

PC 杭の破壊荷重の計算法

槇 田 博 臣*

1. PC 杭の特長

支持杭として使用する場合、PC杭は、それに用いるコンクリートの強度を単位セメント量の増加によってRC杭のそれよりほぼプレストレスに相当するだけ高めるならば、同一寸法のRC杭に比較し、杭単価が若干高いにもかかわらず、杭体の許容支持力の増大と、特に継ぎ杭に際しこれに用いる溶接継手が100%の継手効率を有する場合には、支持力低減の不要とにより、杭の所要本数の減少と基礎の小型化、したがって基礎費用の節約が可能となり、これは特に長大杭においていちじるしい。このゆえに、PC杭は現在RC杭の使用分野を非常な勢いで侵食しつつあり、近い将来完全に席けんするものと考えられる。

つぎに同一の杭径および曲げ破壊強さのモーメント・杭の場合に、PC杭は、RC杭に比較しひびわれ・モーメント対曲げ破壊モーメント比率が約35%以上高く、したがって使用荷重時における曲げ剛性がきわめて高い上、一方において軸筋総原価に比例する q/σ_y (q : 軸筋材の重量単価, σ_y : 軸筋材の降伏点応力)の値が比較的低いため杭単価は当然安くなる。また鋼管杭と比較すると、曲げ剛性は若干高く、しかも杭単価が安いので経済的である。これらの特長は長大杭においていちじるしく発揮される。

2. 計算記号

- $A_0 = 2\pi Rt$: PC杭の断面積
- $A_c = A_0(1 - p_p - p_s)$: コンクリートの純断面積
- $A_p = A_0 p_p$: PC鋼材の断面積
- $A_s = A_0 p_s$: 補強鉄筋の断面積
- $A_r = A_0 \{1 - p_p + (n-1)p_s\}$: 鉄筋コンクリート部の換算断面積
- E_s : 鋼の縦弾性係数 (20 000 kg/cm²)
- E_c : コンクリートの縦弾性係数 (400 000 kg/cm²)
- EI : 杭の曲げ剛性
- F_c : 鉄筋コンクリート部の圧縮破壊荷重
- F_t : 鉄筋コンクリート部の引張りひびわれ荷重

- H : 杭1本当りの水平荷重
- K : 地盤係数
- L : PC杭の全長 (図-1)
- M_u : PC杭の曲げ破壊モーメント
- M_e : PC杭1本当りの地震荷重による曲げモーメント
- N : 任意大きさの軸方向圧縮力
- N_u : PC杭の軸方向圧縮破壊荷重
- N_{-u} : PC杭の軸方向引張破壊 (ひびわれ) 荷重
- P_e : PC鋼材の有効引張力
- d_0 : 杭の外径
- $n = E_s/E_c$: 鋼対PC用コンクリートの縦弾性係数比 (5)
- $p_p = A_p/A_0$: PC鋼材の鉄筋比
- $p_s = A_s/A_0$: 補強鉄筋の鉄筋比
- r : PC杭の断面平均半径 (PC鋼材および補強鉄筋の配筋半径に同じ)
- $t = A_c/2\pi r$: コンクリートの肉厚
- $t_p = A_p/2\pi r$: PC鋼材の換算円輪の肉厚
- $t_s = A_s/2\pi r$: 補強鉄筋の換算円輪の肉厚
- z : 地盤の標準貫入試験値
- α : 断面中立軸の中心半角 (図-2)
- α' : コンクリート (補強鉄筋) の圧縮降伏ひずみ ϵ' に対応する中心半角 (図-2)
- α'' : PC鋼材が σ_{py} に達した点の中心半角 (図-2)
- α''' : 引張断面の補強鉄筋が σ_{sy} に達した点の中心半角 (図-2)
- α_1 : $\alpha'' = \pi$ に対応する α の値
- α_2 : $\alpha''' = \pi$ に対応する α の値
- γ : ϵ' に対応する角度 (図-3)
- δ : P_e に対応する長さ L の鉄筋コンクリート部の縮み (図-1)
- λ : P_e に対応する長さ L のPC鋼材の伸び (図-1)
- σ : 断面の任意点における応力
- $\sigma_u = N_u/A_0$: PC杭の見掛けの軸方向圧縮破壊応力
- σ_{cu} : コンクリートの圧縮破壊強度 (PC杭用コンクリートの場合 500 kg/cm²)
- $\sigma_{ci} \approx 0.1 \sigma_{cu}$: コンクリートの引張強度
- $\sigma_{cp} = P_e/A_r$: コンクリートの有効プレストレス
- σ_{py} : PC鋼材の引張降伏点応力
- $\sigma_{pe} = P_e/A_p$: PC鋼材の有効引張応力
- $\sigma_{pe}' = \sigma_{pe} \{1 + (n-1)(p_p + p_s)\} / \{1 - p_p + (n-1)p_s\} \approx \sigma_{pe}(1 + np_p)$: 中立軸におけるPC鋼材の有効引張応力 (図-2)
- σ_{pi} , P_i : PC鋼材に最初に与えるべき引張応力および引張力
- σ_{pt} , P_t : 応力導入直後のPC鋼材の引張応力および引張力
- σ_{sy} : 補強鉄筋の降伏点応力 (≈ 25 kg/mm²)

* 東急コンクリート工業株式会社常務取締役

- ϵ_{cu} : コンクリートの圧縮破壊ひずみ (2.5×10^{-3})
- $\epsilon_{cp} = \sigma_{cp} / E_c = P_c / A_r E_c = \sigma_{pc} / E_s \cdot n p_p / \{1 - p_p + (n-1)p_s\}$: コンクリートのプレストレイン (図-2)
- $\epsilon_u = \epsilon_{cu} - \epsilon_{cp}$: PC用コンクリートの曲げ圧縮破壊ひずみ (図-2)
- ϵ_s : 補強鉄筋およびPC鋼材の最大引張ひずみ (図-2)
- $\epsilon' = \sigma_{cu} / E_c = \sigma_{sy} / E_s$: コンクリートおよび補強鉄筋の圧縮降伏点ひずみ
- θ : 任意角度 (図-2, 3)
- ϕ : 任意角度 (図-3)
- $\xi = N / A_c \sigma_{cu}$: 圧縮荷重係数
- $\eta = \pi M_u / r A_c \sigma_{cu}$: 曲げ破壊モーメント係数
- ζ : 曲げ破壊断面の最大対最小圧縮ひずみ比率 (図-3)

3. 軸方向力による破壊荷重

(1) PC杭における内力のつり合い

PC杭に軸方向力を外部から加えた場合の内外力のつり合い状態を図-1に示す。

図-1 PC杭の内外力平衡図

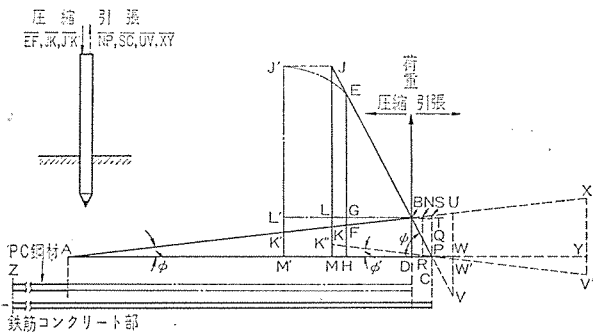


図-1において、横軸にPC鋼材の伸びおよび鉄筋コンクリート部の縮みを、また縦軸にそれらに対応する引張力および圧縮力をとり、 $\overline{BD} = P_c$, $\overline{AD} = \lambda = P_c L / A_p E_s$, $\overline{DC} = P_c L / A_r E_c$ とすれば、 $\tan \phi = P_c / \lambda = A_p E_s / L$, $\tan \psi = P_c / \delta = A_r E_c / L$ となり、弾性限界内ではこれらは三角形ABCを形成する。

(2) PC杭の軸方向圧縮破壊

PC杭に外部から加えた $\overline{EF} = N$ なる軸方向圧縮力は、鉄筋コンクリート部の圧縮力 \overline{EH} とPC鋼材の引張力 \overline{FH} とに図示の状態ですり合う。PC杭が軸方向圧縮破壊を起す場合には、鉄筋コンクリート部の圧縮力は F_c になる。その際の圧縮破壊荷重 N_u は、もし鉄筋コンクリート部の荷重対縮み関係が破壊に至るまで直線的比例関係を維持するものとすれば \overline{JK} となるが、コンクリートの塑性変形を考慮すれば $\overline{M'C} = \epsilon_{cu} L$ に対応する $\overline{J'K'}$ となり、図より明らかなように常に $\overline{J'K'} > \overline{JK}$ である (ただし $\overline{JM} = \overline{J'M'} = F_c$)。なおこのときのPC鋼材の引張力は、前者では \overline{KM} 、後者では $\overline{K'M'}$ で、常に $\overline{K'M'} < \overline{KM}$ である。

計算の簡単と安全のために $N_u \approx \overline{JK}$ とすれば

$$N_u \approx (F_c - P_c)(1 + A_p / A_r \cdot E_s / E_c) = (F_c - P_c)\{1 + (n-1)(p_p + p_s)\} / \{1 - p_p + (n-1)p_s\} \quad (1)$$

ここに、

$$F_c = \sigma_{cu} A_c + \sigma_{sy} A_s = A_0 \{\sigma_{cu}(1 - p_p - p_s) + p_s \sigma_{sy}\} \quad (2)$$

$$\sigma_u = N_u / A_0 = \{(\sigma_{cu} - \sigma_{cp})(1 - p_p - p_s) + (\sigma_{sy} - n \sigma_{cp}) p_s\} \{1 + (n-1)(p_p + p_s)\} / \{1 - p_p + (n-1)p_s\} \quad (3)$$

$p_p \ll 1$, $(n-1)p_s \ll 1$ なる場合には、

$$N_u \approx (F_c - P_c)(1 + n p_p) \quad (1)'$$

$$\sigma_u \approx (\sigma_{cu} - \sigma_{cp})(1 + n p_p) \quad (3)'$$

実際には

$$N_u = \overline{J'K'} = F_c - P_c(1 + A_p / A_r \cdot E_s / E_c) + \epsilon_{cu} A_p E_s = F_c - P_c \{1 + (n-1)(p_p + p_s)\} / \{1 - p_p + (n-1)p_s\} + \epsilon_{cu} A_p E_s \quad (4)$$

なお、式(1)~(4)の計算において $\epsilon_{cu} = 2.5 \times 10^{-3}$ 、また $\sigma_{cu} \geq 500 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートを使用する場合には、 $E_c = 400000 \text{ kg/cm}^2$, $n = 5$ ($E_s = 20000 \text{ kg/mm}^2$) にとってよい。

(3) PC杭の軸方向引張破壊(ひびわれ)

PC杭に外部から加えた $\overline{EF} = N$ なる軸方向引張力は、鉄筋コンクリート部の圧縮力 \overline{PR} とPC鋼材の引張力 \overline{NR} とに図示の状態ですり合う。PC杭が軸方向引張破壊(ひびわれ)を起す瞬間には、鉄筋コンクリート部には $\overline{WV} = F_t$ なる引張力を、またPC鋼材には \overline{UW} なる引張力を生じ、外部よりの軸方向引張破壊(ひびわれ)荷重 N_u とすり合う。ひびわれ発生とともにPC鋼材の引張力は \overline{UW} より \overline{XY} に、また補強鉄筋の引張力は $\overline{WW'}$ より $\overline{YV'}$ に飛躍的に変化するが、 $\overline{XV'} = \overline{UV} = N_u$ である。図-1において、破線で示した $\overline{K''C}$ 線は補強鉄筋の軸方向力を表わすもので、その傾斜は $\tan \phi' = A_s E_s / L$ で与えられる。

$$N_u = \overline{UV} = (F_t + P_c)(1 + A_p / A_r \cdot E_s / E_c) = (F_t + P_c)\{1 + (n-1)(p_p + p_s)\} / \{1 - p_p + (n-1)p_s\} \quad (5)$$

ここに

$$F_t = \sigma_{ct} A_r \quad (6)$$

$$\sigma_u = N_u / A_0 = (\sigma_{ct} + \sigma_{cp}) \{1 + (n-1)p_p + p_s\} \quad (7)$$

$p_p \ll 1$, $(n-1)p_s \ll 1$ なる場合には

$$N_u \approx (F_t + P_c) / (1 + n p_p) \quad (5)'$$

一般に

$$\sigma_{ct} \leq 0.1 \sigma_{cu}$$

(4) 軸方向力の測定に関する注意事項

PC杭の軸方向力測定試験において、材料試験機またはロードセルによって直読した圧縮力(または引張力)は図-1の \overline{EF} (または \overline{NP}) であるが、これに反しコンクリートに取付けたワイヤストレインゲージで測定した圧縮(または引張り)ひずみは \overline{DH} (または \overline{DR}) で

あり、したがってその圧縮（または引張り）応力は \overline{EG} （または \overline{QP} ）すなわち鉄筋コンクリート部の圧縮力の増（減）分に対応するものであるから、外部圧縮力（または引張り力） \overline{EF} （または \overline{NP} ）は次式によって計算しなければならない。

$$\begin{aligned} \overline{EF} \text{ (または } \overline{NP}) &= \overline{HD} \text{ (または } \overline{DR}) \times (\tan \psi + \tan \phi) \\ &= \varepsilon_w E_c (A_r + n A_p) \\ &= \varepsilon_w E_c A_0 \{1 + (n-1)(p_p + p_s)\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに ε_w : ワイヤストレーンゲージによる軸方向ひずみの測定値

(5) プレテンション方式 PC 杭の定着長区間における取扱い

前述の長さ L を定着長区間内の任意点における微小長さに置きかえ、また P_e の代わりにその点における有効引張力を用いるならば、図-1 に示した内外力の平衡図はこの場合にも適用できる。式(1)および(5)から明らかのように、この区間では、杭の内部に比較し N_u は大きく N_{-u} は小さくなり、RC 杭のそれらに近づく。しかしながら、杭打工事に際し振動による定着弛緩もしくは定着長の延伸を防止するため、大部分のプレテンション方式 PC 杭においては、ボンド定着のほかに機械的定着を併用している。

4. 軸方向圧縮荷重下の曲げ破壊モーメント

任意大きさの軸方向圧縮力 N を受けているプレテンション方式 PC 杭の曲げ破壊モーメント M_u は、つぎに述べる仮定の下に、まず曲げ破壊時における軸方向諸力のつり合いから断面中立軸の位置もしくは最大圧縮ひずみ対最小圧縮ひずみ比率 λ を求めたのち、この α もしくは λ をパラメータとして求めた軸方向諸力の断面中心線まわりのモーメントの代数和として計算する。

(1) 計算上の仮定

- 1) 断面は破壊に至るまで平面を保持する。
- 2) コンクリート、補強鉄筋および PC 鋼材は、PC 杭の断面平均半径 r の円周上に薄肉シリングとして分布する。
- 3) 圧縮側コンクリートのひずみが 2.5×10^{-3} （土木学会 PC 設計施工指針による）に達したとき、PC 杭は曲げ破壊を起す。
- 4) コンクリートの引張強度は 0 とする。
- 5) PC 鋼材は、プレテンション方式のゆえに、コンクリートとともに同一ひずみだけ伸縮する。
- 6) コンクリートの圧縮破壊強度 σ_{cu} は、一般の PC 杭用として $\sigma_{cu} = 500 \text{ kg/cm}^2$ とする。したがって σ_{cu} に到達した点の圧縮ひずみ ε' は $\varepsilon' = \sigma_{cu}/E_c = 500/400\,000 = 1.25 \times 10^{-3} = \varepsilon_{cu}/2$ とし、この点を境として小さいひ

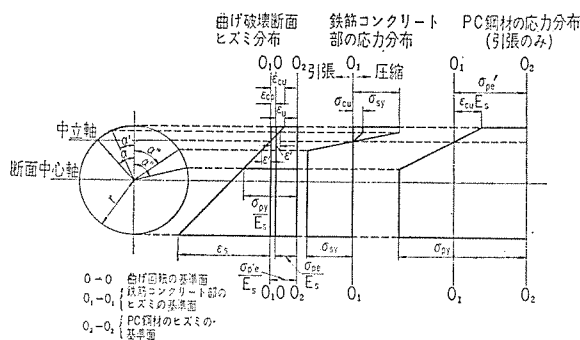
ずみの範囲では、フックの法則が適用され、大きいひずみの範囲では、圧縮応力一定 (σ_{cu}) の法則が適用される。ただし $\sigma_{cu} = 500 \text{ kg/cm}^2$ に対し、 $E_c = 400\,000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $n = 5$ とする。

7) 補強鉄筋は SS 41 相当品とし、 $\sigma_{sy} = 25 \text{ kg/mm}^2$ 、これに対応する降伏点ひずみは $\sigma_{sy}/E_s = 25/20\,000 = 1.25 \times 10^{-3} = \varepsilon_{cu}/2 = \varepsilon'$ とする。したがって補強鉄筋の圧縮応力対圧縮ひずみの関係は、コンクリートのそれに類似する。

(2) 断面の中立軸中心半角 α が $\alpha = 0 \sim \pi$ の場合

ここに断面の中立軸とは、鉄筋コンクリート部の圧縮ひずみが 0 となる面をいう（図-2 参照）。

図-2 曲げ破壊断面の応力分布図
(中立軸の存在する場合)



a) 軸方向圧縮力 N と中立軸中心半角 α との関係

1) α' と α との関係

$$\begin{aligned} \varepsilon'/\varepsilon_{cu} &= (r - r \cos \alpha') / (r - r \cos \alpha) \\ \therefore \alpha' &= \cos^{-1} \{1 - \varepsilon'/\varepsilon_{cu} \cdot (1 - \cos \alpha)\} \dots\dots\dots (9) \\ &= \cos^{-1} \{(1 + \cos \alpha)/2\} \text{ (} \varepsilon'/\varepsilon_{cu} = 0.5 \text{ の場合)} \dots\dots\dots (9') \end{aligned}$$

2) コンクリートの圧縮力 C

$$\begin{aligned} \theta = 0 \sim \alpha' \text{ では } \sigma_1 &= \sigma_{cu} \\ \theta = \alpha' \sim \alpha \text{ では } \sigma_2 &= \sigma_{cu} (\cos \theta - \cos \alpha) / (\cos \alpha' - \cos \alpha) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$C/2 = t \left\{ \int_0^{\alpha'} \sigma_1 r d\theta + \int_{\alpha'}^{\alpha} \sigma_2 r d\theta \right\}$$

$$\therefore C/2 r t \sigma_{cu} = (\alpha' \cos \alpha' - \alpha \cos \alpha + \sin \alpha - \sin \alpha') / (\cos \alpha' - \cos \alpha) \dots\dots\dots (11)$$

3) 圧縮断面における PC 鋼材の引張力 T_p'

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{pe}' - \varepsilon_{cu} E_s (\cos \theta - \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots (12) \\ \sigma_{pe}' &= \sigma_{pe} + E_s \varepsilon_{cp} = \sigma_{pe} + \sigma_{pe} n p_p / \{1 - p_p + (n-1)p_s\} \\ &= \sigma_{pe} (1 + n p_p) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_p'/2 &= t_p \int_0^{\alpha} \sigma r d\theta \\ \therefore T_p'/2 r t_p &= \sigma_{pe}' \alpha - \varepsilon_{cu} E_s (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

4) 圧縮断面における補強鉄筋の圧縮力 C_s'

SS 材はコンクリートとまったく同様に圧縮降伏を起すため $C_s'/2 r t_s \sigma_{sy} = C/2 r t \sigma_{cu}$ あるいは

$$C_s' = p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu} \cdot C \dots\dots\dots (15)$$

5) 引張断面における PC 鋼材の引張力 T_p

$$(\sigma_{py} - \sigma_{pe}') / E_s = \varepsilon_{cu} (r \cos \alpha - r \cos \alpha') / (r - r \cos \alpha)$$

$$\therefore \cos \alpha'' \cos \alpha \{1 + (\sigma_{py} - \sigma_{pe}')/E_s \varepsilon_{cu}\} - (\sigma_{py} - \sigma_{pe}')/E_s \varepsilon_{cu} \dots\dots\dots(16)$$

しかるに $\alpha'' \leq \pi$, したがって式 (16) より

$$\alpha \leq \alpha_1 \equiv \cos^{-1} \{ [(\sigma_{py} - \sigma_{pe}')/E_s \varepsilon_{cu} - 1] / [(\sigma_{py} - \sigma_{pe}')/E_s \varepsilon_{cu} + 1] \} \dots\dots\dots(17)$$

① $\alpha \leq \alpha_1$ の場合

$$\theta = \alpha \sim \alpha'' \text{ では } \left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{pe}' + (\sigma_{py} - \sigma_{pe}')(\cos \alpha - \cos \theta) / (\cos \alpha - \cos \alpha'') \\ \theta &= \alpha'' \sim \pi \text{ では } \sigma_2 = \sigma_{py} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

$$T_p/2 t_p r = \int_{\alpha}^{\alpha''} \sigma_1 d\theta + \int_{\alpha''}^{\pi} \sigma_2 d\theta = \sigma_{pe}'(\pi - \alpha'') + \sigma_{pe}'(\alpha'' - \alpha) + (\sigma_{py} - \sigma_{pe}')(\cos \alpha - \cos \alpha'') \cdot [(\alpha'' - \alpha) \cos \alpha - \sin \alpha'' + \sin \alpha] \dots\dots\dots(19)$$

② $\alpha > \alpha_1$ の場合

$$\sigma_3 = \sigma_{pe}' + \varepsilon_{cu} E_s (\cos \alpha - \cos \theta) / (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots(20)$$

$$T_p/2 t_p r = \int_{\alpha}^{\pi} \sigma_3 d\theta = \sigma_{pe}'(\pi - \alpha) + \varepsilon_{cu} E_s (1 - \cos \alpha) \cdot [(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha] \dots\dots\dots(21)$$

6) 引張断面における補強鉄筋の引張力 T_s

$$\sigma_{sy}/E_s = \varepsilon_{cu} (\cos \alpha - \cos \alpha''') / (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots(22)$$

しかるに $\alpha''' \leq \pi$, したがって式 (22) より

$$\alpha \leq \alpha_2 \equiv \cos^{-1} \{ (\sigma_{sy}/E_s \varepsilon_{cu} - 1) / (\sigma_{sy}/E_s \varepsilon_{cu} + 1) \} \dots\dots\dots(23)$$

① $\alpha \leq \alpha_2$ の場合

$$\left. \begin{aligned} \theta = \alpha \sim \alpha''' \text{ では } \sigma_1 &= \sigma_{sy} (\cos \alpha - \cos \theta) / (\cos \alpha - \cos \alpha''') \\ \theta = \alpha''' \sim \pi \text{ では } \sigma_2 &= \sigma_{sy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(24)$$

$$T_s/2 t_s r = \int_{\alpha}^{\alpha'''} \sigma_1 d\theta + \int_{\alpha'''}^{\pi} \sigma_2 d\theta$$

$$\therefore T_s/2 t_s r \sigma_{sy} = \{ (\alpha''' - \alpha) \cos \alpha - \sin \alpha''' + \sin \alpha \} / (\cos \alpha - \cos \alpha''') + \pi - \alpha''' \dots\dots\dots(25)$$

② $\alpha > \alpha_2$ の場合

$$\sigma_3 = \varepsilon_{cu} E_s (\cos \alpha - \cos \theta) / (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots(26)$$

$$T_s/2 t_s r = \int_{\alpha}^{\pi} \sigma_3 d\theta = \varepsilon_{cu} E_s (1 - \cos \alpha) \cdot [(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha] \dots\dots\dots(27)$$

7) 軸方向圧縮力 N

$$N = C + C_s' - T_p' - T_p - T_s \dots\dots\dots(28)$$

いま ξ を圧縮荷重係数として次式で定義する。

$$\xi = N/A_c \sigma_{cu} \dots\dots\dots(29)$$

通常 $\alpha_2 > \alpha_1$ で, $(\alpha_2 - \alpha_1)$ は小さいから, $\alpha < \alpha_1$ と $\alpha > \alpha_2$ の二つの場合について計算する。また $p_p \equiv A_p/A_c = t_p/t$, $p_s \equiv A_s/A_c = t_s/t$ なる関係を用いる。

① $\alpha < \alpha_1$ の場合

式 (29) に式 (28), (11), (14), (15), (19), (25) を代入して整理すると

$$\begin{aligned} \xi &= (1 + p_s \sigma_{sy}/\sigma_{cu}) / \pi \cdot (\alpha' \cos \alpha' - \alpha \cos \alpha + \sin \alpha - \sin \alpha') / (\cos \alpha' - \cos \alpha) + p_p / \pi \cdot \{ \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} \cdot (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha) - \pi \sigma_{py} / \sigma_{cu} \\ &\quad + (\sigma_{py} - \sigma_{pe}') \alpha'' / \sigma_{cu} - (\sigma_{py} - \sigma_{pe}') / \sigma_{cu} \cdot (\alpha'' \cos \alpha - \alpha \cos \alpha - \sin \alpha'' + \sin \alpha) / (\cos \alpha - \cos \alpha'') \} \\ &\quad - p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu} \pi \cdot [(\alpha''' - \alpha) \cos \alpha - \sin \alpha''' + \sin \alpha] / (\cos \alpha - \cos \alpha''') + \pi - \alpha''' \dots\dots\dots(30) \end{aligned}$$

② $\alpha > \alpha_2$ の場合

式 (29) に式 (28), (11), (14), (15), (21), (27) を代入

して整理すると

$$\begin{aligned} \xi &= (1 + p_s \sigma_{sy}/\sigma_{cu}) / \pi \cdot (\alpha' \cos \alpha' - \alpha \cos \alpha + \sin \alpha - \sin \alpha') / (\cos \alpha' - \cos \alpha) - p_p \{ \sigma_{pe}' / \sigma_{cu} \\ &\quad + \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} \cdot \cos \alpha / (1 - \cos \alpha) \} - p_s \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} \pi \\ &\quad \cdot [(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha] / (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots(31) \end{aligned}$$

式 (30), (31) において, α' : 式 (9), α'' : 式 (16), α''' : 式 (22), σ_{pe}' : 式 (13) によって計算する。

b) 曲げ破壊モーメント M_u と中立軸中心半角 α との関係

1) コンクリート圧縮力の断面中心線まわりのモーメント M_C

$$M_C/2 tr^2 = \int_0^{\alpha'} \sigma_1 \cos \theta d\theta + \int_{\alpha'}^{\alpha} \sigma_2 \cos \theta d\theta$$

上式に式 (10) を代入して整理すると

$$M_C/2 tr^2 \sigma_{cu} = (\alpha - \alpha' + \sin \alpha' \cos \alpha' - \sin \alpha \cos \alpha) / 2(\cos \alpha' - \cos \alpha) \dots\dots\dots(32)$$

2) 圧縮断面におけるP C鋼材引張力の断面中心線まわりのモーメント M_{T_p}'

$$M_{T_p}'/2 t_p r^2 = \int_0^{\alpha} \sigma \cos \theta d\theta$$

上式に式 (12) を代入して整理すると

$$M_{T_p}'/2 t_p r^2 \sigma_{pe}' = \sin \alpha - \varepsilon_{cu} E_s \cdot (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) / 2(1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots(33)$$

3) 圧縮断面における補強鉄筋圧縮力の断面中心線まわりのモーメント M_{C_s}'

SS材はコンクリートとまったく同様に圧縮降伏を起すから

$$M_{C_s}'/2 t_s r^2 \sigma_{sy} = M_C/2 tr^2 \sigma_{cu}, \text{ あるいは } M_{C_s}' = p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu} \cdot M_C \dots\dots\dots(34)$$

4) 引張断面におけるP C鋼材引張力の断面中心線まわりのモーメント M_{T_p}

① $\alpha \leq \alpha_1$ の場合

$$M_{T_p}/2 t_p r^2 = \int_{\alpha}^{\alpha''} \sigma_1 \cos \theta d\theta + \int_{\alpha''}^{\pi} \sigma_2 \cos \theta d\theta$$

上式に式 (18) を代入して整理すると,

$$-M_{T_p}/2 t_p r^2 = \sigma_{pe}' \sin \alpha + (\sigma_{py} - \sigma_{pe}') (\alpha'' - \alpha - \sin \alpha'' \cos \alpha'' + \sin \alpha \cos \alpha) / 2(\cos \alpha - \cos \alpha'') \dots\dots\dots(35)$$

② $\alpha > \alpha_1$ の場合

$$M_{T_p}/2 t_p r^2 = \int_{\alpha}^{\pi} \sigma_3 \cos \theta d\theta$$

上式に式 (20) を代入して整理すると,

$$-M_{T_p}/2 t_p r^2 = \sigma_{pe}' \sin \alpha + \varepsilon_{cu} E_s \cdot (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha) / 2(1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots(36)$$

5) 引張断面における補強鉄筋引張力の断面中心線まわりのモーメント M_{T_s}

① $\alpha \leq \alpha_2$ の場合

$$M_{T_s}/2 t_s r^2 = \int_{\alpha}^{\alpha'''} \sigma_1 \cos \theta d\theta + \int_{\alpha'''}^{\pi} \sigma_2 \cos \theta d\theta$$

上式に式 (24) を代入して整理すると,

$$M_{T_s}/2 t_s r^2 \sigma_{sy} = (\alpha''' - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha''' \cos \alpha''') / 2(\cos \alpha - \cos \alpha''') \dots\dots\dots(37)$$

② $\alpha > \alpha_2$ の場合

$$M_{T_s}/2 t_s r^2 = \int_{\alpha}^{\pi} \sigma_3 \cos \theta d\theta$$

上式に式 (26) を代入して整理すると、

$$-M_{T_s}/2 t_s r^2 = \epsilon_{cu} E_s (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha) / 2 (1 - \cos \alpha) \quad (38)$$

6) 曲げ破壊モーメント M_u

$$M_u = M_C + M_{C_s'} - M_{T_p'} - M_{T_p} - M_{T_s} \dots \dots \dots (39)$$

いま η を曲げ破壊モーメント係数として次式で定義する。

$$\eta = \pi M_u / r A_c \sigma_{cu} \dots \dots \dots (40)$$

① $\alpha \leq \alpha_1$ の場合

式 (40) に式 (39), (32), (33), (34), (35), (37) を代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \eta = & (1 + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu}) / 2 (\cos \alpha' - \cos \alpha) \cdot \{ \alpha - \alpha' \\ & - \sin \alpha \cos \alpha + \sin \alpha' \cos \alpha' \} + p_p \{ (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \\ & \cdot \epsilon_{cu} E_s / 2 \sigma_{cu} (1 - \cos \alpha) + (\sigma_{py} - \sigma_{pe}') / \sigma_{cu} \\ & \cdot (\alpha'' - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha'' \cos \alpha'') / 2 (\cos \alpha \\ & - \cos \alpha'') \} + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu} \cdot (\alpha''' - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha \\ & - \sin \alpha''' \cos \alpha''') / 2 (\cos \alpha - \cos \alpha''') \dots \dots \dots (41) \end{aligned}$$

② $\alpha > \alpha_2$ の場合

式 (40) に式 (39), (32), (33), (34), (36), (38) を代入して整理すると、

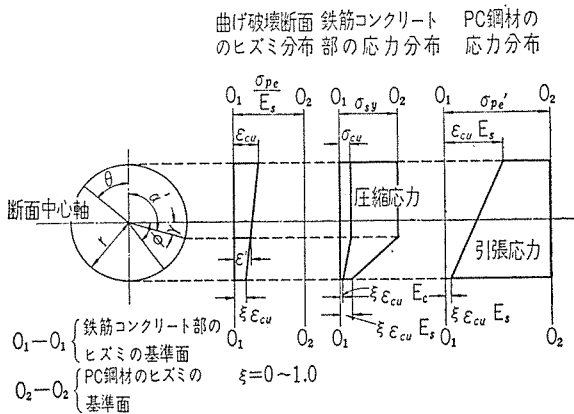
$$\begin{aligned} \eta = & (1 + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu}) (\alpha - \alpha' + \sin \alpha' \cos \alpha' \\ & - \sin \alpha \cos \alpha) / 2 (\cos \alpha' - \cos \alpha) \\ & + p_p \pi \epsilon_{cu} E_s / 2 \sigma_{cu} (1 - \cos \alpha) + p_s \epsilon_{cu} E_s (\pi - \alpha \\ & + \sin \alpha \cos \alpha) / 2 \sigma_{cu} (1 - \cos \alpha) \dots \dots \dots (42) \end{aligned}$$

式 (41), (42) において、 α' : 式 (9), α'' : 式 (16), α''' : 式 (22), σ_{pe}' : 式 (13) より計算する。

(3) 断面に圧縮ひずみのみ生ずる場合

この場合、断面には圧縮ひずみのみ生じ、その最大値は ϵ_{cu} 、最小値は $\zeta \epsilon_{cu}$ で、 $\zeta = 0 \sim 1.0$ の間にある (図-3 参照)。 ζ をパラメータとして ξ および η を計算する。

図-3 曲げ破壊断面の応力分布図 (圧縮ひずみの場合)



a) $\eta = 0 \sim \epsilon' / \epsilon_{cu}$ すなわち $r = 0 \sim \pi/2$ の場合

1) コンクリートの降伏点ひずみの発生位置 r と ζ との関係

$$\begin{aligned} \epsilon' = & \zeta \epsilon_{cu} + (\epsilon_{cu} - \zeta \epsilon_{cu}) (1 - \sin \gamma) / 2 \\ \therefore \sin \gamma = & (\zeta + 1 - 2 \epsilon' / \epsilon_{cu}) / (1 - \zeta) \dots \dots \dots (43) \\ = & \zeta / (1 - \zeta) \quad (\epsilon' / \epsilon_{cu} = 0.5 \text{ の場合}) \dots \dots \dots (43') \end{aligned}$$

2) コンクリートの圧縮力 C

$$\left. \begin{aligned} \theta = 0 \sim \pi/2 \text{ では } \sigma_1 = \sigma_{cu} \\ \theta = \pi/2 \sim (\pi/2 + \gamma) \text{ すなわち} \\ \phi = 0 \sim \gamma \text{ では } \sigma_2 = \sigma_{cu} \\ \theta = (\pi/2 + \gamma) \sim \pi \text{ すなわち } \phi = \gamma \sim \pi/2 \text{ では} \\ \sigma_3 = \sigma_{cu} - (\sigma_{cu} - \zeta \epsilon_{cu} E_c) (\sin \phi \\ - \sin \gamma) / (1 - \sin \gamma) \end{aligned} \right\} \dots \dots (44)$$

$$C/2 tr = \int_0^{\pi/2} \sigma_1 d\theta + \int_0^{\beta} \sigma_2 d\phi + \int_{\beta}^{\pi/2} \sigma_3 d\phi$$

上式に式 (44) を代入して整理すると、

$$C/2 tr \sigma_{cu} = \pi - (1 - \zeta \epsilon_{cu} E_c / \sigma_{cu}) (1 - \sin \gamma) \cdot \{ \cos \gamma - (\pi/2 - \gamma) \sin \gamma \} \dots \dots \dots (45)$$

$$\begin{aligned} = & \pi - (1 - \zeta \epsilon_{cu} E_c / \sigma_{cu}) \{ 1 / \sqrt{1 - 2\zeta} \\ & - (\pi/2 - \gamma) \zeta / (1 - 2\zeta) \} \dots \dots \dots (45') \\ (\epsilon' = \epsilon_{cu} / 2 \text{ の場合}) \end{aligned}$$

3) 補強鉄筋の圧縮力 C_D

SS材はコンクリートとまったく同様に圧縮降伏を起すから

$$C_D/2 r t_s \sigma_{sy} = C/2 r t \sigma_{cu} \dots \dots \dots (46)$$

4) P C鋼材の引張力 T_p

角度 θ における圧縮ひずみ ϵ は

$$\begin{aligned} \epsilon = & \zeta \epsilon_{cu} + (\epsilon_{cu} - \zeta \epsilon_{cu}) (r - r \cos \theta) / 2 r = \epsilon_{cu} / 2 \\ & \cdot \{ (1 + \zeta) + (1 - \zeta) \cos \theta \} \end{aligned}$$

したがって

$$\sigma = \sigma_{pe}' - \epsilon_{cu} E_s / 2 \cdot \{ (1 + \zeta) + (1 - \zeta) \cos \theta \} \dots \dots \dots (47)$$

$$T_p/2 t_p r = \int_0^{\pi} \sigma d\theta$$

$$\therefore T_p/A_p = \sigma_{pe}' - \epsilon_{cu} E_s / 2 \cdot (1 + \eta) \dots \dots \dots (48)$$

5) 軸方向圧縮力 N

$$N = C + C_s - T_p \dots \dots \dots (49)$$

式 (49) に式 (45), (46), (48) を代入し、式 (29) を用いて整理すると、

$$\begin{aligned} \xi = & (1 + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu}) [1 - (1 - \zeta \epsilon_{cu} E_c) / (1 - \sin \gamma) \pi \\ & \cdot \{ \cos \gamma - (\pi/2 - \gamma) \sin \gamma \}] - p_p \{ \sigma_{pe}' / \sigma_{cu} \\ & - \epsilon_{cu} E_s / 2 \sigma_{cu} \cdot (1 + \zeta) \} \dots \dots \dots (50) \end{aligned}$$

ここに r : 式 (43) より計算

6) コンクリート圧縮力の断面中心線まわりのモーメント M_C

$$M_C/2 tr^2 = \int_0^{\pi/2} \sigma_1 \cos \theta d\theta - \int_0^{\beta} \sigma_2 \sin \phi d\phi - \int_{\beta}^{\pi/2} \sigma_3 \sin \phi d\phi$$

上式に式 (44) を代入して整理すると、

$$M_C/2 tr^2 \sigma_{cu} = (1 + \zeta \epsilon_{cu} E_c / \sigma_{cu}) \cdot \{ \pi/4 - (\gamma + \sin \gamma \cos \gamma) / 2 \} / (1 - \sin \gamma) \dots \dots (51)$$

7) 補強鉄筋圧縮力の断面中心線まわりのモーメント M_{C_s}

SS材はコンクリートとまったく同様に圧縮降伏を起すから

$$M_{C_s}/2 t_s r^2 \sigma_{sy} = M_C/2 tr^2 \sigma_{cu} \dots \dots \dots (52)$$

8) P C鋼材引張力の断面中心線まわりのモーメント M_{T_p}

$$M_{T_p}/2 t_p r^2 = \int_0^{\pi} \sigma \cos \theta d\theta$$

に式 (47) を代入して整理すると、

$$-M_{T_p}/2 t_p r^2 = \epsilon_{cu} E_s (1 - \zeta) \pi / 2 \dots \dots \dots (53)$$

9) 曲げ破壊モーメント M_u

$$M_u = M_C + M_{C_s} - M_{T_p} \dots \dots \dots (54)$$

式 (40) に式 (54), (51), (52), (53) を代入して整理すると,

$$\eta = (1 + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu}) [(1 - \zeta \varepsilon_{cu} E_c / \sigma_{cu}) \{ \pi / 4 - (\gamma + \sin \gamma \cos \gamma) / 2 \}] / (1 - \sin \gamma) + p_p \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} \cdot (1 - \zeta) \pi / 4 \dots\dots\dots (55)$$

式 (55) において γ : 式 (43) より計算

c) $\zeta = \varepsilon' / \varepsilon_{cu} \sim 1.0$ の場合 この場合はコンクリートおよび補強鉄筋がすべて圧縮降伏状態にある。

1) コンクリートの圧縮力 C

$C/2 t = \sigma_{cu} r \pi \dots\dots\dots (56)$

2) 補強鉄筋の圧縮力 C_s

$C_s/2 t_s = \sigma_{sy} r \pi \dots\dots\dots (57)$

3) PC鋼材の引張力 T_p 式 (48) と同じ。

4) 軸方向圧縮力 N と圧縮荷重係数 ξ

式 (49) に式 (56), (57), (48) を代入し, 式 (29) を用いて整理すると,

$\xi = 1 + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu} - p_p \{ \sigma_{pe}' / \sigma_{cu} - \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} \cdot (1 + \zeta) / 2 \} \dots\dots\dots (58)$

5) コンクリート圧縮力の断面中心線まわりのモーメント M_C

$M_C = 0 \dots\dots\dots (59)$

6) 補強鉄筋圧縮力の断面中心線まわりのモーメント M_S

$M_S = 0 \dots\dots\dots (60)$

7) PC鋼材引張力の断面中心線まわりのモーメント M_{T_p}

$M_{T_p} / 2 r^2 t_p = \int_0^\pi \sigma \cos \theta d\theta$ に式 (47) を代入して整理すると,
 $-M_{T_p} / 2 r^2 t_p = \varepsilon_{cu} E_s (1 - \zeta) \pi / 4 \dots\dots\dots (61)$

8) 曲げ破壊モーメント M_u

式 (54) に式 (59), (60), (61) を代入し, 式 (40) を用いて整理すると,

$M_u = -M_{T_p} = r A_p \varepsilon_{cu} E_s (1 - \zeta) / 4$
 $\eta = p_p \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} \cdot (1 - \zeta) \pi / 4 \dots\dots\dots (62)$

(4) 圧縮荷重係数 ξ 対曲げ破壊モーメント係数 η 曲線の計算例および実験例

つぎに東急PCパイロおよび無筋コンクリート杭について $\xi-\eta$ 曲線を計算するが, この結果は他の仕様に対しても適用できる。

a) 東急PCパイロの仕様

1) コンクリート

$\varepsilon_{cu} = 2.5 \times 10^{-3}, \sigma_{cu} = 500 \text{ kg/cm}^2, E_c = 40 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

2) PC鋼材 (ウルボン)

$\sigma_{py} = 140 \text{ kg/mm}^2, \sigma_{pe} = 80 \text{ kg/mm}^2$

3) 補強鉄筋

$\sigma_{sy} = 25 \text{ kg/mm}^2$

4) 誘導数値

$n = E_s / E_c = 5, \varepsilon_{cu} E_s / \sigma_{cu} = 10, \sigma_{py} / \sigma_{cu} = 28,$

$(\sigma_{py} - \sigma_{pe}) / \sigma_{cu} = 12, (\sigma_{py} - \sigma_{pe}') / \sigma_{cu} = 12 - 80 p_p,$

$\sigma_{pe} / \sigma_{cu} = 16, \sigma_{pe}' / \sigma_{cu} = 16 + 80 p_p, \varepsilon_{cu} E_c / \sigma_{cu} = 2,$

$\varepsilon' / \varepsilon_{cu} = \sigma_{cu} / E_c \varepsilon_{cu} = 0.5, \cos \alpha' = (1 + \cos \alpha) / 2,$

$\cos \alpha'' = 2.2 \cos \alpha - 1.2 + 8 p_p (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots \text{式 (16) より,}$

$\cos \alpha''' = 1.5 \cos \alpha - 0.5 \dots\dots\dots \text{式 (22) より,}$

$\alpha_1 = \cos^{-1} \{ (0.2 - 8 p_p) / (2.2 - 8 p_p) \} \dots\dots\dots \text{式 (17) より,}$

$\alpha_2 = \cos^{-1} \{ (0.5 - 1) / (0.5 + 1) \} = 109.5^\circ \dots\dots\dots \text{式 (23) より,}$

$\sigma_{cp} = \sigma_{pe} p_p = 8000 p_p \text{ kg/cm}^2$

5) 東急PCパイロの仕様

計算に必要な数値を表-1に示す。

表-1 東急PCパイロの仕様

種 別	p_p	p_s	$\sigma_{cp} \text{ kg/cm}^2$	α_1 度
PC基礎杭	0.006	0	48	86.0
PCモーメント杭	0.012	0	96	87.2
PC特殊モーメント杭	0.018	0	144	88.4

b) 東急PCパイロにおける $\xi-\eta$ 曲線の計算

前項の諸数値を用い, $\xi = N / 500 A_c$ についてはまず α をパラメータとして, $\alpha < \alpha_1$ の場合は式 (30), $\alpha > \alpha_2$ の場合は式 (31) を用い, つぎに ζ をパラメータとして $\zeta = 0 \sim 0.5$ の範囲では式 (50), $\zeta = 0.5 \sim 1.0$ の範囲では式 (58) を用いて計算し, また曲げ破壊モーメント係数 $\eta = \pi M_u / 500 A_c r$ については, まず α をパラメータとして $\alpha < \alpha_1$ の場合は式 (41), $\alpha > \alpha_2$ の場合は式 (42) を用い, つぎに ζ をパラメータとして $\zeta = 0 \sim 0.5$ の範囲では式 (55), $\zeta = 0.5 \sim 1.0$ の範囲では式 (62) を用いて計算し, この結果を表示すると表-2となり, それらの数値を用い ξ 対 η 曲線を描くと線図-1となる。

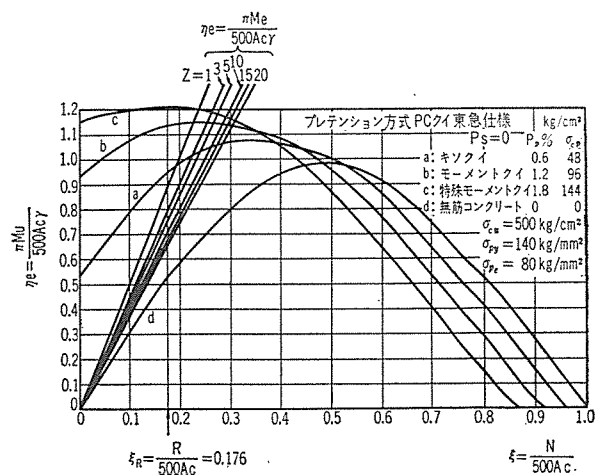
式 (31) を用い $\xi = 0$ として $\alpha_{\xi=0}$ を求め, これを式 (41) に代入すると, 軸荷重のない場合の曲げ破壊モーメント係数 $(\eta)_{N=0}$ が得られる。この結果を表-3に示す。

$(\eta)_{N=0} = 0.948(100 p_p) - 0.119(100 p_p)^2 - 0.028(100 p_p)^3 \dots\dots\dots (62)'$

表-2, 3 を用い $\xi / (\xi)_{M=0}$ および $\eta / (\eta)_{M=0}$ を計算すると表-4および線図-2が得られる。

式 (58) において $\zeta = 1$ とおくと純粋圧縮破壊における圧縮荷重係数 $(\xi)_{M=0}$ が得られる。

線図-1 η 対 ξ 曲線 (表-2 参照)



表—2 $\xi=N/500 A_c$ 対 $\eta=\pi M_u/500 A_c r$

パラメータ	0%		0.6% 48 kg/cm ²		1.2% 96 kg/cm ²		1.8% 144 kg/cm ²	
	ξ	η	ξ	η	ξ	η	ξ	η
$\alpha=0^\circ$	0	0	—	—	—	—	—	—
10°	0.048	0.151	—	—	—	—	—	—
20°	0.095	0.295	-0.060	0.324	-0.215	0.332	-0.375	0.326
30°	0.144	0.434	—	—	—	—	—	—
40°	0.191	0.562	0.051	0.669	-0.082	0.724	-0.235	0.776
50°	0.237	0.677	—	—	—	—	—	—
60°	0.284	0.775	0.159	0.918	0.033	0.985	-0.097	1.051
70°	0.330	0.855	0.213	1.006	0.097	1.074	-0.024	1.141
80°	0.370	0.916	0.267	1.057	0.158	1.119	0.046	1.181
84.5°	—	—	0.291	1.064	0.187	1.142	0.080	1.197
90°	0.418	0.957	—	—	—	—	—	—
100°	0.460	0.990	—	—	—	—	—	—
110°	0.502	0.981	0.431	1.048	0.336	1.121	0.251	1.196
120°	0.541	0.968	0.464	1.030	0.385	1.093	0.309	1.156
130°	0.576	0.941	0.504	1.000	0.426	1.051	0.350	1.117
140°	0.609	0.905	0.548	0.959	0.465	1.012	0.390	1.065
150°	0.628	0.865	0.567	0.916	0.496	0.949	0.422	1.017
160°	0.660	0.827	0.586	0.875	0.516	0.924	0.441	0.972
170°	0.675	0.797	0.608	0.845	0.537	0.892	0.463	0.939
180°	0.682	0.785	0.615	0.832	0.543	0.879	0.471	0.926
$\eta=0.1$	0.762	0.606	0.698	0.649	0.629	0.692	0.559	0.734
0.2	0.838	0.430	0.776	0.468	0.711	0.506	0.642	0.543
0.3	0.907	0.259	0.848	0.292	0.786	0.325	0.719	0.357
0.4	0.965	0.103	0.909	0.131	0.848	0.160	0.784	0.188
0.5	1.000	0	0.947	0.023	0.889	0.047	0.827	0.071
0.6	—	—	0.950	0.019	0.895	0.038	0.835	0.056
0.7	—	—	0.953	0.014	0.900	0.028	0.842	0.042
0.8	—	—	0.956	0.009	0.906	0.019	0.850	0.028
0.9	—	—	0.958	0.005	0.911	0.009	0.858	0.014
1.0	—	—	0.961	0	0.917	0	0.866	0

表—3 東急 PC パイルにおける諸係数

種 別	基礎杭	モーメント杭	特殊モーメント杭
$p_p\%$	0.6	1.2	1.8
σ_{cp} kg/cm ²	48	96	144
$(\alpha)_{\xi=0}$	31°	54°	73°
$(\eta)_{N=0}$	0.519	0.916	1.157
$(\xi)_{M=0}$	0.961	0.917	0.866

$$(\xi)_{M=0} = 1 + p_s \sigma_{sy} / \sigma_{cu} - p_p (\sigma_{pc}' - \epsilon_{cu} E_s) / \sigma_{cu} \dots (58)'$$

上式は、式(4)の結果と一致する。上式に前項の諸数値を代入すると

$$(\xi)_{M=0} = 1 - p_p (6 + 80 p_p) \dots (58)''$$

各種 p_p に対応する $(\xi)_{M=0}$ の値を表—3 に示す。

c) 無筋コンクリート杭における $\xi-\eta$ 曲線の計算および付着のないポストテンション方式 PC 杭について

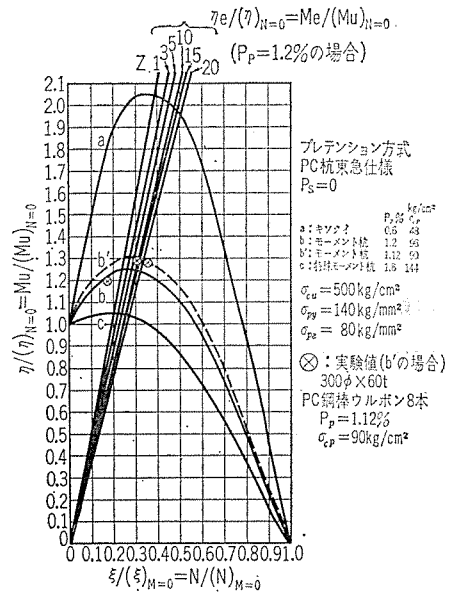
この場合は、前項で用いた諸式において $p_s=0$, $p_p=0$ と置いて計算するが、式(30)と式(31)、式(41)と式(42)とはそれぞれ一致し、また $\zeta=0.5\sim 1.0$ の範囲で式(58)は $\xi=1$ 、式(62)は $\eta=0$ となる。この結果を表—2 に表示し、かつ線図—1 に図示する。

付着のないポストテンション方式 PC 杭で、とくに補強鉄筋のない場合の ξ 対 η 曲線は線図—1 において PC 鋼材の有効引張力に相当する圧縮荷重係数 $P_e/\sigma_{cu} A_c$ だ

表—4 $\xi/(\xi)_{M=0}$ 対 $\eta/(\eta)_{N=0}$

パラメータ	0.6% 48 kg/cm ²		1.2% 96 kg/cm ²		1.8% 144 kg/cm ²	
	$\xi/(\xi)_{M=0}$	$\eta/(\eta)_{N=0}$	$\xi/(\xi)_{M=0}$	$\eta/(\eta)_{N=0}$	$\xi/(\xi)_{M=0}$	$\eta/(\eta)_{N=0}$
$\alpha=20^\circ$	-0.062	0.622	-0.234	0.362	-0.433	0.272
40°	0.053	1.285	-0.089	0.790	-0.271	0.670
60°	0.166	1.765	0.036	1.075	-0.112	0.908
70°	0.222	1.932	0.157	1.172	-0.028	0.986
80°	0.278	2.03	0.172	1.220	0.053	1.021
84.5°	0.303	2.05	0.204	1.247	0.092	1.032
110°	0.448	2.01	0.366	1.223	0.290	1.032
120°	0.483	1.98	0.408	1.193	0.357	0.990
130°	0.525	1.92	0.464	1.148	0.404	0.965
140°	0.570	1.842	0.506	1.103	0.450	0.920
150°	0.590	1.76	0.540	1.035	0.487	0.879
160°	0.610	1.68	0.561	1.008	0.509	0.840
170°	0.633	1.623	0.585	0.973	0.535	0.812
180°	0.640	1.599	0.592	0.958	0.544	0.801
$\eta=0.1$	0.726	1.246	0.685	0.755	0.645	0.634
0.2	0.808	0.900	0.775	0.552	0.741	0.479
0.3	0.882	0.561	0.856	0.355	0.829	0.310
0.4	0.946	0.252	0.923	0.175	0.905	0.153
0.5	0.985	0.044	0.968	0.051	0.954	0.061
0.6	0.989	0.037	0.975	0.042	0.964	0.048
0.7	0.992	0.027	0.980	0.031	0.971	0.036
0.8	0.995	0.017	0.987	0.021	0.981	0.024
0.9	0.997	0.010	0.993	0.010	0.990	0.012
1.0	1.000	0	1.000	0	1.000	0

線図—2 $\eta/(\eta)_{N=0}$ 対 $\xi/(\xi)_{M=0}$ 曲線 (表—4 参照)



け、無筋コンクリート杭の曲線を縦軸側に移動することによって得られる。この際移動量 d は

$$d = P_e / \sigma_{cu} A_c \div p_p \sigma_{pc} / \sigma_{cu} = p_p 8000 / 500 = 16 p_p \dots (63)$$

また純粋な圧縮破壊に対応する横軸上の座標は $(\xi)_{M=0} = 1 - d$ で与えられる (表—5 参照)。

実際には付着のない場合でも、曲げの進行とともに、PC 鋼材の有効引張力は圧縮断面で減少し、引張断面で増加するため PC 鋼材は全体として曲げに対する抵抗モーメントを出すので、曲げ破壊モーメントは、無筋コ

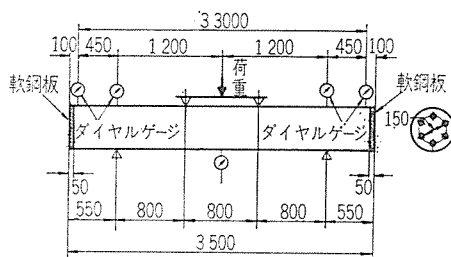
表-5 ポストテンション方式 PC 杭の ξ 対 η 曲線のための修正量 Δ と $(\xi)_{M=0}$

$p_p\%$	Δ	$(\xi)_{M=0}=1-\Delta$
0.6	0.096	0.904
1.2	0.192	0.808
1.8	0.288	0.712

ンクリートのそれよりかなり上まわる。純すい曲げ破壊 ($N=0$) の付近では、 σ_{pe} の代りに $\sigma_{pe}+7.5 \text{ kg/mm}^2$ を用いて計算すると実測値と良く一致する。

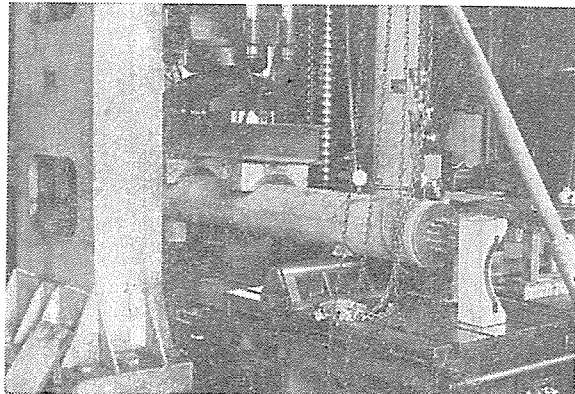
d) 軸方向圧縮荷重下の曲げ破壊試験 前述の計算結果を立証するため、41年4月12, 13の両日300mm径の東急PCモーメント杭について軸方向圧縮荷重下の曲げ破壊試験を行なった(写真-1)。図-4は供試体寸

図-4 供試体とその荷重法



東急PCモーメント杭 $\phi 300 \times 60 \text{ t}$
 $A_c = \text{標準 } 453 \text{ cm}^2$
 PC鋼材ウルボン 8本
 $p_p = 1.12$

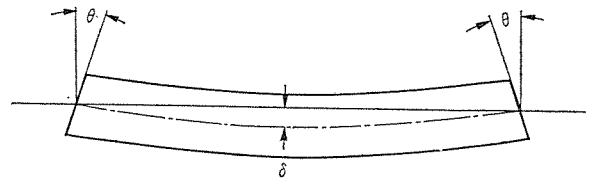
写真-1 試験の状況



法および荷重方法を示すもので、軸荷重は供試杭の両端に接着した厚さ 50 mm の鋼製円板をアンカーとして、杭の中空部を貫通している 8本または 12本のPC鋼棒を緊張することにより、それぞれ 40 tおよび 70 tを与えた。軸荷重 120 tの供試体は緊張作業中にコンクリート端面が補強不完全のために圧潰したので、供試することができなかった。

曲げ破壊はいずれも中央スパンの中央点の圧縮側コンクリートの圧潰によって生じた。直読した測定数値を表-6に示す。

図-5 供試体の破壊時の変形図



供試体は破壊時に図-5のように変形しているの、軸荷重用緊張材は端面傾斜 θ と偏心 δ に基づく曲げモーメントを出すから、真の曲げ破壊モーメントを求めるには、試験機荷重 W による曲げモーメントに対し、つぎのような方法で補正することが必要である。いま

θ : 端面傾斜角ラジアン, δ : 両端面に対する中央点のたわみ cm, L : 供試体の全長=350 cm, l : 支点側スパン=80 cm, A_N : 軸荷重用緊張材の総断面積 (40 t用 507 mm², 70 t用 760 mm²), d_N : 軸荷重用緊張材の配筋直径=15 cm, ΔM_θ : θ に基づく反モーメント t·m, ΔM_δ : δ に基づくモーメント t·m, ΔM : 曲げ破壊モーメントの補正量 t·m, W : 試験機の破壊荷重 t とし, なお他の記号は2の通りとし, また供試体の変形を円弧とみなせば,

$$\theta = 4\delta/L, \Delta M_\theta = d_N^2 A_N E_s \delta / L^2, \Delta M_\delta = N\delta,$$

$$\Delta M = \Delta M_\theta - \Delta M_\delta = \delta(N/100 - A_N/2720) \text{ t}\cdot\text{m} \\ = 0.214\delta \text{ (} N=40 \text{ t の場合),}$$

$$0.420\delta \text{ (} N=70 \text{ t の場合),}$$

$$M_u = Wl/2 + \Delta M = 0.4W + \Delta M \text{ t}\cdot\text{m}$$

ΔM および M_u の計算値を表-6に示す。

供試体の標準値は $p_p = 1.12\%$, $r = 12 \text{ cm}$, $A_c = 453$

表-6 試験成績

41. 4.12, 13 施行

群	製造月日	$W_{N=0} \text{ t}$	$N \text{ t}$	$W_N \text{ t}$	$\delta \text{ cm}$	$0.4W \text{ t}\cdot\text{m}$	$\Delta M \text{ t}\cdot\text{m}$	$M_u \text{ t}\cdot\text{m}$	$M_u / (M_u)_{N=0}$
1	41. 1. 18	17.7				7.08 = $(M_u)_{N=0}$			
	41. 1. 18		70	21.90	0.80	8.76	0.34	9.10	1.285
2	41. 1. 19	20.6							
	41. 1. 20		40	23.55	1.40	9.42	0.30	9.72	平均 9.89
	41. 1. 21		40	24.50	1.15	9.81	0.25	10.06	
	41. 1. 21		70	25.60	1.07	10.23	0.45	10.68	1.293
	41. 1. 22	20.2							
	41. 1. 22	21.2							
	群-2の平均	20.6					8.25 = $(M_u)_{N=0}$		

cm², $\sigma_{cu}=500 \text{ kg/cm}^2$ であるから, 式 (58)'' と (62)' とから標準値として

$$(\xi)_{M=0}=0.92, (\eta)_{N=0}=0.87,$$

$$(M_u)_{N=0}=r \sigma_{cu} A_c / \pi \cdot (\eta)_{N=0} \\ =751 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 7.51 \text{ t} \cdot \text{m}$$

が得られる。

供試体の $\sigma_{cu} A_c$ の真の値は不明であるが, これは前述の諸式から明らかなように $(M_u)_{N=0}$ に比例するゆえ,

$$\sigma_{cu} A_c = 500 \times 453 (M_u)_{N=0} / 7.51 \\ = 0.302 (M_u)_{N=0} \times 10^5 \text{ kg}$$

また

$$\xi_N \equiv N / \sigma_{cu} A_c, \quad \eta_N / (\eta)_{N=0} = M_u / (M_u)_{N=0}$$

上の3式の計算結果を表示すると表-7となる。

表-7

群	N_t	$\sigma_{cu} A_c \text{ } 10^5 \text{ kg}$	ξ_N	$(\xi)_{M=0}$	$\xi_N / (\xi)_{M=0}$	$\eta_N / (\eta)_{N=0}$
1	70	2.13	0.328	0.92	0.357	1.285
2	40	2.49	0.161		0.175	1.200
	70		0.281	0.307	1.293	

表-7の $\eta_N / (\eta)_{N=0}$ 対 $\xi_N / (\xi)_{M=0}$ を線図-2に置点すると, 前述の計算方法が実験結果と比較的によく合うことが了解される。

5. 地震荷重が唯一の水平荷重を与える場合の杭の曲げ破壊安全率

(1) 地震荷重に基づく水平荷重 H と曲げモーメント M_e との関係

杭頭部固定の場合には

$$H = 2 \beta M_e \dots\dots\dots(64)$$

ここに $\beta = (K d_0 / 4 EI)^{1/4} \text{ cm}^{-1}$

簡単のために $K = 0.691 Z^{0.406} \text{ kg/cm}^3$ (福岡・宇部の式) を用いると,

$$\beta = 0.645 Z^{0.1015} (d_0 / EI)^{1/4} \dots\dots\dots(65)$$

$$M_e = H / 2 \beta = 0.775 Z^{-0.1015} (d_0 / EI)^{-1/4} H \dots\dots\dots(66)$$

いま水平方向の最大地震加速度係数を0.2とすれば

$$H = 0.2 N \dots\dots\dots(67)$$

式 (66), (67) より

$$M_e = 0.155 Z^{-0.1015} (d_0 / EI)^{-1/4} N$$

$$\therefore \eta_e = \pi M_e / \sigma_{cu} A_c r = 0.487 Z^{-0.1015} (d_0 / EI)^{-1/4} r^{-1} \xi \dots\dots\dots(68)$$

しかるに直径30~50cmのPC杭では±10%の誤差範囲で $(d_0 / EI)^{-1/4} r^{-1} = 10.5$ とおくことができるから

$$\eta_e = 5.1 Z^{-0.1015} \xi \dots\dots\dots(69)$$

式 (69) は, η_e が近似的に杭径に無関係なることを意味する。これを Z をパラメータとして線図-1に図示した。また η_e の基準を $(\eta)_{N=0}$, ξ の基準を $(\xi)_{M=0}$ に

とると,

$$\eta_e / (\eta)_{N=0} = 5.1 Z^{-0.1015} \xi / (\xi)_{M=0} \cdot (\xi)_{M=0} / (\eta)_{N=0} \dots\dots(70)$$

式 (70) を Z をパラメータとし, $p_p = 1.2\%$ について計算し, これを線図-2に図示した。

(2) 地震荷重に対する杭の曲げ破壊安全率の計算法

杭頭水平面よりの高さ h に重心を有する重量 ΣR の構造物が水平加振力 $\Sigma H = 0.2 \Sigma R$, 垂直加振力 $\Sigma V = 0.1 \Sigma R$ の地震に遭遇した場合を考える (図-6 参照)。ここに R は1本の杭の常時支持力とする。構造物基礎最外端の杭に与えられる極端な荷重条件は

$$\left. \begin{aligned} \text{水平荷重 } H &= 0.2 R \\ \text{垂直荷重 } N_{ea} &= 0.9 R - v, \text{ または } N_{eb} = 1.1 R + v \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(71)$$

ここに v は建物の基礎面に働らく転倒モーメント $h \Sigma H = 0.2 h \Sigma R$ に基づく最外端の杭に作用する垂直荷重である。 $\xi_{ea} = N_{ea} / \sigma_{cu} A_c$ および $\xi_{eb} = N_{eb} / \sigma_{cu} A_c$ を計算し, これらに対応する η_{ea} or $\eta_{eb} = \pi M_u / \sigma_{cu} A_c r$ を線図-1から, あるいは $\xi_{ea} / (\xi)_{M=0} = N_{ea} / (N)_{M=0}$ および $\xi_{eb} / (\xi)_{M=0} = N_{eb} / (\xi)_{M=0}$ を計算し, これらに対応する $M_u / (M_u)_{N=0} = \eta_{ea} / (\eta)_{N=0}$ or $\eta_{eb} / (\eta)_{N=0}$ を線図-2から読みとる。つぎに常時支持力 R に対し $\xi_R = R / \sigma_{cu} A_c$ または $R / (N)_{M=0} = \xi_R / (\xi)_{M=0}$ を計算し, これらに対応する地震荷重曲げモーメントの $\eta_e = \pi M_e / \sigma_{cu} A_c r$ または

図-6 構造物の杭基礎

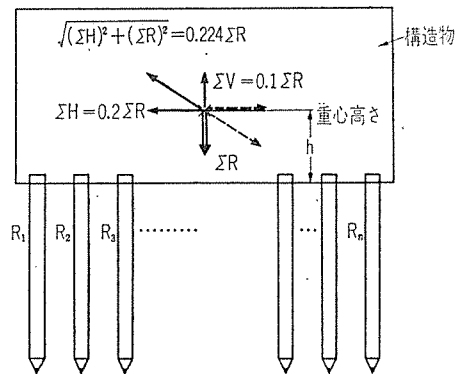
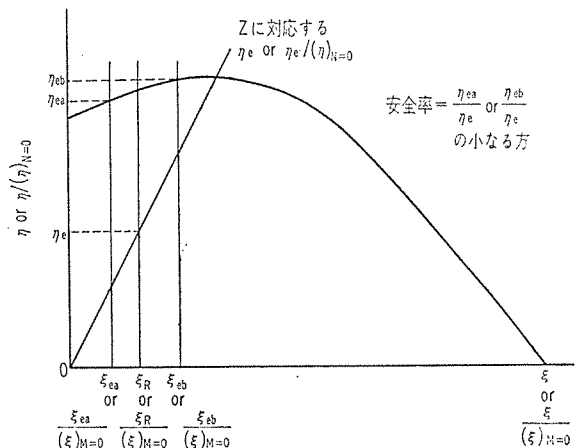


図-7 地震荷重時の曲げ破壊の安全率の求め方



$M_e/(M_u)_{N=0}=\eta_e/(\eta)_{N=0}$ をそれぞれ 線図-1 または 線図-2 から読みとる。両者の比 $M_u/M_e=\eta_{ea}/\eta_e$ または η_{eb}/η_e のいずれか小なる値が曲げ破壊安全率で、これは土木学会 PC 設計施工指針によると 1.3 以上なることを要する。図-7 は 線図-1, 2 の使用法を解説したものである。

支持地盤が十分強固な場合、PC 杭の常時許容支持力は一般に $R=110 A_c \approx 110 A_c \text{ kg} (A_c : \text{cm}^2)$ 、したがって $\xi_R=R/500 A_c=0.22$ 、また東京都では $R=110 A_c \times 0.8 \approx 88 A_c \text{ kg}$ 、したがって $\xi_R=0.176$ となる。

6. PC 鋼材の有効引張力の推算

PC 杭において、応力導入後のある時点における PC 鋼材の有効引張力を正確に推定することはきわめて必要であるにもかかわらず、通常の PC と異なり遠心铸造、蒸気養生および水養生を順次に行なった PC 杭用コンクリートのクリープおよび乾燥収縮に関する実験研究が皆無のため、現状ではきわめて困難である。以下に述べるのは筆者のところで使用している計算式と定数であってまだ実験的に確認されていない。

$$\sigma_{pt}/\sigma_{pi}=P_i/P_i=(1-\xi_1\theta)\{1+(n-1)p_s - p_p\}/\{1+(n-1)(p_p+p_s)\} \dots\dots\dots(72)$$

$$\sigma_{pe}/\sigma_{pi}=P_e/P_i \approx 1 - qp_p/\{1+(n-1)(p_p+p_s)\} = [1 - \xi_2 n \psi p_p / \{1+(n-1) \cdot (p_p+p_s)\}] / [1 + \xi_2 E_s \varepsilon_d / \sigma_{pe} \cdot \{1 - p_p + (n-1)p_s\} / \{1+(n-1)(p_p+p_s)\}] \dots\dots\dots(73)$$

$$q \approx \xi_2 (n \psi + A_s E_s / P_i \cdot \varepsilon_d) = \xi_2 (n \psi + E_s \varepsilon_d / \sigma_{cpi}) = \xi_2 [n \psi + E_s \varepsilon_d / \sigma_{cpi} \cdot \{1+(n-1)p_s - p_p\} / p_p] \dots\dots\dots(74)$$

$$\psi = k \psi_0 \left. \begin{aligned} k &= 1.00 + 5(0.75 - \sigma/\sigma_{\infty}) \leq 1.00 \\ \sigma_{\infty} &= 1.15 \sigma_{28} \text{ (普通ポルトランドセメントの場合)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(75)$$

ここに ψ_0 : クリープ係数 (屋外 2.0, 地中 1.0), ε_d : コンクリートの乾燥収縮度 (屋外: プレテン 20×10^{-5} ポステン 15×10^{-5} , 地中: プレテン 10×10^{-5} ポステン 7.5×10^{-5}), ξ_1 : 応力

導入時における PC 鋼材レラクセーションの進行度, ξ_2 : コンクリートのクリープと乾燥収縮の進行度 (材令 1 月: 1/5, 3 月: 1/3, 6 月: 1/2, 1 年: 1), k : クリープ係数の割増係数, θ : レラクセーション (PC 鋼棒: 0.03, PC 鋼線: 0.05), σ : 応力導入時の製品コンクリートの強度, σ_{28} : 材令 28 日の製品コンクリートの強度, 他の記号: 2 記載のとおり。

$\theta, \psi_0, \varepsilon_d, \xi_2$ は土木学会 PC 設計施工指針による。ただし ψ_0, ε_d は空中放置の場合は“屋外の場合”を使用するが、地中に打込み後は前記値の 1/2 を用いる。 ξ_1 は PC 鋼材を緊張後応力導入に至るまでの経過時間が 24 時間を超過する場合は 1 とする。

式 (72) の n は応力導入時の値 ($\sigma=350 \text{ kg/cm}^2$ の場合 $n=2000000/325000=6.15$) を用いるべきであるが、安定時の値 ($n=5$) を用いて計算しても結果に大差はない。

4, (4), a) の仕様に基いて式 (72)~(75) を計算すると 表-8 が得られる。ただし $\xi_1=\xi_2=1$ とする。

表-8

$p_p \%$	0.6		1.2		1.8	
$\sigma_{pt}/\sigma_{pi} \%$	93		90		87	
$\sigma_{pe}/\sigma_{pi} \%$	93	86	88	77	84	69
$\sigma_{pe}/\sigma_{pi} \%$	87	80	80	69	73	60
	地中	空中	地中	空中	地中	空中

有力な PC 杭製造会社である日本ヒューム管 KK が、 $p_p=1.2\%$ 相当の PC 杭供試品を空气中に放置し、現在までに約 2 ヶ年間経過したが、その間カールソングージによって直接 PC 鋼材の引張力を定期的に測定し続けたところ、それは約 3 ヶ月以内で安定し、応力導入前 $P_i=6 \text{ t}$ であったものが $P_e=5 \text{ t}$ ($P_e/P_i=0.833$) に落ち着いているよしである。したがって、この場合は 表-8 の地中の値がもっとも実際に近いように思われる。

1966.5.4・受付