

論文 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造柱・梁接合部のせん断強度に関する調査・検討

林 和也*1・高森 直樹*2・寺岡 勝*3

要旨：圧縮強度 $\sigma_B > 70\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた十字形およびト字形の柱・梁接合部部分架構について、既往の実験データを収集し、その範囲と動向を分析し、さらに柱・梁接合部のせん断ひび割れ強度と最大強度について、既往の評価式により評価が可能かどうか検討した。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱・梁接合部、高強度コンクリート、せん断強度

1. はじめに

設計基準強度 F_c100 程度までの高強度コンクリートと $SD685$ までの主筋を用いた部材の研究は、1988～1993 年にかけて NewRC 総合技術開発プロジェクトで行われた³⁾。さらに最近では、 F_c150 程度までのコンクリートや $SD685$ を超える強度の主筋を用いた部材の開発・研究が行われ、データが蓄積されてきている。現行の設計法としては、コンクリート F_c60 、主筋 $SD390$ までを対象とした AIJ 靱性保証型設計指針²⁾があるが、現状では適用範囲を超える高強度材料においても、個々に実験的な検討を行った上で同式を用いて設計されることが多い。

しかし、高強度材料は、普通強度材料に比べ、鉄筋およびコンクリート共に弾性域が大きいこと、脆性的であること、また、コンクリートの

自己収縮量が大きいことなど、材料の力学特性が異なる。これらが部材の力学性状に与える影響を正確に評価し設計しているか危惧される。

これらの背景から、高強度材料を用いた柱・梁接合部に関し、ひび割れ強度や最大強度に対して、既往の評価式を用いて評価が可能かどうか、実験結果を収集し調査・検討した。

2. 収集データ

収集データは、国内で行われた通常の純ラーメン形式の鉄筋コンクリート造架構を対象とした柱・梁接合部試験体で、接合部コンクリート圧縮強度 $p\sigma_B > 70\text{N/mm}^2$ の十字形 65 体、ト字形 43 体で、壁柱や柱・梁が偏芯するもの、また、特殊補強されたものは含まれていない。 $p\sigma_B$ の最大値は、十字形試験体が 190N/mm^2 、ト字形試

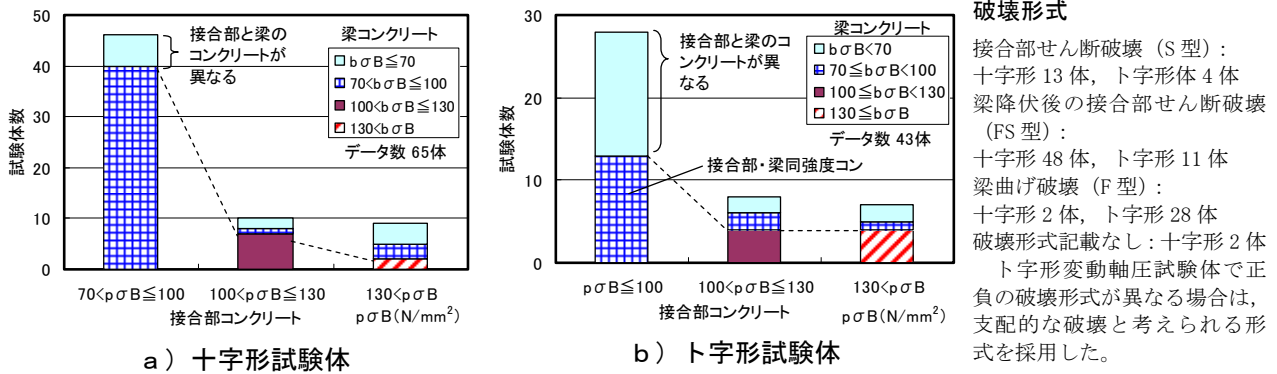


図-1 コンクリート強度別試験体度数

*1 (株)フジタ 技術センター 主任研究員 (正会員)

*2 (株)フジタ 技術センター 主任 修士 (工学) (正会員)

*3 (株)フジタ 技術センター 副所長 博士 (工学) (正会員)

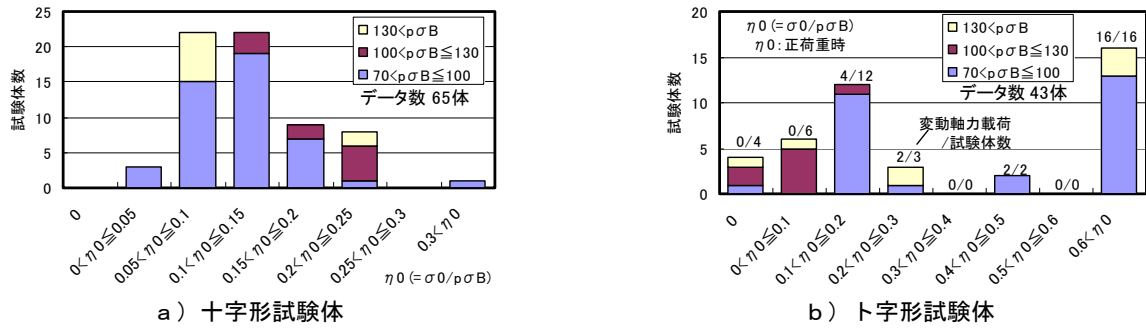


図-2 軸圧比別試験体度数

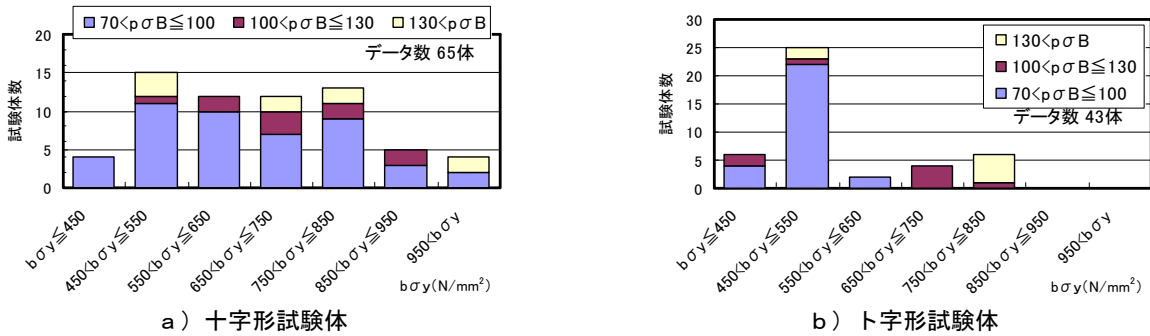


図-3 梁主筋強度別試験体度数

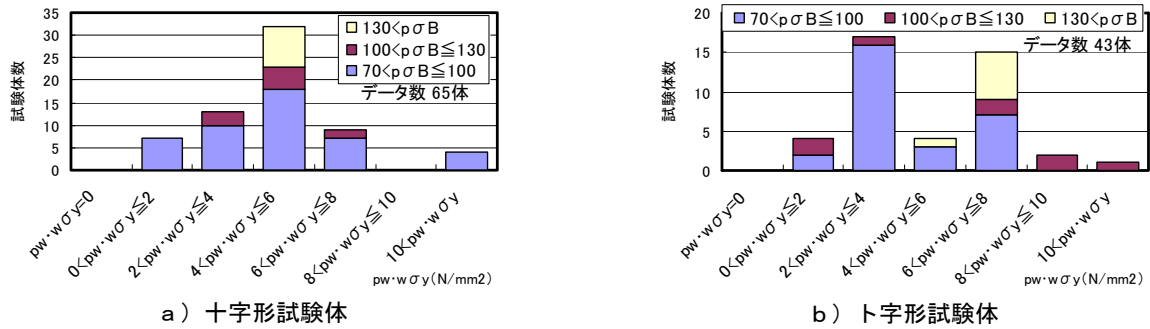


図-4 接合部補強筋量別試験体度数

験体は $179 N/mm^2$ である。データの出典は、十字形試験体は文献 5), 6), ト字形試験体は付表に示したので参照されたい。図-1~4に、主要な要因別の試験体度数の分布を示す。収集データには、 $\rho \sigma_B$ に対し梁のコンクリート強度 $b \sigma_B$ が低いものが十字形で 16 体、ト字形で 19 体含まれている。このデータについても接合部コンクリートとして $\rho \sigma_B$ を用いて検討を行った。

試験体の寸法は、柱幅×柱せい($bc \times Dc$) = $30 \times 30 \sim 55 \times 55$ (cm×cm) で、実大に対し $1/3 \sim 1/2$ 縮尺寸法であった。軸圧比 $\eta_0 (=N/(bc \times Dc), N:$ 軸力) は、十字形では $\eta_0 = 0.05 \sim 0.15$ の範囲の試験体が全体の 68% を占め、また、ト字形では変動軸力を与えているものが 55% あり、 η_0 の最大は 0.7 であった。十字形の梁主筋は、SD490、

590,685,785 級のそれぞれがほぼ同様の割合で使われていた。また、ト字形では SD490 以下が 72% と十字形に比べ接合部の入力レベルを低く抑えたものが多く、収集試験体の 2/3 が梁曲げ破壊型であり、性能確認実験的なものの割合が多い。接合部の横補強筋には、ほとんどの試験体が高強度せん断補強筋を用いており、補強量 $p_w \cdot w \sigma_y$ (p_w : 接合部せん断補強筋比, $w \sigma_y$: 補強筋強度) は、 $3 \sim 8 N/mm^2$ の範囲が多い。

破壊形式の判別は、各出典の記述を優先した。ただし、記載の荷重-変形関係や破壊状況図、主筋降伏の記述等を基に再考し、十字形、ト字形夫々 2 体では破壊形式を変更した。また、接合部のせん断力は、梁端モーメントの算出位置を柱主筋位置とし計算した (図-13 参照)。

3. 接合部せん断ひび割れ強度

せん断ひび割れ発生時の接合部せん断応力度は、十字形、ト字形共に接合部の有効幅を柱幅 b_c 、有効せいを柱応力中心間距離 j_c として算出した。計算値 $c\tau_{pcr}$ は主応力度式によった。なお、コンクリートの引張り強度は $\sigma_t = 0.50\sqrt{p\sigma_B}$ (N/mm^2) と仮定した。また、高強度材料を用いる架構では、普通強度材料の架構に比べ柱軸筋量が多く、さらに芯鉄筋を有する場合も多い。これを考慮し、式中の軸応力度はコンクリートの等価断面積による平均軸応力度 σ_{0e} (表-1, 図-13 参照) を用いて検討した。

3.1 十字形柱・梁接合部

図-5 に、十字形試験体について接合部せん断ひび割れ発生時の接合部のせん断応力度の計算値に対する実験値 ($\tau_{pcr}/c\tau_{pcr}$) と $p\sigma_B$ との関係を示す。 $\tau_{pcr}/c\tau_{pcr}$ の平均値 mx は、0.94 で概ね良い対応を示している。しかし、ばらつきが大きく、下限値は、計算値の0.5倍であった。これは、文献1) による $p\sigma_B < 50$ (N/mm^2) の調査結果より、ややばらつきが大きいもののほぼ同様な結果である。

図-6 に、実験値から主応力度式を用いて σ_t を逆算し、それを $\sqrt{p\sigma_B}$ で除した係数 k を $p\sigma_B$ および柱引張鉄筋比 cP_t との関係で示す。収集データから、ひび割れに対する軸力の影響が小さい軸圧比が小さい場合に、 $p\sigma_B$ が大きいほど、また、 cP_t が多いほど、 k が小さくなる傾向が見られる。これは、自己収縮による内部拘束応力が作用すると考えた場合の傾向と一致する。

3.2 ト字形柱・梁接合部

図-7, 8 にト字形試験体について接合部せん断ひび割れ発生時の接合部のせん断応力度の計算値に対する実験値 ($\tau_{pcr}/c\tau_{pcr}$) と $p\sigma_B$ およびひび割れ発生時軸応力度 σ_{0e} ($=N/A_e$, A_e : コンクリートの等価断面積) との関係を示す。

計算時の軸力値には、ひび割れ発生時の載荷値を用いた。 $\tau_{pcr}/c\tau_{pcr}$ の平均値 mx は 0.73 であり、十字形試験体に比べ低く、特に軸力を変動させ、高軸力を与えた試験体で計算値を大き

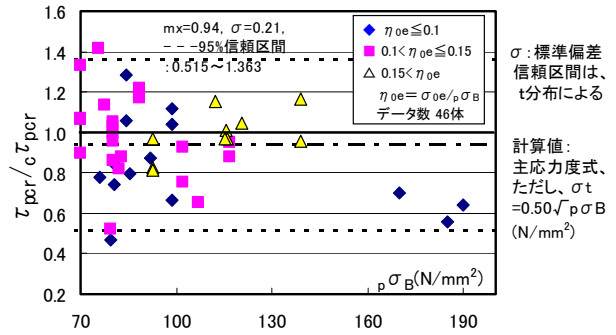


図-5 接合部せん断ひび割れ発生荷重の実験値/計算値と $p\sigma_B$ との関係 (十字形)

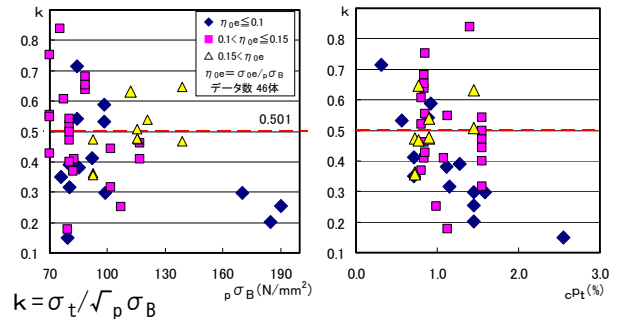


図-6 $p\sigma_B$, cP_t と k との関係 (十字形)

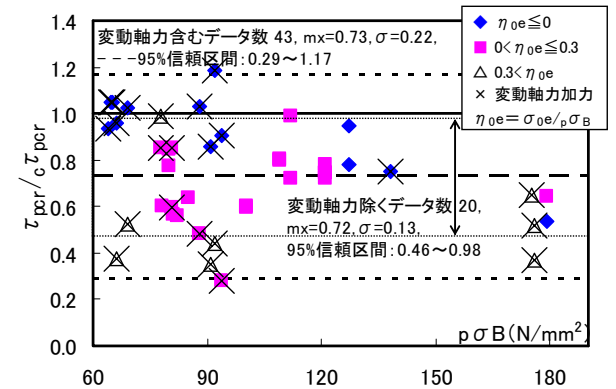


図-7 接合部せん断ひび割れ発生荷重の実験値/計算値と $p\sigma_B$ との関係 (ト字形)

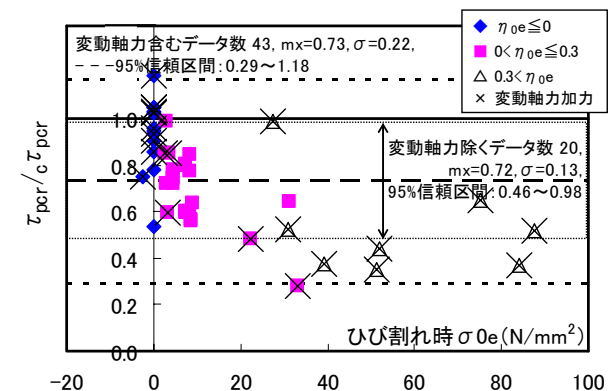


図-8 接合部せん断ひび割れ発生荷重の実験値/計算値とひび割れ時 σ_{0e} との関係 (ト字形)

く下回る傾向が見られた。この一因として、ト字形試験体は、左右非対称のため 接合部断面内の軸力分布の偏りが生じ、ひび割れ発生場所での軸応力度が計算で用いている平均軸応力度と異なっていることが考えられる。

4. 柱・梁接合部の最大せん断強度

4.1 十字形柱・梁接合部

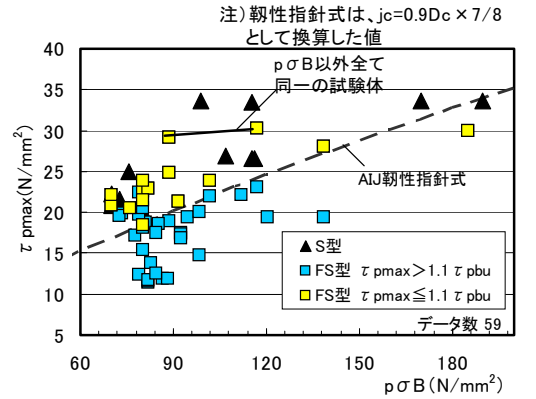
図-9に、接合部のコンクリート強度 $p\sigma_B$ と接合部最大せん断応力度 τ_{pmax} との関係を示す。 τ_{pmax} の算出にあたり、梁端接合部の有効幅は柱幅と梁幅の平均 ($[b_b + b_c]/2$)、接合部のせいは柱の応力中心間距離 j_c とした (表-1, 図-13 参照)。図中、AIJ 靱性指針²⁾による計算値は、 $j_c = 0.9D_c \times 7/8$ として換算し、 $p\sigma_B \leq 60N/mm^2$ の適用範囲を超えて適用した。

AIJ 靱性指針による計算値は、ほぼS型の下限値に相当していた。

図-10a, b に AIJ 靱性保証型設計指針式および寺岡らの提案式¹⁾ による接合部せん断強度計算値 (表-1 参照) と接合部最大せん断力実験値との対応を示す。

S 型の実験値は、寺岡らの提案による下限値式の値、あるいは AIJ 靱性指針式による計算値を下回るものは無い。S 型の破壊に対し、これらの式の評価の適合性は、同程度であった。

S 型と FS 型を併せた実験値に対して、寺岡らの提案式の実験値/計算値の平均 mx は 0.95, t 分布による 95%信頼区間は 0.72~1.17 であった。これは、文献 1) による調査結果の適合性 ($p\sigma_B < 500 (kg/cm^2)$ の範囲: 平均値 $mx=1.009$, 95%信頼区間 0.739~1.279, $p\sigma_B = 600 \sim 1200 (kg/cm^2)$ の範囲: $mx=0.985$, 95%信頼区間 0.763~1.207) に対し、実験値/計算値がやや小さく、高強度材料ではやや高めの値を予測していた。一方、S 型と FS 型を併せた実験値に対する AIJ 靱性指針式の適合性は、 $mx=1.07$ であり、95%信頼区間は 0.69~1.45 であった。先述のように、因子として $p\sigma_B$ のみの AIJ 靱性指針式は、実験値のばらつきが大きく、寺岡らの提案式の方が



注) τ_{pbu} : AIJ 梁曲げ耐力計算値時の接合部せん断応力度

図-9 接合部コンクリート強度と接合部最大せん断応力度との関係 (十字形)

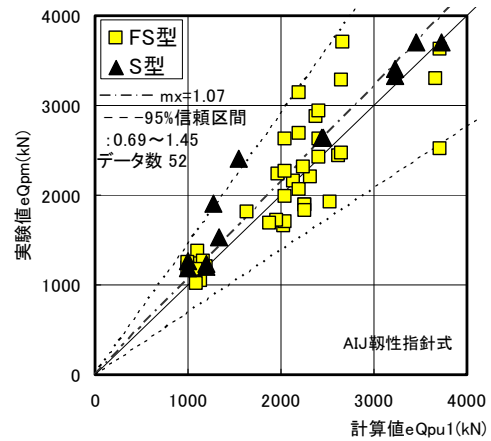


図-10a 接合部せん断耐力の実験値と計算値の適合性 (十字形, AIJ 靱性指針式)

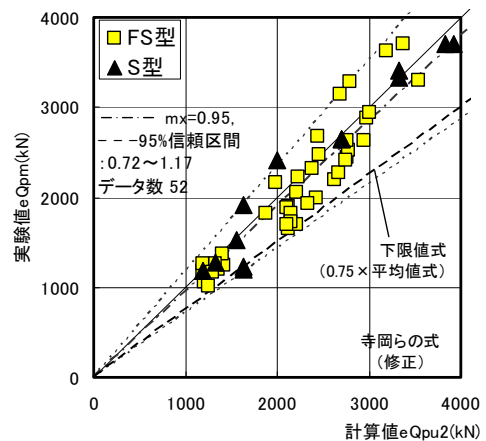


図-10b 接合部せん断耐力の実験値と計算値の適合性 (十字形, 寺岡らの提案式)

精度良い経済的な設計が可能である。

4.2 ト字形柱・梁接合部

図-11 にト字形試験体での接合部コンクリート強度と接合部最大せん断応力度 τ'_{pmax} との関係を示す。 τ'_{pmax} の算出にあたり、梁端接合部の有効幅は柱幅と梁幅の平均、接合部の有効せいは柱面からの接合部内梁主筋水平投影長とした(表-1, 図-13 参照)。FS型破壊の内、AIJ 靱性指針式を下回るものは、軸圧縮破壊を伴った試験体であった。高軸圧下での軸圧縮破壊に対しては、芯鉄筋や横補強筋を十分配すなどの配慮が必要である。

図-12a, b にト字形で軸圧縮破壊を伴わず S 型, FS 型破壊した試験体について接合部最大せん断強度の実験値/計算値を $p\sigma_B$ との関係で示す。寺岡らの提案式¹⁾と比較する τ'_{pmax} の算出にあたり、梁端接合部の有効せいは、柱主筋位置からの接合部内梁主筋水平投影長とした。なお、寺岡らの提案式は S 型破壊に対する評価式である。S, FS 型に対し、AIJ 靱性指針式では、平均値 $m_x=1.38$, 95%信頼区間は 1.07~1.70 と計算値を下回るものは無く、寺岡らの提案式では、 $m_x=0.94$, 95%信頼区間は 0.69~1.19 で、データ数が少数ではあるが良い対応を示した。また、S 型に対する寺岡らの提案式の適合性(図中参)は、文献 1) による $25 < p\sigma_B < 90 \text{ N/mm}^2$ の範囲での適合性 ($m_x=1.00$, 95%信頼区間 0.85~1.15) に比べ、実験値/計算値がやや小さかった。

5. まとめ

高強度材料を用いた柱・梁接合部の耐震性能評価法を得る目的の一環として、接合部コンクリート圧縮強度 $p\sigma_B > 70 \text{ (N/mm}^2)$ の十字形およびト字型の部分架構の実験データを収集し、接合部のせん断ひび割れ強度および最大耐力について、既往の評価式の適合性を調査・検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 接合部のせん断ひび割れ強度は、 $p\sigma_B > 70 \text{ (N/mm}^2)$ においても、 $p\sigma_B \leq 70 \text{ (N/mm}^2)$ のコンクリートの延長にあり、平均値は主応力度式により評価できた。ただし、特に変動軸力

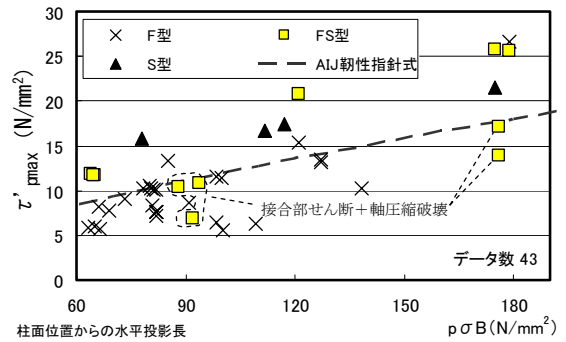


図-11 接合部コンクリート強度と接合部最大せん断応力度との関係 (ト字形)

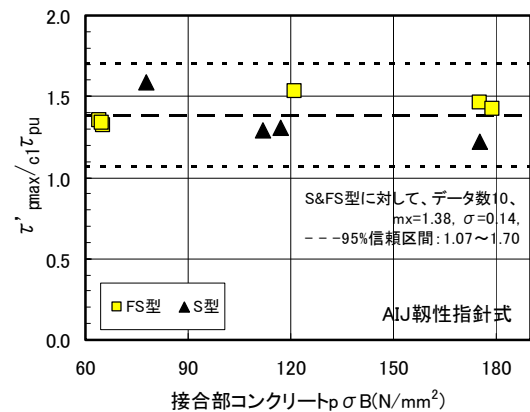


図-12a 接合部最大せん断強度の実験値/計算値と $p\sigma_B$ との関係 (ト字形, AIJ 靱性指針式)

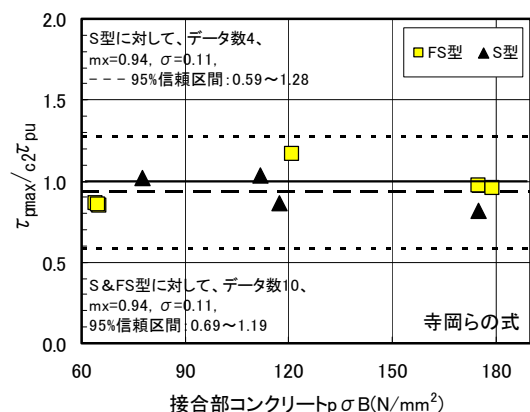


図-12b 接合部最大せん断強度の実験値/計算値と $p\sigma_B$ との関係 (ト字形, 寺岡らの提案式)

を受ける外部柱梁接合部では、実験値がやや低めとなる傾向が見られ、注意が必要である。

- (2) $p\sigma_B > 70 \text{ (N/mm}^2)$ においても、AIJ 靱性指針式および寺岡らの提案式を用いることにより、柱・梁接合部耐力の評価が可能であった。
- (3) 接合部の最大せん断強度は、AIJ 靱性指針式より寺岡らの提案式の方が精度良く推定できた。

付表 実験データ引用文献と 引用試験体の主な因子 (ト字形試験体)

試験体名	筆頭者	文献注1)	形状 H×L (cm×cm)	軸圧 (N/mm ²)	柱		梁				接合部			梁主筋 定着 方法 注2)	試験体数 破壊形式 注3)		
					Bc×Dc (cm×cm)	cpt (%)	bb×Dc (cm×cm)	bσB (N/mm ²)	bpt (%)	bσy (N/mm ²)	pσB	pw (%)	wσy (N/mm ²)		F型	FS型	S型
J-3~6	多田	96AIJ	123×110	10.3~10.3	30×30	1.28	23×28.5	52.9	1.57	415	82.1	0.3	713		4		
OND, ONS他	丸田	00所報	126×116, 225×200	45.7,41.2, 41.0~21, 122~34	42.5×42.5, 47.5×47.5	0.55,0.44	30×32.5, 32.5×45	45.2~ 64.5	1.90,2.4	512,524	63~66	0.55	1203	機械的		3	3
TC, TV-1~3	真田	03所報	120×105	0.0	30×30	1.28	22×30	179,175	4.09,3.01	784,539	179,176	0.44	1463	機械的		4	1
ト形	黒瀬	94AIJ	140×120	0.0	38×38	0.99	25×38	73.4	1.54	567	73.4	0.57	1368	不明	1		
J01,02	中澤	00AIJ	130×128	0.0	36×36	0.89	28×36	72.0	2.06	722	127.0	0.67	1387	機械的		2	
J13	中澤	01AIJ	140×150	6.0	40×40	1.45	31×40	52.0	3.37	710	117.2	0.8	1282	機械的			1
BC-B1,P1	鈴木	02AIJ	126×140	36.8~3	40×40, 35×35	0.90,1.17	28×44	74.2,77.8	1.71,3.37	536,521	81.77	0.43	346	機械的		1	1
NO4	原	01AIJ	280×130	25~0	40×40	0.50	25×40	49.3	1.90	563	99.9	0.4	1306	機械的		1	
N.F1000	村井	95AIJ	135×115	10.7	30×30	1.29	24×40	100,109	1.19	401	100.2	0.21	339	折り曲げ		2	
O8C	木村	97JCI	160×190	10.60~0	47.5×47.5	0.86	32.5×45, 42.5×29.5	68~90	1.7~2.5	522	80~94	0.25	928	折り曲げ		3	3
O8C31他	木村	99JCI	160×190	10.54~0	47.5×47.5	0.86	32.5×45	78~85	1.82,2.5	548	78~85	0.24,0.26	857	折り曲げ		5	
KJOP	石川	04JCI	151.2×190	46.2~0	47.5×47.5	0.69	34×42.5	66.0	1.82	511	66.0	0.36	870	機械的		1	
J2	宮下	04AIJ	160×150	19.6	40×40	0.72	24×39	57.8	1.37,2.90	529	98.3	0.4	1389	機械的		2	
J3	岩岡	04AIJ	160×127	3.9	38×38	0.99	25×40	111.8	2.75	785	111.8	0.24	1008	折り曲げ			1
NO3.4	石渡	04AIJ	175×157.5	6.1	35×35	0.94	28×35	121.61	2.90	716,531	121.0	0.43	1455	機械的		1	1
J3	鳥居	03AIJ	200×150	35.1~17.8	45×45	0.76	32×45	75.5	1.21	776	138.2	0.56	986	機械的		1	

注1) AIJ：日本建築学会大会学術講演梗概集,構造, JCI：コンクリート工学年次講演論文報告集,

注2) 折り曲げ定着1体, 機械的定着2体, 上端筋機械的+下端筋折り曲げ定着1体, 注3) 破壊モードの表記は図-1参照

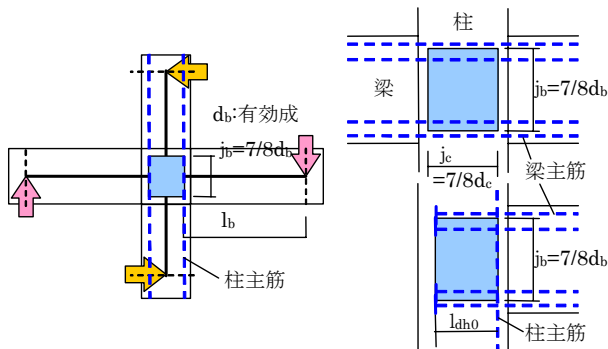


図-13 接合部有効断面積の考え方

謝辞 本調査のデータベースとして貴重な資料を引用させていただきました研究者方々に深謝いたします。参考文献として記すべきところですが、紙面の都合上、十字形試験体では、文献5), 6) 中の記載で、また、ト字形試験体では、付表にて変えさせていただきます。

参考文献

- 寺岡勝：高層骨組における柱・梁接合部の耐震設計法に関する研究，フジタ技術研究報告，増刊第5号，1997.
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999.
- 国土開発技術研究センター：NewRC 研究開発概要報告書，1993.5.
- 村上秀夫，藤井栄，石渡康弘，森田司郎：鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断強度に関する検討（接合部データベース解析その1,その2），日本建築学会構造系論文集，

表-1 実験値算出方法および評価式

<p>接合部せん断ひび割れ強度実験値算出法 $\tau_{pcr} = Q_{pcr} / (b_c \times j_c)$，ただし，$Q_{pcr}$：せん断ひび割れ発生時の接合部せん断力 Q_p，b_c：柱幅，j_c：柱応力中心間距離，$Q_p = (M_{bL} + M_{bR}) / j_b - Q_c$，$M_{bL}$，$M_{bR}$：柱主筋位置での左右梁モーメント，$j_b$：梁応力中心間距離，$Q_c$：柱せん断力</p> <p>接合部せん断ひび割れ強度評価式 $c \tau_{pcr} = \sqrt{(\sigma_t^2 + \sigma_0 e \cdot \sigma_t)}$: 主応力度式，$\sigma_t = 0.501 \sqrt{p \sigma_B}$，$p \sigma_B$：接合部コンクリート強度，$\sigma_0 e = N / A_e$，$N$：ひび割れ発生時の軸力，$A_e$：コンクリートの等価断面積（芯鉄筋を含んだ柱軸筋。コンクリートのヤング係数が $\sigma - \epsilon$ 関係のどの時点であるかの定義は，各出典文献による。）</p> <p>接合部最大せん断強度実験値算出法 $\tau_{pmax} = Q_{pmax} / ((b_c + b_b) / 2 \times D_j)$，ただし，$Q_{pmax}$：最大荷重時接合部せん断力 Q_p，b_b：梁幅，〔十字形試験体〕$D_j = j_c$，〔ト字形試験体〕$D_j = l_{dh0}$：柱主筋位置からの梁主筋水平投影長，ただし τ'_{pmax} では $D_j = l_{dh}$：柱面位置からの梁主筋水平投影長</p> <p>接合部最大せん断強度評価式 1 AIJ靱性保障型設計指針式²⁾ 接合部最大せん断強度評価式 2¹⁾ [注]この式のみ MKS 単位 [十字形] $\tau_{pu} = 0.133 b_p t_e^{0.32} \cdot c p t^{0.19} \cdot f(p \sigma_B) \cdot (j_b + j_c) / \sqrt{(j_b^2 + j_c^2)}$ $+ 0.25 p_w \cdot w \sigma_y$，〔ト字形〕$\tau_{pu} = 1.32 b_p t_e^{0.66} \cdot (l_{dh} / d_{bd})^{0.28} \cdot p \sigma_B^{0.46} \cdot (j_b + j_c) / \sqrt{(j_b^2 + j_c^2)} + 0.4 p_w \cdot w \sigma_y$，ただし，$b_p t_e = b_p t \cdot b \sigma_y / 4000$ ($b \sigma_y > 4000$ 時)，$f(p \sigma_B) = 0.435 p \sigma_B + 426$ ($p \sigma_B \leq 900$ 時)，$f(p \sigma_B) = 0.116 p \sigma_B + 713$ ($p \sigma_B > 900$ 時，原式¹⁾を修正⁵⁾)</p>

- No.503, pp.85~92, 1998, No.523, pp.103~110, 1999.
- 林和也，高森直樹，寺岡勝：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部のせん断強度に関する調査・検討，フジタ技術研究報告，第40号，pp.45-50, 2004.
- 林和也，高森直樹，寺岡勝：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部のせん断強度に関する調査・検討，日本建築学会学術講演梗概集 構造IV，pp.253~254, 2005.