

論 文

[2064] 鉄筋コンクリート内部柱・梁接合部におけるせん断抵抗機構

正会員○舟井哲也（京都大学大学院）

正会員 藤井 栄（京都大学建築学科）

正会員 森田司郎（京都大学建築学科）

1. まえがき

R C 柱・梁接合部のせん断耐力に及ぼす、せん断補強筋や柱軸力、主筋の付着性能等の複合的な影響については、かなりの実験資料の蓄積にもかかわらず明確でない。このため最大公約数ともいえるコンクリート強度の関数としてせん断耐力を評価せざるを得ないのが現状である。本研究は、ト型柱・梁接合部に対して著者等が提案したせん断抵抗機構解析法 [1] を内部接合部の場合に拡張した簡易な解析法を提案するものであり、梁通し筋の付着能力、柱軸力、接合部内せん断補強筋がせん断耐力に及ぼす影響について検討した。

2. 解析手法

本解析は、ある外力に対して接合部に形成されるせん断力伝達機構およびパネルコンクリートの応力を求める解析である。

2. 1 接合部まわりの応力条件の設定

(1) 梁断面力

梁の両危険断面での断面内力は、平面保持断面解析を行って鉄筋力、コンクリート圧縮力を求める。次に図-1に示すように断面力の修正を行う。

① 梁が降伏している場合には、降伏以後の繰り返し載荷条件を考慮し、梁圧縮筋となる位置の梁筋力は、上下等量配筋の場合は圧縮降伏力、上下等量でない場合は、その断面の引張鉄筋力に等しい圧縮力に修正する。

② 二段配筋の場合には内側筋の付着力が非常に小さくなる特徴がある [2] ため、内側筋の付着力は無視し、内側筋の圧縮側の危険断面の鉄筋力は反対側の引張力（断面解析解）に等しい値に置き換える。

③ 上記の修正後、接合部内で要求される付着応力が付着強度 τ_u を超えていないことを確かめる。もし超えている場合には付着応力が付着強度 τ_u なるように圧縮側の鉄筋力を修正する。

④ 梁鉄筋力の修正にともない左右の梁危険断面において軸力の釣合を満たすコンクリート圧縮力とモーメントの釣合を満たす合力の作用位置を求める。

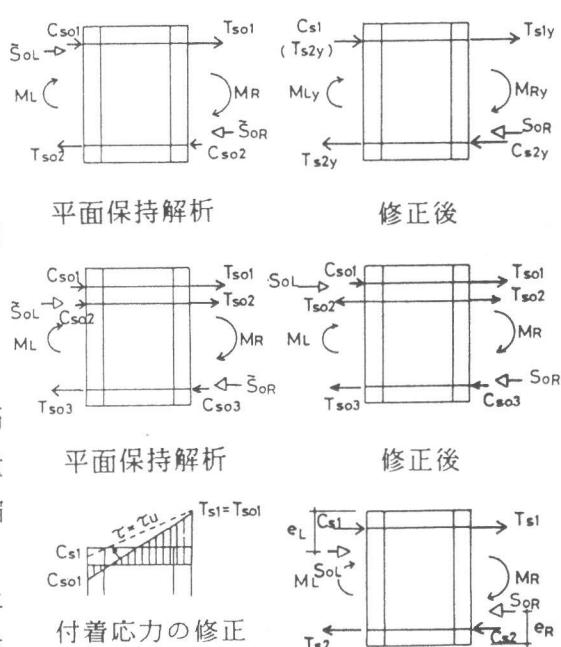


図-1 梁断面力の修正

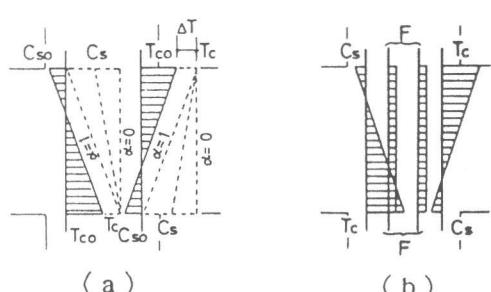


図-2 柱断面力の修正

(2) 柱断面力

上下柱の危険断面での断面力は平面保持の断面曲げ解析を行った後、図-2に示す修正を行う。柱断面力が上下で異なる場合にはその平均で処理する。

① 上下柱危険断面の外縁鉄筋力は平面保持解析で得られた鉄筋力から、柱筋降伏強度までの範囲で引張側にシフトしうるとし、これを ΔT で表す。

表-1 各機構の構成力と釣合式

機構構成力	釣合式
機構①・柱コンクリート圧縮力： P_1 ・梁コンクリート圧縮力： S_1	$P_1 \cdot (h_c - 2a_1) = S_1 \cdot (h_b - 2e_1) \dots (7)$
機構②・柱外縁筋付着力： B_2 ・梁コンクリート圧縮力： S_2	$B_2 \cdot j_c = S_2 \cdot (h_b - 2e_1) \dots (8)$
機構③・柱コンクリート圧縮力： P_3 ・梁筋付着力： R_3	$R_3 \cdot j_b = P_3 \cdot (h_c - 2a_2) \dots (9)$
機構④・梁コンクリート圧縮力： S_4 ・梁筋付着力： R_4 ・柱コンクリート圧縮力： P_4	$P_4 \cdot (h_c - 2a_1) = R_4 \cdot (\frac{j_b}{2} + \frac{h_b}{2} - e_1) \dots (10)$
機構⑤・柱コンクリート圧縮力： P_5 ・梁筋付着力： R_5 ・せん断補強筋力： $W_5 (=R_5)$	$B_5 \cdot (\frac{j_c}{2} + \frac{h_c}{2} - a_2) = W_5 \cdot \frac{j_c}{2} \dots (11)$
機構⑥・柱筋付着力： B_6 ・せん断補強筋力： W_6	$B_6 \cdot j_c = W_6 \cdot j_c \dots (12)$
柱・梁せん断力の釣合	$V_c = R_{v1} \cdot \frac{j_b}{h_b} (+ S_{v1} \cdot \frac{h_b - 2e_1}{h_b}) \dots (13)$ $V_b = B_{v1} \cdot \frac{j_c}{h_c} (+ P_{v1} \cdot \frac{h_c - 2a_1}{h_c}) \dots (14)$

$$\Delta T = \gamma \cdot \Delta T_0 = \gamma \cdot (\sigma_{cy} \cdot A_{ct} - T_{co}) \dots (1)$$

ここで、 σ_{cy} ：柱筋降伏強度、 A_{ct} ：外縁柱筋断面積、 T_{co} ：平面保持解析から得られる柱危険断面最外縁の柱鉄筋力を表す。 γ は柱鉄筋力増大係数 ($0 \leq \gamma \leq 1$) である。

② 柱外縁筋の付着力の仮定(図-2(a)参照)。

平面保持解析から得られる付着力 B_0 を最大として、形成されるせん断抵抗機構、局所の付着強度に応じて変化しうるものと仮定する。付着力 B は次式で表される。

$$B = \alpha \cdot B_0 = \alpha \cdot (T_{co} - C_{so}) \dots (2)$$

ここで T_{co} 、 C_{so} は、平面保持解析による柱危険断面における柱外縁鉄筋の引張、圧縮力であり、 α は柱筋付着有効係数 ($0 \leq \alpha \leq 1$) である。

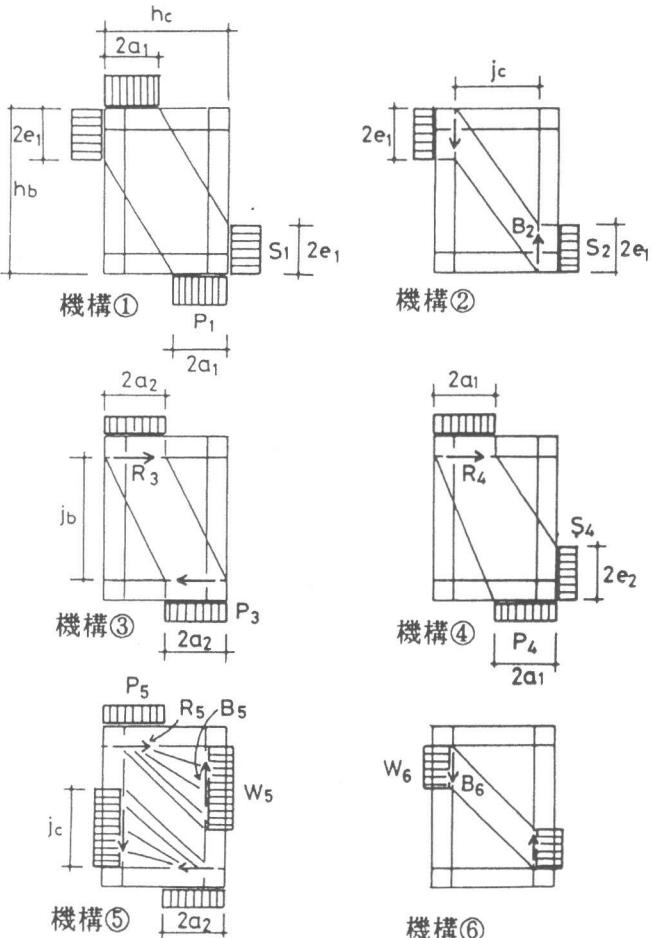


図-3 せん断抵抗機構

これより、柱外縁筋の危険断面での鉄筋力は次のように表される。

$$\text{柱外縁鉄筋引張力: } T_c = T_{co} + \Delta T \quad \dots\dots (3)$$

$$\text{柱外縁鉄筋圧縮力: } C_s = C_{so} + \Delta T + \alpha B_o \quad \dots\dots (4)$$

③ 柱中間鉄筋力の仮定（図-2(b)参照）

柱中間筋の接合部パネル内での付着力は考慮しない。さらに、接合部内での柱中間筋の伸び量が柱外縁筋の接合部内伸び量に等しいと仮定すると、次式が成立する。

$$F = \frac{A_f \cdot (T_c + C_s)}{2 \cdot A_{ct}} \quad \dots\dots (5)$$

ここで F は中間筋の鉄筋力の合力、 A_f は中間筋断面積、 A_{ct} は柱外縁鉄筋断面積である。

①②③の仮定は既往の実験結果 [2] で見られた性状を反映させたものである。

④ 柱危険断面でのコンクリート圧縮力

上記の柱鉄筋力修正の結果、柱危険断面のコンクリート圧縮力、その作用位置はモーメント、軸力の釣合を満たすように再分布させる。付着有効係数 α 、柱鉄筋力増大係数 γ に依存する。

2. 2 接合部せん断補強筋力の仮定

せん断補強筋に生じる引張力は接合部パネルに水平方向の一様な圧縮力 W_h を生じさせると考える。 W_h は、次式で与えられる。

$$W_h = \beta W_{ho} = \beta (A_w \cdot \sigma_{wy}) \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 A_w : 接合部内せん断補強筋断面積、 σ_{wy} : せん断補強筋降伏強度、 β : せん断補強筋有効係数 ($0 \leq \beta \leq 1$) を表す。

2. 3 せん断抵抗機構モデルと釣合式

図-3 に示す 6 種類の基本的なせん断抵抗機構および梁、柱のせん断力の釣合を考える。各機構の構成力と釣合式（式(7)～(14)）を一括して表-1 に示す。

左右の梁の断面力が異なる場合には、コンクリート圧縮力の小さい側の梁危険断面の圧縮力作用位置を e_1 とし、他方の断面では、残りのコンクリート圧縮力 (S_4) に対してモーメントの釣合を満たす位置を求めてこれを e_2 とする。

柱コンクリート圧縮力の作用位置 a_1 、 a_2 は、それぞれ機構①、機構③が最も有利な（コンクリート斜め圧縮束に生じる応力を小さくする）位置をあらかじめ計算して与える。

$$a_1 = \frac{h c^2 + A \cdot B - A \cdot \sqrt{(B^2 + h c^2)}}{2 h c} \quad \dots\dots (15)$$

ここで、 $A = h b - 2 e_1$ 、 $B = h b - 4 e_1$ である。 a_2 は上式で、 $e_1 = 0$ としてやればよい。このように柱断面のコンクリート圧縮力とその作用位置を元の値から変更することは、先に仮定した柱鉄筋力のシフト（ γ の設定）によって可能になる。

2.4 接合部まわりの応力の釣合

$$\text{柱コンクリート圧縮力: } P_o = P_1 + P_3 + P_4 + P_5 + P_v \dots (16)$$

$$\text{柱筋付着力: } B = \alpha B_o = B_2 + B_5 + B_6 + B_v \dots (17)$$

$$\text{梁筋付着力: } R_{ot} = R_3 + R_4 + R_5 + R_v \text{ (上端筋)} \dots (18)$$

$$R_{ob} = R_3 + R_5 + R_v \text{ (下端筋)} \dots (19)$$

$$\text{梁コンクリート: } S_{oL} = S_1 + S_2 + S_v \text{ (左梁)} \dots (20)$$

$$\text{圧縮力 } S_{oR} = S_1 + S_2 + S_4 + S_v \text{ (右梁)} \dots (21)$$

$$\text{せん断補強筋力: } Wh = \beta Wh_o = W_5 + W_6 \dots (22)$$

$$\text{接合部せん断力: } V_j = S_1 + S_2 + R_3 + R_4 + R_5 \dots (23)$$

2.5 各せん断抵抗機構の優先順位と計算方法

以下の手順で計算を行う。

(1)供試体の寸法、配筋、材料特性値、梁、柱せん断力の条件設定。

(2)梁、柱断面の曲げ解析によって、平面保持解析値を得る。

(3)梁断面の鉄筋力の修正。

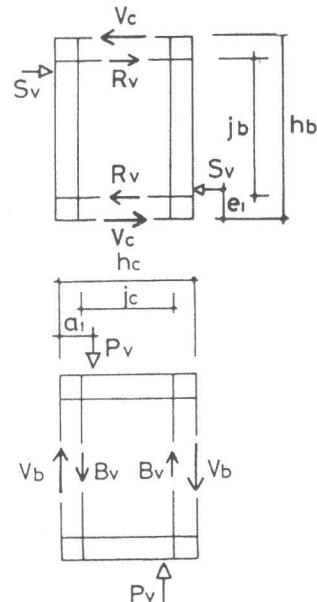


図-4 せん断力の釣合

(4)梁断面モーメント、軸力の釣合を満たす S_{oL} 、 S_{oR} の算出、および機構④の有無の判定、 S_1 、 S_2 の作用位置 e_1 、 S_4 の作用位置 e_2 の計算。機構④の構成力が定まる。 (S_4, R_4, P_4)

(5)柱断面における最も有利なコンクリート圧縮力作用位置 a_1 、 a_2 の計算。 $((15)$ 式)

(6)機構⑤、⑥の構成力 B_5 、 W_5 、 R_5 、 B_6 、 W_6 、 P_5 の計算 $((11)(12)$ 式)。ここで、 R_5 もしくは $B_5 + B_6$ と、 R_{ob} 、平面保持解析付着力 B_o との比較から β ($0 \leq \beta \leq 1$) が定まる。

(7)柱、梁せん断力 V_c 、 V_b の伝達に要する付着力 R_v 、 B_v の計算 (図-3 参照)。付着力が不足する場合は圧縮力 S_v 、 P_v を求めモーメントの釣合を保つ。 (17) 式より機構②の構成力 B_2 が定まり (8) 式より S_2 が定まる。また、 (19) 式より機構③の構成力 R_3 が定まり (9) 式より P_3 が定まる。

(8) (20) 式より機構①の構成力 S_1 が定まり、 (7) 式より P_1 が得られる。

(9) (16) 式に得られた値を代入し、柱断面コンクリート圧縮力の和 P_o を求め、柱軸力の釣合を満たす γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) を求める。

(10)各機構により生じるパネル中央部のコンクリート斜め圧縮応力を加えて σ_c を求める。

上記の計算において、各機構の構成力はすべて正または 0 でなければならない。この条件が満たされるように α ($0 \leq \alpha \leq 1$) が決定されることになる。

本解析では、接合部が最も有利な応力状態になる (σ_c が最も小さくなる) 解を指向する。この結果、機構⑤、機構⑥がなかでは最も有利なせん断伝達機構であることから、これらの機構の構成力である柱筋付着力や梁筋付着力の許し得る範囲でせん断補強筋有効係数 β をできるだけ大きくとること優先させる。機構②、③の計算の前に柱、梁のせん断力の釣合を優先させている理由は、機構①が機構②、③よりも有利な機構であることを念頭に、機構②、③の負担分を大きくならないように機構の構成力である柱筋付着力、梁筋付着力を柱、梁のせん断力との釣合機構に利用しているためである。柱筋については局所付着強度上限を設け機構付着力を制限する。

本解析法を用いて、ある任意の接合部のせん断耐力を算定することも可能である。この場合には、外力を大きくした解を順次求めて、パネルコンクリート応力が限界応力に一致する時のせん断力を収束的に計算すればよい。なお、コンクリート引張強度は全計算仮定で無視し、鉄筋の応力-歪関係は完全弾塑性、コンクリートの応力-歪関係は文献[1]で用いたものと同じとした。

2. 6 梁、柱筋の付着力の上限

以下に示す解析では柱筋の付着条件として、平面保持解析から得られる付着力の範囲 ($0 \leq \alpha \leq 1$) のもとで、局所の付着強度上限を $8\sqrt{f_c}$ として制限した。この大きさは、既往の研究で見られる拘束条件の比較的良好な場合の接合部内での局所の付着強度にはほぼ相当する大きさである。梁筋については局所付着強度の上限を設けず、平均付着強度 τ_u のみで制限することにし、 τ_u の大小を解析条件として与えてその影響を調査することとした。

3. 本方法によるパラメーター解析例

最も基本的なせん断強度に関する実験として Meinheitらによる実験供試体[3]について検討する。この実験では多くが梁降伏前のせん断破壊であり、履歴の影響も小さい特徴がある。せん断補強筋比、柱軸力を実験変数としている。

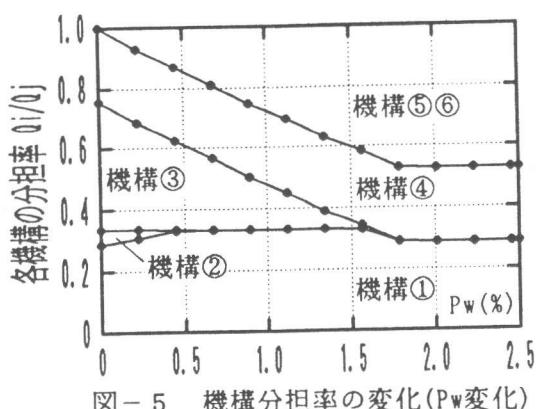


図-5 機構分担率の変化(Pw変化)

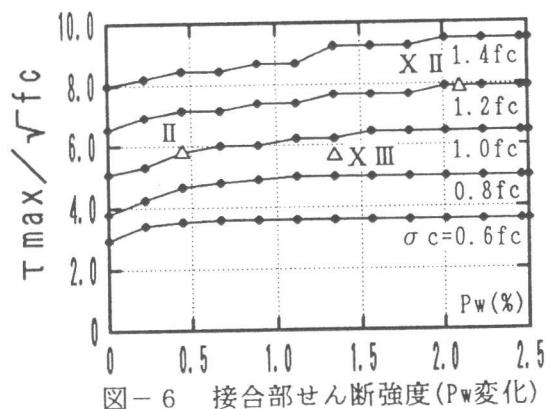


図-6 接合部せん断強度(Pw変化)

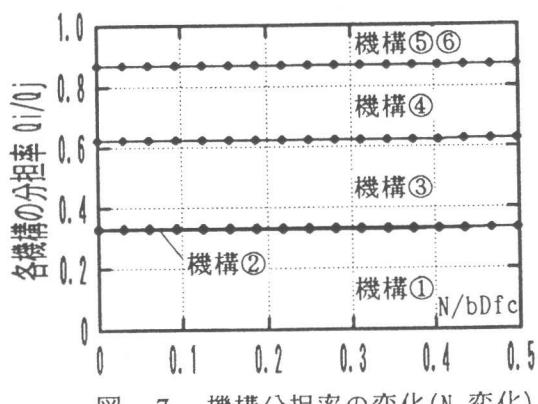


図-7 機構分担率の変化(N変化)

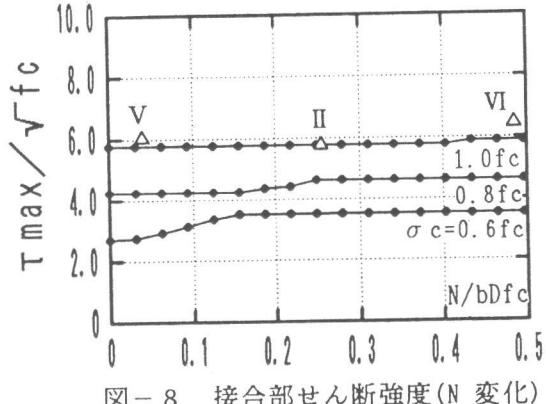


図-8 接合部せん断強度(N変化)

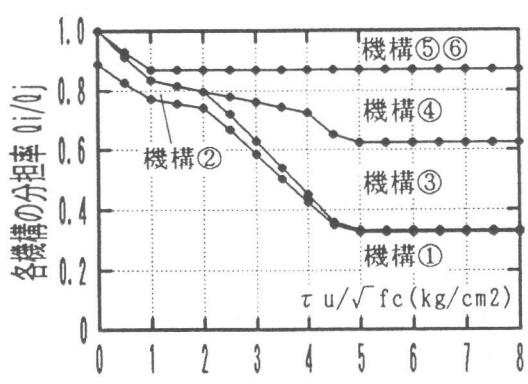


図-9 機構分担率の変化(τu変化)

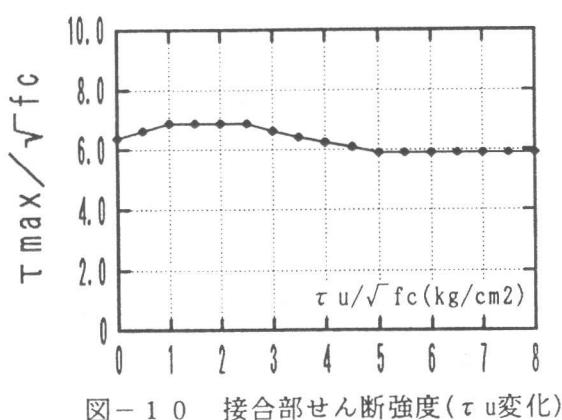


図-10 接合部せん断強度(τu変化)

3. 1 接合部せん断補強筋の影響

図-4は、基本供試体 No. II（せん断補強筋比 $p_w=0.45\%$ 、柱軸力比 $N/bDfc=0.254$ 、コンクリート圧縮強度 $f_c=426 \text{ kgf/cm}^2$ ）に対して p_w のみを変化させた場合の機構分担割合の変化を示す。外力条件は実験最大強度時の値を入力した。 p_w の増大に伴いトラス機構⑤、⑥の分担率が増大し、機構②、③の分担は減退してゆく。このことが斜め圧縮束コンクリート応力 σ_c の低下につながる。そしてある程度の補強筋量を超えると梁筋、柱筋の付着入力上限により補強筋を増すことによる影響が現れなくなる。図-5は、供試体IIの配筋について、パネルコンクリート応力 σ_c が $0.6 f_c \sim 1.4 f_c$ となる時の接合部せん断入力を各 p_w に対して補間的に求めたものである。本解析法によるせん断強度計算値である。対応する彼らの実験結果を図中に示す。実験結果がばらついているため適合性を論じるのは難しいが、 p_w の増大による強度上昇傾向は実験結果とほぼ対応しており、補強筋の効果のモデルとして扇型トラス機構が妥当なモデルであることがわかる。

3. 2 柱軸力の影響

図-6は、基本供試体 No. IIについて、上と同様に柱軸力比を変化させた場合の機構分担の変化を示す。柱軸力の増大による機構分担の変化は殆どないことがわかる。これは本解析が柱筋力のシフトを考慮するために軸力の大小によらず有効な束機構が形成されることと、柱筋の局所付着強度上限により柱軸力の大小による柱筋付着力の変化が機構⑤、⑥の形成に影響を与えないことによる。また、図-7には、 $\sigma_c = 0.6 \sim 1.0 f_c$ となる時の本解析法によるせん断強度計算値と実験結果との比較を示す。これら3体の供試体間で見る限り柱軸力の影響の有無はこの実験では明瞭ではなく解析結果と対応する。

3. 3 梁筋付着強度の影響

図-8、図-9には上と同様に、基本供試体IIに対して梁主筋の付着強度 τ_u をパラメーターとした解析結果を示す。 τ_u が小さい範囲では τ_u の増大に伴い機構⑤、⑥の分担率が増大して耐力上昇につながるが、以降は τ_u の増大が機構③の分担増大を伴い耐力低下につながっている。この問題については、実験的にも十分な資料がなく今後の課題である。

4. 結論

実験で見られる接合部まわりの応力状態を反映させた内部柱・梁接合部のせん断耐力解析法を示した。本解析法を既往のMeinheitらの実験結果に適用した結果、せん断補強筋、柱軸力のせん断耐力に及ぼす影響についてほぼ実験結果と対応する結果が得られた。ただし、本解析法はまだ、非常に基礎的な開発段階ともいえるもので必ずしもすべての実験結果を再現できるものではないと思われる。より一般化するためには、梁、柱筋の付着特性の合理的な評価や繰り返し載荷時の性状、接合部コンクリート有効圧縮強度の評価等、実験結果とフィードバックしながら洗練していく必要がある。

[参考文献]

- [1] 藤井 栄、森田司郎：鉄筋コンクリート外部柱・梁接合部のせん断抵抗機構、日本建築学会構造系論文報告集、第398号、1989年4月、pp. 61-pp. 71
- [2] 藤井 栄、森田司郎：鉄筋コンクリート内部、外部接合部の性状の比較、コンクリート工学年次論文報告集12-2、1990年7月、pp. 691-696
- [3] D. Meinheit, J.O. Jirsa : THE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN JOINTS, CESRL REPORT NO. 77-1, JANUARY 1977