軸方向荷重をうけるPCくいの破壊曲げモーメント

三　浦　一　郎

1. まえがき

遠心力で締め固めたプレテンション方式のプレストレストコンクリートくいは，わが国では，昭和37年に首都高速道路公団の高速1号線において使用されたのが最初であるが，その後数年間に目ざましい発展をとげ，昭和44年の使用量は全国で約230万トン，すなわち長い歴史を有する鉄筋コンクリートくいと肩を並べるまでに到ったのである。

その間，昭和43年には，プレテンション方式遠心力プレストレストコンクリートくいJISA 5335および，ポストテンション方式遠心力プレストレストコンクリートくいJISA 5336が制定され，需要増大に拍車をかけた観がある。

これは，もちろんＰＣくいの持つ各種のすぐれた特性によることはいうまでもないが，使用にあたってこれらの特性が十分生かされるような設計および施工については，さらに深い検討がなされることが望まれる。

ここでは，これらＰＣくいが，軸方向荷重と水平力または曲げモーメントを受けたときの破壊に対する安全度を検討するために有用な軸力と破壊曲げモーメントの関係（N-Mu Interaction Curve）を求める方法について述べる。

なお，この Interaction Curve の求め方については，これまでいくつか提案されているが，[1][2]くいの壁厚のとり方，コンクリートの応力分布，ＰＣ鋼材の応力とひずみの関係等においてこの報告とは相当に異なっている。

2. 記　　号（図-1 参照）

γ_0	外側半径
γ_i	内側半径
γ_p	ＰＣ鋼線位置半径
A_c	コンクリートの純断面積
A_p	ＰＣ鋼線の断面積
E_c	コンクリートのヤング係数
E_p	ＰＣ鋼線のヤング係数
σ_{ce}	有効プレストレス
σ_{cu}	コンクリートの圧縮強度
ε_{cu}	コンクリートの圧縮破壊ひずみ
ε_{cy}	コンクリートの降伏点ひずみ$=\sigma_{cu}/E_C$
σ_{pi}	中立軸位置におけるＰＣ鋼線の応力度
ε_{pi}	〃　ひずみ度
σ_p	引張側最遠のＰＣ鋼線の応力度
ε_p	〃　ひずみ度
ε_{p0}	圧縮側最遠のＰＣ鋼線のひずみ度

σ_{py}　ＰＣ鋼線の降伏点応力度
ε_{py}　〃　ひずみ度
α_0　中立軸位置における外側円の中心半角
α_i　〃　内側円の中心半角
α_{0y}　コンクリートが降伏点に達した位置の外側円の中心半角
α_{iy}　コンクリートが降伏点に達した位置の内側円の中心半角
α_p　中立軸位置におけるＰＣ鋼線配置円の中心半角
α_{py}　ＰＣ鋼線が降伏点に達した位置におけるＰＣ鋼線配置円の中心半角
α_{0py}　圧縮側最遠のＰＣ鋼線位置の外側に，ＰＣ鋼線が引張降伏点に達する位置があると考えられる時，その位置における外側円の中心半角
C_1　コンクリートの応力度が σ_{cu} に達した部分の全圧縮力
C_2　〃　弾性範囲内にある部分の全圧縮力
T_p　ＰＣ鋼線の全引張力
N　軸方向圧縮力 $=C_1+C_2-T_p$
M_{c1}　C_1 による曲げモーメント（図心軸に対する）
M_{c2}　C_2　〃
M_p　T_p　〃
M_u　断面の破壊曲げモーメント $=M_{c1}+M_{c2}-M_p$

3. 計算上の仮定（図-1 参照）

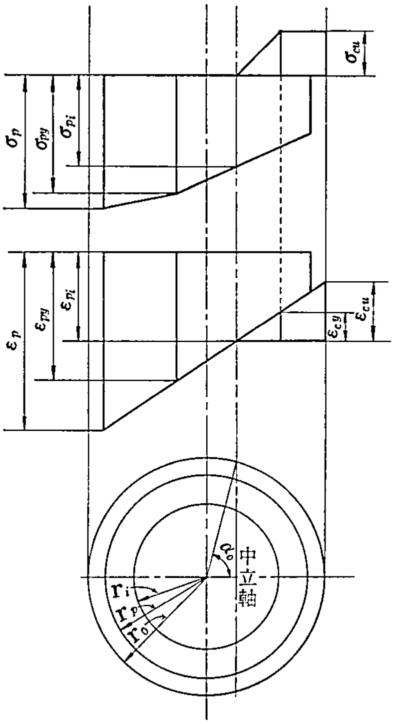
1) ＰＣくいの断面は，破壊に至るまで平面を保持するものとする。

2) 同一円周上に均等に配置されたＰＣ鋼材は，等断面積の薄肉の鋼管とみなす。

3) 圧縮側コンクリートのひずみが，圧縮破壊ひずみに達したときＰＣくいは曲げ破壊をおこすものとする。

4) コンクリートの応力ひずみ曲線を図-2 のように仮定する。すなわち，コンクリートのひずみ ε が ε_{cy} を超えない範囲では，応力はひずみに比例するものとし，$\varepsilon>\varepsilon_{cy}$ では応力は一定で，その値は σ_{cu} とする。

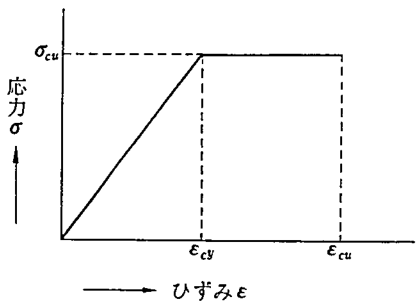
5) ＰＣ鋼線の応力ひずみ曲線を 図-3 のように仮定する。
すなわち，ＰＣ鋼線のひずみが ε_{py} を超えない範囲では，応力はひずみに比例するものとし，中立軸から引張側の最も遠い位置にあるＰＣ鋼線のひずみ ε_p が ε_{py} を超えるときは，ＰＣ鋼線の



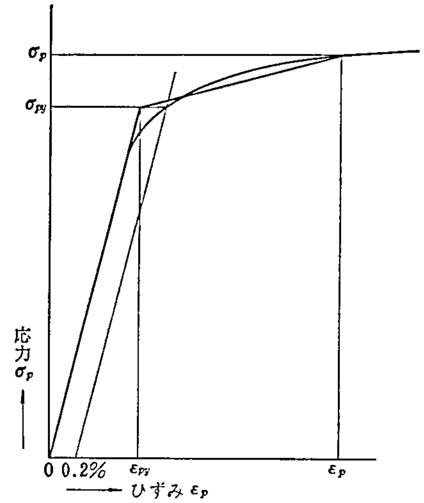
図—1

応力ひずみ曲線上にてε_pに相当する応力σ_pを求め，これを最遠のＰＣ鋼線の応力とし，中間に存在するＰＣ鋼線の応力はσ_{py}とσ_pを結ぶ直線上にあるものとする。

6) 断面の中立軸とは，コンクリートの圧縮ひずみが０となる面をいう。



図—２



図—３

4. 軸方向力と破壊曲げモーメント

4.1 コンクリート

（Ⅰ） $\pi \geqq \alpha_0 > 0$ （図-４）

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\gamma_0-\gamma_0\cos\alpha_0}=\frac{\varepsilon_{cy}}{\gamma_0\cos\alpha_{0y}-\gamma_0\cos\alpha_0}$$

$$\cos\alpha_{0y}=\cos\alpha_0+\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}(1-\cos\alpha_0)$$

$$=\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}+\left(1-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\cos\alpha_0$$

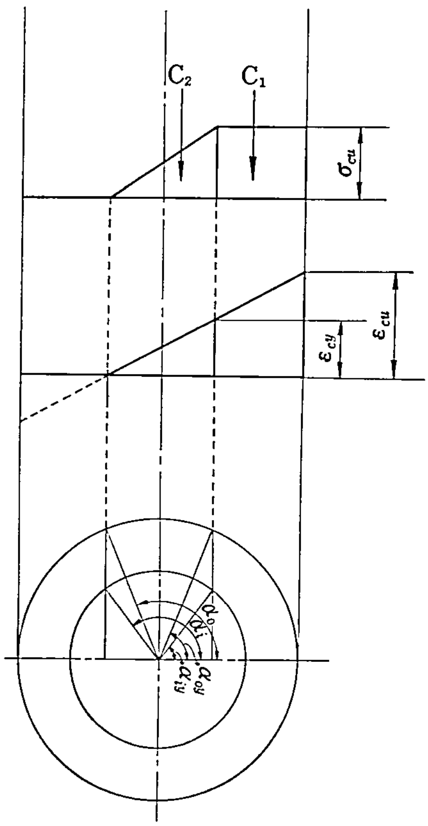
$$\therefore\quad \alpha_{0y}=\cos^{-1}\left\{\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}+\left(1-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\cos\alpha_0\right\}$$

$$\gamma_0\cos\alpha_0=\gamma_i\cos\alpha_i$$

$$\therefore\quad \alpha_i=\cos^{-1}\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_i}\cos\alpha_0\right)$$

$$\gamma_0\cos\alpha_{0y}=\gamma_i\cos\alpha_{iy}$$

$$\therefore\quad \alpha_{iy}=\cos^{-1}\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_i}\cos\alpha_{0y}\right)$$



図—４

$$C_1 = -2\int_{\gamma_o}^{\gamma_o \cos \alpha_{0y}} \sigma_{cu}\, y\, dx + 2\int_{\gamma_i}^{\gamma_i \cos \alpha_{iy}} \sigma_{cu}\, y dx$$

$$= 2\int_0^{\alpha_{oy}} \sigma_{cu}\, \gamma_0^2 \sin^2 \theta d\theta - 2\int_0^{\alpha_{iy}} \sigma_{cu}\, \gamma_i^2 \sin^2 \theta d\theta$$

$$= \gamma_0^2\, \sigma_{cu} \left\{ \alpha_{0y} - \sin \alpha_{0y} \cos \alpha_{0y} - \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^2 (\alpha_{iy} - \sin \alpha_{iy} \ \cos \alpha_{iy}) \right\}$$

$$M_{c1} = -2\int_{\gamma_o}^{\gamma_o \cos \alpha_{oy}} \sigma_{cu} yx\, dx + 2\int_{\gamma_i}^{\gamma_i \cos \alpha_{iy}} \sigma_{cu}\, yx\ dx$$

$$= 2\gamma_0^3\, \sigma_{cu} \int_0^{\alpha_{oy}} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta - 2\gamma_i^3\, \sigma_{cu} \int_0^{\alpha_{iy}} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta$$

$$= \frac{2}{3}\gamma_0^3\, \sigma_{cu} \left\{ \sin^3 \alpha_{0y} - \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^3 \sin^3 \alpha_{iy} \right\}$$

$$\frac{\varepsilon_{cx}}{\gamma_0 \cos \theta - \gamma_0 \cos \alpha_0} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\gamma_0 - \gamma_0 \cos \alpha_0}$$

$$\varepsilon_{cx} = \frac{\varepsilon_{cu}}{1 - \cos \alpha_0} (\cos \theta - \cos \alpha_0)$$

$$\sigma_{cx} = E_c\, \varepsilon_{cx}$$

$$= \frac{E_c\, \varepsilon_{cu}}{1 - \cos \alpha_0} (\cos \theta - \cos \alpha_0)$$

$$\frac{\varepsilon_{cix}}{\gamma_i \cos \theta - \gamma_0 \cos \alpha_0} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\gamma_0 - \gamma_0 \cos \alpha_0}$$

$$\varepsilon_{cix} = \frac{\varepsilon_{cu}}{1 - \cos \alpha_0} \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \cos \theta - \cos \alpha_0 \right)$$

$$\sigma_{cix} = E_c\, \varepsilon_{cix}$$

$$= \frac{E_c\, \varepsilon_{cu}}{1 - \cos \alpha_0} \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \cos \theta - \cos \alpha_0 \right)$$

$$C_2 = -2\int_{\gamma_o \cos \alpha_{oy}}^{\gamma_o \cos \alpha_o} \sigma_{cx}\, y dx + 2\int_{\gamma_i \cos \alpha_{iy}}^{\gamma_i \cos \alpha_i} \sigma_{cix}\, y dx$$

$$=\frac{2E_c\,\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\int_{\alpha_{0y}}^{\alpha_0}\gamma_0^2(\cos\theta-\cos\alpha_0)\,\sin^2\theta\,d\theta-\frac{2E_c\,\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\int_{\alpha_{iy}}^{\alpha_i}\gamma_i^2\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\cos\theta-\cos\alpha_0\right)\sin^2\theta\,d\theta$$

$$=\frac{2\gamma_0^2E_c\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\Big[\frac{1}{3}(\sin^3\alpha_0-\sin^3\alpha_{0y})-\frac{\cos\alpha_0}{2}(\alpha_0-\alpha_{0y}-\sin\alpha_0\cos\alpha_0+\sin\alpha_{0y}\cos\alpha_{0y})$$

$$-\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^2\left\{\frac{1}{3}\frac{\gamma_i}{\gamma_0}(\sin^3\alpha_i-\sin^3\alpha_{iy})-\frac{\cos\alpha_0}{2}(\alpha_i-\alpha_{iy}-\sin\alpha_i\cos{}_i+\sin\alpha_{iy}\cos\alpha_{iy})\right\}\Big]$$

$$M_{c2}=-2\int_{\gamma_0\cos\alpha_{0y}}^{\gamma_0\cos\alpha_0}\sigma_{cx}\,yxdx+2\int_{\gamma_i\cos\alpha_{iy}}^{\gamma_i\cos\alpha_i}\sigma_{cix}\,yxdx$$

$$=\frac{2E_c\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\int_{\alpha_{0y}}^{\alpha_0}\gamma_0^3(\cos\theta-\cos\alpha_0)\sin^2\theta\,\cos\theta d\theta$$

$$-\frac{2E_c\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\int_{\alpha_{iy}}^{\alpha_i}\gamma_i^3\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\cos\theta-\cos\alpha_0\right)\sin^2\theta\,\cos\theta d\theta$$

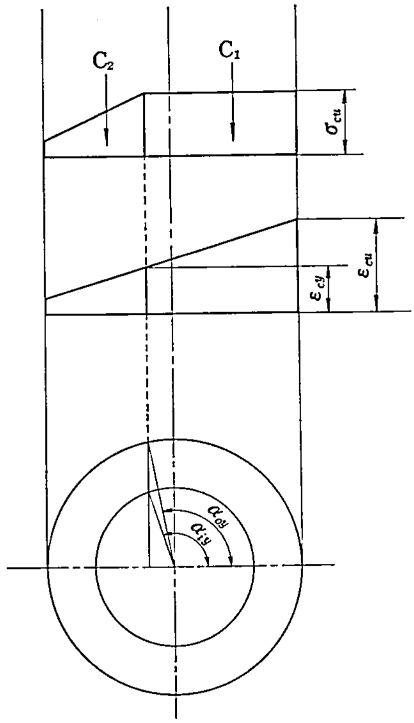
$$=\frac{2\gamma_0^3E_c\,\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\Big[\frac{1}{8}(\alpha_0-\alpha_{0y})-\frac{1}{32}(\sin4\alpha_0-\sin4\alpha_{0y})-\frac{1}{3}\cos\alpha_0(\sin^3\alpha_0-\sin^3\alpha_{0y})$$

$$-\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^3\left\{\frac{1}{8}\frac{\gamma_i}{\gamma_0}(\alpha_i-\alpha_{iy})-\frac{1}{32}\frac{\gamma_i}{\gamma_0}(\sin4\alpha_i-\sin4\alpha_{iy})-\frac{1}{3}\cos\alpha_0(\sin^3\alpha_i-\sin^3\alpha_{iy})\right\}\Big]$$

但し

$\gamma_0>\gamma_0\cos\alpha_0\geq\gamma_i$	のとき	$\alpha_i=0$
$\gamma_i>\gamma_0\cos\alpha_0\geq-\gamma_i$	のとき	$\alpha_i=\cos^{-1}\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_i}\cos\alpha_0\right)$
$-\gamma_i>\gamma_0\cos\alpha_0\geq-\gamma_0$	のとき	$\alpha_i=\pi$
$\gamma_0\geq\gamma_0\cos\alpha_{0y}\geq\gamma_i$	のとき	$\alpha_{iy}=0$
$\gamma_i>\gamma_0\cos\alpha_{0y}\geq-\gamma_i$	のとき	$\alpha_{iy}=\cos^{-1}\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_i}\cos\alpha_{0y}\right)$
$-\gamma_i>\gamma_0\cos\alpha_{0y}\geq-\gamma_0$	のとき	$\alpha_{iy}=\pi$

(II)　$\pi\geqq\alpha_{0y}\geqq\cos^{-1}\left(\frac{2\,\varepsilon_{cy}-\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}}\right)$　(図—5)



図—5

$$C_1=\gamma_0^2\,\sigma_{cu}\left\{\alpha_{0y}-\sin\alpha_{0y}\cos\alpha_{0y}-\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^2(\alpha_{iy}-\sin\alpha_{iy}\cos\alpha_{iy})\right\}$$

$$M_{c1}=\frac{2}{3}\gamma_0^3\,\sigma_{cu}\left\{\sin^3\alpha_{0y}-\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^3\sin^3\alpha_{iy}\right\}$$

$$C_2=\frac{2\gamma_0^2E_c\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_{0y}}\left[-\frac{1}{3}\left(1-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\sin^3\alpha_{0y}-\frac{1}{2}\left(\cos\alpha_{0y}-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)(\pi-\alpha_{0y}+\sin\alpha_{0y}\cos\alpha_{0y})\right.$$
$$\left.-\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^2\left\{-\frac{1}{3}\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\left(1-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\sin^3\alpha_{iy}-\frac{1}{2}\left(\cos\alpha_{0y}-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)(\pi-\alpha_{iy}+\sin\alpha_{iy}\cos\alpha_{iy})\right\}\right]$$

$$M_{c2}=\frac{2\gamma_0^3E_c\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_{0y}}\left[\left(1-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\left\{\frac{1}{8}(\pi-\alpha_{0y})+\frac{1}{32}\sin 4\alpha_{0y}\right\}+\frac{1}{3}\left(\cos\alpha_{0y}-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\sin^3\alpha_{0y}\right.$$
$$\left.-\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^3\left\{\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\left(1-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\left(\frac{\pi-\alpha_{iy}}{8}+\frac{\sin 4\alpha_{iy}}{32}\right)+\frac{1}{3}\left(\cos\alpha_{0y}-\frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cu}}\right)\sin^3\alpha_{iy}\right\}\right]$$

但し

$\gamma_0\geq\gamma_0\cos\alpha_{0y}\geq\gamma_i$　のとき　$\alpha_{iy}=0$

$\gamma_i>\gamma_0\cos\alpha_{0y}\geq-\gamma_i$　のとき　$\alpha_{iy}=\cos^{-1}\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_i}\cos\alpha_{0y}\right)$

$-\gamma_i>\gamma_0\cos\alpha_{0y}\geq-\gamma_0$　のとき　$\alpha_{iy}=\pi$

4.2 ＰＣ鋼線

$$\varepsilon_{pi}=A_c\sigma_{cc}\left(\frac{1}{E_cA_c}+\frac{1}{E_pA_p}\right)$$

$$\sigma_{pi}=E_p\varepsilon_{pi}$$

（Ⅰ） $\pi\geq\alpha_0>0$

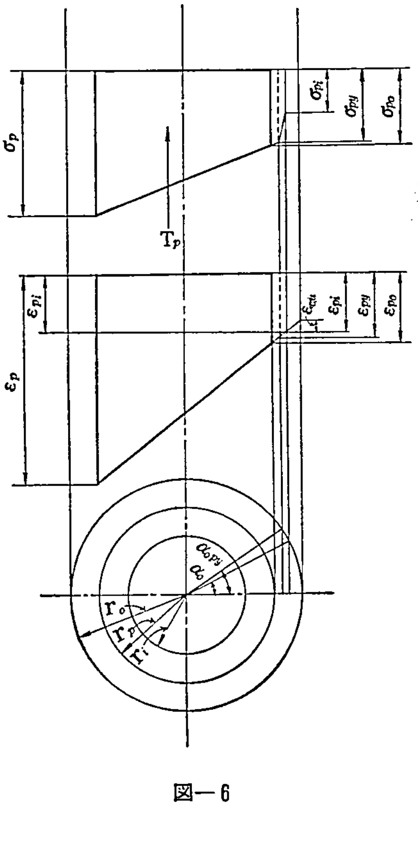
$$\varepsilon_p=\varepsilon_{pi}+\frac{\cos\alpha_0+\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}}{1-\cos\alpha_0}\varepsilon_{cu}$$

$\varepsilon_{py}\geq\varepsilon_p$ ならば　$\sigma_p=E_p\varepsilon_p$

$\varepsilon_p>\varepsilon_{py}$ ならば　σ_p=PC鋼線の応力ひずみ曲線にて，ε_p に相当する応力として求める

$$\varepsilon_{p0}=\varepsilon_{pi}+\frac{\cos\alpha_0-\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}}{1-\cos\alpha_0}\varepsilon_{cu}$$

(1) $\varepsilon_{p0}\geq\varepsilon_{py}$　（図－6）



図－6

$$\cos\alpha_{0py}=\frac{\varepsilon_{cu}+\varepsilon_{py}-\varepsilon_{pi}}{\varepsilon_{cu}}\cos\alpha_0-\frac{\varepsilon_{py}-\varepsilon_{pi}}{\varepsilon_{cu}}$$

$$\frac{\sigma_{px}-\sigma_{py}}{\gamma_0\cos\alpha_{0py}-\gamma_p\cos\theta}=\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\gamma_p+\gamma_0\cos\alpha_{0py}}$$

$$\sigma_{px}=\sigma_{py}+\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}+\cos\alpha_{0py}}\left(\cos\alpha_{0py}-\frac{\gamma_p}{\gamma_0}\cos\theta\right)$$

$$T_p=2\int_0^{\pi}\sigma_{px}\,\gamma_p t_p d\theta$$

$$=2\gamma_p t_p\int_0^{\pi}\left\{\sigma_{py}+\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}+\cos\alpha_{0py}}\left(\cos\alpha_{0py}-\frac{\gamma_p}{\gamma_0}\cos\theta\right)\right\}d\theta$$

$$=A_p\left\{\sigma_{py}+\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}+\cos\alpha_{0py}}\cos\alpha_{0py}\right\}$$

$$M_p=2\int_0^{\pi}\sigma_{px}\gamma_p^2 t_p\cos\theta\cdot d\theta$$

$$=-2\frac{\gamma_p^3}{\gamma_0}t_p\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}+\cos\alpha_{0py}}\left[\frac{1}{2}(\theta+\sin\theta\ \cos\theta)\right]_0^{\pi}$$

$$=-\frac{A_p}{2}\frac{\gamma_p^2}{\gamma_0}\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\dfrac{\gamma_p}{\gamma_0}+\cos\alpha_{0py}}$$

(2) $\varepsilon_{py}>\varepsilon_{p0}$ (図-7)

$$\cos\alpha_{py}=\frac{\gamma_0}{\gamma_p}\left\{\frac{\varepsilon_{cu}+\varepsilon_{py}-\varepsilon_{pi}}{\varepsilon_{cu}}\cos\alpha_0-\frac{\varepsilon_{py}-\varepsilon_{pi}}{\varepsilon_{cu}}\right\}$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\gamma_0-\gamma_0\cos\alpha_0}=\frac{\varepsilon_{pi}-\varepsilon_{px1}}{\gamma_p\cos\theta_1-\gamma_0\cos\alpha_0}$$

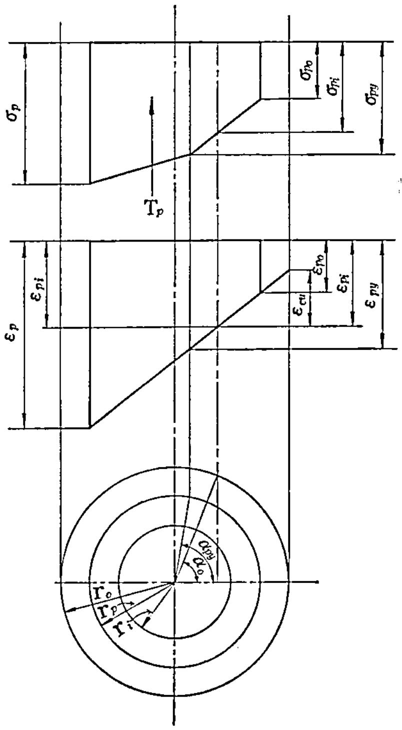
$$\varepsilon_{px1}=\varepsilon_{pi}+\frac{\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\left(\cos\alpha_0-\frac{\gamma_p}{\gamma_0}\cos\theta_1\right)$$

$$\sigma_{px1}=E_p\varepsilon_{px1}$$

$$=\sigma_{pi}+\frac{E_p\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\left(\cos\alpha_0-\frac{\gamma_p}{\gamma_0}\cos\theta_1\right)$$

$$\frac{\sigma_{px2}-\sigma_{py}}{\gamma_p\cos\alpha_{py}-\gamma_p\cos\theta_2}=\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{\gamma_p+\gamma_p\cos\alpha_{py}}$$

$$\therefore\quad\sigma_{px2}=\sigma_{py}+\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{1+\cos\alpha_{py}}(\cos\alpha_{py}-\cos\theta_2)$$



図—7

$$T_p=2\gamma_p t_p\int_0^{\alpha_{py}}\sigma_{px1}\,d\theta_1+2\gamma_p t_p\int_{\alpha_{py}}^{\pi}\sigma_{px2}\,d\theta_2$$

$$=\frac{A_p}{\pi}\Big[\sigma_{pi}\,\alpha_{py}+\frac{E_p\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\Big(\alpha_{py}\ \cos\alpha_0-\frac{\gamma_p}{\gamma_0}\sin\alpha_{py}\Big)$$

$$+\sigma_{py}(\pi-\alpha_{py})+\frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{1+\cos\alpha_{py}}\Big\{(\pi-\alpha_{py})\cos\alpha_{py}+\sin\alpha_{py}\Big\}\Big]$$

$$M_p=2\gamma_p{}^2t_p\Big\{\int_0^{\alpha_{py}}\sigma_{px1}\,d\theta_1+\int_{\alpha_{py}}^{\pi}\sigma_{px2}\,d\theta_2\Big\}$$

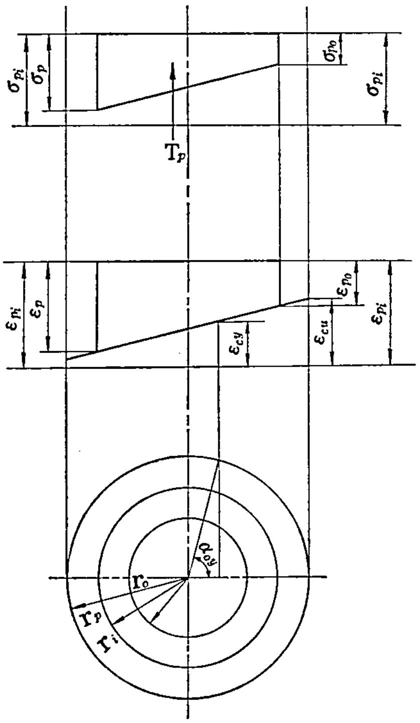
$$=\frac{A_p\gamma_p}{\pi}\Big[\sigma_{pi}\ \sin\alpha_{py}+\frac{E_p\varepsilon_{cu}}{1-\cos\alpha_0}\Big\{\cos\alpha_0\ \sin\alpha_{py}-\frac{1}{2}\frac{\gamma_p}{\gamma_0}(\alpha_{py}+\sin\alpha_{py}\ \cos\alpha_{py})\Big\}$$

$$-\sigma_{py}\sin\alpha_{py}-\frac{1}{2}\ \frac{\sigma_p-\sigma_{py}}{1+\cos\alpha_{py}}\ (\pi-\alpha_{py}+\sin\alpha_{py}\ \cos\alpha_{py})\ \Big]$$

但し　$\varepsilon_{py}\geqq\varepsilon_p$　のとき　$\alpha_{py}=\pi$

（Ⅱ） $\alpha_0 > \pi$ （図-8）

$$\pi \geqq \alpha_{0y} > \cos^{-1}\left(\frac{2\varepsilon_{cy}-\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}}\right)$$



図―8

$$T_p = A_p\left\{E_p(\varepsilon_{pi}-\varepsilon_{cu}) + \frac{E_p(\varepsilon_{cu}-\varepsilon_{cy})}{1-\cos\alpha_{0y}}\right\}$$

$$M_p = -\frac{A_p}{2}\cdot\frac{\gamma_p{}^2}{\gamma_0}\cdot\frac{E_p(\varepsilon_{cu}-\varepsilon_{cy})}{1-\cos\alpha_{0y}}$$

（Ⅲ） 軸方向圧縮力のみ作用するとき

$T_p = A_pE_p(\varepsilon_{pi}-\varepsilon_{cu})$

$M_p = 0$

4.3 計算方法

上記の各計算式を用いて，ＰＣくいに軸方向力が作用するときの破壊曲げモーメントを求めることができるが，その計算方法はつぎのとおりである。

(1) $\pi \geq \alpha_0 > 0$ の範囲内では，α_0 をパラメーターとし，適当間隔に α_0 を選定する。

(2) α_0 の各の値に対して，C_1，M_{c1}，C_2，M_{c2}，T_p，M_p を計算する。

(3) $\alpha_0 > \pi$ に対しては，α_{0y} をパラメーターとし，
$\pi \geq \alpha_{0y} > \cos^{-1}\left(\frac{2\varepsilon_{cy} - \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}}\right)$ の範囲で適当間隔に α_{0y} を選定する。

(4) α_{0y} の各の値に対して，C_1，M_{c1}，C_2，M_{c2}，T_p，M_p を計算する。

(5) α_0 および α_{0y} の各の値に対して，つぎの式から軸方向力 N と破壊曲げモーメント M_u を計算する

$$N = C_1 + C_2 - T_p$$

$$M_u = M_{c1} + M_{c2} - M_p$$

(6) N, M_u を直交する座標軸として，上記の計算結果をプロットすれば N—M_u 図ができる。この図から，任意の軸方向力Nが作用するときの破壊曲げモーメント M_u を求めることができる。

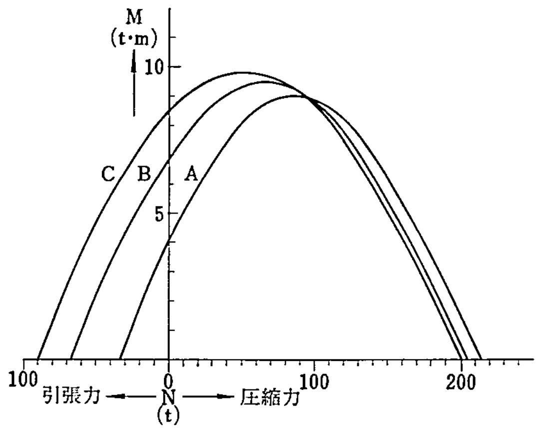
この計算を行なう場合，つぎの諸数値が与えられていなければならない。

γ_0，γ_i，γ_p，A_c，A_p，E_c，E_p，σ_{ce}，σ_{cu}，ε_{cu}，σ_{py}
ＰＣ鋼線の応力ひずみ曲線

なお，JIS A 5335（プレテンション方式遠心力プレストレストコンクリートくい）に規定されている製品の破壊曲げモーメントは $N=0$ すなわち $C_1+C_2=T_p$ のときの M_u である。この M_u は前記の $N-M_u$ 図から容易に求められるが，計算によって求めようとするときは，いくつかのα_0（または α_{0y}）に対する Nを計算し試的に$N=0$ となるときの α_0（または α_{0y}）を求め，これを M_u の式に代入すればよい。

5. 計　算　例

プレテンション方式遠心力プレストレストコンクリートくい（JIS A 5335-1968）に適合するＰＣくいのうち，外径 300 mm のＡ，ＢおよびＣ種についての計算結果は図—9のとおりである。



図—9

ただし，これらのくいの設計条件は表―1のとおりである。

外　径	厚　さ	種　別	ひ　び　わ　れ 曲げモーメント	破　　　壊(1) 曲げモーメント	P　C　鋼　線(2)		有効プレストレス
					直　径	本　数	
mm	mm		t•m	t•m	mm		kg/cm²
300	60	A	2.5	3.75	7	6	47
		B	3.5	6.3	7	12	86
		C	4.0	8.0	7	16	108

(注) (1) 破壊曲げモーメントは，ひびわれ曲げモーメント（規格値）に対し，それぞれ，A種は1.5倍，B種は1.8倍，C種は2.0倍したものである。

(2) PC鋼線は2種で，引張荷重5,950kg（155 kg/mm²）以上，降伏点荷重 5,200kg（135 kg/mm²）以上，伸び5％以上，レラクセーション3.5％のものである。

また，計算に用いた諸数値はつぎのとおりである。

$\gamma_0=15\text{cm}$,　　$\gamma_i=9\text{ cm}$,　　$\gamma_p=12\text{ cm}$

$A_c=452\text{ cm}^2$,　　$A_p=$ A種 2.31 cm^2,　　B種 4.62 cm^2,　　C種 6.16 cm^2

$E_c=400{,}000\text{ kg/cm}^2$,　　$E_p=2{,}000{,}000\text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{ce}=$ A種 47 kg/cm^2,　　B種 86 kg/cm^2,　　C種 108 kg/cm^2

$\sigma_{cu}=500\text{ kg/cm}^2$,　　$\varepsilon_{cu}=2{,}500\times10^{-6}$

$\sigma_{py}=13{,}500\text{ kg/cm}^2$,　　$\sigma_{pu}=15{,}500\text{ kg/cm}^2$

6. む す び

計算式がいくらか繁雑であるとのそしりを免かれないであろうが，電子計算機にかければ，1分足らずですむ。前記計算例も電算機で求めたものである。コンクリートの仮定した応力ひずみ曲線も，あまり簡略化しすぎたきらいもあるが，実用的には，それ程重大な誤謬をおかしているとは思われない。それよりも ε_{cu} や σ_{cu} の実状に合う値を採ることが重要である。PC鋼線についてもほぼ同様のことがいえる。前記の計算例に用いたこれらの値は規格値すなわち最低限の保証値であるから，一般製品の破壊曲げモーメントはこの式による計算値を上廻るのが普通である。

なお，補強鉄筋のある場合の軸力と破壊曲げモーメント，軸力とひびわれ曲げモーメントの Interaction Curve の求め方についてはつぎの機会にゆずる。

参 考 文 献

(1) 槇田：PCくいの破壊荷重の計算法，プレストレスコンクリート Vol. 8, No. 3 (1966, 8)

(2) 六車，富田：PCく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年版