

終局破壊限界状態における P C くい耐力計算法

猪 股 俊 司*

P C くい の 破 壊 耐 力 に 関 す る Interaction Curve の 求 め 方 に つ い て は 多 く の 論 文 が 発 表 さ れ て い る^{1)~6)}。

こ こ で は, FIP-CEB⁷⁾ の コ ン ク リ ー ト 構 造 物 設 計 施 工 規 準 の 破 壊 の 終 局 限 界 状 態 計 算 上 の 仮 定 を 用 い た 場 合 の Interaction Curve の 求 め 方 に つ い て の 計 算 式 を 示 す も の で あ る。

計 算 上 の 仮 定 は 次 の よ う で あ る。

1) コ ン ク リ ー ト 圧 縮 応 力-ひ ず み 曲 線 は パ ラ ボ ラ- 矩 形 分 布 で あ っ て, パ ラ ボ ラ 頂 点 応 力 度 に 相 応 す る コ ン ク リ ー ト ひ ず み は 2.0% で あ り, 矩 形 分 布 の 終 り の 最 大 ひ ず み は 3.5% で あ る。計 算 に 用 い る 最 大 圧 縮 応 力 度 は, $R_{cu}^{**} = 0.85 R_c^{**} = 0.85 R_{ck}' / \gamma_c$ で あ る (図-1)。

2) P C 鋼 材 引 張 応 力-ひ ず み 曲 線 は, 計 算 用 値 $R_p^{**} = R_{pk} / \gamma_a$ ま で は フ ッ ク の 直 線 で, ひ ず み は R_p^{**} / E_p で あ り, こ れ 以 上 の ひ ず み に 対 し は, 引 張 応 力 度 は 一 定 で あ っ て R_p^{**} と す る (図-2)。

3) 破 壊 の 終 局 限 界 状 態 は, コ ン ク リ ー ト 最 大 圧 縮 ひ ず み が 3.5% と な る か, ま た は P C 鋼 材 引 張 ひ ず み の

図-1 コ ン ク リ ー ト 応 力-ひ ず み 曲 線

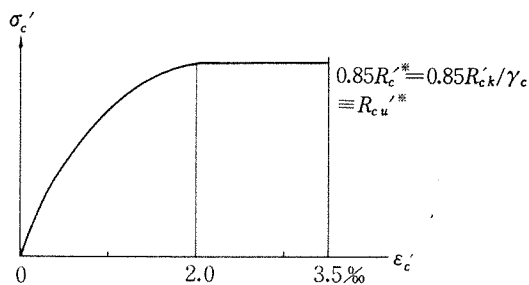


図-2 P C 鋼 材 応 力-ひ ず み 曲 線

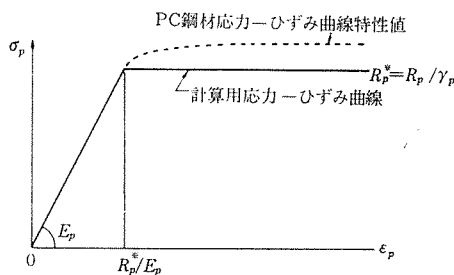
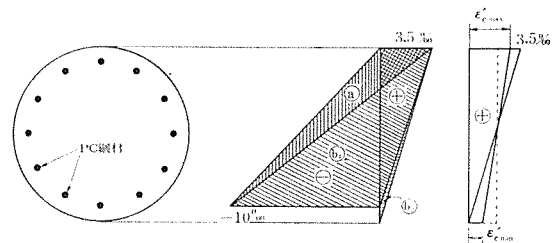


図-3 ひ ず み 分 布



増 加 が 10% と な る か, い ず れ か に よ っ て 生 ず る (図-3)。

4) 断 面 が す べ て 圧 縮 ひ ず み と な る 場 合, 最 大 圧 縮 ひ ず み $\epsilon_c'_{max}$ と, 最 少 圧 縮 ひ ず み $\epsilon_c'_{min}$ と の 関 係 は 次 式 で 与 え ら れ る (図-3)。

$$\epsilon_c'_{max} = 3.5 - 0.75 \epsilon_c'_{min} (\%) \dots \dots \dots (1)$$

5) 軸 力 作 用 点 の 不 確 実 さ を 考 慮 に 入 れ る た め, 2 cm ま た は 外 直 径 の 1/30 の い ず れ が 大 き い 値 の 付 加 的 な 偏 心 を 不 利 な 方 向 に 考 慮 す る。

以 上 の 仮 定 に よ り, コ ン ク リ ー ト 断 面 に つ い て の 軸 力 と モー メ ン ト お よ び P C 鋼 材 に つ い て の 軸 力 と モー メ ン ト と を 計 算 す る。

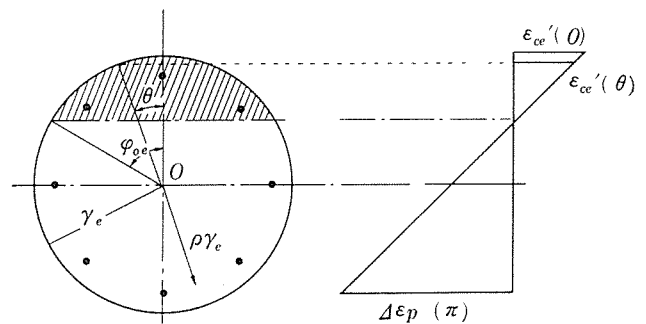
1. コ ン ク リ ー ト 断 面 に 関 す る 軸 力 と モー メ ン ト

軸 力 を N_c' , モー メ ン ト を M_c と し, 半 径 r_e な る 円 形 断 面 に つ い て, 次 の 係 数 を 定 め る (図-4)。

$$\text{軸 力 係 数 } n_c = N_c' / R_{cu}^{**} \pi r_e^2$$

$$\text{モー メ ン ト 係 数 } m_c = M_c / R_{cu}^{**} \pi r_e^3$$

図-4 外 円 に 関 す る ひ ず み 分 布 (中 立 軸 断 面 内)



* 工 博 株 式 会 社 日 本 構 造 橋 梁 研 究 所 副 社 長

(1) コンクリート断面内に中立軸のある場合

a) $\varepsilon_{ce}'(0) \leq 2\%$ すなわち, $1 > \cos \varphi_{0e} > (1 - 0.2\rho)$

/1.2

φ_{0e} : 中立軸の中心半角

ρ : P C 鋼材配直円半径と外径との比

$\varepsilon_{ce}'(0)$: 圧縮縁ひずみ

この場合, ひずみ分布は図-3のa区間にある。すなわちP C鋼材ひずみ増は10%である。よってコンクリートひずみ分布と圧縮応力度分布とは次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{ce}'(\theta) &= 10 \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \\ \sigma_{ce}'(\theta) &= R_{cu}' \cdot 10 \cdot \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \\ &\times \left(1 - 2.5 \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

よって n_c', m_c は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} n_c' &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\varphi_{0e}} \frac{\sigma_{ce}'(\theta)}{R_{cu}' \cdot 10} \sin^2 \theta d\theta \\ m_c &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\varphi_{0e}} \frac{\sigma_{ce}'(\theta)}{R_{cu}' \cdot 10} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

積分結果について次の記号を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \int \sin^2 \theta d\theta &= \frac{1}{2} (\theta - \sin \theta \cos \theta) = A(\theta) \\ \int \cos \theta \sin^2 \theta d\theta &= \frac{1}{3} \sin^3 \theta = B(\theta) \\ \int \cos^2 \theta \sin^2 \theta d\theta \\ &= \frac{1}{4} \{ \cos \theta \sin^3 \theta + A(\theta) \} = C(\theta) \\ \int \cos^3 \theta \sin^2 \theta d\theta \\ &= \frac{1}{5} \{ \cos^2 \theta \sin^3 \theta + 2 B(\theta) \} = D(\theta) \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

以上の積分結果は n_c', m_c について次のようになる。

$$\begin{aligned} n_c' &= \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e})A(\varphi_{0e}) \\ &+ (\rho + 6 \cos \varphi_{0e})B(\varphi_{0e}) + \\ &- 2.5 C(\varphi_{0e})] \dots\dots (5.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_b &= \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e})B(\varphi_{0e}) \\ &+ (\rho + 6 \cos \varphi_{0e})C(\varphi_{0e}) \\ &- 2.5 D(\varphi_{0e})] \dots\dots (5.b) \end{aligned}$$

b) $3.5\% \geq \varepsilon_{ce}'(0) > 2\%$ すなわち, $(1 - 0.2\rho)/1.2 > \cos \varphi_{0e} > (1 - 0.35\rho)/1.35$ この場合, ひずみ分布は図-3のa区間にある。コンクリート断面内にひずみが2%となる位置がある。この位置の中心半角を φ_{2e} とすると,

$$\cos \varphi_{2e} = 0.2\rho + 1.2 \cos \varphi_{0e} \dots\dots (6)$$

コンクリート応力度分布は,

$$\varphi_{2e} > \theta > 0 \quad \sigma_{ce}'(\theta) = R_{cu}' \cdot 10$$

$$\varphi_{0e} > \theta > \varphi_{2e}$$

$$\sigma_{ce}'(\theta) = R_{cu}' \cdot 10$$

$$\cdot \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \left(1 - 2.5 \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \right)$$

となる。よって n_c', m_c は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} n_c' &= \frac{2}{\pi} A(\varphi_{2e}) + \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e}) \{ A(\varphi_{0e}) - A(\varphi_{2e}) \} + \\ &+ (\rho + 6 \cos \varphi_{0e}) \{ B(\varphi_{0e}) - B(\varphi_{2e}) \} \\ &- 2.5 \{ C(\varphi_{0e}) - C(\varphi_{2e}) \}] \dots\dots (7.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_c &= \frac{2}{\pi} B(\varphi_{2e}) + \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e}) \{ B(\varphi_{0e}) - B(\varphi_{2e}) \} + \\ &+ (\rho + 6 \cos \varphi_{0e}) \{ C(\varphi_{0e}) - C(\varphi_{2e}) \} \\ &- 2.5 \{ D(\varphi_{0e}) - D(\varphi_{2e}) \}] \dots\dots (7.b) \end{aligned}$$

c) $\varepsilon_{ce}'(0) = 3.5\%$ すなわち $(1 - 0.35\rho)/1.35 > \cos \varphi_{0e} > -1$ この場合, ひずみ分布は図-3のb₁ または b₂ 区間にあり, P C鋼材ひずみ増は10%より小さい。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ce}'(\theta) &= 2\% \text{ となる位置の中心半角を } \varphi_{2e} \text{ とすると,} \\ \cos \varphi_{2e} &= (2 + 1.5 \cos \varphi_{0e})/3.5 \dots\dots (8) \end{aligned}$$

ひずみ分布および応力度分布は,

$$\varepsilon_{ce}'(\theta) = 3.5 \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \dots\dots (9)$$

$$\varphi_{2e} > \theta > 0 \quad \sigma_{ce}'(\theta) = R_{cu}' \cdot 10$$

$$\varphi_{0e} > \theta > \varphi_{2e}$$

$$\sigma_{ce}'(\theta) = R_{cu}' \cdot 3.5$$

$$\cdot \frac{\cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \left(1 - \frac{3.5 \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{4(1 - \cos \varphi_{0e})} \right)$$

よって n_c', m_c は積分結果次式で与えられる。

$$\begin{aligned} n_c' &= \frac{2}{\pi} A(\varphi_{2e}) + \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) \{ A(\varphi_{0e}) - A(\varphi_{2e}) \} + \right. \\ &+ \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \{ B(\varphi_{0e}) - B(\varphi_{2e}) \} \\ &\left. - \frac{7}{8} \{ C(\varphi_{0e}) - C(\varphi_{2e}) \} \right] \dots\dots (10.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_c &= \frac{2}{\pi} B(\varphi_{2e}) + \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) \{ B(\varphi_{0e}) - B(\varphi_{2e}) \} + \right. \\ &+ \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \{ C(\varphi_{0e}) - C(\varphi_{2e}) \} \\ &\left. - \frac{7}{8} \{ D(\varphi_{0e}) - D(\varphi_{2e}) \} \right] \dots\dots (10.b) \end{aligned}$$

(2) 断面外に中立軸のある場合

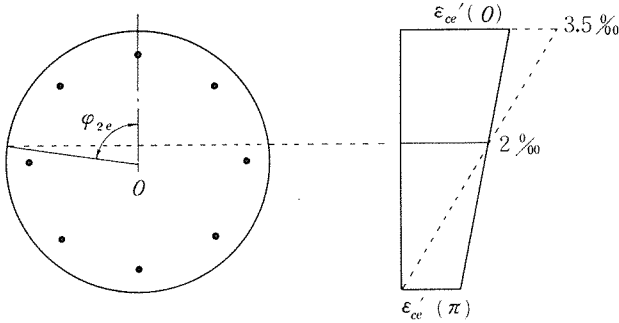
ひずみ分布は図-5に示す。これは、

$$\varepsilon_{ce}'(\theta) = 2 + \frac{7}{6} \{1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi)\} \left(\cos \theta - \frac{1}{7} \right) \dots\dots\dots (11)$$

$\varepsilon_{ce}' = 2\%$ となる位置は、

$$\cos \varphi_{2e} = \frac{1}{7} \dots\dots\dots (12)$$

図-5 外円に関するひずみ分布 (中立軸断面外)



応力度分布は次のようである。

$$\begin{aligned} \varphi_{2e} > \theta > 0 \quad \sigma_{ce}'(\theta) &= R_{cu}' \ast \\ \pi > \theta > \varphi_{2e} \\ \sigma_{ce}'(\theta) &= R_{cu}' \ast \left[1 - \left(\frac{7}{12} \right)^2 \{1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi)\}^2 \right. \\ &\quad \left. \left(\cos \theta - \frac{1}{7} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

よって n_c' , m_c は次のようである。

$$\begin{aligned} n_c' &= 1 - \frac{49}{72\pi} \{1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi)\}^2 \\ &\quad \times \left[\frac{1}{49} \left\{ \frac{\pi}{2} - A(\varphi_{2e}) \right\} + \frac{2}{7} B(\varphi_{2e}) + \left\{ \frac{\pi}{8} - C(\varphi_{2e}) \right\} \right] \dots\dots\dots (13.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_c &= \frac{49}{72\pi} \{1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi)\}^2 \\ &\quad \times \left[\frac{1}{49} B(\varphi_{2e}) + \frac{2}{7} \left\{ \frac{\pi}{8} - C(\varphi_{2e}) \right\} + D(\varphi_{2e}) \right] \dots\dots\dots (13.b) \end{aligned}$$

2. 中空断面についての解

中空断面に関する解を求めるには、すでに述べた解法を外円について適用し、軸力係数およびモーメント係数 n_c' および m_c を求める。

次に与えられた中立軸について、内円に関する軸力係数およびモーメント係数 n_{ci}' および m_{ci} を求める。ここに、

$$\left. \begin{aligned} n_{ci}' &= N_{ci}' / R_{cu}' \ast \pi r_i^2 \\ m_{ci} &= M_{ci} / R_{cu}' \ast \pi r_i^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

r_i = 内円半径 $\equiv \lambda r_e$

中立軸の外円についての中心半角を φ_{0e} とすると、内

円についての中心半角 φ_{0i} 図-6 外円および内円に関する中立軸位置の関係 (図-6)。

$$\cos \varphi_{0i} = \frac{1}{\lambda} \cos \varphi_{0e} \dots\dots\dots (15)$$

中立軸が内円内にあるためには、次の条件が成立する。

$$\lambda > \cos \varphi_{0e} > -\lambda$$

この範囲内に φ_{0e} がある場合および $-\lambda > \cos \varphi_{0e} > -1$ の場合を区別して、 n_{ci}' , m_{ci} を求める。

(1) $\lambda > \cos \varphi_{0e} > (1 - 0.35\rho)/1.35$ の場合

この場合、P C 鋼材引張ひずみ増は 10% となる。

a) $\cos \varphi_{0e} > (\lambda - 0.2\rho)/1.2$ すなわち $\varepsilon_{ci}'(0) \leq 2\%$

この場合の n_{ci}' , m_{ci} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} n_{ci}' &= \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\quad \times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e})A(\varphi_{0i}) + (\rho + 6 \cos \varphi_{0e})\lambda B(\varphi_{0i}) - 2.5 \lambda^2 C(\varphi_{0i})] \dots\dots\dots (16.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{ci} &= \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\quad \times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e})B(\varphi_{0i}) + (\rho + 6 \cos \varphi_{0e})\lambda C(\varphi_{0i}) - 2.5 \lambda^2 D(\varphi_{0i})] \dots\dots\dots (16.b) \end{aligned}$$

b) $(\lambda - 0.2\rho)/1.2 \geq \cos \varphi_{0e}$ の場合すなわち、 $\varepsilon_{ci}'(0) > 2\%$ $\varepsilon_{ci}' = 2\%$ となる位置の内円についての中心半角 φ_{2i}

$$\cos \varphi_{2i} = (0.2\rho + 1.2 \cos \varphi_{0e})/\lambda \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned} n_{ci}' &= \frac{2}{\pi} A(\varphi_{2i}) + \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\quad \times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e})\{A(\varphi_{0i}) - A(\varphi_{2i})\} + (\rho + 6 \cos \varphi_{0e})\lambda\{B(\varphi_{0i}) - B(\varphi_{2i})\} - 2.5 \lambda^2\{C(\varphi_{0i}) - C(\varphi_{2i})\}] \dots\dots\dots (18.a) \end{aligned}$$

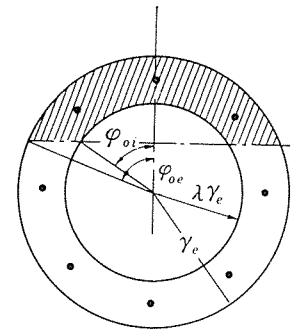
$$\begin{aligned} m_{ci} &= \frac{2}{\pi} B(\varphi_{2i}) + \frac{20}{\pi(\rho + \cos \varphi_{0e})^2} \\ &\quad \times [-\cos \varphi_{0e}(\rho + 3.5 \cos \varphi_{0e})\{B(\varphi_{0i}) - B(\varphi_{2i})\} + (\rho + 6 \cos \varphi_{0e})\lambda\{C(\varphi_{0i}) - C(\varphi_{2i})\} - 2.5 \lambda^2\{D(\varphi_{0i}) - D(\varphi_{2i})\}] \dots\dots\dots (18.b) \end{aligned}$$

(2) $(1 - 0.35\rho)/1.35 \geq \cos \varphi_{0e} \geq -\lambda$ の場合

この場合 $\varepsilon_{ce}'(0) = 3.5\%$ である。

a) $\cos \varphi_{0e} > (3.5\lambda - 2)/1.5$ の場合すなわち $\varepsilon_{ci}'(0) \leq 2\%$ ひずみ分布と応力度分布は、

$$\varepsilon_{ci}'(\theta) = 3.5 \frac{\lambda \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}}$$



$$\sigma_{ci}'(\theta) = R_{cu}' \cdot 3.5 \cdot \frac{\lambda \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \left(1 - \frac{3.5 \lambda \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{4} \frac{1}{1 - \cos \varphi_{0e}} \right)$$

よって,

$$n_{ci}' = \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) A(\varphi_{0i}) + \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \lambda B(\varphi_{0i}) - \frac{7}{8} \lambda^2 C(\varphi_{0i}) \right] \dots\dots\dots(19.a)$$

$$m_{ci} = \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) B(\varphi_{0i}) + \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \lambda C(\varphi_{0i}) - \frac{7}{8} \lambda^2 D(\varphi_{0i}) \right] \dots\dots\dots(19.b)$$

b) $(3.5\lambda - 2)/1.5 > \cos \varphi_{0e} > -\lambda$ の場合すなわち

$$\varepsilon_{bi}'(0) \geq 2.0\text{‰}$$

$\varepsilon_{bi}'(\varphi_{2i}) = 2\text{‰}$ の位置

$$\cos \varphi_{2i} = (2 + 1.5 \cos \varphi_{0e}) / 3.5 \lambda \dots\dots\dots(20)$$

n_{ci}' , m_{ci} は次のようになる。

$$n_{ci}' = \frac{2}{\pi} A(\varphi_{2i}) + \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) \{ A(\varphi_{0i}) - A(\varphi_{2i}) \} + \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \lambda \{ B(\varphi_{0i}) - B(\varphi_{2i}) \} - \frac{7}{8} \lambda^2 \{ C(\varphi_{0i}) - C(\varphi_{2i}) \} \right] \dots\dots\dots(21.a)$$

$$m_{ci} = \frac{2}{\pi} B(\varphi_{2i}) + \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) \{ B(\varphi_{0i}) - B(\varphi_{2i}) \} + \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \lambda \{ C(\varphi_{0i}) - C(\varphi_{2i}) \} - \frac{7}{8} \lambda^2 \{ D(\varphi_{0i}) - D(\varphi_{2i}) \} \right] \dots\dots\dots(21.b)$$

(3) $-\lambda > \cos \varphi_{0e} \geq -1$ の場合

この場合は中立軸は内円外にある。

$\varepsilon_{cc}' = 2\text{‰}$ となる位置

$$\cos \varphi_{2i} = (2 + 1.5 \cos \varphi_{0e}) / 3.5 \lambda \dots\dots\dots(22)$$

$$n_{ci}' = \frac{2}{\pi} A(\varphi_{2i}) + \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \times \left[\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) \left\{ \frac{\pi}{2} - A(\varphi_{2i}) \right\} + \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \lambda B(\varphi_{2i}) - \frac{7}{8} \lambda^2 \left\{ \frac{\pi}{8} - C(\varphi_{2i}) \right\} \right] \dots\dots\dots(23.a)$$

$$m_{ci} = \frac{2}{\pi} B(\varphi_{2i}) + \frac{7}{\pi(1 - \cos \varphi_{0e})^2} \times \left[-\cos \varphi_{0e} \left(\frac{1}{8} \cos \varphi_{0e} - 1 \right) B(\varphi_{2i}) + \left(1 + \frac{3}{4} \cos \varphi_{0e} \right) \lambda \left\{ \frac{\pi}{8} - C(\varphi_{2i}) \right\} + \frac{7}{8} \lambda^2 D(\varphi_{2i}) \right] \dots\dots\dots(23.b)$$

(4) 中立軸が内円外にある場合

この場合は中立軸はもちろん内円外にある。ひずみ分布は

$$\varepsilon_{ci}'(\theta) = 2 + \frac{7}{6} \{ 1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi) \} \left(\lambda \cos \theta - \frac{1}{7} \right) \dots\dots\dots(24)$$

$\varepsilon_{ci}' = 2\text{‰}$ となる中心半角は

$$\cos \varphi_{2i} = 1/7 \lambda \dots\dots\dots(25)$$

内円についての応力度分布

$$\sigma_{ci}'(\theta) = R_{cu}' \cdot \left[1 - \left(\frac{7}{12} \right)^2 \{ 1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi) \}^2 \right] \times \left(\lambda \cos \theta - \frac{1}{7} \right)^2$$

よって,

$$n_{ci}' = 1 - \frac{49}{72 \pi} \{ 1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi) \}^2 \times \left[\frac{1}{49} \left\{ \frac{\pi}{2} - A(\varphi_{2i}) \right\} + \frac{2}{7} \lambda B(\varphi_{2i}) + \lambda^2 \left\{ \frac{\pi}{8} - C(\varphi_{2i}) \right\} \right] \dots\dots\dots(26.a)$$

$$m_{ci} = \frac{49}{72 \pi} \{ 1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi) \}^2 \left[\frac{1}{49} B(\varphi_{2i}) + \frac{2}{7} \lambda \left\{ \frac{\pi}{8} - C(\varphi_{2i}) \right\} + \lambda^2 D(\varphi_{2i}) \right] \dots\dots\dots(26.b)$$

以上から、ある仮定した中立軸位置について内円についての n_{ci}' , m_{ci} が定まると、すでに与えた外円についての n_{ce}' , m_{ce} と組み合わせて、中空断面に関するコンクリート軸力 N' とモーメント M とは、次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} N_c' &= n_{ce}' \cdot R_{cu}' \cdot \pi r_e^2 - n_{ci}' \cdot R_{cu}' \cdot \pi r_i^2 \\ M_c &= m_{ce} \cdot R_{cu}' \cdot \pi r_e^3 - m_{ci}' \cdot R_{cu}' \cdot \pi r_i^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots(27)$$

中立軸が外円の外にある場合は、外円縁における最少コンクリートひずみ $\varepsilon_{ce}'(\pi)$ を仮定して解を求め、式(27)で中空断面の N_c' , M_c が求められる。

3. PC鋼材に関する軸力係数とモーメント係数

軸力変化を ΔN_p 、モーメント変化を ΔM_p とし、各係数を次のように定める。

$$\left. \begin{aligned} \text{軸力係数 } n_p &= \Delta N_p / A_p R_p \cdot \rho r_e \\ \text{モーメント係数 } m_p &= \Delta M_p / A_p R_p \cdot \rho r_e \end{aligned} \right\} (28)$$

A_p : PC鋼材断面積

P C鋼材応力-ひずみ曲線は図-2に示すようなものとする。基準状態(コンクリート応力度 0 の状態)におけるP C鋼材引張応力度を σ_{p0} 、有効引張応力度を σ_{pe} とする。

$$\sigma_{p0} = \mu R_p^{**} = (1 + n w_p) \sigma_{pe} \dots (29)$$

ここに、 $w_p = A_p / A_c$

応力-ひずみ曲線は次式で与えられる(図-7)。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_p \leq \Delta \varepsilon_{p\mu} \quad \Delta \sigma_p = E_p \Delta \varepsilon_p \\ -10\% > \Delta \varepsilon_p > \Delta \varepsilon_{p\mu} \quad \Delta \sigma_p = (1 - \mu) R_p^{**} \end{aligned} \right\} \dots (30)$$

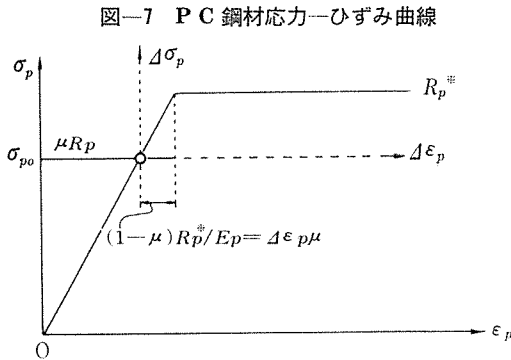


図-7 P C 鋼材応力-ひずみ曲線

(1) 中立軸が断面内にある場合

a) $1 > \cos \varphi_{0e} \geq (1 - 0.35 \rho) / 1.35$ の場合すなわち、

$\Delta \varepsilon_p(\pi) = -10\%$ P C鋼材ひずみ変化の分布は、

$$\Delta \varepsilon_p(\theta) = 10 \frac{\rho \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} (\%) \dots (31)$$

$\Delta \varepsilon_p = -\Delta \varepsilon_{p\mu}$ となる位置の中心半角 $\varphi_{p\mu}$

$$\cos \varphi_{p\mu} = \frac{1}{\rho} \cos \varphi_{0e} - \frac{\Delta \varepsilon_{p\mu}}{10 \rho} (\rho + \cos \varphi_{0e}) \dots (32)$$

よって応力分布は、

$$\varphi_{p\mu} > \theta > 0 \quad \Delta \sigma_p(\theta) = E_p \cdot 10 \cdot \frac{\rho \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}}$$

$$\pi > \theta > \varphi_{p\mu} \quad \Delta \sigma_p(\theta) = -(1 - \mu) R_p^{**}$$

よって軸力係数およびモーメント係数は次のようになる。

$$\begin{aligned} n_p &= \frac{N_p}{A_p R_p^{**}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{\Delta \sigma_p(\theta)}{R_p^{**}} d\theta \\ &= \frac{10}{\pi} \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \frac{\rho \sin \varphi_{p\mu} - \varphi_{p\mu} \cos \varphi_{0e}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \\ &\quad - \left(\frac{1 - \mu}{\pi} \right) (\pi - \varphi_{p\mu}) \dots (33.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_p &= \frac{M_p}{A_p R_p^{**} \rho r_e} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{\Delta \sigma_p(\theta)}{R_p^{**}} \cos \theta d\theta \\ &= \frac{10}{\pi} \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \\ &\quad \times \frac{\left(\frac{\rho}{2} \cos \varphi_{p\mu} - \cos \varphi_{0e} \right) \sin \varphi_{p\mu} + \frac{\rho}{2} \varphi_{p\mu}}{\rho + \cos \varphi_{0e}} \\ &\quad + \left(\frac{1 - \mu}{\pi} \right) \sin \varphi_{p\mu} \dots (33.b) \end{aligned}$$

b) $(1 - 0.35 \rho) / 1.35 > \cos \varphi_{0e} > -1$ の場合すなわち

$\varepsilon_{ce}'(0) = 3.5\%$ この場合 $\Delta \varepsilon_p(\pi) > -10\%$ である。

P C鋼材ひずみ分布は、

$$\Delta \varepsilon_p(\theta) = 3.5 \frac{\rho \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \dots (34)$$

1) $\cos \varphi_{0e} \geq (\Delta \varepsilon_{p\mu} / 3.5 - \rho) / (1 + \Delta \varepsilon_{p\mu} / 3.5)$ の場合 P C鋼材は弾性範囲および塑性範囲にある。

$\Delta \varepsilon_p(\theta) = -\Delta \varepsilon_{p\mu}$ となる位置の中心半角

$$\cos \varphi_{p\mu} = \frac{1}{\rho} \left[\cos \varphi_{0e} - \frac{\Delta \varepsilon_{p\mu}}{3.5} (1 - \cos \varphi_{0e}) \right] \dots (35)$$

応力変化は、

$$\varphi_{p\mu} > \theta > 0 \quad \Delta \sigma_p(\theta) = E_p \cdot 3.5 \frac{\rho \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}}$$

$$\pi > \theta > \varphi_{p\mu} \quad \Delta \sigma_p(\theta) = -(1 - \mu) R_p^{**}$$

よって

$$\begin{aligned} n_p &= \frac{3.5}{\pi} \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \frac{\rho \sin \varphi_{p\mu} - \varphi_{p\mu} \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \\ &\quad - \left(\frac{1 - \mu}{\pi} \right) (\pi - \varphi_{p\mu}) \dots (36.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_p &= \frac{3.5}{\pi} \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \\ &\quad \times \frac{\left(\frac{\rho}{2} \cos \varphi_{p\mu} - \cos \varphi_{0e} \right) \sin \varphi_{p\mu} + \frac{\rho}{2} \varphi_{p\mu}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \\ &\quad + \left(\frac{1 - \mu}{\pi} \right) \sin \varphi_{p\mu} \dots (36.b) \end{aligned}$$

2) $\cos \varphi_{0e} \leq (\Delta \varepsilon_{p\mu} / 3.5 - \rho) / (1 + \Delta \varepsilon_{p\mu} / 3.5)$ の場合 P C鋼材は弾性範囲のみにあり、

$$\pi > \theta > 0 \quad \Delta \sigma_p(\theta) = E_p \cdot 3.5 \frac{\rho \cos \theta - \cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}}$$

$$n_p = -3.5 \frac{\cos \varphi_{0e}}{1 - \cos \varphi_{0e}} \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \dots (37.a)$$

$$m_p = 1.75 \frac{1}{1 - \cos \varphi_{0e}} \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \dots (37.b)$$

(2) 断面外に中立軸のある場合

ひずみ分布

$$\Delta \varepsilon_p(\theta) = 2 + \frac{7}{6} \{ 1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi) \} \left(\rho \cos \theta - \frac{1}{7} \right) \dots (38)$$

P C鋼材は弾性範囲内にある。よって、

$$n_p = \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) \left[2 - \frac{1}{6} \{ 1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi) \} \right] \dots (39.a)$$

$$m_p = \frac{7}{12} \rho \left(\frac{E_p}{R_p^{**}} \right) [1.5 - 0.75 \varepsilon_{ce}'(\pi)] \dots (39.b)$$

4. P C くい破壊終局限界状態の Interaction Curve の求め方

Interaction Curve は次の順序で求められる。

1) 外円に関する軸力係数 n_{ce}' 、モーメント係数 m_{ce} を計算する。

中立軸が断面内にある場合、中立軸位置（外円に関する中心半角 φ_{0e} で与えられる）を変化させ、すなわち、 φ_{0e} を $0 \sim 180^\circ$ の範囲で変えて n_{ce}' 、 m_{ce} を計算する。この場合、角度範囲によって適用式の異なることに注意する。

中立軸が断面外にある場合、断面の最少圧縮ひずみ、 $\varepsilon_{ce}'(\pi)$ を $0 \sim 2\%$ の範囲で変化させて、 n_{ce}' 、 m_{ce} を計算する。

n_{ce}' 、 m_{ce} は ρ のみの関数である。中空断面では一般に P C 鋼材はコンクリート壁厚の中央に配置されているから、 $\rho = (1 + \lambda)/2$ である。したがって、 n_{ce}' 、 m_{ce} は λ のみの関数となる。

2) 内円に関する軸力係数 n_{ci}' 、モーメント係数 m_{ci} を計算する。これには 1) で仮定した φ_{0e} に対して計算される。中立軸が内円内にある範囲 $\lambda > \cos \varphi_{0e}$ についてと同時に、中立軸は内円外にあるが、外円内にある範囲、 $-1 > \cos \varphi_{0e} > -\lambda$ についても n_{ci}' 、 m_{ci} を計算する。

中立軸が断面外にある場合は 1) で仮定して $\varepsilon_{be}'(\pi)$ に対応して、 n_{ci}' 、 m_{ci} を計算する。

n_{ci}' 、 m_{ci} は ρ と λ との関数であるが、 $\rho = (1 + \lambda)/2$ であるから、 λ のみの関数となる。

3) P C 鋼材に関する軸力係数 n_p 、モーメント係数 m_p を計算する。

この場合 $\varphi_{0e} = 0 \sim 180^\circ$ の範囲と、 $\varepsilon_{ce}'(\pi) = 0 \sim 2\%$ との範囲について、 n_p 、 m_p を求める。この場合にも φ_{0e} の値に応じて適用式をえらぶ。

n_p 、 m_p は ρ の関数であるが、これはまた λ のみの関数として表わされる。

4) 釣合条件式は次式で与えられる。

$$N = n_{ce}' R_{cu}' \pi r_e^2 - n_{ci}' R_{cu}' \pi r_i^2 + n_p A_p R_p \pi - P_0$$

$$M = m_{ce} R_{cu}' \pi r_e^3 - m_{ci} R_{cu}' \pi r_i^3 + m_p A_p R_p \pi r_e$$

よって

$$\bar{w}_p = \frac{R_p \pi}{R_{cu}' \pi r_e^2 (1 - \lambda^2)} = w_p \frac{R_p \pi}{R_{cu}' \pi} \dots (40)$$

なる記号を用いると、中空断面に関する軸力係数と、モーメント係数をそれぞれ n' 、 m として次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} n &= N / R_{cu}' \pi r_e^2 \\ &= n_{ce}' + \lambda^2 n_{ci}' + (1 - \lambda^2) \bar{w}_p n_p - (1 - \lambda^2) \bar{w}_p \cdot \mu \\ m &= M / R_{cu}' \pi r_e^3 \\ &= m_{ce} - \lambda^3 m_{ci} + (1 - \lambda^2) \rho \bar{w}_p m_p \end{aligned} \right\} \dots (41)$$

式 (41) から、ある仮定された中立軸位置 (φ_{0e} で表わされる) または断面の最少圧縮ひずみ $\varepsilon_{ce}'(\pi)$ に対応

する座標点 (n 、 m) が定まる。

以上により Interaction Curve が求められる。

5) 不測の偏心量 2 cm または外径の 1/30 いずれか大きい値を用い、これに N を乗じた値だけ M を減少させて、4) で求められた Interaction Curve を補正し、最終曲線が求められる。

5. 計算例題 (図—8)

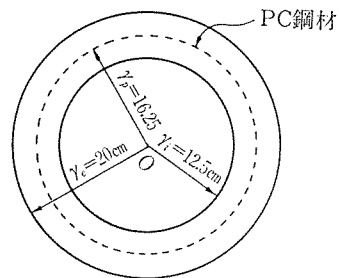
$r_e : 20 \text{ cm}$ $r_i : 12.5 \text{ cm}$ $r_p : 16.25 \text{ cm}$

コンクリート圧縮強度特性値 $R_c' = 500 \text{ kg/cm}^2$

P C 鋼棒降伏点応力度特性値 $R_{py} = 15\,000 \text{ kg/cm}^2$

$A_p = 9.0 \text{ cm}^2$

図—8 計算例



有効引張応力度 $\sigma_{pe} = 68 \text{ kg/mm}^2$

$\lambda = 0.625$, $\rho = 0.8125$

$w_p = 90/\pi \times 20^2 \times (1 - 0.625^2) = 0.01175$

σ_{p0} は $n = 6$ と仮定して、

$\sigma_{p0} = 68 \times (1 + 6 \times 0.01175) = 72.8 \text{ kg/mm}^2$

$R_{cu}' \pi = 0.85 \times 500 / 1.3 = 327 \text{ kg/cm}^2$ ($r_c = 1.3$)

$R_p \pi = 15\,000 / 1.15 = 13\,000 \text{ kg/cm}^2$ ($r_a = 1.15$)

よって $\Delta \varepsilon_{p\mu} = (1 - \mu) R_p \pi / E_p$

$$= \left(1 - \frac{7\,280}{13\,000} \right) \times 13\,000 / 2\,000 = 2.86 \%$$

ここに、 $\mu = 7\,280 / 13\,000 = 0.560$

(1) 中立軸が断面内にある場合

$\cos \varphi_{0e} = (1 - 0.2 \rho) / 1.2 = 0.6979$ $\varphi_{0e} = 45^\circ 44'$

$\cos \varphi_{0e} = (1 - 0.35 \rho) / 1.35 = 0.5505$ $\varphi_{0e} = 56^\circ 38'$

よって外円について、 n_{ce}' 、 m_{ce} を求めるにあたって、次の状態を考慮して適用式を定める。

$0^\circ < \varphi_{0e} < 45^\circ 44' \dots \varepsilon_{ce}'(0) < 2\%$, $\Delta \varepsilon_p(\pi) = 10\%$

適用式 (5.a), (5.b)

$45^\circ 44' < \varphi_{0e} < 56^\circ 38' \dots 3.5\% > \varepsilon_{ce}' > 2\%$,

$\Delta \varepsilon_p(\pi) = 10\%$

適用式 (7.a), (7.b)

$56^\circ 38' < \varphi_{0e} < 180^\circ \dots \varepsilon_{ce}'(0) = 3.5\%$, $\Delta \varepsilon_p(\pi) > 10\%$

適用式 (10.a), (10.b)

以上の適用式を用いて n_{ce}' 、 m_{ce} が求まる。

$\cos \varphi_{0e} = \lambda = 0.625$

$\varphi_{0e} = 51^\circ 39'$

報 告

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{0e} &= (\lambda - 0.2 \rho) / 1.2 = 0.3854 & \varphi_{0e} &= 67^\circ 20' \\ \cos \varphi_{0e} &= (3.5 \lambda - 2) / 1.5 = 0.125 & \varphi_{0e} &= 82^\circ 49' \\ \cos \varphi_{0e} &= -\lambda = -0.625 & \varphi_{0e} &= 128^\circ 21' \\ 51^\circ 39' < \varphi_{0e} < 56^\circ 38' & \varepsilon_{ci}'(0) < 2\% & \Delta \varepsilon_p(\pi) &= -10\% \\ & \text{適用式 (16.a), (16.b)} \\ 56^\circ 38' < \varphi_{0e} < 82^\circ 49' & \varepsilon_{ci}'(0) < 2\% & \varepsilon_{ce}'(0) &= 3.5\% \\ & \text{適用式 (19.a), (19.b)} \\ 82^\circ 49' < \varphi_{0e} < 128^\circ 21' & \varepsilon_{ci}'(0) > 2\% & \varepsilon_{ce}'(0) &= 3.5\% \\ & \text{適用式 (21.a), (21.b)} \\ 128^\circ 21' < \varphi_{0e} < 180^\circ & \varepsilon_{ci}'(0) > 2\% & \varepsilon_{ce}'(0) &= 3.5\% \\ & \text{適用式 (26.a), (26.b)} \end{aligned}$$

以上の適用式で n_{ci}' , m_{ci} が求められる。

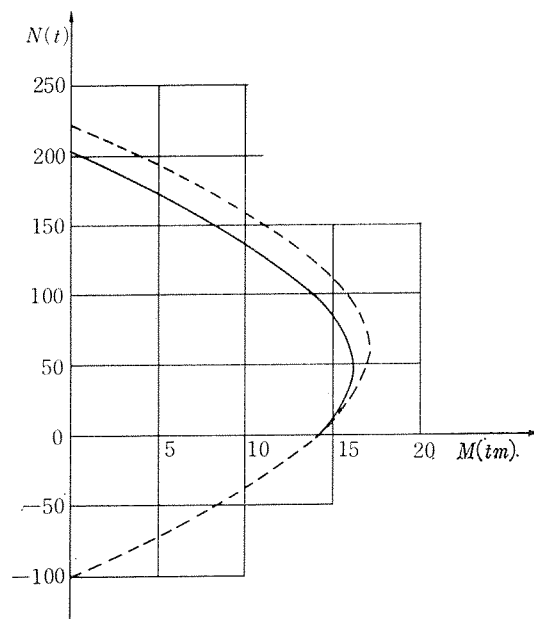
$$\begin{aligned} \cos \varphi_{0e} &= (\Delta \varepsilon_{p\mu} / 3.5 - \rho) / (1 + \Delta \varepsilon_{p\mu} / 3.5) = 0.0026 \\ \varphi_{0e} &= 89^\circ 52' \\ 0 < \varphi_{0e} < 56^\circ 38' & \Delta \varepsilon_p(\pi) &= -10\% \\ & \text{適用式 (33.a), (33.b)} \\ 56^\circ 38' < \varphi_{0e} < 89^\circ 52' & -\Delta \varepsilon_{p\mu} < \Delta \varepsilon_p(\pi) &\leq -10\% \\ & \text{適用式 (36.a), (36.b)} \\ 89^\circ 52' < \varphi_{0e} < 180^\circ & \Delta \varepsilon_p(\pi) > -\Delta \varepsilon_{p\mu} \\ & \text{適用式 (37.a), (37.b)} \end{aligned}$$

以上の適用式で n_p , m_p が求められる。

中立軸が断面外にある場合は $\varepsilon_{ce}'(\pi)$ を $0 \sim 2\%$ 間で変え、式 (13.a), (13.b) で n_{ce}' , m_{ce} が、式 (26.a), (26.b) で n_{ci}' , m_{ci} が、式 (39.a), (39.b) で n_p , m_p が、それぞれ求められる。

よって式 (41) を用いて n , m または N' , M の関係が求められる。これを 図-9 の点線で示す。次に不測の偏心量を 2 cm または $2r_e/30 = 1.3$ cm, すなわち 2 cm を考慮に入れて、 $0.02 N \text{ tm}$ だけ M を減少させ、最終 Interaction Curve として 図-9 の実線のように与えられる。

図-9 PCぐいの Interaction Curve



参 考 文 献

- 1) 楨田：PCぐいの破壊荷重の計算法，プレストレスト コンクリート Vol. 8, No. 3 (1966. 8)
- 2) 六車・富田：PCぐいの断面の力学的性質に関する理論的研究，セメント技術年報，昭和 42 年度版
- 3) 末永：PCパイプハンドブック 7章PCぐいの設計
- 4) 三浦：軸方向荷重をうけるPCぐいの破壊曲げモーメント，セメント コンクリート，1971 年 7 月
- 5) 岡田・平沢：PCぐいの破壊時およびひびわれ時の $P \sim M$ 相関曲線，コンクリートパイプ No. 3, 1971 年 10 月
- 6) 宮崎・井上：終局強度設計法によるコンクリート円形曲げ部材断面の検討，国鉄構造物設計資料，1971 年 9 月 No. 17
- 7) コンクリート構造物設計施工国際指針，鹿島出版会 1972. 8. 2・受付

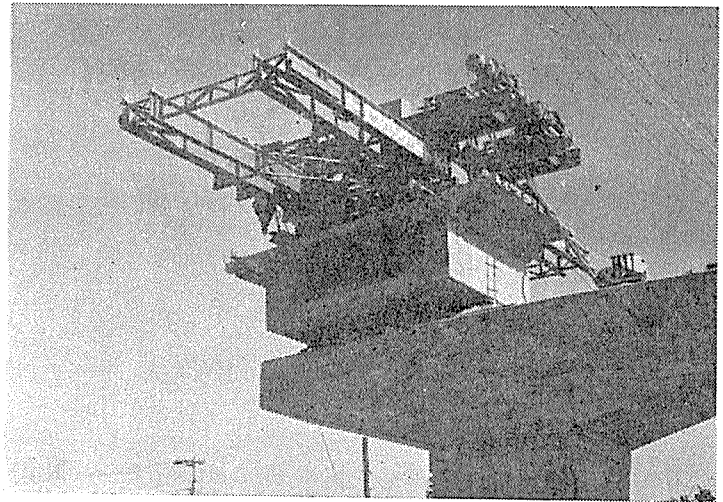
転勤（または転居）ご通知のお願い

勤務箇所（会誌発送，その他通信宛先）の変更のご通知をお願いいたします。

会誌発送その他の場合，連絡先が変更になっていて，お知らせがないため郵便物の差しもどしを受けることがたびたびあります。不着の場合お互いに迷惑になるばかりでなく，当協会としましては二重の手数と郵送料とを要することになりますので，変更の場合はハガキで結構ですから，ただちにご一報下さるようお願いいたします。

ご転勤前後勤務先に送ったものがそのまま転送されないでご入手にできない場合は，当方として責任を負いかねますからご了承願います。

PC架設機 の 設計・製作



プレキャストブロック架設機
(首都高速3号線)

三信工業株式会社

東京都千代田区神田錦町1-4 (滝本ビル5階)

TEL (294) 5131・5132

PAT No. 467154
532878

LPPセンターホール
ジャッキ

PC同時緊張機

PAT No. 569584

PC・各工法用ジャッキ・ポンプ・油圧機器・試験機

OX山本扛重機株式会社

東京都中央区新富1-6-3
TEL 東京(551)局2115~9