

[2080] 高強度 PC くい の曲げ靱性設計

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)

正会員 西山 峰広 (京都大学工学部)

1. まえがき

地震による基礎くいの破壊がわが国ばかりでなく諸外国でも報告されており〔1-6〕、くい基礎の耐震設計のあり方ばかりでなく、くいそのものの性能改善の必要性も指摘されている。PC くいそのものの耐震性能向上の基本となるのは、せん断強度の向上、曲げ破壊強度の向上および曲げ靱性の確保の3点である。このうち、せん断破壊強度の向上については、降伏強度が少なくとも $60\sim 80\text{ kgf/mm}^2$ の高強度せん断補強筋を使用して適切な補強を行えば、せん断破壊をほぼ完全に防止出来ることが、筆者らの実験的および理論的研究によって実証されている〔7,8〕。曲げ破壊強度の向上については、太径くいの使用、プレストレスの大きいC種またはこれ以上のくいの使用など、設計応力を上回る強度のくいを選定することによって対処出来る。一方、曲げ靱性に関しては、PC くいには曲げ破壊といえども破壊直前の塑性変形が殆ど認められない脆性的破壊様相を示す。曲げ靱性に富む部材に改善する方策の一つに横拘束コンクリートの使用があり、筆者らは、高強度PC くいにこれを応用し、かつ、高一様伸びPC 鋼棒との併用により、著しい塑性曲げ変形能力を持つPC くいに改善出来ることを示した〔9-11〕。本研究は筆者らの横拘束コンクリートおよびPC くいの靱性改善に関する既往の研究成果にもとずき、PC 鋼棒破断による曲げ破壊をおこさない範囲で、必要なPC くい断面曲率靱性を付与するための横拘束筋の設計の具体的方法について述べたものである。

2. 断面曲率靱性設計のフロー

構造物の耐震設計は、通常、構造物の破壊強度が地震力を上回るよう設計する、いわゆる強度設計が主である。この場合、構造物が崩壊メカニズムに達するまで構造物を構成する各部材がその耐力を保持したまま塑性変形することが一般に要求される。これを満たすために従来は、部材設計においてクリティカル断面に十分な曲率靱性が付与されるよう、種々の構造制約が設けられている。しかし、これらの制約は断面曲率靱性を間接的に制御しているに過ぎず、曲率靱性要求値を直接設計の対象に取り上げているものではない。しかし、今日ではコンクリートの横拘束による断面曲率靱性改善を定量的に評価出来るまでに基礎的データが準備されており、断面曲率を直接設計の対象とすることが可能となってきた〔12,13〕。すなわち、靱性には関係なくまず部材の強度設計を行い、次いで強度設計された部材のクリティカル断面に対して、

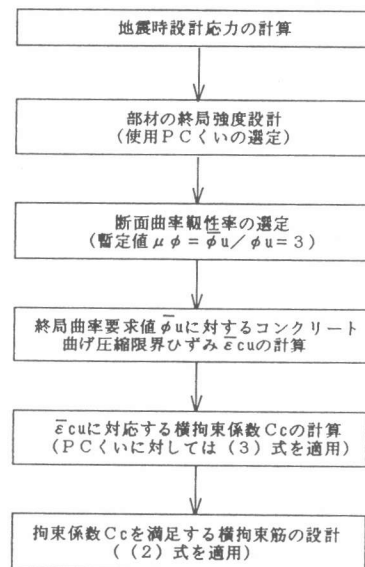


図1 断面曲率靱性設計フロー

必要な曲率靱性を付与する曲率靱性設計（具体的には横拘束筋の設計）を行うことが可能である。その設計フローを図1に示す。

図中の曲率靱性設計に関する各ステップにおいて、設計された部材断面に要求される曲率の大きさ $\bar{\phi}_u$ は、曲率靱性率 $\mu\phi$ をあたえることによって設定される。一般に曲率靱性率は曲げ降伏曲率 ϕ_y に対する曲げ終局曲率 $\bar{\phi}_u$ の比で現されるが、PCくいではPC鋼棒の降伏が起こっても変形の降伏現象は殆ど認められないまま曲げ破壊に至るので、 ϕ_y を曲率靱性率計算の基礎とするのは必ずしも妥当ではない。本研究では ϕ_y のかわりに無拘束PCくいの曲げ終局時曲率 $\bar{\phi}_u$ を用い、曲率靱性率を次式で表すことにする。

$$\mu\phi = \bar{\phi}_u / \phi_u \quad (1)$$

すなわち、横拘束筋の配置により曲げ破壊時曲率が無拘束くいの何倍に改善されたかを表す倍率を、曲率靱性率と呼ぶことにする。

(1)式から曲率要求値 $\bar{\phi}_u$ が決められると、断面の曲げ解析によって、曲率 $\bar{\phi}_u$ に達するときの圧縮縁コンクリートひずみ $\bar{\epsilon}_{cu}$ を求め、次いでこの $\bar{\epsilon}_{cu}$ が得られるように横拘束筋の必要量が無拘束コンクリートの曲げ圧縮限界ひずみ ϵ_{cu} と横拘束筋の拘束効果を表す係数 C_c を用いて計算する。横拘束係数 C_c は筆者らの研究〔13〕によると次式で表される。

$$C_c = \rho_s \frac{\sqrt{f_y}}{f_c'} \left(1 - 0.5 \frac{s}{D_{core}} \right) \quad (2)$$

$\rho_s = 4 a_s / s D_{core}$: 横拘束筋容積比 (中実コンクリート断面に対し計算)

a_s : 横拘束筋断面積、 f_y : 横拘束筋降伏応力、 s : 横拘束筋ピッチ、

f_c' : コンクリート圧縮強度、 D_{core} : コアコンクリート最小寸法、

また、 $\bar{\epsilon}_{cu}$ と ϵ_{cu} との関係は、著者らの行った横拘束コンクリートの圧縮試験結果から、 $\bar{\epsilon}_{cu} = (1 + k C_c) \epsilon_{cu}$ (ただし、 k は実験定数)で表され〔12,13〕、かつ、横拘束PCくいの曲げ試験結果〔11〕において、 $\epsilon_{cu} = 0.3109\%$ のコンクリートに対し $C_c = 4.125 \times 10^{-4}$ の横拘束を行った場合には、少なくとも $\bar{\epsilon}_{cu} = 1.0098\%$ となることから実験定数 k を決めた結果、PCくいに適用する実験式として次式を得た。

$$\bar{\epsilon}_{cu} = (1 + 5450 C_c) \epsilon_{cu} \quad (3)$$

3. PCくい断面の破壊強度と終局曲げ靱性インターアクションカーブ

前項で述べた(1) - (3)式を使ってPCくいの曲げ靱性設計を行うにあたり、種々の $\bar{\epsilon}_{cu}$ の値に対する破壊時軸力 N_u -曲げモーメント M_u インターアクションカーブと終局時曲率 $\bar{\phi}_u$ の関係を計算しておくに便利である。ここではコンクリートおよびPC鋼棒の応力ひずみ関係を図2のように仮

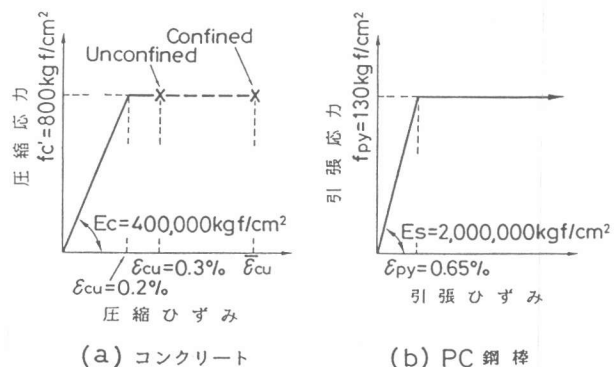


図2 コンクリートおよびPC鋼棒の応力ひずみ曲線の仮定

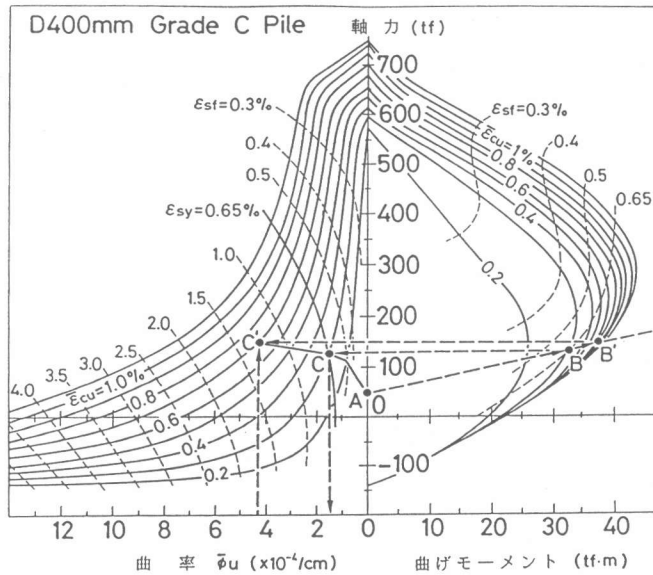


図3 Nu-Mu- $\bar{\phi}_u$ インターアクションカーブの一例
(D400mmC種高強度PCくい)

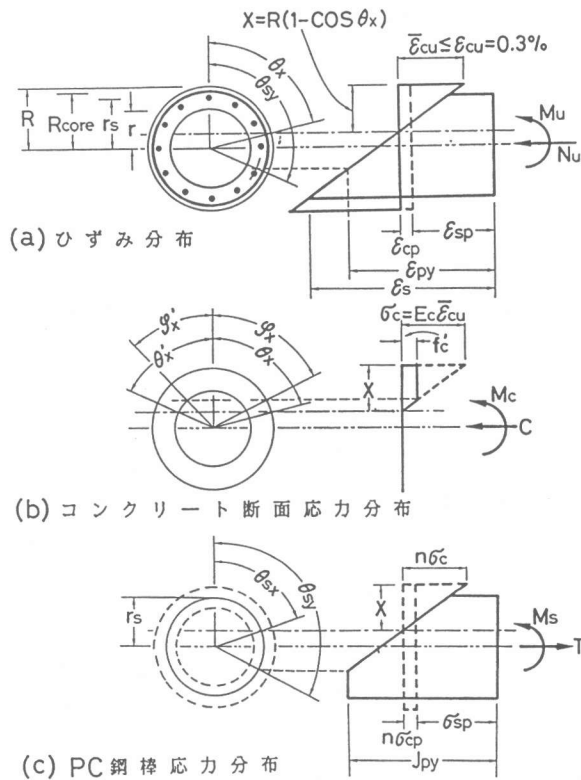


図4 PCくい断面曲げ破壊時ひずみおよび応力分布
(PC鋼棒降伏後に破壊する場合)

表1 図4に対応するPCくい断面終局強度計算式一覧

コンクリート断面応力に関する計算式	PC鋼棒応力に関する計算式
コンクリートの圧縮合力 $C=C_1-C_1'-C_2+C_2'$ $\frac{C_1/R^2 f_c'}{C_1'/R^2 f_c'} = \frac{\sigma_c/f_c'}{3(1-\cos\theta_x)} \times \left\{ \frac{f(\theta_x)}{R^3} f(\theta_x') \right\}$ $\frac{C_2/R^2 f_c'}{C_2'/R^2 f_c'} = \frac{(\sigma_c-f_c')/f_c'}{3(1-\cos\psi_x)} \times \left\{ \frac{f(\psi_x)}{R^3} f(\psi_x') \right\}$ 重心軸に対する抵抗モーメント $M_c = M_{c1} - M_{c1}' - M_{c2} + M_{c2}'$ $\frac{M_{c1}/R^3 f_c'}{M_{c1}'/R^3 f_c'} = \frac{\sigma_c/f_c'}{12(1-\cos\theta_x)} \times \left\{ \frac{g(\theta_x)}{R^4} g(\theta_x') \right\}$ $\frac{M_{c2}/R^3 f_c'}{M_{c2}'/R^3 f_c'} = \frac{(\sigma_c-f_c')/f_c'}{12(1-\cos\psi_x)} \times \left\{ \frac{g(\psi_x)}{R^4} g(\psi_x') \right\}$ $f(\theta) = 3\sin\theta - \sin^3\theta - 3\theta\cos\theta$ $g(\theta) = 3\theta - 3\sin\theta\cos\theta - 2\sin^3\theta\cos\theta$ $\sigma_c = E_c \bar{\epsilon}_{cu} \quad \cos\theta_x' = \frac{R}{r} \cos\theta_x$ $\cos\psi_x = 1 - \frac{\sigma_c - f_c'}{\sigma_c} (1 - \cos\theta_x)$ $\cos\psi_x' = \frac{R}{r} \cos\psi_x$	PC鋼棒引張合力 $\frac{T}{R^2 f_t} = q \left[\pi - \frac{f_{py} - n\sigma_{cp} - \sigma_{sp} + n\sigma_c}{f_{py}(1 - \frac{r_s}{R} \cos\theta_{sy})} \cdot \frac{r_s}{R} f_p(\theta_{sy}) \right]$ 重心軸に対する抵抗モーメント $\frac{M_s}{R^2 f_t} = q \frac{r_s^2}{R^2} \cdot \frac{f_{py} - n\sigma_{cp} - \sigma_{sp} + n\sigma_c}{2f_{py}(1 - \frac{r_s}{R} \cos\theta_{sy})} g_p(\theta_{sy})$ $f_p(\theta_{sy}) = \sin\theta_{sy} - \theta_{sy}\cos\theta_{sy}$ $g_p(\theta_{sy}) = \theta_{sy} - \sin\theta_{sy}\cos\theta_{sy}$ $\cos\theta_{sy} = \frac{R}{r_s} \left[\cos\theta_x - \frac{f_{py} - n\sigma_{cp} - \sigma_{sp}}{n\sigma_c} (1 - \cos\theta_x) \right]$ $q = \frac{A_{sp} f_{py}}{\pi R^2 f_t}$ 約合式 軸力 $N_u = C - T$ 曲げモーメント $M_u = M_c + M_s$ 中立軸位置 $x = R(1 - \cos\theta_x)$

定し、一例としてD400mmC種高強度PCくい（外径D=40cm、内径d=25cm、PC鋼棒配置径d_s=33cm、PC鋼棒7-D9.2mm、7-D11mm併用、有効プレストレス100kgf/cm²）について計算した結果を図3に示す。計算式の詳細は、紙数の関係で図4に示す引っ張り側PC鋼棒の一部が降伏した後に破壊に至る場合に対するもののみを表1にまとめている。

図3を用いて図1の曲率靱性設計フローに従ったPCくいの靱性設計方法を説明すると、次のようになる。すなわち、長期軸力だけを受けているくいに地震力が作用すると、軸力と曲げモーメントがこれに加わるが、両者の増分比を一定とすると、地震時の軸力-曲げモーメントの変化は図3のA点（長期軸力作用時）からAB線のように表される。AB線が $\bar{\epsilon}_{cu}=0.3\%$ （無拘束コンクリートの圧縮限界ひずみ）に対する破壊強度インターアクションカーブに達すると、無補強くいでは破壊する。このときの曲率 ϕ_u はこの交点を水平に左側の曲率曲線に移してC点から求められる。次いで、(1)式から必要曲率 $\bar{\phi}_u$ を計算し、再び、AB線を延長して種々の $\bar{\epsilon}_{cu}$ に対する曲率を同様の方法によって求め、所要の $\bar{\phi}_u$ となる $\bar{\epsilon}_{cu}$ が決定される。一方、図3において、種々の軸力レベルに対する曲率靱性率 μ_ϕ を計算すると図5のようになり、同一の $\bar{\epsilon}_{cu}$ の値に対する曲率靱性率は、軸力レベルには無関係にほぼ一定となる。したがって、実用的には純曲げだけを受ける場合について(1)式を適用して必要曲率 $\bar{\phi}_u$ を求め、これに対するコンクリートの必要圧縮限界ひずみ $\bar{\epsilon}_{cu}$ を求めるのが便利である。図6は一例としてD400mmくいの純曲げを受ける場合の

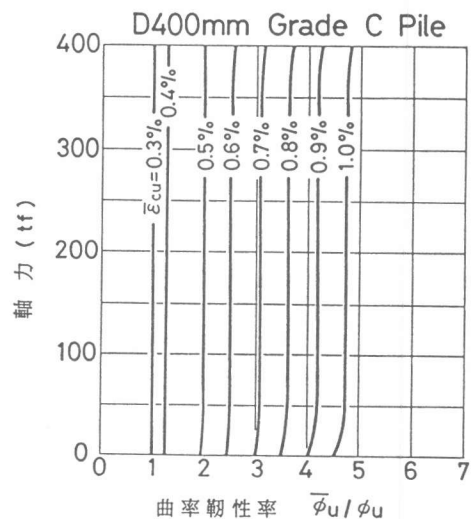


図5 軸力レベルに対する曲率靱性率

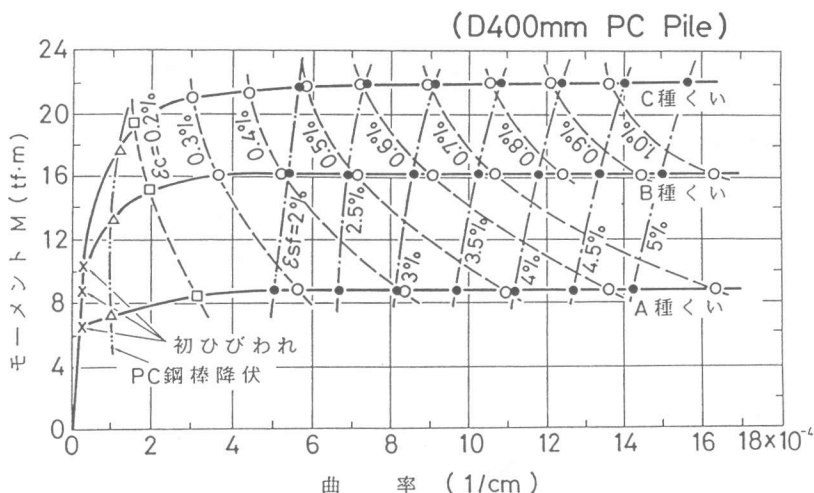


図6 純曲げを受ける場合のモーメントー曲率関係
(D400mm高強度PCくい)

曲げモーメントー曲率関係計算結果を示したもので、図中にはコンクリート曲げ圧縮限界ひずみ $\bar{\epsilon}_{cu}$ および曲げ破壊時PC鋼棒伸びひずみ ϵ_{sr} を与える補助線も記載してある。例えばC種くい で $\mu\phi=3$ とすれば、図6から $\phi_u=9 \times 10^{-4}/\text{cm}$ となり、対応するコンクリート圧縮限界ひずみは $\bar{\epsilon}_{cu}=0.7\%$ 、PC鋼棒の必要一様伸びひずみは $\epsilon_{sr} \geq 3\%$ となる。

4. 横拘束筋設計図表について

以上のようにして必要コンクリート圧縮限界ひずみ $\bar{\epsilon}_{cu}$ を確定すれば、無拘束コンクリートの圧縮限界ひずみの値 $\bar{\epsilon}_{cu}=0.3\%$ を用いて(3)式から横拘束係数C。が計算される。次いで(2)式から横拘束筋を設計するが、PCくいのように断面寸法が標準化されているプレキャスト製品については、種々の $\bar{\epsilon}_{cu}$ に対して横拘束筋ピッチsを横補強筋径ごとに計算した図表を用意しておくと便利である。D400mmくいについて横補強筋かぶり厚さを1cmとしてこれを計算した一例を図7に示す。かぶり厚さを著しく薄くしたのは、PCくいのコンクリート断面が中空円筒であるため、コアコンクリート部分を出来るだけ多くして横拘束効果を高め、さらに、かぶりコンクリートの剝離によるコンクリート断面欠損を少なくして、剝離による耐荷能力の低下を最小限にとどめるためである。横拘束筋として高性能亜鉛メッキ線など耐食性に優れた鋼材が開発されており、かぶり厚さが少なくても腐食の心配はないと判断している。なお、前項で述べた曲率靱性率 $\mu\phi=3$ を得るのに必要なD400mmC種くいの横拘束筋を図7から求めると、 $f_y=6000\text{kgf/cm}^2$ の $\phi 4\text{mm}$ 横拘束筋をピッチ $s=5\text{cm}$ で配置すればよいことになる。

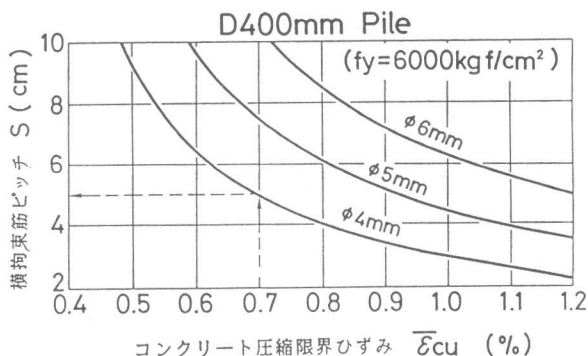


図7 横拘束筋設計図表の一例 (D400mm高強度PCくい)

5. 結語

本研究では横拘束によるコンクリートの圧縮限界ひずみの改善、および、これをPCくいに適用して著しい塑性曲げ変形能力を付与出来ることを実証した筆者らの既往の研究成果にもとずき、PCくいの曲率靱性設計の具体的方法を提案し、併せて靱性設計図表とこれの使用方法について述べた。設計の基礎となる曲率靱性率の設定については、今後の研究にまたなければならないが、実用的見地からは靱性率3程度を当面の設計に適用すれば、従来慣用の無拘束PCくいと比較してエネルギー吸収能力でおよそ5倍に改善されることになり、著しい耐震安全性の改善が期待できるものと判断される。

(参考文献)

- 1) Kishida, H.: Damage to Reinforced Concrete Building in Niigata City with Special Reference to Foundation Engineering, Soil and Foundations, Vol.8, No.1, pp.71-88, 1966.
- 2) 大岡、杉村: 既製コンクリート杭の試掘による地震被害調査結果(その1)、(その2)、日本建築学会大会学術講演概要集、pp.2087-2090, 昭和55年、9月
- 3) Margason, E. & Holloway, D.M.: Pile Bending During Earthquakes, Proc. of the 6th WCEE (New Delhi, India), pp.1690-1696, 1977.
- 4) Gerwick, B.C.Jr.: Seismic Design of Prestressed Concrete Piles, Proc. of the 9th FIP Congress (Stockholm, Sweden), Part 2, pp.60-69, June, 1982.
- 5) Sheppard, D.A.: Seismic Design of Prestressed Concrete Piling, J. of the PCI, Vol.28, No.2, pp.20-49, March/April, 1983.
- 6) Park, R. & Falconer, T.J.: Ductility of Prestressed Concrete Piles Subjected to Simulated Seismic Loading, J. of the PCI, Vol.28, No.5, pp.112-144, Sept./Oct., 1983.
- 7) Muguruma, H.: Development of the Pretensioned Prestressed Spun Concrete Pile by Using the Steam-Cured Ultra-High Strength Concrete, J. of Japan Prestressed Concrete Engineering Association, Vol.24, Extra Number for 9th FIP Congress (Stockholm, Sweden), pp.52-58, May, 1982.
- 8) 渡辺、六車、西山: 曲げとせん断を受けるPCパイルの耐力評価に関する研究、第9回(昭和62年度)コンクリート工学年次講演会発表予定。
- 9) 六車、渡辺、幅、浅井: 超高強度PCくいの曲げ靱性改善、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.465-468、昭60.5.
- 10) Muguruma, H., Nishiyama, M. & Watanabe, F.: Improving the Flexural Ductility of Ultra-High Strength Prestressed Spun Concrete Piles by using High Yield Strength Confining Reinforcement, Proc. of the 10th FIP Congress (New Delhi, India), Vol.1, pp.299-306, Feb. 1986.
- 11) 西山、六車、渡辺: 高一様伸び鋼棒と横拘束併用による高強度PCくいの曲げ靱性改善、第9回(昭和62年度)コンクリート工学年次講演会発表予定。
- 12) 六車他4名: コンクリートの曲げ圧縮限界ひずみの改善に関する研究、第24回構造工学シンポジウム「構造の非線型問題」論文集、pp.109-116、日本学術会議、昭53.2.
- 13) 六車他3名: 横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化、セメント技術年報、34巻、pp.429-432、昭55.5.