

論文 鉄筋コンクリート内柱梁接合部のせん断強度

李 祥浩*¹・小谷 俊介*²

要旨：RC造内柱梁接合部のせん断強度時のせん断抵抗機構をストラットとトラス機構の共存モデルと仮定し、そのモデルに基づき、接合部コンクリートの有効圧縮強度、ストラットの幅及び角度を定量化した。またこれらを用いた接合部せん断強度の計算値と実験値を比較検討した。更に実用的なせん断強度式を提案し、その対応性を検討した。
キーワード：鉄筋コンクリート、内柱梁接合部、せん断抵抗機構、せん断強度

1. はじめに

最近、日本の鉄筋コンクリート（RC）造内柱梁接合部のせん断強度の評価式は、実験式からせん断抵抗機構に基づいたせん断強度式へ移行しつつある。筆者らは、柱軸力、接合部横補強筋などのパラメータが接合部のせん断強度やその時の接合部コンクリートの応力状態に与える影響を調べるために、張ら[1]が開発した非線形有限要素解析プログラムを用いて、パラメータ解析を行った[2]。また、接合部パネルでのコンクリートがせん断圧縮破壊する時の入力せん断力に対して、ストラット作用力とトラス作用力の負担割合を仮定し、その時の接合部コンクリートの圧縮強度（有効圧縮強度と呼ぶ）を求める簡単な解析方法について検討した[3]。これらの検討結果をもとに、本研究ではRC造内柱梁接合部のせん断抵抗機構に基づいたせん断強度の評価方法について検討した。すなわち、梁曲げ降伏以前に接合部コンクリートがせん断圧縮破壊した実験データから、前述の解析方法[3]を用い、接合部コンクリートの有効圧縮強度、ストラットの幅および角度を求めて定量化した。また、これらを用いた接合部せん断強度の計算値と実験値を比較し、計算値の精度について検討した。さらに実用的なせん断強度式を提案し、既往の実験データとの対応性について検討した。

2. せん断抵抗機構モデルの仮定

接合部のせん断抵抗機構モデルを仮定する前に、有限要素解析法から得られた解析結果[2]のなかで、せん断抵抗機構と関連性があると考えられる解析結果を以下のように示す。

- ①接合部への入力せん断力は主にコンクリートの圧縮ストラット機構により伝達される、
- ②接合部横補強筋量が多くなるにつれて接合部パネルで流れる圧縮主応力度の幅が広がる、
- ③柱軸力はストラットの幅および角度と密接な関係にあり、柱軸力が増大するにつれてストラットの幅および角度が増大する、などである。

以上の定性的な傾向を考えるとParkら[4]の提案モデル（ストラット機構とトラス機構の共存）は接合部のせん断抵抗機構を十分表されるモデルであると思われる。そこで本研究では接合部せん断強度時のせん断抵抗機構をストラット機構とトラス機構の共存モデル（図1）と仮定した。

3. 解析の方法

3. 1 解析の対象：対象とする柱梁接合部は、①スラブおよび直交梁がない平面十字形、②接

* 1 東京都立大学助手 工学部建築学科、工博（正会員）

* 2 東京大学教授 工学部建築学科、工博、Ph. D.（正会員）

合部横補強筋と柱中段筋を有する、③接合部内あるいは廻りに特殊な補強がない、④梁の左右対称及び柱の上下対称、⑤柱と梁の偏心がなく、接合部の形状が正方形に近い、⑥梁主筋および柱主筋は接合部内を通し配筋される、ものとする。

3. 2 解析の仮定：解析で用いた主な仮定事項は、①ストラットの幅(D)は一定である、②トラス機構は接合部パネルで斜めせん断ひび割れが発生した後に

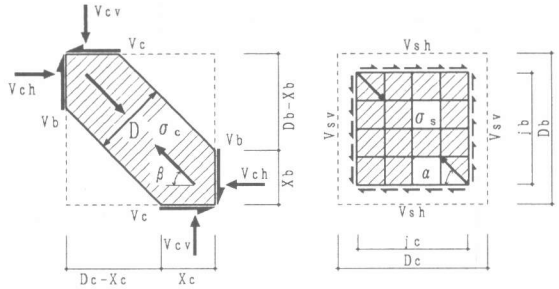
形成される機構とし、トラスの角度(α)はせん断ひび割れの角度と同一とする、③ストラット機構での梁端部および柱端部からのコンクリート圧縮力は部材端部の圧縮域(X_b 、 X_c)に一樣に分布している、④接合部の有効幅(b_j)は梁幅と柱幅の平均値とする、⑤コンクリートの引張力は無視する、などである。なお、これ以外の仮定事項や接合部廻り応力の算定方法については文献[3]に譲りたい。

3. 3 計算の手順：①最大耐力時の梁および柱の曲げモーメントから曲げ解析を用いて接合部廻りの主筋力を計算、②断面力の釣合からコンクリートの圧縮力および圧縮域を計算、③トラス機構の負担分(V_{sh} 、 V_{sv})およびその時の圧縮応力度($\sigma_s = V_{sh}/(b_c \cdot j_c) \cdot (\tan \alpha + \cot \alpha)$ 、 b_c は柱幅、 j_c は接合部パネルの水平方向の距離)を計算、④ストラット機構の負担分(V_{ch} 、 V_{cv})およびその時の圧縮応力度($\sigma_c = \sqrt{V_{ch}^2 + V_{cv}^2}/(b_j \cdot D)$)を計算、⑤最大耐力時のコンクリートの圧縮応力度($\nu \sigma_B = \sigma_s + \sigma_c$ 、角度の差無視)を計算、する。

4. 接合部せん断強度の検討

接合部のせん断抵抗機構モデルを用いて、せん断強度(接合部がせん断圧壊する場合)を評価しようとする、接合部コンクリートの有効圧縮強度、ストラットの幅および角度の適切な評価が重要になる。ここでは、前述の解析方法に従い、梁曲げ降伏前に接合部がせん断圧縮破壊した既往の実験データ(表1、19体)を用いて、接合部コンクリートの有効圧縮強度、ストラット幅および角度を求め、その定量化を試みる。

4. 1 有効圧縮強度：接合部内梁主筋の付着強度を $4\sqrt{\sigma_B}$ (σ_B はコンクリート圧縮強度、[5])として、前述の解析方法で求めた接合部コンクリートの有効圧縮強度($\nu \sigma_B$ 、 $\sigma_B^{2/3}$ で基準化)と接合部横補強筋力($\rho_{jh} \cdot \sigma_{jhy}$ 、 $\sigma_B^{2/3}$ で基準化、 ρ_{jh} および σ_{jhy} は接合部横補強筋比および降伏強度)との関係を図2に示す。解析から求めた $\nu \sigma_B$ はかなりばらついているが、接合部



(a)ストラット機構 (b)トラス機構

図1 接合部のせん断抵抗機構

表1 引用した実験データの一覧

実施機関	試験体名	文献
東京大学	I1	JCI年次1992, pp. 379-384
千葉大学	OKJ-3, OKJ-5	AIJ大会1991, pp. 577-578
前田建設	JS-36-20, JS-36-18 JS-48-20, JS-48-18 JS-60-18	AIJ大会1991, pp. 579-582
鹿島建設	J-600-70, J-600-70A	AIJ大会1991, pp. 587-588
フジタ工業	HNO 4, HNO 6	JCI年次1990, pp. 633-638
建築研究所	J2	AIJ大会1989, pp. 459-462
京都大学	A1, A2, A3, A4	AIJ大会1989, pp. 439-442
千葉大学	WJ4, WJ6	JCI年次1988, pp. 497-500

JCI年次：コンクリート工学年次論文報告集の略

AIJ大会：日本建築学会大会学術講演梗概集の略

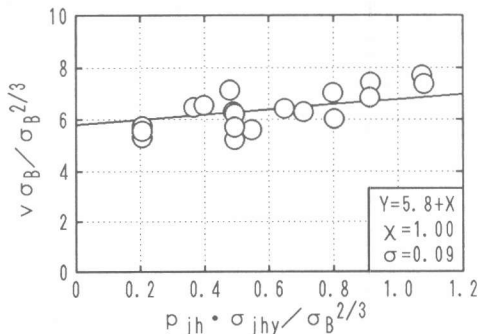


図2 $\nu \sigma_B - \rho_{jh} \cdot \sigma_{jhy}$ の関係

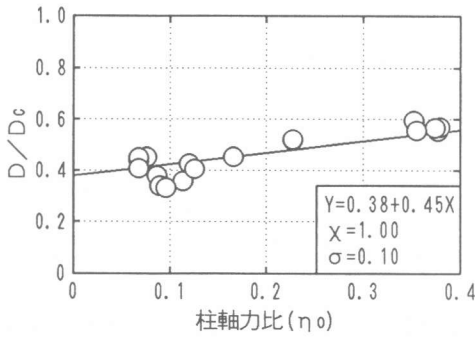


図3 D/Dc-ηoの関係

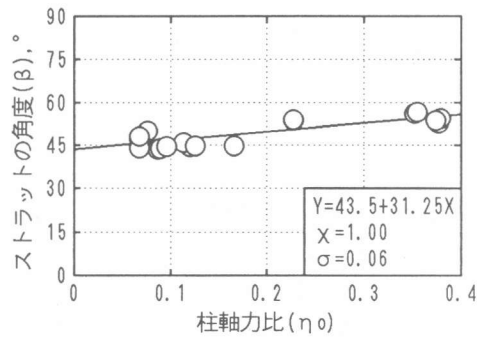


図4 β-ηoの関係

横補強筋比の増大とともに若干増大する傾向が見られる。ここでは、 $\nu\sigma_B$ の平均値（図の中の
実線、 σ は標準偏差）を用い、式（1）のように定量化する。なお、CEB-CODE式（ $\nu\sigma_B=3.68$
 $\sigma_B^{2/3}$ 、[6]）はかなり低めの評価式になっている。それは、CEB-CODE式がT形梁の実験結果か
ら得られたウェブ部分でのコンクリートの有効圧縮強度（下限値）であることが考えられる。

4. 2 ストラットの幅：解析から求めたストラットの幅（D、柱せい D_c で基準化）と柱軸力
比（ η_o ）の関係を図3に示す。ばらつきは大きいのが、柱軸力が大きくなるとストラットの幅は
大きくなる。ここでは、ストラットの幅（単位：cm）を式（2）のように定量化する。

4. 3 ストラットの角度：解析から求めたストラットの角度（ β ）と柱軸力比の関係を図4に
示す。ばらつきはあるが、柱軸力の増大とともにストラットの角度も大きくなる傾向が見られる。
ここでは、ストラットの角度（単位：°）を式（3）のように定量化する。

$$\nu\sigma_B = (5.80 + p_{jh} \cdot \sigma_{jhy} / \sigma_B^{2/3}) \cdot \sigma_B^{2/3} \quad (1)$$

$$D = (0.38 + 0.45\eta_o) \cdot D_c \quad (2)$$

$$\beta = 43.5 + 31.25\eta_o \quad (3)$$

4. 4 ストラットの形状：文献[2]の有限要素解析から得られた接合部コンクリートの主応力
度図（最大耐力時で、接合部横補強筋がない場合）とせん断強度時の圧縮ストラットの形状（式
（2）および式（3）から求める）を図5に示す。柱軸力が大きくなるに従って、ストラットの
幅や角度が大きくなり、せん断強
度時のストラットの形状は式（2）
および式（3）で概ね評価できると
考えられる。

4. 5 接合部のせん断強度：接
合部のせん断強度（ V_{csl} ）を式
（4）のように、トラス機構の負
担せん断力とストラット機構の負
担せん断力の和で、 V_{sh} および V_{ch}
は式（5）および式（7）で評
価する。なお、トラス機構におい
て、水平方向の負担せん断力は鉛
直方向の負担せん断力の影響を受
けないと仮定している。

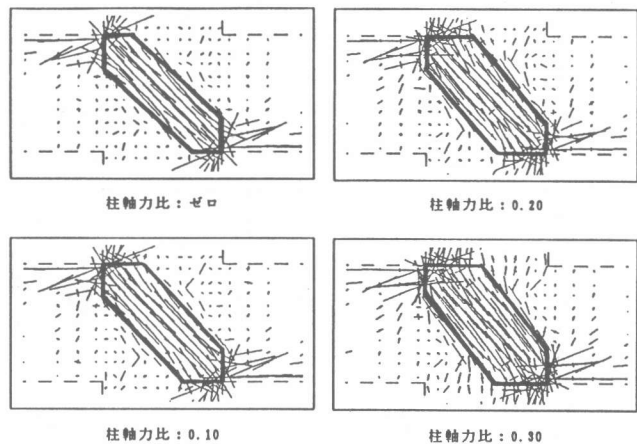


図5 せん断強度時の圧縮ストラット形状

$$V_{cal} = V_{sh} + V_{ch} \quad (4)$$

$$V_{sh} = b_c \cdot j_c \cdot p_{jh} \cdot \sigma_{jhy} \cdot \tan \alpha \quad (5)$$

$$\leq 4\sqrt{\sigma_B} \cdot \Sigma \phi_b \cdot j_c \quad (6)$$

$$V_{ch} = (\nu \sigma_B - \sigma_s) \cdot D \cdot b_j \cdot \cos \beta \quad (7)$$

ここで、 α はトラス作用力の角度 ($\tan \alpha = \sqrt{1 + (\sigma_o / \sigma_t)}$ 、 σ_o は柱軸方向応力度、 σ_t はコンクリート引張強度(友澤ら[7]の研究による、 $\sigma_t = 1.07 \sigma_B^{0.566} \text{kgf/cm}^2$)、 $\Sigma \phi_b$ は接合部内梁主筋の周長の和である。

4. 6 実験値との比較：1985年から1993年までの日本建築学会大会学術講演梗概集や日本コンクリート工学年次論文報告集に報告されている実験データのうち、梁降伏前に接合部がせん断破壊した試験体39体に対して、式(4)から求めた接合部せん断強度の計算値を実験値(V_{exp})と比較して図6に示す。接合部せん断強度の実験値/計算値は、平均値が1.023、標準偏差が0.130程度で、比較的ばらつきが小さい。また、各パラメータに対しても影響が少なく、計算値が実験値の概ね±20%程度の精度で推定していると考えられる。

5. 実用的なせん断強度式

ここでは、接合部のせん断強度式(4)を実用的なせん断強度式として簡略化する。平面柱梁接合部(試験体I1、[8])の形状と接合部横補強筋の降伏強度($\sigma_{jhy} = 3670 \text{kgf/cm}^2$)を用いて、コンクリート圧縮強度($\sigma_B = 400, 800 \text{kgf/cm}^2$)、柱軸力比($\eta_o = 0 \sim 0.4$)、接合部横補強筋比($p_{jh} = 0.0 \sim 2.4\%$)をパラメータとして求めた接合部のせん断強度(式(4)を使用)を図7に示す。この図から、接合部横補強筋量の増大とともに、柱軸力が高い場合よりも低い場合にせん断強度の上昇が顕著に表れ、その傾向はコンクリート圧縮強度が高いほど顕著になっている。接合部横補強筋比がゼロの場合には接合部に作用するせん断力をストラット機構のみで抵抗することを意味し、トラス機構の負担割合は柱軸力の大小によって異なるが、その寄与度は小さいと考えられる。ここでは、せん断強度式(4)～(7)の複雑さを避けて、トラス機構の

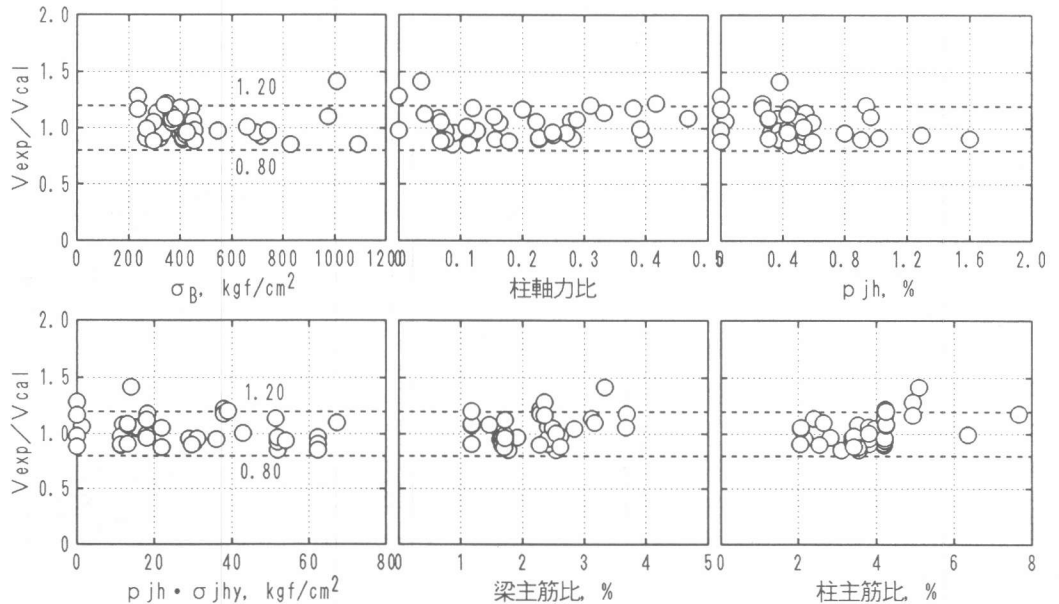


図6 実験値と計算値の比較

負担割合を無視 ($p_{jh} = \text{ゼロ}$) し、また柱軸力の影響も無視 ($\eta_o = \text{ゼロ}$) すれば、式 (1) ~ 式 (3) は式 (8) ~ 式 (10) となり、接合部のせん断強度式 (4) は式 (11) のように簡単に表される。せん断強度式 (11) はトラス機構の負担分と柱軸力の影響を無視したために、通常の柱軸力の範囲 ($\eta_o = 0.1 \sim 0.3$ 程度) では安全側の評価になる (図 7 を参照)。ただし、設計での接合部横補強筋はコア・コンクリートの拘束および剛性確保などの理由から、RC 計算規準 [9] を参考にして 0.2% 以上を考えている。

$$\nu \sigma_B = 5.80 \cdot \sigma_B^{2/3}, \text{ kgf/cm}^2 \quad (8)$$

$$D = 0.38 \cdot D_c, \text{ cm} \quad (9)$$

$$\beta = 43.5, \text{ }^\circ \quad (10)$$

$$V_{cal} = 1.60 \cdot \sigma_B^{2/3} \cdot b_j \cdot D_c \quad (11)$$

梁降伏前に接合部が破壊した試験体 39 体について、最大せん断応力度 (実験値) とコンクリート圧縮強度の関係を図 8 に示す。また、本研究で収集した全試験体 167 体 (接合部せん断破壊型: 39 体、梁降伏後のせん断破壊型: 86 体、梁破壊型: 42 体) について、実験値と計算値を梁曲げ降伏時の入力せん断力 (V_{my}) で基準化して図 9 に示す。なお、接合部のせん断強度式 (11) は New RC でのせん断設計式 [10] とほぼ同じ形になっている。指針式 ($0.3\sigma_B$ 、[11]) は高強度コンクリート範囲で過大評価、コンクリート圧縮強度の平方根に比例 (例えば、 $5\sqrt{\sigma_B}$) すると低強度コンクリート範囲で過大評価してしまう。式 (11) はその問題点を補った強度式となり、梁降伏前に接合部が破壊した実験データの下限值を表している。本研究で収集した実験データを見るかぎり、接合部のせん断強度式を式 (11) と評価すれば、梁降伏前の接合部のせん断圧壊は起らないと判断される。

6. 二方向加力への適用

本研究で収集した立体柱梁接合部試験体 20 体 (表 2) について、二方向加力を受ける柱梁接合部の二軸相関関係を図 10 に示す。横軸および縦軸には二方向加力時での各方向の入力せん断力の最大値を式 (11) で基準化した。この図から、二方向加力を受ける立体柱梁接合部のせん断強度は分からないが、接合部のせん断強度式を式 (11) と評価すると、各梁方向独立に設計しても

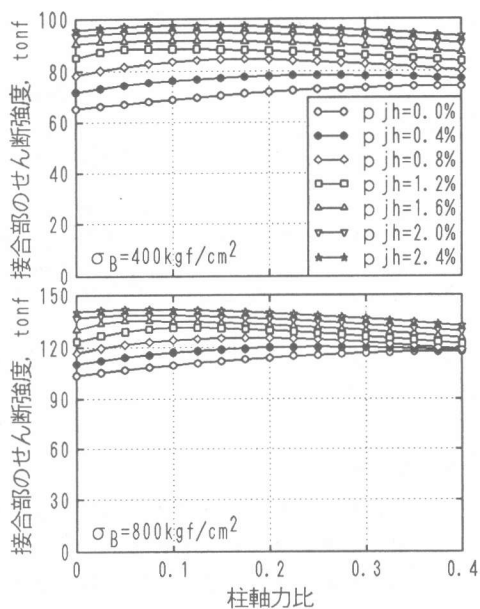


図 7 接合部のせん断強度-柱軸力の関係

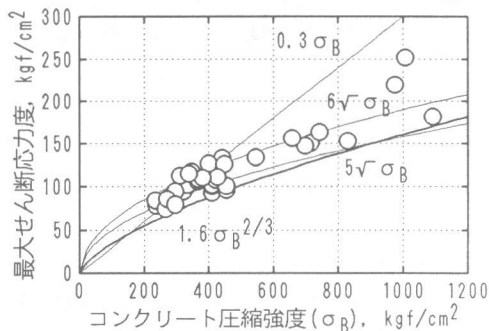


図 8 接合部のせん断応力度- σ_B の関係

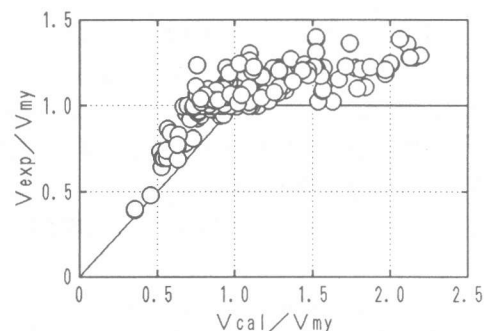


図 9 $V_{exp}/V_{my} - V_{cal}/V_{my}$ の関係

表2 引用した実験データの一覧

実施機関	試験体名	文献
東京電機大	BJ-3D-0, BJ-30-S	JCI年次1994, pp. 745-750
建築研究所	J12	AIJ大会1993, pp. 877-880
東京大学	I2	JCI年次1992, pp. 379-384
宇都宮大学	J1, J2, J3	JCI年次1991, pp. 519-524
大阪工業 大学	J10-2, J10-3 J12-2, J12-3	JCI年次1988, pp. 525-530
東京大学	K1, K2	JCI年次1986, pp. 649-652
北海道大学	B1-XY, B1-45, B1-45P	AIJ大会1984, pp. 1871-74
芝浦工業大	JXY-4, JXY-5	AIJ大会1984, pp. 1869-70
東京大学	A5, A6	JCI年次1992, pp. 379-384

安全であること（すなわち、二軸相関はないと仮定）を示している。

7. まとめ

以上、RC造内柱梁接合部のせん断強度を検討した結果を以下のようにまとめる。

- ①接合部のせん断強度を式(4)～式(7)で評価すれば、概ね±20%程度の精度でせん断強度が推定できる。
- ②接合部のせん断強度を式(11)で評価すれば、せん断強度の下限値は確保できる。
- ③接合部のせん断強度を式(11)で評価すれば、二方向地震力の同時性による応力の割増しは考慮しなくても良い。

【謝辞】本研究を行うに当たり、多くの研究者の貴重なデータを引用させて頂きました。ここに、厚く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 張愛暉：鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析、千葉大学学位論文、1990。
- 2) 李祥浩・小谷俊介：RC柱梁接合部のせん断性状、第9回日本地震工学シンポジウム、Vol. 2、pp. 1543～1548、1994. 12
- 3) 李祥浩・小谷俊介・青山博之：鉄筋コンクリート内柱梁接合部のせん断終局強度、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 2、pp. 273～278、1993. 6
- 4) Paulay, T. et al: Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Seismic Actions, ACI Journal, Vol. 75, No. 11, pp. 585-293, 1978. 11
- 5) 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状、pp. 265、1991。
- 6) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: CEB-FIP MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES, 1988.
- 7) 友澤史紀、野口貴文、小野山貫造：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、A材料施工、pp. 497-498、1990. 10
- 8) 李祥浩・北山和宏・小谷俊介・青山博之：高強度RC造柱・梁接合部のせん断強度、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 379-384、1992. 6
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説、1988。
- 10) 国土開発技術研究センター：New RC研究開発概要報告書、1992。
- 11) 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。

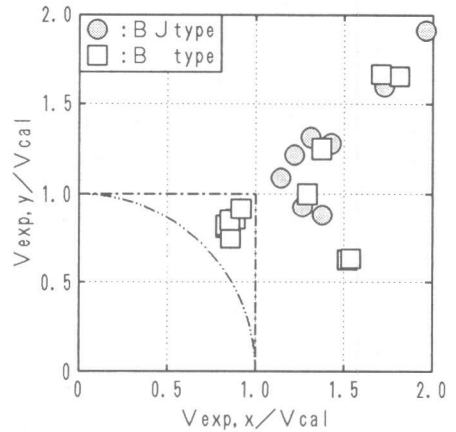


図10 接合部せん断強度の二軸相関