

論文 柱貫通型・柱 RC-梁 S 造ト形接合部の強度と変形能に関する 実験的研究

澁川正四郎*1・市川昌和*2・細萱武*3・森本仁*2

要旨：本研究は、混合構造として新たに提案した構造システムにおける柱貫通型・柱 RC-梁 S 造ト形接合部の構造性能を把握することを目的として、載荷実験を行い検討したものである。接合部は、開口を開けた中板、三角スチフナ、FBP およびふさぎ板によって構成されている。実験因子は、接合部への入力せん断力と中板の形状および二方向載荷による影響である。試験体はすべて梁降伏型となり、良い構造性能を示した。また、接合部への入力せん断力が、既往の設計耐力式による算定値を上回ることを確認した。なお、中板分離の接合部にこの設計耐力式を適用する場合、検討の余地があることがわかった。

キーワード：混合構造、柱貫通型、ト形柱梁接合部、中板、ふさぎ板

1. はじめに

近年、建設業界の多様なニーズに対応するために合理的な構法の開発が急務となっている。このような背景から、柱を鉄筋コンクリート、梁を鉄骨造で構成される混合構造の研究が盛んに行われており、様々に工夫された柱梁接合部に関する実験結果が多数報告されている [1]。

本研究では、図-1 に示すような接合部のディテールを有する混合構造を提案し、その構造性能を把握することを目的として載荷実験を行った。この接合部は、コンクリートの充填性を考慮して開口を開けた鉄骨ウェブ（以下、中板）、FBP (Face Bearing Plate)、ふさぎ板および三角スチフナによって構成され、S 梁が RC 柱を貫通しない柱貫通型である。筆者らは、既に文献 [2] で中柱の十字形接合部に関して検討を行っており、本論文は、隅柱を想定した二方向載荷を含め、外柱を対象としたト形接合部について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表-1 に、配筋図を図-2 に、中板の形状を変えた EJ2 と EJ3 の接合部鉄骨詳細図を図-3 に示す。試験体は、階高、スパン、柱断面が共通で、縮尺 1/2.5 の 4 体である。接合部は、 $0.25D_c$ (D_c は、柱成) の開口を開けた中板、三角スチフナ、FBP およびふさぎ板で構成されている EJ2 の形状を基本としている。実験因子は、接合部への入力せん断力 (EJ1、EJ2)、中板の形状 (EJ2、EJ3)、二方向載荷による影響 (EJ2、EJ4) である。EJ1 は、接合部への入力せん断力が実状の設計断面とほぼ同程度となるように S 梁の板厚を小さくしている。EJ3 は中板が分離した試験体であり、EJ4 は二方向載荷の試験体である。表-2 に使用したコンクリート、鉄筋および鋼材の試験

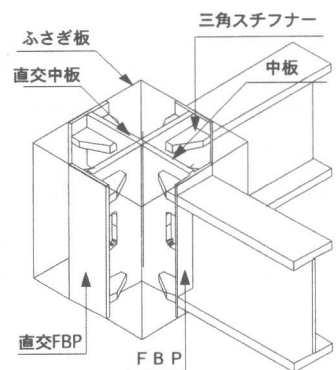


図-1 接合部ディテール

*1 日産建設 (株) 技術研究所、工修 (正会員)

*2 鉄建建設 (株) 技術研究所 (正会員)

*3 日産建設 (株) 技術本部

表-1 試験体諸元

試験体名	EJ1	EJ2	EJ3	EJ4
実験因子	接合部への入力せん断力の影響		中板分離の影響	二方向載荷の影響
接合部	中板	PL-12	PL-19	
	中板開口	0.25Dc		中板分離 0.25Dc
	三角スリット	PL-12	PL-19	
	ふさぎ板	PL-2.3		
	FBP	PL-9	PL-16	
S梁	直交材	PL-9		PL-19
	断面	BH-300×120×6×12	BH-300×120×9×22	
RC柱	断面	Bc×Dc = 350mm×350mm		
	主筋	12-D19 (SD345)		
	帯筋	4-D6 (SD690)		
	軸力	0.1・Bc・Dc・σ _B		

表-2 使用材料試験結果

鉄筋・鋼材	降伏応力 (Mpa)	引張強度 (Mpa)	ヤング係数 (Gpa)
D19	347	496	184
D6	807	903	198
PL-2.2	365	525	210
PL-19	367	532	210
PL-16	420	566	212
PL-12	360	519	207
PL-9	383	539	210
PL-6	438	568	211
PL-2.3	352	409	208
試験体名 (コンクリート)	圧縮強度 (Mpa)	割裂強度 (Mpa)	ヤング係数 (Gpa)
EJ1	34.0	2.54	23.1
EJ2	34.6	2.76	25.7
EJ3	34.5	2.77	27.0
EJ4	35.6	2.76	24.2

結果を示す。柱主筋にはSD 345のD 19を、帯筋にはSD 690のD 6を用いた。ふさぎ板にはSS 400を用い、その他の鋼材はSM 490 Aを用いた。

2.2 載荷方法および測定方法

載荷は、柱の反曲点位置をピン・ローラー支持し、柱に一定軸力 ($0.1 \cdot Bc \cdot Dc \cdot \sigma_B$) を作用させ、ジャッキにより梁の反曲点位置の変形を制御して実施した。

EJ1~3の載荷履歴は、層間変形角 $R = \pm 1/200$ を1回、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ を2回正負載荷した後、 $+1/15$ まで載荷した。また、EJ4は、層間変形角 $R = \pm 1/50$ まで載荷した後（以下、従軸方向：EJ4-1）、その直交方向（以下、主軸方向：EJ4-2）に他試験体と同様な載荷履歴で実験を行った。

変形の測定は、柱の反曲点位置でピン・ローラー支持された計測治具に設置した変位計で梁の反曲点位置の変形を測定した。接合部のせん断変形は、柱幅と梁幅が大きく異なるため、図-4に示す中板を含む梁幅内部分（内部パネル）と梁幅外のコンクリートの部分（外部パネル）では、異なった変形を示す。したがって、内部パネルのせん断変形は、載荷方向の梁ウェブとFBPに溶接した板に設置したボルトを用いて測定し、外部パネルのせん断変形は、ふさぎ板に開けた穴からコンクリート中に埋設したボルトを用いて測定した。また、主な主筋、帯筋、中板、ふさぎ板、FBPなどの鋼板の歪を測定した。

3. 実験結果

3.1 実験経過

図-5にEJ2とEJ3のふさぎ板を剥がした状態での最終ひび割れ図を、表-3に実験結果一覧を示す。

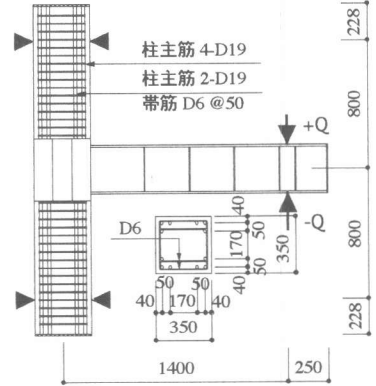


図-2 試験体配筋図

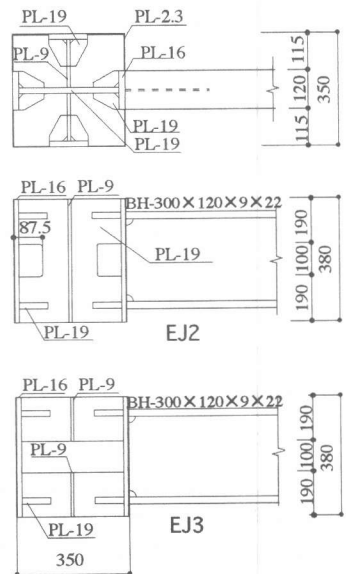


図-3 鉄骨詳細図

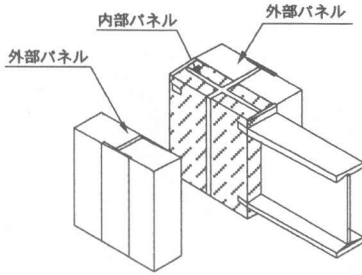


図-4 接合部構成要素

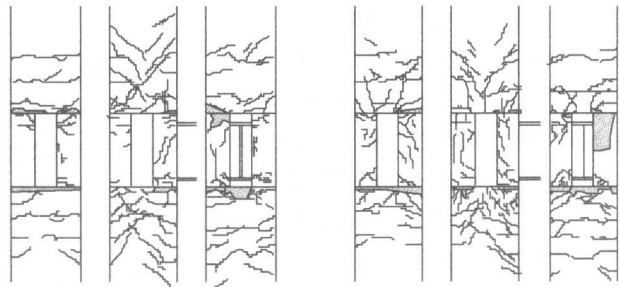


図-5 最終ひび割れ図

ひび割れの発生順序は全試験体とも概ね同様で、層間変形角 $R=1/200$ までにふさぎ板と柱の境界に曲げひび割れが、 $R=1/100$ までにFBP端近傍に斜めひび割れと柱せん断ひび割れが観察された。荷が進むにつれてふさぎ板と柱の境界部分でコンクリートの圧壊が始まって剥離し、引張側フランジのFBPがはらみだして柱面との間に隙間が生じた。ふさぎ板を取って観察すると、接合部内にはFBPのはらみだしに伴うと思われるひび割れが生じていた。中板が分離しているEJ3は、同じS梁のEJ2と比べると、柱部分と接合部内のひび割れがやや多かった。なお、EJ1は梁降伏型の試験体の

表-3 実験結果一覧

試験体名	梁フランジ降伏		三角スチフナ引張降伏		中板中央部降伏		柱主筋引張降伏	
	eQ (kN)	R (rad.)	eQ (kN)	R (rad.)	eQ (kN)	R (rad.)	eQ (kN)	R (rad.)
EJ1	+61.7	+1/296	+168.6	+1/29	+157.8	+1/40	未降伏	
	-67.6	-1/276	-160.7	-1/39	-146.0	-1/63	未降伏	
EJ2	+167.7	+1/128	+215.6	+1/70	+216.6	+1/40	未降伏	
	-65.6	-1/444	-213.6	-1/82	-221.5	-1/63	-226.4	-1/66
EJ3	+139.2	+1/144	+233.2	+1/43	—	—	未降伏	
	-100.0	-1/235	-227.4	-1/56	—	—	-228.3	-1/47
EJ4-1	+160.7	+1/148	+233.2	+1/66	+250.9	+1/52	未降伏	
	-163.7	-1/157	-227.4	-1/68	-227.4	-1/68	未降伏	
EJ4-2	+113.7	+1/186	+221.5	+1/66	+248.9	+1/47	+276.4	+1/28
	-164.6	-1/127	-212.7	-1/68	-202.9	-1/95	-191.1	-1/84
	最大耐力時					梁全塑性時		
試験体名	eQmax (kN)	Rmax (rad.)	Vj (kN)	eτmax (MPa)	eτmax σ _R	cQp (kN)	eQmax cQp	cτp σ _R
EJ1	+182.4	+1/15	+733	+8.9	0.26	139.3	1.31	0.20
	-172.6	-1/25	-693	-8.4	0.25		1.24	
EJ2	+292.2	+1/15	+1227	+14.9	0.43	227.5	1.28	0.34
	-274.6	-1/25	-1153	-14.0	0.41		1.21	
EJ3	+277.5	+1/15	+1165	+14.2	0.41	227.5	1.22	0.34
	-256.9	-1/25	-1079	-13.1	0.38		1.13	
EJ4-1	+251.1	+1/50	+1054	+12.8	0.36	227.5	1.1	0.33
	-246.1	-1/50	-1033	-12.6	0.35		1.08	
EJ4-2	+300.1	+1/15	+1259	+15.3	0.43	227.5	1.32	0.33
	-281.5	-1/25	-1182	-14.4	0.40		1.24	

注)・eは実験値を、cは計算値を、eQは層せん断力を、Rは層間変形角を示す。
 ・ $V_j = eQ_{max} (1-u-v) / v$ ここに、L:スパン、H:階高、Dc:柱せい
 ・ $e\tau_{max} = V_j / (b_j \cdot Dc)$ u:柱外側主筋間距離とスパンの比
 ・ $cQ_p = (M_p \cdot L) / (H \cdot (L - Dc))$ v:梁フランジ間距離 (βB) と階高の比
 ・ $c\tau_p = (M_p / \beta B - cQ_p) / (b_j \cdot Dc)$ b_j:0.5 (柱幅+梁幅)、M_p:全塑性モーメント

ため、ひび割れは非常に軽微で、柱せん断ひび割れは $R=1/50$ の荷で発生した。

鋼材の降伏状況についてみると梁フランジは $R=1/127$ までに、中板切欠部の上下の鋼材は $R=1/100$ までに引張降伏している。中板中央部、三角スチフナは $R=1/33$ までに降伏したが、ふさぎ板はせん断降伏しなかった。柱主筋は $R=1/25$ までに、EJ1以外のすべての試験体で引張降伏した。

3.2 層せん断力 (Qc) - 層間変形 (δc) 関係

図-6にEJ1とEJ2のQc-δc関係を梁全塑性時の計算値とともに示し、図-7に全試験体のQc-δc関係の包絡線を、図-8に各サイクルの負側荷時の等価減衰定数 h_{eq}の比較を示す。

全試験体とも梁崩壊型で $R=1/15$ まで耐力低下のない安定した紡錘形の履歴ループを示した。まず、梁降伏を想定したEJ1に着目すると、ほぼ完全な紡錘形となり等価減衰定数をみても高いエネルギー吸収性能を持っていることが分かる。これより、このディテールにおいては梁降伏を先行させることにより、S造的な靱性を有する構造として設計できることが確認できた。

次に、EJ2~EJ4のQc-δc関係については、EJ1より入力せん断力が大きくなっているため、

やや逆S字形の傾向とはなるが、良好な履歴ループを示している。中板が分離しているEJ3は、最大耐力、等価減衰定数とも他の試験体に比べ多少小さくはなるが、ほぼ同程度の値となっている。また、二方向载荷における主軸方向のEJ4-2は一方向载荷のEJ2と比較して、一度履歴を経験したR=1/50までは僅かながら低い傾向を示すものの、以後は、ほぼ同様の性状を示しており、二方向载荷が最大耐力、等価減衰定数に及ぼす影響は少ないと考えられる。

3.3 接合部せん断変形

図-9にEJ2とEJ3の接合部内部パネルのせん断変形角 γ_w 、外部パネルのせん断変形角 γ_f の比較を示す。内部パネルは紡錘形、外部パネルは逆S字形の傾向となり、内部パネルのエネルギー吸収量が大きいことを示している。EJ3の内部パネルせん断変形角 γ_w が大きくなっているのは、中板が分離しているための影響と考えられる。

3.4 鋼材の主応力

中板 (R=1/100) とふさぎ板・FBP (R=1/50) の1回目正側载荷時の主応力を図-10に示す。ここで、降伏条件は、Von Misesの降伏条件を用いた。中板上部の主応力の方向は水平に、中央部はほぼ45度となっている。また、中板上部の梁加力側は層間変形角R=1/100前後で降伏に達している。これは、梁フランジの引張力によって、中板が引張降伏したためと思われる。ふさぎ板・FBPの中央列(E~M点)の主応力は、中板に比べ小さく降伏に達していない。ふさぎ板の主応力の向きは、ハの字型になっており、中板とは異なっている。

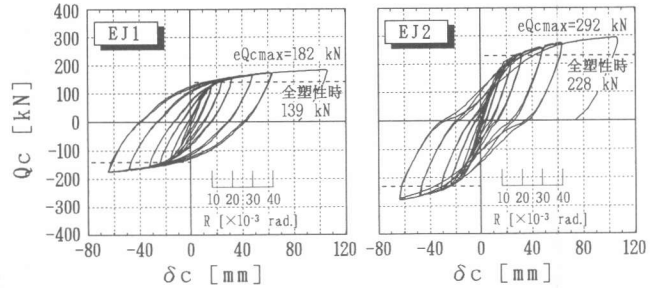


図-6 層せん断力-層間変形 (Qc - δc)

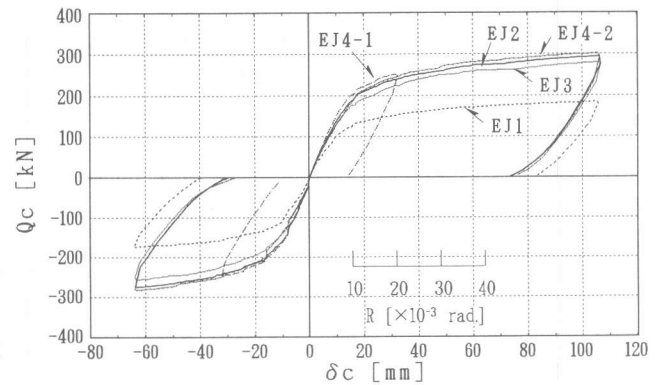


図-7 Qc - δc 関係の包絡線

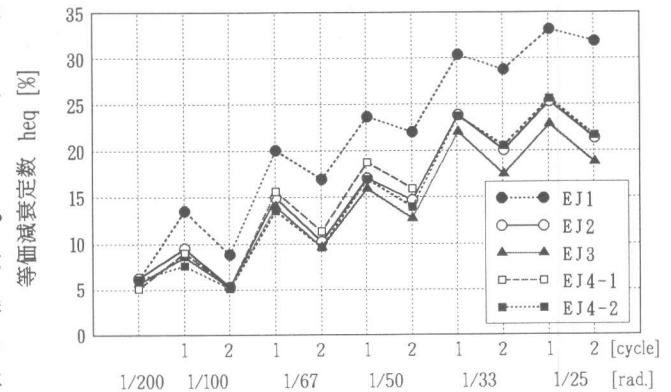


図-8 等価粘性減衰定数 heq の比較

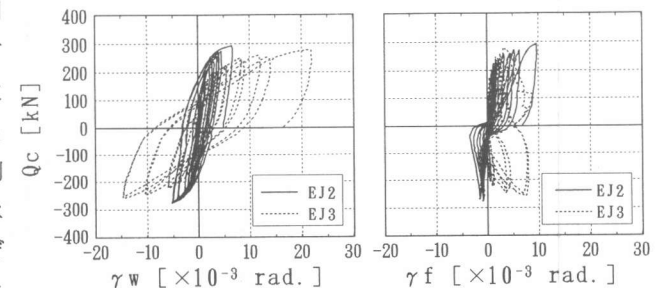


図-9 せん断変形の比較

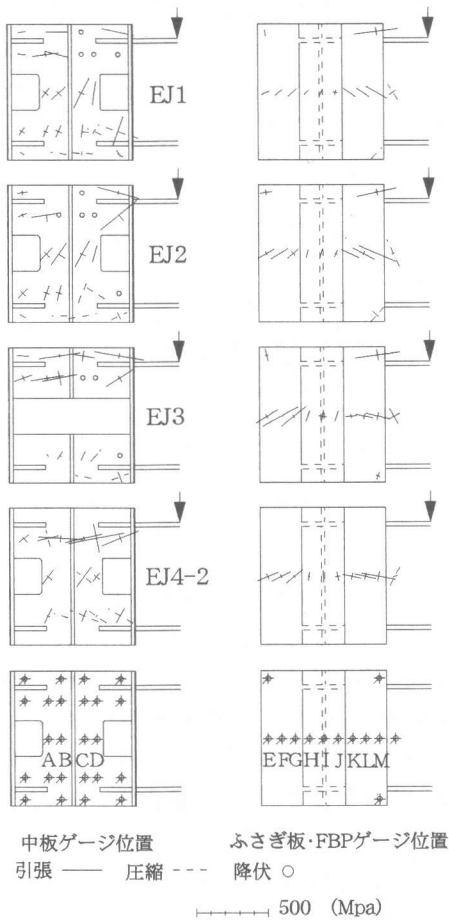


図-10 中板とふさぎ板・FBPの主応力

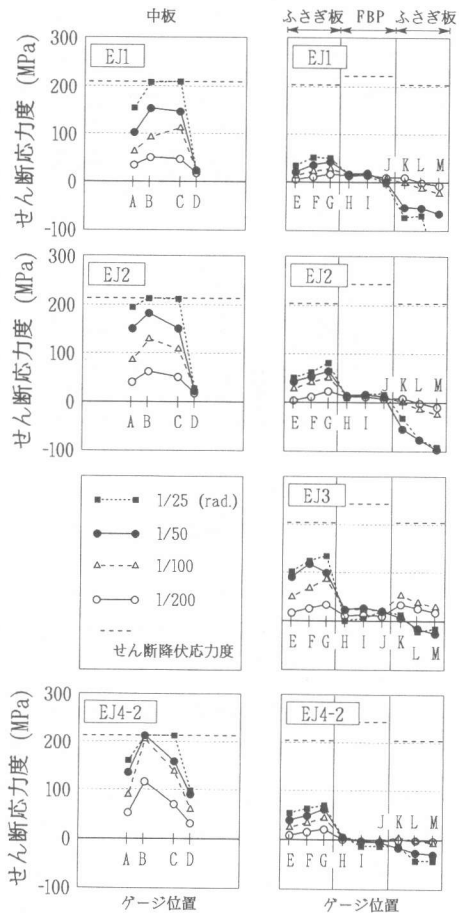


図-11 中板とふさぎ板・FBPのせん断応力度分布

3.5 鋼材のせん断応力度

図-11に中板とふさぎ板・FBPの各層間変形角ごとの第1サイクル目正側載荷時のせん断応力度分布を示す。ここで、せん断応力度は、せん断降伏 ($\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$) 以降が一定となるバイリニアを仮定して求めた。各試験体とも変形の進展にともない、せん断応力度が大きくなっている。中板の中央部 (B, C点) は $R=1/33$ 程度でせん断降伏したが、両端部 (A, D点) はせん断降伏していない。全般的に中央部が大きなパラボラ状の分布を示したが、両端部を比較すると、A点は増加しているがD点はほぼ一定値となっている。本実験において、中板のせん断応力度分布をみる限り、各試験体で明確な差がみられなかった。また、EJ2とEJ4-2を比較しても、EJ4-2のD点の応力度がやや大きくなっているが、二方向載荷の影響は明確にみられなかった。

ふさぎ板・FBPは、いずれの試験体もせん断降伏していない。ふさぎ板は変形の進展にともないせん断応力度が増加し、FBPをはさんで逆対称形の分布を示し、FBPは変形量に関係なくほぼ一定値となっている。また、中板が繋がっている試験体 (EJ1, EJ2, EJ4) と中板が分離したEJ3のせん断応力度を比較すると、EJ3の方がやや大きな値を示している。

3.6 接合部入力せん断力に対する各部負担力の比較

図-12に接合部への入力せん断力に対するコンクリートと中板の負担力の推移について示す。実

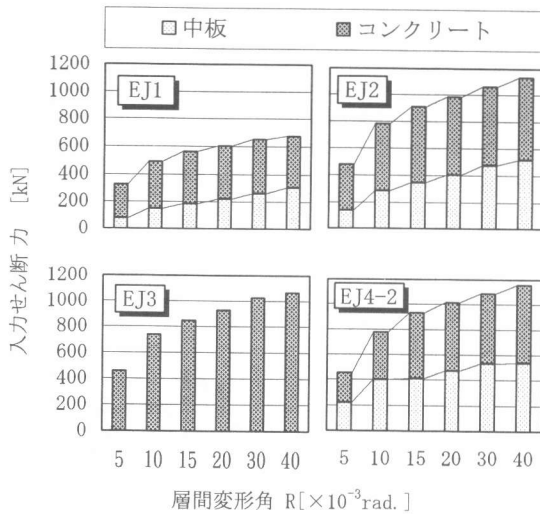


図-12 負担せん断力の推移

表-4 実験値とせん断耐力値の比較

試験体	SRC式		JCI式	
	V_j [kN]	$V1$ [kN]	$V_j/V1$	$V2$ [kN]
EJ1	733 (560)	807	0.91 (0.69)	838 (0.67)
EJ2	1228 (956)	1083	1.13 (0.88)	1073 (0.89)
EJ3	1166 (956)	284	4.11 (3.37)	406 (2.06)
EJ4-2	1260 (956)	1086	1.16 (0.88)	1085 (0.88)

ここで、()内は梁全塑性時の算定値

$$V_j = eQ_{max} \cdot (1-u-v) / v$$

$$V1 = (jF_s \cdot j\delta) \cdot Ac1 + 1.2 \cdot (wcy / \sqrt{3}) \cdot Aw$$

$$V2 = K2 \cdot j\gamma \cdot \sigma_b \cdot Ac2 + (wcy / \sqrt{3}) \cdot Aw$$

$$j\delta: \text{ト形}=2 \quad Ac1: \text{柱主筋間距離} \times Bc/2$$

$$Aw: Bweb \times tweb \quad K2: \text{拘束型}=1.07$$

$$j\gamma: \text{ト形}=0.18 \quad Ac2: Dc \times Bc/2$$

験値は、各層間変形角ごとの正側載荷第1サイクル目とし、中板の負担力はせん断応力度より求め、コンクリートの負担力は入力せん断力と中板の負担力の差とした。またふさぎ板・FBPはせん断降伏しておらず、せん断応力度分布も逆対称となっているため負担力を0とし、中板分離型は中板の負担力を0とした。中板が繋がっている試験体では入力量の大小はあるが、明確な差はみられない。

表-4に実験値の接合部への最大入力せん断力と既往の接合部せん断耐力式 (SRC式とJCI式)との比較を示す [3] [4]。いずれも梁曲げ降伏型を想定した試験体であるが、接合部への入力量の大きなEJ2~EJ4において、接合部せん断耐力式の算定値以上の耐力を確認した。また、接合部入力せん断力を実状の設計レベルと想定したEJ1については、耐力式の約90%程度の入力に対し、復元力特性にこの接合部の影響はほとんど現れていないことが明らかとなった。なお、EJ3は中板のせん断負担力を0としているため、算定値が実験値よりもかなり小さくなっている。今後、本ディテールに対応した柱梁接合部のせん断耐力式の検討を進める予定である。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) EJ1の復元力特性は非常に安定した紡錘形を示した。また、入力せん断量が大きなEJ2~EJ4はEJ1に比べるとやや逆S字形となる傾向を示したが、安定した履歴ループとなった。
- 2) 梁曲げ降伏型を想定したが、実験値は接合部せん断耐力式の算定値を十分上回った。
- 3) 中板分離型の接合部において、復元力特性は他の試験体と同等の性状を示し、接合部の入力せん断力も他の試験体と同等の耐力を示した。しかし、既往の接合部せん断耐力式の算定値とは対応が悪く、今後検討の必要がある。
- 4) 二方向載荷の影響を検討した結果、本接合部において二方向載荷の影響がないことを確認した。

【謝辞】 本研究にあたって、ご指導していただいた東京理科大学の松崎育弘教授に深く感謝いたします。

【参考文献】

- [1] 日本建築学会 柱RC梁Sとする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム 1994.12
- [2] 細萱 森本他 柱貫通形・RCS造十字型柱・梁接合部の実験的研究 (その1~3)、建築学会大会、1996.9 pp.1061
- [3] 日本建築学会 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1987 pp.18~26
- [4] 日本コンクリート工学協会 混合構造研究委員会報告書 1991.12 pp.224~226