

鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON STRENGTH AND DUCTILITY OF
CONNECTIONS IN STEEL FRAME PIER STRUCTURES黄 元燮^{*} 西村宣男^{**} 高津秀俊^{***}

By Won-sup HWANG, Nobuo NISHIMURA and Hidetoshi TAKATSU

This paper presents the experimental investigations on strength and ductility of connections in steel frame pier structures. From the results of tests on twelve mild steel connections subjected to monotonic and cyclic loading, some basic data on the strength and shear deformation behavior, failure modes of connections are presented. Furthermore, concerned with the effects of stiffness ratio of stiffened web plate and material properties on inelastic behavior of connections, tests on eight high strength steel connections are also conducted. The results are examined with emphasis on the influence of sectional-area ratio, width-thickness ratio of panel zone and material properties on connection behavior.

Key Words : box connection, strength, ductility

1. まえがき

都市高速道路などで多用されている鋼製ラーメン橋脚は、巨大地震時においても崩壊することなく道路機能を確保するという観点から、その強度と変形能が重要視される典型的な土木構造物の例である。特に、はり・柱部材の接合部である隅角部には、地震時に最も大きな断面力が作用する可能性があり、鋼製ラーメン橋脚の耐震性能を正しく評価するために、まずそれらの隅角部の挙動特性をより正確に検討する必要があると考えられる。

この問題に対しては、これまで酒造・事口ら¹⁾による実験的検討が行われ、隅角部パネルのせん断変形が卓越する場合、強度および変形能の両面から安定的な挙動特性を有していることが指摘されている。また、中井・酒造ら^{2), 3)}は、はり・柱フランジにおける垂直応力に関連し、せん断遅れ応力度のより簡単な算定法を提案した。ただし、これらの一連の研究においては、主に崩壊のメカニズムや隅角部パネル近傍のはり・柱フランジに生じるせん断遅れ現象などに着目しており、隅角部パネル挙動に対する幅厚比や断面積比などの影響については、まだ十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、使用鋼種の異なる合計20体の無補剛および補剛断面隅角部に対象に、単調あるいは繰り返し載荷実験を行い、隅角部パネルの強度・変形能に対する ①パネル幅厚比および断面構成板の断面積比、②補剛材の剛度比と使用鋼種、ならびに、③崩壊形式の影響などについて実験的検討を行った。さらに、これ

* 工博 (株)建設技術研究所大阪支社 道路本部・技術第二部 (〒540 大阪市中央区大手前1-2-15)
 ** 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)
 *** 大阪大学大学院 博士前期課程 (〒565 吹田市山田丘2-1)

らの実験結果を基に、④隅角部パネルの降伏強度、⑤隅角部の変形能と材料特性との関係などについて考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の設計および諸元

供試体は、Fig.1に示すように箱形断面のはりとは柱部材が直角に交差するL型の隅角部模型である。ここでは、はりおよび柱部材のフランジで囲まれる点線部分を隅角部パネル、その近傍のはりおよび柱部材を部材一般部と称するものとする。また、本研究では、隅角部パネルの挙動特性に着目するために、曲げによる部材一般部の降伏より隅角部パネルのせん断降伏が先行するように ($M_Y(\tau) \leq M_Y(\sigma)$)、はりとは柱部材の長さ L を決定した。ここで、 $M_Y(\tau)$ および $M_Y(\sigma)$ はそれぞれ Beedle⁴⁾ の研究による隅角部パネルおよび部材一般部の降伏モーメントとして次式で与えられる。

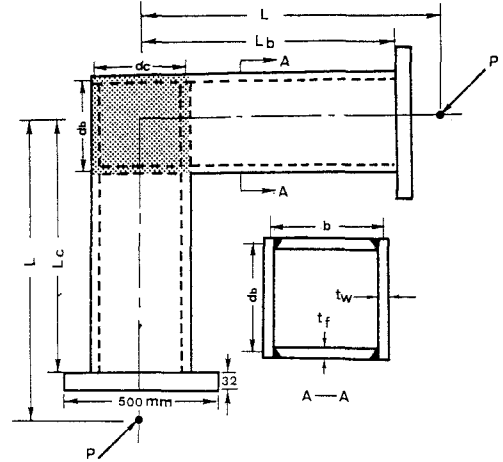


Fig. 1 Specimen Details (A, B, D series)

$$M_Y(\tau) = \frac{2 t_w \cdot d_b \cdot d_c \cdot \sigma_{Y\tau}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{1 - (d_b + d_c)/2L} \right] \quad (1)$$

$$M_Y(\sigma) = \frac{\sigma_{Y\sigma}}{(1 - d/2L)/W + 1/AL} \quad (2)$$

ここで、 W および A はウェブ高さの低い方の部材の断面係数および断面積であり、また d はその反対部材のウェブ高さを表す。

(1) 断面構成板のパラメータ R_f 、 R_p

局部座屈に関する部材一般部のフランジ板および隅角部パネルの幅厚比パラメータ R_f および R_p は次式で表される。

$$R_f = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4\pi^2} \cdot \frac{\sigma_{Yf}}{E}} \quad (3)$$

$$R_p = \frac{d_c}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\kappa_p \pi^2} \cdot \frac{\tau_Y}{E}} \quad (4)$$

ここに、 b 、 d_c ：フランジ幅の中心間隔およびウェブ高さ、 t_f 、 t_w ：フランジ、ウェブの板厚、 ν ：ポアソン比、 σ_{Yf} 、 σ_{Yw} ：フランジおよびウェブ材の降伏点応力度 (kgf/cm^2)、 E ：ヤング係数 (kgf/cm^2) を示す。また、 τ_Y ：せん断降伏応力度 ($= \sigma_{Yw}/\sqrt{3}$) であり、座屈係数 κ_p はせん断を受ける単純支持パネルの座屈係数である⁵⁾。ここでは、各供試体の R_f および R_p の値をそれぞれ 0.5～0.9 および 0.2～0.5 まで変化させた。

(2) 断面構成板の断面積比 S

はりおよび柱部材のウェブとフランジとの断面積比 S_b および S_c は次式で求められる。断面積比 S はこれらの S_b 、 S_c 中で大きい値を選定し、ここでは S の値を約 0.4～0.8 まで変化させた。

$$S_b = \frac{d_b \cdot t_w}{b \cdot t_f} \quad S_c = \frac{d_c \cdot t_w}{b \cdot t_f} \quad (5)$$

(3) 縦補剛材の剛度比

Fig. 2に補剛断面からなる供試体Cシリーズ⁶⁾の断面詳細を示す。補剛材は柱部材のウェブパネル部分のみを連続とし、それ以外の部分ではそれぞれの部材軸方向に不連続とした。また、隅角部パネルの剛度 k は次式を用いて評価される。

$$\zeta_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{D_c \cdot t_w^3} \quad (6)$$

ここに、 I_d : 板の表面に関する縦補剛材の断面 2 次モーメント
($= t_s \cdot h_s^3 / 3$)

供試体Cシリーズでは、これらの ξ_s と現行の道示⁷⁾ II 3. 2. 4における縦補剛材の必要剛比 ξ_{req} との比(ξ_s / ξ_{req})をそれぞれ約2および7とした。

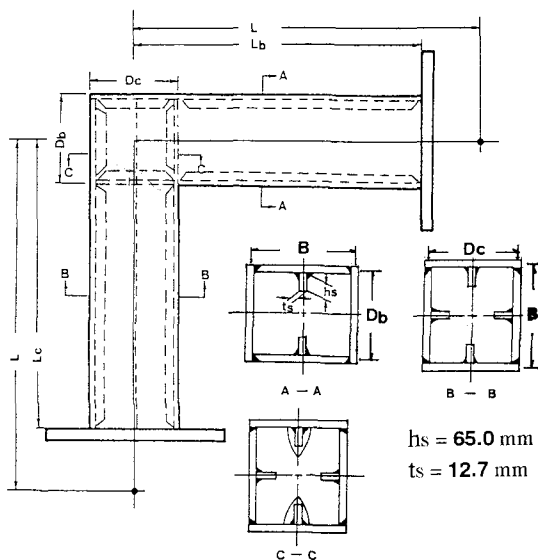


Fig. 2 Specimen Details (C series)

(4) 供試体の諸元

各供試体の諸元および各種パラメータをTable 1に示す。ここで、供試体A, BシリーズはSS400鋼材を、C, Dシリーズでは高張力のSM570およびLYR60鋼材を用いており、各供試体名は以下の記号で表している。

表示例：①B L(H)-A-1 M

載荷方法 M：単調載荷
 C：繰返し載荷
 供試体番号
 供試体シリーズ
 鋼種 (H：SM570, L：LYR60)
 供試体形状 (箱型・L字形)

実験結果の考察には、この記号の B L および使用鋼種などを省略し、簡単に記述している。

Table 1 Specimen Dimensions

Specimen	B (mm)	b (mm)	t _r (mm)	D _b (mm)	D _c (mm)	d _b (mm)	d _c (mm)	t _w (mm)	L _{tr} (mm)	L (mm)	$\frac{M_y(\tau)}{M_y(\sigma)}$	R _t	R _r	S	$\frac{\xi_t}{\xi_{avg}}$
BL-A-1M	--	184.4	5.9	--	--	154.1	154.1	4.4	491	600	0.659	0.654	0.346	0.623	--
BL-A-1C	--	184.4	5.9	--	--	154.1	154.1	4.4	491	600	0.659	0.654	0.346	0.623	--
BL-A-2M	--	244.5	6.0	--	--	204.0	204.0	4.5	691	800	0.655	0.853	0.448	0.625	--
BL-A-2C	--	244.4	6.0	--	--	204.0	204.0	4.4	691	800	0.644	0.853	0.458	0.612	--
BL-A-3M	--	184.5	6.0	--	--	204.0	154.0	4.5	511	620	0.879	0.644	0.374	0.829	--
BL-A-3C	--	184.4	5.9	--	--	204.1	154.1	4.4	511	620	0.876	0.654	0.383	0.825	--
BL-B-1M	--	275.6	8.8	--	--	201.2	201.2	5.6	668	900	0.511	0.708	0.371	0.464	--
BL-B-1C	--	275.5	8.8	--	--	201.2	201.2	5.5	668	900	0.503	0.708	0.378	0.456	--
BL-B-2M	--	335.6	8.7	--	--	271.3	271.3	5.6	868	1100	0.572	0.872	0.501	0.520	--
BL-B-2C	--	335.6	8.8	--	--	271.3	271.3	5.6	868	1100	0.566	0.862	0.501	0.519	--
BL-B-3M	--	275.6	8.8	--	--	271.2	271.2	5.6	668	900	0.696	0.708	0.413	0.626	--
BL-B-3C	--	275.6	8.8	--	--	271.2	271.2	5.6	668	900	0.696	0.708	0.413	0.626	--
BLH-C-1M	712.6	356.3	19.4	460.6	460.6	460.6	230.3	12.6	1600	2200	0.607	0.515	0.311	0.420	2.3
BLH-C-1C	712.6	356.3	19.4	460.6	460.6	460.6	230.3	12.6	1600	2200	0.607	0.515	0.311	0.420	2.3
BLH-C-2M	712.6	356.3	19.4	460.6	460.6	460.6	230.3	12.6	1600	2200	0.607	0.515	0.311	0.420	7.3
BLH-C-2C	712.6	356.3	19.4	460.6	460.6	460.6	230.3	12.6	1600	2200	0.607	0.515	0.311	0.420	7.3
BLH-D-1M	--	248.9	12.5	--	--	157.5	157.5	8.9	750	1000	0.562	0.574	0.254	0.450	--
BLH-D-1C	--	248.9	12.5	--	--	157.5	157.5	8.9	750	1000	0.562	0.574	0.254	0.450	--
BLL-D-2M	--	248.9	12.7	--	--	157.5	157.5	8.9	750	1000	0.583	0.498	0.233	0.442	--
BLL-D-2C	--	248.9	12.7	--	--	157.5	157.5	8.9	750	1000	0.583	0.498	0.233	0.442	--

(5) 材料の機械的性質

Table 2 に材料試験結果をまとめた。各供試体における降伏点 σ_y および引張強さ σ_u などはJIS規格(SS400: $\sigma_y \geq 25\text{kgf/mm}^2$, $\sigma_u = 41 \sim 52\text{kgf/mm}^2$, SM570: $\sigma_y \geq 47\text{kgf/mm}^2$, $\sigma_u = 58 \sim 73\text{kgf/mm}^2$)をほぼ満足している。ちなみに、道示では公称降伏点としてSS400: 2400kgf/cm^2 , SM490: 3200kgf/cm^2 と規定している。

Table 2 Material Properties

Test series	Coupon specimen	σ_y (kgf/cm^2)	σ_u (kgf/cm^2)	E ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	$\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$	Steel class
A	web	2730	3690	1.91	0.74	SS400
	flange	3316	4617	2.09	0.72	SS400
B	web	3263	4541	2.11	0.72	SS400
	flange	3872	5206	2.08	0.75	SM490
C	web	6260	6750	2.03	0.93	SM570
	flange	5640	6530	1.91	0.86	SM570
D	web	6138	6736	2.03	0.91	SM570
	flange	6164	6866	2.05	0.90	SM570
	web	5106	6460	2.02	0.79	LYR60
	flange	4881	6330	2.09	0.77	LYR60

2.2 実験装置および荷荷方法

(1) 実験装置

供試体A, BおよびDシリーズの荷荷装置をFig. 3に示す。供試体両端はヒンジ支承を用いて支持し、上端のヒンジはジャッキと、下端のヒンジは荷荷台にボルトで固定した。ジャッキの容量は最大ストローク $\pm 125\text{mm}$, 最大荷重 $\pm 60\text{tf}$ であり、荷荷荷重および強制変位量はそれぞれ操作盤に表示されるジャッキ内蔵のロードセルおよび変位計からの信号によって制御できる。また、隅角部パネルのせん断変形を計測するために、パネルと計測フレームに設置されている変位計の間を伸びの小さいアンバー線で連結した⁹⁾。一方、補剛断面からなるCシリーズの供試体に対しては、川崎製鉄鋼構造研究所の1000tf大型構造物試験機⁹⁾を用いて荷荷実験を行った。

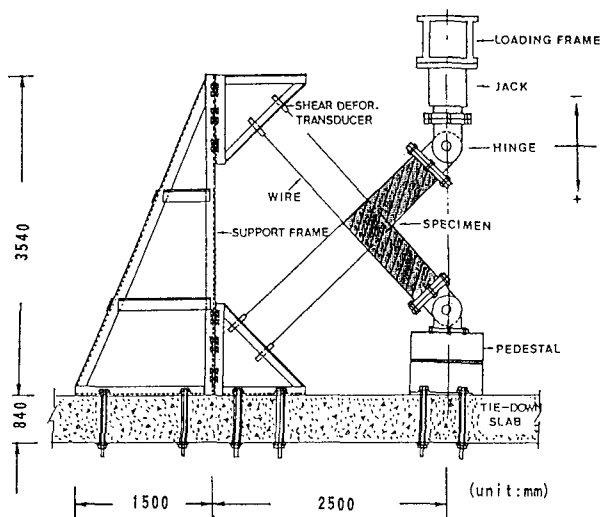


Fig. 3 Test Setup

(2) 荷荷方法

(a) 単調荷荷

一般に、門型ラーメン橋脚の隅角部では、はりの中間荷重および地震時の水平荷重によって大きな負のモーメントが作用する。そこで、本研究では、Fig. 4(a)に示したように、圧縮側から荷荷を初め、最大荷重に達するまで静的荷荷をした後、除荷を行った。

(b) 繰返し荷荷

① 片振り繰返し荷荷 (供試体Aシリーズ)

各供試体の単調荷荷実験の結果より荷荷時の降伏変位 δ_y を求めた後 (Fig. 4(a) 参照), δ_y ずつ強制変位量を増加させながら顕著な強度低下が現れるまで圧縮側のみの領域で繰返し荷荷を行った (Fig. 4(b) 参照)。

② 両振り繰返し荷荷 (供試体B, C, Dシリーズ)

供試体B, CおよびDシリーズにおける繰返し荷荷は、Fig. 4(c)のように各サイクル毎に δ_y ずつ支承間変位が進むように荷荷し、最大変位振幅 $7\delta_y$ で崩壊に達するまで繰返し荷荷を行った。

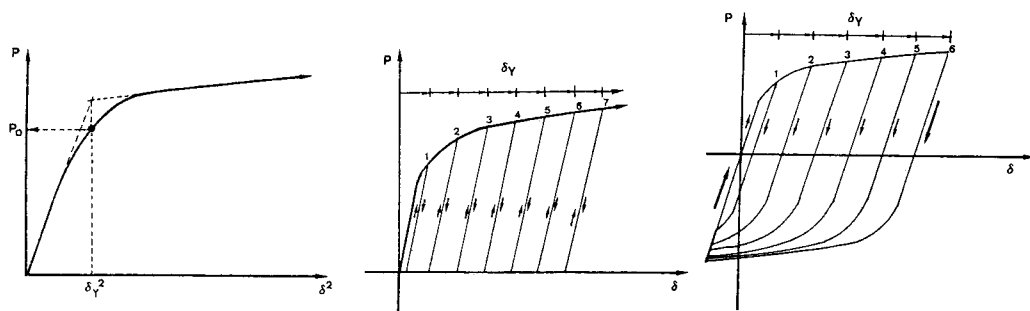


Fig. 4 Loading Programs

3. 実験結果及びその考察

3.1 隅角部の強度特性

(1) 断面積比 S および幅厚比パラメータ R_F の影響

単調荷重実験における荷重 P と支承間変位 δ の関係を Fig. 5 に示す。ここで、図中の矢印は、実験から得られた降伏荷重 P_0 および極限荷重 P_u などを表したものである。まず、幅厚比パラメータ R_F の値が約 0.4 としてほぼ一定で、断面積比 S の値が異なる供試体 B-1M と A-3M との強度特性について比較検討する。断面積比 S の値が約 0.5 である供試体 B-1M においては、降伏後の隅角部パネルのひずみ硬化などによる強度上昇率 (P_u/P_0) が大きく (約 1.5 程度)、また、極限強度に達するまで比較的安定した挙動を示していることがわかる。しかし、 S の値が約 0.8 である供試体 A-3M においては、降伏後の強度上昇が明確に現れず、極限強度に達した後、著しく強度が低下していることがわかる。Fig. 6 にこれらの強度上昇率 (P_u/P_0) と断面積 S の関係を示す。この図より、各供試体における強度上昇率は断面積比 S が大きくなるほど徐々に低下し、特に、 $R_F \geq 0.4$ の供試体では、隅角部パネルの局部座屈の影響で (P_u/P_0) 比の低下が顕著に現れているのわかる。また、Fig. 7 に両振りの繰返し荷重を行った供試体 B-1C と B-2C の $P-\delta$ 履歴曲線を示す。まず、供試体 R_F の値が約 0.35 である B-1C の $P-\delta$ 履歴曲線は約 20 サイクルの繰返し荷重まで比較的安定しており、その後、隅角部パネルの板たわみの進行とともに徐々に強度が低下する。しかし、 $R_F = 0.5$ の供試体 B-2C では、強制変位の $5\delta_y$ 近傍で極限強度に達しており、その後、隅角部パネルの急激な板たわみの増加とともに、供試体 B-1C に比べて早い段階で強度低下が生じている。

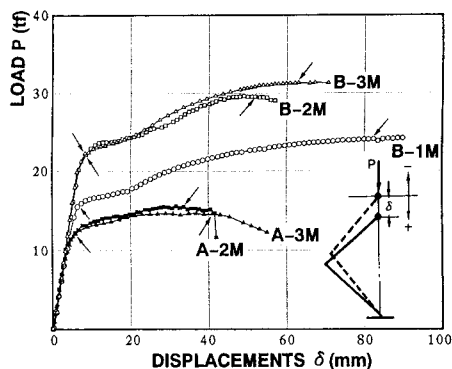


Fig. 5 $P-\delta$ Curves under Monotonic Tests

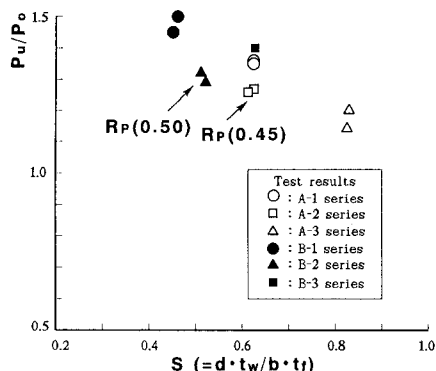


Fig. 6 Effects of S , R_F on Strength

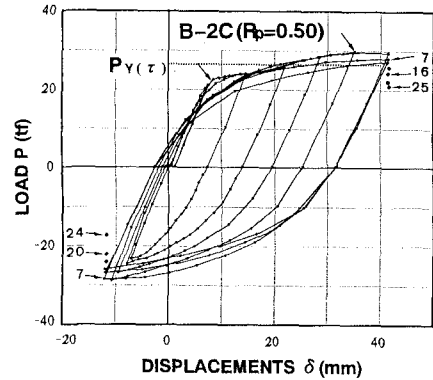
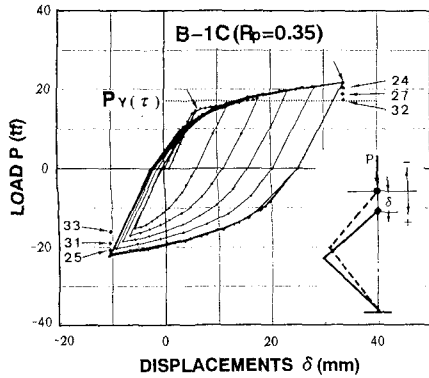


Fig. 7 P- δ Curves for Specimen B-1 C and 2 C

(2) 補剛材剛度比の影響

Fig. 8は、単調載荷実験における供試体C-1 Mおよび2 MのP- δ の関係を示したものである。この図からわかるように、2つの供試体の極限強度はほぼ一致しており、強度に対する補剛材剛度比の影響は小さいものと考えられる。ここで、補剛材剛度比の大きいC-2 Mの最大変形量がC-1 Mより約15mm程度下回っているのは、載荷中にC-1 Mより早い段階で隅角部パネルとフランジ板の間に亀裂が生じたためである。また、繰り返し載荷実験を行った供試体C-1 Cおよび2 CのP- δ 履歴挙動においては、補剛材剛度比の大きいC-2 Cの方が若干安定した履歴挙動を示すものの、補剛材剛度比の差による影響はほとんど現れなかった。

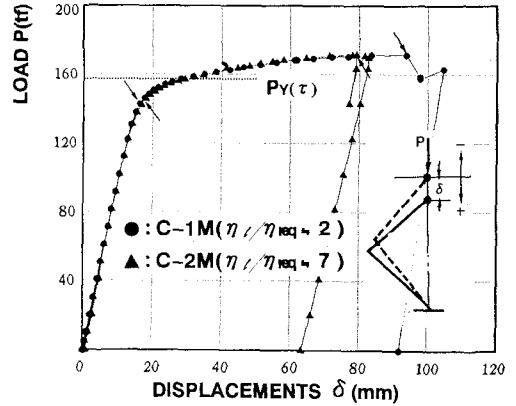


Fig. 8 P- δ Curves for C-1 M and 2 M

(3) 使用鋼種の影響

Fig. 9に単調載荷実験における供試体D-1 Mおよび2 Mの荷重P-変位 δ の関係を示す。この図を見ると、各供試体の極限荷重は、SM570鋼を用いたD-1 Mの方がLYR60鋼を用いたD-2 Mより約5%程度大きくなっているが、降伏後の強度上昇率(P_u/P_y)はD-1 Mの方が約1.2、D-2 Mの場合が約1.4程度で、それぞれの供試体に用いた材料の強度特性(σ_u/σ_y)をよく反映する傾向があることがわかる。また、Fig. 10に繰り返し載荷実験を行った供試体D-1 Cおよび2 CのP- δ 履歴曲線を示す。2つの供試体ともに $\delta = 6\delta_y$ に達するまで安定した強度履歴特性を表すものの、最大変位振幅($7\delta_y$)

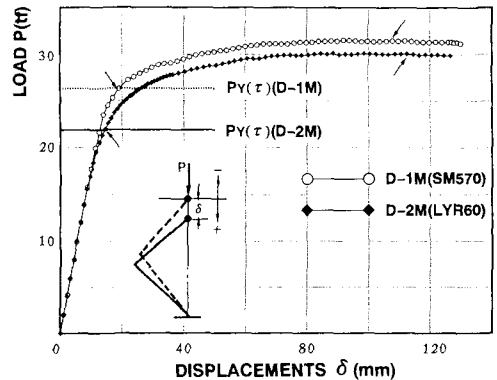


Fig. 9 P- δ Curves for D-1 M and 2 M

の繰り返し載荷中においては、SM570鋼を用いたD-1 Cの方がD-2 Cより顕著に強度低下が現れている。そこで、以上の関係を考慮すると、LYR鋼を用いたD-2 Cの方がSM570鋼のD-1 Cよりやや安定した強度特性を持つものと考えられる。

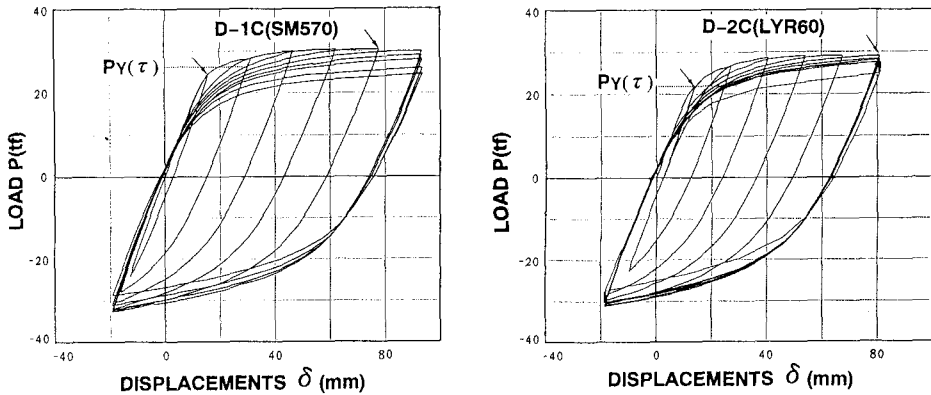


Fig.10 P- δ Curves for D-1 C and 2 C

3. 2 隅角部パネルのせん断変形特性

(1) 単調載荷実験

Fig.11に、実験から得られた各供試体A, Bシリーズの荷重Pとパネルのせん断ひずみ γ を、それぞれ理論降伏荷重 $P_Y(\tau)$ および降伏せん断ひずみ $\gamma_Y (= \tau_Y / G)$ で除して無次元化した関係を示す。ここでは、隅角部パネルの降伏後から極限強度に達するまでのせん断変形の余裕度を隅角部パネルの変形能 μ_s と定義するものとする。

$$\mu_s = \gamma_u / \gamma_Y \quad (7)$$

ここに、 γ_u : 極限荷重におけるせん断ひずみ

(a) 断面積比Sおよび幅厚比パラメータ R_p の影響

まず、幅厚比パラメータ R_p がほぼ同じ値で、断面積比Sが大きく異なる供試体B-1MとA-3Mのせん断変形特性について比較検討してみる。断面積比S値の小さい供試体B-1Mにおける変形能は約50を越えており、極限状態に達するまではりおよび柱フランジ板の局部たわみはほとんど見られず、ほぼ純せん断状態の隅角部パネルの塑性変形が卓越する。これに比べて、供試体A-3Mの変形能はB-1Mの約半分程度となっており、特にフランジ板の局部たわみの増加によって、強度低下が生じるとともに隅角部パネルのせん断変形が進展しなくなる。また、各供試体における変形能は、断面積比Sの値が大きくなるほどほぼ直線的に低下し、特に $R_p \geq 0.4$ の供試体においては、パネル変形能の低下現象が顕著に現れることがわかる (Fig.12参照)。一方、これらの供試体におけるパネル降伏荷重を比較してみると、断面積比Sおよび幅厚比パラメータ R_p などが大きくなるほど、降伏強度比($P_o / P_Y(\tau)$)が若干ずつ減少する傾向が見られる。

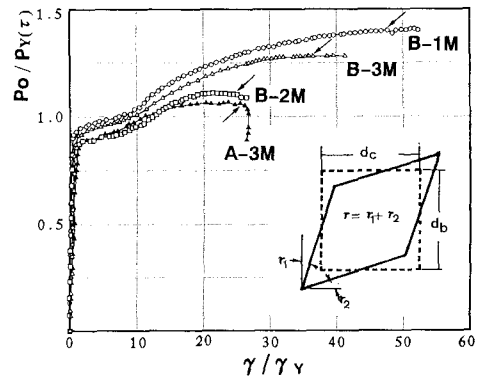


Fig.11 Shear Deformation in Panel Zone(A, B)

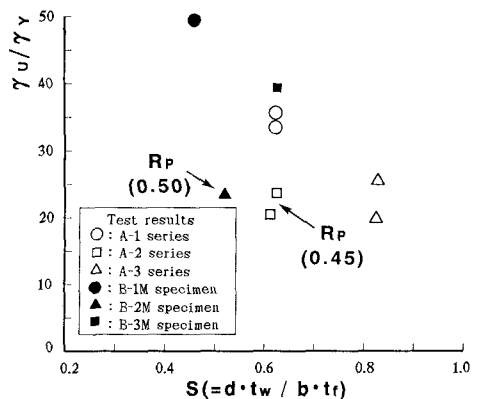


Fig.12 Effects of S, R_p on Strength

(b) 補剛材剛度比および使用鋼種の影響

Fig. 13に単調載荷実験から得られた供試体C, Dシリーズの $(P/P_Y(\tau)) - (\gamma/\gamma_Y)$ の関係を示す。まず、補剛材剛度比の大きい供試体C-2Mのパネル変形能は亀裂の発生による影響でC-1Mの変形能より若干低下しているが、それらの曲線形状を見ると、補剛材剛度の差による影響は小さいものと考えられる。また、使用鋼種が異なる供試体D-1MおよびD-2Mの関係曲線を比較して見ると、弾性域におけるせん断剛性はほぼ一致しているが、パネル降伏後の曲線勾配はLYR60鋼を用いたD-2Mの方が大きくなることがわかる。また、極限強度における供試体D-2Mのパネル変形能は約25程度で、SM570鋼を用いたD-1Mの変形能の約20より若干増加している。

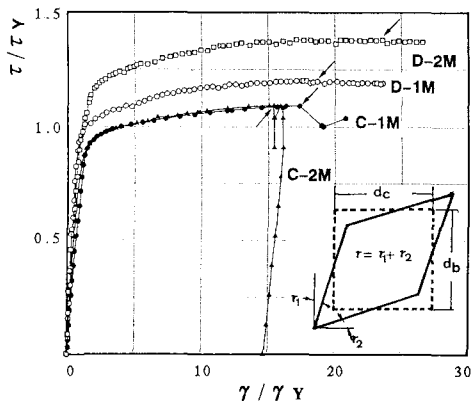


Fig. 13 Shear Deformation in Panel Zone (C, D)

(2) 繰り返し載荷実験

(a) 崩壊形式の影響

Fig. 14に断面積比Sの値がそれぞれ約0.6, 0.8である供試体A-1CおよびA-3Cの荷重P-せん断変形 γ との関係を示す。隅角部パネルの塑性変形が卓越するA-1Cの場合、パネル降伏とともにそのせん断変形が著しく増加し、また極限状態に達するまで十分なせん断変形能を持つものと考えられる。一方、A-3Cにおいては、パネル降伏後、徐々にせん断変形が増加しているが、さらに繰り返し載荷を行うと、部材一般部フランジ板の局部たわみが累積されることによってせん断変形はほぼ進行せず、急激に強度が低下していることがわかる。このような、フランジ板の局部座屈によるパネル変形能の低下現象は酒造ら¹⁾による研究成果からも確認されている。

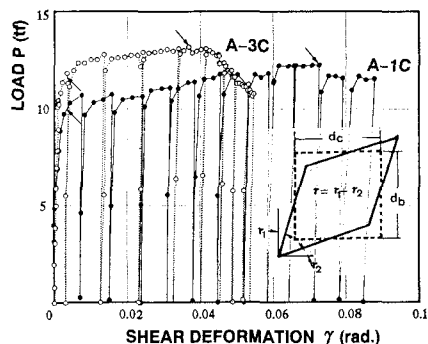


Fig. 14 P- γ Curves for A-1C and 3C

(b) 隅角部パネルの局部座屈の影響

Fig. 15に幅厚比パラメータ R_F 値の異なる供試体B-1CおよびB-2CのP- γ の関係を示す。 R_F =約0.35である供試体B-1Cのせん断履歴ループは比較的安定した挙動を示しており、地震時かなりのエネルギー吸収能（ループによって囲まれる面積）が期待できるものと考えられる。しかし、 R_F 値の約0.5であるB-2Cでは、極限強度に達した後、各サイクル毎にその吸収能が低下する傾向が見られる。

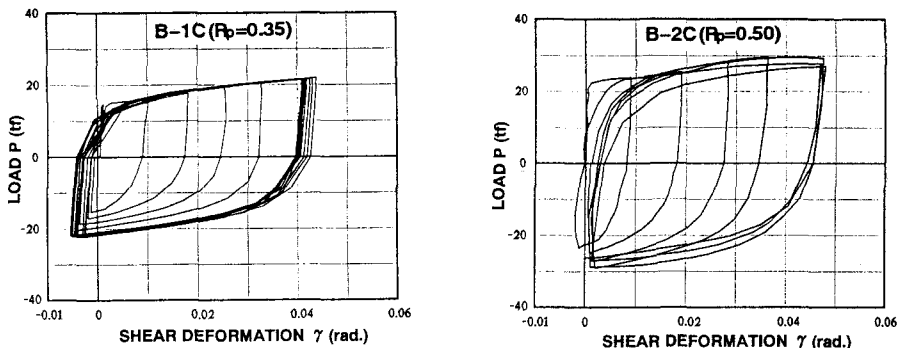


Fig. 15 Effect of Local Buckling in Panel Zone on Shear Deformation Behavior

(c) 補剛材剛度比および使用鋼種の影響

Fig. 16に繰り返し載荷実験における供試体C-1 CおよびC-2 Cの荷重 P —せん断変形角 γ の関係を示す。補剛材剛度の大きいC-2 Cの方がやや安定した挙動を示しているものの、4サイクル目におけるパネルのせん断変形量はほぼ一定であり、2つの供試体の間には補剛材剛度による影響が明瞭に現れていない。また、前節の強度履歴特性と同様にLYR60鋼を用いたD-2 Cの方が、SM570鋼のD-1 Cより若干安定的な P — γ 履歴特性を有することが観察された¹⁰⁾。

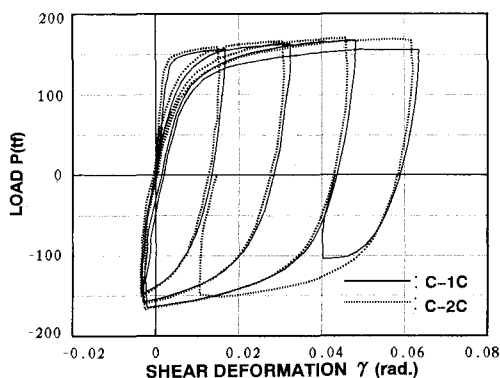


Fig. 16 P - γ Curves for C-1 C and 2 C

3. 3 板要素の局部たわみ

(1) 単調載荷実験

Fig. 17に単調載荷実験における供試体A, Bシリーズの荷重 P —隅角部パネルの板たわみ δ_p の関係を示す。まず、幅厚比パラメータ R_p の値がそれぞれ約0.35程度である供試体A-1 MとB-1 Mの板たわみ δ_p は、それぞれの板厚 t_w の約0.2程度でほとんど進行せず、極限状態に達するまで安定的な挙動を示した。しかし、 R_p の値が約0.5である供試体A-2 MおよびB-2 Mにおけるたわみ δ_p は、それぞれの板厚 t_w の約2倍を越えており、このような板たわみ δ_p の増加によって強度上昇率および変形能などが著しく低下するものと考えられる。一方、供試体A-3 Mのたわみ δ_p は、柱部材フランジの局部たわみが卓越することによって、 (δ_p/t_w) 比の約0.3付近からその進行が止まり、急激な強度低下が現れた。

(2) 繰り返し載荷実験

ここでは、供試体Bシリーズを対象に、繰り返し載荷実験における強度低下特性と隅角部パネルの板たわみ δ_p の関係について検討を行う。Fig. 18および19に、各サイクルにおける強度低下率およびパネルの板たわみ δ_p の関係について示す。これらの図より、供試体B-1 Cでは (δ_p/t_w) の比が約1となる20回目から強度低下が生じ始め、その後 δ_p の増加に従い徐々に強度が低下していることがわかる。これに対して、 R_p の約0.5であるB-2 Cでは、各サイクル毎に板たわみ δ_p が急激に増加しており、その強度低下率もB-1 Cより大きくなっている。また、Fig. 18に示したように、強度低下に対するはりおよび柱部材の交差点内側(●→)溶接割れの影響は小さいと考えられるものの、外側(■→)に生じる溶接割れによって急激に強度が低下している。一方、B-2 Cのパネルたわみ δ_p は数回の繰り返し載荷で測定計の制限(約20mm)を越えたため、載荷途中までの測定データのみを示したものである(Fig. 19参照)。

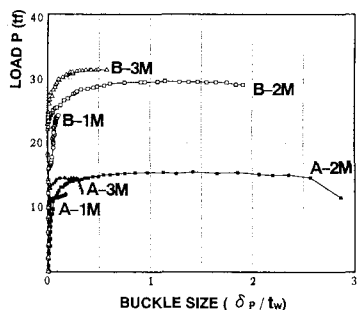


Fig. 17 Buckle Size in Panel Zone (Monotonic)

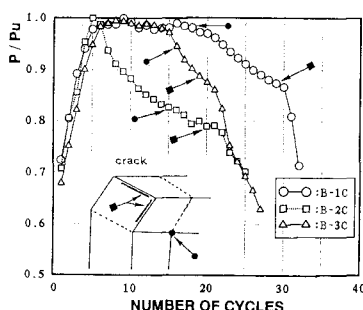


Fig. 18 Strength Deterioration

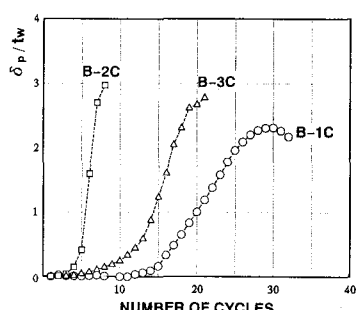


Fig. 19 Buckle Size in Panel Zone (Cyclic)

3. 4 隅角部の崩壊形式

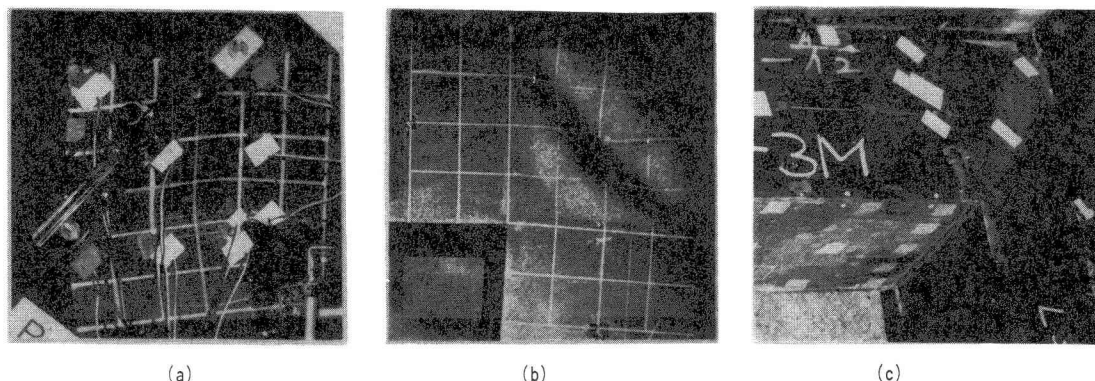


Photo 1 Failure Modes of Connections

ここでは、参考文献1)による3つの崩壊形式を参考にして、本実験で観察された隅角部パネルの崩壊形式を中心に述べる。

TYPE S : ①せん断ヒンジ型 — 隅角部パネルおよび部材一般部フランジのたわみなどはほとんど進行せず、ほぼ純せん断状態のパネル塑性変形のみを続けるケース (Photo 1(a) 参照)

: 供試体 A-1, B-1 および供試体 C, D シリーズ

②せん断座屈型 — フランジの板たわみはほとんど進行せず、せん断座屈による隅角部パネルの局部たわみが卓越しながら崩壊に達するケース (Photo 1(b) 参照)

: 供試体 A-2 および B-2, 3 シリーズ

TYPE B : フランジ座屈型 — 隅角部パネルの局部たわみはほとんど見られず、部材一般部フランジの局部たわみが卓越するケース (Photo 1(c) 参照) : 供試体 A-3 シリーズ

ここで、供試体 A-3 M および B-3 C の崩壊形式は、隅角部パネルと部材一般部フランジの連成座屈によるものであるが、それぞれの最終的な崩壊形式としては、TYPE B および TYPE S ②に近いものと言える。

TYPE S の①は幅厚比パラメータ R_F および断面積比 S の小さい供試体の崩壊形式であり、降伏後の強度上昇率が大きく、十分なパネル変形能が期待できる。また、実験結果を参考にすると、 R_F および S の値がそれぞれ0.4および0.8以下の範囲であれば、この崩壊形式に属するものと考えられる。また、TYPE S の②は隅角部パネルの局部たわみによってその強度および変形能が著しく低下する崩壊形式であり、実験結果によると、 $R_F \geq 0.4$ の隅角部はこの崩壊形式に属する。さらに、TYPE B は断面積 S の値が約0.8を越える供試体の崩壊形式であり、隅角部の強度および変形能の両面から一番不利な崩壊形式となる。

4. 隅角部の強度と変形能に関する考察

ここでは、隅角部パネルの降伏強度に対する断面積比 S および隅角部パネルの幅厚比パラメータ R_F の影響、ならびにパネル変形能と材料変形能の関係について述べる。Table 3 に単調あるいは繰り返し載荷実験を行った供試体20体の実験結果をまとめた。ここで、理論降伏荷重 $P_{Y(\tau)}$ および $P_{Y(\sigma)}$ は Beedleら による $M_{Y(\tau)}$ および $M_{Y(\sigma)}$ (式(1)および(2)参照) に相当する荷重を表すものであり、供試体と載荷装置の幾何学的関係から次式で求められる。

$$P_Y(\tau), (\sigma) = \frac{\sqrt{2} M_Y(\tau), (\sigma)}{L} \quad (8)$$

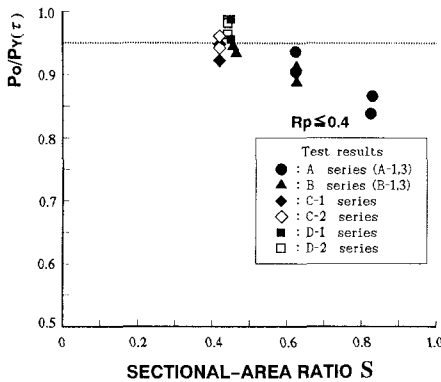
4.1 隅角部パネルの降伏強度

まず、幅厚比パラメータ $R_p \leq 0.4$ の範囲における隅角部パネルの降伏強度比 ($P_o/P_Y(\tau)$) と断面積比 S の関係を Fig. 20 (a) に示す。隅角部パネルの降伏強度は断面積 S が増加するほどほぼ直線的に減少しており、特に S が約 0.8 程度である供試体 A-3 シリーズの強度低下率は約 15% 程度になっていることがわかる。また、Fig. 20 (b) に降伏強度比と R_p との関係を示す。この図より、 $R_p \leq 0.4$ 範囲における隅角部パネルの降伏強度は理論降伏荷重 $P_Y(\tau)$ の約 0.95 となっているが、 R_p が約 0.5 である B-2 シリーズにおいてはパネルのせん断座屈などの影響で顕著に強度が低下する傾向が見られる。したがって、パネル降伏強度をより正確に評価するためには、このような断面積比 S や幅厚比パラメータ R_p などの影響を考慮する必要があると考えられる。

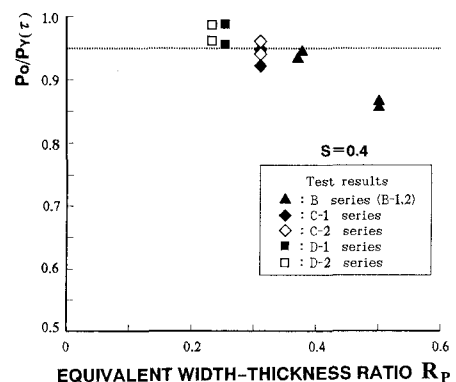
Table 3 Test Results

Specimen	Experimental			Reference		P_o	γ_u
	P_o	P_u	P_o/P_u	$P_Y(\tau)$	$P_Y(\sigma)$	$P_Y(\tau)$	γ_Y
BL-A-1M	9.45	12.86	1.36	10.45	15.83	0.90	35.7
BL-A-1C	9.78	13.23	1.36	10.45	15.83	0.94	(33.5)
BL-A-2M	12.30	15.62	1.27	14.01	21.36	0.88	23.7
BL-A-2C	12.50	15.76	1.26	13.70	21.26	0.91	(20.5)
BL-A-3M	12.24	14.70	1.20	14.29	16.24	0.86	25.5
BL-A-3C	11.55	13.16	1.14	13.99	16.16	0.83	(19.8)
BL-B-1M	16.13	24.38	1.50	17.29	33.81	0.93	47.1
BL-B-1C	16.03	23.23	1.45	16.98	33.71	0.94	----
BL-B-2M	22.95	29.66	1.29	26.50	46.30	0.87	23.3
BL-B-2C	22.66	29.97	1.32	26.48	46.71	0.86	----
BL-B-3M	22.35	31.34	1.40	24.53	35.22	0.91	35.9
BL-B-3C	21.76	30.40	1.40	24.53	35.22	0.89	----
BLH-C-1M	145.0	171.5	1.18	157.1	259.0	0.92	17.3
BLH-C-1C	149.0	167.2	1.12	157.1	259.0	0.95	----
BLH-C-2M	148.0	171.5	1.16	157.1	259.0	0.94	15.2
BLH-C-2C	151.0	170.6	1.13	157.1	259.0	0.96	----
BLH-D-1M	25.97	31.54	1.21	26.27	46.67	0.99	18.1
BLH-D-1C	25.12	30.49	1.21	26.27	46.67	0.96	----
BLL-D-2M	21.51	30.08	1.40	21.78	37.37	0.99	23.5
BLL-D-2C	21.01	29.09	1.38	21.78	37.37	0.96	----

Load Unit (tf)



(a)



(b)

Fig. 20 Effects of S and R_p on Panel Yield Strength

4.2 パネル変形能と材料変形能の関係

ここでは、隅角部パネルの塑性せん断変形が卓越する供試体を対象として、そのパネル変形能 (γ_u/γ_Y) と材料変形能 ($\varepsilon_o/\varepsilon_Y$) の関係について述べる。Fig. 21 に断面積比 S が約 0.4 の一定で、幅厚比パラメータ $R_p \leq 0.4$ の供試体における (γ_u/γ_Y) - ($\varepsilon_o/\varepsilon_Y$) の関係を示す。ここで、 ε_o は各使用鋼材の一樣伸び (ほぼ、最大応力度時のひずみ量に相当) で、材料の降伏比 (Yield Ratio) と関連して次式で求められる¹¹⁾。

$$\varepsilon_o = 60 (1 - YR) \quad (9)$$

ここに、 $YR = \sigma_Y/\sigma_u$

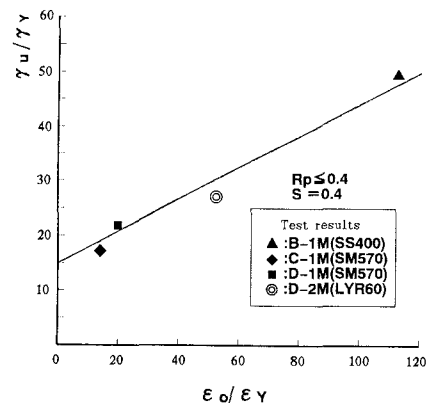


Fig. 21 ($\varepsilon_o/\varepsilon_Y$) - (γ_u/γ_Y) Relationships

この図より、隅角部パネルの変形能と材料変形能の間にはほぼ直線関係があり、特にSS400鋼を用いた隅角部の変形能に比べて SM570鋼の変形能が約半分になっていることわかる。一方、3.2節で述べたように、隅角部パネルの変形能は断面積比Sおよび幅厚比パラメータR_pなどが増が加するほど低下する傾向があり、したがって、隅角部パネルの変形能を評価する際、これらの影響を考慮する必要があると考えられる。

5. 数値解析結果と実験結果の比較

5.1 解析法および初期不整

数値解析においては、供試体形状の対称性を考慮して断面の1/2部分を解析対象とし、板要素の弾塑性解析法を立体に拡張したプログラム NAPLAT¹²⁾を用いた。解析に考慮する残留応力としては、引張残留応力度 $\sigma_{rt}=1.0\sigma_Y$ 、圧縮残留応力 $\sigma_{rc}=-0.4\sigma_Y$ を、初期たわみは供試体の全体的な初期たわみの形状を考慮して、はりおよび柱方向にsine波形で与えた¹³⁾。一方、材料の応力 σ -ひずみ ϵ 関係は次式で与えている (Fig. 22参照)。

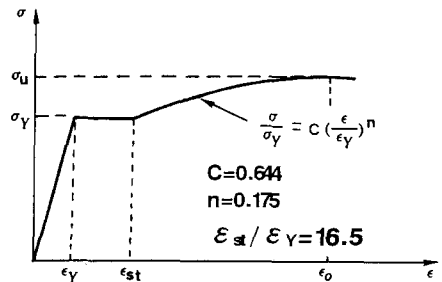


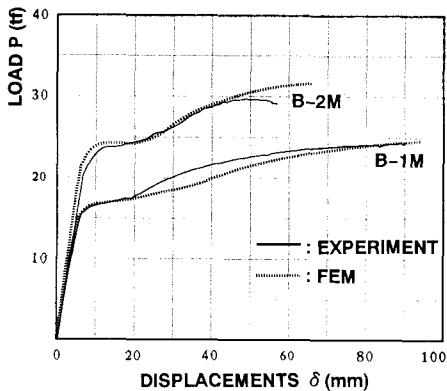
Fig. 22 Idealization of $\sigma - \epsilon$

$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \begin{cases} \epsilon / \epsilon_Y & : \epsilon \leq \epsilon_Y \\ 1 & : \epsilon_Y < \epsilon \leq \epsilon_{st} \\ C (\epsilon / \epsilon_Y)^n & : \epsilon_{st} < \epsilon \end{cases} \quad (10)$$

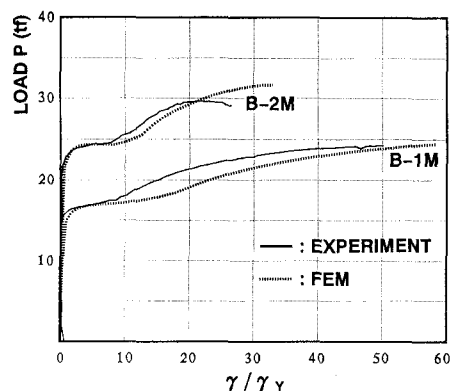
ここで、 ϵ_{st} はひずみ硬化開始ひずみであり、Cおよびnはひずみ硬化域における $\sigma - \epsilon$ 関係の形状を表す係数で、供試体Bシリーズの材料試験結果を参考にした。

5.2 解析結果

数値解析ならびに実験から得られた供試体B-1MおよびB-2MのP- δ の関係およびP-(γ/γ_Y)の関係をFig. 23(a)および(b)に示す。これらの図をみると、それぞれの供試体における実験および解析からの降伏荷重はほぼ一致しており、また、実験では隅角部パネルの初期たわみおよび残留応力度の分布などの影響で数値解析結果と若干の差が現れるものの、本研究で用いた解析法によって単調載荷を受ける隅角部の全体的な挙動をほぼ推定できるものと考えられる。



(a)



(b)

Fig. 23 Comparisons of Experimental and Numerical Results

6. 結論

本研究は、鋼製ラーメン橋脚の耐震性能に関連し、単調あるいは繰り返し荷重履歴を受ける隅角部の強度と変形特性などを明らかにしたものである。本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 隅角部の強度上昇率(P_u/P_o)および変形能(γ_u/γ_y)は、断面積比 S や隅角部パネルの幅厚比パラメータ R_F などが大きくなるほど低下する傾向があり、特に $R_F \geq 0.4$ である隅角部ではパネルの局部たわみによる低下現象が現れた。
- (2) 部材一般部フランジ板の局部座屈が卓越する隅角部では、降伏後の強度上昇効果が明瞭に現れず、その変形能においても純せん断状態のパネル変形が卓越する隅角部に比べて大きく低下した。
- (3) 補剛材の剛度比(E_s/E_{req})をそれぞれ約2および7程度にした隅角部の強度およびせん断挙動に関する関係曲線はほぼ一致しており、また、繰り返し載荷実験における履歴特性においても、補剛材剛度比の差による影響はほとんど現れなかった。
- (4) LYR60鋼およびSM570鋼を用いた隅角部の強度特性は、それぞれの材料強度特性(σ_u/σ_y)を反映する傾向があり、また繰り返し載荷における強度履歴特性においては、LYR60鋼を用いた隅角部の方が、従来のSM570鋼を用いた隅角部に比べてやや安定した挙動を示した。
- (5) 単調載荷実験におけるLYR60鋼隅角部の変形能は約25程度で、SM570鋼を用いた隅角部の約20より若干大きくなった。また、繰り返し載荷実験におけるせん断履歴挙動においても、LYR60鋼を用いた隅角部の方がSM570鋼の隅角部より若干安定的な挙動を示した。
- (6) 幅厚比パラメータ R_F が約0.4以下の範囲にある隅角部では、ほぼ純せん断状態のパネル塑性変形が進行し、極限状態に達するまで安定的な挙動特性を示した。一方、断面積比 S の値が約0.8を越える隅角部では、部材一般部フランジ板の局部たわみが卓越する崩壊形式となり、隅角部の強度と変形能の両面から一番不利な崩壊形式であった。
- (7) 隅角部パネルの降伏強度は、断面積比 S の値が大きくなるほど徐々に低下する傾向があり、また、幅厚比パラメータ $R_F \geq 0.4$ の隅角部では、パネルのせん断座屈の影響で、降伏強度が低下する傾向があった。
- (8) パネルの塑性変形が卓越する隅角部の変形能と材料変形能($\varepsilon_o/\varepsilon_y$)の間にはほぼ直線関係があり、特に、SM570鋼を用いた隅角部の変形能はSS400鋼隅角部の約半分程度となった。
- (9) 本研究で用いた弾塑性有限変位法による数値解析結果と、単調載荷実験における強度およびせん断変形に関する関係曲線はほぼ一致することが確認された。

参考文献

- 1) 酒造敏廣，事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 121-134，1991.
- 2) 中井 博，福岡 悟，酒造敏廣，明橋克良：鋼製ラーメン隅角部の Shear lag と耐荷力に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 33A，pp. 193-206，1987.
- 3) 中井 博，酒造敏廣，橋本良之：せん断遅れ現象を考慮した鋼製ラーメン隅角部の限界状態設計法について，土木工学論文集，No. 455，pp. 95-104，1992.
- 4) Beedle, L. S., Topractsoglou, A. A. and Johnston, B. G.: Connection for Welded Continuous Portal Frame, Welding Journal, Vol. 30, pp. 359s-384s, July, 1951.
- 5) 福本啓士：鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究，科学研究費補助金研究成果報告

書, 1989.

- 6) 宇都宮紳三, 田中祐人, 西村宣男: 鋼製ラーメン隅角部の耐荷力と変形能に関する研究, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, I-55, 1992.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1989.
- 8) W.S. Hwang, S. Harimoto and N. Nishimura: Inelastic Behavior of Beam-to-Column Connections of Welded Box-Section, Technol. Repts. Osaka Univ., Vol.40, pp.323-330, 1990.
- 9) 川崎製鉄鋼構造研究所: 川鉄技報, Vol.4, No.2, 1972.
- 10) 黄 元燮, 高津秀俊, 西村宣男: 低降伏比高張力鋼を用いたラーメン隅角部の繰返し塑性履歴, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-14, 1992.
- 11) 福本昤士: 鋼構造の機能向上からみた高張力鋼の実用化に関する研究, 科学研究費補助金研究成果報告書, 1992.
- 12) 小松定夫, 北田俊行, 宮崎清司: 残留応力と初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析, 土木工学論文集, No.244, pp.102-113, 1975.
- 13) 黄 元燮: 鋼製ラーメン橋脚隅角部の弾塑性挙動と限界状態照査法に関する研究, 大阪大学博士学位論文, 1993.7.

(1993 年 9 月 16 日 受付)