

論文 プレキャスト鉄筋コンクリート部材の剪断耐力に関する研究

Oscar Lopez-Batiz*¹

要旨: PCa梁部材の接合部領域での剪断力による破壊形状をモデル化し、そのモデルを用いたパラメトリック解析を基に、上界定理に基づいた極限解析を行なう。解析の目的は、打継面での滑りを考慮した部材全体の剪断耐力を定量的に求めることである。主な結論としてはPCa梁部材に、RC梁部材と同程度の剪断耐力を得るには、打継面から数えて最初の横補強筋を打継面付近に配筋し、また打継面の摩擦係数が普通コンクリートの値 ($\mu = 1.4$) 程度なるように界面処理をすることが有効である。そして、ダボ筋比 ($\rho, \sigma_y / f_c$) の値を 0.2 以上にするとよい。

キーワード: PCa梁部材、剪断耐力、打継面での滑り変形、上界定理、極限解析

1. はじめに

PCa梁部材の接合部領域での剪断破壊形状をモデル化し、そのモデルを用いたパラメトリック解析を基に、上界定理に基づいた極限解析を行なう。解析の目的は、打継面でのすべりを考慮した部材全体のせん断耐力を定量的に求めることにある。打継面を横断する主筋(接合筋)の影響、打継面近傍の横補強筋の影響および接合面形状の影響を考慮した接合部付近の解析モデルを用いて、PCa部材の剪断耐力に及ぼす影響について、パラメトリック解析により検討する。さらに、上界定理に基づく極限解析を行ない、破壊性状およびせん断耐力に関して得られた実験結果を力学的に検証する。また、その解析結果をもとに、PCa梁部材の剪断設計について述べる。

2. 不連続性を有するRC部材の剪断力伝達

PCa構造の施工法は様々あるが、PCa部材は中央部で接合する部材と端部で接合する部材二つに分けられる。剪断力伝達機構のモデル化にあたって下記に示す仮定および簡略化を用いた:

a) 部材主筋は通し鉄筋とする。b) 接合面を横断する主筋は、上端筋と下端筋共一段筋とする。c) 主筋とコンクリートの付着性状が良好である。d) 横補強筋は丸鋼で、コンクリートとの付着を考慮し

ない。e) 床スラブは、PCa板で、梁部材とは独立に挙動する。

3. パラメトリック解析

打継面の許容変形に達した時のダボ作用による割裂ひび割れ幅および長さに及ぼす部材断面寸法の影響を検討し、打継面からダボ筋とコンクリートの間の付着力がなくなる点までの距離 (L_{cr} ; Fig. 1. aに定義を示す) を解析的に決定する。

この L_{cr} を決定するのに、ダボ筋のふし・リブ高さおよび形状そして、その付近のコンクリートの骨材の形状と寸法影響する。しかし、本研究ではダボ筋のふし・リブ高さのみを考慮した。ふし・リブの形状・寸法と付着性能に関して行なわれた既往の研究¹⁾では、ふしの高さは平均的に鉄筋径の0.05倍であると報告されている。ダボ筋の変形 (y) が考慮しているダボ筋のふしの高さより大きい値になると、付着力がなくなると仮定している(部材が繰返し加力にあるという仮定)。そこで、 $L_{cr} = y = 0.05d_b$ 。(割裂ひび割れ開き、 d_b : ダボ筋径) になる点から求める。

不連続面のダボ作用を考慮したモデルのパラメトリック解析をのために、コンクリート強度、打継面の摩擦係数、横補強筋比、打継面からのS、打継面を横断する主筋径(ダボ筋径) および主筋比

*1 CENAPRED、メキシコ国立防災センター、研究員 工博 (正会員)

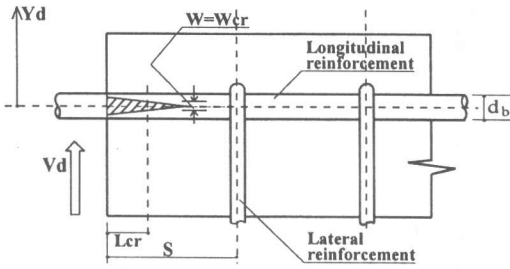


Fig.1.a Definition of crack length L_{cr}

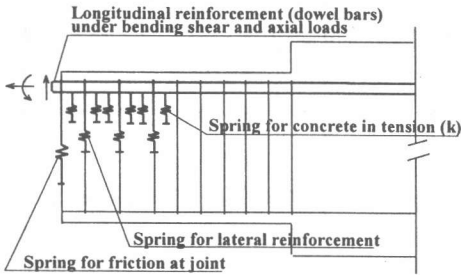


Fig.1.b Model for parametric analysis

をパラメータとし、その解析結果から極限解析のために必要となる変数 L_{cr} を得ることにした。

パラメトリック解析のための固定因子および変動因子を次のように設定した：

- ・ 固定因子：①部材の断面寸法(30x40cm)；②主筋は、上端筋と下端筋、それぞれ一段筋；③接合領域の許容変形は3.0 mmとした²⁾；④ダボ筋に生じる引張力を $T=As \cdot \sigma_y/2$ により設定した(As ：ダボ筋断面積、 σ_y ：ダボ筋の降伏強度、主筋は応力は部材内の主筋平均応力として仮定した)；⑤合成梁のバネ係数 k (図1. b)はJones³⁾らの研究で提案された値を用いた。

- ・ 変動因子：①打継面を通過する主筋の径(d_b :16~32 mm)；②主筋の降伏強度(σ_y :4000~10000 kgf/cm²)；③横補強筋比($\rho_w \sigma_{wy}$:8~28 kgf/cm²)；④コンクリート強度(σ_c :200~500 kgf/cm²)；⑤打継面の μ :0.0~1.4)；⑥打継面からの S :20~80 mm)。

図1. bに示すモデルを考慮し、ダボ変形(y_d)が3 mmに至るまで加力解析を行った。ひび割れ長さ L_{cr} を上端筋と下端筋の距離(本解析では $H'=320$ mm)で割った値と上記に示した各パラメータとの関係をFig. 2に示す。

打継面を横断するダボ筋量($\rho_t \sigma_y$ 、 ρ_t :ダボ筋比)；設定したダボ許容変形量($y_d=3.0$ mm)までモデ

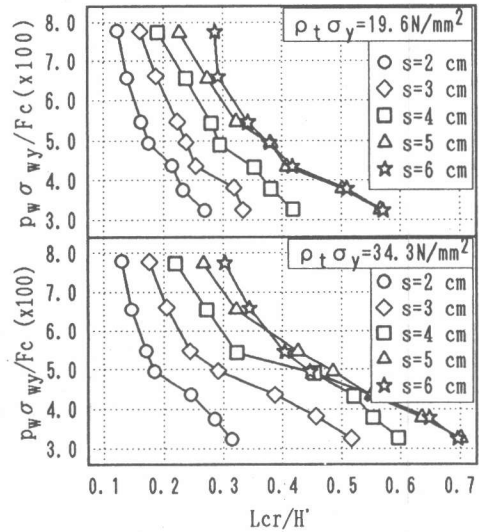


Fig.2.a Relation between $\rho_w \sigma_{wy}$ and L_{cr} / H' (Fig.1.a); $F_c=35.3 \text{ N/mm}^2$; $H'=w_1 D$ ($w_1 \leq 1, D$:effective depth)

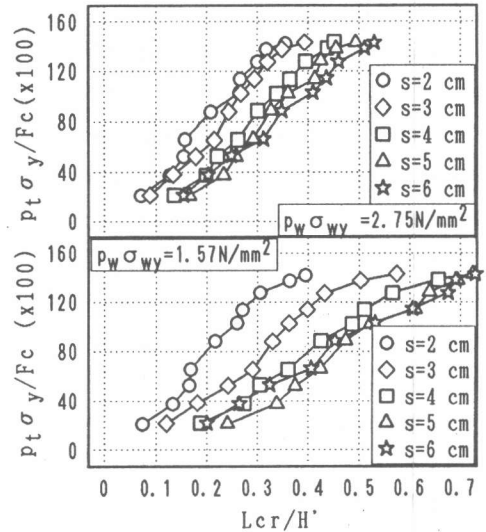


Fig.2.b Relation between $\rho_t \sigma_y$ and L_{cr} .

ルに荷重をかけて、 L_{cr} のひび割れ長さを検討した。ダボ筋比が大きい場合には、打継面からの S に関わらず、ダボ変形が1.0mm以内でその横補強筋は降伏し、ダボの降伏耐力に達する。ダボ筋比が大きくなるに従って、 L_{cr} も大きくなる傾向がある。

横補強筋比($\rho_w \sigma_{wy}$):打継面を横断するダボ筋比とは逆に、横補強筋比が大きくなれば L_{cr} が小さくなる。しかし、この傾向は $\rho_t \sigma_y$ の値とダボ筋径により変わる、同じ $\rho_t \sigma_y$ で、ダボ筋径が大き

い場合には、横補強筋比による影響が少ない。逆に、ダボ筋径が小さい場合には、横補強筋による影響が大きい。

打継面からのS:Sが小さい場合には、 L_{cr} が短くなる ($S \leq 30$ mmでは、いずれのパラメータに対してとも L_{cr}/H' の割合が0.4以下になる)。

4. 極限解析

4.1 上界定理によるせん断強度算定をする上での材料特性の仮定(Nielsen⁴⁾)。

コンクリートは平面応力状態にあり剛塑性とする。また、Fig. 3に示す降伏曲線を有し、流れ則に従う。

仮想変位によるコンクリートの内部仕事を求めるには、降伏時の応力が分っているだけでは不十分であり、応力と歪増分の関係を定義する必要がある。関連する流れ則とは応力が降伏曲線に達した時、降伏曲線と塑性歪増分のベクトルが直交することを意味する。この時、塑性歪増分によるコンクリート単位体積当りの内部仕事 w_{ic} は平面応力状態で

$$w_{ic} = \sigma_1 \cdot d\varepsilon_1 + \sigma_2 \cdot d\varepsilon_2 \quad (1)$$

と表わせる (σ_i : i方向の主応力、 $d\varepsilon_i$: i方向の塑性主歪増分)。

不連続線に於けるコンクリートの内部塑性仕事は二つの剛体部分にはさまれた変位の不連続場にクーロンの降伏条件を適用してコンクリートの内部塑性仕事を求めた。仮想的なひび割れとしてFig. 4のような変形領域を仮定する。

コンクリートの有効強度係数 ν_o を用いて、みかけの降伏強度を F_c より下に設定することが妥当である。本研究では $\nu_o = 0.7$ とおいた。

打継面での摩擦が有効強度係数に与える影響を取り入れるために、有効強度係数とPCa部材の打継面の摩擦係数(μ)との関係が正比例すると仮定する(接合面に摩擦のない材料であればトラス機構の圧縮ストラットが成立たないので $\mu = 0$ とし、普通コンクリートの最大摩擦係数は1.4とした)。

$$\nu = (\mu/1.4)\nu_o \quad (2)$$

主筋およびあばら筋は、降伏強度で剛塑性とす

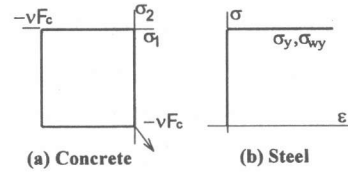


Fig.3 Failure surface for concrete and ε - σ relation for steel

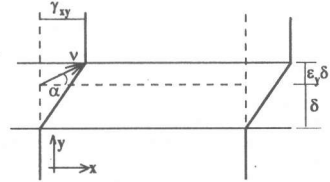


Fig.4 Cracking and deformation model for analysis

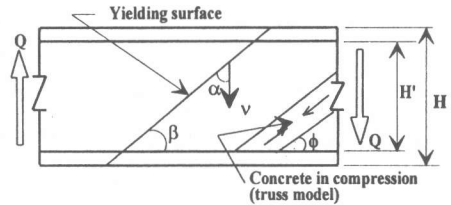


Fig.5 Failure mode for RC element (assumed)

る (Fig. 3. b)。

部材の破壊機構は実験の破壊モードを参考にモデル化した。破壊機構におけるパラメータは、ひび割れ(仮想的に歪が生じるとした領域、Yield Lineを指す。この他の部分は剛体と考える)の角度 β 、ひび割れと仮想変位方向となす角 α (これにより材軸方向の変形が考慮できる)の2つとする。

まず、RC部材を用いた場合の終局剪断耐力を求めるためには、Fig. 5に示す破壊モードが考えられる。ここに α と β は幾何学的な制約などから、次の範囲にある:

$$\phi \leq \beta \leq \pi/2, \quad \pi/2 \leq \alpha + \beta \leq \pi \quad (3)$$

ここに、 ϕ は軸材と剪断力伝達トラス機構におけるコンクリート圧縮束の部材軸に対する角度。

次に、打継面に滑り止めとして、コッター等の機械的な作用がない梁部材では、実験結果から、Fig. 6に示す破壊モードを仮定する。このような降伏線が発生する時に、 $\beta = 90^\circ$ であるので、 α は幾何学的な制約などから次の範囲を取り得る:

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2 \quad (4)$$

部材主筋(軸方向鉄筋)の内部仕事を求めるため

に、逆対称曲げモーメントを受けた部材とし、危険断面の圧縮側主筋には圧縮応力が生じないように、部材内の主筋平均応力は部材中央に生じるように主筋の応力分布を仮定した(本研究ではPCa部材の打継面は部材中央に於けると考慮する)。降伏線が部材の中央にある場合には、主筋に生じる応力 σ_s は $\sigma_s/2$ (主筋の平均応力を仮定)とした。

4.2 解の導出

各破壊モードのモデルをFig. 5~6に示し、そのモデルにせん断力Qにより仮想変位 v が生じた時、仮想仕事の原理から、

$$W_e = W_c + W_t + W_w \quad (5)$$

ここに、RC部材およびPCa部材の各破壊モードを考慮し、外部仕事、及び内部のコンクリート、主筋と横補強筋の仕事は下記に述べるようにする：

①RC部材の破壊モードを考慮した場合

We は Q による外部仕事である：

$$W_e = Q \cdot v \cdot \sin(\alpha + \beta) \quad (6)$$

コンクリートの内部仕事(式(1) から)：

$$W_c = (\nu/2)(1 - \sin\alpha) \cdot b(H'/\sin\beta) \nu \cdot F_c \quad (7)$$

軸方向鉄筋(主筋)の内部仕事：

$$W_t = -v \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot \Sigma a_s \cdot \sigma_s \quad (8)$$

ここに、 a_s ：軸方向鉄筋(主筋)面積。

横補強筋の内部仕事：

$$W_w = v \cdot \sin(\alpha + \beta) \cdot \rho_w \sigma_{wy} \cdot b \cdot H' \cdot \cot\beta \quad (9)$$

ここに、 b ：部材幅。

式(6~9)を式(5)に入れ、両辺を $v \cdot \sin(\alpha + \beta)$ で割ると、せん断力 Q が得られる。さらに $b \cdot H' \cdot \nu \cdot F_c$ で基準化することにより、無次元化せん断力 q_{RC} は次式で表される：

$$q_{RC} = \frac{Q}{bH'\nu F_c} \quad (10)$$

ここに、

$$Q = \frac{(1 - \sin\alpha)bH'\nu F_c}{2\sin(\alpha + \beta)\sin\beta} - \frac{\cos(\alpha + \beta)\Sigma a_s \sigma_y}{2\sin(\alpha + \beta)} + \rho_w \sigma_{wy} bH' \cot\beta$$

さらに

$$A = \frac{\Sigma a_t \sigma_y}{2bH'\nu F_c}; \quad B = \frac{\rho_w \sigma_{wy}}{\nu F_c}$$

$$\sin\alpha = \cos\beta \cdot \sin(\alpha + \beta) - \sin\beta \cdot \cos(\alpha + \beta)$$

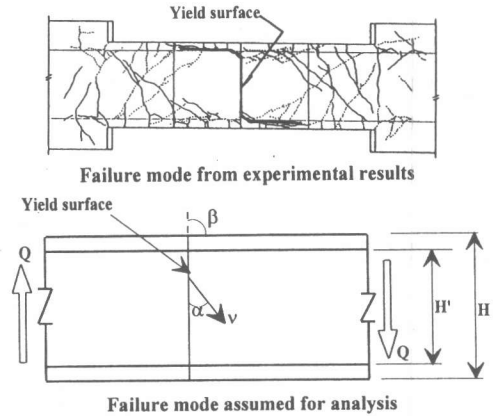


Fig.6 Failure mode for PCa element (from experimental results and assumed for analysis)

を式(10)に代入する。上界定理の物理的意味は、起こり得る破壊機構のうち、消費する仕事が最も小さくなるように破壊が生じる。 α 、 β の範囲内で、これに対応する最小の q_{RC} (RC部材の無次元化剪断終局耐力)は次のようになる：

$$q_{RC} = 2\sqrt{B(1-B) \cdot A(1-A)} \quad (11)$$

ただし、 $\tan\beta \geq \tan\phi$ の場合は式(11)でよいが、 $\tan\beta \leq \tan\phi$ となった場合には、部材のプロポーシオンによる制約を受ける。この場合には、 β を ϕ と置き換え、無次元化終局耐力が得られる。

ひび割れの角度が ϕ により制約される場合：

$$\tan\phi \geq \frac{1}{1-2B} \sqrt{\frac{B(1-B)}{A(1-A)}}$$

の時

$$q_{RC} = \left\{ (\cot^2\phi + 4A\sqrt{1-A}) + (2B-1)\cot\phi \right\} / 2$$

②部材の中央打継面にすべり止めとしてコッター等機械的な作用を考慮しない梁部材の破壊モードを用いた場合(Fig. 6)

We は Q による外部仕事である

$$W_e = Q \cdot v \cdot \cos\alpha \quad (12)$$

コンクリートの内部仕事：

$$W_c = (\nu/2)(1 - \sin\alpha) \cdot b \cdot h' \cdot \nu F_c \quad (13)$$

ただし、主筋のダボ作用により生じた L_{cr} の影響があり、このコンクリートは引張応力状態にある。しかし、Fig. 3に示すコンクリートの降伏曲線では、コンクリートの引張応力を無視しているため、仕事は行なわない。そして、 h' は打継面で圧縮応力が生じる部分を表し、コンクリートによる内部

仕事は、この打継面部分で成されると仮定した。

h' は Fig. 7 に示すように算定した：

$$h' = H' - 2 \cdot L_{cr} \cdot \tan \phi \quad (14)$$

軸方向鉄筋(主筋)の内部仕事：

$$W_t = v \cdot \sin \alpha \cdot \Sigma a_1 \sigma_s \quad (15)$$

横補強筋の内部仕事：

$$W_w = v \cdot \cos \alpha \cdot \rho_w \sigma_{wy} \cdot b \cdot 2 \cdot L_T \quad (16)$$

$$= v \cdot \rho_w \sigma_{wy} \cdot b \cdot H' \cdot \cot \phi \cdot \cos \alpha \quad (17)$$

ここに、 L_T は破壊機構に達したときに、降伏した横補強筋の範囲を表す。文献5に示した接合面領域で、横補強筋の歪度分布の結果によると、ダボ作用による割裂ひび割れも長さ L_{cr} が部材の上端筋と下端筋の距離(H')より小さい値になるにもかかわらず、 L_T の値がその H' に近い値になることが分る。ただし、 $L_T = H' \cot \phi / 2$ と仮定する。

式(12~17)を式(5)に入れると式(10)より

$$q_{PCa} = \frac{Q}{b D v_0 F_c} \quad (18)$$

$$Q = \frac{w_1 - 2w_2 \tan \phi}{2(1.4 \cos \alpha)} \mu (1 - \sin \alpha) + \frac{\rho_t \sigma_s}{v_0 F_c} w_1 \cot \phi$$

となる。

ここに、 $A = \mu \cdot (w_1 - 2 \cdot w_2 \cdot \tan \phi) / 1.4 \cdot 2.0$

$$B = \rho_t \sigma_s / v_0 \cdot F_c$$

$$C = \{ \rho_w \sigma_{wy} / v_0 F_c \} w_1 \cdot \cot \phi$$

とする。そして、最小の q_{PCa} を求めるためには、 $\partial Q / \partial \alpha = 0$ から以下のことが得られる。

$$q_{PCa} = \frac{A - (A - B)^2}{\sqrt{2AB - B^2}} + C$$

ただし、 $B > A$ の場合 q_{min} は $\alpha = 0.0$ 時になることによって

$$q_{PCa} = A + C \quad (19)$$

ここに、 $w_1 = H' / D$ 、 $w_2 = L_{cr} / D$ (D : 部材断面の有効せい)とする。

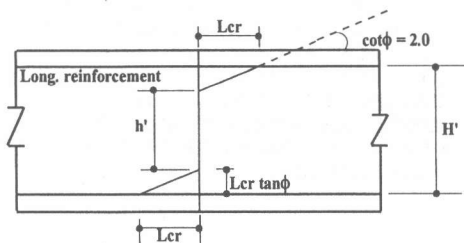


Fig. 7 Force transmission at joint vicinity, considering the friction condition at joint and L_{cr}

5. PCa部材の終局耐力に関する検討

各破壊モードに対する無次元化せん断力(q_{RC} , q_{PCa})を用いて、RC部材の剪断耐力を基に、PCa部材の終局剪断耐力を求める。PCa部材のRC部材に対する剪断耐力修正低減定数($\chi = q_{PCa} / q_{RC}$)について検討した結果を示す。部材寸法の主なパラメータと剪断耐力の修正低減係数との関係をFig. 8~9に示す。Fig. 8~9に示す解析結果を求めるには、打継面からの S を30.0 mm以内とした時、ダボ作用モデルの解析結果から得られたダボ作用による L_{cr} を表すパラメータ L_{cr} / H' は以下ようになる：
 $S \leq 30.0 \text{ mm} \quad L_{cr} / H' \leq 0.4$

即ち、ダボ作用モデルによる解析結果で、 $S \leq 30.0 \text{ mm}$ にした時、最悪状況になるのは $L_{cr} / H' = 0.40$ になった時である。上界定理を用いた極限解析では $L_{cr} / H' = 0.40$ とした。

ダボ筋量($\rho_t \sigma_y$)の影響：

・線はいずれも右下がりになっている。剪断力伝達トラス機構のコンクリート圧縮束の角度(ϕ)が26.6°では、打継面の μ が0.7程度の場合、最小修正低減係数は0.85程度である。 μ が1.4になると、最小修正低減係数は0.91程度である。

・コンクリート圧縮束の角度(ϕ)が45.0°とする、線は右下がりの傾向が認められる。打継面の μ が0.70程度の場合、最小修正低減係数は0.70程度である。 μ を1.4とした場合、最小修正低減係

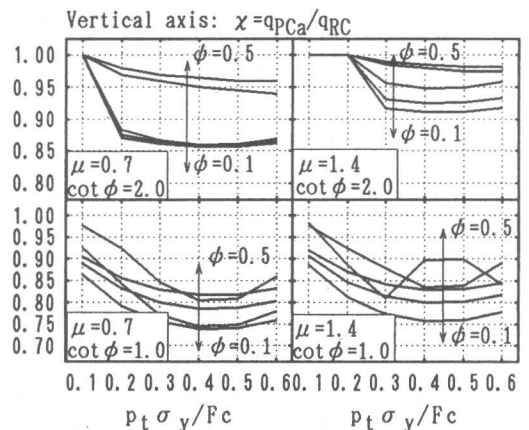


Fig. 8 Variation of resistance index for PCa members
 $\chi = q_{PCa} / q_{RC}$ and $\rho_t \sigma_y$, $\Psi = \rho_w \sigma_{wy} / F_c$ (varying @0.1), $L_{cr} / H' = 0.4$.

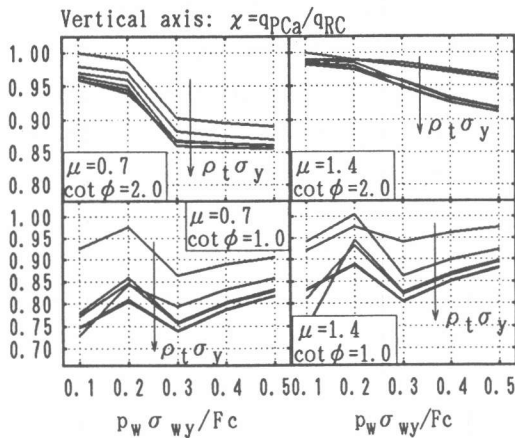


Fig.9 Variation of resistance index for PCa members
 $\chi = q_{PCa}/q_{RC}$ and $\rho_w \sigma_{wy}$, $Lcr/H^2=0.4$.

数は0.75程度であった。

横補強筋量($\rho_w \sigma_{wy}$)の影響:

・トラス機構におけるコンクリート圧縮束の角度(ϕ)を26.6°とした場合、線はいずれも右下がりである。ダボ筋比が小さい場合には($\rho_t \sigma_y/Fc=0.1$)、どんな横補強筋比であっても修正低減係数の値が1.0程度であった。

打継面の摩擦係数(μ)の影響:

・ μ は、打継面のコンクリートによる内部仕事にしか影響を及ぼさないため、 $\mu=1.40$ の修正低減係数の値と、 $\mu=0.70$ の修正低減係数の値との差は、平均10.0%程度以内であるが、その差の最大値は20.0%程度であった。しかし、 μ が小さい方が、横補強筋比およびダボ筋比による変化が若干穏やかとなる。

6. 既往の研究との適合性

耐力修正低減係数を用いて文献5)の実験結果への適合性について検討する。Table-1に、実験結果、鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針⁶⁾を基に計算した剪断終局耐力(表中Qc)、各試験体のRC部材として求めた剪断耐力と、 q_{RC} 、 q_{PCa} の関係で求めた耐力修正低減係数を用いて低減したPCa部材の剪断耐力を示す(χQc (指針))。剪断耐力の修正低減係数を使用して求めたPCa部材の終局剪断耐力と実験結果を比較すると、剪断

耐力余裕度が平均的に20%となる。ここで示した剪断力に対する設計の考え方をを用いると、安全側になり、PCa部材の剪断設計に、RC部材の剪断耐力に修正低減係数を用いる方法は有効である。PCa部材の修正低減係数は0.75~0.90程度である。

Table-1 Comparison of results

Specimen ⁷⁾	Qe (KN)	Qc(KN)	χ	χQc (KN)
CJS1	278	378	0.63	238
CJS2	356	378	0.63	238
CJS3	329	378	0.72	272
CJS4	381	378	0.88	333
CJS5	414	378	0.76	287

Qe: Shear strength (experiment from reference 7); Qc: Shear strength (calculated with reference 6); χ : Shear strength reduction factor (calculated with the formulas showed in the body of the paper)

7. まとめ

—普通強度コンクリートを用いたPCa梁部材に、RC梁部材と同程度の剪断耐力を得るには、打継面からのSを打継面付近に配筋し、また打継面の μ が普通コンクリートの値($\mu=1.4$)程度になるように界面処理をすることが有効である。そして、ダボ筋比($\rho_t \sigma_y/Fc$)の値が0.2以上にするとよい。—接合面の滑りに対する機械的な抵抗を設けて、 μ を大きくすると、PCa部材の剪断耐力はRC部材の剪断耐力に近づく。
 — $S=2.0\sim 3.0$ mm、主筋量と横補強筋量との関係を $\rho_t \sigma_y/\rho_w \sigma_{wy} \leq 12.5$ とすると、ダボ作用による割裂ひび割れ長さを表すパラメータ $Lcr/H^2 \leq 0.4$ に限り、PCa部材の剪断耐力修正低減係数 χ は、 $\chi \geq 0.85$ となる。

参考文献:

- 1) 梅村魁, "異形鉄筋コンクリート設計法研究会編", pp. 21-57, 1971.
- 2) Lopez-Batiz, "Behaviour of precast reinforced concrete frame structures under lateral loads, accepted for publication, Magazine of Concrete Research, 3) Jones, R., "The Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams in Shear", Magazine of Concrete Research, Vol. 8, No. 23, pp. 675-692, 1956. 8. 4) Nielsen, M.P., "Limit Analysis and Concrete Plasticity", Prentice Hall, 1984.
- 5) Oscar Lopez, "プレキャスト鉄筋コンクリート構造の耐震性に関する研究, 東京大学建築学科学位論文, 1992. 12. 6) 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1991. 10. 7) 楠, 他, "プレキャスト鉄筋コンクリート梁部材の中央接合部に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, 1992. 5.