

軸圧縮力を受ける H 形鋼柱の塑性変形能力改善のための 補強法に関する実験的研究

三谷 勲・有馬 冬樹・林原光司郎・秦 旭安
(受理 平成 8 年 5 月 31 日)

Experimental Study on a Reinforcing Method for Improvement of Plastic Rotation Capacity of an H-shaped Steel Column Subjected to an Axial Compressive Load

Isao MITANI, Fuyuki ARIMA, Koshiro HAYASHIHARA and Xuan QIN

Fourteen partial reinforced H-shaped steel columns and a non-reinforced steel column were tested under monotonic axial compressive loading in order to develop a new reinforcing method for the improvement of plastic rotation capacity of the column. The reinforcing method was basically divided into two types: by welding steel plates and ribs (A type) and by filling concrete (B type). Non-reinforcing parts were provided at both column ends in common with each specimen. The main purpose of the reinforcement is to provide much increase of plastic rotation capacity and little increase of the strength at the column ends.

The main test variables are:

- i) The location and the type of reinforcing plates and ribs welded to the column (A type)
- ii) The height of non-reinforcing parts and the quantity of reinforcing bars embedded in concrete filled (B type)

Main conclusions are:

- i) The improvement of plastic rotation capacity with a little increase of loading capacity can be made by introducing the method presented herein.
- ii) The efficiency of the improvement largely depends on the type of the reinforcement and the height of the non-reinforcing parts at the column ends.

1. 序

H 形鋼柱の塑性変形能力は、フランジ幅厚比、ウェブ幅厚比、軸力比、構面内外の細長比、両材端に作用する曲げモーメントの比率、鋼材の降伏応力度等、局部座屈あるいは横座屈にかかわる多くの要因に支配されることが明らかにされている^{1)~9)}。

過去、部材の塑性変形能力を改善する目的で、局部座屈を起こす板要素に対して補強を施した鉄骨部材の変形性能について検討した研究がある。鈴木ら^{10), 11)}、松井ら¹²⁾は、箱形断面の材軸方向にスチフナを施し、

塑性変形能力の向上を図っている。また、三谷ら^{13)~15)}は、幅厚比の減少と板要素の構面外剛性の増大を図るために H 形鋼の柱フランジをカバープレートで補強、あるいは柱ウェブを材軸方向にスチフナで補強した H 形鋼柱の加力実験を行い、同補強形式の鋼柱の塑性変形能力について検討している。さらに、鈴木ら¹⁶⁾は、コンクリートによる補剛条件下にある鉄骨短柱の降伏後の座屈挙動に対するフランジ幅厚比およびウェブ幅厚比の影響を定量的に把握するため、無補強および補剛試験体について実験的、解析的に検討している。これら一連の研究は、局部座屈が先行する板要素に対し

て直接補強を施し、その幅厚比を減少させることで部材の塑性変形能力を向上させることを目的としたものである。

しかしながら、このような局部補強では、材端部まで補強すると耐力が大きくなり、材端部を塑性化させるためには、材長方向に補強部を長くする必要が生じる。この問題に対して、柱脚部の下端部に無補強の部分を設けると、強度はあまり増大せず、変形能力のみを増大させることができ、さらに、基礎にかかる力を増やさずに、構造物の耐震性能を上げられると思われる。本研究では、このように塑性変形能力が改善される補強方法の開発および補強範囲の検討を目的として、H形鋼柱の材端部に無補強部を設けた鉄骨材補強¹⁷⁾およびコンクリート補強短柱試験体の単調軸圧縮載荷実験を行い、本補強法の塑性変形能力に対する有効性について検討する。

2. 実験計画

2. 1. 試験体

実験に用いた試験体の形状寸法を図1(a)～(i)に、実験条件を表1に示す。試験体は軽量H形鋼(材質SWH400)を用い、両材端にエンドプレートと溶接した平押し型の短柱である。エンドプレートは溶接によるそりが生じたので両載荷面を機械仕上げにより平滑にした。

実験に用いた補強方法は大別すると二種類であり、鋼材カバープレートおよびリブによる補強(Aタイプ)、およびコンクリートによる補強(Bタイプ)である。

図1(a)～(g)に示すAタイプの試験体名は「S+数字+アルファベット」の形で表される。「数字」は端部無補強部の長さ、無補強試験体の場合はエンドプレート間の距離である。「アルファベット」のうち「N」は無補強試験体を表し、「FP」はフランジのカバープレート補強、「WP」はウェブのカバープレート補強、「FS」はフランジのリブ補強、「WS」はウェブのリブ補強、「FWS」はフランジおよびウェブのリブ補強、「FWT」は一定間隔の帯板(PL25×4.5 @100mm)によるフランジおよびウェブの補強を表す。補強板はH形鋼柱フランジと同じ鋼材で、H形鋼にすみ肉溶接されている。

同図(h)および(i)に示すBタイプの試験体では、コンクリートと鉄骨との一体化を図る目的で、柱ウェブに孔をあけ、鉄筋(D10)を挿入している。試験体名

は「S+前数字+WC+後数字」の形式で示されている。「前数字」は端部無補強部の長さ、「WC」はウェブにコンクリート補強、「後数字」には1と2があり、ウェブを貫通した鉄筋の本数を表す。

2. 2. 実験方法

加力は圧縮試験機を用いて試験体の両材端のエンドプレートの平押し形式により行った。図2に示すように、試験体のウェブの両側に計2台の変位計を設置し、エンドプレート間の軸方向変位を測定した。歪ゲージ貼付位置を図3に示す。同図に示すフランジおよびウェブ部分(両端はしあきの中心と材長の中央部)に歪ゲージを貼付し、材軸方向歪を測定した。同図中の○内に示す数字はゲージ番号である。

3. 実験結果および考察

3. 1. 軸圧縮応力-軸方向歪関係

軸圧縮応力-軸方向歪関係を図4に示す。軸圧縮応力は、軸圧縮力を試験体の実測断面積で除したもので、軸方向歪は変位計の値を変位計の測定区間長さで除したものである。各図中 σ_y は無補強断面の降伏軸応力である。即ち、

$$\sigma_y = (A_f \cdot \sigma_f + A_w \cdot \sigma_w) / (A_f + A_w)$$

A_f, A_w : それぞれフランジ, ウェブ断面積 (cm²)

σ_f, σ_w : それぞれフランジ, ウェブ鋼材降伏応力度 (tf/cm²)

同図(a)～(f)にAタイプの鉄骨材補強試験体の、同図(g)～(i)にBタイプのコンクリート補強試験体の実験曲線を表す。比較のために、無補強の場合の実験曲線を各図中点線で表す。▽印は各実験曲線の実験最大値($\sigma_{\max} = P_{\max} / A, A = A_f + A_w$)を示している。いずれの試験体も、局部座屈の進展とともに耐力が低下している。

同図(a)にフランジ補強試験体の実験曲線を示している。実験最大耐力 σ_{\max} およびその時の変位量 δ_{pm} は、補強試験体の方が無補強試験体の場合より大きい。また、S25FSおよびS50FPの σ_{\max} は σ_y より高いが、S100FPに関しては σ_y と同程度である。ピーク点以降の耐力劣化勾配に関してはS100FPは無補強試験体より大きいが、S25FSおよびS50FPは無補強試験体に比べ小さい。

同図(b)にウェブ補強試験体の実験曲線を示している。S50WS, S50WPの σ_{\max} および δ_{pm} が無補強試験体の場合より大きい。S100WSの場合は σ_{\max} に関しては無補強試験体の場合とほぼ同じであるが、

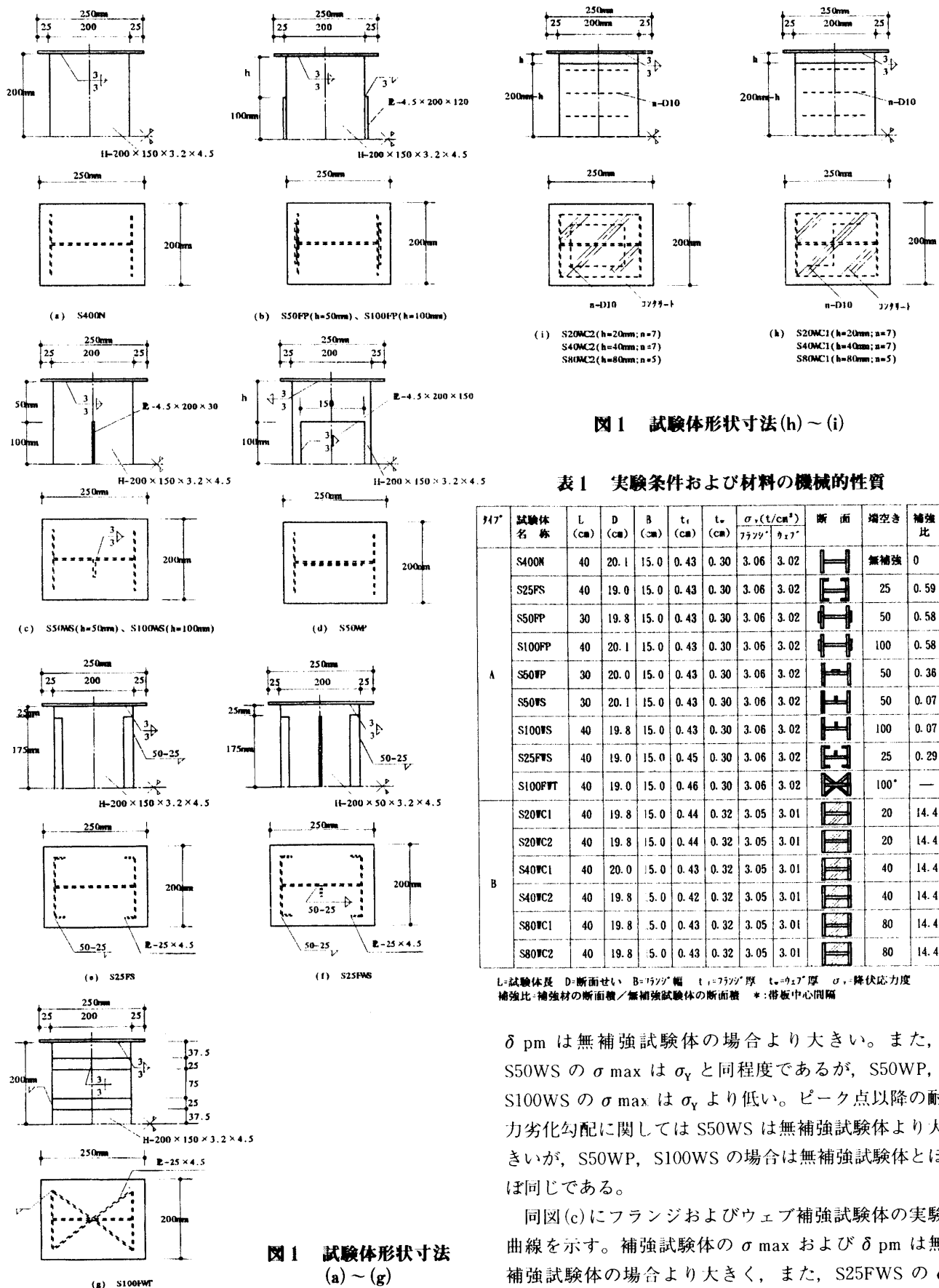


図1 試験体形状寸法 (h) ~ (i)

表1 実験条件および材料の機械的性質

材料	試験体名	L (cm)	D (cm)	B (cm)	t _f (cm)	t _w (cm)	σ_y (t/cm ²)	σ_t (t/cm ²)	断面	端空き	補強比
A	S400N	40	20.1	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		無補強	0
	S25FS	40	19.0	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		25	0.59
	S50FP	30	19.8	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		50	0.58
	S100FP	40	20.1	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		100	0.58
	S50WP	30	20.0	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		50	0.36
	S50WS	30	20.1	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		50	0.07
	S100WS	40	19.8	15.0	0.43	0.30	3.06	3.02		100	0.07
	S25FWS	40	19.0	15.0	0.45	0.30	3.06	3.02		25	0.29
	S100FWT	40	19.0	15.0	0.46	0.30	3.06	3.02		100*	—
B	S20WC1	40	19.8	15.0	0.44	0.32	3.05	3.01		20	14.4
	S20WC2	40	19.8	15.0	0.44	0.32	3.05	3.01		20	14.4
	S40WC1	40	20.0	15.0	0.43	0.32	3.05	3.01		40	14.4
	S40WC2	40	19.8	15.0	0.42	0.32	3.05	3.01		40	14.4
	S80WC1	40	19.8	15.0	0.43	0.32	3.05	3.01		80	14.4
	S80WC2	40	19.8	15.0	0.43	0.32	3.05	3.01		80	14.4

L: 試験体長 D: 断面せい B: フランジ幅 t_f: フランジ厚 t_w: ウェブ厚 σ_y : 降伏応力度
補強比: 補強材の断面積 / 無補強試験体の断面積 * : 帯板中心間隔

δ_{pm} は無補強試験体の場合より大きい。また、S50WS の σ_{max} は σ_y と同程度であるが、S50WP、S100WS の σ_{max} は σ_y より低い。ピーク点以降の耐力劣化勾配に関しては S50WS は無補強試験体より大きい、S50WP、S100WS の場合は無補強試験体とは同じである。

同図(c)にフランジおよびウェブ補強試験体の実験曲線を示す。補強試験体の σ_{max} および δ_{pm} は無補強試験体の場合より大きく、また、S25FWS の σ

図1 試験体形状寸法 (a) ~ (g)

max は σ_y より高い。ピーク点以降の耐力劣化勾配に関しては S100FWT は無補強試験体より大きい、S25FWS は無補強試験体に比べ小さい。

同図(d)～(f)にそれぞれ端部無補強部の長さが 25, 50 および 100 mm の補強試験体の実験曲線を示している。S25FWS, S25FS, S50FP の σ_{max} および δ_{pm}

は、他の A タイプ試験体より卓越しており、ピーク点以降の耐力劣化勾配も小さい。

同図(g)～(i)にコンクリート補強試験体の実験曲線を示している。補強試験体の σ_{max} および δ_{pm} は無補強試験体の場合より大きく、いずれの場合にもピーク点での σ_{max} は σ_y にほぼ等しい。また、ピーク点以降の耐力劣化勾配に関しては、無補強長さが 40 mm 以下の S20WC1, S20WC2, S40WC1 および S40WC2 は無補強試験体に比べ、かなり小さいが、無補強長さが大きい S80WC1 および S80WC2 は無補強試験体に比べ大きい。

3. 2. 破壊性状

図5に試験体の破壊性状を示す。同図(a)に示すように、無補強試験体 S400N の場合はウェブの中心部において座屈が生じた。鉄骨材補強試験体では、同図(b)および(c)に示すように、端部無補強部の長さが

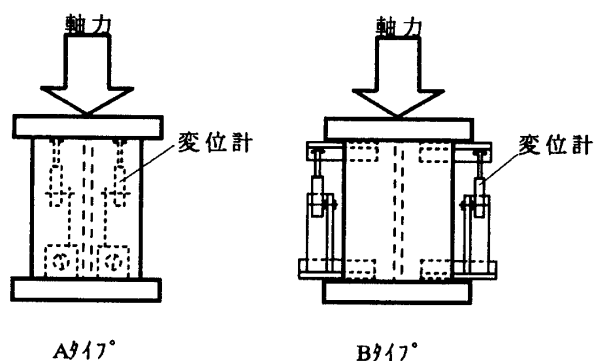
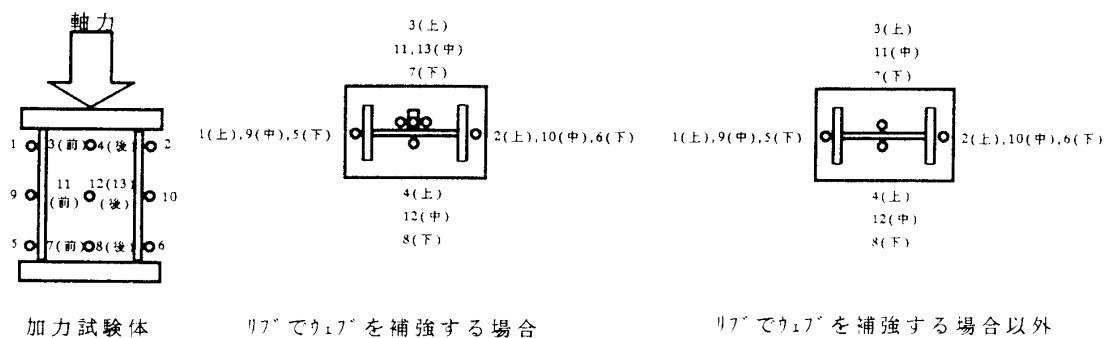
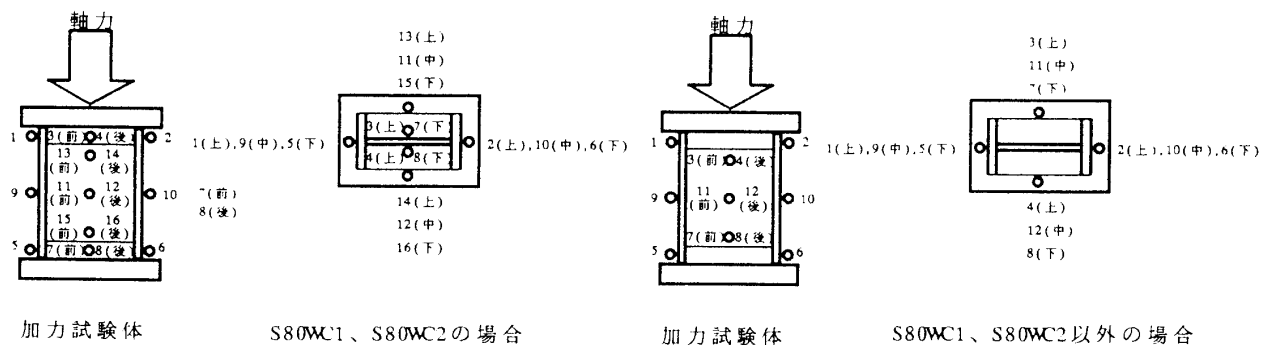


図2 変位計位置および加力表示

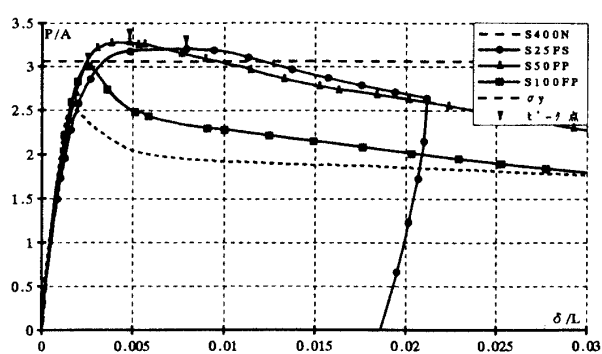


(a) Aタイプ (カバースプレートとリフで補強した試験体)

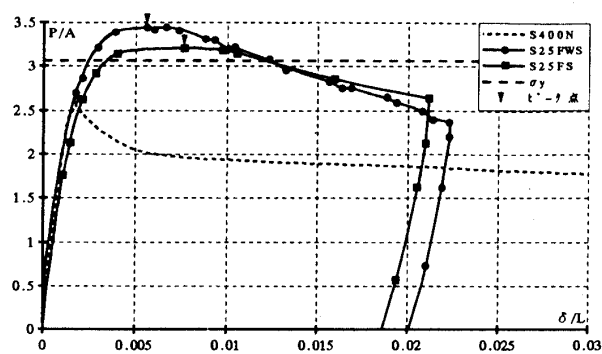


(b) Bタイプ (コンクリートで補強した試験体)

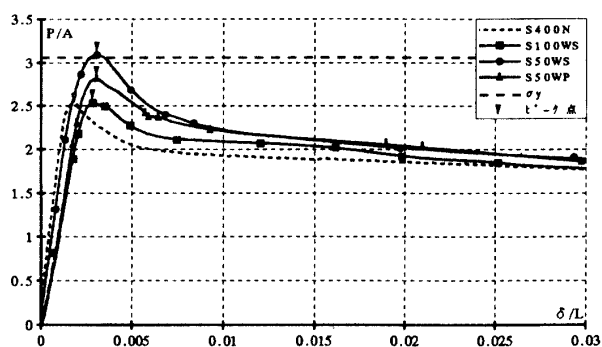
図3 ゲージ位置および加力表示



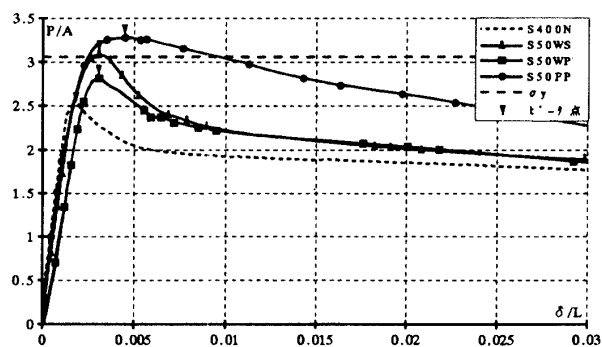
(a) フランジ補強の場合
(鉄骨材補強)



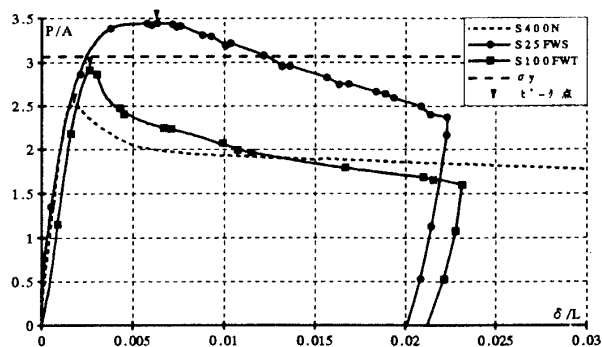
(d) 端部無補強部の長さが 25 mm の場合
(鉄骨材補強)



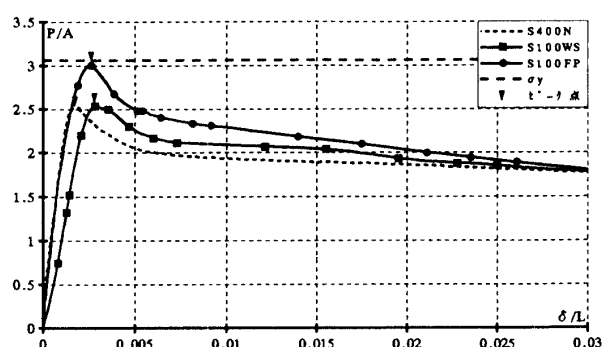
(b) ウェブ補強の場合
(鉄骨材補強)



(e) 端部無補強部の長さが 50 mm の場合
(鉄骨材補強)

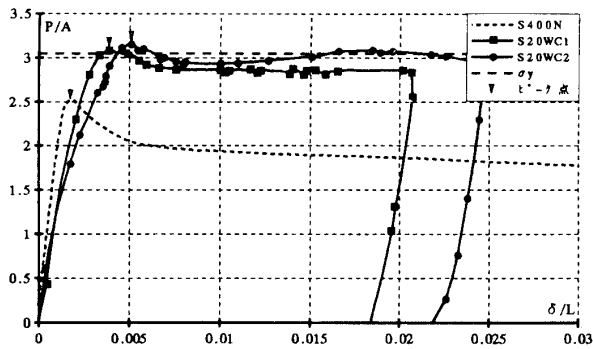


(c) フランジおよびウェブ補強の場合
(鉄骨材補強)

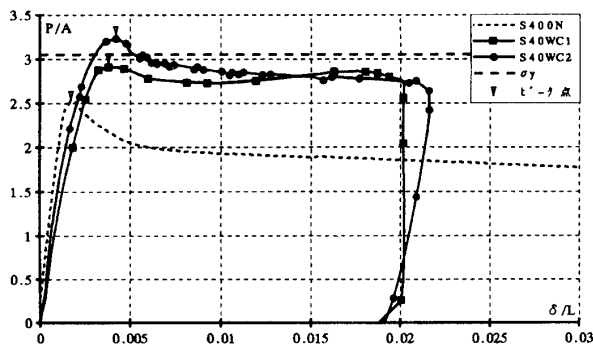


(f) 端部無補強部の長さが 100 mm の場合
(鉄骨材補強)

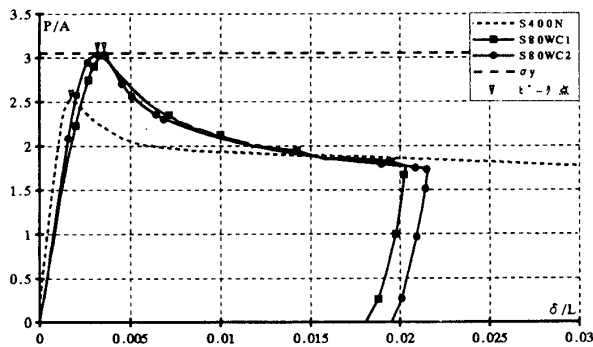
図4 軸圧縮応力-軸方向歪関係 (a) ~ (f)



(g) 端部無補強部の長さが 20 mm の場合
(コンクリート補強)



(h) 端部無補強部の長さが 40 mm の場合
(コンクリート補強)



(i) 端部無補強部の長さが 80 mm の場合
(コンクリート補強)

図4 軸圧縮応力-軸方向歪関係(g)~(i)

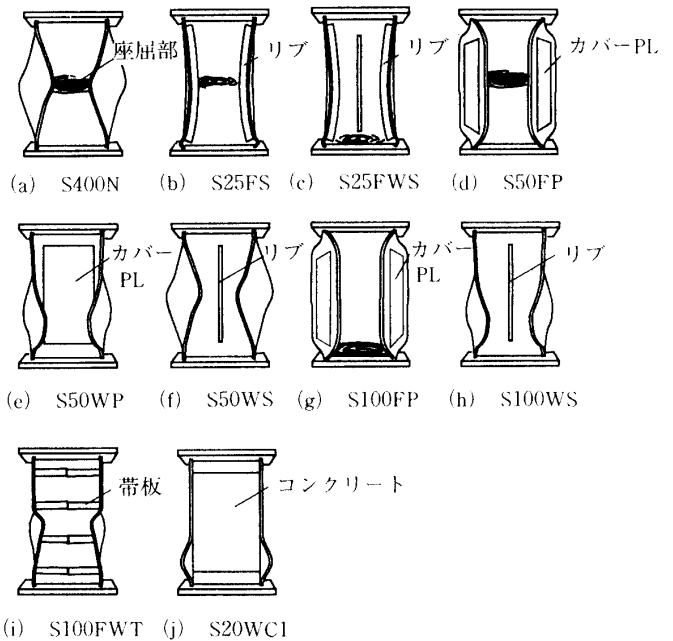


図5 破壊性状

25 mmの補強試験体では、いずれもフランジは内側に湾曲し、ウェブに関しては、中心部での座屈 (S25FS) あるいは一端部での座屈 (S25FWS) により耐力が低下した。同図(d)~(f)に示すように、端部無補強部の長さが50 mmの補強試験体では、フランジの一端部 (S50WP) あるいはフランジの中心部近傍 (S50WS) が座屈した。リブで補強した S50WS 試験体では、フランジ部に無補強試験体と同様の局部座屈が発生した。同図(g)および(h)に示すように、端部無補強部の長さが100 mmの S100FP および S100WS はそれぞれウェブの一端部での座屈、フランジの一端部での座屈により耐力が決まった。カバープレートウェブに溶接したものは、ウェブの無補強部およびフランジ部の局部変形が進行した。同図(i)に示すように、フランジおよびウェブを中心間隔 100 mm、幅 25 mmの帯板で補強した試験体 S100FWT は、フランジおよびウェブが同時に局部座屈が生じた。また、同図(j)に示すコンクリート補強試験体 S20WC1 の場合は、フランジは外側に湾曲、フランジの一端部で座屈した。従って、補強コンクリートはウェブの面外変位を十分に拘束しうることが分かる。図には示していないが、他のコンクリート補強試験体についても S20WC1 とほぼ同様の破壊性状であった。

3. 3. 最大荷重時以後の塑性変形能力

表2に最大荷重時 ($\kappa=1.00$) および最大荷重時以

表2 最大荷重時 ($\kappa=1$)、最大荷重の90% ($\kappa=0.9$) および95% ($\kappa=0.95$)
 まで低下した時の変形量および歪

(a) Aタイプ試験体

TYPE A	κ	κP_{\max}	δ	ϵ_{1-4}	ϵ_{5-8}	ϵ_{9-12}
S400N	1.00	47.03	0.67	1140	1100	1228
	0.95	44.68	0.96	1098	1245	1845
	0.90	42.33	1.24	1045	1442	2429
S25FS	1.00	58.79	2.89	3815	3478	6349
	0.95	55.85	4.92	8539	4784	8179
	0.90	52.91	6.09	12823	4938	8564
S50FP	1.00	60.90	1.34	4567	3186	459
	0.95	57.85	2.53	9270	6413	193
	0.90	54.81	3.29	11485	7996	-15
S100FP	1.00	56.09	1.03	1445	1877	1694
	0.95	53.29	1.30	1991	3317	1601
	0.90	50.48	1.50	2615	4076	1568
S50WP	1.00	57.57	0.91	4429	1894	1385
	0.95	54.69	1.19	5239	2508	1555
	0.90	51.81	1.37	6306	2528	1595
S50WS	1.00	52.41	0.89	3146	1897	1719
	0.95	49.79	1.26	2963	2237	2833
	0.90	47.17	1.50	3137	2306	3386
S100WS	1.00	46.99	1.11	2743	514	1332
	0.95	44.64	1.63	3270	762	2607
	0.90	42.29	1.94	3719	735	2834
S25FWS	1.00	65.16	2.30	19012	5668	2360
	0.95	61.90	3.78	36462	6187	2521
	0.90	58.64	4.75	46593	6197	2601
S100FWT	1.00	55.99	1.04	2554	2114	2415
	0.95	53.19	1.26	2501	2106	3509
	0.90	50.39	1.39	2412	2013	4008

(b) Bタイプ試験体

TAPE B	κ	κP_{\max}	δ	ϵ_{1-2}	ϵ_{3-4}	ϵ_{5-6}	ϵ_{7-8}	ϵ_{9-10}	ϵ_{11-12}	ϵ_{13-15}	ϵ_{14-16}
S20WC1	1.00	59.35	1.58	884	-1195	1003	-14	2010	41		
	0.95	56.38	2.33	832	-1203	1479	-33	4395	48		
	0.90	53.41									
S20WC2	1.00	60.74	2.02	1340	11	419	8	1339	132		
	0.95	57.71	2.66	2390	12	479	7	1419	149		
	0.90	54.67									
S40WC1	1.00	55.33	1.56	1151	-32	1078	-30	1802	44		
	0.95	52.56	2.61	2715	-23	2034	-29	2583	65		
	0.90	49.80									
S40WC2	1.00	60.22	1.67	1921	3	1497	0	1261	349		
	0.95	57.21	2.02	2561	3	1828	-11	1253	371		
	0.90	54.20	3.31	7674	8	4344	112	1358	443		
S80WC1	1.00	57.33	1.62	1067	793	1297	4755	1945	17	-6	4
	0.95	54.46	1.83	1107	762	1891	6107	1978	30	1	3
	0.90	51.60	2.09	1072	732	3134	7049	1976	47	8	3
S80WC2	1.00	57.36	1.25	1495	2555	1632	3275	1527	-13	1	-3
	0.95	54.49	1.62	1513	2375	2240	3170	1546	21	11	0
	0.90	51.62	1.78	1454	2307	2939	3055	1510	36	15	1

 κ : t_0 - t 以後の荷重/最大荷重

 P_{\max} : 試験体の最大荷重(ton)

 δ : 試験体 κP_{\max} 時の軸方向変位量(mm)

 ϵ_{i-j} : 試験体 κP_{\max} 時のゲージ番号 i から j の平均歪($\times 10^{-6}$)

後の耐力が最大荷重の95% ($\kappa=0.95$), 90% ($\kappa=0.90$) まで低下した時の各試験体の軸圧縮力 κP_{\max} , 変形 δ および歪 ϵ_{i-j} (i, j : ゲージ番号) を示している。但し, $1.00P_{\max}$ については P_{\max} と表示する。

表3に補強試験体の実験値を無補強試験体の実験値

で除した値を示している。 $P_{\max}/P_{0\max}$ は最大荷重の比である。 δ/δ_0 は κP_{\max} 時の軸方向変位の比を示している。同表(a)の $\epsilon_u/\epsilon_{0,u}$ および $\epsilon_l/\epsilon_{0,l}$ は, それぞれ κP_{\max} 時の両柱端部における歪のうち, 値の大きいもの同士, 値の小さいもの同士の比である。

表3 無補強試験体の場合で基準化した実験値

(a) Aタイプ試験体

NAME	κ	$\kappa P_{\max}/\kappa P_{0\max}$	δ/δ_0	$\varepsilon_u/\varepsilon_{0,u}$	$\varepsilon_t/\varepsilon_{0,t}$	$\varepsilon_n/\varepsilon_{0,n}$
S25FS	1.00	1.25	4.31	3.35	3.16	5.17
	0.95		5.13	7.78	3.84	4.43
	0.90		4.92	12.27	3.43	3.53
S50FP	1.00	1.29	1.99	4.00	2.90	0.37
	0.95		2.64	8.44	5.15	0.10
	0.90		2.66	10.99	5.55	-0.01
S100FP	1.00	1.19	1.53	1.65	1.31	1.38
	0.95		1.35	3.02	1.60	0.87
	0.90		1.21	3.90	1.81	0.65
S50WP	1.00	1.22	1.36	3.88	1.72	1.13
	0.95		1.24	4.77	2.01	0.84
	0.90		1.10	6.04	1.75	0.66
S50WS	1.00	1.11	1.33	2.76	1.72	1.40
	0.95		1.31	2.70	1.80	1.54
	0.90		1.21	3.00	1.60	1.39
S100WS	1.00	1.00	1.65	2.41	0.47	1.08
	0.95		1.70	2.98	0.61	1.41
	0.90		1.57	3.56	0.51	1.17
S25FWS	1.00	1.39	3.42	16.67	5.15	1.92
	0.95		3.94	33.21	4.97	1.37
	0.90		3.84	44.60	4.30	1.07
S100FWT	1.00	1.19	1.55	2.24	1.92	1.97
	0.95		1.31	2.28	1.69	1.90
	0.90		1.12	2.31	1.40	1.65

(b) Bタイプ試験体

NAME	κ	$\kappa P_{\max}/\kappa P_{0\max}$	δ/δ_0	$\varepsilon_u/\varepsilon_{0,u}$	$\varepsilon_t/\varepsilon_{0,t}$	$\varepsilon_n/\varepsilon_{0,n}$
S20WC1	1.00	1.26	2.35	0.90	0.81	1.43
	0.95		2.42	0.77	1.12	1.50
	0.90					
S20WC2	1.00	1.29	3.01	1.01	0.34	0.95
	0.95		2.77	1.54	0.36	0.48
	0.90					
S40WC1	1.00	1.18	2.33	0.87	0.87	1.28
	0.95		2.72	1.75	1.54	0.88
	0.90					
S40WC2	1.00	1.28	2.49	1.45	1.20	0.90
	0.95		2.10	1.65	1.38	0.43
	0.90		2.67	4.61	3.33	0.32
S80WC1	1.00	1.22	2.41	0.98	0.86	1.38
	0.95		1.90	1.22	0.84	0.67
	0.90		1.69	1.88	0.82	0.46
S80WC2	1.00	1.22	1.87	1.93	1.31	1.09
	0.95		1.69	1.53	1.69	0.53
	0.90		1.44	1.39	2.25	0.35

κ : $\kappa=1.00$ 以後の荷重/最大荷重。 $\kappa=1.00$ は最大荷重時、 $\kappa=0.90$ 、 $\kappa=0.95$ はそれぞれ最大荷重の90%、95%まで低下した時である。
 P_{\max} : 補強試験体の最大荷重 δ : 補強試験体 κP_{\max} 時の軸方向変位量
 $P_{0\max}$: 無補強試験体の最大荷重 δ_0 : 無補強試験体 $\kappa P_{0\max}$ 時の軸方向変位量
 ε_u : 補強試験体 κP_{\max} 時の端部鉄骨断面の最大平均歪
 ε_t : 補強試験体 κP_{\max} 時の端部鉄骨断面の最小平均歪
 ε_n : 補強試験体 κP_{\max} 時の中心部鉄骨断面の平均歪
 $\varepsilon_{0,u}$: 無補強試験体 κP_{\max} 時の端部鉄骨断面の最大平均歪
 $\varepsilon_{0,t}$: 無補強試験体 κP_{\max} 時の端部鉄骨断面の最小平均歪
 $\varepsilon_{0,n}$: 無補強試験体 κP_{\max} 時の中心部鉄骨断面の平均歪

$\varepsilon_m/\varepsilon_{0,m}$ は κP_{\max} 時の中央部の歪の比である。

また、表4には各試験体の最大荷重の95%および90%まで低下した時の変位量を最大荷重時の変位量で除した値 ($\delta_{0.95}/\delta$ および $\delta_{0.90}/\delta$) を示している。この値が大きき、かつ表3の $\kappa=0.95$ および $\kappa=0.90$ 時の δ/δ_0 が大きいほど、塑性変形能力が高いことを意味する。

3. 3. 1. 鉄骨材補強試験体 (Aタイプ)

a) フランジ補強の場合 (S25FS, S50FP および S100FP)

S50FP および S100FP 試験体はいずれもフランジをカバープレートで補強, S25FS はフランジ先端部をリブで補強したものである。表3によると、無補強の場合に比べ、フランジ補強を施した試験体の最大耐力 P_{\max} は約1.2倍～1.3倍高くなっているが、 P_{\max} 時の変位量 δ/δ_0 に関しては、S50FP の場合では約2倍、S100FP の場合では約1.5倍、S25FS の場合では4.3倍である。従って、 P_{\max} の増加より変形能力の増加の方が卓越している。また、S25FS, S50FP および S100FP の $0.95P_{\max}$ 時の δ/δ_0 に関しては、それぞれ約5.1倍、約2.6倍、約1.4倍であり、 $0.90P_{\max}$ 時では、それぞれ約4.9倍、約2.7倍、約1.2倍であった。さらに、表4に示す補強試験体と無補強試験体の値の比較から、 P_{\max} 以後の耐力低下については、S50FP および S25FS は無補強の場合より小さいこと、および S100FP は無補強の場合より大きいことが分かる。 P_{\max} 時の断面平均歪は、S50FP および S25FS では両端部においてそれぞれ約4倍と2.9倍、約3.4倍と3.2倍であり、歪進展には差がある。S100FP の場合では両端部において約1.3倍および1.7倍であるが、中央部の歪は1.4倍である。補強を施したフランジ部近傍の歪は小さいが、無補強ウェブ部近傍の歪が大きくなっている。

これらの試験体の比較よりフランジを補強する場合は材端の無補強部長さを5cm以下とした方が変形能力改善の効果が大きいことが分かる。

b) ウェブ補強の場合 (S50WP, S50WS および S100WS)

S50WP 試験体はカバープレートを溶接, S50WS および S100WS はリブを溶接したものである。表3によると、ウェブ補強を施した試験体 S50WP および S50WS の P_{\max} は無補強の場合に比べ、約1.1倍～1.2倍高くなっているが、S100WS の P_{\max} は無補強の場合とほぼ同じである。 P_{\max} 時の δ/δ_0 に関し

表4 最大荷重の90%および95%まで低下した時の変位

TYPE	NAME	$\delta_{0.95}/\delta$	$\delta_{0.90}/\delta$
	S400N	1.43	1.84
	S25FS	1.70	2.11
	S50FP	1.89	2.46
	S100FP	1.26	1.46
A	S50WP	1.31	1.50
	S50WS	1.41	1.69
	S100WS	1.47	1.75
	S25FWS	1.65	2.07
	S100FWT	1.21	1.34
	S20WC1	1.47	
	S20WC2	1.32	
B	S40WC1	1.67	
	S40WC2	1.20	1.98
	S80WC1	1.13	1.29
	S80WC2	1.29	1.42

δ : 試験体最大荷重時の軸方向変形

$\delta_{0.90}$: 試験体の最大荷重の90%まで低下した時の軸方向変形量

$\delta_{0.95}$: 試験体の最大荷重の95%まで低下した時の軸方向変形量

ては、S50WP および S50WS の場合ではそれぞれ約1.4倍、1.3倍、S100WS の場合では約1.7倍となっている。従って、 P_{\max} の増加に比べ変形能力の増加の方が若干上回っているが、フランジ補強の場合に比べその増加率は少ない。また、S50WP, S50WS および S100WS の $0.95P_{\max}$ 時の δ/δ_0 に関しては、それぞれ約1.2倍、約1.3倍および約1.7倍であり、 $0.90P_{\max}$ 時では、それぞれ約1.1倍、約1.2倍および約1.6倍であった。さらに、表4に示す補強試験体と無補強試験体の値の比較から、 P_{\max} 以後の耐力低下については、S100WS は無補強の場合とほぼ同程度であるが、S50WP および S50WS は無補強の場合より大きいことが分かる。 P_{\max} 時の断面平均歪は、S50WP, S50WS および S100WS の場合では両端においてそれぞれ約3.9倍と1.7倍、約2.8倍と1.7倍、約2.4倍と0.5倍であり、歪が一端部に集中していることが分かる。また、補強を施したウェブ部近傍の歪は小さいが、無補強フランジ部近傍の歪は大きくなっている。

c) フランジおよびウェブ補強の場合 (S25FWS および S100FWT)

S25FWS はフランジ、ウェブともにリブで補強, S100FWT はフランジ先端とウェブ中央を繋ぐように帯板で補強したものである。表3によると、無補強の場合に比べ、フランジ、ウェブともに補強を施した試験体 S25FWS の P_{\max} は約1.4倍高くなっている

が、S100FWT の場合は無補強の場合に比べ約 1.2 倍である。 P_{max} 時の δ/δ_0 に関しては、S100FWT の場合では約 1.6 倍であるが、S25FWS の場合では約 3.4 倍である。従って、S25FWS の場合は P_{max} の増加より変形能力の増加の方が顕著である。また、S100FWT および S25FWS の $0.95P_{max}$ の δ/δ_0 に関しては、それぞれ約 1.3 倍、約 3.9 倍であり、 $0.90P_{max}$ 時では、それぞれ約 1.1 倍、約 3.8 倍であった。さらに、表 4 に示す補強試験体と無補強試験体の値の比較から、 P_{max} 以後の耐力低下については、S25FWS は無補強の場合より小さいが、S100FWT は無補強の場合より大きいことが分かる。S100FWT 試験体ではフランジ座屈とウェブ座屈が同時に生じたため、S25FWS ほどには変形能力が改善されていない。 P_{max} 時の断面平均歪は、S100FWT、S25FWS の場合では両端部においてそれぞれ約 1.9 倍と 2.2 倍、約 16.7 倍と 5.2 倍であり、歪の進展には差が生じている。

d) 端部無補強部の長さが 25 mm の場合 (S25FS および S25FWS)

S25FS はフランジ先端をリブ補強、S25FWS はフランジ先端およびウェブ中央部をリブ補強している。前項 a) および c) に述べたように、両試験体とも無補強試験体より変形能力改善の効果が大きい。表 3 の第 2 および 3 欄より、これらの試験体は他の A タイプ試験体に比べ、 P_{max} および δ/δ_0 の値に関わらず大きい値を示している (S50FP の場合を除く)。さらに、表 4 に示す補強試験体の値の比較から、両試験体とも P_{max} 以後の耐力低下は他の A タイプ試験体より小さいことが分かる。

e) 端部無補強部の長さが 50 mm の場合 (S50WP、S50WS および S50FP)

S50WP、S50FP はそれぞれウェブおよびフランジをカバープレートで補強、S50WS はウェブ中央部をリブで補強している。前項 b) に述べたように、無補強試験体と比べた場合、この 3 者の中では S50FP 試験体の塑性変形性能が最も高い。また、表 3 の第 2 および 3 欄より、 P_{max} に関しては、これらの試験体は他の A タイプ試験体 (S25FWS の場合を除く) に比べ、S50WP、S50WS の場合の値は低いが、S50FP の場合の値は大きいことが分かる。また、 δ/δ_0 の値に関しては、S25FS、S25FWS を除く A タイプ試験体よりも、S50FP の場合の方が大きいことが分かる。さらに、表 4 に示す補強試験体の値の比較から、S50FP の場

合は P_{max} 以後の耐力低下は他の A タイプ試験体 (S25FS、S25FWS の場合を除く) より小さいことが分かる。

f) 端部無補強部の長さが 100 mm の場合 (S100FP および S100WS)

S100FP はフランジをカバープレートで、S100WS はウェブをリブで補強したものである。表 3 の第 2 および 3 欄より、S100FP の P_{max} は S50WP より大きい。S100WS の P_{max} は A タイプ試験体の中では最も低く、無補強試験体とほぼ同じであることが分かる。両試験体の δ/δ_0 の値は、S50WP および S50WS より大きい。S50FP より小さい。さらに、表 4 に補強試験体の値の比較から、両試験体とも P_{max} 以後の耐力低下は S50WP および S50WS の場合より小さいことが分かる。

3. 3. 2. コンクリート補強試験体 (B タイプ)

コンクリート補強試験体、S20WC1、S20WC2 および S40WC1 では、実験範囲中において P_{max} 以後の耐力低下が $0.90P_{max}$ まで低下していないので、表 3 中の δ/δ_0 に関しては、 P_{max} 時および $0.95P_{max}$ 時の値のみが示されている。

a) 端部無補強部の長さが 20 mm の場合 (S20WC1 および S20WC2)

表 3 によると、無補強の場合に比べ、S20WC1 および S20WC2 の P_{max} はいずれも約 1.3 倍高くなっているが、 P_{max} 時の δ/δ_0 に関しては、それぞれ約 2.4 倍、3.0 倍である。従って、 P_{max} の増加より変形能力の増加の方が卓越している。また、 $0.95P_{max}$ 時の δ/δ_0 に関しては、それぞれ約 2.4 倍、2.8 倍である。さらに、表 4 に示す補強試験体と無補強試験体の値の比較から、ピーク以後 95% までの耐力低下については、S20WC1 試験体は無補強の場合より小さいが、S20WC2 試験体は無補強の場合より大きいことが分かる。 P_{max} 時の断面平均歪は、S20WC1 および S20WC2 の場合では両端 (鉄骨部) において、それぞれ約 0.8 倍と 0.9 倍、約 0.3 倍と 1.0 倍であるが、中央部 (鉄骨部) の歪はそれぞれ約 1.4 倍、0.95 倍であり、断面位置による歪の差は A タイプ試験体より小さい (A タイプ参照)。

b) 端部無補強部の長さが 40 mm の場合 (S40WC1 および S40WC2)

表 3 によると、無補強の場合に比べ、S40WC1 および S40WC2 の P_{max} はそれぞれ約 1.2 倍、1.3 倍高くなっているが、 P_{max} 時の δ/δ_0 に関しては、それ

ぞれ約 2.3 倍, 2.5 倍である。従って, P_{max} の増加より変形能力の増加の方が顕著である。また, $0.95P_{max}$ 時の δ/δ_0 に関しては, S40WC1 および S40WC2 はそれぞれ約 2.7 倍, 2.1 倍である。さらに, 表 4 に示す補強試験体と無補強試験体の値の比較から, ピーク以後95%までの耐力低下については, S40WC1 は無補強の場合より小さいが, S40WC2 は無補強の場合より大きいことが分かる。 P_{max} 時の断面平均歪は, S40WC1 および S40WC2 の場合では両端 (鉄骨部) において約 0.9 倍と 0.9 倍および約 1.2 倍と 1.5 倍であるが, 中央部 (鉄骨部) の歪はそれぞれ約 1.3 倍, 0.9 倍であり, 断面位置による歪の差は A タイプ試験体より小さい (A タイプ参照)。

c) 端部無補強部の長さが 80 mm の場合 (S80WC1 および S80WC2)

表 3 によると, 無補強の場合に比べ, S80WC1 および S80WC2 の P_{max} は約 1.2 倍高くなっているが, P_{max} 時の δ/δ_0 に関してはそれぞれ約 2.4 倍, 1.9 倍である。従って, P_{max} の増加より変形能力の増加の方が顕著である。また, $0.95P_{max}$ 時の δ/δ_0 に関しては, S80WC1 および S80WC2 はそれぞれ約 1.9 倍, 1.7 倍である。さらに, 表 4 に補強試験体と無補強試験体の値の比較から, ピーク以後95%までの耐力低下については, 無補強の場合より大きいことが分かる。 P_{max} 時の断面平均歪は, S40WC1 および S40WC2 の場合では両端 (鉄骨部) においてそれぞれ約 0.9 倍と 1.0 倍, 1.3 倍と 1.9 倍であるが, 中央部 (鉄骨部) の歪はそれぞれ約 1.4 倍, 1.1 倍, 断面位置による歪の差は A タイプ試験体より小さい (A タイプ参照)。

4. 結 び

H 形鋼部材の塑性変形能力の改善を目的とした補強方法および補強範囲を調べるために, 無補強短柱試験体 1 体および柱端部に無補強部を持つ 7 種類 14 体の短柱補強試験体について単調軸圧縮実験を行い, 実験結果の検討を行った結果, 本局部補強形式が塑性変形能力の改善に対して有効であることが確認された。しかしながら, 補強材料, 補強形式および端部無補強部の長さにより, その効果に関して以下に示すような差が生じた。

1) 鉄骨補強材を使用した場合;

a) フランジとウェブを中心間隔 100 mm, 幅 25 mm の帯板で補強した試験体は, フランジおよびウェブが

同時に局部座屈したため最大耐力以後の耐力低下が他の補強試験体と比べ大きく, 補強の効果は低い。しかしながら曲げが卓越する場合は, フランジ座屈時のウェブの応力は小さく, また片フランジは引張応力を受けるので, この実験結果は曲げが卓越する部材には適用できないと思われる。

b) 最大耐力に関して, フランジおよびウェブともにリブで補強した試験体は, ウェブのみを補強した試験体より高いが, フランジのみを補強した試験体とはほぼ同程度である。しかし, 最大耐力時の変位は他の試験体と比べ非常に大きい。従って, フランジおよびウェブともにリブで補強する方法は塑性変形能力の改善に有効である。

c) 端部無補強部の長さが短くなるにつれて, 試験体の最大耐力が増加するが, 同時に最大耐力時の変位も大きくなり, かつピーク以後の耐力劣化勾配が小さくなるので, 無補強部に変形が集中することによる弊害を除けば, 無補強部の長さを短くする補強は塑性変形能力の改善に関して効果的である。

2) コンクリート補強材を使用した場合; 全体的に, 最大耐力時の変位が大きく, かつピーク以後の耐力劣化勾配が小さいので塑性変形能力が高い。特に無補強部長さが 40 mm 以下のものは, 実験範囲内ではあるが, ピーク以後の耐力低下が 10% 未満であったので, カバープレートとリブを鉄骨補強材として用いた試験体に比べ, コンクリートで補強する方法の方が塑性変形能力の改善に関して有効であるといえる。

謝 辞

実験に際し, 鹿児島大学大学院生, 倉橋孝裕, 片平崇, 張学飛各氏, 仮屋蘭一樹技官のご協力を得ました。

参考文献

- 1) 日本建築学会: “鋼構造型設計指針”, 1975年11月。
- 2) 日本建築学会: “鋼構造型限界状態設計基準 (案)”, 1990年。
- 3) 日本建築学会: “鋼構造型座屈設計指針”, 1996年 4月。
- 4) 牧野 稔, 松井千秋, 三谷 勲: “H 形鋼柱の局部座屈後の変形性状 (その 1)”, 日本建築学会論文報告集, 第281号, 1979年 7 月, pp.71~80。
- 5) 牧野 稔, 松井千秋, 三谷 勲: “H 形鋼柱の局部座屈後の変形性状 (その 2)”, 日本建築学会論文報告集, 第286号, 1979年12月, pp.23~28。

- 6) 牧野 稔, 松井千秋, 三谷 勲: “H形鋼柱の局部座屈後の変形性状(その3)”, 日本建築学会論文報告集, 第288号, 1980年2月, pp.49~59.
- 7) 牧野 稔, 松井千秋, 三谷 勲: “H形鋼柱の局部座屈後の変形性状(その4)”, 日本建築学会論文報告集, 第290号, 1980年4月, pp.45~55.
- 8) 三谷 勲, 牧野 稔, 松井千秋: “H形鋼柱の局部座屈後の変形性状に関する解析的研究(その1)”, 日本建築学会論文報告集, 第296号, 1980年10月, pp.37~47.
- 9) 三谷 勲, 牧野 稔, 松井千秋: “H形鋼柱の局部座屈後の変形性状に関する解析的研究(その2)”, 日本建築学会論文報告集, 第301号, 1981年3月, pp.77~87.
- 10) 鈴木敏郎, 酒井新吉, 鶴飼司郎, 青木俊夫, 木村克次: “箱形断面柱部材の弾塑性挙動に関する実験的研究(その2)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 構造系, 1981年9月, pp.2069~2077.
- 11) 鈴木敏郎, 酒井新吉, 鶴飼司郎, 青木俊夫, 木村克次: “スチフナ補剛箱形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(東北), 構造系, 1982年10月, pp.1919~1920.
- 12) 松井千秋, 森野捷輔, 津田恵吾, 椎葉喜一: “角形鋼管柱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(北陸), 構造系, 1983年9月, pp.1367~1368.
- 13) 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, 1982年3月, pp.233~236.
- 14) 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)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 1982年10月, pp.1915~1916.
- 15) 三谷 勲, 林原光司郎, 今門一弘: “一定鉛直荷重と複曲率曲げを受けるH形鋼柱の変形性状および塑性変形能力に関する実験的研究”, 鹿児島大学工学部研究報告, 第27号, 1985年11月, pp.83~103.
- 16) 鈴木敏郎, 元結正次郎, 内山雅彦: “鉄骨コンクリートの短柱圧縮時の耐力および変形能力に関する研究”, 日本建築学会構造系論文集, 第480号, 1996年2月, pp.171~178.
- 17) 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, 1996年3月, pp.581~584.