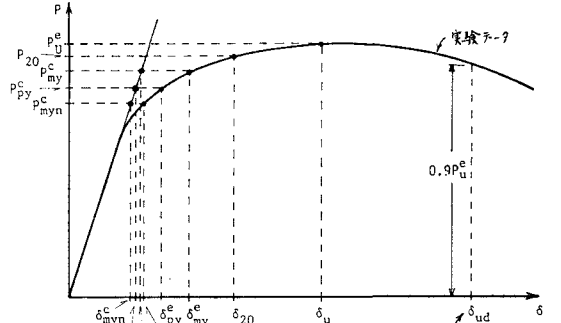


で、スパンは 318cm (突骨組に対して約 2/3 スケールのモデル) が標準である。スパンを 462cm とした試験体 (マーク L で表わす) および片側スパンのみ 462cm とした試験体 (マーク L' で表わす) もある。また、パネルゾーンにダブラプレート片面補強した試験体 (マーク H で表わす) および両面補強した試験体 (マーク F で表わす) もある。この他マーク SS, M, (F) ははり端部の接合方法を表わし、夫々順に現場溶接タイプの接合、混用接合 (上フランジ突合せ溶接、下フランジスプリットタイ接合)、全周すみ肉溶接接合である。パネル降伏比 R_{PY} (パネル降伏耐力の柱はりの降伏耐力のどちらか小さい方に対する比) の値が 1 より小さい弱パネルタイプの試験体が多く、同形状の試験体ではシリーズ名 Z → A → B → B' → C → D の順にパネル降伏比が小さくなるように計画してある。実験結果の概要を Fig.2 および Tab.3 に示す。

骨組モデル試験体は、Fig.3 に概要を示す 2 層 2 スパン (F-2 タイプ) と 2 層 1 スパン (F-1 タイプ) および 1 層 1 スパン (F-1B1, F-1B1') の 3 種の形状と、パネル降伏比が比較的大きい A タイプとやや小さい B タイプの 2 種類の断面形状の柱はり材の組合せがあり、その一覧を Tab.4 に、素材試験結果を Tab.5 に示す。F-1BH(c) 試験体はパネルゾーンにダブラプレート片面補強したものである。また F-1B1'(c) 試験体は左右の柱の断面形状が異なる (曲げ剛性が約 3:5) 試験体である。Tab.4 に示す R_{PY} の値は弾性解析の反曲点位置で切断した部分梁構について求めたものである。実験結果の概要を Tab.6 に示す。



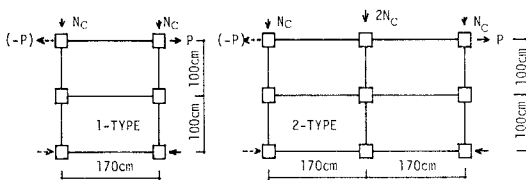
- Fig. 2
- P_{PY} --- パネル降伏荷重 (パネル領域はフランジ中心線間) (計算値)
 - P_{MY} --- 柱あるいははり降伏荷重の小さい方の値 (計算値)
 - P_{MP} --- 柱あるいははり全塑性荷重の小さい方の値 (計算値)
 - P_{MYP} --- 柱あるいははり降伏荷重公称値の小さい方の値 (計算値)
- P_{MY} と計算した降伏耐力 F_y の値 (SS41: 2.4 t/cm², SM50: 3.3 t/cm²) としたときの値
- P_{20} --- $\gamma/\gamma = 20$ のときの荷重 (実験値) δ_{PY} --- P_{PY} に対応する変形 (実験値)
 - P_u --- 最大荷重 (実験値) δ_{MYP} --- P_{MYP} に対応する変形 (実験値)
 - δ_{PY} --- P_{PY} に対応する変形 (計算値) δ_{MY} --- P_{MY} に対応する変形 (実験値)
 - δ_{MYP} --- P_{MYP} に対応する変形 (計算値) δ_{20} --- $\gamma/\gamma = 20$ のときの変形 (実験値)
 - δ_{MY} --- P_{MY} に対応する変形 (計算値) δ_u --- P_u のときの変形 (実験値)

Tab.4 Frame model specimens

Specimen	Column	Beam	Material	R_{PY}	Remarks
F-2A(c)	H-150x150x7x10	H-200x100x5.5x8	1	∇ 0.89 \diamond 0.45 \diamond 0.95 \diamond 0.48	$N_c = 0.20N_y$
F-1A(c)	H-150x150x7x10	H-200x100x5.5x8	1	∇ 0.89 \diamond 0.96	$N_c = 0.25N_y$
F-2B(c)	H-150x150x6x12	H-200x100x6x12	3	∇ 0.60 \diamond 0.82 \diamond 0.58 \diamond 0.41	$N_c = 0.20N_y$
F-1BH(c)	H-150x150x6x12	H-200x100x6x12	3	∇ 1.38 \diamond 1.17	$N_c = 0.30N_y$ Doubler Plate R.6
F-1B F-1B(c)	H-150x150x6x12	H-200x100x6x12	2	∇ 0.52 \diamond 0.46	$N_c = 0.25N_y$
F-1B1(c)	H-150x150x6x12	H-200x100x6x12	3	∇ 0.61	$N_c = 0.20N_y$
F-1B1'(c)	H-150x150x6x12 H-120x120x6x12	H-200x100x6x12	3	∇ 0.60 \diamond 0.82	$N_c = 0.20N_y$

Tab.5 Mechanical properties of material (Frame)

Group	Plate Material	σ_y (t/cm ²)	σ_B (t/cm ²)	ϵ_{st} (%)	Δ (°)	E_{st} (t/cm ²)
1	RL-5.5 SS41	3.21	4.56	1.98	22.9	34.2
	RL-7 SS41	3.13	4.64	1.83	28.2	32.5
	RL-8 SS41	2.58	4.35	1.91	24.9	42.7
	RL-9 SS41	3.62	4.74	1.99	25.0	31.3
	RL-10 SS41	2.85	4.45	1.89	26.4	44.0
2	RL-6 SS41	3.24	4.74	2.07	28.0	43.4
	RL-12 SS41	3.46	4.56	2.23	27.6	27.0
3	RL-6 SS41	3.61	4.75	2.29	24.9	35.2
	RL-12 SS41	3.10	4.51	2.22	29.6	29.6



Tab.6 Test results

Specimen	P_{PY}^e (t)	P_{MY}^e (t)	P_{MP}^e (t)	P_{MYP}^e (t)	P_u^e (t)	P_{20}^e (t)	δ_{PY}^e (cm)	δ_{MY}^e (cm)	δ_{MYP}^e (cm)	δ_{20}^e (cm)	δ_u^e (cm)	δ_{PY}^e/δ_u^e (%)	δ_{20}^e/δ_u^e (%)	P_{20}^e/P_u^e (%)	$\delta_{20}^e/\delta_{PY}^e$ (%)	$\delta_{20}^e/\delta_{20}^e$ (%)				
F-2A(c)	12.8	24.6	27.6	20.7	12.0	17.7	0.57	1.10	0.93	0.87	5.79	2.12	25.3	9.04	49.8	12.4	53.1	25.1	7.10	47.7
F-1A(c)	11.7	12.2	13.8	11.3	9.9	10.3	0.89	0.93	0.86	2.44	2.76	2.17	14.8	12.7	46.8	13.6	47.2	—	—	—
F-2B(c)	11.1	27.3	30.6	21.2	15.7	22.9	0.41	1.00	0.77	0.66	2.39	1.46	39.5	17.3	84.3	—	38.0	8.02	83.0	—
F-1BH(c)	21.9	18.7	21.3	14.5	22.7	24.8	1.36	1.17	0.90	2.01	1.66	1.26	33.4	9.9	39.2	11.8	38.2	—	—	—
F-1B(c)	9.8	20.9	23.8	14.5	9.5	12.7	0.49	1.04	0.72	1.07	5.92	1.75	22.2	11.5	80.2	25.8	79.5	22.2	8.04	79.6
F-1B	9.3	20.9	23.8	14.5	9.6	12.5	0.49	1.04	0.72	0.94	4.93	1.62	22.4	11.1	78.6	21.5	79.3	22.0	8.63	78.5
F-1B1(c)	18.2	30.1	37.4	23.3	19.0	22.1	0.45	0.75	0.58	0.73	3.13	1.17	33.6	13.2	75.5	14.0	75.3	32.7	6.06	76.0
F-1B1'(c)	15.6	19.0	24.0	14.7	12.5	17.3	0.47	0.57	0.44	0.87	1.31	0.80	26.1	10.4	73.4	13.4	72.5	26.0	8.96	73.4

3. 柱はり接合部変形の材端への影響

弱パネルタイプの柱はり接合部の復元力特性には、一般にパネル降伏以後パネル板の降伏耐力を上まわる耐力の上昇が見られる。この現象はパネルが弱いほど (R_{PY} の値が小さいほど) 顕著に現われるが、その原因として柱およびはり材端がパネルを補強する効果を持つと考えられる。⁸⁾ この考え方を基に筆者の一人により復元力特性の推定法が提案され⁹⁾、柱はり接合部の復元力特性をほぼ推定することが可能である。2に述べた実験結果を調べると、この復元力特性推定法は R_{PY} の値が0.4 ~ 0.5の付近を境界として、これより R_{PY} の値が小さいときやや危険側、これより R_{PY} の値が大きいとき安全側の推定をすることがあつた。そこで復元力のより正確な推定を行える資料になるものとして、試験体の最大耐力 (P_U) のパネル降伏耐力 (P_{PY}) に対する比を R_{PY} に対してプロットした回を Fig.4 に示す。図中に記入した曲線は前述の提案式を拡張した次式を表わしている。

$$P_U / P_{PY} = (1.78 + 1 / R_{PY}) / 2 \quad \text{---- (1)}$$

この近似式は全体の傾向を良く表わしていると思われる。またこの柱はり材端によるパネルの補強現象は柱はり材端に生ずるS字形のひずみ分布パターンに関連しており、このS字形のひずみ分布によりフランジにひずみ集中が発生して柱はりの耐力低下がおこることも既に指摘した²⁾。そこではりの耐力低下について検討する為にはり (H-350 x 175 x 9 x 12) の P- δ_B 関係 (実験値) を降伏荷重 (計算値) P_{BY}^C と降伏変形量 (計算値) δ_B^C で規準化して Fig.5a ~ b に示す。ひずみ硬化域を考慮した部材のモーメント曲率関係より求めた片持ちばりの計算値も合せて示してある。図がわかるように R_{PY} の小さい (0.64 以下) 試験体のはりの P- δ_B 曲線は計算値より低い耐力を示し、それは R_{PY} が小さいほど顕著である。また R_{PY} が0.8以上の試験体 (パネル補強のない) の P- δ_B 曲線は計算値を上回っている。パネル補強を行った試験体の P- δ_B 曲線は Aタイプにおいては計算値にほぼ等しい値を示しており、Cタイプにおいては計算値より低い値を示している。これらの傾向は前述のS字形ひずみ分布の影響と思われ、材端におけるS字形ひずみ分布の形成がはり材端の早期降伏と耐力の低下に結びつくことが検証できる。 R_{PY} の値が大きい試験体においてはS字形のひずみ分布が生ずるものの R_{PY} の値が小さい試

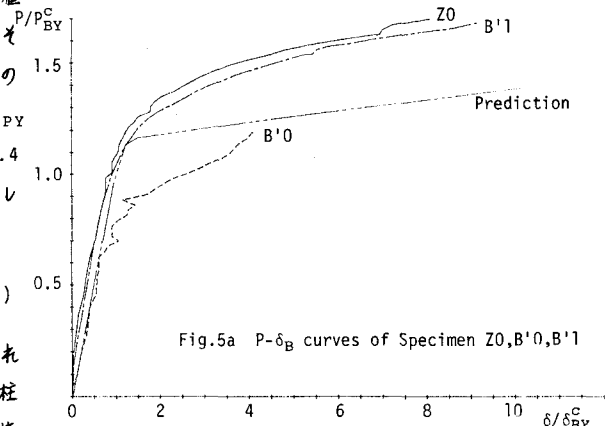
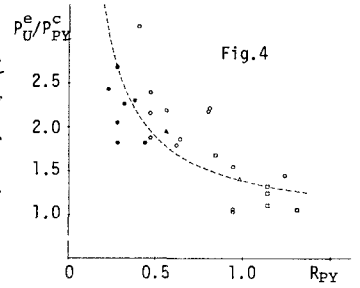


Fig.5a P- δ_B curves of Specimen Z0, B'0, B'1

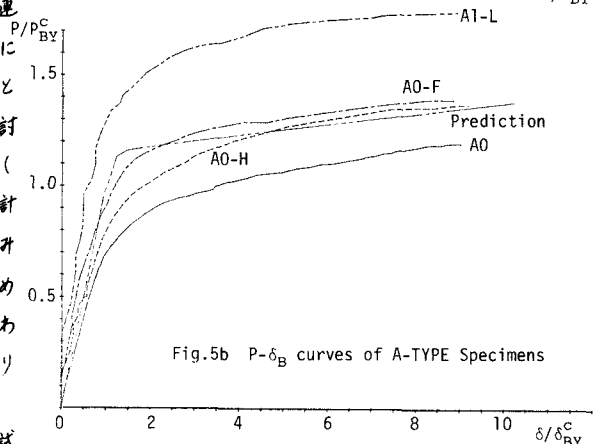


Fig.5b P- δ_B curves of A-TYPE Specimens

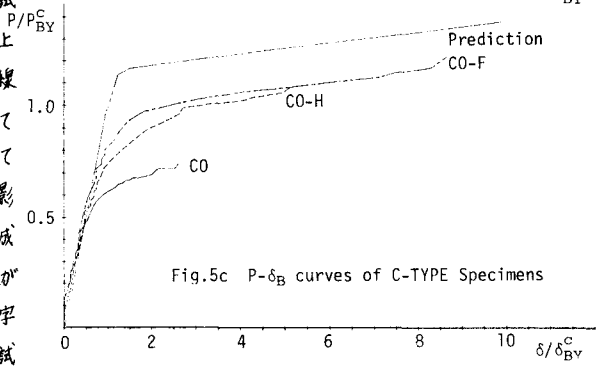


Fig.5c P- δ_B curves of C-TYPE Specimens

験体に比べてその傾向は小さい。またはり材端のひずみ分布に平面保持を仮定した場合よりも最外縁のひずみの値が大きくなりフランジが早期にひずみ硬化域に達するために、実験値が計算値を上回る結果に結びつくと思われる。この点については、S形状ひずみ分布の材長方向の変化とも合わせて今後の検討課題としている。このような実験値が計算値を上回る傾向は骨組モデル試験体においてもみられた。

4. 柱はり接合部の変形分比率

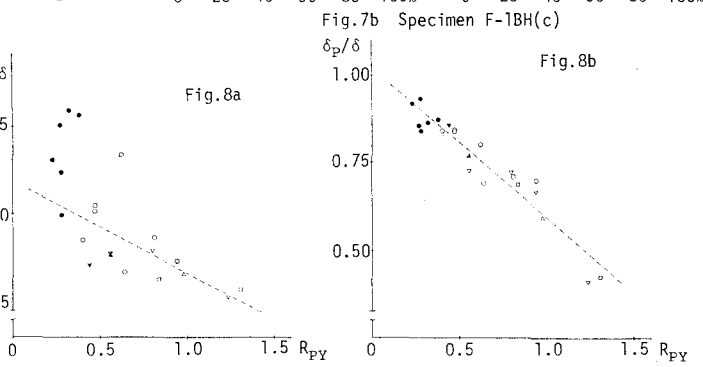
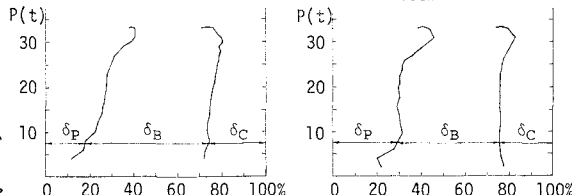
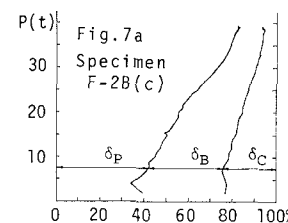
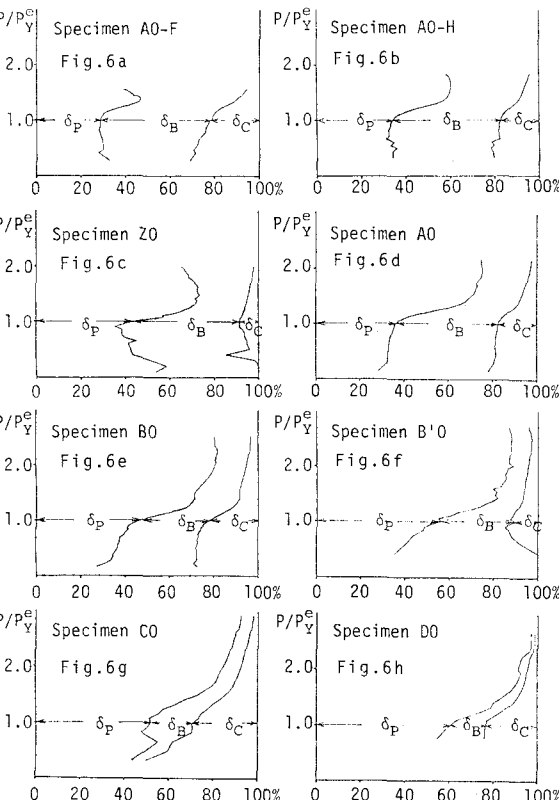
柱はり接合部において各部分材の変形の全体変形に対する比率を求めたものを部分架構試験体について Fig. 6a~h に、骨組モデル試験体について Fig. 7a, b に示す。図中の記号 δ_P , δ_B および δ_C は夫々パネルの変形、はりの変形および柱の変形による成分を表す。弾性域においては各成分の比率はほぼ一定値を示しており、パネルゾーンの降伏 (P/P_Y^e) によりパネル変形 δ_P の占める比率が増大し、パネルのせん断変形が γ_{st}^c をこえるとはほぼ δ_P の占める比率は一定となる傾向にある。また全体的に見て R_{PY} の値が小さい試験体の方が δ_P の占める比率が大きい。そこでパネル変形の比率 δ_P/δ と R_{PY} の関係を弾性域についてプロットしたものを Fig. 8a に、パネル変形が γ_{st}^c 時についてプロットしたものを Fig. 8b に示す。弾性域では変形量が小さいため測定精度の悪い試験体がありこれを除くとほぼ両回とも直線的に分布している。そこで以下の回帰直線を求め図中に点線で示す。

$$\begin{aligned}
 \delta_P/\delta &= 0.593 - 0.261R_{PY} \quad (\text{弾性時}) \\
 \delta_P/\delta &= 1.016 - 0.423R_{PY} \quad (\gamma_{st}^c \text{時}) \quad \text{---(2)}
 \end{aligned}$$

図よりパネル変形が γ_{st}^c になる時の δ_P/δ の値はほぼ上に示す式により求めることが可能であると思われる。

5. 柱はり接合部のエネルギー吸収能力

部分架構試験体におけるエネルギー吸収量を各部分材の分担量があるように分離して Fig. 9a ~ m に示す。縦軸は塑性率 1 の完全弾塑性復元力の吸収エネルギー (E_0) を用いて規準化し、横軸はその時の降伏変形量 (δ_Y^c) によって規準化した。降伏荷重 P_Y^e および降伏変形 δ_Y^c は柱は



り部材の耐力で決まるものとした。これは弱パネルタイプの試験体が強いことと同一形状試験体においてパネルゾーン補強の効果を比較することを目的としたためである。Tab.7に各試験体の最大変形時のエネルギー吸収量および各部材の分担率を、Fig.10にエネルギー吸収量規準値と R_{PY} との関係を示す。弱パネルタイプの試験体が強いため、全体的にパネルゾーンの変形による吸収エネルギーの比率が高いが、強パネルタイプのA0-F、A1-L試験体においてもパネルゾーンの変形がエネルギー吸収に寄与する割合が1/3以上となっている。またFig.10に示した点線は標準タイプの十字形およびト字形の試験体の結果を直線近似したもので、ほぼこの直線上に分布している。 R_{PY} の値が大きくなるにつれてエネルギー吸収量も大きくなっていることがわかる。またLタイプ試験体および柱に軸力を加えた試験体のエネルギー吸収量は標準タイプに比べて0.34~0.71と小さい。またはり材端接合の強度又は変形能力(すかい溶接々合、混用接合で何れも耐力が低かった)が不足していたB0-(F)(c), B1-M, B1-M'試験体は特に小さい値を示す。次にパネルゾーンダブラプレート補強の効果を比較してみる。Aタイプの試験体においては補強量が大きいほど(A0→A0-H→A0-Fの順に)エネルギー吸収量が小さくなり、補強の効果はない。Cタイプの試験体ではCO-Hの場合補強は有効であるがCO-Fの場合は R_{PY} の値が並い Z_0 , B'1に比べて小さく、CO-Hとほぼ等しい値を示しており補強はさほど有効ではない。これらの試験体の結果がみるとパネル補強の効果は $R_{PY}=0.30$ の場合は補強の効果認められるが $R_{PY}=0.65$ の場合にはパネル補強はむしろエネルギー吸収という面でマイナスとなっている。

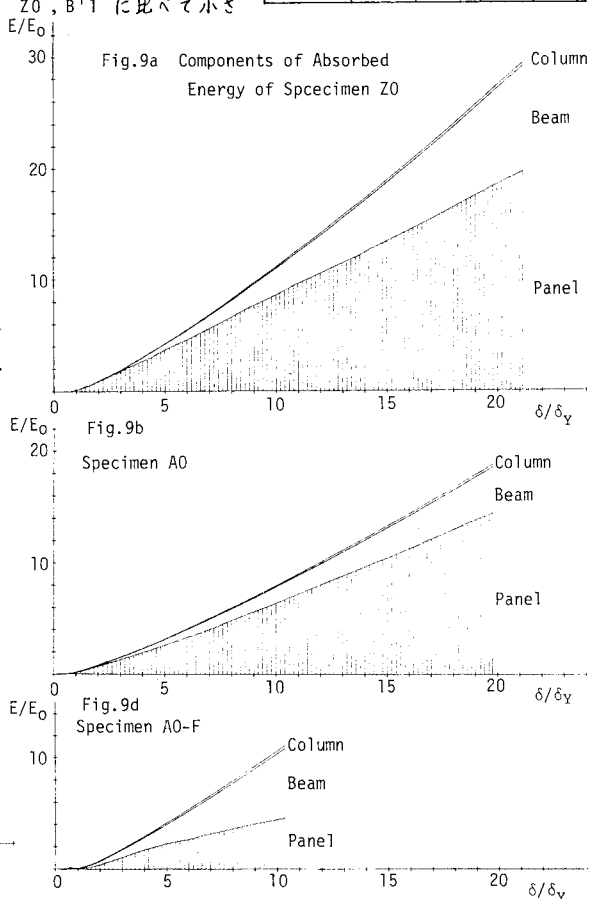
骨組モデル試験体のエネルギー吸収量をパネルゾーンと柱はり材の分担率を分離し、部分架構試験体と同様に規準化してFig.11a~fに示す。またTab.8に各試験体の最大変形時におけるエネルギー吸収量および各部材の分担率を示す。骨組モデルにおいても部分架構試験体の実験結果と同様にパネルゾーンの変形による吸収エネルギーの比率が高く、また強パネルタイプ試験体のF-1BH(c)試験体においてはパネルゾーンの変形による吸収エネルギーの比率

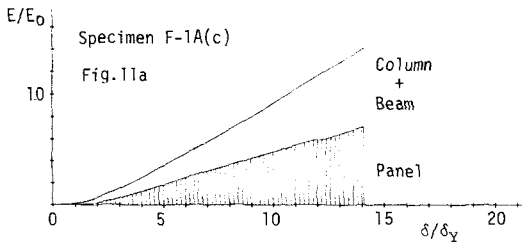
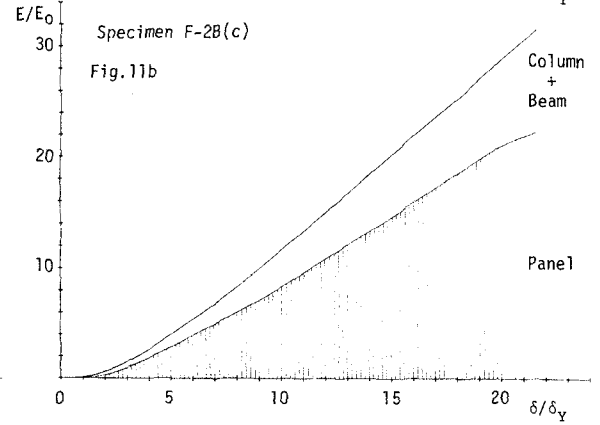
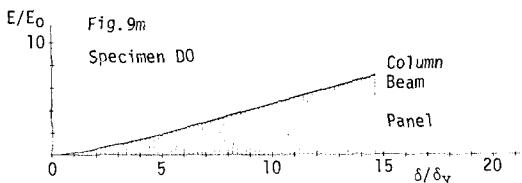
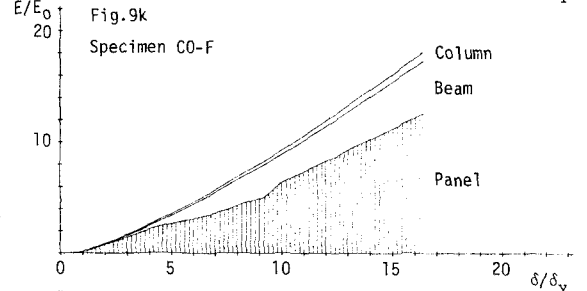
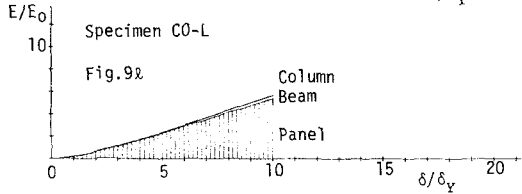
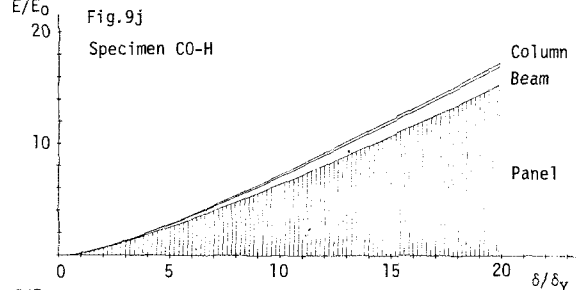
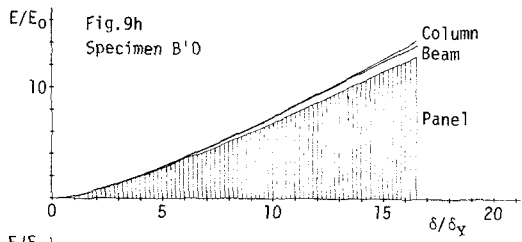
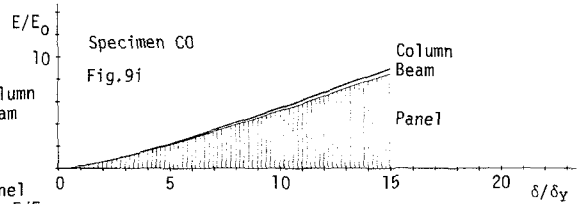
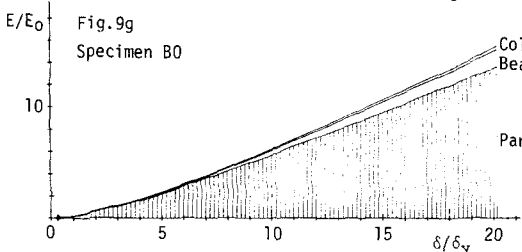
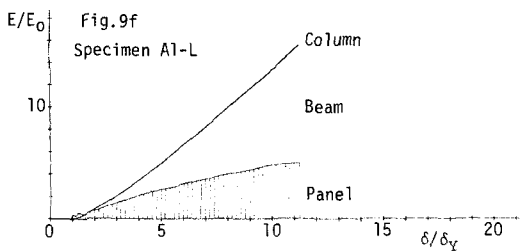
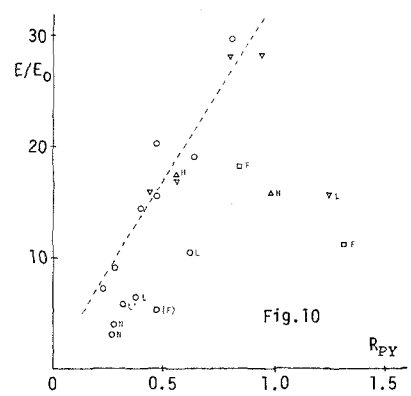
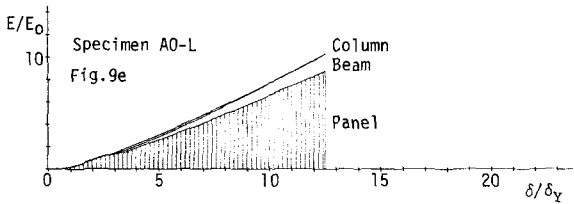
Tab.7 Absorbed Energy (t·cm)

Specimen	E_0	E (max)	E/E_0 (max)	E_p/E (max)
Z0	22.57	666.2	29.5	67.0
A0	32.10	605.2	18.9	77.2
A0-H	28.05	438.1	15.6	61.2
A0-F	26.15	289.7	11.1	41.1
A0-L	34.28	355.5	10.4	84.9
A1-L	27.07	422.1	15.6	31.9
B0	64.37	992.5	15.4	88.5
B0-SS(c)	50.69	1021.0	20.1	97.8
B0-(F)(c)	50.69	265.5	5.2	95.9
B1	42.71	1244.0	29.1	65.7
B1-M	42.71	153.1	3.6	69.1
B1-M'	42.71	167.0	3.9	43.1
B'0	35.62	509.3	14.3	89.7
B'1	24.01	671.8	28.0	70.0
C0	50.52	454.7	9.0	94.6
CO-H	38.26	663.3	17.3	88.8
CO-F	34.17	617.8	18.1	69.7
CO-L	49.95	286.7	5.7	94.6
CO-L'	45.57	292.5	6.4	96.5
CO-N	47.40	144.5	3.1	97.6
C1	32.96	553.6	16.8	78.1
D0	25.71	184.1	7.2	99.1
D0-N	16.96	66.9	3.9	100.0
D1	17.87	282.6	15.8	96.1

Tab.8 Absorbed Energy (t·cm)

Specimen	E_0	E (max)	E/E_0 (max)	E_p/E (max)
F-1A(c)	11.73	165.5	14.1	50.4
F-2B(c)	17.74	560.7	31.6	70.6
F-1BH(c)	21.85	294.2	13.5	25.9
F-1B(c)	27.23	453.0	16.6	96.3
F-1B	27.23	>312.8	>11.5	85.6
F-1B1(c)	22.58	414.2	18.3	68.2
F-1B1'(c)	10.85	305.8	28.2	70.8





が約 1/4 となっており、骨組モデルの強パネルタイプにおいてパネルゾーンがエネルギー吸収に寄与していることが確認された。次にパネルゾーンにダブルプレート補強した F-1BH(c) 試験体と無補強試験体 F-1B(c) ($R_{PY} = 0.46, 0.52$) とを比較するとパネル補強によりエネルギー吸収能力が低下する例があることが骨組モデルにおいても確認された。

6. まとめ

鋼構造骨組の耐震設計に関して、柱はり接合部がどのような寄与を行うことができるかという点について、H 形鋼強軸交形柱はり接合部に関する実験結果の解析により次のような点が明らかとなった。

(i) パネルゾーンの復元力特性については文献⁹⁾

の提案式が全般的傾向を良く表わすが、最大耐力については(1)式により精度の高い推定値が E/E_0 得られる。

(ii) 骨組変形に占める柱はり接合部変形による成分の比率は、塑性域において約 1/3 以上でありパネル降伏比 R_{PY} の値が小さいほど大きくなる。

(iii) 骨組の吸収エネルギーに占める柱はり接合部変形による成分の比率は強パネルタイプでも 1/4 以上であり、弱パネルタイプでは 2/3 程度となる。

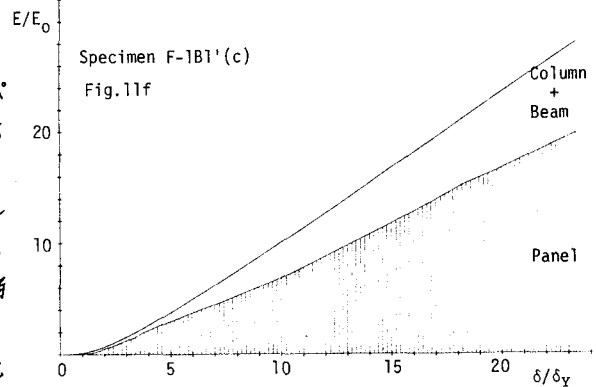
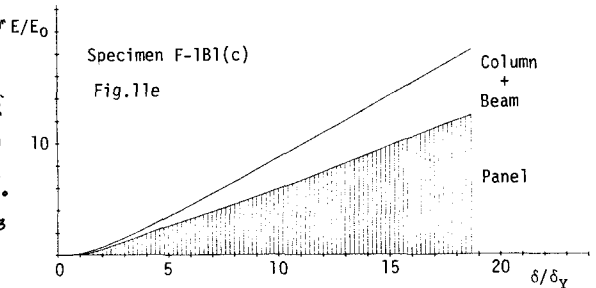
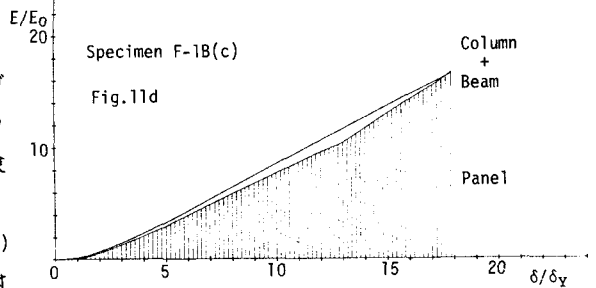
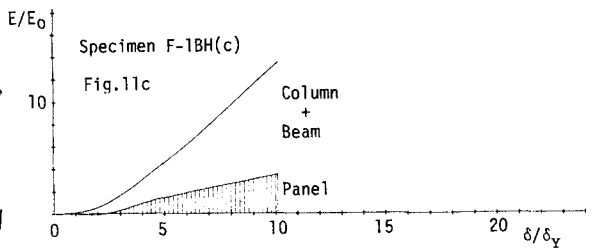
(iv) エネルギー吸収能力という面から見ると、パネルのダブルプレート補強がマイナスとなる場合がある。

(v) 柱はり接合部の変形により吸収できるエネルギー量は大きく、これは最大級の地震に対する倒壊を防止する設計に活用できる。この場合弱パネルタイプ⁶⁾の柱はり接合部が推定されるが、実用上のパネル降伏比 R_{PY} の下限を 0.4 程度とするのがよい。

(引用文献)

- 1) 加藤 勉、秋山 宏 「地震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷」日本建築学会論文報告集 235, 1975.
- 2) 中尾 雅躬 「鋼構造柱はり剛接合部に関する研究」東京大学工学博士論文 1975, 12.
- 3) 仲威雄、他 「H 形鋼強軸交形柱はり接合部の復元力特性に関する実験-その1, その2, その3」日本建築学会大会 1978, 9.
- 4) 仲威雄、他 「H 形鋼強軸交形柱はり接合部の復元力特性に関する実験-その4」日本建築学会大会 1979, 9.
- 5) 仲威雄、他 「H 形鋼強軸交形柱はり接合部の復元力特性に関する実験-その5」日本建築学会大会 1980, 9.
- 6) 仲威雄、他 「鋼構造ラーメンの復元力特性に関する研究-その1, その2」日本建築学会大会 1979, 9.
- 7) 仲威雄、他 「鋼構造ラーメンの復元力特性に関する研究-その3」日本建築学会大会 1980, 9.
- 8) 仲威雄、他 「鋼構造柱はり接合部と柱はり材端の塑性域における相互影響-その1」日本建築学会大会 1980, 9.
- 9) 加藤 勉、中尾 雅躬 「H 形鋼強軸交形パネルゾーンの復元力特性評価法の一提案」日本建築学会大会 1976, 10.

*1 東京大学名誉教授・工博 *2 東京電機大学助教授・工博 *3 東京電機大学助手



CONTRIBUTION OF THE RESTORING FORCE CHARACTERISTICS
OF STEEL BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS
TO THE ASEISMIC BEHAVIOR OF FRAME

Takeo NAKA* , Masami NAKAO** , Hiroshi OSANO***

1.Introduction

Recent philosophy on the seismic design of structures is characterized by the combination of the following dual criteria;

- 1.The frame should be proportioned to remain within the elastic limit under a strong earthquake which reasonably expected during the service life.
- 2.The frame should be proportioned to avoid collapse under the most severe earthquake which possibly could occur.

As the behavior of steel beam-to-column connection(panel-zone) is considered to be a great help to the design under the latter criterion,the contribution of the behavior of panel-zone on the aseismic behavior of frame is investigated through the analyses of test data on the beam-to-column connections composed of H-shapes subjected to strong axis bending and is reported herein.

2.Outline of experiments

Experiments of which the data are analysed are of the following two series;

- 1.Experiment on 24 specimens of frame subassemblages listed on Tab.1 of which configurations and loadings are shown in Fig.1.
- 2.Experiment on 8 specimens of frame model of reduced size listed on Tab.4 of which configurations and loadings are shown in Fig.3.

3.Restoring force characteristics of panel-zone

Because of the phenomenon of "reinforcement of panel by the ends of beams and columns",the ultimate strength of panel-zone is usually far larger than the yield strength of this part for weak-panel type. A method for evaluation of the restoring force characteristics of panel-zone among elastic and plastic range was proposed in ref.9) through the consideration of this phenomenon. This method can be revised on the estimation of ultimate strength by making use of Eq.(1).

4.Deformation share of panel-zone

Contribution of the deformation of panel-zone on the deformation of overall frame is large as shown in Fig.6 and Fig.7. Deformation share of panel-zone can be estimated by Eq.(2). Panel-zone can bear more than 1/3 of the deformation of overall frame even when the case of strong-panel type.

5.Energy absorption

Absorbed energy and contribution of panel-zone in it are shown in Fig.9 and Fig.11 for each specimen. Contribution of panel-zone in energy absorption is more than 1/3 usually.

6.Conclusion

Contribution of the behavior of panel-zone on the aseismic behavior of frame is remarkable concerning to deformation capacity or energy absorption capacity. Application of weak-panel type is recommended to utilize this peculiarity,where lower bound of "panel- yield ratio" R_{PY} (ratio of panel-zone yield strength to the lower one between column yield strength or beam yield strength) available is 0.4.

* Professor emeritus,Dr.Eng.,University of Tokyo.

** Associate professor,Dr.Eng.,Tokyo Denki University.

*** Assistant,Tokyo Denki University.