

論文 柱貫通型・柱 RC - 梁 S 造接合部のせん断性能に関する実験的研究

古川 淳^{*1}・中出 駿^{*2}・森本 仁^{*3}・松崎育弘^{*4}

要旨：筆者らは、中板に開口を設けた柱貫通型の柱 RC 梁 S 造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やふさぎ板など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報告した[1]。本研究では、これまでの実験結果を基に本接合部仕口をより詳細に検討するために接合部の構成材、コンクリート強度、梁の偏心および載荷方法（二方向載荷）を実験因子として接合部のせん断性能について検討を行った。その結果、(1)二方向載荷、梁の偏心が接合部強度にそれほど大きな影響を及ぼさないこと、(2)コンクリート強度が接合部のせん断性能に及ぼす影響が大きいこと等が判明した。

キーワード：混合構造、接合部、中板開口、柱貫通型

1. はじめに

近年、混合構造に関する研究が大変盛んに各研究機関においてなされ、その研究成果が多く報告されている。特に、柱・鉄筋コンクリート造（以下：RC 造）、梁・鉄骨造（以下：S 造）の混合構造（以下：RCS 造）に関する研究は多くなされている。

筆者らは、開口のある中板、三角スチフナ、フェースペアリングプレート（以下：FBP）およびふさぎ板から構成された柱貫通型

RCS 造十字型接合部について載荷実験を実施し、強度および変形能に関して、既報で報告してきた[1]。その結果、多くの有益な結果を報告することができた。

本研究では、先に行った実験結果を踏まえて、より詳細に RCS 造接合部を把握するために中板開口、コンクリート強度、中板厚、FBP 厚の因子が本仕口のせん断性能に対して及ぼす影響を把握するために実験を実施した。さらに、二方向載荷の影響、梁を偏心させた影響につい

表-1：試験体一覧

試験体	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.3	No.10
RC 柱	断面		350×350				350×350	
	主筋		12-D19				12-D19	
	帯筋		4-D10 @50				4-D10 @50	
接合部	断面		BH-300×120×9×22				BH-300×120×9×22	
	中板	PL-19		PL-9	PL-19		PL-19	
	中板開口率	78(%)	45(%)	48(%)		45(%)		45(%)
	三角スチフナ		PL-19				PL-19	
	ふさぎ板		PL-2.3				PL-2.3	
	FBP	PL-16	PL-6		PL-16		PL-16	
	直交中板	無し		PL-9		PL-19	PL-9	無し
σ_b (N/mm ²)		33.9	20.7	35.7	34.9	35.4	36.8	33.6
$c\tau u/\sigma_b$		0.68	1.12	0.65	0.66	0.66	0.63	0.68
軸力比				0.2			0.2	
実験因子	中板開口 直交材無	コンクリート強度	FBP 厚	中板厚	梁偏心	二方向載荷	基本	直交材無

σ_b ：実験時コンクリート圧縮強度、 $c\tau u$ ：接合部平均せん断応力度 $c\tau u = [(1-u-v)pQ_c/v]/[b_f D_c]$
 Q_c ：計算値の梁全塑性時層せん断力、 u ：柱主筋面距離/スパン、 v ：梁フランジ重心面距離/スパン
 b_f ：有効幅 [$0.8(\text{柱幅} + \text{梁幅})$]、 D_c ：柱せい

*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) 所長 技術研究所 (正会員)

*4 東京理科大学 教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

ても検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体

表-1 に試験体の諸元を、図-1 に試験体配筋図を、図-2 に No.15 と No.16 の接合部の鉄骨詳細図を示す。表-1 には、既報の No.3 と No.10 の諸元も併せて示す。各試験体とも、スパン、階高、断面寸法、配筋等は共通であり、既報と同一形状としている。中板には開口を設けており、その中板開口率を図-3 に示すように定義した。以下、本論文では中板開口率を四捨五入した数値で表現する。

実験因子は以下の通りである。No.11 は中板開口率を 80% とし直交材を設けていない。既報の No.10 と比較することにより中板開口率の影響を把握する。No.3 と比較して、No.12 はコンクリート強度を $F_c 21 N/mm^2$ と低くし、No.13 は FBP 厚を PL-6 と薄くし、No.14 は中板を PL-9 と薄くした。コンクリート強度、FBP 厚、中板厚が接合部のせん断耐力に及ぼす影響について把握する。No.15 は No.3 と比較して梁を 50mm 偏心させ、偏心の影響について把握する。No.16 は、二方向載荷の影響について検討する。

コンクリートの試験結果を表-1に、鋼材の引張試験結果を表-2に示す。

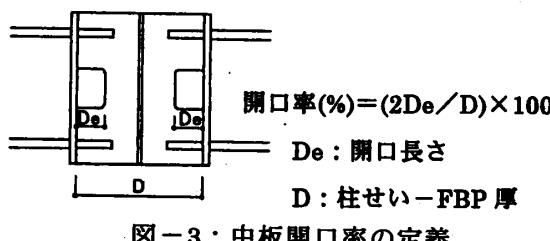


図-3：中板開口率の定義

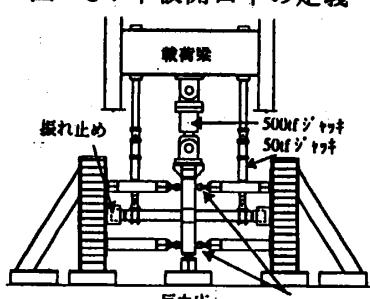


図-4：載荷装置

2. 2 載荷および計測方法

図-4 に載荷装置の概要を示す。載荷は、柱の上下の反曲点位置を球座で拘束し、鉛直ジャッキにより一定軸力 ($0.2bD_c \sigma_B$)を加えた状態で梁の全体変形が同じになるように変形を制御して載荷した。載荷履歴は、層間変形角 $R = \pm 0.25\%$ を 1 回、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ を 2 回繰り返した後、最後を押し切りを標準の履歴とし

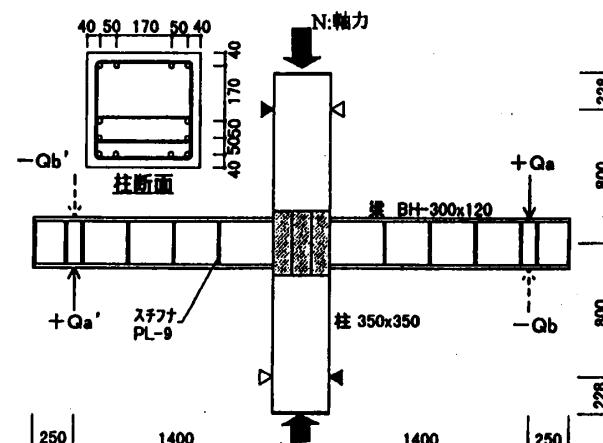


図-1：試験体形状

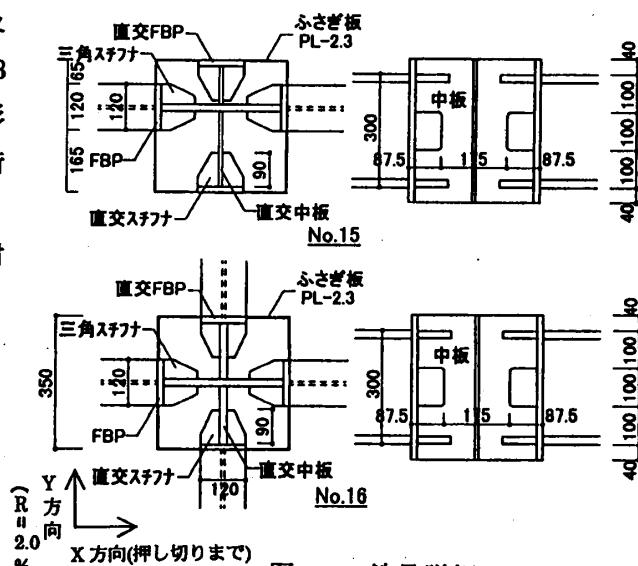


図-2：鉄骨詳細

表-2: 鋼材の材料特性

	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び量 (%)	備考
PL-22	355	0.21	524	41.9	SM 490
PL-19	366	0.21	531	44.2	
PL-16	419	0.21	564	41.9	
PL-12	360	0.21	518	42.3	
PL-9	382	0.21	538	38.4	
PL-6	438	0.21	567	31.3	
PL-2.3	378	0.21	408	35.7	
D19	698	0.18	918	14.8	
D10	727	0.18	969	9.9	

注)ヤング係数: $\times 10^6$

た。二方向載荷とした No.16 については、 $R = \pm 0.25\%$ を1回、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.0\%$ を2回繰り返した後、載荷を一端終了し、試験体を取り出し、反転して、再度、 $R = \pm 0.25\%$ ～押し切りまでの標準履歴により実験を実施した。なお、一方の梁を載荷している際、もう一方の梁を拘束等していない。本論文では、先に載荷した方向をY方向、最後まで載荷した方向をX方向と呼ぶ。計測方法は、層間変形と接合部のせん断変形を主に測定した。歪は、中板、ふさぎ板およびFBPに3軸ゲージを、鉄筋に1軸ゲージを添付し、主な箇所について測定した。

3. 実験結果

3. 1 破壊経過

図-5にNo.15について、ふさぎ板を実験終了後切断した状態の最終ひび割れ図を示す。二方向独立載荷の試験体も含めて接合部に直交材がある試験体の場合、諸ひび割れの発生状況は、ほぼ同様であった。すなわち、層間変形角 $R=0.5\%$ までにふさぎ板と柱の境界に曲げひび割れが、 $R=1.5\%$ までに柱にせん断ひび割れが生じた。その後、載荷方向のFBP端部からの上下柱面に斜めひび割れが発生した。以降の載荷でふさぎ板と柱の境界の曲げひび割れが進展し、柱隅部分のコンクリートが圧壊がみられた。また、中板開口が大きく直交材のないNo.11では、諸ひび割れ状況は

ほぼ同様であったが、大変形時($R=4.0\%$)でふさぎ板の膨らみが顕著となった。一方、梁が偏心したNo.15では、柱のひび割れ本数は、他の試験体と比較して梁偏心側の柱にやや多く発生した。実験終了後、No.15のふさぎ板を切ってひび割れ状況を観察すると、図-4の側面A、Bでは梁を偏心させた方向の接合部コンクリートのひび割れは殆どなく、反対側の接合部コンクリートにひび割れが多数発生した。また、正面では直交FBPと平行した顕著なひび割れが発生していた。このひび割れは反対側でも同様のひび割れが観察された。

3. $2Q_c - \delta_c$ 関係の比較

図-6にNo.11～No.16の各試験体の $Q_c - \delta_c$ 関係を、表-3に実験結果一覧を示す。なお、比較のためNo.3とNo.10の $Q_c - \delta_c$ 関係を破線で示す。以下、実験因子の違いによる $Q_c - \delta_c$ 関係の比較について述べる。

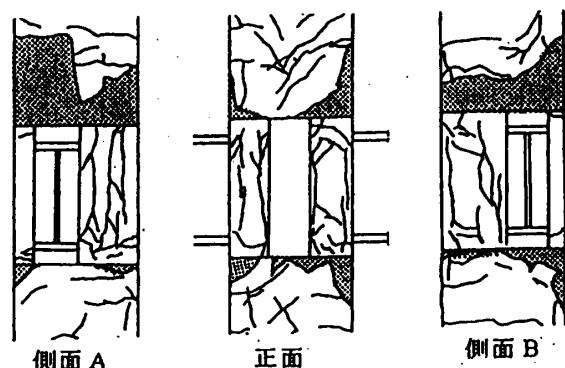
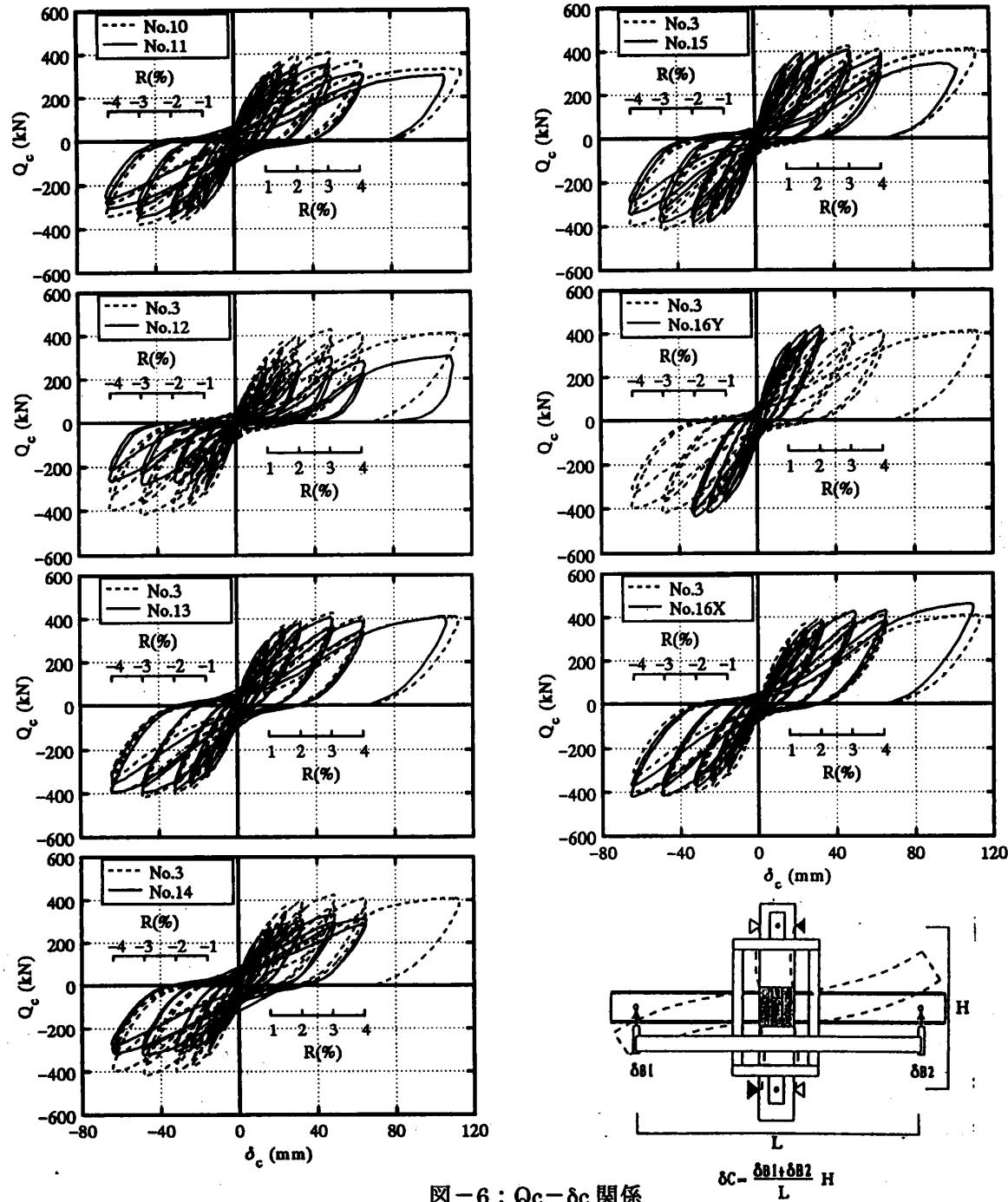


図-5：ひび割れ状況 (No.15)

表-3：実験結果一覧

試験体	実験値				梁全塑性時		柱降伏時	破壊モード
	eQ_{max} (kN)	eR_{max} (%)	V_j (kN)	$\frac{e\tau_{max}}{\sigma_p}$	eQ_p (kN)	$\frac{eQ_{max}}{eQ_p}$		
No.11	+353 -344	+3.0 -3.0	+1483 -1446	+0.53 -0.52	463	+0.76 -0.74	625	J
No.12	+306 -283	+6.7 -3.0	+1287 -1190	+0.76 -0.70	463	+0.66 -0.61	519	J
No.13	+409 -402	+3.0 -3.0	+1714 -1688	+0.58 -0.58	463	+0.88 -0.88	637	J
No.14	+332 -325	+3.0 -3.0	+1396 -1365	+0.49 -0.48	463	+0.72 -0.70	631	J
No.15	+406 -380	+3.0 -3.0	+1703 -1596	+0.59 -0.55	463	+0.88 -0.82	636	J
No.16Y	+435 -431	+2.0 -2.0	+1827 -1813	+0.60 -0.60	463	+0.94 -0.94	645	-----
No.16X	+459 -418	+6.7 -4.0	+1927 -1757	+0.64 -0.58	463	+0.99 -0.90	645	B

注) eQ_{max} : 最大層せん断力(実験値), eR_{max} : 最大層せん断力時変形角(実験値), V_j : 最大接合部せん断力 [$= (1-u-v) eQ_{max} / v$], u, v : 表-1の脚注と同じ, $e\tau_{max}$: 最大接合部せん断応力 [$= V_j / (bj Dc)$], b, j, Dc : 表-1の脚注と同じ, eQ_p : 梁全塑性時層せん断力(計算値) [$= (\sum M_p L) / (H Dc)$], M_p : 全塑性モーメント, L : 梁スパン, H : 隅, $e\tau_p$: 梁全塑性時接合部せん断応力(計算値) [$= (\sum M_p / jb \cdot eQ_p) / (bj Dc)$], eQ_u : e 関数法による計算破壊モード : J→接合部せん断破壊, B→梁曲げ降伏

図-6: $Q_c - \delta_c$ 関係

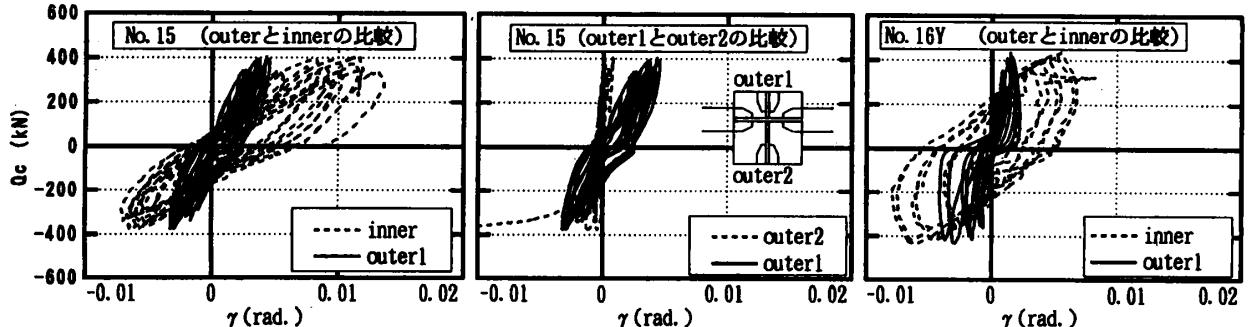
$$\delta_c = \frac{\delta_{B1} + \delta_{B2}}{L} H$$

中板開口率の影響

直交材のない No.10 (中板開口率 50%) と No.11 (中板開口率 80%) について比較を行い、直交材のない場合の中板開口率について検討する。既報では直交材のある試験体の場合、中板開口率がせん断強度に及ぼす影響はほとんどみられなかった[1]。中板開口率が 80% の No.11 は、全般的に No.10 より低い実験値を示し、中板開口率の影響が顕著に表れている。

コンクリート強度の影響

No.12 と No.3 を比較すると、No.12 は最大耐力時で約 30% 低い実験値を示し、履歴性状は、顕著なスリップ性状を示した。本接合部仕口での主な応力伝達機構は、FBP による圧縮束と柱主筋の付着によりなされていると考えられる。そのため、コンクリート強度が低くなることで、主筋の付着劣化がしやすくなり付着反力がとれなくなったことで起こったと推察される。従って、コンクリート強

図-7: $Q_c - \gamma$ 関係

度は、本接合部仕口の耐力決定の重要な要因であると考えられる。

FBP 厚と中板厚の影響

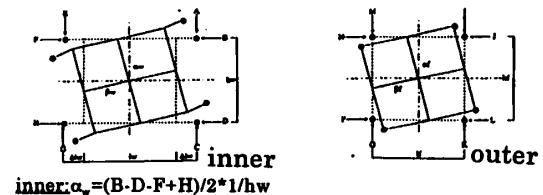
FBP 厚さを変えた No.13(PL-6)と No.3(PL-16)を比較すると、履歴性状に関して正載荷時ではやや低い最大耐力を示し、負載荷時では 15%程度低い耐力を示した。最終載荷時には、梁フランジ上下に拡張した FBP とふさぎ板の溶接部分の一部が切れており、FBP の端部の曲がりが顕著になっていた。中板厚さを変えた No.14(PL-9)と No.3(PL-16)を比較すると、No.14 は中板の引張降伏で最大耐力が決定されたため、逆に紡錘型の履歴性状を示したと考えられる。

梁偏心の影響

梁を偏心させた影響について、No.15 と No.3 を比較した。梁を 50mm 偏心させた No.15 がやや低い耐力を示している。これは、梁を偏心させたため有効幅が減少したことが考えられる。また、最大耐力以降、No.3 に比べ耐力低下が見られた。

二方向載荷の影響

Y 方向では No.3 と比較して、実験値がやや高いものの顕著な差はみられなかった。X 方向でも、No.3 と比較して実験値が大変形時でやや高くなっているが、履歴性状について顕著な差がなかった。また、X 方向と Y 方向を比較すると、X 方向の方が初期剛性が全般的に小さくなり、同一変形時での実験値がやや小さくなっている。既往の研究では、RCS 架構に対して二方向載荷の影響を検討した例



inner: $\alpha_i = (B-D-F+H)/2 * 1/hw$
 $\Delta V = [(C-\Delta l w * \alpha_i) + (-G-\Delta l w * \alpha_i) + (E-\Delta l w * \alpha_i) + (-A-\Delta l w * \alpha_i)]/2$
 $\beta_i = \Delta V/lw$ ($lw=350\text{mm}$, $lw=30\text{mm}$, $hw=240\text{mm}$), $w = \alpha_i - \beta_i$
outer: $\alpha_o = (J-L-N+P/2) * 1/hf$, $\beta_o = (-I+M+K-O)/2 * 1/lf$
 $(hf=240\text{mm}$, $lf=240\text{mm}$), $\gamma_i = \alpha_i - \beta_i$
矢印は変位計を示し A~O はその番号を示す。
Inner の計測点は梁ウェブにあり、 $\Delta l w$ は柱面からの距離

図-8: 接合部せん断変形測定方法

はないが、本実験の範囲では履歴性状に及ぼす二方向載荷の影響は少ないとと思われる。

3. 3 接合部せん断変形

図-7 に梁を偏心させた No.15 と二方向独立載荷を行った No.16 の接合部せん断変形角 γ とせん断力 Q_c の履歴曲線を示す。せん断変形角の測定方法は、図-8 に示すように接合部の 4 点の水平、鉛直座標の変位を測定することにより求めた。鉄骨梁端部分での測定を inner、ふさぎ板に穴を開けてコンクリート部分での測定を outer とここでは呼ぶことにする。また、梁偏心させた No.15 の outer については、偏心側(以下:outer1)とその反対側(以下:outer2)の 2 力所を測定した。

これらの図より、outer のせん断変形角は inner より大きなせん断変形角を示し、その大きさは 3 倍程度となっている。ここで、示したのは一例であるが、他の試験体においても outer は inner と比較して約 3 倍程度のせん断変形角を示している。また、梁偏心させた No.15 の outer のせん断変形角について比較すると、梁偏心側で測定した outer1 の方が outer2 より大きなせん断変形角を示しており、コンクリートパネルが梁偏心させたことによりねじれてい

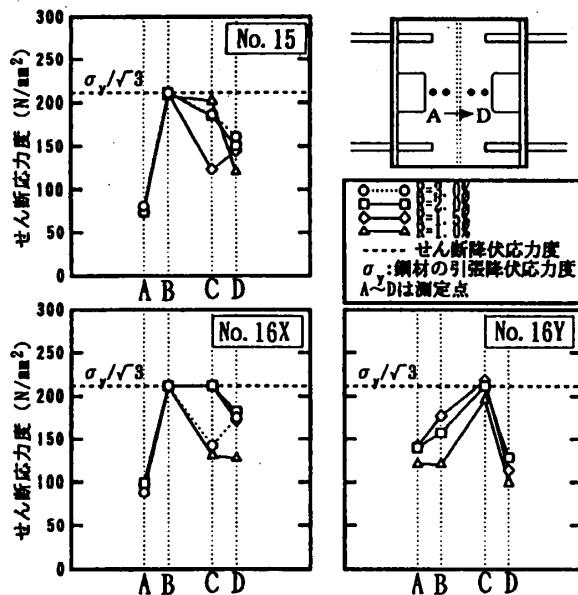


図-9：中板のせん断応力度分布

ることがわかる。

3. 4 鋼材のせん断応力度分布

図-9と図-10にNo.15とNo.16の中板とふさぎ板の各ピーク時におけるせん断応力度分布を示す。せん断降伏応力度は、鋼材の単調引張降伏応力度に対して $\sqrt{3}$ で除した値とした。また、No.15のふさぎ板は梁を偏心させた側のふさぎ板を裏面、その反対の面を正面とした。

図-16では梁偏心や二方向載荷の実験因子に関わらず変形角R=1.0%で中板中央付近がせん断降伏している、また、中板開口付近では大変形時でもせん断降伏までは至っていない。なお、No.16では処女載荷したY方向の歪は、変形角R=2.0%時で大変小さかったため、その後に載荷したX方向での歪には影響がないものと考えられる。

ふさぎ板のせん断応力度分布をみると、No.15の正面と裏面のせん断応力度は、梁を偏心させた側のふさぎ板の方が1.5倍程度大きい。この傾向は、せん断変形角の結果と類似している。また、二方向載荷をしたNo.16では、ふさぎ板部分の応力度はあまり差がみられないが、X方向のFBPのせん断応力度は大変小さい値となっている。

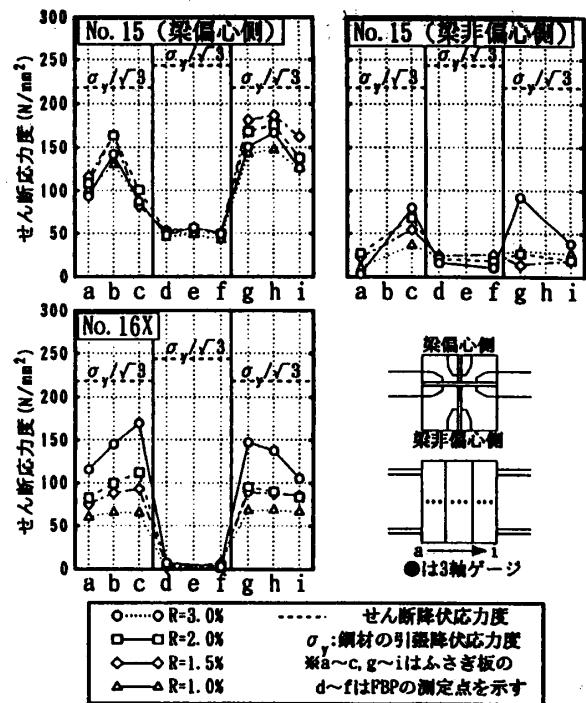


図-10：ふさぎ板のせん断応力度分布

4. まとめ

中板に開口を設けた柱貫通型 RCS 造接合部に対し実験を行い、各実験因子の影響を検討した。本実験の範囲で以下のことが明確になった。

- (1) 中板開口率は、直交材がある試験体ではその履歴にそれほど影響を及ぼさないが、直交材のない試験体に対しては、そのせん断耐力に影響を与える。
- (2) コンクリート強度は、本接合部仕口のせん断性能に対して重要な要因を持つ。
- (3) せん断耐力に対して比較すると、梁偏心の影響はそれほどみられない。しかし、コンクリートパネルのせん断変形については、偏心側と非偏心側ではかなり差がみられる。
- (4) 梁を偏心させた場合、偏心させた側のふさぎ板のせん断応力度は、その反対のふさぎ板より1.5倍程度大きな値を示した。
- (5) 一度損傷を与えた接合部に直交方向から再度載荷をおこなっても、履歴性状に与える影響は少ないことが判明した。

参考文献

- [1]古川淳他：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、日本コンクリート工学会年次論文報告集、Vol.19、No.2、1997年6月