PC くい断面の力学的諸性質について*

六 車 熙**

Mechanical Properties of the Prestressed Concrete Pile Section

by

Hiroshi MUGURUMA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

1 ま え が き

建築構造物に使用する基礎ぐいは、主として上部構造の荷重による圧縮力を支持する中心軸圧ぐいとして設計される。土木構造物では曲げモーメントにも抵抗するいわゆるモーメントぐいとして設計されることが多い。しかし、実際には中心軸圧ぐいであっても、くい打込み時の偏心打撃、くい運搬時または建込作業中、継ぐいの折れ曲り、地震時の地盤の動きおよび上部構造の振動などによって生ずる曲げモーメントを同時に受けることは明らかであり、これらの曲げモーメントに対して安全であることが必要である。また、地震時上部構造のロッキングによる引拔力、地盤沈下に伴う負の摩擦力による付加軸圧力など、種々の応力を受ける。これらの作用応力は充分解明されてはいないが、少なくとも中心軸圧ぐいであっても曲げモーメントに対するかなりの抵抗は必要である。従来から慣用の遠心力鉄筋コンクリートくい（以下RCくいと略記）は曲げに対する充分な抵抗は期待できず、運搬時、打込み時などにひびわれ発生や局部的破壊などの事故も少なくなかった。また、継ぐいの場合には、継手耐力が本体に比べて低いことも多く、くいの一体化の点で疑問を残している。したがって、長尺ぐいの場合または曲げモーメントの作用大なる場合には、主として鋼ぐい¹⁾が使用されてきたが、腐食、経済性などの点で問題を残している。プレストレストコンクリートくい（以下PCくいと略記）は断面にプレストレスを導入することによって曲げに対する抵抗力を増大し、RCくいの欠点を取り除いたものであり、軸力はもちろん曲げに対しても抵抗性が大きい点が認められ、近年急速に普及発展しつつある。しかしながら、その普及があまりにも急速であったため、PCくいそのものの力学的特

質が十分に理解されておらず、設計にあたってはRCくいの設計規準または仕方書に準じて行なわれる場合が多い。その結果、PCくいとしての力学的特質を充分発揮できない不当な取り扱いをされる面も多くあるようである。本稿では力学的特質の中で最も重要であり、かつ「最も基本的である断面の力学的性質（特に、耐力）について論じたものであり、破壊の interaction curve の画き方とその性質、くいの折れ曲りと許容支持力、プレストレスの大小と許容支持力、現行の許容支持力決定法の問題点などについて述べる。

2 PC くい断面耐力 Interaction Curve 上の重要ポイント

わが国の PC くい²⁾³⁾は遠心力締固めによって製造される中空円筒断面のものがほとんどである。中空円筒断面の力学は、土木建築技術者にとって案外なじみが少なく、その上に PC くいでは PC 鋼材がコンクリート断面に一樣分散配置されて一樣プレストレスが導入される点で通常の PC 部材と異なるため、経験的に断面耐力の特質を知りたい。また、曲げと軸圧を同時に受けるから、その耐力を精算することはきわめてめんどうである⁴⁾⁵⁾。略算式も 2, 3 発表されているが、ここではまずひびわれおよび破壊耐力 interaction curve（以下略号 IC を用いる）を画くのに必要な予備知識としての IC 上の重要ポイントについて簡単に述べる。

IC を画く場合、まず考えなければならないのは中心軸圧耐力、純曲げ破壊耐力、純曲げひびわれ耐力、曲げひびわれが発生せずに破壊に至る限界の耐力といった特定の耐力である。これらの IC 上の特定の耐力を示す点のことをここでは重要ポイントと呼ぶことにする。PC くい断面についてこれを示すと Fig. 1 のようになる。図中の A～G の重要ポイントは次のとおりである。

A 点：中心圧縮耐力

* 原稿受理 昭和42年5月17日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

Fig. 1. Critical points on the interaction curves of prestressed concrete pile.

- B点：曲げひびわれが発生することなく破壊に至る限界
- C点：引張側最外端 PC 鋼材が降伏することなく破壊に至る限界
- D点：純曲げ破壊耐力
- E点：中心引張耐力
- F点：圧縮側コンクリートが塑性域にはいることなく曲げひびわれを発生する限界
- G点：純曲げひびわれ耐力

上記の説明で明らかなように、重要ポイントとはたとえば PC 鋼材が降伏するか否か、曲げひびわれが発生しているか否かといった断面耐力時の断面性状が一つの状態から他の状態に移り変わる変移点であって、耐力計算式の表示が重要ポイントを限界として異なることになる。すなわち、耐力計算式を考える場合、Fig. 1 の AB 間、BC 間、CD 間などの各重要ポイント間に対し、それぞれ独立に計算式を求めなければならない。なお、Fig. 1 の DE 間および GE 間ではそれぞれコンクリート断面応力がすべて引張応力となる限界に対する重要ポイントが省略されているが、これらの区間における IC はほとんど直線とみなしてもよいこと、および軸力が引張りとなる区間はさして重要でないことと理由で、ここでは取り上げないことにする。

3 破壊耐力 IC 略算式

前項で述べた重要ポイントに着目して破壊耐力 IC を計算できる。ここでは筆者の略算式を示しておく。式の誘導は紙数の都合で省略し、計算のもとになる仮定、断面のひずみおよび応力分布を必要に応じて示すにとどめた。なお、PC 鋼材はこれと同断面面積の鋼管に置き換える。このような置き換えを行っても計算値にはほとんど差はない。

3・1 中心圧縮耐力 (A 点)

$$N_u = (F_c - \sigma_p)A_o + (\epsilon_{cu}' - \frac{\sigma_p}{E_c})E_s A_s \quad (1)$$

N_u ：破壊軸力， F_c ：コンクリート圧縮強度， σ_p ：コンクリート断面有効プレストレス， A_o ：コンクリート断面積， ϵ_{cu}' ：中心軸圧を受けて圧壊するときのコンクリート圧縮ひずみ（通常は0.15%と仮定）， E_c ：コンクリート弾性係数， E_s ：PC鋼材弾性係数， A_s ：PC鋼材断面面積

3・2 曲げひびわれが発生することなく破壊に至る限界の耐力 (B 点)

曲げひびわれ発生時のコンクリート引張縁ひずみを

$$\epsilon_{ct} = 1.5F_t/E_c$$

F_t ：コンクリート引張強度

と仮定すれば、この場合の断面ひずみおよび応力分布はFig. 2 のようになる。ただし、引張側および圧縮側

Fig. 2. Stress and strain distributions of section at the critical point B (where the flexural failure takes place as soon as initial cracking).

コンクリート応力分布はそれぞれ強度 F_t および F_c の長方形分布と仮定する。破壊時軸力 N_u および曲げモーメント M_u はFig. 2 を参照して次のようになる。

$$N_u = F_c \frac{A_c}{\pi} \theta_n - F_t \frac{A_c}{\pi} (\pi - \theta_n) - A_s (\sigma_s + n\sigma_p + \frac{1.5nF_t - \epsilon_{cu}E_s}{2}) \quad (2)$$

$$M_u = (F_c + F_t) \frac{A_c}{\pi} R_c \sin \theta_n + \frac{A_s}{4} \cdot \frac{R_s^2}{R} (\epsilon_{cu}E_s + 1.5nF_t) \quad (3)$$

$$\cos \theta_n = \frac{R}{R_s} \cdot \frac{1.5nF_t - \epsilon_{cu}E_s}{1.5nF_t + \epsilon_{cu}E_s} \quad (4)$$

n ：弾性係数比， ϵ_{cu} ：曲げ破壊時コンクリート圧縮縁最大ひずみ（通常は0.3%と仮定）， σ_s ：PC鋼材有効引張応力， R ：くい半径（ $=D/2$ ， D は外径）， R_c ：コンクリート断面平均径， R_s ：PC鋼材配置位置半径， θ_n ：中立軸位置における半開角（中立軸と半径 R_s の円との交点に対して求める。 $R_s \neq R_c$ の場合は半径 R_c の円の交点に対する半開角とは一致しないが、 R_c に対しても近似的に同じ θ_n の値をとる）。

3・3 曲げひびわれが発生することなく破壊に至る範囲 (A～B 間)

A 点および B 点を直線で結べば充分である。

3・4 PC 鋼材が降伏することなく破壊に至る範囲 (B～C 間)

Fig. 3. Stress and strain distributions of section in the range BC (where the failure occurs before yielding of prestressing steel).

Fig. 3 を参照して次のようになる。

$$N_u = F_c \frac{A_c}{\pi} \theta_n - (\sigma_s + n\sigma_e) + \frac{R_s/R \cdot \cos \theta_n}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_n} \epsilon_{cu} E_s A_s \quad (5)$$

$$M_u = F_c \frac{A_c}{\pi} R_c \sin \theta_n + A_s R_s \frac{R_s/R}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_n} \epsilon_{cu} E_s \quad (6)$$

中立軸位置における半開角 \$\theta_n\$ は B 点の値(4)式と C 点の値(7)式の範囲内で適当に選ぶ。

3・5 PC 鋼材が降伏と同時に破壊に至る場合 (C点)

PC 鋼材応力ひずみ曲線を Fig. 4 の点線のように仮

Fig. 4. Assumption of stress-strain curve of prestressing steel.

定し、降伏点として Y 点 (0.2% 残留伸び応力) の代わりに Y' 点をとることにすれば、この場合の断面応力分布は Fig. 3 において PC 鋼材下縁応力が降伏点応力 \$F_y\$ に等しいとしたときになる。したがって、耐力計算式は(5)および(6)式がそのまま使用できる。ただし、中立軸位置での半開角 \$\theta_n\$ は次式となる。

$$\cos \theta_n = \frac{R}{R_s} \cdot \frac{F_y - \sigma_s - n\sigma_p - \epsilon_{cu} E_s R_s/R}{F_y - \sigma_s - n\sigma_p + \epsilon_{cu} E_s} \quad (7)$$

3・6 PC 鋼材降伏後破壊に至る範囲 (C~D 間)

耐力は Fig. 5 を参照して次のようになる。

$$N_u = F_c \frac{A_c}{\pi} \theta_n - F_y A_s + \frac{A_s}{\pi} (F_y - n\sigma_p - \sigma_s + \epsilon_{cu} E_s) \times \frac{R_s/R \cdot (\sin \theta_y - \theta_y \cos \theta_y)}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_y} \quad (8)$$

$$M_u = F_c \frac{A_c}{\pi} R_c \sin \theta_n + \frac{A_s}{\pi} (F_y - n\sigma_p - \sigma_s + \epsilon_{cu} E_s)$$

Fig. 5. Stress and strain distributions of section in the range CD (where the flexural failure takes place after yielding of prestressing steel).

$$\times \frac{R_s^2/R}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_y} \left(\frac{\theta_y}{2} - \frac{\sin 2\theta_y}{4} \right) \quad (9)$$

ここに、\$\theta_y\$ は断面における PC 鋼材降伏限界位置での半開角であって、

$$\cos \theta_y = \cos \theta_n - \frac{R}{R_s} \left(1 - \frac{R_s}{R} \cos \theta_n \right) \frac{F_y - \sigma_s - n\sigma_p}{\epsilon_{cu} E_s} \quad (10)$$

また、\$\theta_n\$ は C 点の値(7)式と D 点の値の範囲内で適当に選ぶ。

3・7 純曲げ破壊モーメント (D 点)

前項において \$N_u=0\$ になる場合である。すなわち、中立軸位置での半開角 \$\theta_n\$ は(8)式を 0 とおいて、

$$F_c \frac{A_c}{\pi} \theta_n - F_y A_s + \frac{A_s}{\pi} (F_y - n\sigma_p + \epsilon_{cu} E_s) \times \frac{R_s/R \cdot (\sin \theta_y - \theta_y \cos \theta_y)}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_y} = 0 \quad (11)$$

から求める。上式から \$\theta_n\$ を求める計算はたいへんめんどうであるので、\$N_u=0\$ となるような \$\theta_n\$ を任意に仮定し、これに対する破壊耐力 \$N_u\$ および \$M_u\$ をそれぞれ(8)および(9)式から求め、この点を Fig. 1 における d 点とすれば、次項で求める純引張耐力 E 点と d 点とを直線で結び、横軸との交点を純曲げ破壊耐力 D 点とすれば充分である。なお、図式計算によって D 点の厳密解を求める方法もある。

3・8 純引張耐力 (E 点)

$$N_u = (F_t + \sigma_p) A_c + n(\sigma_p + 1.5F_t) A_s \quad (12)$$

3・9 軸力が引張りとなる範囲 (D~E 間)

D 点 (または d 点) と E 点とを直線で結べば充分である。

4 ひびわれ耐力 IC 略算式

前記と同様にひびわれ耐力 IC を画くための略算式を列記すれば次のようになる。

4・1 圧縮側コンクリートが塑性域にはいつて後に曲げひびわれを発生する範囲 (B~F 間)

圧縮側コンクリートの応力ひずみ曲線を Fig. 6 の点線のように仮定すれば、ひびわれ発生時の断面ひずみおよび応力分布は Fig. 7 のようになる。これよりひびわれ発生時の軸力 \$N_e\$ および曲げモーメント \$M_e\$ は以

Fig. 6. Assumption of compressive stress-strain relation of concrete.

Fig. 7. Stress and strain distributions of section in the range BF (where the initial crack takes place after the concrete strain in compression zone has entered into plastic range).

Fig. 8. Stress and strain distributions of section at the critical point F (where the initial crack occurs as soon as the concrete strain in compression zone enters into plastic range).

下のようになる。

$$N_c = F_c \frac{A_c}{\pi} \theta_n - F_t \frac{A_s}{\pi} (\pi - \theta_n) + A_s (\sigma_s + n\sigma_p + 1.5nF_t \frac{R_s/R \cdot \cos \theta_n}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_n}) - F_c \frac{A_c}{\pi} \cdot \frac{R_c/R \cdot (\sin \theta_n - \sin \theta'_y) - R_s/R \cdot (\theta_n - \theta'_y) \cos \theta_n}{R_c/R \cdot \cos \theta'_y - R_s/R \cdot \cos \theta_n} \quad (13)$$

$$M_c = (F_c + F_t) \frac{A_c}{\pi} R_c \sin \theta_n + \frac{A_s}{2} \cdot \frac{R_s^2}{R} \cdot \frac{1.5nF_t}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n} - F_c \frac{A_c}{\pi} R_c \cdot \frac{\frac{R_c}{R} \left(\frac{\theta_n - \theta'_y}{2} + \frac{\sin 2\theta_n - \sin 2\theta'_y}{4} \right) - \frac{R_s}{R} \cos \theta_n (\sin \theta_n - \sin \theta'_y)}{R_c/R \cdot \cos \theta'_y - R_s/R \cdot \cos \theta_n} \quad (14)$$

ここに、 θ'_y は圧縮側コンクリートが塑性域にはいる位置での半開角であって、

$$\cos \theta'_y = \frac{R}{R_c} \cdot \frac{F_c (1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n) + 1.5F_t R_s/R \cdot \cos \theta_n}{1.5F_t} \quad (15)$$

である。 θ_n はB点の値(4)式とF点の値(19)式との範囲で任意に選ぶ。

昭和42年 8月

4・2 圧縮側コンクリートが塑性域にはいることなく曲げひびわれを発生する限界(F点)

Fig. 8 に断面のひずみおよび応力分布を示す。計算式は以下になる。

$$N_c = F_c \frac{A_c}{\pi} \cdot \frac{R_c/R \cdot \sin \theta_n - R_s/R \cdot \theta_n \cdot \cos \theta_n}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_n} - F_t \frac{A_s}{\pi} (\pi - \theta_n) - \left\{ n\sigma_p + \sigma_s + \frac{n(1.5F_t - F_c)}{2} \right\} A_s \quad (16)$$

$$M_c = F_c \frac{A_c}{\pi} \cdot \frac{R_c}{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_n} \left\{ \frac{R_c}{R} \left(\frac{\theta_n}{2} + \frac{\sin 2\theta_n}{4} \right) - \frac{R_s \sin 2\theta_n}{R} \right\} + F_t \frac{A_s}{\pi} R_c \sin \theta_n + \frac{A_s}{4} \cdot \frac{R_s^2}{R} n(1.5F_t + F_c) \quad (17)$$

$$\cos \theta_n = \frac{R}{R_s} \cdot \frac{1.5F_t - F_c}{1.5F_t + F_c} \quad (18)$$

4・3 圧縮側コンクリートが塑性域にはいることなく曲げひびわれを発生する範囲(F~G間)

Fig. 8 で圧縮側コンクリート縁応力 F_c の代わりに

$$\sigma_c = 1.5F_t \frac{1 - R_s/R \cdot \cos \theta_n}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n} (\leq F_c) \quad (19)$$

を用いればよい。すなわち、

$$N_c = 1.5F_t \frac{A_c}{\pi} \cdot \frac{R_c/R \cdot \sin \theta_n - R_s/R \cdot \theta_n \cdot \cos \theta_n}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n} - F_t \frac{A_s}{\pi} (\pi - \theta_n) - (n\sigma_p + \sigma_s + 1.5nF_t \frac{R_s/R \cdot \cos \theta_n}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n}) A_s \quad (20)$$

$$M_c = 1.5F_t \frac{A_c}{\pi} \cdot \frac{R_c}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n} \left\{ \frac{R_c}{R} \left(\frac{\theta_n}{2} + \frac{\sin 2\theta_n}{4} \right) - \frac{R_s}{R} \cdot \frac{\sin 2\theta_n}{2} \right\} + F_t \frac{A_s}{\pi} R_c \sin \theta_n + 1.5nF_t \frac{A_s}{2} \cdot \frac{R_s/R}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n} \cdot R_s \quad (21)$$

θ_n はF点の値(19)式とG点の値の範囲内で選ぶ。

4・4 純曲げひびわれモーメント(G点)

(20)式で $N_c = 0$ であるから、

$$1.5F_t \frac{A_c}{\pi} \times \frac{R_c/R \cdot \sin \theta_n - R_s/R \cdot \theta_n \cdot \cos \theta_n}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n} - F_t \frac{A_s}{\pi} (\pi - \theta_n) - (n\sigma_p + \sigma_s + 1.5F_t \frac{R_s/R \cdot \cos \theta_n}{1 + R_s/R \cdot \cos \theta_n}) A_s = 0 \quad (22)$$

から中立軸位置での半開角 θ_n が求められる。曲げひびわれモーメントは(21)式から計算される。近似的には

3・7項で述べたのと同様に $N_c = 0$ となるような θ_n を

適当に選び、これに対する N_e および M_e を(20)および(21)式からそれぞれ計算し、この点を Fig. 1 における g 点とすれば、純引張耐力 E 点と g 点とを直線で結び、横軸との交点を純曲げびびわれ耐力 G 点とすれば充分である。

4・5 軸力が引張りとなる範囲(E~G間)

G 点(または g 点)と E 点とを直線で結ぶ。

5 IC 計算例とより簡単な IC の画き方

以上に略述した PC くい耐力略算式を用いて計算した IC 例を Fig. 9 に示す。計算に用いた数値は下記のとおりである。

$$F_c = 500 \text{ kg/cm}^2, F_t = 50 \text{ kg/cm}^2, E_c = 400\,000 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\varepsilon_{cu}' = 0.15\%, \varepsilon_{cu} = 0.3\%, n = 5$$

$$F_y = 130 \text{ kg/mm}^2 (\text{JIS 案 2 種異形鋼棒})$$

$$\sigma_s = 0.7F_y = 91 \text{ kg/mm}^2, E_s = 2\,000\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_p = 40, 80, 120 \text{ kg/cm}^2 \text{ の 3 種}$$

$$R_c = R_s = 0.84R \text{ (外径 500mm, 肉厚 80mm, 肉厚の中心に PC 鋼材を配置した PC くい)}$$

有効プレストレス σ_p を上記の 3 種としたのは、それぞれ、支持ぐい、モーメントぐい、特殊モーメントぐいに対応する代表値として採用したものであり、有効プレストレスの大きさによって IC がいかに変化するかをみるためである。図から明らかなように、有効プレストレスが大きくなると中心圧縮耐力は小さくなるが、純曲げびびわれ耐力および純曲げ破壊耐力は増大することはいうまでもない。モーメントぐいという呼称の由来はここにある。

Fig. 9. Example of interaction curves for various effective prestress σ_p .

なお、前項までに述べた略算式で IC は比較的簡単かつ正確に画くことができるが、数値計算にやや時間がかかる。たとえば、(8)および(9)式から推定できるよ

Fig. 10. Approximation of interaction curve by sine curve (pile of $\sigma_p = 80 \text{ kg/cm}^2$).

うに、破壊時軸力 N_u は θ_n に、曲げモーメント M_u は $\sin \theta_n$ にほぼ比例する⁵⁾。すなわち、IC は近似的には sine curve としてもよいと考えられる。このことは Fig. 9 から推測される。Fig. 10 は Fig. 9 における $\sigma_p = 80 \text{ kg/cm}^2$ の場合を例にとつて sine curve の近似を行なったものである。sine curve の画き方は破壊 IC を例にとれば、まず IC の最大 M_u の点 H を求め、EH 間および HA 間をそれぞれ Eh および hA の長さを $\pi/2$ とする sine curve で結べばよい。H 点は前述の略算式から求めるが、C 点の近傍に H 点がかかることから、(7)式で C 点に対応する θ_n を求め、これの前後の θ_n に対する N_u および M_u を 3・4 項および 3・6 項の計算式を用いて計算し、C 点付近の IC を画いてこれより H 点を求めるのが便利である。

6 支持ぐい許容支持力決定現行法

くいの許容支持力は地盤の性状、および、断面の力学性質特に中心軸圧耐力をもとにして決定される。すなわち、地盤の性状から決められる許容支持力と、くい中心軸圧耐力を安全率で割って求められる許容支持力とを比較して、小さいほうの値をとる。本報は後者について論ずるのが目的であるが、PC くいについては現在のところ断面の力学性状から許容支持力を決める一般的な方法は確立されておらず、もっぱら RC くいのそれを準用しているにすぎない。日本建築学会建築基礎構造設計規準によると、遠心力 RC くいではコンクリートの許容圧縮応力度を圧縮強度 F_c の $1/4$ 以下、かつ、 80 kg/cm^2 以下と規定している。従来はこの規定が PC くいにもそのまま適用され、 $F_c = 500 \text{ kg/cm}^2$ であるにもかかわらず、ほとんどが 80 kg/cm^2 以下の制限に押さえられており、その結果、PC くい本来の特性を発揮するまでには至っていない。最近では PC くいのすぐれた力学的特質が認められ、許容値の上限を

Table I. Allowable stress and axial compressive strength of prestressed concrete piles having various effective prestress ($F_c=500 \text{ kg/cm}^2$, $n=5$, $F_y=9100 \text{ kg/cm}^2$).

Effective prestress $\sigma_p \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$(F_c - \sigma_p)/4$ $\text{(kg/cm}^2\text{)}$	N_u/A_c from Eq.(25) $\text{(kg/cm}^2\text{)}$	Axial comp. strength N_u/A_c from Eq. (1) $\text{(kg/cm}^2\text{)}$	N_u/N_a -ratio
40	115(100)	122.5 (100)	472.3 (100)	3.86
80	105(91.3)	109.6 (89.5)	442.8 (93.8)	4.04
120	95(82.6)	101.2 (82.6)	411.5 (87.2)	4.07

* Values in double bracket are the ratio of value for each effective prestress to that for $\sigma_p=40 \text{ kg/cm}^2$

110 kg/cm^2 (RC くい 1.37 倍) まで上げようとする動きもあり、東京都、大阪府などではすでにこれを採用している。このような上限値の採用の理由は、RC くいに対する $F_c/4$ の制限は PC くいにも適用するものとし、

$$f_c = (F_c - \sigma_p)/4 \quad (23)$$

f_c : PC くいコンクリート許容圧縮応力度(σ_p はこの中に含まない)

を許容支持力として $F_c=500 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_p=50 \text{ kg/cm}^2$ を代入して、

$$f_c = (500 - 50)/4 = 112.5 \text{ kg/cm}^2 \quad (24)$$

となることによる。

しかしながら、(23)式の考え方を有効プレストレス σ_p の大きいものに対してまでも適用すると、 σ_p が大きいほど f_c が小さくなるをえなくなり、許容支持力で損をすることになる。すなわち、プレストレスは単に運搬時や打込み時の衝撃によるひびわれを防止できる必要最小限の大きさを導入すればよいという考え方を示しているにすぎない。また、Fig. 9からもわかるように、 σ_p が大きいほど中心圧縮耐力は低下するが、このような事実から考えても(23)式は妥当な考え方であるとする向きが多い。参考のために種々の σ_p に対する(23)式による f_c およびこれに有効断面積を乗じた許容支持力、

$$N_a = f_c(A_c + nA_s) = f_c A_c (1 + n \frac{\sigma_p}{\sigma_s}) \quad (25)$$

($\because A_c \sigma_p = A_s \sigma_s$)

および中心圧縮耐力 N_u (Fig. 9)をTable I に示しておく。なお、Table I には安全率 N_u/N_a が併記されているが、 σ_p の大きさにはそれほど左右されるものではなく、(23)式によっても中心圧縮耐力 N_u をもとにして許容支持力を決めても、一つの σ_p に対してはそれほどかわるものではないことがわかる。

7 くの折れ曲りと許容支持力

前項で述べた現行の許容支持力決定法はくいが真直の場合には一応妥当と考えられるが、実際のくいには地中に打込み後も地震力などによる曲げモーメントの作用があるし、また、継ぐいでは折れ曲りを考慮すると、中心軸圧を受ける場合の性状だけをもとにしたのでは必ずしも合理的な許容支持力を決定することには

ならない。すなわち、Fig. 11に示す継ぐいが図のように折れ曲っているとき、簡単のために地盤の影響は無視し、かつ、折れ曲り点の折れ曲り角度は軸圧 N が作用しても変化しないとすれば、折れ曲り点の曲げモーメント M は次のようになる。

$$M = l\varphi N/4 \quad (26)$$

l : 継ぐい全長, φ : 折れ曲り角度

(26)式は細長比 l/D (D はくい径) を考慮して

$$M/D = l\varphi N/4D \quad (27)$$

となり、細長比 l/D の値に応じてFig. 11 に示すICと

Fig. 11. Effects of knee bent of prestressed concrete pile upon the ultimate and the initial cracking strengths.

の交点が変わってくる。すなわち、許容支持力 N_a がくい折れ曲りに無関係に決められるとき(すなわち、くいに作用する曲げモーメント M を無視して決められるときには、折れ曲り角度が一定であっても細長比 l/D に応じてICとの交点が変わることから安全率は一定とならず、細長比 l/D が大きいほど N_a の破壊に対する安全率が小となる。最近、くいの許容支持力低減を必要とする細長比限界値を、PC くいに対してはRC くいの値 $l/D \leq 60$ をあげて $l/D \leq 100$ 程度にしようとする動きがあるが、この場合、許容支持力 N_a と l/D 限界値をまったく別個の考え方で決めるのではなく、折れ曲り角度 φ および細長比 l/D と破壊耐力 N_u , M_u との相対関係を用い、破壊耐力に安全率を考慮する方法で N_a および l/D を有機的に決めるべきと考え、同様な意味でひびわれ耐力に対するICも同時に考え、与えられた φ および l/D に対してひびわれに対す

Table II. Allowable stresses determined from interaction curves considering the length-pile diameter ratio ($F_c=500\text{kg/cm}^2$, $n=5$, $F_y=9\,100\text{kg/cm}^2$, $R_c=R_s=0.84R$).

Eff. prestress σ_p (kg/cm ²)	Length-pile dia. ratio l/D	Ultimate strength (kg/cm ²)		Initial cracking load (kg/cm ²)		Allowable stress deter- mined from ult. strength* (kg/cm ²)		Allowable stress determined from initial cracking load* (kg/cm ²)	
		N_u/A_c	$M_u/A_c R_s$	N_c/A_c	$M_c/A_c R_s$	N_a/A_c	$M_a/A_c R_s$	N_a/A_c	$M_a/A_c R_s$
40	80	284	156	255	140	142	78	196	108
	100	243	166	190	129	122	83	146	99
	120	198	166	115	97	99	83	58	75
80	80	276	152	259	143	138	76	199	110
	100	243	166	208	142	122	83	160	109
	120	208	176	161	134	104	88	124	103
120	80	264	145	256	141	132	73	197	109
	100	237	162	216	148	119	81	166	114
	120	207	174	175	147	104	87	135	113

* Allowable stresses are calculated from Eqs. (28) and (29), where the safety factors given by Eqs. (31) are used

る安全度もある程度確保できるよう考慮するのが合理的である。すなわち、 ϕ 式と破壊またはひびわれ耐力 IC との交点の座標をそれぞれ (N_u , M_u), (N_c , M_c) とすれば、許容軸圧力は、

$$N_a \leq N_u/S_u, N_a \leq N_c/S_c \quad (28)$$

S_u : 破壊安全率, S_c : ひびわれ安全率

の小さいほうの値をとる。同様に許容曲げモーメント M_a についても、

$$M_a \leq M_u/S_u, M_a \leq M_c/S_c \quad (29)$$

の小さいほうの値をとる。もちろん、上記の値をそのまま採用するというのではなく、たとえば、打撃時応力なども同時に勘案して妥当な許容支持力を決めるべきであるが、PC くいでは継ぐいの場合の折れ曲りを認めるかぎりにおいては、中心軸圧だけを考える ϕ 式の考え方は無意味に近いといわざるをえない。

このようにくいの折れ曲りを考慮して許容支持力または許容曲げモーメントを決める場合、有効プレストレスの大きさがいかにその許容値に影響するかを、5の算例を用いて調べる。実際の PC 継ぐいの折れ曲り角度実測結果^{8)~11)}によると、通常は $\phi=40^\circ$ 程度が最高である。したがって、ここでは $\phi=40^\circ$ とすれば、 ϕ 式から、

$$\frac{M}{A_c R_s} = \frac{\phi N}{2 A_c R_s / R} \cdot \frac{l}{D} = 0.00693 \frac{l}{D} \cdot \frac{N}{A_c} \quad (30)$$

となる。 $l/D=80, 100$ および 120 に対する (30) 式の直線が Fig. 9 にあわせて示してある。これら直線と IC との交点の座標は Table II のようになる。また、同表には通常の PC 部材と同じく安全率を、

$$S_u=2, S_c=1.3 \quad (31)$$

としたときの許容応力 N_a および M_a も同時に示してある。Fig. 12 は許容応力 N_a および M_a と l/D の関係を σ_p をパラメータとして図示したものである。これ

Fig. 12. Allowable stresses N_a and M_a of prestressed concrete piles having the various length-diameter ratio l/D ($\phi=40^\circ$, $S_u=2$, $S_c=1.3$).

らから明らかなように、許容応力 N_a および M_a は同じ l/D の値に対して σ_p が大となってもほとんど低下せずほぼ同じ値となり、 σ_p が小さい場合には l/D が大となるにしたがって、 N_c および M_c が極度に小さくなるので、場合によっては σ_p の小さいほうが極度に小さい許容応力 N_a および M_a をとらざるをえないことも起こりうる。また、同一 σ_p の場合には許容支持力 N_a は l/D が大きいほど低下するが、許容曲げモーメント M_a は逆に増大する。このように σ_p の大小によっては許容応力 N_a および M_a はほとんど関係せず、中心軸圧だけを考えた許容支持力決定法はくいの折れ曲り(または曲げモーメントの作用)があるかぎり無意味であることが数値的にも明らかである。むしろ、 σ_p を大きくして曲げひびわれの発生を防ぐのが真の PC くいの特質を発揮させることになろう。

なお、実際のくいでは軸力 N が増加することにより ϕ 式に従って曲げモーメント M が増大することはまれであり、むしろ地震力などのように他の種類の外力

の作用によって曲げモーメントそのものが増大していくことのほうが多い。このような場合には許容曲げモーメントに対して⑧式の安全率が満足されておれば、許容支持力に対してはある程度の余力だけで充分とする考え方がなりたつ。すなわち、許容応力 N_a , M_a は破壊またはひびわれ IC の横軸の値をそれぞれ⑧式の安全率に対応して1/2および1/1.3にした曲線と、くいの折れ曲りによる軸力と曲げモーメントの関係を与える直線⑧式との交点の座標となる。Fig. 9 の IC に対する上記の許容応力度を求めた結果だけを図示すれば Fig. 13 のようになり、 N_a および M_a ともに σ_p が大き

Fig. 13. Allowable stresses N_a and M_a of prestressed concrete piles having the various length-diameter ration l/D ($\varphi = 40^\circ$, $M_u/M_a = 2$, $M_e/M_a = 1.3$).

いほど大きくとってよいという結果を得る。すなわち、曲げモーメントの作用の大きい場合には、有効プレストレスを大きくしたほうが軸力に対しても曲げモーメントに対しても耐荷能力が大となるという、いわゆる PC 本来の特性が如実に表われるのである。

以上述べたように、くいに折れ曲りが起こることを認めざるをえない現状においては、有効プレストレス σ_p が大きいくいでも σ_p の小さいくいと同等またはそれ以上の許容応力を採用してもよいであろう。安全性の点からはむしろ σ_p の大きいくいを推奨したいと考える。

8 PC くい許容支持力と支持力低減を必要とする細長比限界値筆者案

建築基礎構造規程⁷⁾では RC くいに対して細長比 l/D が 60 以上になると l/D の値から 60 を差し引いた数値の % だけ許容支持力 N_a を低減することになっている。この規定は PC くいに対してはあまりにも酷であり、すでに述べたように l/D 限界値を 80~100 程度に上げようとする動きがある⁸⁾。もちろん、Fig. 12 または 13 から明らかなように、くいに折れ曲りが生ずるかぎりにおいては、このような細長比による低減は理論的にいって考慮されるべきであるが、低減の標準となる許容支持力 N_a と切り放しては論ずることはできない。たとえば、許容支持力標準値を σ_p の大小には関係なく、 $N_a/A_c = 110 \text{ kg/cm}^2$ ⑧

とし、これに対応する細長比限界値を Fig. 12 および 13 から求めてみよう。⑧式の値は⑧式の値をもとにしたコンクリート断面応力許容値 $f_c = 110 \text{ kg/cm}^2$ とほぼ同じと考えてよい。ちなみに $f_c = 110 \text{ kg/cm}^2$ に対する N_a/A_c の値を⑧式から求めると、 $n=5$, $\sigma_s = 91 \text{ kg/mm}^2$ として

$$\sigma_p = 40 \text{ kg/cm}^2 \text{ のとき } N_a/N_c = 112.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_p = 80 \text{ " " " } N_a/A_c = 114.8 \text{ " "}$$

$$\sigma_p = 120 \text{ " " " } N_a/A_c = 117.3 \text{ " "}$$

である。⑧式に対応する細長比限界値を求めた結果を Table III に示す。もちろん、Fig. 12 から得た値と

Table III. Critical value of length-diameter ratio of prestressed concrete piles necessary to reduce the allowable axial load.

Effective prestress σ_p (kg/cm ²)	Critical value of l/D -ratio	
	From Fig. 12	From Fig. 13
40	108	92
80	114	110
120	112	121

Fig. 13 から得た値とは異なるのが当然であるが、いま、 $\sigma_p = 40 \text{ kg/cm}^2$ のくいはいわゆる支持ぐいであって、曲げモーメントの作用はきわめて小さいとみなして Fig. 12 から得た値を、 $\sigma_p = 80$ および 120 kg/cm^2 のくいはいわゆるモーメントぐいであって、曲げに対する安全率の確保が最も重要であると考えて Fig. 13 からの値を採用するものとし、これを取り扱いやすい数値にまとめて、以下の l/D 限界値を提案する。

$$\left. \begin{array}{ll} \sigma_p = 40 \text{ kg/cm}^2 \text{ のくいでは } l/D \leq 100 \\ \sigma_p = 80 \text{ " " " } l/D \leq 110 \\ \sigma_p = 120 \text{ " " " } l/D \leq 120 \end{array} \right\} \quad \text{⑨}$$

なお、⑨式の許容支持力標準値は、たとえば、 $l/D = 80$ の場合にはきわめて余裕のある値であることが Fig. 12 または 13 からわかるが、打込み時の衝撃力や偏心打撃の危険性、ネガティブフリクションの影響などを考えると、妥当な値であると思われる。

9 結 語

本報は PC くいの断面の力学特性をもとにして、プレストレスの大小、細長比、折れ曲り角度などと許容支持力との関係について概説したが、要は PC くいの特性を十分に発揮させるためには、現行の支持ぐいの標準となっている $\sigma_p = 40 \text{ kg/cm}^2$ 程度のものでは、一般的にいて不十分であり、むしろ $\sigma_p = 80 \text{ kg/cm}^2$ またはそれ以上といった曲げひびわれまたは曲げ破壊に対する抵抗力の強いくいのほうが理想的であると考えられる。もちろん、これらのプレストレスの大きいくいは、導入プレストレスが大きいから許容支持力をそれだけ低減しなければならないというのではなく、支持

ぐいとしてもプレストレスの小さいくい以上にすぐれた耐荷力を持つといえよう。充分検討の上プレストレスの大きいくい，すなわち，PC としての特質を充分発揮できる能力を持ったくいに移り変わっていくことを望むものである。

参 考 文 献

- 1) 吉成元伸，建築技術，**158**，p.57 (1964)。
- 2) 六車 照，富田幸次郎，PC 技術協会第 7 回研究発表会講演概要，p.7 (1967)。
- 3) 井上 肇，セメント技術年報 **XVIII**，p.539(1964)。
- 4) 槇田博臣，プレストレストコンクリート，**8**，No. 3，20 (1966)。
- 5) 坪井研究室，基礎ぐいの径，長さ比に関する基礎的研究(その 1)(1967)。
- 6) 坂 静雄，六車 照，セメント技術年報 **IX**，p. 370 (1955)。
- 7) 日本建築学会，建築基礎構造設計規準，同解説(1960)。
- 8) 山肩邦男，建築・土木における最新の基礎工法講習会テキスト，7-1 (1967)。
- 9) 山肩邦男，土と基礎，**14**，No. 5，11 (1966)。
- 10) 坪井研究室，基礎ぐいの径，長さ比に関する基礎的研究(その 2)(1966)。
- 11) 橋本敏秀，建築技術，**188**，51 (1967)。