

論文

[2062] RC 内部梁・柱接合部のせん断終局強度と破壊形式分類  
に関する検討

正会員○上村智彦(芝浦工業大学建築学科)

1. 序

現在、内部梁・柱接合部の接合部終局強度と破壊モードを正確に把握することは、重要な問題である。本報告では、実験資料を用いて、接合部のせん断終局強度時の抵抗機構に考察を加え、接合部終局強度推定が可能であることを示すとともに、簡便な破壊モード分類法と接合部終局強度推定法を示す。

2. 接合部終局せん断強度の推定法

ここで対象とする接合部は平面十字形で、①主筋は接合部域で通し配筋、②接合部補強はフープ筋及び柱中間筋によるものとする。

2.1 仮定事項

1) 接合部域梁及び柱主筋の付着性状に関する仮定

既往の実験結果を基に、梁及び柱接合部端断面の引張側主筋歪( $b \epsilon_{st}, c \epsilon_{st}$ )と接合部域梁及び柱主筋の平均付着応力度( $b \tau_{av}, c \tau_{av}$ )との関係を、種々な影響因子は考えられるが、ここでは、係数( $\alpha = 27.3 \times 10^3$ )を用いて次式で表現する[1],[2]。但し、 $N$ :柱軸力、 $E_c$ :コンクリートのヤング係数、 $A$ :柱断面積。又、 $b \tau_{av}, c \tau_{av}$ は $4.0\sqrt{F_c}$ 以下とする[3]。

$$b \tau_{av} = \alpha \cdot b \epsilon_{st}, \quad c \tau_{av} = \alpha \cdot \{c \epsilon_{st} + N / (E_c \cdot A)\} \quad (1)$$

2) 梁及び柱接合部端断面の引張側主筋応力に関する仮定

梁及び柱接合部端断面の引張側主筋応力と歪( $b T_s, b \epsilon_{st}, c T_s, c \epsilon_{st}$ )は、梁及び柱接合部端の曲げモーメント( $b M, c M$ )の作用下の曲げ理論解析結果より求めたものに等しいと仮定する。

2.2 接合部せん断抵抗機構

接合部への作用外力は、ストラット機構とトラス機構で伝達されると考える。(図1参照)

(1)ストラット機構: ストラットは、梁及び柱接合部端のコンクリート圧縮ストレスブロックが矩形であるとし、それらで囲まれた部分と考える。ストラットに伝達される合力( $C$ )は、梁と柱の接合部端のコンクリート圧縮力( $b C_c, c C_c$ )、せん断力( $V_b, V_c$ )、及びストラット域の主筋の付着力( $d_b T_s, d_c T_s$ )から構成される。

(2)トラス機構: トラス機構は、ストラット機構のストラット域外の主筋の付着力( $d_b T_c, d_c T_c$ )と、フープ筋及び柱中間筋(柱主筋)の抵抗力( $T_h, T_v$ )とで、釣合いを形成する機構である。詳細は、文献[2]を参照。

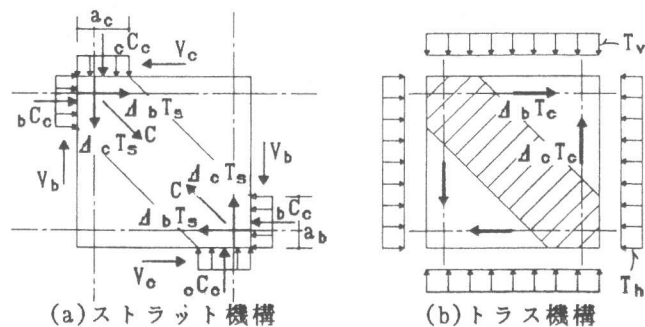


図1 接合部せん断抵抗機構

### 2.3 接合部終局せん断強度の推定法

接合部破壊型(以後、J型と呼ぶ)及び梁曲げ降伏後に接合部破壊する型(B・J型と呼ぶ)では、一般的に、最大耐力に近づくとつれて梁及び柱主筋の接合部域引張側では付着性状が悪くなり、トラス機構は形成されなくなる。従って、ストラット機構が主たる抵抗機構となるため、接合部終局強度はストラット機構の圧潰により決定すると考える。

#### 1) 算定手順

Step1: 梁せん断力( $V_b$ )を与えて、骨組の釣合より、梁及び柱接合部端の曲げモーメント( ${}_bM, {}_cM$ )を求める。

Step2:  ${}_bM, {}_cM$ の作用下での梁及び柱接合部端断面の引張側主筋応力と歪( ${}_b\epsilon_{st}, {}_c\epsilon_{st}$ )を、曲げ理論解析[4]より求める。

Step3: 接合部域梁及び柱主筋の圧縮側歪( ${}_b\epsilon_{sc}, {}_c\epsilon_{sc}$ )を、引張側歪から求まる平均付着応力度(式(1))を用いて、次の関係式より得る。 ${}_b\epsilon_{sc}$ の場合について示すと、 ${}_b\tau_{av} = {}_bE_s \cdot {}_b a_s \cdot ({}_b\epsilon_{st} - {}_b\epsilon_{sc}) / (\phi_b \cdot D_c)$  ( ${}_bE_s$ : 梁主筋のヤング係数、 ${}_b a_s$ 、 $\phi_b$ : 梁主筋一本の断面積と周長)となる。

Step4:  ${}_b\epsilon_{sc}, {}_c\epsilon_{sc}$ より、梁及び柱接合部端断面の圧縮側主筋応力( ${}_bC_s, {}_cC_s$ )を得て、同位置のコンクリート圧縮合力( ${}_bC_c, {}_cC_c$ )を、 ${}_bC_c = {}_bT_s - {}_bC_s$ 、 ${}_cC_c = {}_cT_s + N - {}_cC_s$ より求める。

Step5: 梁及び柱接合部端コンクリート圧縮応力度( $a_b, a_c$ )を求める。(図2参照)

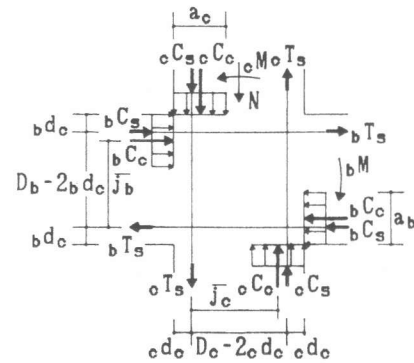


図2 接合部応力状態とコンクリート圧縮応力度

$$\bar{j}_b = \{ {}_bM - (D_b - 2{}_b d_c) \cdot {}_bC_s \} / {}_bC_c, \quad \bar{j}_c = \{ {}_cM - (D_c - 2{}_c d_c) \cdot {}_cC_s + (D_c - 2{}_c d_c) \cdot N/2 \} / {}_cC_c \quad (2)$$

$$\therefore a_b = 2 \{ (D_b - {}_b d_c) - \bar{j}_b \}, \quad a_c = 2 \{ (D_c - {}_c d_c) - \bar{j}_c \} \quad (3)$$

但し、同位置のコンクリート圧縮応力度が  $\beta F_c$  ( $\beta = 0.85$ ) 以上のとき、次式とする。

$$a_b = {}_bC_c / (\beta F_c \cdot {}_b b), \quad a_c = {}_cC_c / (\beta F_c \cdot {}_c b_c) \quad ({}_b b, {}_c b_c: \text{梁及び柱幅}) \quad (4)$$

Step6: ストラット合圧縮力(C)を求める。

$$\left. \begin{aligned} {}_sV_H &= {}_bC_c + \Delta {}_bT_s - V_c \\ {}_sV_U &= {}_cC_c + \Delta {}_cT_s - V_b \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\therefore C = \sqrt{{}_sV_H^2 + {}_sV_U^2} \quad (6)$$

${}_sV_H, {}_sV_U$ : 合力(C)の水平及び鉛直成分  
 $\Delta {}_bT_s, \Delta {}_cT_s$ : ストラット域の主筋の付着力

Step7: ストラット圧縮応力度( $\sigma_s$ )を求める。

$$\sigma_s = C / A_s \quad (A_s = \sqrt{{}_b a_b^2 + {}_c a_c^2} \cdot t_p, \quad t_p: \text{接合部有効幅} (= ({}_b b + {}_c b_c) / 2)) \quad (7)$$

$\sigma_s$ の値がコンクリート有効圧縮強度( $\nu F_c$ )であれば、そのときの $V_b$ が接合部破壊時の梁せん断力となるが、 $\nu F_c$ でなければ、再度 $\sigma_s$ が $\nu F_c$ となるまで $V_b$ を仮定し繰り返す。尚、梁断面の上端と下端の主筋量が同じでない場合(複筋比1.5以下対象)、①左右梁接合部端で異なるコンクリート圧縮応力度の大きさは平均した値とすること、② ${}_sV_H$ は左右梁接合部端断面のコンクリート圧縮合力の平均と梁上端・下端筋のストラット域の付着力を平均したものをを用いて求める。

## 2) 適用方法

上記の方法で算定しようとする、コンクリート有効圧縮強度( $\nu F_c$ )の値が必要となるが、 $\nu F_c$ が分からない現状である。そこで、コンクリート圧縮強度低減係数( $\nu$ )の値としては、せん断実験などにより求められた値に対応するものとする。従って、J型及びB・J型の最大荷重時の $\sigma_s/F_c$ の値が、既往のコンクリート圧縮強度低減係数に対応すれば、この方法は、終局強度の推定法として妥当とする。使用した試験体64体は、コンクリート圧縮強度低減係数に関する資料が多い普通コンクリート( $F_c \leq 400 \text{ kg/cm}^2$ )とし、①直交梁なし、②接合部域で通し配筋、③接合部補強は特殊補強でないものとした[5]。

### 2.4 適用結果

#### 1) 接合部圧縮ストラット応力度の大きさと破壊形式との関係

最大耐力時の $\nu = \sigma_s/F_c$ と梁接合部端理論曲げ降伏時の接合部せん断入力量( $t \tau_{py}/F_c$ )の関係では、図3に示すように、J型及びB・J型は $0.68 \leq \nu \leq 0.88$ に分布し、梁曲げ破壊型(以下、B型と呼ぶ)は、 $0.01 \leq \nu \leq 0.78$ に広く分布する。従って、コンクリート強度に対する接合部圧縮ストラット応力度の大きさ関係で、J型等の分類がほぼ可能である。尚、梁接合部端理論曲げ降伏時の接合部せん断応力度( $t \tau_{py}$ )は、次式の接合部せん断応力度( $\tau_p$ )の算定式の梁せん断力(P)に梁理論曲げ降伏時梁せん断力(左右梁曲げ降伏時梁せん断力が異なる場合は、平均値とする)を用いて求めたものである。

接合部せん断応力度( $\tau_p$ )の算定式：

$$\tau_p = (1-u-v) \cdot P / (u \cdot v \cdot H \cdot t_p) \quad (8)$$

$u$ :  $j_c/L$ ,  $v$ :  $j_b/H$ ,  $H, L$ : 階高, スパン

$j_b, j_c$ : 梁及び柱の応力中心間距離

$P$ : 梁せん断力,  $t_p$ : (梁幅+柱幅)/2

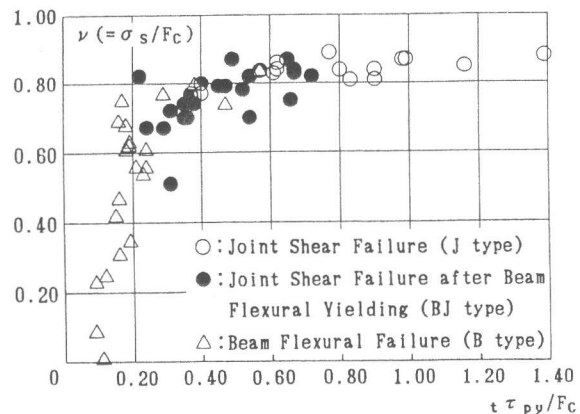


図3  $\nu (= \sigma_s/F_c) - t \tau_{py}/F_c$  関係

#### 2) コンクリート圧縮強度低減係数による接合部圧縮ストラット応力度( $\sigma_s$ )の検討

ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減係数( $\nu$ )の評価式として、ひび割れ面に直交方向の引張歪( $\epsilon_t$ )の関数としたものが幾つか提案されている[6]。しかしながら、既往の接合部実験資料の適用に際し、一般には $\epsilon_t$ は得られていない。そこで、梁のせん断実験結果の分析及び平板の純せん断実験で得られている $\nu$

とコンクリート強度( $F_c$ )との関係で示した式 $\nu = 0.8 - F_c/200$  [MPa] (Nielsen[7])、 $\nu = 3.68/F_c^{0.333}$  [kgf/cm<sup>2</sup>] (CEBコード)、 $\nu = 0.8 - F_c/2400$  [kgf/cm<sup>2</sup>] (長沼等[8])を用いる。

J型とB・J型の最大荷重時の $\nu = \sigma_s/F_c$ と $F_c$ の関係を示した図4から、上記のCEBコード式を

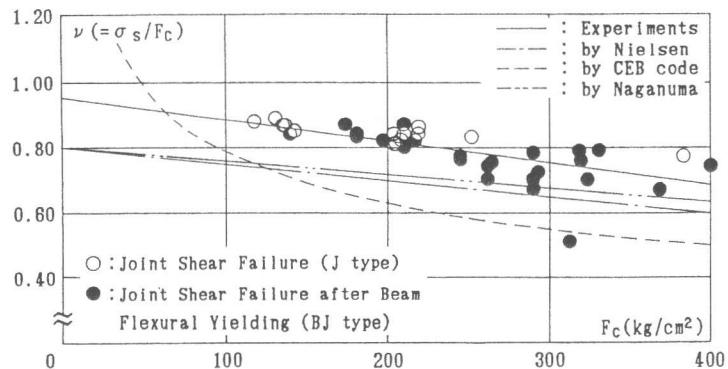


図4  $\nu (= \sigma_s/F_c) - F_c$  関係

除く各式が下限を示している。下限値となった理由には、実際のストラットは拡がりを持つにも拘らず、ここでは、梁及び柱接合部端断面のコンクリート圧縮域を矩形ストレスブロックとし、ストラット断面を小さく評価していることに起因していると思われる。

### 3. 梁・柱接合部の破壊モード分類法

#### 3.1 破壊モード分類法

接合部終局強度が、前述のように、接合部ストラットの圧潰で決定すると考えると、接合部破壊の主たる因子は、①接合部せん断応力度(ストラット圧縮力を構成する接合部端断面の梁・柱のコンクリート圧縮力と比例的關係)と、②コンクリート強度( $F_c$ )である。接合部には、梁曲げ耐力時以上の接合部せん断応力度は生じないので、破壊モード分類のための接合部せん断応力度としては、梁接合部端理論曲げ降伏時の値( $t\tau_{py}$ )(梁曲げ降伏モーメントは、資料中に記載なき場合、 $M_y=0.9\cdot a_t\cdot\sigma_y\cdot d$ で求めた)を用いることとした。以上から、破壊モード分類の指標としては、主たる2つの因子を考慮した $t\tau_{py}/F_c$ の値をとり、 $t\tau_{py}/F_c$ が大きいと接合部破壊、小さいと梁曲げ破壊と予想し、 $t\tau_{py}/F_c$ と破壊モードの関連について普通コンクリートから高強度コンクリートにわたって検討した。尚、「2章」の結果は、接合部破壊時には柱接合部端断面のコンクリート圧縮応力度は、軸力が大きくなると、その増加にみあう同断面のコンクリート圧縮応力域が大きくなり、軸力の大小に拘らず同断面のコンクリート圧縮応力度は、 $\beta F_c$ ( $\beta=0.85$ )に近い値を示した。そこで、ストラット応力度に対する柱軸力の影響は小さいと予測した。

使用した試験体は、対象範囲を「2章」の場合を原則としたが、普通コンクリート( $F_c\leq 400\text{kg/cm}^2$ )53体では、特に、層間変位曲線と接合部変形曲線が掲載されていたもののみ、又、高強度コンクリート( $400\text{kg/cm}^2\leq F_c\leq 1200\text{kg/cm}^2$ )53体では、①片側直交梁付き(7体)、②両側直交梁とスラブ付き(1体)、③特別な接合部補強が施されているもの(2体)も含めた[9]。

#### 3.2 考察

- (1)図5は、圧縮ストラット強度に関連する $t\tau_{py}/F_c$ と $F_c$ の關係を示したものである。B型は、 $t\tau_{py}/F_c < 0.2$ 、B・J型は、 $0.2 \leq t\tau_{py}/F_c < 0.4$ 、J型は、 $t\tau_{py}/F_c \geq 0.4$ に分布している。
- (2)図6に既往実験の最大耐力時接合部せん断入力量( $e\tau_{pu}/F_c$ )—コンクリート強度( $F_c$ )の關係を示す。破壊モード分類指標を用いた図5と比較して、図6では $e\tau_{pu}/F_c$ が0.2~0.4付近に集中し、破壊モード分類は不可能である。従って、破壊モード分類には、前述の $t\tau_{py}/F_c$ を用いると、より明確となる。

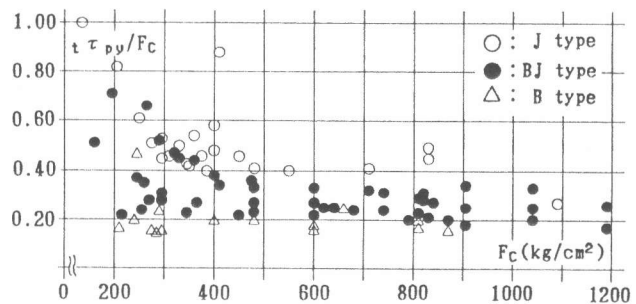


図5  $t\tau_{py}/F_c - F_c$  關係

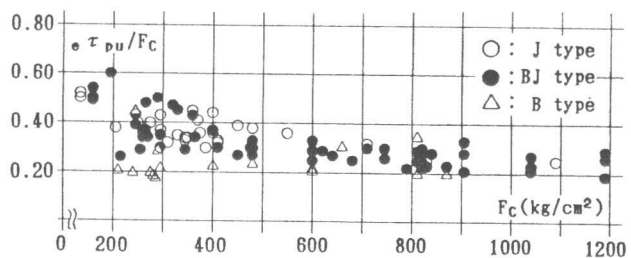


図6  $e\tau_{pu}/F_c - F_c$  關係

### 4. 接合部終局せん断強度の簡便な推定法

#### 4.1 接合部終局せん断強度の簡便な推定法

既往実験のB・J型、J型の接合部終局せん断入力量( $e\tau_{pu}/F_c$ )が、0.2~0.5に分布すること、破壊モード分類の指標 $t\tau_{py}/F_c$ との関連から、次のことが予想できる。

(1) B・J型の場合、 $t\tau_{py}/F_c$ の値が接合部終局せん断入力量( $e\tau_{pu}/F_c$ )の下限値以上でB・J型の破壊モードとなり、試験体の最大荷重時の $e\tau_{pu}/F_c$ の値は、 $t\tau_{py}/F_c$ とほぼ同じ値となる。

(2) 試験体の $t\tau_{py}/F_c$ が、接合部終局せん断入力量( $e\tau_{pu}/F_c$ )の上限値に近づくと、試験体の最大荷重時の $e\tau_{pu}/F_c$ の値は、ある一定値に留まる傾向となり、J型はこの部分に分布する。

以上のような考察の基に、図7と図8に「3章」で使用した試験体について、普通コンクリートと高強度コンクリートに分け、最大荷重時の接合部せん断入力量( $e\tau_{pu}/F_c$ )と梁理論曲げ降伏時接合部せん断入力量( $t\tau_{py}/F_c$ )の関係を示した。尚、普通コンクリート資料には「2章」の資料の内、「3章」に含まれていない試験体も追加した。

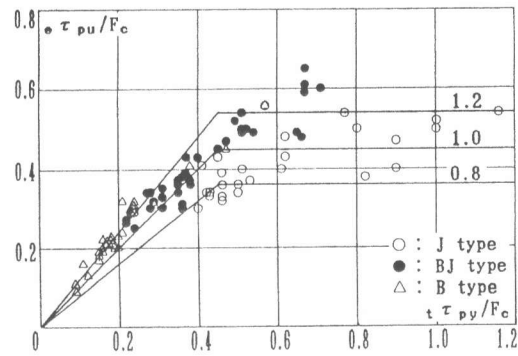


図7 普通コンクリートの  
 $e\tau_{pu}/F_c - t\tau_{py}/F_c$ 関係

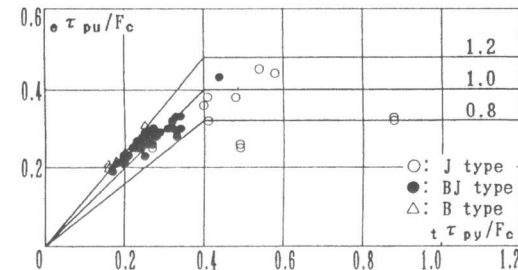


図8 高強度コンクリートの  
 $e\tau_{pu}/F_c - t\tau_{py}/F_c$ 関係

#### 4.2 接合部終局強度の推定式と接合部終局強度影響因子に関する考察

##### 1) 接合部終局強度の推定式

図7と図8より、接合部終局強度の推定式は、次式のようになり、 $e\tau_{pu}/F_c$ の値は、推定式の±20%の範囲にはほぼ納まる。尚、図7、図8には一部特殊な試験体も含まれているが、下式の主な適用範囲は、①直交梁なし、②接合部域で通し配筋、③接合部は特殊補強でないものである。

$$\left. \begin{aligned} \text{普通コンクリートの推定式} \quad & \text{----- } 0.20 \leq t\tau_{py}/F_c \leq 0.45 : e\tau_{pu} = t\tau_{py} \quad (\text{B・J型}) \\ & t\tau_{py}/F_c > 0.45 : e\tau_{pu} = 0.45F_c \quad (\text{J型}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{高強度コンクリートの推定式} \quad & \text{---- } 0.20 \leq t\tau_{py}/F_c \leq 0.40 : e\tau_{pu} = t\tau_{py} \quad (\text{B・J型}) \\ & t\tau_{py}/F_c > 0.40 : e\tau_{pu} = 0.40F_c \quad (\text{J型}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

##### 2) 接合部終局強度影響因子に関する考察

(1) コンクリート強度：推定式がコンクリート強度で異なり、J型の $e\tau_{pu}/F_c$ の値が高強度コンクリートで小さくなるのは、「2章」で述べたように、接合部ストラットのコンクリート有効圧縮強度を評価する場合のコンクリート圧縮強度低減係数( $\nu$ )が小さくなることに対応する。

(2) 接合部域付着性状(接合部域梁主筋付着指標( $\tau_{bs}/\sqrt{F_c}$ ))の影響：ストラットの圧潰と考えた場合、影響因子は、①コンクリート強度、②接合部域付着性状に関する接合部域付着指標と接合部補強筋量が考えられる。掲載しなかったが、接合部補強筋量の接合部終局強度に関する影響は見られるもののその影響は小さく、接合部域付着指標の評価ではこれを無視して考える。接合部端梁断面のコンクリート圧縮力は、接合部域付着性状に影響され、付着指標が大きいと大きくなり、低い荷重で接合部ストラットが圧潰をし破壊すると予想される。尚、

付着指標  $\tau_{bs}$  は、 $\tau_{bs} = d_B \cdot \sigma_y / (2 \cdot D_C)$  ( $\sigma_y$ : 梁主筋降伏応力度、 $d_B$ : 主筋の直径) である。

図9は、「3章」で使用した普通コンクリートの資料について、 $e \tau_{pu} / F_c$  と  $t \tau_{py} / F_c$  の関係を示したものである。又、図10は、接合部域付着性状の接合部終局せん断入力量 ( $e \tau_{pu} / F_c$ ) に対する影響をみるため、図9の  $t \tau_{py} / F_c$  のA, B, Cの区間について、付着指標 ( $\tau_{bs} / \sqrt{F_c}$ ) による接合部終局せん断入力量 ( $e \tau_{pu} / F_c$ ) の変動を示したものである。同図は、各区間について、(1)に  $e \tau_{pu} / F_c - t \tau_{py} / F_c$ 、(2)に  $\tau_{bs} / \sqrt{F_c} - t \tau_{py} / F_c$  の関係を各々示したものである。同図より、 $t \tau_{py} / F_c$  が同じで  $\tau_{bs} / \sqrt{F_c}$  が大きい場合を小さい場合と比較して (例えば、C(2)図の

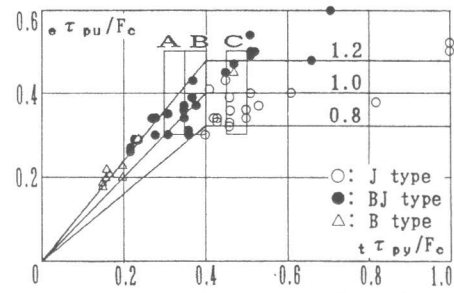


図9  $e \tau_{pu} / F_c - t \tau_{py} / F_c$  関係

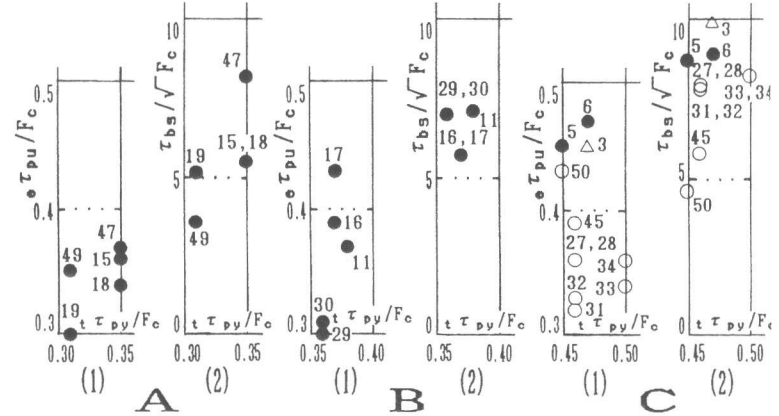


図10 接合部域付着性状と接合部終局せん断入力量関係

27と50)、 $e \tau_{pu} / F_c$  は小さい値となる傾向 (C(1)図の27は50より小さい) が、接合部破壊が顕著であるB, C区間の試験体で明確となる。

### 5. 結論

- (1) 既往のコンクリート有効圧縮強度の値は、接合部終局強度時に、接合部終局せん断強度の推定法で求めた圧縮ストラット機構のストラット応力度の下限を示す。
- (2) 破壊モード分類は、梁理論曲げ降伏時接合部せん断入力量 ( $t \tau_{py} / F_c$ ) で簡便に予測できる。
- (3) 接合部終局強度は、提案した推定式で、梁曲げ降伏モーメントを求める場合の式と同程度の精度で評価できる。

【謝辞】 本研究は、1991年度芝浦工業大学卒論生、石久保 猛、千葉 隆史、西尾 博人、福本 雄二、山西 功一諸氏の卒業論文の一部である。各位に謝意を表します。

#### 【参考文献】

- [1] 森田, 角「鉄筋コンクリート柱・梁接合部における梁軸筋の接合部からの抜け出しについて」 建築学会大会, PP.1099~1100, 1972
- [2] 上村, 他「鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部の破壊機構に関する研究」 コンクリート工学論文報告集, 9-2, PP.193~198, 1987
- [3] 「地震荷重と建築構造の耐震性」 建築学会, 1976
- [4] 藤井, 青山, 他「材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係」 建築学会大会, PP.1261~1262, 1973
- [5] 1985年までの、建築学会大会梗概集、関東支部研究報告集、及びコンクリート工学論文報告集に記載されたもの。
- [6] 例えば、「森田 等「鉄筋コンクリート構造のFEM解析の精度向上に必要な基礎実験と解析モデルの開発」昭和63年度科学研究費補助金、研究成果報告書」では、既往の提案式も含め、総合的評価が行われている。
- [7] Nielsen, M.P., Jensen, B.C., and Bach, F. 「Concrete Plasticity-Beam Shear-Shear in Joints Punching Shear」 Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, St. Research Lab., Oct. 1978
- [8] 長沼一洋, 山口恒雄「ひび割れたコンクリートの圧縮特性に関する研究」 JCIコロキウム「RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」 論文集, PP.23~30, 1989.10
- [9] 普通コンクリート試験体は、1988年までに、高強度コンクリート使用試験体は、1989年~1991年間に、建築学会大会梗概集、関東支部研究報告集、及びコンクリート工学論文報告集に記載されたもの。