

論文 柱貫通型・柱 RC-梁 S 造接合部の終局せん断耐力とせん断剛性

中出 瞳^{*1}・米奥久貴^{*2}・渕川正四郎^{*1}・松崎育弘^{*3}

要旨:本報告は、柱貫通型・柱 RC-梁 S 造接合部の静的載荷実験結果から、接合部の終局せん断耐力とせん断剛性を検討した結果を示したものである。終局せん断耐力は、中板部分とコンクリート部分の終局負担せん断力の累加とし、せん断剛性は、梁幅内部分(内部パネル)と梁幅外部分(外部パネル)のせん断変形関係から求めたコンクリート部分の負担せん断力-せん断変形と中板部分の負担せん断力-せん断変形を累加して評価した。提案した終局せん断耐力式と負担せん断力-せん断変形はともに実験値と良好な対応を示した。

キーワード:RCS 造、終局せん断耐力、せん断剛性、内部パネル、外部パネル

1. はじめに

筆者らは、既にふさぎ板で囲まれ、中板を開口を設けた柱貫通型の柱RC-梁S造の接合部ディテールを提案し、静的載荷実験を行い、その結果について報告してきた^{1~3)}。本接合部のような混合構造を設計するためには、混在する異種部材の柱梁接合部の耐力と剛性を適切に評価する必要がある。

本報告では、既に実施した静的載荷実験の結果を踏まえて、本接合部の終局せん断耐力とせん断剛性を提案する。

2. 試験体

接合部ディテール、試験体形状図、接合部鉄骨詳細図を図-1, 2, 3に、試験体諸元を表-1に示す。接合部ディテールは、柱面位置のフェイスペアリングプレート(以下、FBPと略)、開口を設けた中板、三角スチフナおよびふさぎ板で構成されている。試験体は、No.1~16の十字形接合部16体とNo.17~20(EJ1~EJ4)のト形接合部4体の計20体からなっている。また、階高、スパンおよび柱断面形状は、全試験体共通である。

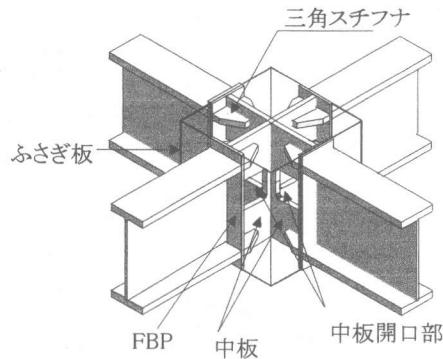


図-1 接合部ディテール

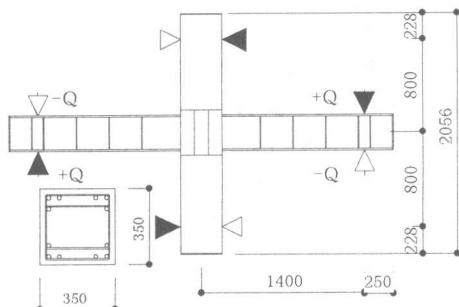


図-2 試験体形状図

*1 日産建設(株) 技術研究所 工修(正会員)

*2 日産建設(株) 技術研究所 (正会員)

*3 東京理科大学教授 工学部建築科 工博(正会員)

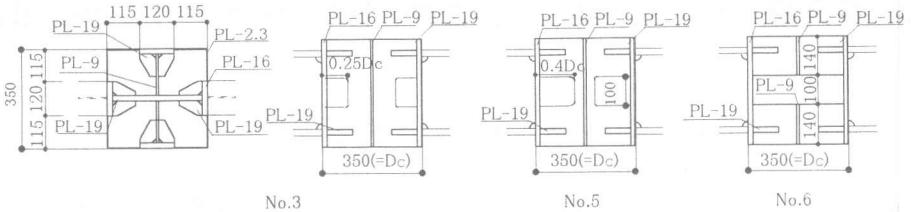


図-3 接合部鉄骨詳細図

表-1 試験体緒元

試験体名	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
実験パラメーター	接合部へのせん断入力量	基本試験体	中板厚	中板開口	中板分離、中板形状		ふさぎ板	直交材なし		
接合部	中板 PL-12 中板開口 0.25Dc 三角スチナ PL-12 ふさぎ板 FBP PL-9 直交材 形状	PL-14	PL-19	PL-25	PL-19 PL-19×140 0.40Dc 0.50Dc(中板分離)	PL-19×140 PL-28×95	PL-19	PL-19	PL-6	PL-2.3
S梁	断面 BH-300×120×9×22 300×120×6 ×12 ×16			PL-2.3			無し	PL-6	PL-2.3	
RC柱	断面 主筋 12-D19(SD345) 帯筋 4-D6 @50(SD690)				PL-16					
	破壊形式 梁曲げ降伏		せん断破壊	引張破壊			せん断破壊			
試験体名	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17(EJ1)	No.18(EJ2)	No.19(EJ3)	No.20(EJ4)
実験パラメーター	中板開口、直交材なし 中板 PL-19	コンクリート強度 FBP厚	中板厚	梁偏心	二方向載荷	接合部へのせん断入力量	中板分離	二方向載荷		
接合部	中板開口 0.40Dc 三角スチナ PL-19 ふさぎ板 PL-2.3 FBP PL-16 直交材 無し		PL-9 0.25Dc	PL-19	PL-12 PL-19	0.25Dc PL-12 PL-19	PL-19	PL-16	PL-9 PL-19	
S梁	断面 BH-300×120×9×22				BH-300×120×6×12		BH-300×120×9×22			
RC柱	断面 主筋 12-D19(SD690) 帯筋 4-D10 @50(SD690)				Bc×Dc=350×350		12-D19(SD345)		4-D6 @50(SD690)	
	破壊形式 せん断破壊		引張破壊	せん断破壊			梁曲げ降伏			

Bc: 梁幅 Dc: 柱幅

3. 接合部せん断耐力

3.1 終局せん断耐力式

実験結果^{1)~3)}より以下のことが判明した。

- ①中板およびコンクリートに比べて、FBP・ふさぎ板の終局時負担せん断力は小さい。
- ②ふさぎ板厚が増大すると、コンクリートの終局時負担せん断力も上昇する。
- ③中板開口幅の増大に伴って、コンクリートの終局時負担せん断力も上昇する。
- ④直交中板がなくなると、FBP・ふさぎ板の終局時負担せん断力は減少する。

上記の結果から、接合部に作用するせん断力を(1)式から算定し、接合部せん断耐力を中板の負担せん断力とコンクリート負担せん断力

の累加と仮定とした(2)式を提案する。

$$Q_p = \frac{1 - u - v}{v} Q_c \quad (1)$$

$$Q_{pu} = K_w \cdot \tau_{wy} \cdot A_w + \phi \cdot K_c \cdot 0.3 \sigma_{cb} \cdot A_c \quad (2)$$

$$\sigma_{cb} = \sigma_b + \frac{11.5 t_{co}}{(D_{max} - 2t_{co})} \rho_h \cdot \sigma_fy \quad (3)$$

$$K_c = \beta \left(\frac{1.6 D_{co}}{D_c} + 0.5 \right) \quad (4)$$

$$\phi = - \frac{0.45 D_{co}}{D_c} + 0.95 \quad (5)$$

ここで、

Q_p :接合部に作用するせん断力(N)

Q_c :層せん断力(N)

uL :柱の応力中心間距離(mm)

vH :梁の応力中心間距離(mm)

L :スパン(mm) H :階高(mm)
 K_w :中板有効係数 (=0.7)
 σ_{wy} :中板の降伏応力度(N/mm²)
 τ_{wy} :中板のせん断降伏応力度(N/mm²)
 $(= \sigma_{wy} / \sqrt{3})$
 A_w :中板の断面積(mm²)
 ϕ :直交材損失低減係数
(直交中板が有る場合 : 1.0)
 K_c :コンクリート有効幅係数
 σ_{cb} :拘束を考慮したコンクリート
の圧縮強度⁴⁾ (N/mm²)
 A_c :コンクリートの断面積(mm²)
 σ_b :コンクリート強度 (N/mm²)
 D_{max} :柱幅および柱せいの最大幅(mm)
 t_{co} :ふさぎ板厚(mm)
 ρ_h :ふさぎ板の体積比
 σ_{fy} :ふさぎ板の降伏応力度(N/mm²)
 D_{co} :中板の開口幅(mm) D_c :柱せい(mm)
 β :形状係数(十字形 : 1, ト形 : 2/3)

以下、各係数について説明する。

(1) K_w 中板有効係数

各試験体の中板有効係数 K_w を図-4 に示す。ここで、 K_w は中板の有効断面積を表わす係数である。 K_w は、ほぼ下限値である 0.7 とした。

(2) σ_{cb} 拘束を考慮したコンクリートの圧縮強度

ふさぎ板の拘束効果を考慮するため、鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針⁵⁾に、孫ら⁴⁾の正方鋼管による拘束効果を考慮したコンファインドコンクリート強度を適用し、接合部コンクリートのせん断強度を $0.3 \sigma_{cb}$ とした。

(3) K_c コンクリート有効幅係数

コンクリート有効幅係数 K_c は、コンクリートの有効断面積を示す係数で、コンクリートの終局負担せん断力をコンクリートのせん断強度 $0.3 \sigma_{cb}$ とコンクリート断面積で除した値である。

直交中板を有するせん断破壊した十字形試験体およびト形試験体の中板の開口幅比 ($= D_{co}/D_c$) とコンクリート有効幅係数 K_c の関係を図-5 に示す。ここで、十字形試験体を○、ト形

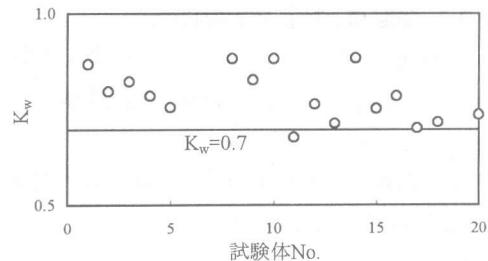


図-4 各試験体の中板有効係数 K_w

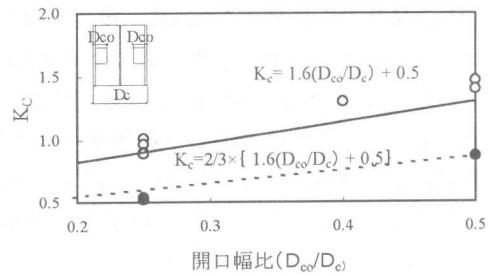


図-5 開口幅比とコンクリート有効幅係数 K_c

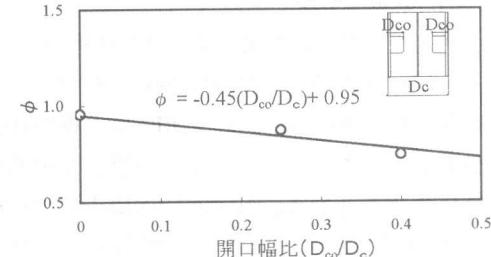


図-6 開口幅比と直交材損失低減係数 ϕ

試験体を●で表す。

開口幅の増大に伴って K_c が線形的に増加していることから(4)式を導いた。また、ト形試験体は、SRC 規準⁶⁾を参考に形状係数を $\beta = 2/3$ とした。ト形試験体は、曲げ降伏試験体であるため、破線は、安全に評価していると考えられる。

(4) ϕ 直交材損失低減係数

直交材損失低減係数 ϕ は、直交中板がなくなった場合のコンクリートの終局負担せん断力の低減率を示している。

せん断破壊した十字形試験体で、中板の開口幅比と直交材損失低減係数 ϕ の関係を図-6 に示す。開口幅の増大に伴って ϕ が減少していることから(5)式を導いた。ここで、 $D_{co}/D_c = 0$ の値は文献 7)の実験結果より算出した。

3.2 実験値と計算値との比較

計算値に対する(2)式による実験値比を図-7に示す。図中で、せん断破壊した試験体を○で、曲げおよび引張破壊を■で表す。

せん断破壊した試験体は、1.0~1.19であり、実験値に概ね対応している。

4. 接合部のせん断剛性評価

接合部剛性を評価するために、接合部をコンクリートと中板の要素に分離し、各要素の平均せん断応力度-せん断変形($\tau - \gamma$)を仮定する。

さらに、同一変形時における各要素の応力に有効断面積を乗じてせん断力を計算し、それらを累加して、接合部に作用するせん断力-せん断変形関係($Q_p - \gamma$)を決定する。

4.1 中板モデル

中板の平均せん断応力度-せん断変形($\tau_w - \gamma_w$)を図-8に示す。初期剛性は、鋼材のせん断弾性剛性($G_s = E_s / 2(1 + \nu_s)$: E_s は中板の弾性係数、 ν_s はポアソン比)とし、第1折れ点のせん断応力度を $0.65 \tau_{wy}$ 、せん断降伏応力時の変形を 0.4% とした⁸⁾。上記のモデルを用いて、中板の負担せん断力は、次の(6)式で表わせる。

$$Q_{pw} = wA \cdot \tau_w \quad (6)$$

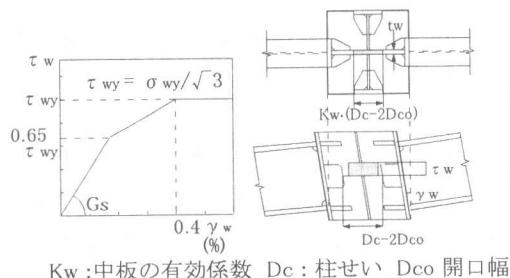
ここで、

Q_{pw} :中板の負担せん断力(N)

wA :中板の有効断面積(mm^2)

$$(=K_w(D_c - 2D_{co})t_w)$$

τ_w :中板の平均せん断応力度(N/mm^2)



K_w :中板の有効係数 D_c :柱せい D_{co} 開口幅

図-8 中板モデル

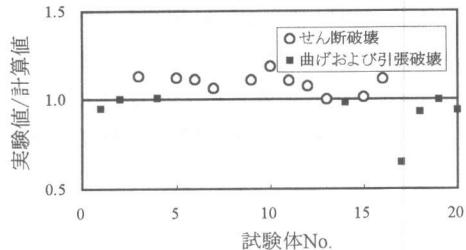


図-7 実験値と計算値の比較

4.2 コンクリートモデル

コンクリート要素は、内部パネル(梁の内側コンクリート)と外部パネル(梁の外側コンクリート)に分け、図-9に示す平均せん断応力度-せん断変形($\tau_c - \gamma_c$)のモデルを適用する。初期剛性は、せん断弾性剛性($G_c = E_c / 2(1 + \nu_c)$: E_c はコンクリートの弾性係数、 ν_c はポアソン比)とし、第1折れ点をひび割れ強度($0.1 \sigma_{cb}$)、第2折れ点を接合部コンクリートせん断強度($0.3 \sigma_{cb}$)と仮定した⁸⁾。

コンクリートの負担せん断力は、各パネルを累加した(7)式で表せる。

$$Q_{pc} = cA_{in} \cdot \tau_{cin} + cA_{out} \cdot \tau_{cout} \quad (7)$$

ここで、

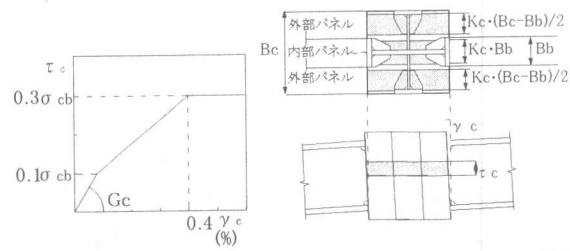
Q_{pc} :コンクリートの負担せん断力(N)

$$cA_{in} : \text{内部パネルの有効断面積} (\text{mm}^2) \\ (=K_c \cdot B_b \cdot D_c)$$

$$cA_{out} : \text{外部パネルの有効断面積} (\text{mm}^2) \\ (=K_c(B_e - B_b) D_c)$$

$$\tau_{cin} : \text{内部パネルの平均せん断応力度} \\ (\text{N/mm}^2)$$

$$\tau_{cout} : \text{外部パネルの平均せん断応力度} \\ (\text{N/mm}^2)$$



K_c :コンクリートの有効幅係数 B_c :柱幅 B_b :梁幅

図-9 コンクリートモデル

また、外部パネルのせん断変形 γ_{out} と内部パネルのせん断変形 γ_{in} は異なることが既にわかっている^{1)~3)}。 γ_{in} と γ_{out} とに一定関係が得られると、接合部に作用するせん断力とせん断変形 ($Q_{pc} - \gamma$) 関係が算定できることが示されている⁸⁾。

図-10 に中板の開口幅比と γ_{in}/γ_{out} の関係を示す。ここで、中板の開口幅比 0 の値は文献 7) より得た。この図から(8)式に示す γ_{out} に対する γ_{in} の関係が得られる。

$$\alpha = \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{out}} = 10 \left(\frac{D_{co}}{D_c} \right)^2 - 0.1 \left(\frac{D_{co}}{D_c} \right) + 2.0 \quad (8)$$

(8)式より、どちらか一方のせん断変形がわかると、(7)式からコンクリートの $Q_{pc} - \gamma$ を求められる。

4.3 接合部の等価せん断変形の提案

接合部モデルの負担せん断力 (Q_p) は、中板モデルとコンクリートモデルを累加した(9)式で表わされる。

$$Q_p = Q_{pw} + Q_{pc} \quad (9)$$

しかし、梁の変形は、内部パネルのせん断変形 γ_{in} に、柱の変形は、外部パネルのせん断変形 γ_{out} に大きく依存する。このため、柱、梁、接合部の挙動で構成されている骨組解析には、そのまま内部パネルおよび外部パネルのせん断変形で解析を行うのは非常に難しい。そのため、簡易に骨組解析を行うための接合部パネル全

$$\delta_p = \frac{L}{2} (1 - v + \alpha - \alpha \cdot u) \gamma_{out} \quad (10)$$

体としての等価せん断変形 (γ_{eq}) を提案する。

接合部変形によって生じる梁端部の変位量 δ_p は、(10)式で示されている⁷⁾。

ここで、内部および外部パネルのせん断変形が等しい ($\alpha=1.0$) 等価せん断変形 (γ_{eq}) を仮定すると、梁端部の変位量 δ_p は(11)式になる。

$$\delta_p = \frac{L}{2} (2 - u - v) \gamma_{eq} \quad (11)$$

この(11)式と(10)式が等しいと仮定して(12)式の関係を得る。

$$\gamma_{eq} = \frac{1 - v + \alpha - \alpha \cdot u}{2 - u - v} \gamma_{out} \quad (12)$$

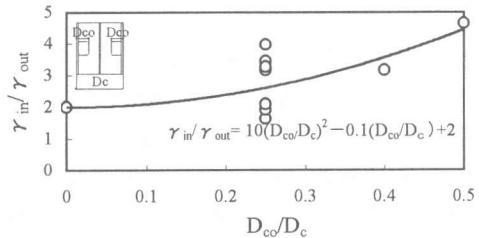


図-10 中板の開口幅比と γ_{in}/γ_{out}

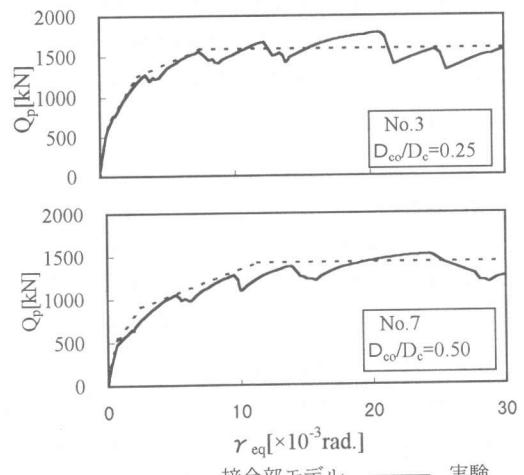


図-11 接合部のせん断力と等価せん断変形

図-11 に、開口幅 ($0.25D_c$, $0.50D_c$) を変化させた試験体について、実験値と、中板モデルとコンクリートモデルを累加した接合部モデルから算出した接合部に作用するせん断力-等価せん断変形の包絡線 ($Q_c - \gamma_{eq}$) を示す。全体的に接合部モデルと実験値を比較すると、接合部モデルは、開口幅の影響が少なく、実験結果を初期から終局まで良好評価している。

4.4 実験値と解析値の比較

図-12 に、提案した接合部モデルのせん断力-等価せん断変形関係 ($Q_p - \gamma_{eq}$) と材料試験結果を用いた静的増分解析の結果と、実験の層せん断力-層間変形 ($Q_c - \delta_c$) を比較して示す。

梁や柱は、材端剛塑性バネモデルとし、柱をコンクリートの曲げひび割れモーメントを第一折れ点、部材の降伏を第二折れ点とし、第三勾配を弾性剛性の $1/1000$ としたトリニア型のスケルトンカ

ープとした。

また、梁に関しては、第1折れ点が梁鋼材の降伏応力となり、第2勾配を梁鋼材の弾性係数の1/1000としたバイリニヤモデルにした。

一方、接合部は、柱の主筋間距離と梁の応力中心間距離を辺とする長方形パネルとして提案モデルを適用した。

実験値と解析値を比較すると、解析値の初期剛性がやや高い傾向を示すものの、中板の開口幅による影響は少なく、耐力を含めた全体的な挙動は、初期から終局まで良く対応している。

5. まとめ

提案した接合部を有する柱 RC-梁 S 造の混合構造接合部の実験結果から、接合部の終局せん断耐力とせん断剛性の評価を行った。その結果、以下の知見が得られた。

①終局せん断耐力について、中板部分とコンクリート部分の終局負担せん断力の累加と仮定し、中板の有効断面積、ふさぎ板による拘束効果、中板の開口幅および直交中板の有無による影響を考慮した評価式を提案した。評価式による計算値は、実験結果と良好な対応がみられた。

②せん断剛性においては、内部パネルと外部パネルのせん断変形関係から求めたコンクリート部分の負担せん断力-せん断変形関係に、中板部分の負担せん断力-せん断変形関係を累加して、接合部に作用するせん断応力-せん断変形を求めるモデル化を提案した。これを適用した静的増分解析結果は、実験結果の層せん断力-層間変形関係を良くシミュレーションしていた。

謝辞

本研究は、鉄建建設株式会社との共同研究であり、関係者に謝意を表します。

参考文献

1)古川淳ほか: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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.2、pp.1467-1472、1997.6

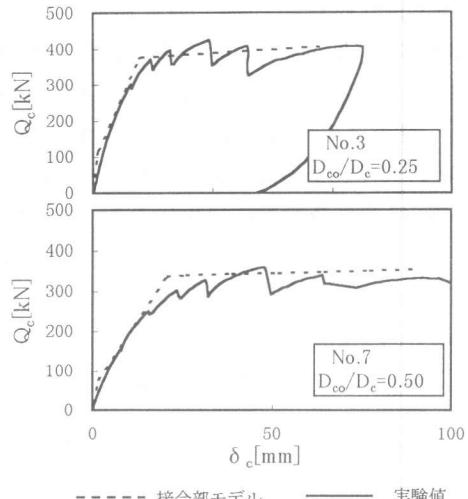


図-12 実験値と解析値の比較

- 2)渕川正四郎ほか: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研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.2、pp.1473-1478、1997.6
- 3)古川淳ほか: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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.3、pp.763-768、1998
- 4)孫玉平ほか:正方形鋼管横補強鉄筋コンクリート柱の曲げ終局強度の算定法、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.131-136、1996
- 5)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
- 6)日本建築学会、鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1987
- 7)鴨川ほか:ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(RCS-10~16)柱貫通型RCS接合部の耐震性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1099-1112、1996.9
- 8)坂口昇:鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁で構成される架構の剛性、耐力および変形、日本建築学会構造系論文報告集、No.437、pp.125-134、1992.