

# [160] 鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部の終局強度に関する研究

正会員 上村智彦 (芝浦工業大学工学部)

## 1. 序

RC造の最近の傾向に、材料の高強度化に伴う部材断面の縮小化、及び高層化がある。このような傾向にある構造物で、梁曲げ降伏型を目標とする場合、接合部には大きなせん断力が生じ、梁曲げ耐力の発揮のための接合部せん断破壊の防止が一つの問題となる。本研究の目的は、直交

梁のない一体打ち内部接合部(十字型)の終局強度(破壊機構)について、既往の提案式等による検討と影響因子の評価に基づいて接合部破壊機構の提案を行なうことである。

## 2. 接合部終局強度の特徴に関する検討

### 2.1 既往試験体の最大耐力と理論曲げ終局強度との関係について

図1は、既往試験体について、最大耐力 ( $exp Pu$ ) と梁又は柱の曲げ理論耐力 ( $tPu$ ) 比の分布を示したものである。理論終局曲げ強度は、次式又は、断面分割による曲げ解析で求めた。

$$\text{梁: } \mu = 0.9 a_t \sigma_y d_b$$

$$\text{柱: } \mu = 0.8 a_t \sigma_y D + 0.5 N D (1 - N / (b D F_o))$$

尚、使用試験体は、我国で実験されたもので、④断面寸法は、 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  以上、⑤主筋は、接合部域で通し配筋したもの、⑥普通コンクリートを使用したものとし、接合部補強法には、基準を設けていない。

破壊形式と ( $exp Pu / tPu$ ) の関係は、通常の見方から従う関係・表1を満足している。曲げ破壊した試験体は、約合い鉄筋比以下であり、曲げ耐力劣下は生じていない。しかしながら、梁曲げ破壊型(以後B型と称す)は、 $exp Pu / tPu > 1.1$  以上となる試験体が多くあるが、梁曲げ破壊後に接合部破壊する場合(以後、B・J型と称す)は、1.0近傍に集中する特徴がある。

### 2.2 既往の提案式による接合部終局せん断強度の評価

終局強度式として、遠藤式、大和田式、是石式、執筆者の式が提案されている。ここでは、最大耐力時の接合部せん断応力度 ( $\tau_p$ ) を次式で算定し、提案式との比較より、終局強度と破壊形式について検討する。

$$\tau_p = (1 - u - v) L P / (vH uL t_p) \dots \text{式(1)}$$

$uL = Jc$ ,  $vH = Jb$ : 柱と梁の応力中心間距離,  $L$ : スパン

$H$ : 壁高,  $P$ : 梁せん断力,  $t_p$ : パネル有効幅(執筆者の式では、(柱幅+梁幅)/2, 他式では、柱幅である。)

使用試験体は、2.1の試験体で、④主筋に機械的定着などの細工を施していないもの、⑤接合部補強法は、フープ筋(スターラップ筋の補強を含む)で普通に補強されたものとする。

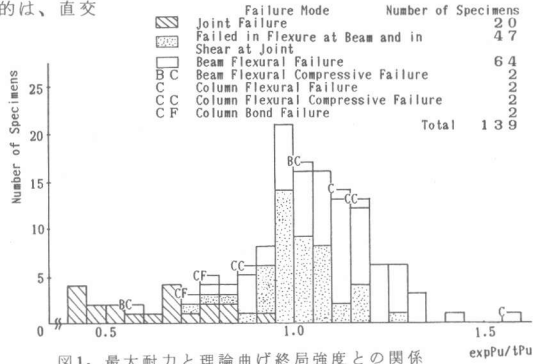


図1. 最大耐力と理論曲げ終局強度との関係

表1. 破壊形式と耐力比の関係

Failure Mode	$expPu/tPu$
Joint Failure	<1.0
Failed in Flexure at Beam and in Shear at Joint	$\approx 1.0$
Beam Flexural Failure	$\approx 1.0$

Proposed Equation by KAMIMURA  
 $\tau_{pu} = (0.78 - 0.0016F_c)F_c + 0.5 \cdot Pw \cdot s \cdot y$   
 $= 95.1 + 0.5 \cdot Pw \cdot s \cdot y$   
 $F_c \leq 244$   
 $F_c \geq 244$   
 :  $kg/cm^2$

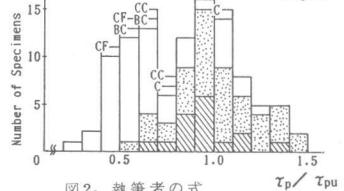


図2. 執筆者の式

Proposed Equation by KOREISHI  
 $\tau_{pu} = (0.50 - 0.001F_c)F_c + 2.7N/Pw \cdot s \cdot y$   
 $= 62.5 + 2.7N/Pw \cdot s \cdot y$   
 $F_c \leq 250$   
 $F_c \geq 250$   
 :  $kg/cm^2$

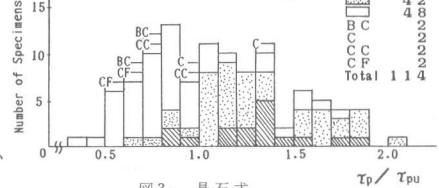


図3. 是石式

図2、図3に執筆者の式と是石式による終局耐力 ( $\tau_{pu}$ ) と実験値 ( $\tau_p$ ) の比の比較を示す。(速藤式、大和田式は省略) これらの図から、速藤式、大和田式、是石式の3式では、破壊モードの判別が困難である。一方、執筆者の式は、接合部破壊型(以後、J型と称す)では、1.0近傍に集中するが、B型、B-J型の試験体には、1.2以上となる場合も多数あり、この点の評価が難しい。

### 2.3 接合部終局強度の影響因子と既往の提案抵抗機構について:

J型とB-J型の接合部終局強度の影響因子として、コンクリート強度、補強筋量、柱幅と梁幅の比、柱軸力が考えられる。接合部破壊時の接合部への作用外力の大きさを示す接合部せん断応力度を式(1)で算定し、 $\tau_p - F_c$ の関係図より各影響因子の評価を行う。但し、パネル有効幅  $t_p$  は、 $t_p = (\text{梁幅} + \text{柱幅}) / 2$  とする。

(1) 図4は、接合部終局強度実験値とコンクリート強度との関係を、2.2のJ型、B-J型について示したものである。図中の  $5.0\sqrt{F_c}$  は、ACI規準において規定された最大せん断応力度である  $3.98\sqrt{F_c}$  をパネルゾーンの相連(ACI:柱と梁間に囲まれた部分)を考慮して記入したものである。同図から、②ACI規準は、終局強度の下限値を表現していること、③B-J型の終局強度が、J型に比べて高くなっていることと、分散が激しく、一義的には、終局強度は決定していないこと、④終局強度と  $F_c$  が一次の関係にあることが分かる。

(2) ⑤補強筋量 ( $P_w$ ) の影響を図5と図6に、柱軸力を一定とし、終局強度の変化をみると、影響はほとんどない。⑥軸力 ( $\sigma_o$ ) の影響を図7~図9に、補強筋量を一定とし検討すると、終局強度に系統的傾向を及ぼしていない。

以上の特徴の関連から、補強筋量が一次的因子でないで、既往の「トラスメカニズム」、「せん断摩擦メカニズム」、「トラスメカニズムとストラットメカニズムの共存」の抵抗機構は成立していない。一方、 $F_c$  が支配的であるから、破壊機構は、ストラット機構に起因していることを予想させる。

### 3. 接合部破壊機構の提案

接合部破壊機構は、前述の検討結果の特徴を反映したもので、次のように考えられる。

終局強度がコンクリート強度と一次の関係であることから、破壊機構は、接合部のせん断ひび割れ発生以降に形成される主たるコンクリート圧縮ストラット機構に依存すると思われる。図10(a)は、ストラットの形成状態と接合部に伝達される梁、柱からの力を一方向載荷時について示したもので、破壊時には、同図に示すような応力と破壊状況を呈し、最終的には、主たるストラットの強度以上に、梁、柱からの圧縮合力がなることによって、破壊すると考えられる。接合部に伝達される力は、(b)図のように①梁、柱の付根部分のコンクリート圧縮力 ( $C_c$ 、 $c_c$ )、せん断力 ( $V_B$ 、 $V_c$ ) 及び主たるストラット域の主筋の付着力 ( $\Delta_B T_c$ 、 $\Delta_c T_c$ ) からなる力でストラットへ伝達される合力  $C$  と、②主たるストラット域外で、主筋から接合部コンクリートへ伝

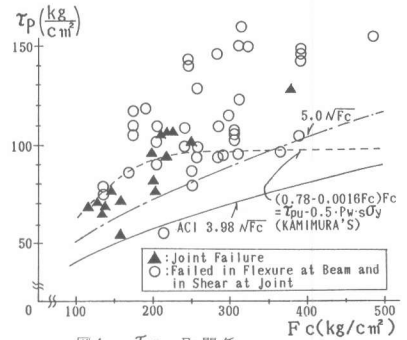


図4.  $\tau_p - F_c$ 関係

Effect of Shear Reinforcing Bar	Failure Mode	$0 \leq P_w < 0.40$	$0.40 \leq P_w$
		Joint	△
Beam and Joint		○	●

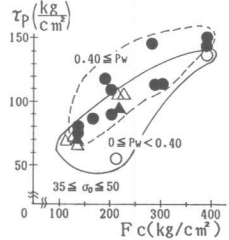
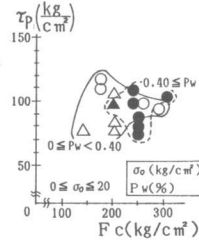


図5. 補強筋量の評価

図6. 補強筋量の評価

Effect of Column Axial Stress	Failure Mode	$0 \leq \sigma_o < 40$	$40 \leq \sigma_o < 60$	$60 \leq \sigma_o$
		Joint	△	▲
Beam and Joint		○	◎	●

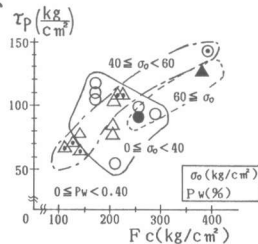


図7. 柱軸力の評価

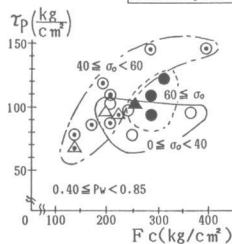


図8. 柱軸力の評価

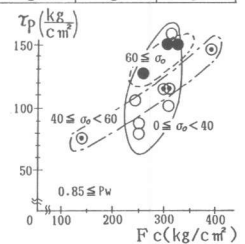


図9. 柱軸力の評価

達される付着力 ( $\Delta_B T_s$ 、 $\Delta_C T_s$ ) とに分けられる。破壊時には、接合部域の主筋の付着の良い試験体は、図10(b)に示すように、主筋から力が付着力として、主たるストラット以外の接合部コンクリートに流れ、主たるストラットに加わる圧縮合力が、図10(c)に示す接合部域の付着の悪い場合と比較して、同一外力に対して、小さくなると考えられる。従って、同じ形状寸法の試験体であっても、接合部域の付着性状が良い場合は、主筋から力が主たるストラット以外の接合部コンクリートに伝達されるため、破壊時ストラット合力になるのが遅れ、破壊耐力が大きくなると思われる。前述の機構は、B・J型の破壊機構についても、図10(b)の主たるストラット域外の機構の存在を考えると、梁主筋が降伏することにより、接合部域主筋の付着劣下が生じ、主たるストラット域外の機構は有効でなくなり、対角方向の主たるストラットが、ストラット圧縮強度となり破壊すると説明できる。又、このことは、B・J型の耐力がJ型よりも高くなり得ることを意味している。

3.1 接合部のせん断終局強度の算定方法：主たるストラットの圧縮応力が、コンクリートの圧縮強度となった場合に接合部が破壊すると考え、終局強度を接合部域の主筋の付着の考慮と、幾つかの仮定を基にして、以下のように算定する。

(1) 主たるストラットに作用する合力C

(1.1) ストラット合力C

図10より  $C = \sqrt{V_{ch}^2 + V_{cv}^2}$   
 $V_{ch} = B C_c + \Delta_B T_c - V_c$ ,  $V_{cv} = c C_c + \Delta_C T_c - V_B$

(1.2)  $V_{ch}$ 、 $V_{cv}$ の構成要素について

$V_{ch}$ の場合：接合部域の梁主筋のひずみ分布を 図11のように仮定し、引張ひずみ  $\epsilon_{st}$  は、曲げ理論値に一致すると考える。一方、圧縮ひずみ  $\epsilon_{sc}$  は、接合部域平均付着応力度の関係式である次式の係数  $\alpha$  を仮定し求める。

$$\tau_{av} = \alpha \cdot \epsilon_{st} = \frac{E_s \cdot A_s}{\phi \cdot J_c} (\epsilon_{st} - \epsilon_{sc}) \quad (\alpha: \text{一定値})$$

$E_s$ : 鉄筋ヤング係数,  $A_s$ : 梁主筋の断面積,  $\phi$ : 梁主筋の周長  
 従って、梁主筋の合力  $B T_s$ 、 $B C_s$  は引張ひずみより、又、ストラットへの付着による伝達力は、次式より決定できる。

$$\Delta_B T_c = \tau_{av} \cdot \phi \cdot S_B \cdot n \quad S_B: \text{図12参照}, n: \text{梁主筋本数}$$

$V_{cv}$ の場合：算定方法は  $V_{ch}$ の場合と同様であるが、但し、接合部域平均付着応力度は、次式とする。

$$\tau_{av} = \alpha (\epsilon_{st} + \epsilon_o) \quad (\epsilon_o = \frac{N}{E_c \cdot A})$$

$N$ : 柱軸力,  $A$ : 柱断面積,  $E_c$ : コンクリートヤング係数

(2) 主たるストラットの大きさの決定

接合部は、せん断変形のみをするものとし、作用せん断応力度の大部分は、ストラットで負担されると考える。接合部を図13のように耐震壁における作用せん断力に対するブレース置換と同様に考えて、梁及び柱の応力中心間距離で囲まれたバネの対角線方向のストラットに置換するものとする。

$$\text{ストラット断面積 } A_B: A_B = \frac{(J_b^2 + J_c^2)^{3/2}}{2 \cdot J_b \cdot J_c} \cdot \frac{G}{E_c} \cdot t_p \cdot D_p \cdot t_p$$

$G$ : コンクリートせん断弾性係数,  $D_p$ : ストラットの成い,  $t_p$ : (梁幅+柱幅)/2

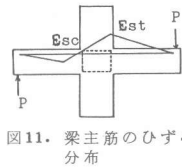
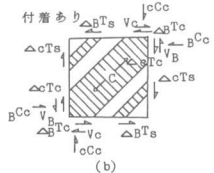
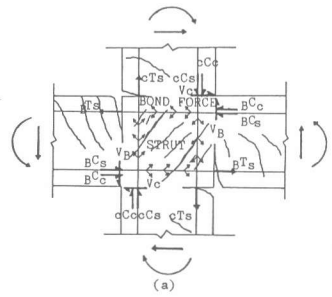


図11. 梁主筋のひずみ分布

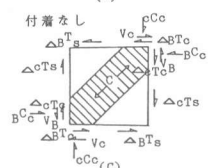


図10. 接合部破壊機構

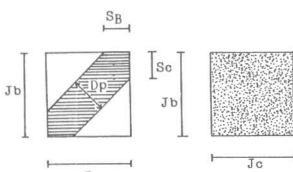


図12. ストラット寸法

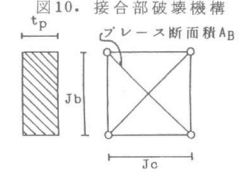


図13. ストラット算定法

表2. 接合部終局強度計算方法の妥当性の評価方法

〔評価方法〕	1. 梁曲げ破壊型の場合 $P_{exp}(=P_y) < P_{NB}$
	2. 梁曲げ破壊前に接合部破壊する場合 $P_B < P_y, P_{NB} \leq P_{exp} \leq P_B$
	3. 梁曲げ破壊後に接合部破壊する場合 $P_{NB} \leq P_{exp}(=P_y)$
〔記号〕	$P_B$ : $\alpha = 27.3 \times 10^3$ のとき $P_{NB}$ : $\alpha = 0$ のとき $P_y$ : ( $\alpha$ = 接合部域平均付着応力度の係数 ) $P_y$ : 理論梁曲げ終局耐力 $P_{exp}$ : 実験時終局耐力

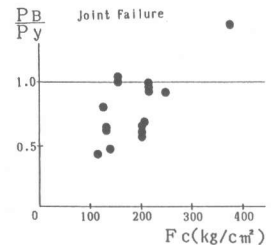


図14.  $P_B / P_y - F_c$

### 3.2 適用例：

(1) 方法 ここでは、合力方向と仮定した主たるストラット方向は一致するものとする。(多段配筋の場合も同じ方法で算定する。)パネル水平方向せん断力 $V_{ch}$ は、

$$V_{ch} = P_{Bc} + \Delta P_{Tc} - V_c = E_s \cdot (2 - \frac{\alpha \cdot \phi \cdot J_c}{E_s \cdot A_s}) \cdot n \cdot A_s \cdot \epsilon_{st} + \frac{\alpha \cdot \phi \cdot (J_b^2 + J_c^2)^2}{4 \cdot J_b^2 \cdot J_c} \cdot \frac{G}{E_c} \cdot n \cdot \epsilon_{st} - \frac{L \cdot 2 \cdot n \cdot E_s \cdot A_s \cdot J_b}{H \cdot (L - J_c)} \cdot \epsilon_{st}$$

ストラット圧縮強度  $C = F_c \cdot D_p \cdot t_p$

$V_{ch}$ と $C$ との関係  $V_{ch} = \frac{J_c}{\sqrt{J_b^2 + J_c^2}} \cdot C$

上式より $\epsilon_{st}$ が求まり、従って、梁せん断力 $P = \frac{2 \cdot n \cdot E_s \cdot A_s \cdot J_b}{(L - J_c)} \cdot \epsilon_{st}$

(2) 結果 2.2の使用試験体から、柱せん断力の生じないもの、梁主筋に焼入れしているものは除き、B型、B・J型、J型について、前述の方法の適用を行なった。接合部域平均付着応力 $\tau_{av}$ に関連する $\alpha$ については、 $\alpha = 0$ (付着のない場合)と $\alpha = 2.73 \times 10^3$ (文献2に示された値)を用いて、各々の場合の終局耐力を算定した。表2に示す評価方法が成立すれば、前述の接合部終局強度計算方法が妥当といえる。図14～図16にその結果を示す。図16より、B型の場合、評価方法を満足しない試験体は3体、B・J型の場合には、 $0.8 \leq P_{exp}/P_{NB}$ の部分に分布し、各々満足していると做せる。一方、J型の場合には、図14～図16より、 $P_B/P_Y \leq 1.0$ 、 $P_{exp}/P_B \leq 1.0$ 、 $0.8 \leq P_{exp}/P_{NB} \leq 1.2$ であるから、評価方法を満足しているといえる。また、J型、B・J型のいずれの破壊型試験体も、接合部域の付着が無い $\alpha = 0$ の耐力を下限とすると思われる。

(3) 合力方向とストラット方向の検討 前述の算定では、合力方向とストラット方向は一致するものと仮定したが、ここでは、その検証として、J型とB・J型について、合力方向( $V_{cv}/V_{ch}$ )とストラット方向( $J_b/J_c$ )の値を求めて比較する。合力方向は、 $P_B$ 、 $P_{NB}$ の計算値の内、実験時の破壊耐力に近い値を用い、又、 $V_{cv}$ 、 $V_{ch}$ の算定時には、 $P_B$ 又は、 $P_{NB}$ の計算に用いた係数 $\alpha$ を用いた。 $V_{cv}$ の算定は、 $P_B$ 又は $P_{NB}$ の値より、柱せん断力を求め、曲げ解析より引張側ひずみ $\epsilon_{st}$ を求めて、 $V_{ch}$ の場合と同じ方法で求めた。尚、実験値が、計算値と大きく異なる試験体(J型3体、B・J型4体)については、除くこととした。図17に結果を示す。いずれの場合も、ストラット方向と合力方向はほぼ一致していると做すことができ、仮定は一応成立していると考えられる。この点、ストラット機構に基づくJIRSAの方法<sup>3)</sup>は、この方向が一致しないと考えられる点に問題がある。

### 4. 結論

本研究より、次の知見が得られた。(1)執筆者の式は、J型の終局強度の平均値を、また、ACI規準の式は、J型、B・J型の下限値を与えるが、いずれの場合もJ型とB・J型の破壊形式の判別と終局強度を予測させるものではない。(2)破壊機構を接合部域の主筋の付着性状を考慮したコンクリートストラット機構とすれば、破壊時の諸現象が説明でき、3.で述べた付着の有無の場合の接合部破壊耐力を算定し、図18に示す流れ図から、破壊形式と破壊耐力が得られる。

文献1) ここで使用した試験体は、1953年～1985年に我国で実験され、建築学会論文報告集、同大会梗概集、同関東支部報告集、コンクリート工学年次講演会論文集に記載されたものである。

2) 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” 1972年、建築学会大会

3) ZHANG, LIANDE and JIRSA “A STUDY OF SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN JOINTS” 1982, PMFSEL REPORT NO. 82-1

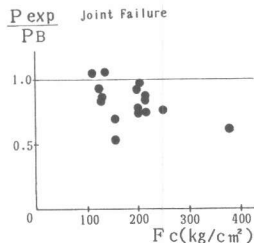


図15.  $P_{exp}/P_B - F_c$

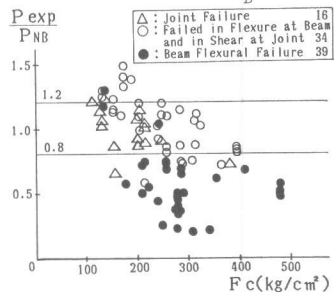


図16.  $P_{exp}/P_{NB} - F_c$

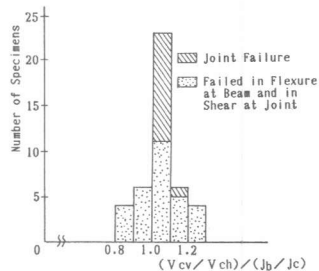


図17. 合力方向とストラット方向の関係

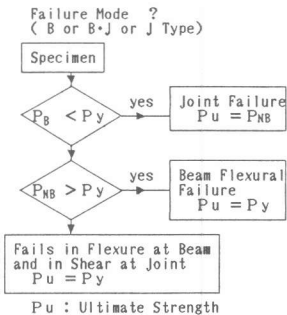


図18. 破壊形式の判別と破壊耐力