

論文

[2092] プレストレストコンクリート造外部梁・柱接合部の設計法
に関する研究

正会員 ○西山峰広 (京都大学工学部)

西崎隆氏 (京都大学大学院)

正会員 六車 熙 (京都大学工学部)

正会員 渡辺史夫 (京都大学工学部)

1. 序

著者らは、市之瀬[1]、藤井ら[2]による研究を参考に、梁柱接合部について主だったせん断抵抗機構をいくつか抜き出してモデル化し、それらの重ね合わせによって全体のせん断抵抗機構を表現するという手法を用いて、PC造外部梁柱接合部のせん断抵抗機構を表現し、梁が終局状態に達する以前に接合部がせん断破壊することを防ぐために必要となる接合部せん断補強筋量の設計式を導いた。本論文では、以下にこれを報告するとともに、本モデルの有効性を確認するため行ったPC造外部梁柱接合部に対する繰り返し載荷試験結果との比較を示す。

2. 解析対象接合部及び解析仮定

2. 1 解析対象接合部

梁に対して緊張材によりプレストレスが導入され、柱は鉄筋コンクリート造の外部梁柱接合部を対象とする。簡略化のため直交梁、床スラブの効果は無視する。また、梁降伏先行型の接合部のみを対象とし、柱の降伏が先行するような場合は取り扱わない。また、梁普通鉄筋の上端筋量は、下端筋量よりも多いか、または等しいとする。緊張材は、梁断面重心軸位置に関して上下対称配置、柱主筋については左右対称配置とする。

2. 2 解析仮定

(1) 梁普通鉄筋は、上端・下端筋ともに引張試験より得られた降伏強度 f_y に達しているものとする。また、このような鉄筋引張力及び圧縮力は、鉄筋とコンクリート間の付着力のみによって接合部パネルに伝達されるものとする。

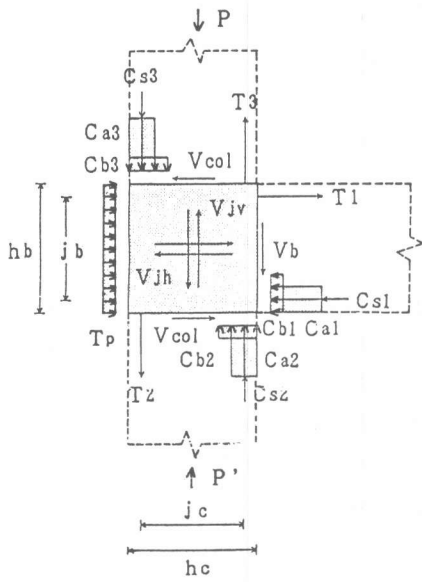
(2) (1) で仮定したような梁主筋力と柱せん断力との差が接合部に入力されるとする。また、上下柱のせん断力は等しいとする。

(3) コンクリートの引張力は無視し、また、柱主筋は、弾性範囲にあるものとする。

(4) 終局時における接合部まわりの応力状態を図1に示すようにモデル化する。普通鉄筋については、その配置位置に作用する集中力と置き換える。コンクリートについてはその圧縮応力の分布を2つの矩形応力ブロックにより置き換える。すなわち、梁危険断面では圧縮鉄筋位置と図心位置が一致し、かつ、圧縮鉄筋かぶり厚の2倍のせいをもつ矩形圧縮応力ブロックCb1と、梁断面曲げ解析により得られた中立軸高さにわたって等分布する矩形圧縮応力ブロックCb2により置き換える。また、柱危険断面についても同様に2種類の矩形圧縮応力ブロックを考える。

このような2種類の圧縮応力ブロックを用いることにより、梁においては、プレストレスの大きさによる圧縮ストラットの幅の変化を、また、柱においては、軸力の大きさによる圧縮ストラットの幅の変化をそれぞれ解析にとり込むことができる。また、さらには、上下柱危険断面における軸力とモーメントのつり合いをともに満足させることも可能となる。

(5) 接合部内における緊張材とコンクリート間の付着力は無視する。これは、既往の研究においても指摘されているように、緊張材の付着が塑性域における繰り返し載荷により容易に劣化し、



- P : 上柱軸力
- P' : 下柱軸力 (P' = P + Vb)
- Vjh : 接合部水平せん断力
- Vjv : 接合部垂直せん断力
- Tp : 柱自由面に一様分布するプレストレス力
- Vb : 梁せん断力
- Vcol : 柱せん断力
- T1 : 梁引張鉄筋力
- Cs1 : 梁圧縮鉄筋力
- Ca1 : 圧縮鉄筋の周りに一様分布 (長方形分布) するコンクリート圧縮力
- Cb1 : 柱自由面における一様分布圧縮力Tp とつり合い、梁中立軸深さ dnb 間に一様分布するコンクリート圧縮力
- T2 : 下柱引張鉄筋力
- Cs2 : 下柱圧縮鉄筋力
- Ca2 : 下柱圧縮鉄筋の周りに一様分布 (長方形分布) するコンクリート圧縮力
- Cb2 : 上柱危険断面における圧縮力Cb3と大ききの等しいコンクリート分布圧縮力
- T3 : 上柱引張鉄筋力
- Cs3 : 上柱圧縮鉄筋力
- Ca3 : 上柱圧縮鉄筋の周りに一様分布 (長方形分布) するコンクリート圧縮力
- Cb3 : 上柱の中立軸深さ dnc 間に一様分布するコンクリート圧縮力

図1 終局時における接合部まわりの応力状態のモデル化

緊張材の張力は接合部自由面の定着装置 (定着板) を介して接合部パネルに伝達されるという状態を想定しているためである。したがって、緊張材による軸圧縮力は、梁危険断面コンクリート圧縮域と接合部自由面から接合部パネルに伝達されるものとする。また、接合部自由面においてはこの圧縮力 $T_p (= T_{p1} + T_{p2})$ は均一に分布すると仮定する。

(5) 梁に配置されている緊張材は、平面保持の仮定を用いた梁断面曲げ解析により得られる応力状態にあるとする。ここで先の付着の劣化の仮定と矛盾が生じるわけであるが、断面曲げ解析の際にこの付着の影響を考慮するには、歪の適合係数 F [3] などを用いる他は、計算が繁雑になってしまう。さらに、この F 値にも不確定な要素が多いため、現時点では、平面保持を仮定することにした。

3. せん断抵抗機構

次に示すような6種類のせん断抵抗機構を考慮する。以下、各記号はすべて図中に示してある。

(1) ストラット機構 a (図2)

この機構は、市之瀬[1] によって提案された準ストラット機構 a に相当するものである。

力のつり合いより次式を得る。

$$C'sa = Vsa = Qsa \quad (1)$$

$$Csa \cdot jc = Qsa \cdot jb \quad (2)$$

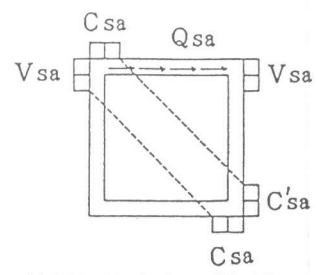
ここで、 jc 、 jb は、それぞれ柱、梁主筋間距離。

(2) ストラット機構 b (図3)

力のつり合いより、

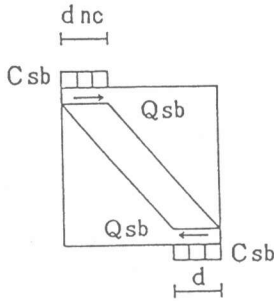
$$Csb = Cb3 = Cb2 \quad (3)$$

$$Qsb \cdot jb = \{ hc - (d + dnc) / 2 \} \cdot Cb3 \quad (4)$$

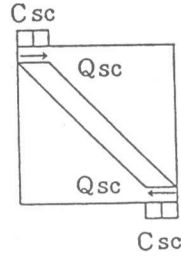


- Vsa : 接合部上部の水平せん断補強筋による「たが」作用の一部
- Qsa : 梁上端筋の付着力の一部
- Csa : 圧縮鉄筋周りに作用する上下柱コンクリート圧縮力Ca2及びCa3の一部
- C'sa' : 梁下端の圧縮鉄筋周りに作用するコンクリート圧縮力Ca1の一部

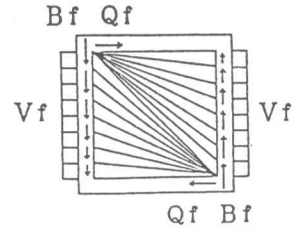
図2 ストラット機構 a



Csb : 上柱中立軸深さ d_{nc} 間に
一様分布する圧縮力 (= Cb3)
Csb' : 下柱圧縮縁から距離 d の間に
一様分布する圧縮力 (= Cb2)
Qsb : 本ストラット端部圧縮域で
伝達される梁上端筋と下端筋の
付着力の一部



Csc : 上下柱圧縮鉄筋周りに作用する
コンクリート圧縮力 Ca2
及び Ca3の一部
Qsc : 本ストラット端部圧縮域
で伝達される梁上端筋と
下端筋の付着力の一部



Vf : 接合部水平せん断補強筋による
「たが」作用の一部
Qf : 梁上端筋と下端筋の付着力の一部
Bf : 三角形分布となる左右柱主筋の
付着力の一部

図3 ストラット機構 b

図4 ストラット機構 c

図5(a) 扇型トラス機構

ここで、 d : 下柱危険断面の応力ブロック Cb2の分布長さ。
 d は下柱危険断面におけるモーメントが、梁断面終局モーメントの1/2となるように決定される。 h_c : 柱全せい。

(3) ストラット機構 c (図4)

モーメントのつり合いより

$$C_{sc} \cdot j_c = Q_{sc} \cdot j_b \quad (5)$$

(4) 扇型トラス機構 (図5(a))

各扇型トラスの力のつり合いより

(図5(b))、

$$B_{f1} = B_{f2} = 1/2 \cdot B_f \quad (6)$$

機構全体の力のつり合いより、 V_f

$$Q_f \cdot j_b = B_f \cdot j_c \quad (7)$$

$$V_f = Q_f \quad (8)$$

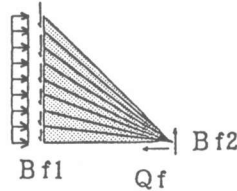
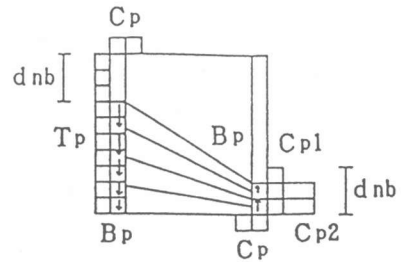


図5(b)



T_p : 自由側面に一様分布する圧縮力
 C_{p1} : 梁中立軸深さ d_{nb} 間に一様分布する
圧縮力 (= Cb1)
 C_{p2} : 梁下端の圧縮鉄筋周りに作用する
コンクリート圧縮力 Ca1の一部
 C_p : 上下柱の圧縮鉄筋周りに一様分布する
コンクリート圧縮力 Ca2及び Ca3の一部
 B_p : 三角形分布となる柱主筋の付着力の一部

図6(a) プレストレスによる
せん断抵抗機構

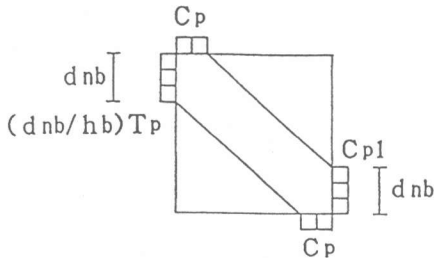


図6(b) プレストレスによるストラット機構

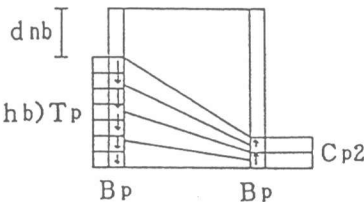


図6(c) プレストレスによる扇型トラス機構

(5) プレストレスによる機構 (図6(a))

次のような2種類のせん断抵抗機構を考案した。

(a) プレストレスによるストラット機構 (図6(b))

力のつり合いにより、

$$(d_{nb}/h_b) \cdot T_p = C_{p1} \quad (9)$$

$$C_p \cdot j_c = (d_{nb}/h_b) \cdot T_p \cdot (h_b - d_{nb}) \quad (10)$$

(b) プレストレスによる扇型トラス機構 (図6(c))

力のつり合いにより、

$$B_p \cdot j_c = (h_b - d_{nb}) / h_b \cdot T_p \cdot (j_b - d_{nb}) / 2 \quad (11)$$

(6) 梁せん断力の負担機構 (図7)

力のつり合いより、

$$V_b = C_{vb} + B_{vb} \quad (12)$$

せん断抵抗機構として、市之瀬[1]によるトラス機構を

除外したのは、次のような理由による。

(a) トラス機構を形成するには、柱危険断面において全断面にわたる一様なコンクリート圧縮力が必要となるが、かなりの高軸力下でないかぎりこのような分布圧縮力は考えにくい。特に、実設計では、外部接合部においては、引張軸力となるような場合も想定される。

(b) 市之瀬は、このトラス機構により柱中間筋の効果を考慮することができるとしている。しかし、柱中間筋は水平せん断補強筋と異なり通し配筋であり、その定着は上下柱内にとられることになるため、接合部内のひびわれにより生じた中間筋の引張力は、柱コンクリート圧縮域を通して接合部に伝えられる。このため、(a)と同様の理由により、柱中間筋による一様な圧縮力分布を考えることもまた難しい。

4. つり合い条件と必要せん断補強筋量の計算

接合部パネルに伝達される外力とそれに対応する内力のつり合いより次のような条件式が得られる。

(1) 梁上端筋と下端筋の付着力の差を負担するのはストラット機構 a の Q_{sa} 。したがって、

$$Q_{sa} = T_1 - C_{s1} \quad (13)$$

ここで、 T_1 : 梁上端鉄筋力 ($T_1 = f_y \cdot A_{st}$)、 C_{s1} : 梁下端鉄筋力 ($C_{s1} = f_y \cdot A_{sb}$)、 A_{st} : 上端鉄筋断面積、 A_{sb} : 下端鉄筋断面積。

(2) 柱自由面側柱主筋の付着力の $T_2 + C_{s3}$ は、扇型トラス機構の B_f とプレストレスによる扇型トラス機構 B_p で負担されるため、

$$B_f + B_p = T_2 + C_{s3} \quad (14)$$

(3) 柱自由面側柱主筋と梁接続面側柱主筋の付着力の差 ($T_3 + C_{s2}$) - ($T_2 + C_{s3}$) は、梁せん断力の負担機構の B_{vb} により負担される。したがって、

$$B_{vb} = (T_3 + C_{s2}) - (T_2 + C_{s3}) \quad (15)$$

(4) 上部柱危険断面におけるコンクリート圧縮力のうち圧縮鉄筋位置とその図心位置が一致する矩形応力ブロックに関するつり合いより、

$$C_{sa} + C_{sc} + C_p = C_{a3} \quad (16)$$

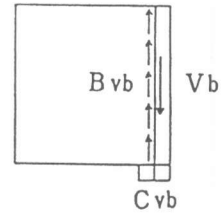
以上より、ストラット機構 a の V_{sa} と扇型トラス機構の V_f より、必要せん断補強筋量 V_{sh} は、

$$V_{sh} = V_{sa} / 2 + V_f \quad (17)$$

但し、梁上下主筋間に配置される補強筋を必要せん断補強筋とする。式(1)~(16)を用いると、

$$V_{sh} = (T_1 - C_{s1}) / 2$$

$$+ (j_c / j_b) \cdot (T_2 + C_{s3}) - \frac{(h_b - d_{nb}) \cdot (j_b - d_{nb})}{2 \cdot j_c \cdot h_b} \cdot T_p \quad (18)$$



V_b : 梁より伝達されるせん断力
 C_{vb} : 下柱圧縮鉄筋周りに一様分布するコンクリート圧縮力 C_{a2} の一部
 B_{vb} : 梁側柱主筋の付着力の一部

図7 梁せん断力の負担機構

5. 解析方法

必要せん断補強筋量を求める際の手順は次のようになる。

- (1) 梁および柱の配筋を、必要曲げ耐力、せん断耐力などの点から決定する。
- (2) 梁の断面曲げ解析を行い、終局時における中立軸位置、緊張材張力、曲げ耐力を求める。終局時は、例えば、コンクリート圧縮縁歪の値を設定するなどして決めることになる。
- (3) (2) で求めた梁終局時モーメントが接合部上下柱に等分されるとして、この柱モーメントに釣り合うように上下柱断面の歪・応力分布（具体的には、主筋応力、中立軸位置）を定める。
- (4) 式(18)を用いて V_{sh} を計算する。

本解析法では、解析仮定(1) で示したように普通鉄筋は、引張あるいは圧縮降伏しているものとして取り扱っている。しかしながら、梁の断面曲げ解析時には、例えば、圧縮鉄筋が降伏していない場合もある。このため、接合部解析時に梁危険断面において軸力のつり合いを満足するようにコンクリート圧縮力の大きさを決めることになり、梁断面曲げ解析より得られたモーメントとはつり合わない。但し、柱危険断面については、軸力のつり合いを満足し、かつ、柱断面曲げ解析時のモーメントともつり合う。

6. 実験結果との比較

上で記したようなせん断抵抗機構および必要せん断補強筋量設計式の有効性を検証するため、表1に示すような2体の純RC造を含む6体の外部梁柱接合部試験体に対して繰り返し載荷試験を行い、その実験結果を解析結果と比較した。各試験体は、梁断面200x300mm、柱断面300x300mm、

表1 各外部梁柱接合部試験体の仕様詳細一覧

試験体	fc' (MPa)	柱			接合部	梁		
		軸方向鉄筋	P (kN)	P/(Ag·fc')		Pwj (%)	軸方向鉄筋	e (e/D) (mm)
PC1	41.2	10-D19	264.6	0.0714	0.960 (φ9)	4-D19	30 (1/10)	276.8
PC2			98.0	0.0364			80 (1/3.8)	283.9
PC3			29.8	30 (1/10)			302.3	
PC4				80 (1/3.8)			294.2	
RC1	41.2	264.6	0.0714	6-D19, 4-D16	—	—		
RC2	29.8	98.0	0.0364					

fc' : コンクリート圧縮強度, P : 柱軸力, Ag : 柱断面積,

e : 梁断面における緊張材偏心距離 (梁断面重心軸位置より測定),

D : 梁全せい, Pe : 有効プレストレス,

Pwj : Ash/(bc·jb) (Ash : 接合部コア内の水平せん断補強筋全断面積,

bc : 柱幅, jb : 梁断面における上下主筋間距離

引張試験より得られた普通鉄筋の降伏強度 : D19 ----> 426 MPa, D16 ----> 359 MPa, φ9 ----> 335 MPa.

緊張材公称降伏強度 (0.2% offset) : 1275 MPa, 及び引張強度 : 1422 MPa.

接合部パネル中心位置より梁端加力位置まで1800mm、柱反曲点位置までは750mm となっている。6体の試験体は、その梁の曲げ耐力がほぼ等しく設計されている。梁筋は上端、下端とも同一配筋であり、PC1、PC2およびRC1では、梁普通鉄筋を緊張材とともに定着板に機械的に定着し、残りの試験体では上端下端ともに曲げ下げ定着とした。緊張材として、公称径11mmの異形P C鋼棒(D種1号SBPD130/145)を使用した。解析に使用した各材料の応力-歪関係は以下に示す通りである。・コンクリート：六車により提案された応力-歪曲線モデルと圧縮限界歪[4]・普通鉄筋：引張試験より得られた降伏強度を用いた完全弾塑性モデル・緊張材：公称降伏点 (0.2% offset)と公称引張強度点を折れ曲がり点とするTri-linearモデル

RC2を除いて試験体はすべて層間変形角 (梁端変位/梁長) にしてR=±1/15においても十分な耐力を保持し、実験は載荷装置の制約より打ち切った。紙面の制約により図は掲載しなかった

が、接合部パネルのせん断応力-せん断変形角関係、梁および接合部の破壊の様子さらには梁端変位に対するそれぞれの変形成分から、RC2のみ接合部のせん断破壊により終局に至ったと判断される。表2に実験結果と解析結果の比較を示す。実験値における接合部入力せん断力Vjhは、小倉・関根[5]によって示された式を用いて、梁端荷重より計算した。一方、解析時には図1に示した接合部の中央切断面について自由体のつり合いよりVjhを計算したため、その値が実験と解析で異なる場合がある。なお、実験のVshの値は、せん断補強筋に貼付した電気抵抗線歪ゲージの測定値より算出した。

表2 実験結果と本提案式による計算結果との比較

試験体	Vsh.real (kN)	Vsh.NZS (kN)	Vsh.prop (kN)	$\frac{Vsh.real}{Vsh.prop}$	σ_c (MPa)	$\frac{\sigma_c}{f_c'}$	Vsh.meas (kN)	$\frac{Vsh.meas}{Vsh.prop}$	Vjh (kN)	θ (rad)	破壊モード'
PC1	213.8	116.7	80.7	2.65	21.3	0.53	85.4	1.05	394.7	1/25.7	BY→BF
PC2		442.3	85.4	2.50	22.0	0.53	106.9	1.25	413.6	1/27.4	BY→BF
PC3		116.7	151.1	1.41	17.8	0.60	113.5	0.75	385.4	1/25.3	BY→BF
PC4		442.3	163.9	1.30	19.8	0.66	150.9	0.92	422.7	1/23.3	BY→BF
RC1		621.8	205.5	1.04	32.4	0.79	165.5	0.81	462.3	1/22.8	BY→BF
RC2		621.8	265.2	0.81	28.9	0.97	207.8	(0.78)	376.1	1/19.4	BY→JS

Vsh.real : Ash-fyj (fyj:接合部せん断補強筋降伏強度),

Vsh.NZS : NZSに規定されている必要せん断補強筋量,

Vsh.prop : 著者らの提案による設計式で与えられる必要せん断補強筋量,

Vsh.meas : 実験時に測定された接合部せん断補強筋張力の合計,

Vjh : 参考文献[5]に示されている算定式より求められる接合部入力せん断力,

θ : 梁の部材角,

破壊モード' : BY→BF : 梁の引張普通鉄筋が降伏した後に、梁の曲げ破壊により終局状態に至った。

BY→JS : 梁の引張普通鉄筋が降伏した後に、接合部がせん断破壊にした。

σ_c : 本論文で提案されたせん断抵抗機構モデルのコンクリート圧縮ストラットに生じる圧縮応力の和

表2より、接合部に実際に配筋されているせん断補強筋量Vsh.realが提案式による値Vsh.propを下回っているRC2のみが接合部でせん断破壊したことは注目される。また、実測値Vsh.measとVsh.propの比は、0.75~1.25でありほぼ十分な精度を示していると考えられる。なお、表2中にはせん断抵抗機構モデルの各圧縮ストラットに生じる圧縮応力の和も併せて示してあるが、算定法については別の機会に譲る。

7. 結び

PC造梁柱接合部のせん断抵抗機構をモデル化し、必要せん断補強筋量を得るための設計式を示した。また、PC造梁柱接合部に対する載荷試験結果と比較することにより、本モデルと設計式の妥当性が示された。

【参考文献】

- [1] 市之瀬:付着良好な梁降伏型RC内部接合部の必要せん断補強筋量,日本建築学会構造系論文集,第383号,昭和63年1月,pp.88-97
- [2] 藤井,森田:鉄筋コンクリート外部柱・はり接合部におけるせん断抵抗機構に関する考察,日本建築学会近畿支部研究報告集 構造系,昭和63年,pp.89-92
- [3] Burns,N.H.and Siess,C.P.: Repeated and Reversed Loading in Reinforced Concrete, Journal of SD,Proceedings of ASCE,Oct.,1966,pp.65-78
- [4] 六車:コンクリートの強度発現機構からみた曲げ圧縮限界歪に関する研究, 複合材料シンポジウム論文集, March, 1976, pp.383-391
- [5] 小倉,関根:鉄筋コンクリート柱・はり接合部に関する研究の動向, コンクリート工学 Vol.19, No.9, Sep., 1981, pp.3-15