

論文 R C造偏心柱梁接合部のせん断及び捩り変形と応力に関する実験的研究

近藤 龍哉*1・黒澤亮太郎*2・佐藤 学*3・広沢 雅也*4

要旨：柱に梁が偏心接合した柱梁接合部のせん断実験結果について報告する。偏心接合部は非偏心接合部に比べて、せん断強度が劣る。また、接合部内の柱主筋および梁主筋の歪の状況から、接合部せん断力に対する接合部の抵抗範囲は柱および梁の圧縮域を立体的に結んだ線で囲まれた範囲(有効範囲)と考えられる。偏心接合部の破壊について、有効範囲に対する接合部せん断応力度に捩りモーメントによるせん断応力度が累加され、梁が偏心配置された側面側から破壊が進展する機構で説明できる。

キーワード：偏心接合, 捩りモーメント, せん断応力度

1. はじめに

柱に梁が偏心取り付けした十字型接合部は、柱上下端(実建物では反曲点位置)が捩れ拘束されていない、また、梁先端では面外方向の変位拘束がされていないとき、柱のせん断力と梁の曲げモーメントの合応力の水平断面でのずれ(偏心距離)で二次的に接合部に捩りモーメントが発生すると思われる。そして、接合部上面に生じる捩りモーメントと下面に生じる捩りモーメントは大きさが等しく逆向きで、接合部内で自己釣り合いすると考える。

本論文では、偏心接合による捩りモーメントが接合部の強度に影響することについて、接合部の応力状態を推定し、捩りモーメントにより接合部せん断応力度が増加することを示し、これによって接合部が破壊したと思われることについて、実験で得られた知見を記す。

2. 実験計画と実験結果

2.1 実験計画

(1) 試験体の形状

試験体は、柱心と梁心の距離(e : 偏心距離)を

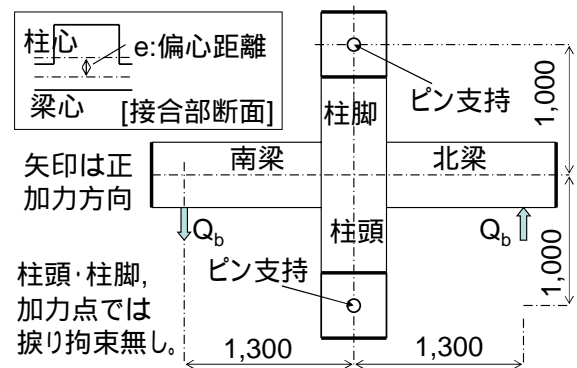


図 1 試験体東面形状と E085 の水平断面

表 1 試験体諸係数

	E00	E085	E135
e (mm)	00	85	135
柱 b_c (mm)	400		500
柱 D_c (mm)	500		300
σ (MPa)	5.88		
引張筋	5-D19		
dt_c (mm)	50	54	
帯筋	D10 @100		
梁 b_b (mm)	230		
梁 D_b (mm)	500	450	
引張筋	6-D19	4-D19	
dt_b (mm)	80		
あばら筋	D10 @100	ダブル	D10 @100

*1 工学院大学講師 工学部建築学科 工修 (正会員)
 *2 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *3 小田急建設(株) 技術本部技術開発部 工修 (正会員)
 *4 工学院大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

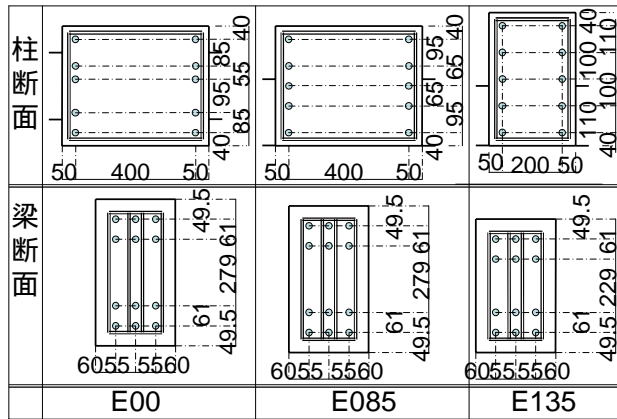


図 2 接合部断面リスト

主な変動因子に、3体作成した。接合部せん断強度と梁および柱の終局強度を比較して、試験体は接合部せん断破壊型に設計した。形状を図

1に示す。E00は非偏心試験体。E085はE00と同断面だが、梁を柱の側面に揃えた $e=85\text{mm}$ の試験体。E135は柱の強軸と弱軸を入れ替え、さらに、梁を柱の側面に揃えて偏心させた $e=135\text{mm}$ の試験体である。諸係数を表1に示す。なお、コンクリートは $f_c=23.3\text{N/mm}^2$ 、ヤング率は $E_c=1.68 \times 10^4\text{N/mm}^2$ である。主筋D19は $f_y=384.0\text{N/mm}^2$ 、せん断補強筋D10は $f_y=358.0\text{N/mm}^2$ で、ともにヤング率は $E_s=2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ とした。表1の記号は文献1)による。

接合部の配筋を図2に示す。接合部内の配筋は柱および梁の配筋と同様だが、せん断補強筋はD10@100で3本、梁心を基準に配筋した。

(2) 計測計画

荷重計測は加力点で荷重を梁せん断力 Q_b として計測した。また、柱軸力 N_c も、試験体の柱下面からの加力として計測した。なお、柱せん断力 Q_c は $Q_c=Q_b \times \text{スパン}(2600\text{mm}) \div \text{階高}(2000\text{mm})$ として計算した。

変位は梁先端(加力点)と柱ピン支持点で計測したほか、図3に示す接合部東面(偏心側面)の4点で各3方向(南北、上下、東西)を共通の基準点からの相対変位として測定した。なお、E00とE085では $h=340\text{mm}$ 、 $W=340\text{mm}$ 、E135では $h=290\text{mm}$ 、 $W=140\text{mm}$ である。

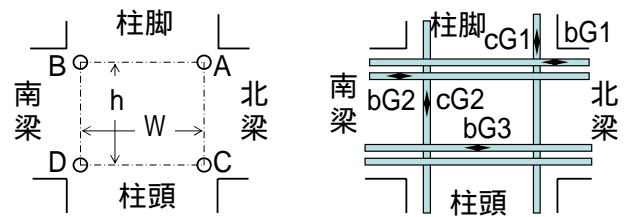
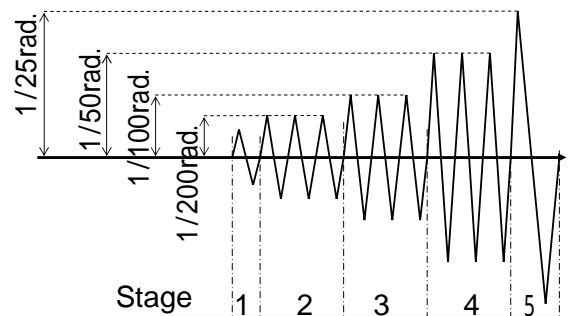


図 3 変位形設置位置 図 4 歪ゲージ位置



Stage1は柱せん断力による荷重制御
Stage2から4は層間変位角による変位制御で各3cycle
Stage5も層間変位角による変位制御

図 5 加力計画

歪計測は柱主筋および梁主筋に歪ゲージを貼り付け計測した。図4の矢印がゲージ位置で、柱脚位置(梁上端面位置):cG1と梁心位置:cG2とした。また、梁端位置(境界梁取り付け面):bG1、bG2と柱心位置:bG3とした。

(3) 加力計画

図5に加力計画を示す。図1の柱先端をピン支持し、梁先端(矢印位置)に5つのステージに分けて繰り返し正負交互に加力した。なお、 $\sigma_c=6\text{N/mm}^2$ の柱軸力を一定圧加えている。

2.2 実験結果

(1) 柱せん断力と層間変位角

3つの試験体ともに、柱・梁に大きなせん断ひび割れは生じず、コンクリートの圧潰、主筋の降伏は生じず、接合部の斜めひび割れが拡幅したとき試験体の強度は低下した。よって、接合部せん断破壊先行型と考える。

柱のせん断力 Q_c と層間変位角 R の履歴曲線の包絡線を図6に示す。同一断面のE00とE085を比較すると、偏心試験体は非偏心試験体に比べて強度が低いことを示している。また、

最大強度を示した後の強度低下率も偏心試験体は大きく、偏心試験体は非偏心試験体に比べて力学的性能が劣ると思われる。

(2) 捩りモーメントと捩り率

捩りモーメント M_t と捩り率 ω の関係を図 7 に示す。 M_t を柱せん断力と偏心距離との積として式(1)とする。また、 ω は接合部内の捩り角の上下方向の変化率として、式(2)とする。ここで A, B, C, D は接合部偏心面(東面)で計測した変位で、図 3 の柱心と梁心の交点を基準点とした東西方向の変位成分である。なお、変数の添え字は変位の測定点に対応する。

$$M_t = Q_C \times e \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\frac{(\delta_A - \delta_B)}{W} - \frac{(\delta_C - \delta_D)}{W}}{h} \quad (2)$$

E085 の接合部水平断面形状は長辺 500mm、短辺 400mm と整形で、E135 は長辺 500mm、短辺 300mm で扁平である。捩り強度および捩り剛性は整形な E085 が大きい。しかし、最大強度後の強度低下率は E135 が小さく、靱性能は扁平な E135 が高いと思われる。

(3) 接合部せん断力と接合部せん断変形角

接合部せん断力 V_j と梁幅中心垂直断面の接合部せん断変形角 j の関係を図 8 に示す。 V_j は Q_b と Q_c をもとに式(3)で求める。 j は接合部東面のせん断変形角 j_s から捩り成分を補正($j = j_s - \theta \times e$)する。なお、 j_s は接合部東面(図 3)の 4 点の位置ベクトル(南北方向および上下方向)の変化から、式(4)で求める。

$$V_j = \frac{Q_b(L - D_c)}{j_b} - Q_c \quad (3)$$

ここで、 L : スパン

$j_b = d_b \times 7/8$: 梁の応力中心間距離

$$\gamma_{js} = \theta - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

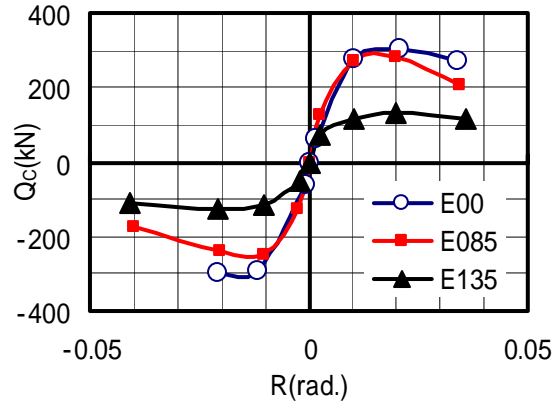


図 6 柱せん断力と層間変位角関係

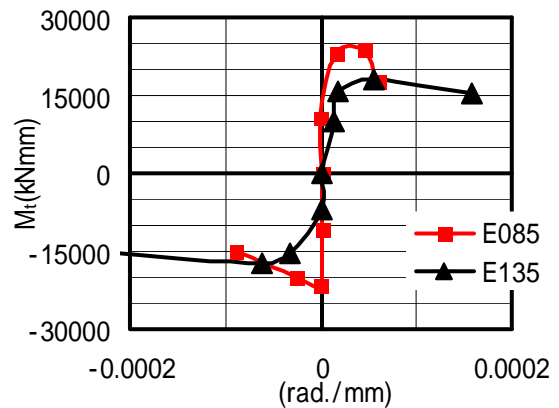


図 7 捩りモーメントと捩り率

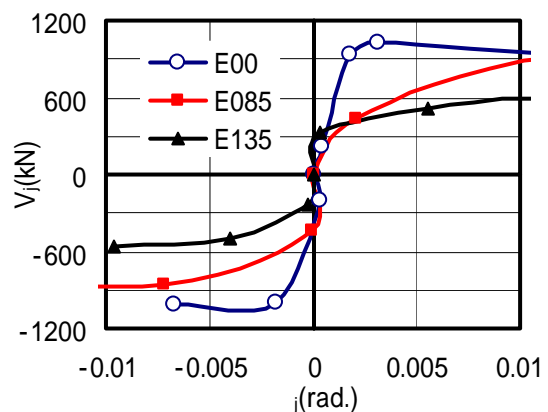


図 8 接合部せん断力とせん断変形角

ここで

$$\cos \theta = \frac{(\vec{a}\vec{b} \cdot \vec{\alpha}\vec{\beta})}{|\vec{a}\vec{b}| \times |\vec{\alpha}\vec{\beta}|}$$

$$\alpha\bar{\beta} = \begin{cases} (X_A + X_B)/2 - (X_C - X_D)/2 \\ (Y_A + Y_B)/2 - (Y_C + Y_D)/2 \end{cases}$$

$$a\bar{b} = \begin{cases} (X_A + X_C)/2 - (X_B - X_D)/2 \\ (Y_A + Y_C)/2 - (Y_B + Y_D)/2 \end{cases}$$

なお， X_A, X_B, X_C, X_D は図 3 の柱心と梁心の交点を原点とした接合部の変形後の水平方向の座標。同じく， Y_A, Y_B, Y_C, Y_D は上下方向の座標。

図 8 では，断面の等しい E00 と E085 を比べたとき，偏心試験体は非偏心試験体に比べ剛性が低い。これは，偏心試験体は V_j に加えて捩りモーメントが累加されたためと考える。

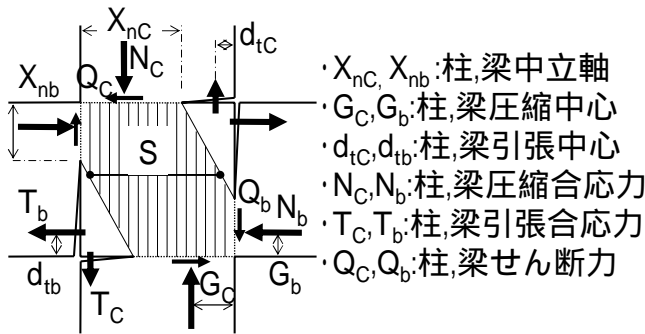


図 9 接合部周辺の応力

3. 接合部の応力と歪

3.1 接合部周辺の歪

柱脚および梁端部の歪分布を仮定し，接合部周辺の応力状態を図 9 のように推定する。

平面保持の仮定により梁端部で中立軸位置 X_{nb} ，歪勾配 ϵ_b は断面形状，材料特性係数，曲げモーメントの関数として式(5)，式(6)となる。中立軸位置から梁主筋までの距離を h_{sb} とすると，主筋の歪度は式(7)となる。また，柱脚で中立軸位置 X_{nc} ，歪勾配 ϵ_c は断面形状，材料特性係数，曲げモーメント，軸力の関数として式(8)，式(9)より求まる。中立軸位置から柱主筋までの距離を h_{sc} とすると，主筋の歪度は式(10)となる。

梁端部の中立軸位置 X_{nb} ：

$$X_{nb} = \frac{-2 \cdot n \cdot a_{tb} / b_b}{1 + \sqrt{(2n \cdot a_{tb} / b_b)^2 + 2n \cdot D_b \cdot a_{tb} / b_b}} \quad (5)$$

ここで $n = E_S / E_C$ ， E_S は降伏前鉄筋のヤング率， E_C は弾性時コンクリートのヤング率である。

歪勾配：

$$\epsilon_b = \frac{M_b}{E_S \cdot a_{sb} \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (6)$$

ここで， $C_1 = (D_b - X_{nb} - d_{tb})$
 $C_2 = (D_b - d_{tb} - G_b)$

そして，

$$G_b = \frac{b_b \frac{X_{nb}^3}{6} + n \cdot d_{tb} \cdot a_{tb} (X_{nb} - d_{tb})}{b_b \frac{X_{nb}^2}{2} + n \cdot a_{tb} (X_{nb} - d_{tb})}$$

中立軸から h_{sb} 離れた梁主筋の歪度 ϵ_{sb} ：

$$\epsilon_{sb} = \epsilon_b \cdot h_{sb} \quad (7)$$

柱脚の中立軸位置 X_{nc} を求める条件式：

$$n(X_{nc} \cdot D_c - 2D_c \cdot d_{tc} + 2d_{tc}^2) a_{tc} + X_{nc} \frac{X_{nc} \cdot b_c}{2} \left(D_c - \frac{X_{nc}}{3} \right) = K \frac{b_b}{2} X_{nb}^2 + K \cdot n \cdot a_{tb} \cdot (2X_{nb} - D_b) \quad (8)$$

ここで， $K = \frac{M_c + N \frac{D_c}{2}}{N}$ とした。

歪勾配：

$$\epsilon_c = \frac{M_c + N \frac{D_c}{2}}{U} \quad (9)$$

ここで，

$$U = E_S (X_{nc} \cdot D_c - 2D_c \cdot d_{tc} + 2d_{tc}^2) a_{tc} + E_C \cdot X_{nc} \frac{X_{nc} \cdot b_c}{2} \left(D_c - \frac{X_{nc}}{3} \right)$$

中立軸から h_{sc} 離れた柱梁主筋の歪度 ϵ_{sc} ：

$$\epsilon_{sc} = \epsilon_c \cdot h_{sc} \quad (10)$$

図 10 は E00 試験体で実験時の応力状態に対して、式(5)(6)(7)で梁主筋の歪(梁端部梁上端筋 bG1 点：図-4)を計算した値と実験の計測値を比較した。○は最大強度前の計測値，●は最大強度後の計測値である。計算値は実線で示した。最大強度前で，計算値は計測値とよく一致しており，解析は妥当と考える。

図 11 は E00 試験体で実験時の応力状態に対して、式(8)(9)(10)で柱主筋の歪(柱脚部柱主筋 cG1 点：図-4)を計算した値と実験の計測値を比較した。○は最大強度前の計測値，●は最大強度後の計測値である。計算値は実線で示した。最大強度前で，計算値は計測値とよく一致しており，解析は妥当と考える。

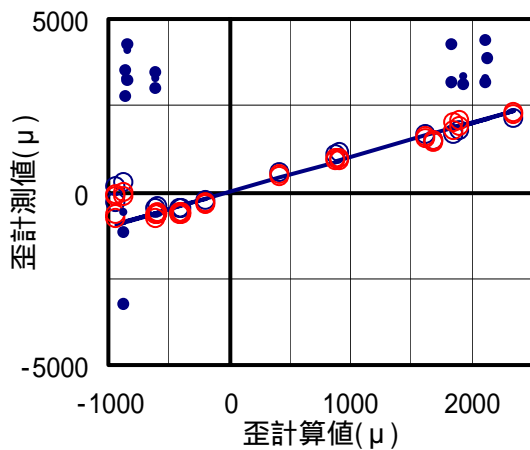


図 10 梁端部の歪

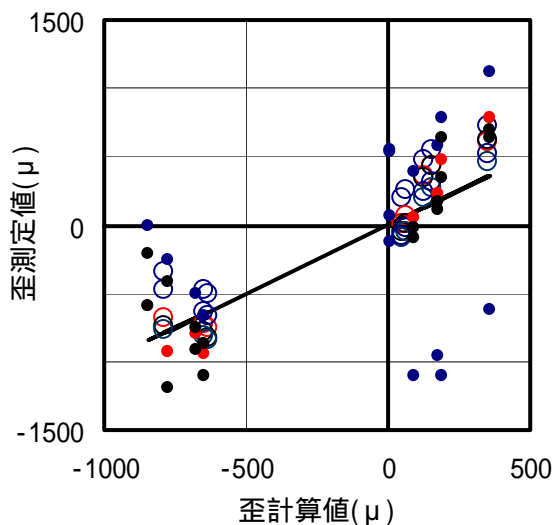


図 11 柱脚部の歪

図 12 は E00 試験体で，柱主筋の歪を柱脚部と梁心位置とで比較した。梁心位置の歪(cG2 点)は最大強度前の計測値で，○で示した。柱脚部の歪は前記の方法で計算した値で，実線で示した。柱主筋が引張応力を受けているときは柱脚部の歪と梁心位置の歪はほぼ一致している。つまり，引張側主筋は柱脚から梁心あたりの範囲では接合部内に力を伝えていないと思われる。

同様に図 13 は E00 試験体で，梁主筋の歪を梁端部と柱心位置で比較したものである。柱心位置の歪(bG3 点)は最大強度前の計測値で，○で示した。梁端部の歪は前記の方法で計算した値で，実線で示した。梁主筋が引張応力を受けているときは梁端部の歪と柱心位置の歪は概ね一致している。つまり，引張側主筋は梁端から柱心あたりの範囲では接合部内に力を伝えて

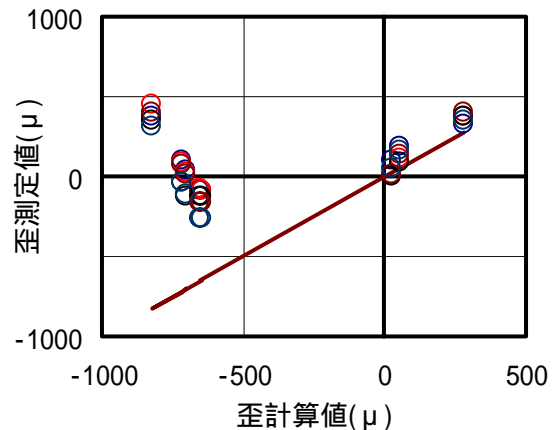


図 12 柱主筋の歪比較

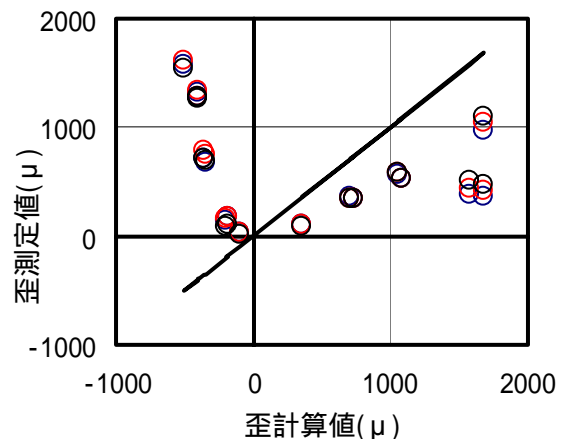


図 13 梁主筋の歪比較

いないと思われる。

以上から，図 9 に示したように柱梁接合部への引張筋からの接合部せん断力の伝達は他方向(梁引張筋に対しては柱，柱引張筋に対しては梁)から圧縮力を受けている範囲(中立軸位置を結んだ線で囲まれた範囲：ハッチ部分)と考える。

3.2 接合部せん断応力度

接合部せん断力に対する抵抗要素を引張筋から力が伝わり始まる範囲(図 9 のハッチ部分)と考え，幅 S と柱幅の積をせん断有効断面($A_{ja}=S \times b_c$)と仮定する。有効断面に対する平均せん断応力度($\tau_{ja}=V_j/A_{ja}$)を求める。

また，捩りモーメントの影響を考慮するため，有効断面を楕円に置き換えてせん断応力度を求めることを試みた。 A_{ja} と同一面積の楕円(長軸と短軸の長さ比は有効断面の長辺と短辺の比に等しいとする)を仮定し， M_t による楕円周上のせん断応力度(τ_{jt1} :せん断方向， τ_{jt2} :直交方向)を式(11)で求めた。

$$\tau_{jt1} = \frac{2M_t}{\pi \cdot \alpha \cdot \beta^2}, \tau_{jt2} = \frac{2M_t}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \beta} \quad (11)$$

表 2 に 3 つの試験体の最大強度時のせん断応力度の比較を示す。 V_{jmax} は最大強度時の接合部せん断力，このときの有効断面積に対する平均せん断応力度の最大値 τ_{jmax} を示した。また，

表 2 偏心面のせん断応力度

	E00	E085	E135
V_{jmax} (kN)	1022	955	595
X_{nC} (mm)	326	325	176
X_{nb} (mm)	171	171	142
S (mm)	416	415	233
A_{ja} (mm ²)	166369	166197	116670
τ_{jmax} (N/mm ²)	6.1	5.7	5.1
M_{tmax} (kNmm)		23895	17989
(mm)		234	132
(mm)		226	282
τ_{jt1} (N/mm ²)		1.3	1.1
τ_{jt2} (N/mm ²)		1.2	2.3
τ_{jbmax} (N/mm ²)		1.2	2.3
τ_{jDmax} (N/mm ²)	6.1	7.0	6.2

捩りモーメント M_{tmax} による接合部南面および北面のせん断応力度の最大値 τ_{jbmax} ，そして，接合部東面(偏心面)の最大せん断応力度を平均せん断応力度と捩りモーメントによるせん断力の和 τ_{jDmax} として示した。

E00 は $V_{jmax}=1022$ kN の時最大強度で，接合部はせん断破壊した。このとき τ_{jmax} は 6.1 N/mm² で，これを本実験シリーズの接合部せん断強度の基準値とする。一方，偏心試験体 E085 および E135 は $\tau_{jmax}=5.7$ N/mm² および 5.1 N/mm² とせん断強度の基準値に対して小さいが，2次応力として発生する捩りモーメントによる接合部東面(偏心側面)のせん断応力度 τ_{jt1} を加えた τ_{jDmax} はいずれも基準値を上回る。よって，偏心試験体では平均せん断応力度に捩りモーメントによるせん断応力度が累加され偏心側面からせん断破壊が発生すると思われる。

4. まとめ

検討結果を列記する。

- ・偏心接合部は非偏心接合部に比べて強度が低下する。これは2次応力として捩りモーメントが発生し，接合部せん断力に累加されるためと思われる。
- ・接合部のせん断抵抗要素は柱および梁の圧縮域を結んだ範囲で構成するせん断有効断面と思われる。
- ・偏心接合部の破壊機構は，せん断有効断面でせん断力と捩りモーメントに抵抗し，捩りモーメントによるせん断応力度を累加して評価することができる。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会 1999
- 2) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説，日本建築学会
- 3) 高岡宣善，構造部材の捩り解析，共立出版