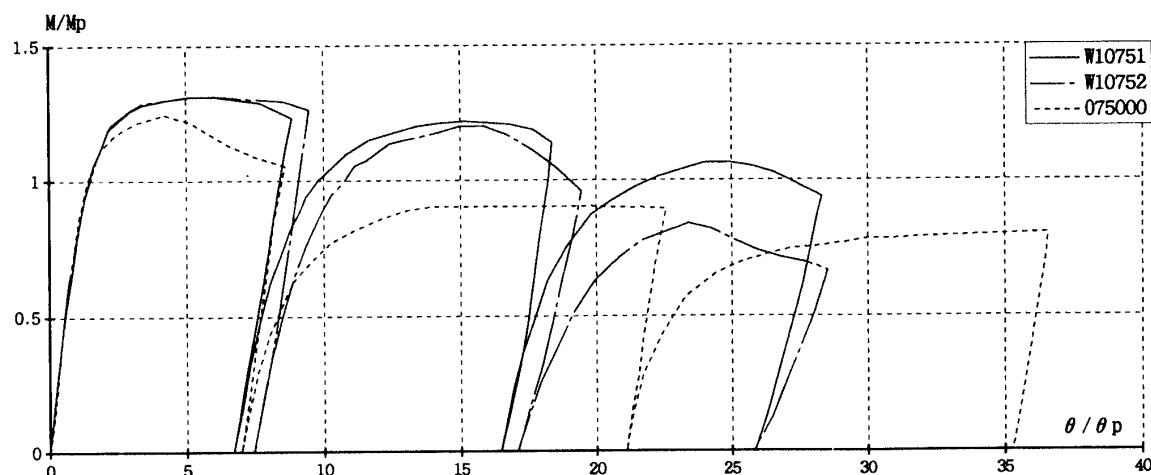
の値によって繰り返し加力に伴う耐力低下の度合いが異なり、 $lb/iy=105$ の場合には補強効果は認められないが、 $lb/iy=75$ の場合には補強効果が顕著であることがわかる。

4. 塑性変形能力

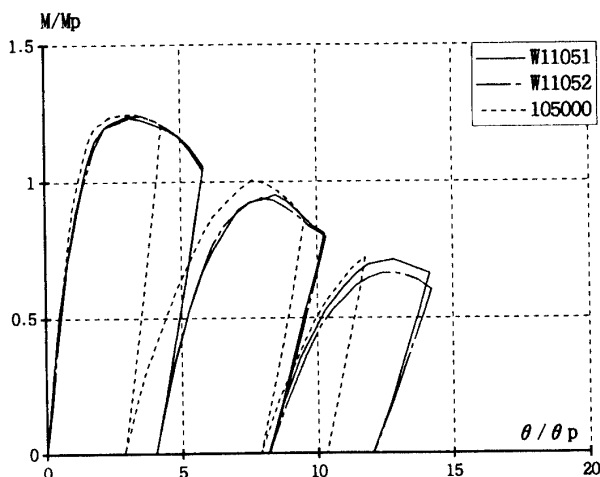
実験結果より、最大耐力時の塑性変形能力 R_m 、および最大耐力の95%まで耐力が低下した時の塑性変形能力 $R_{0.95}$ を求め、文献10) に提案された塑性変形能力評価式より得られる予測値 $((R_m)_{pred}$ 及び $(R_{0.95})_{pred}$) との比較を図4 (a), (b) に示す。

評価式を使用する際、F1□1 試験体では lb を $0.9L$ に、F1□2 試験体では $0.8L$ に、また W1□□ 試験体において、ウェブ幅厚比を $(d/2)/tw$ としている (d : 断面せい、 tw : ウェブ厚)。また、今回の実験は加力点で構面外変位、及びねじれを拘束した片持ばり形式で行ったので構面外に関する支持条件より定まる定数 k は 0.7 として評価式を適用した。図4 (a), (b) 中、 Δ , \square , \circ は $lb/iy=75$ の時のフランジ補強試験体、ウェブ補強試験体、無補強の場合であり、 \blacktriangle , \blacksquare , \bullet は $lb/iy=105$ の時の各試験体の場合である。

両図より $lb/iy=75$ の場合でウェブ補強の試験体では塑性変形能力が著しく改善されていることがわかる。なお、フランジ補強、ウェブ補強試験体とも予測値が実験値より大きくなっているが、これは評価式は材長方向に等断面材を対象としたものであるためである。局部補強による塑性変形能力の改善量を推測するためには、等価幅厚比等を適切に与える必要があることを意味している。



(c) $lb/iy=75$ (ウェブ補強)



(d) $lb/iy=105$ (ウェブ補強)

図3 荷重で正側の M-θ 曲線を順次つないだ実験曲線 (つづき)

5. 弾塑性解析

最大耐力に至るまでの実験曲線を追跡するために、フランジ補強試験体について弾塑性解析を行った。

解析に際し以下の仮定を用いた。

- 1) 平面保持。
- 2) 断面は理想サンドウィッチ断面。
- 3) 応力度-ひずみ度曲線はバイリニア ($E/E_{st}=53$)。
- 4) 局部座屈, 横座屈等の不安定現象は生じない。

次式により構面内水平変位 δ を求めた。

$$\delta = \int \int \kappa(x) dx dx + C1x + C2$$

ここに、 $\kappa(x)$: 曲率分布, $C1, C2$: 積分定数, フランジ補強試験体のうち補強長さが短い場合の試験体に対応する解析結果を図3 (a), (b)中に二点鎖線で示す。実験曲線と解析曲線とを比較することにより、弾性域から最大耐力に達するまでの挙動を解析曲線はよく説明している。

6. 離散化極限解析

無補強試験体及びフランジ補強試験体について、文献11)に従う離散化極限解析を行った。

6.1 崩壊機構

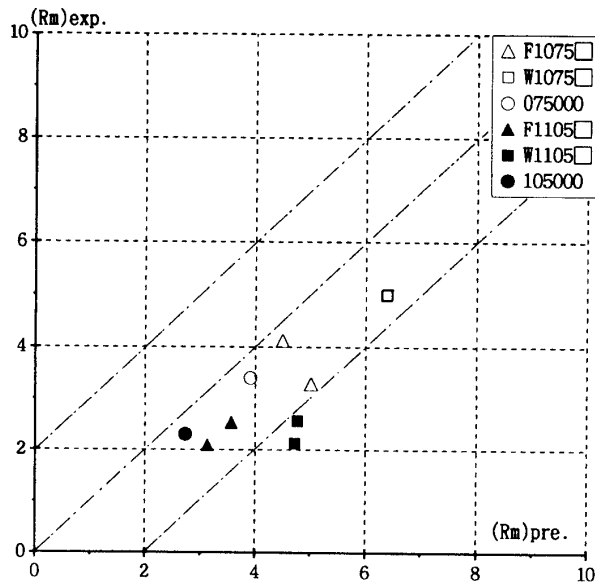
図5, 図6は、今回の解析で用いた崩壊機構であり、図5は無補強試験体を、図6はフランジ補強試験体を表す。両崩壊機構ともに、圧縮フランジにおいてはI, J点を、ウェブに関してはK点を頂点とする面外変形により局部座屈を、また(d)図に示すように圧縮フランジ及びウェブの構面外変形により横座屈を考慮している。また、図6中の斜線部は、カバープレートによる補強部を表す。

6.2 仮定

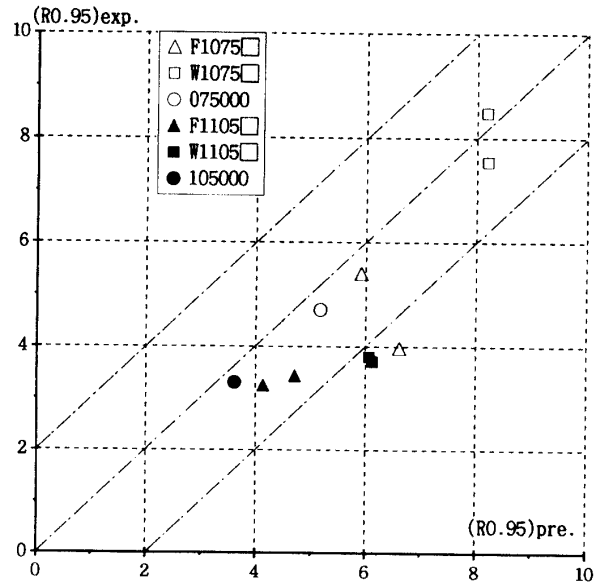
- 1) Mises の降伏条件に従う。
- 2) 引張フランジでは構面外変形が生じない。
- 3) フランジ板要素より得た引張試験結果を参考にした応力度-ひずみ度関係 (図7) を使用。

6.3 解析方法及びその結果

解析では、表1に示す実測の断面サイズを用いた。横座屈位置に関するパラメータ λ (無補強), η (フ



(a) 最大耐力時



(b) 最大耐力の95%にまで低下した時

図4 塑性変形能力

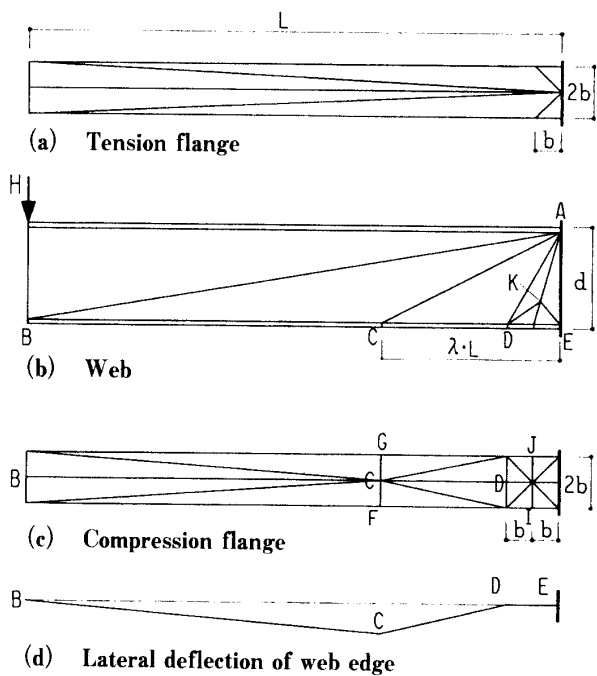


図5 崩壊機構 (無補強試験体)

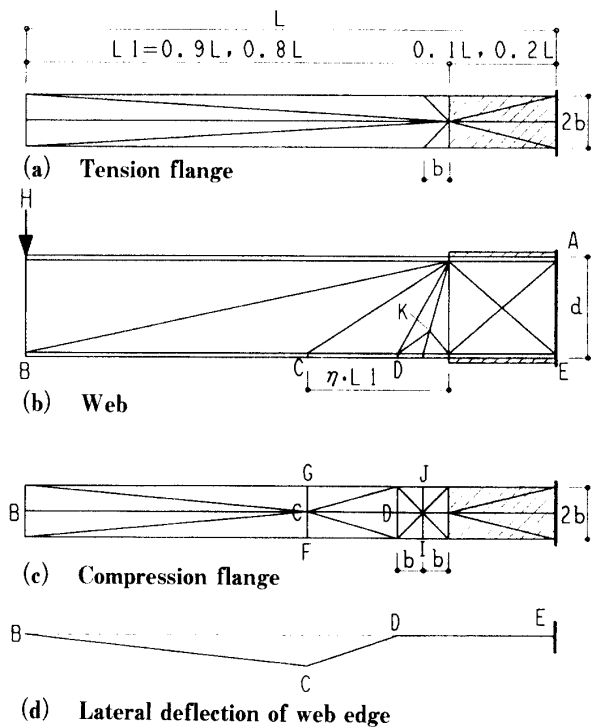


図6 崩壊機構 (フランジ補強試験体)

ランジ補強) は共に3分の1とした。局部座屈に関する初期変形として圧縮フランジI, J点及びウェブK点の各面外方向に各板厚の3分の1を, また横座屈に関する初期変形としてC, F, G点の構面外方向に材長の200分の1を与え解析を行った。

解析結果を図8(a), (b)に太実線(F1□□□1),

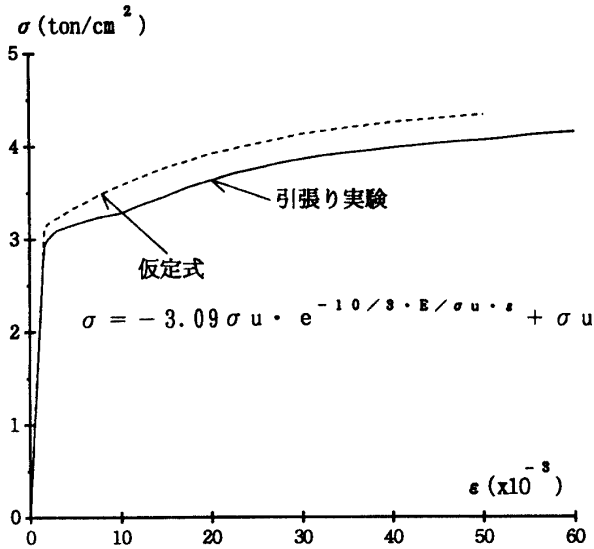


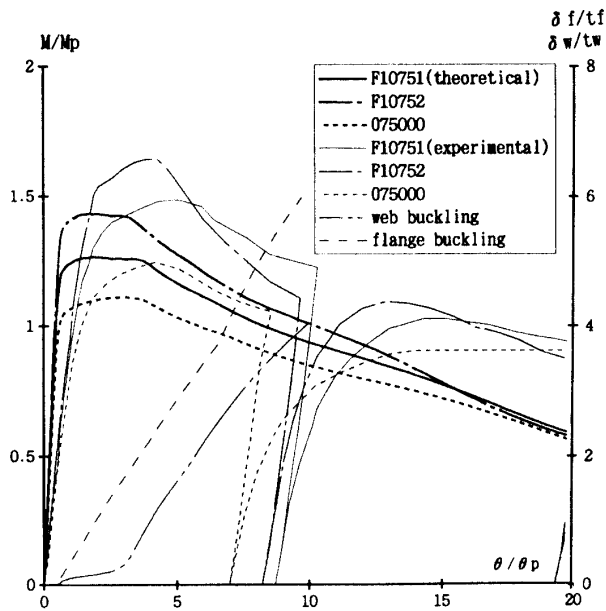
図7 応力度-ひずみ度関係

太一点鎖線(F1□□□2), 太点線(無補強)で示す。両図より, 弾性範囲において実験と解析との対応は良くないが, 最大耐力以降の耐力低下の様子は良く対応しており, 解析曲線においても実験結果ほど顕著では無いが, フランジ補強長さが長くなる程最大耐力以後の耐力低下が大きくなるのがわかる。

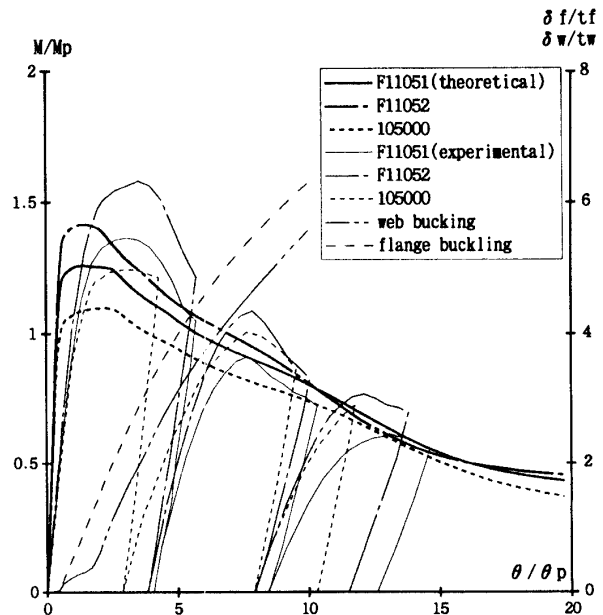
また, 同図(a), (b)中に補強長さが長い場合(F10752及びF11052)のフランジ局部座屈(I点での面外変位: δf), ウェブ局部座屈(K点での面外変位: δw)の進展状況を各板厚 t_f, t_w で無次元化を行い示した。図より, 弾性限界から最大耐力に至るまではフランジの局部座屈が先行して起こり, 最大耐力以降の劣化域においてウェブの局部座屈が急速に進展している様子がわかる。

7. 結 び

H形鋼柱の塑性変形能力の改善を目的とした補強方法, 補強量と補強効果の関係を調べるために, 軽量H形鋼のフランジをカバープレートで補強したもの, およびウェブを材軸方向スチフナで補強したものについて繰り返し水平加力実験を行い, 実験結果の検討を行った。その結果, 局部補強により塑性変形能力の改



(a) $l_b/i_y=75$ (フランジ補強)



(b) $l_b/i_y=105$ (フランジ補強)

図8 解析結果と実験結果との比較

善が可能であることが明らかとなった。また、今後解明すべき点として、1) ウェブ補強(材軸方向スチフナ)に関しては、スチフナ剛性及びスチフナ長と補強効果の関係、2) フランジ補強(カバープレート)に関しては、カバープレートが降伏する場合或いはカバープレートより柱脚部側に無補強部分を設けた場合の補強効果、3) 等断面材を対象とした変形能力評価式を局部補強材に適用する場合に用いるべき等価幅厚比等の検討が挙げられる。

謝 辞

実験・資料整理に際し、'81年度卒論生、加藤康博(現(株)熊谷組)、椎葉喜一(現大和団地(株))、二田司(現飛鳥建設(株))の諸氏から御協力を得ました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木敏郎, 小河利行, 五十嵐規矩夫: ウェブに鋼板を添接したH形鋼曲げ部材の塑性変形性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第470号, pp.115~122, 1995.4
- 2) 鈴木敏郎, 小河利行, 五十嵐規矩夫, 末岡利之: 構成板要素の局部座屈を拘束したH形鋼曲げ部材の塑性変形性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第474号, pp.181~190, 1995.8
- 3) 松井千秋, 森野捷輔, 津田恵吾, 椎葉喜一: 角形鋼管部材の局部座屈補強に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.1367~1368, 1983.9
- 4) 鈴木敏郎, 酒井新吉, 鶴飼司郎, 青木俊夫, 木村克次: 箱型断面柱部材の弾塑性挙動に関する実験的研究(その2 リブによる補強効果について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.2069~2070, 1981.9
- 5) 鈴木敏郎, 酒井新吉, 鶴飼司郎, 青木俊夫, 木村克次: スチフナ補剛箱型断面柱部材の変形性状について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.1919~1920, 1982.10
- 6) 三谷 勲, 林原光司郎: H形鋼柱の塑性変形能力改善に関する実験的研究(その1), 日本建築学会九州支部研究報告, 第26号, pp.233~236, 1982.3
- 7) 三谷 勲, 林原光司郎: H形鋼柱の塑性変形能力改善に関する実験的研究(その2 実験結果の考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1915~1916, 1982.10
- 8) 秦 旭 安, 林原光司郎, 三谷 勲: H形鋼柱の塑性変形能力改善に関する一実験, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, 第10号, pp.581~584, 1996.3
- 9) 三谷 勲, 山崎達司, 林原光司郎, 今門一弘: 複曲率曲げを受けるH形鋼柱の塑性変形能力に及ぼす軸力比および曲げモーメント比の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第370号, pp.69~80, 1986.12
- 10) 三谷 勲, 今門一弘: 複曲率曲げを受けるH形鋼柱の塑性変形能力評価式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第379号, pp.71~78, 1987.9
- 11) 林原光司郎, 三谷 勲: 座屈を伴うH形鋼柱の離散化極限解析, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, 第10号, pp.573~576, 1996.3