

論文 柱貫通型・柱 RC-梁 S 造接合部の強度と変形能に関する研究

古川 淳*1・中出 睦*2・森本 仁*3・松崎育弘*4

要旨：本研究では、中板に開口を設けた柱貫通型の柱 RC 梁 S の十字型柱・梁接合部について静的載荷実験を行い、接合部を構成する中板とふさぎ板が接合部強度および変形能に及ぼす影響について検討した。実験の結果、(1)中板に開口を設けても、接合部への平均せん断入力量を制限することで優れた変形能が得られる。(2)ふさぎ板を設けることで架構耐力は上昇し、また内外接合部パネルのせん断変形差を緩和させる。(3)接合部コンクリートの有効幅は、中板の開口が大きくなると拡がる傾向にある。

キーワード：柱貫通型・接合部せん断耐力・中板・ふさぎ板・FBP

1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以下：RC 造）の柱と鉄骨造（以下：S 造）の梁を組み合わせた混合構造（以下：RCS 造）の多くの研究は、異種部材の交わる接合部を対象とし、その耐荷機構の解明を目的としている。

筆者らは、柱貫通型の RCS 造接合部について接合部内鉄骨ウェブ（以下：中板）の開口の有無が接合部の構造性能に及ぼす影響に関して研究してきた[1]。本研究では、その研究成果を基に中板にせん断負担をさせることを意図して中板を一部繋げた仕口の十字型柱・梁接合部について静的漸増載荷実験を行い、中板、ふさぎ板およびフェースベアリングプレート（以下：FBP）が柱・梁接合部の強度や変形能に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

表-1 試験体諸元

試験体名		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
主な実験因子		接合部へのせん断入力量の影響			中板厚の影響	中板開口の影響	中板分離、中板形状の影響		ふさぎ板の影響		直交材の影響
接合部	中板	R-12	R-14	R-19	R-25	R-19	R19×140	R-28×95	R-19		
	中板開口	0.25Dc				0.40Dc	分離		0.25Dc		
	三角スリット	R-12	R-14	R-19							
	ふさぎ板	R-2.3							無し	R-6	R-2.3
	FBP	R-9	R-12	R-16							
S梁	断面	BH-300×120×6×12	BH-300×120×6×16	BH-300×120×9×22							
R梁	Bc×Dc	350mm×350mm									
C柱	主筋	12-D19(SD345)			12-D19(SD690)						
	帯筋	4-D6@50			4-D10@50						
σ_B (MPa)		34.0	33.2	33.6	33.6	33.8	28.8	28.8	34.3	34.3	35.2
$c \tau_p / \sigma_B$		0.43	0.50	0.68	0.68	0.67	0.79	0.79	0.66	0.66	0.65

σ_B ：コンクリート圧縮強度、 $c \tau_p$ ：接合部平均せん断応力度 $[(1-u-v)cQc/v]/(b_j \cdot Dc)$ 、 cQc ：梁全塑性時層せん断力(計算値)、

b_j ：有効幅 $[=0.5(\text{柱幅}+\text{梁幅})]$ 、 Dc ：柱幅、 u ：柱主筋間距離 / スパン、 v ：梁フランジ重心間距離 / 階高

*1 鉄建建設(株) 技術研究所 建築構造研究室、工修(正会員)

*2 日産建設(株) 技術研究所 第2研究室、工修

*3 鉄建建設(株) 技術研究所 所長、(正会員)

*4 東京理科大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

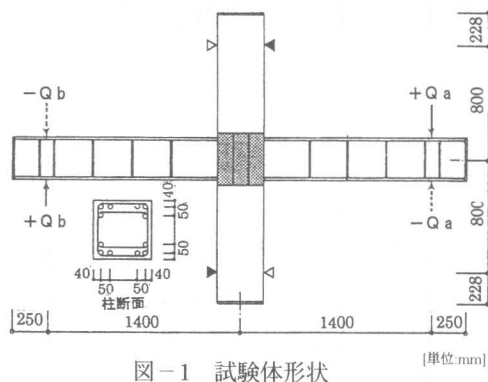


図-1 試験体形状

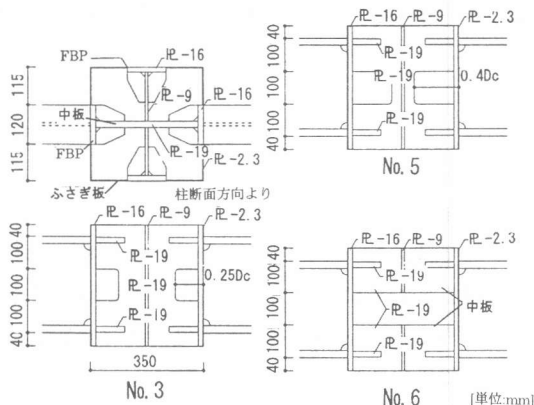


図-2 鉄骨詳細

2.1 試験体

表-1に試験体の諸元を、図-1に試験体の形状図を、図-2にNo.3、No.5およびNo.6の鉄骨詳細図を示す。試験体は縮尺1/2.5とした計10体であり、スパン、階高、柱断面寸法は各試験体とも共通としている。接合部の仕口は、三角スチフナ、FBP、開口のある中板およびふさぎ板で構成されている。

主な実験因子は、接合部への平均せん断入力量(No.1～No.3)、中板厚(No.4)、中板の開口の大きさ(No.5、No.6)、中板の形状(No.7)、ふさぎ板の有無(No.8)、ふさぎ板厚(No.9)および直交材の有無(No.10)とした。試験体の破壊形式は接合部への平均せん断入力量(計算値)とコンクリート圧縮強度の比により想定した。No.1は梁曲げ降伏型をNo.3～No.10は接合部せん断破壊型を想定した。No.3を基本試験体として、接合部せん断破壊型を想定した各試験体と比較した。No.4では中板厚をPL-25と厚くし、No.5では中板開口(0.4Dc)を大きくし、No.6は中板が分離した試験体である。No.7はNo.6と同様に中板が分離しほぼ同じ中板断面積であるが、中板形状を変えている。No.8はふさぎ板がなく、No.9では逆にPL-6と厚くしている。No.10では直交材の影響をみるため、直交方向の中板とFBPおよび三角スチフナをなくしている。なお、梁引張力に対する中板厚と三角スチフナの板厚については、文献[2]を参考にして定めている。

コンクリートは調合強度Fe270の普通コンクリートとし、主筋は、No.1とNo.2ではSD345のD19を、No.3～No.10ではSD690のD19を用い、帯筋にはせん断強度を十分に確保するためにSD690のD6とD10を用いた。鉄骨についてはPL-2.3とPL-6はSS400を、それ以外の鉄骨はSM490とした。コンクリートの試験結果を表-1に、鋼材の材料特性を表-2に示す。

2.2 荷重方法および計測方法

荷重は、柱の上下の反曲点位置を球座により拘束し、荷重フレームに取り付けた4900kNジャッキで柱に一定軸力(0.2BcDcσB)を作用させた状態で、梁の反曲点位置に取り付けた490kNジャッキで左右の梁の全体変形が同じになるように変形を制御して実験を行った。荷重履歴は、層間変形角 $R=\pm 1/200$ を1回、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ を各々2回繰り返した後、最後に押し切りを標準とした。変形の測定は、梁の変形、接合部のせん断変形等を変位計を用いて測定した。また、主な主筋、帯筋および鋼鈑の歪を歪ゲージにより測定した。

表-2 鋼材の材料特性

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	伸び量 (%)	材質
Fe-28	351	524	200	48.0	SM490
Fe-25	435	573	208	49.9	
Fe-22	351	546	205	46.2	
Fe-19	328	521	195	44.7	
Fe-16	347	521	193	41.0	
Fe-14	374	529	205	39.2	
Fe-12	393	554	203	37.7	
Fe-9	363	557	203	34.0	
Fe-6	446	552	199	32.3	
Fe-2.3	475	596	276	33.2	
D19	377	506	179	27.4	SD345
D19	717	963	193	18.1	SD690
D10	796	1002	194	14.7	
D6	709	912	178	9.0	

3. 実験結果

3.1 実験経過および破壊状況

図-3に、No.3、No.8、No.10について、ふさぎ板を切った状態の最終ひびわれ状況を示す。ふさぎ板と直交材がある試験体の場合、層間変形角 $R=1/200$ までにふさぎ板と柱の境界面に曲げひび割れが、 $R=1/67$ までに柱にせん断ひび割れが生じた。以降の載荷でふさぎ板と柱の境界面のひび割れが進展し、コンクリートの圧壊がみられた。ひび割れ状況について比較すると、せん断入力量による差異はみられなかった。

ふさぎ板がない No.8 では、 $R=1/100$ で接合部に直交 FBP を交叉するようにせん断ひび割れが生じ、 $R=1/67$ で載荷方向の FBP の上下の柱面に、FBP から伝達されたと考えられる支圧力により縦ひび割れが生じた。この縦ひび割れは他の試験体でもみられたが、特に No.8 で顕著に生じ、変形の進展にともない柱の被りコンクリートを局所的に剥離させた。大変形時($R=1/25$)では、FBP とコンクリートとの間に 1cm 以上隙間が生じた。一方、直交材がない No.10 では、 $R=1/33$ の繰返し時に、ふさぎ板が面外方向にふくらみ、耐力低下がみられた。実験終了後、ふさぎ板を切ってひび割れ状況を観察すると、PL-2.3のふさぎ板で拘束された No.3 では著しいひび割れが生じていなかったのに対し、直交材がなくふさぎ板が面外方向へふくらんだ No.10 ではせん断ひび割れが多数生じ、接合部のコンクリートの剥落も顕著にみられた。このことより、直交 FBP と溶接された PL-2.3 のふさぎ板でも接合部の拘束性が高いことがわかる。

3.2 $Q_c - \delta_c$ 関係の比較

図-4に各試験体の層せん断力と層間変形の関係（以下： $Q_c - \delta_c$ 関係）を示す。以下、 $Q_c - \delta_c$ 関係の比較する。

(1)接合部せん断入力量の影響：No.1 では梁全塑性時の計算値に対して実験値が上回り最後まで耐

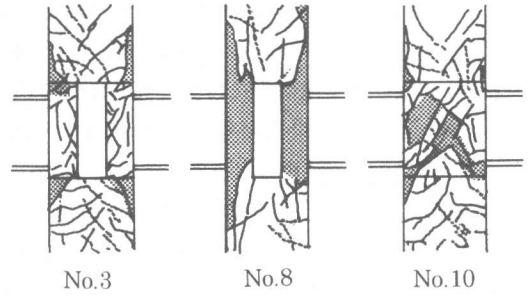


図-3 最終ひび割れ状況

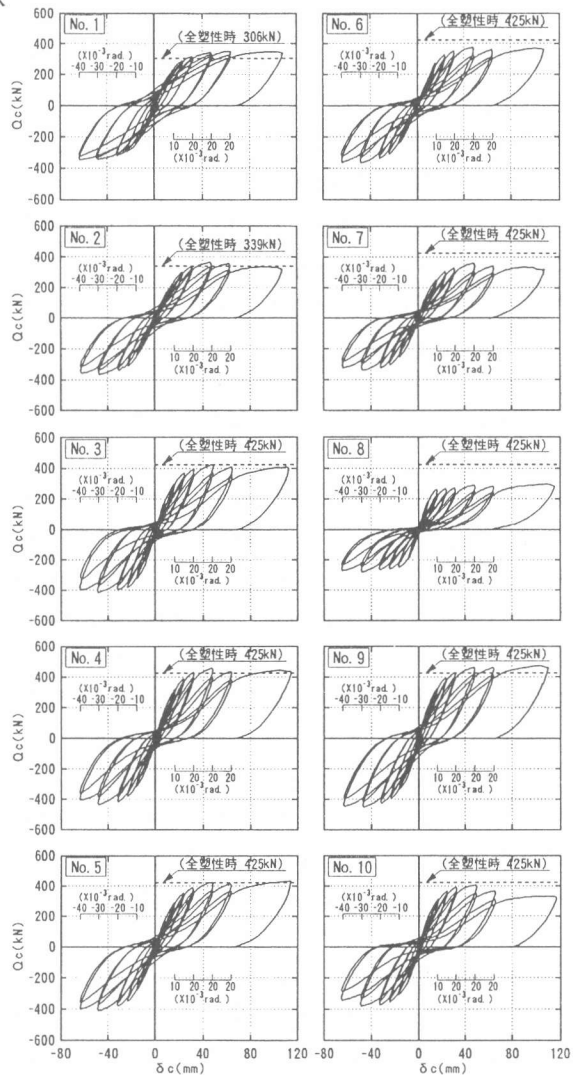


図-4 $Q_c - \delta_c$ 関係

力低下の少ない安定した履歴を示した。No.2では最大耐力時（ $R=1/33$ ）の実験値が梁全塑性時の計算値を上回っているがそれ以降の変形でやや耐力低下した。破壊形式については、No.1は梁曲げ降伏、No.2は梁曲げ降伏後接合部せん断破壊したと考えられる。中板に開口を設けても、接合部へのせん断入力量を制限することで優れた変形能が得られる。

(2)中板厚、形状の影響：中板厚を変えた No.3 と No.4 を比較すると、中板厚が PL-25 の No.4 の方が正側では約 10%高い耐力を示したが負側ではそれほど差がみられず、中板厚を増してもその断面積に応じた耐力上昇がみられなかった。中板開口を変えた No.3、No.5、No.6 を比較すると、中板開口が 0.4Dc の No.5 は No.3 とほぼ同じ履歴を示したが、中板が分離した No.6 は No.3 と比較して全般的に低い耐力を示した。なお、中板が分離し中板形状を変えた No.7 は、No.6 よりやや低い耐力を示した。

(3)ふさぎ板と直交材の影響：ふさぎ板がない No.8 は No.3 と比較して全般的に耐力が低く、逆に PL-6 の No.9 では耐力が上昇したことより、本実験ではふさぎ板の有無および厚が耐力に大きな影響を及ぼした。一方、直交材のない No.10 では No.3 と比較して耐力が低く、特に面外方向のふくらみが顕著にみられた $R=1/33$ 頃より耐力の差が大きくなった。

3.3 接合部せん断変形

図-5にふさぎ板を因子とした No.3、No.8 および No.9 の接合部のせん断変形角と Q_c の関係を示す。図中には、内部パネルのせん断変形角（以下： γ_{in} ）と外部パネルのせん断変形角（以下： γ_{out} ）を併せて示している。 γ_{in} について比較すると、ふさぎ板が PL-2.3 の No.3、ふさぎ板がない No.8 および PL-6 の No.9 とともに小さい。それに対し、 γ_{out} をみると、ふさぎ板の拘束状態の違いにより大きな差がみられ、特に No.8 ではスリップ性状の大きなせん断変形角を示している。 γ_{in} と γ_{out} で大きな差がみられたことにより、載荷方向のふさぎ板と FBP の役割について考察する。 Q_c の差異より、ふさぎ板にはコンクリート圧縮強度の上昇、せん断伝達や FBP には支圧応力を受けるコンクリートを側方から拘束する効果があると考えられる。 γ_{in} と γ_{out} の差が小さな No.9 では、ふさぎ板 PL-6 と比較的厚い板を用いているため、より FBP に近い挙動を示し、内・外接合部パネルのせん断変形の差が小さくなったと思われる。

3.4 鋼材のせん断応力度

(1)中板のせん断応力度分布：図-6に No.3、No.4 と No.8 の中板中央部の正載荷時の第 1 サイクルピーク時のせん断応力度分布を示す。なお、せん断応力度は、せん断降伏（ $\tau_y=\sigma_y/\sqrt{3}$ ）以降一定と仮定し求めた。各試験体とも、せん断応力度はパラボラ

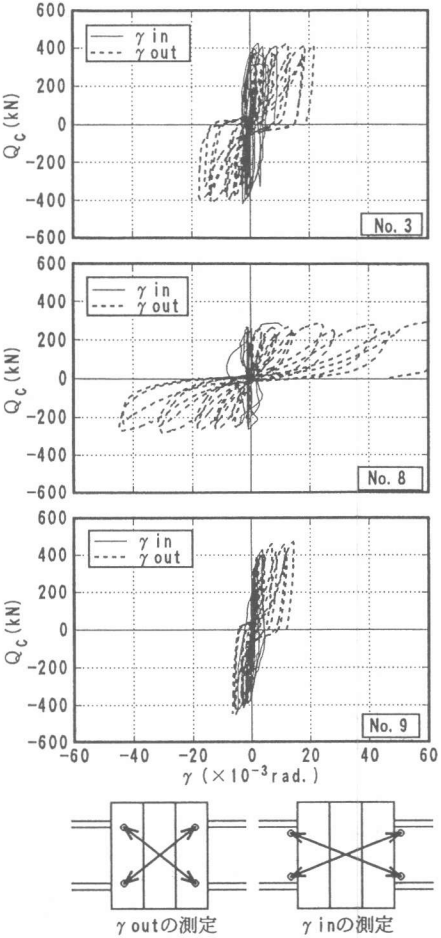


図-5 $Q_c - \gamma$ 関係

状の分布性状を示し、B、C 点は、 $R=1/67$ でほぼせん断降伏したが、A、D 点はせん断降伏していない。本実験の範囲では、中板厚を厚くした No.4 の A、D 点のせん断応力度は、変形が進んでも他の試験体と同程度の値を示し、B、C 点でのせん断応力度のみが上昇している。また、ふさがき板がない No.8 と No.3 では、ふさがき板の有無による影響は特にみられなかった。

(2)ふさがき板と FBP のせん断応力度分布：図-7 に中板の開口の異なる No.3、No.4 および No.7 のふさがき板と FBP のせん断応力度分布を示す。いずれの試験体でも FBP のせん断応力度の推移は同程度であるが、ふさがき板の推移は、中板開口が大きくなる程大きな値を示し、No.7 では $R=1/33$ でせん断降伏している。なお、FBP については全ての試験体でせん断降伏していない。

4. 接合部終局せん断耐力の検討

4.1 接合部のせん断力負担割合

図-8 に接合部せん断破壊を想定した 8 体の最大耐力時におけるふさがき板、FBP、中板およびコンクリートの接合部への入力せん断力に対する負担割合を示す。表-3 に全ての試験体の最大耐力時の負担せん断力を示す。なお、ふさがき板、FBP と中板の負担せん断力は、せん断応力度を積分して求めた。コンクリートの負担せん断力は、接合部入力せん断力から各鋼材の負担力の差とした。

中板開口が $0.25D_c$ の No.3、No.4、No.8 および No.10 では、FBP のせん断力負担割合が約 10% となっている。中板が分離した No.6 と No.7 では、FBP の負担割合が約 15% 程度と大きくなっている。また、ふさがき板の負担割合も大きくなっている。

4.2 接合部コンクリートの負担せん断力

中板が分離した No.6 と No.7 の接合部せん断抵抗機構を想定した場合、コンクリートの圧縮束により接合部のせん断抵抗を主に行っていると考えられる。そのため、コンクリートの圧縮強度は接合部せん断力に関わる重要な要因の一つである。そこで、コンクリート圧縮強度の影響を除いて、No.3 と No.6 を比較する。図-9 に Q_c を接合部せん断応力度(τ_p)にしコンクリート強度で除して無次元化した図を示す。この図より、No.3 と No.6 はほぼ同等の構造性能を有し、中板を連続させた効果がみられない。RCS 造の接合部では、一般に柱幅に対して梁幅

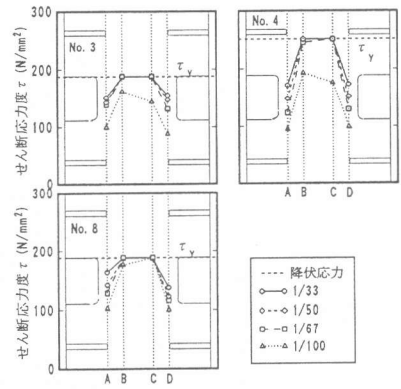


図-6 中板のせん断応力度分布

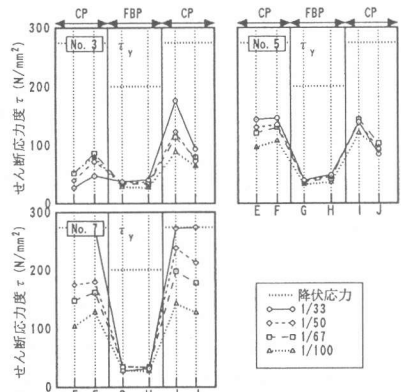


図-7 ふさがき板と FBP のせん断応力度分布

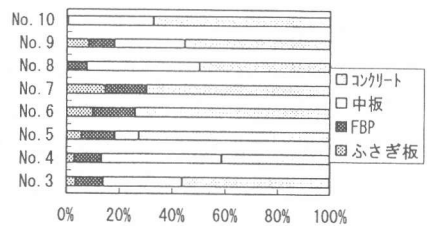


図-8 接合部負担せん断力の割合

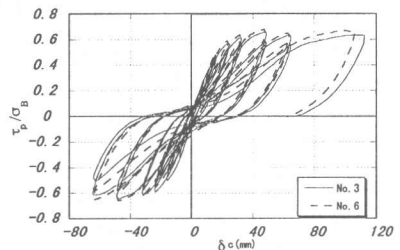


図-9 $\tau_p/\sigma_c - \delta_c$ 関係

が小さいため、接合部コンクリートの圧縮束が拡がることから、接合部コンクリートの有効断面に着目し検討した。有効断面は、(1)式を用いて柱幅に対する有効幅係数 K_c として求

表－3 接合部負担せん断力と有効係数

試験体	pQttotal (kN)	pQcp		pQfbp		pQweb		pQcon		Kc
		(kN)	(%)	(kN)	(%)	(kN)	(%)	(kN)	(%)	
No. 1	1410	73	5.1	122	8.6	414	29.3	803	56.9	0.64
No. 2	1495	67	4.5	165	11.0	419	28.1	845	56.5	0.69
No. 3	1787	63	3.5	186	10.4	519	29.1	1018	57.0	0.82
No. 4	1922	61	3.2	196	10.2	866	45.1	799	41.6	0.65
No. 5	1828	128	7.0	165	9.0	191	10.5	1344	73.5	1.08
No. 6	1581	159	10.0	253	16.0	0	0.0	1169	74.0	1.10
No. 7	1511	221	14.7	235	15.6	0	0.0	1054	69.8	1.00
No. 8	1260	0	0.0	65	5.1	558	44.3	637	50.6	0.51
No. 9	1984	218	11.0	176	8.9	522	26.3	1068	53.8	0.85
No. 10	1708	8	0.5	0	0.0	558	32.6	1143	66.9	0.88

pQttotal: 接合部せん断力, pQcp: ふさぎ板負担せん断力
 pQfbp: FBP負担せん断力, pQweb: 中板負担せん断力
 pQcon: コンクリートの負担せん断力 pQcon=pQttotal-pQcp-pQfbp-pQweb、Kc: 有効幅係数

めた。なお、せいは柱全せいとした。また、コンクリートのせん断強度は $0.3\sigma_B$ [3] を本研究では採用した。

$$K_c = pQ_{con} / (0.3\sigma_B \times B_c \times D_c) \tag{1}$$

ここに、 pQ_{con} : 接合部コンクリート負担せん断力、 $0.3\sigma_B$: コンクリートせん断強度、 B_c : 柱幅、 D_c : 柱せい

計算結果を表－3 に示す。ふさぎ板を有する試験体の場合、中板開口 $0.25D_c$ の試験体の有効幅係数は平均 0.85 であり、開口が $0.4D_c$ または分離した試験体では、平均 1.06 となった。また、梁が全塑性時耐力に達した No.1、No.2 および No.4 では、有効幅係数が平均 0.65 である。従って、中板の開口が大きいと接合部コンクリートの有効幅が増え、コンクリートの負担せん断力が上昇し図－9 のような結果になったと思われる。

5. まとめ

本実験の範囲において以下のことが判明した。

- (1) 標準的な接合部仕口であれば、接合部への平均せん断応力度（計算値）とコンクリート強度の比が 0.43 程度であれば、耐力低下の少ない優れた履歴を示す。
- (2) ふさぎ板を厚くすることにより、耐力が上昇し、更に内外の接合部せん断変形の差を緩和する。
- (3) 直交 FBP のせん断負担は、接合部せん断力の約 10% 程度である。
- (4) ふさぎ板を有する場合、柱幅に対するコンクリートの有効幅係数は、中板の開口が $0.25D_c$ の試験体では平均 0.85 で、 $0.4D_c$ または中板を分離した試験体では平均 1.06 となった。

今後は、本接合部仕口に関して有効幅と中板開口の関係などについて力学的機構を解明し接合部に関する定量的評価を検討していきたい。

[参考文献]

- [1] 市川昌和、古川淳、森本仁、松崎育弘：中板を欠損させた柱 RC・梁 S 造接合部の構造性能に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.2, pp.1373-1378、1996.6
- [2] 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、1992.8
- [3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990