報　告

コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による PC材のプレストレス力減退一近似理論解

坂　静雄
六車　熙

1. 諸　言

プレストレスト コンクリート部材（以下PC部材と略記）は，コンクリートのクリープおよび乾燥収縮，PC鋼材のクリープ（またはレラクセーション）によって，導入されたプレストレス力が時間の経過とともに減少する。この問題に関する研究はすでに数多く発表されており，部材の実用設計にはプレストレス有効率としてポストテンション材では $\eta=0.85$，プレテンション材では $\eta=0.80$ を用いて大差ないことが確認されている。しかし，このような有効率仮定値を用いて設計されたPC部材の，実際のプレストレス力減退量を知って有効率仮定値が正当であるかどうかを検査しておくことは，設計部材の安全性を，より一そう明確にするために必要であり，この意味からプレストレス力減退量の理論計算式の研究を行なう必要があるわけである。

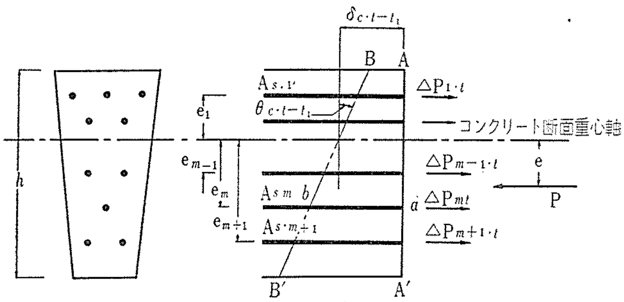
これに関する理論研究は，R. Schwarz[1]，A.E. Komendant[2]，K. Sattler[3),4)]，H. Baldauf[5]，B. Friz[6]，A.Habel[7]，W. Säger[8]，著者[9)~12)] などにより，厳密解または近似解が発表されている。これらの理論式のうち任意多段配置PC鋼材を持つPC断面（以下任意断面と略記）に適用できる一般解としては，K. Sattler[3),4)]，H. Baldauf[5] および，著者発表の理論式[9)~12)] だけであり，他はいずれもある特定のPC鋼材配置を持つ特定断面に対してだけ厳密理論式となるか，または，一般断面に適用すれば，近似度が悪くなるおそれのあるものが多い。すなわち，ある特定の断面を持つPC部材に適用するときには厳密解または近似解となる理論式を，一般断面に適用することは理論上きわめて不合理である。一方，一般断面に適用できる理論解（たとえば，著者理論式）は，計算式が複雑で数値計算の手間がかかって実用的でない。本研究はこのような意味から一般PC断面に対しコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力減退の近似解法を試みたものである。

2. 理論解誘導の方針

理論解誘導にあたってPC静定部材におけるコンクリート断面に作用する軸方向力および曲げモーメントについて考えてみよう。問題を簡単にするために，図—1(a)に示す無応力補強鉄筋を持たない任意PC断面に，プレストレス力だけが作用している場合について考えることにする。同図(b)において時間 t_1 のとき初プレストレス力 P が偏心距離 e（図でコンクリート断面重心軸より下側に正）で導入された直後の断面位置をA B，その後における任意時間 t のときの位置を A′B′ とし，かつ A B B′A′ は時間 $t-t_1$ の間におこった単位部材長に対する，コンクリートのクリープひずみを表わすものとする。いま，コンクリートとPC鋼材との間の平面保持を仮定すれば（この仮定はポストテンション材でグラウトを行なわないものには，特別の場合を除いて適用できない），時間 t_1 で A B の位置にあった各段PC鋼材断面は，時間 t において A′B′ の位置になければならない。すなわち，任意段 m におけるPC鋼材は時間 $t-t_1$ の間に A B B′A′ ではさまれるひずみ ab だけ強制縮みがおこるわけで，PC鋼材のクリープ（またはレラクセーション）を無視すれば，上記強制縮みをおこすのに必要な弾性圧縮力 $\varDelta P_{m\cdot t}$ が第 m 段目PC鋼材におこるプレストレス力減退である。一方，コンクリート断面に対しては $\varDelta P_{m\cdot t}$ は図—1(b)に示すように第 m 段目PC鋼材配置位置に働く引張力となる。したがって，任意時間 t においてコンクリート断面に作用する軸圧力は，プレストレス力導入直後 t_1 から持続作用する初プレストレス力 P（偏心距離 e），および，各段PC鋼材配置位置に働く各段PC鋼材のプレストレス力減退量 $\varDelta P_{m\cdot t}$ に等しい引張力群とに分けられる。引張力群 $\varDelta P_{m\cdot t}$ を各段PC鋼材について加算した量

$$\varDelta P_t=\sum_{m}\varDelta P_{m\cdot t}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

図—1



(a)　(b)

が全プレストレス力減退量（ただし $\varDelta P_{t=t_1}=0$）であり，コンクリート断面重心軸に関する引張力群 $\varDelta P_{m\cdot t}$ の曲げモーメント和

$$\varDelta M_t=\sum_m \varDelta P_{m\cdot t}\cdot e_m \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

が全プレストレス モーメント減退量（ただし，$\varDelta M_{t=t_1}=0$）である。ただし，e_m は第 m 段ＰＣ鋼材位置とコンクリート断面重心軸との距離で，**図―1** (**b**) において重心軸より下側に正，したがって，$\varDelta M_t$ は初プレストレス モーメント

$$M=P\cdot e \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

と逆方向を正とする。

図―1 (**b**) において時間 $t-t_1$ 間におこるコンクリート断面重心軸における軸方向ひずみ $\delta_{c\cdot t-t_1}$ および回転ひずみ $\theta_{c\cdot t-t_1}$ により，第 m 段目ＰＣ鋼材におけるプレストレス力減退量 $\varDelta P_{m\cdot t}$ を表わせば，

$$\varDelta P_{m\cdot t}=E_sA_{sm}(\delta_{c\cdot t-t_1}+e_m\theta_{c\cdot t-t_1}) \quad \cdots\cdots\cdots(4)$$

である。ここに，$\theta_{c\cdot t-t_1}$ は **図―1** (**b**) で断面下縁ひずみ ＢＢ′ が上縁ひずみ ＡＡ′ よりも大きい場合の回転ひずみを正，E_s は ＰＣ 鋼材弾性係数，A_{sm} は第 m 段目ＰＣ鋼材全断面積である。(４)を(２)および(３)に代入してプレストレス力 および プレストレス モーメント減退量を求めると，

$$\begin{aligned}\varDelta P_t&=E_s\sum_m A_{sm}(\delta_{c\cdot t-t_1}+e_m\theta_{c\cdot t-t_1})\\&=E_sA_s(\delta_{c\cdot t-t_1}+e_g\theta_{c\cdot t-t_1})\\&=D_s(\delta_{c\cdot t-t_1}+e_g\theta_{c\cdot t-t_1}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varDelta M_t&=E_s\sum_m A_{sm}\,e_m(\delta_{c\cdot t-t_1}+e_m\theta_{c\cdot t-t_1})\\&=E_sI_s\theta_{c\cdot t-t_1}+E_sA_s\,e_g\,\delta_{c\cdot t-t_1}\\&=K_s\,\theta_{c\cdot t-t_1}+D_s\,e_g\,\delta_{c\cdot t-t_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)\end{aligned}$$

ここに，

$A_s=\sum_m A_{sm}$：全ＰＣ鋼材断面積

$I_s=\sum_m A_{sm}\,e_m^2$：コンクリート断面重心軸に対する全ＰＣ鋼材断面２次モーメント

e_g：コンクリート断面重心軸と全ＰＣ鋼材断面重心軸との距離（**図―1** (**b**) でコンクリート断面重心軸より下側に正）

$$D_s=E_sA_s,\ K_s=E_sI_s \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

(５)および(６)において $\delta_{c\cdot t-t_1}$ および $\theta_{c\cdot t-t_1}$ がわかれば $\varDelta P_t$ および $\varDelta M_t$ を知ることができる。

3.　変化応力のもとでのコンクリートの クリープひずみ

すでに述べたように無載荷ＰＣ部材のコンクリート断面に作用する軸方向力は P および $\varDelta P_t$，曲げモーメントは M および $\varDelta M_t$ である。また，これらの正負の方向はすでに述べたとおりである。これらによりコンクリートのクリープに関する２つの基礎法則，すなわち，Davis-Glanville の法則および Whitney の法則を用い，かつ，乾燥収縮はコンクリートのクリープひずみの進行に比例すると仮定することによって，つぎのように表わすことができる[9)~12)]。

$$\delta_{c\cdot t-t_1}=\frac{P}{D_{co}}(1-k)(\varphi_t+\varphi_{t_1})-\frac{\varDelta P_t}{D_{co}}(1-k\,\varphi_t)-\int_{t_1}^{t}\frac{\varDelta P_t}{D_{co}}d\,\varphi_t+\frac{S_n}{\varphi_n}(\varphi_t-\varphi_{t_1}) \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

$$\theta_{c\cdot t-t_1}=\frac{M}{K_{co}}(1-k)(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\frac{\varDelta M_t}{K_{co}}(1-k\,\varphi_t)-\int_{t_1}^{t}\frac{\varDelta M_t}{K_{co}}d\,\varphi_t+\frac{\varDelta S_n}{\varphi_n h}(\varphi_t-\varphi_{t_1}) \quad \cdots\cdots\cdots(9)$$

ここに，

$$D_{co}=E_{co}\,A_c,\ K_{co}=E_{co}\,I_c \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

E_{co}：標準時間　$t=0$ におけるコンクリートの弾性係数

A_c：コンクリート断面積

I_c：コンクリート断面積重心軸に関するコンクリート断面２次モーメント

φ_t：コンクリートのクリープ係数

$\varphi_{t_1}=\varphi_{t=t_1}$：時間 t_1 における φ_t の値

$\varphi_n=\varphi_{t\to\infty}$：コンクリートのクリープ係数最終値

S_n：一様乾燥収縮ひずみ最終値

$\varDelta S_n$：コンクリート断面上下縁の収縮差（下縁収縮ひずみ―上縁収縮ひずみが正のとき正とする）

h：断面の全高さ

k：コンクリートの弾性係数の時間的変化に関係する常数で，弾性係数変化をつぎのように仮定した。

$$E_{c\cdot t}=E_{co}/(1-k\varphi_t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

$E_{c\cdot t}$：任意時間 t におけるコンクリートの弾性係数(8)および(９)において，

$$\left.\begin{aligned}F(P)&=(1-k)P+D_{co}\frac{S_n}{\varphi_n}\\F(M)&=(1-k)M+K_{co}\frac{\varDelta S_n}{\varphi_{nh}}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

とおけば，

$$\delta_{c\cdot t-t_1}=\frac{1}{D_{co}}\left\{F(P)(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\varDelta P_t(1-k\,\varphi_t)-\int_{t_1}^{t}\varDelta P_t\,d\varphi_t\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

$$\theta_{c\cdot t-t_1}=\frac{1}{K_{co}}\left\{F(M)(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\varDelta M_t(1-k\,\varphi_t)-\int_{t_1}^{t}\varDelta M_t\,d\varphi_t\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

と書くことができる。

4.　無載荷 ＰＣ 材に対する近似解

(13)および(14)式を(５)および(６)式に代入すれば，$\varDelta P_t$ および $\varDelta M_t$ に関する連立方程式をうる。これを解けば $\varDelta P_t$ および $\varDelta M_t$ の完全厳密解が得られるので

あるが[11)]，著者の研究によると，ΔP_t および ΔM_t の進行過程はプレストレス導入以後のコンクリートのクリープひずみ進行過程と近似的に相似であることが明らかになっている[9)~12)]。すなわち，

$$\Delta P_t=\Delta P_n\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

$$\Delta M_t=\Delta M_n\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

と仮定することができる。ここに，

ΔP_n：プレストレス力減退量最終値$(=\Delta P_{t\to\infty})$

ΔM_n：プレストレス モーメント減退量最終値 $(=\Delta M_{t\to\infty})$

したがって，ΔP_n および ΔM_n がわかれば，(15)および(16)式から任意時間における ΔP_t，ΔM_t が求められる。すなわち，(5)および(6)式で $t\to\infty$ のときの $\delta_{c\cdot t-t_1}$ および $\theta_{c\cdot t-t_1}$ の値をそれぞれ δ_{cn}，θ_{cn} とおけば，

$$\Delta P_n=D_s(\delta_{cn}+e_g\,\theta_{cn}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

$$\Delta M_n=K_s\,\theta_{cn}+D_s\,e_g\,\delta_{cn} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

一方，(15)および(16)式をそれぞれ(13)および(14)式に代入整理すると，

$$\delta_{c\cdot t-t_1}=\frac{1}{D_{co}}\left\{F(P)\,(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\Delta P_n\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}\left(1-k\,\varphi_t+\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{2}\right)\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

$$\theta_{c\cdot t-t_1}=\frac{1}{K_{co}}\left\{F(M)\,(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\Delta M_n\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}\left(1-k\,\varphi_t+\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{2}\right)\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

したがって，

$$\delta_{cn}=\frac{1}{D_{co}}\left\{F(P)\,(\varphi_n-\varphi_{t_1})-\Delta P_nK_{\varphi n_1}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots(21)$$

$$\theta_{cn}=\frac{1}{K_{co}}\left\{F(M)\,(\varphi_n-\varphi_{t_1})-\Delta M_nK_{\varphi n_1}\right\} \quad \cdots\cdots(22)$$

ここに，

$$K_{\varphi n_1}=1-k\,\varphi_n+\frac{\varphi_n-\varphi_{t_1}}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

(21)および(22)式を(17)および(18)に代入整理すれば，ΔP_n および ΔM_n に関する次の連立一次方程式が得られる。

$$\Delta P_n(1+\varepsilon pK_{\varphi n1})\Delta M_n\,\varepsilon\,q\,K_{\varphi n1}/\nu\,e_g=[\varepsilon\,p\,F(P)+\varepsilon\,q\,F(M)/\nu\,e_g](\varphi_n-\varphi_{t_1}) \quad \cdots\cdots(24)$$

$$\Delta M_n(1+\varepsilon_q\,K_{\varphi n1})+\Delta P_n\,\varepsilon p\,e_g\,K_{\varphi n1}=[\varepsilon\,p\,e_gF(P)+\varepsilon\,q\,F(M)](\varphi_n-\varphi_{t_1}) \quad \cdots\cdots\cdots(25)$$

ここに，

$$\left.\begin{array}{l}\varepsilon=E_s/E_{co},\ p=A_s/A_c,\ q=I_s/I_c\\ \nu=I_s/A_s\,e_q{}^2\end{array}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$

(25)および(26)式を代数的にとけば，ΔP_n および ΔM_n に対する解が得られる。

$$\Delta P_n=\frac{\varepsilon\,p[1+\varepsilon\,qK_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]F(P)+\varepsilon\,qF(M)/\nu\,e_q}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}+\varepsilon^2pq\,K_{\varphi n1}{}^2(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1}) \cdots\cdots\cdots(27)$$

$$\Delta M_n=\frac{\varepsilon\,p\,e_q\,F(P)+\varepsilon\,q[1+\varepsilon\,pK_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]F(M)}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}+\varepsilon^2p\,q\,K_{\varphi n1}{}^2(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1}) \cdots\cdots\cdots(28)$$

したがって，ΔP_t および ΔM_t はそれぞれ(15)および(16)式に(27)および(28)式を代入して，

$$\Delta P_t=\frac{\varepsilon p[1+\varepsilon\,qK_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu[F(P)+\varepsilon\,qF(M)/\nu\,e_g}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}+\varepsilon^2p\,q\,K_{\varphi n1}{}^2(\nu-1)/\nu}(\varphi_t-\varphi_{t_1}) \cdots\cdots\cdots(29)$$

$$\Delta M_t=\frac{\varepsilon\,p\,e_g\,F(M)+\varepsilon\,q[1+\varepsilon\,pK_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]F(M)}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}+\varepsilon^2pqK_{\varphi}{}^2{}_{n1}(\nu-1)/\nu}(\varphi_t-\varphi_{t_1}) \cdots\cdots\cdots(30)$$

(29)および(30)式が求める一般解である。また，ＰＣ鋼材が一段配量の場合には，つぎのようになる。

$$\Delta P_t=\frac{\varepsilon\,pF(P)+\varepsilon q\,F(M)/e_g}{1+\varepsilon(p+q)\,K_{\varphi n1}}(\varphi_t-\varphi_{t_1}) \quad (31)$$

$$\Delta M_t=\frac{\varepsilon\,pF(P)+\varepsilon\,qF(M)/e_q}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}}e_g(\varphi_t-\varphi_{t_1})=\Delta P_t\,e_g \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(32)$$

なお，多段配置ＰＣ鋼材を持つ断面では(29)および(30)式から

$$e_\Delta=\frac{\varepsilon\,pe_g\,F(P)+\varepsilon\,q[1+\varepsilon\,p\,K_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]F(M)}{\varepsilon\,p[1+\varepsilon\,q\,K_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]F(P)+\varepsilon\,q\,F(M)/\nu\,e_g}\neq e_g \cdots\cdots\cdots(33)$$

となって，一般には ΔP_t の作用位置 e_Δ は e_g と一致しない。

つぎに，(31)式においてコンクリートの弾性係数を無視し$(k=0)$，かつ，(12)式を代入して整理すると，

$$\Delta P_t=A_s\frac{\varepsilon\sigma_{cp}+N_{sh}}{1+\varepsilon\sigma_{cp}\left(1+\dfrac{\varphi_n-\varphi_{t_1}}{2}\right)/\sigma_{sp}}(\varphi_t-\varphi_{t_1}) \quad \cdots(34)$$

ここに，

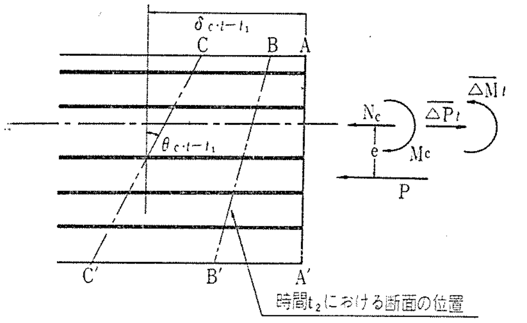
$$\left.\begin{array}{l}\sigma_{cp}=\dfrac{P}{A_c}+\dfrac{M}{I_c}e_g=\dfrac{P}{A_c}+\dfrac{Pe_g{}^2}{I_c}\\ \sigma_{sp}=\dfrac{P}{A_s}\ ,\quad N_{sh}=\left(\dfrac{S_n}{\varphi_n}+\dfrac{\Delta S_n}{\Delta_{nh}}\right)E_s\end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(35)$$

となって，(34)式は DIN 4227 解説に示されている ΔP_t 計算式と一致する。

5．載荷 PC 材に対する近似解

いま，時間 $t_2(\geq t_1)$ で設計荷重による一定軸圧力および一定曲げモーメントが持続載荷されるものとし，これらの軸圧力および曲げモーメントがコンクリート断面によって分担される量をそれぞれ N_c（圧縮力を正），M_c（プレストレス モーメント $M=Pe$ と同方向のとき正），載荷後における任意時間 $t(\geq t_2)$ までにおけるプレストレス力減退量を $\overline{\Delta p_t}$（コンクリート断面に対し引張

図—2



力を正），プレストレス モーメント減退量を$\overline{\Delta M_t}$（Peと反対方向に働くときを正）とすれば，任意時間tにおけるコンクリート断面に作用する軸方向力および曲げモーメントは図—2のようになる。図—2にはコンクリート断面の時間tまでにおこる実際ひずみも，あわせて図示してある。時間$t_1\sim t_2$間においてはN_cおよびM_cは作用していないことを考慮して，時間$t(\geqq t_2 \geqq t_1)$までにおこるコンクリート断面の軸方向実際ひずみ$\bar{\delta}_{c\cdot t-t_1}$および回転実際ひずみ$\bar{\theta}_{c\cdot t-t_1}$を求めると，

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_{c\cdot t-t_1}=&\frac{F(P)}{D_{co}}(\varphi_t-\phi_{t_1})+\frac{N_c}{D_{co}}(1-k\varphi_t+\varphi_t-\varphi_{t_2})\\&-\frac{\overline{\Delta P_t}}{D_{co}}(1-k\varphi_t)-\int_{t_1}^{t_2}\frac{\Delta P_t}{D_{co}}d\varphi_t\\&-\int_{t_2}^{t}\frac{\overline{\Delta P_t}}{D_{co}}\,d\varphi_t \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(36)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_{c\cdot t-t_1}=&\frac{F(M)}{K_{co}}(\varphi_t-\varphi_{t_1})+\frac{M_c}{D_{co}}(1-k\varphi_t+\varphi_t-\varphi_{t_2})\\&-\frac{\overline{\Delta M_t}}{K_{co}}(1-k\varphi_t)-\int_{t_1}^{t_2}\frac{\Delta M_t}{K_{co}}d\varphi_t\\&-\int_{t_2}^{t}\frac{\overline{\Delta M_t}}{K_{co}}d\varphi_t \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(37)\end{aligned}$$

ただし，ΔP_t, ΔM_tはそれぞれ無載荷部材に対する任意時間までにおこる，プレストレ力およびプレストレスモーメント減退量である。

いま，設計荷重載荷によっておこるコンクリートの弾性変形$N_c(1-k\varphi_{t_2})/D_{co}$および$M_c(1-k\varphi_{t_2})/K_{co}$によるPC鋼材引張力の瞬間的減少量はきわめて小さく，これを無視してもよいと考えられるので，(36)および(37)式は近似的につぎのようになる。

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_{c\cdot t-t_1}=&\frac{F(P)}{D_{co}}(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\frac{N_c}{D_{co}}(1-k)(\varphi_t-\varphi_{t_1})\\&-\frac{\overline{\Delta P_t}}{D_{co}}(1-k\varphi_t)-\int_{t_1}^{t_2}\frac{\Delta P_t}{D_{co}}d\varphi_t\\&-\int_{t_2}^{t}\frac{\overline{\Delta P_t}}{D_{co}}d\varphi_t\cdots\cdots\cdots\cdots(38)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_{c\cdot t-t_1}=&\frac{F(M)}{K_{co}}(\varphi_t-\varphi_{t_1})-\frac{M_c}{K_{co}}(1-k)(\varphi_t-\varphi_{t_1})\\&-\frac{\overline{\Delta M_t}}{K_{co}}(1-k\varphi_t)-\int_{t_1}^{t}\frac{\Delta M_t}{K_{co}}d\varphi_t\\&-\int_{t_2}^{t}\frac{\overline{\Delta M_t}}{K_{co}}d\varphi_t\cdots\cdots\cdots\cdots(39)\end{aligned}$$

ここで**4.**に述べたと同様の近似を適用する。すなわち，(15)および(16)式と同様にして

$$\overline{\Delta P_t}=\Delta P_{t_2}+(\overline{\Delta P_n}-\Delta P_{t_2})\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_2}}\cdots\cdots(40)$$

$$\overline{\Delta M_t}=\Delta M_{t_2}+(\overline{\Delta M_n}-\Delta M_{t_2})\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_2}}\quad\cdots\cdots\cdots(41)$$

とする。ここに，$\overline{\Delta P_n}$, $\overline{\Delta M_n}$は載荷PC材のプレストレス力およびプレストレス モーメント減退最終量，ΔP_{t_2}, ΔM_{t_2}は無載荷PC材の時間t_2までにおこる減退量で，それぞれ(29)および(30)式に$t=t_2$を代入して得られる。(40)および(41)式をそれぞれ(38)および(39)式に代入整理すると，

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_{c\cdot t-t_1}=&\frac{F(P)}{D_{co}}(\varphi_t-\varphi_{t_1})+\frac{N_c}{D_{co}}(1-k)(\varphi_t-\varphi_{t_2})\\&-\frac{\Delta P_{t_2}}{D_{co}}\left[\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{2}+\frac{\varphi_n-\varphi_t}{\varphi_n-\varphi_{t_2}}\left(1-k\varphi_t+\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{2}\right)\right]\\&-\frac{\overline{\Delta P_n}}{D_{co}}\cdot\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_2}}\left(1-k\varphi_t+\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{2}\right)\cdots\cdots(42)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_{c\cdot t-t_1}=&\frac{F(M)}{K_{co}}(\varphi_t-\varphi_{t_1})+\frac{M_c}{K_{co}}(1-k)(\varphi_t-\varphi_{t_2})\\&-\frac{\Delta M_{t_2}}{K_{co}}\left[\frac{\varphi_t-\varphi_{t_1}}{2}+\frac{\varphi_n-\varphi_t}{\varphi_n-\varphi_{t_2}}\left(1-k\varphi_t+\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{2}\right)\right]\\&-\frac{\overline{\Delta M_n}}{K_{co}}\cdot\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_2}}\left(1-k\varphi_t+\frac{\varphi_t-\varphi_{t_2}}{2}\right)\cdots(43)\end{aligned}$$

一方，$\overline{\Delta P_t}$および$\overline{\Delta M_t}$は$\overline{\Delta P_n}$および$\overline{\Delta M_n}$が求まれば(40)および(41)式からただちに求められる。すなわち，(42)および(43)式より実際ひずみの最終値$\bar{\delta}_{cn}$および$\bar{\theta}_{cn}$を求めると，

$$\bar{\delta}_{cn}=\frac{\overline{F(P)}}{D_{co}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})-\frac{\overline{\Delta P_n}}{D_{co}}K_{\varphi n2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(44)$$

$$\bar{\theta}_{cn}=\frac{\overline{F(M)}}{K_{co}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})-\frac{\overline{\Delta M_n}}{K_{co}}K_{\varphi n2}\cdots\cdots\cdots\cdots(45)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}\overline{F(P)}=&\left(P+N_c\frac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}\right)(1-k)+D_{co}\frac{S_n}{\varphi_n}-\frac{\Delta P_{t_2}}{2}\\\overline{F(M)}=&\left(M+M_c\frac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}(1-k)+K_{co}\frac{\Delta S_n}{\varphi_n h}\right.\\&-\frac{\Delta M_{t_2}}{2}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(46)$$

$$K_{\varphi n2}=1-k\varphi_n+\frac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(47)$$

また，図—2から実際ひずみ最終値$\bar{\delta}_{cn}$および$\bar{\theta}_{cn}$を用いて$\overline{\Delta P_n}$および$\overline{\Delta M_n}$を求めるのであるが，図—1, 2とは全く同様の意味を持つものであるから，この関係式は(17)および(18)式と全く同形となる。すなわち

$$\overline{\Delta P_n}=D_s\bar{\delta}_{cn}+D_s e_g\bar{\theta}_{cn}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(48)$$

$$\overline{\Delta M_n}=D_s e_g\bar{\delta}_{cn}+K_s\bar{\delta}\bar{\theta}_{cn}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(49)$$

(48)および(49)式にそれぞれ(44)および(45)式を代入整理すれば，上記の連立方程式は(24)および(25)式と全く同形となる。すなわち，(27)および(28)式に

おいて

$$\left.\begin{array}{l}\varDelta P_n \to \overline{\varDelta P_n},\ \varDelta M_n \to \overline{\varDelta M_n}\\ F(P)\to \overline{F}(P),\ F(M)\to \overline{F(M)}\\ K_{\varphi n1}\to K\varphi_{n2}\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots(50)$$

なる記号変換を行なえばよい。

$$\overline{\varDelta P_n}=\frac{\varepsilon p[1+\varepsilon qK_{\varphi n2}(\nu-1)/\nu]\overline{F}(P)+\varepsilon q\overline{F}(M)/\nu e_g}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n2}+\varepsilon^2 pqK_{\varphi}{}^2{}_{n2}(\nu-1)\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots\cdots(51)$$

$$\overline{\varDelta M_n}=\frac{\varepsilon pe_g\overline{F}(P)+\varepsilon q[1+\varepsilon pK_{\varphi n2}(\nu-1)/\nu]\overline{F}(M)}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n2}+\varepsilon^2 pqK_{\varphi}{}^2{}_{n2}(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots\cdots(52)$$

6.　特別の場合

4. および **5.** で述べた近似解は，いずれも $e_g \fallingdotseq 0$ として求めたものである。$e_g=0$ の場合，無載荷部材では (17)および (18) 式を，載荷部材では (48)および(49) 式を用いることはできない。すなわち，これらの式に $e_g=0$ を代入したものを用いなければならない。ここでは無載荷部材の場合を示せば，

$$\varDelta P_n=D_s\,\delta_{cn},\ \varDelta M_n=K_s\theta_{cn}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(53)$$

したがって，(21) および (22) 式を代入整理すれば

$$\varDelta P_n=\frac{\varepsilon pF(P)}{1+\varepsilon pK_{\varphi n1}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(54)$$

$$\varDelta M_n=\frac{\varepsilon qF(M)}{1+\varepsilon qK_{\varphi n1}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(55)$$

をうる。載荷部材の場合には (50) 式の記号変換を行なって，

$$\overline{\varDelta P_n}=\frac{\varepsilon p\overline{F}(P)}{1+\varepsilon pK_{\varphi n2}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(56)$$

$$\overline{\varDelta M_n}=\frac{\varepsilon q\overline{F}(M)}{1+\varepsilon qK_{\varphi n2}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(57)$$

7.　不静定構造物における P C 部材

不静定架構におけるＰＣ部材はプレストレス導入による軸圧力 p および曲げモーメント M，設計荷重による軸圧力 N_c および曲げモーメント M_c （これらはすべて一定と考える）のほかに，コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によっておこるクリープ不静定力およびクリープ不静定モーメントを受ける。これらのクリープ不静定応力は時間の経過とともに変化する変動応力である。いま，コンクリート断面に分担されるクリープ不静定軸方向力を N_{ct}，クリープ不静定曲げモーメントを M_{ct} とし，これらによるコンクリートの弾性変形のためにおこるＰＣ鋼材引張力の損失量を無視すれば，これらによっておこるコンクリート断面重心軸における軸方向ひずみおよび回転ひずみ増分は，

$$\text{軸方向ひずみ増分}=\frac{1}{D_{co}}\int_{t_1}^{t}N_{ct}\,d\varphi_t\ \cdots\cdots\cdots\cdots(58)$$

$$\text{回転ひずみ増分}=\frac{1}{K_{co}}\int_{t_1}^{t}M_{ct}\,d\varphi_t\ \cdots\cdots\cdots\cdots(59)$$

ただし，N_{ct} は圧縮力を正，M_{ct} は $M=Pe$ と同方向のとき正としてある。$t=t_1$ においては $N_{ct}=0, M_{ct}=0$ であること，および，プレストレス力およびプレストレス モーメント減退量におよぼす N_{ct} および M_{ct} の影響はかなり小さいことから[14]，(58) および (59) 式をつぎのように近似化する。

$$\text{軸方向ひずみ増分}=\frac{1}{D_{co}}\cdot\frac{N_{ct}}{2}(\varphi_t-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots(60)$$

$$\text{回転ひずみ増分}=\frac{1}{K_{co}}\cdot\frac{M_{ct}}{2}(\varphi_t-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots(61)$$

したがって，不静定構造におけるＰＣ部材においては，$\delta_{c\cdot t-t_1}$, $\theta_{c\cdot t-t_1}$ は無載荷部材の場合に対しては (19) および (20) 式の右辺に (60) および (61) 式を加算したものになる。同様に δ_{cn}, θ_{cn} については，(21) および (22) 式の右辺に，

$$\text{軸方向ひずみ増分}=\frac{1}{D_{co}}\cdot\frac{N_{cn}}{2}(\varphi_t-\varphi_{t_1})\cdots\cdots\cdots(62)$$

$$\text{回転ひずみ増分}=\frac{1}{K_{co}}\cdot\frac{M_{cn}}{2}(\varphi_t-\varphi_{t_1})\ \cdots\cdots\cdots(63)$$

N_{cn}：不静定軸方向力最終値（圧縮力を正）

M_{cn}：不静定曲げモーメント最終値　($M=Pe$ と同方向の場合を正)

をそれぞれ加算すればよい。結局，(21) および (22) 式において，

$$\left.\begin{array}{l}F(P)=(1-k)P+N_{cn}/2+S_n\,D_{co}/\varphi_n\\ F(M)=(1-k)M+M_{cn}/2+\varDelta S_n\,K_{co}/\varphi_n h\end{array}\right\}\cdots(64)$$

とおけば，不静定応力を考慮する場合でも解は **4.** の場合と全く同じとなる。

載荷ＰＣ部材の場合でも全く同様であって，(51)および(52)式がそのまま用いられる。ただし，$\overline{F}(P)$ および $\overline{F}(M)$ は (46) 式右辺に N_{cn} および M_{cn} に関する補正を行なえばよい。すなわち，

$$\left.\begin{array}{l}\overline{F}(P)=\left(P+N_c\dfrac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}\right)(1-k)+\dfrac{N_{cn}}{2}+D_{co}\dfrac{S_n}{\varphi_n}\\ \qquad-\dfrac{\varDelta P_{t_2}}{2}\\ \overline{F}(M)=\left(M+M_c\dfrac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}\right)(1-k)+\dfrac{M_{cn}}{2}\\ \qquad+K_{co}\dfrac{\varDelta S_n}{\varphi_n h}-\dfrac{\varDelta M_{t_2}}{2}\end{array}\right\}(65)$$

なお，クリープ不静定力 N_{cn}, M_{cn} を求めるためには，不静定架構の応力解析を行なわなければならない。これには δ_{cn}, θ_{cn} または $\overline{\delta}_{cn}$, $\overline{\theta}_{cn}$ を N_{cn} および M_{cn} の関数として表わすことが必要である。すなわち，

$$\delta_{cn}=\frac{1}{D_{co}}\cdot\frac{(1+\varepsilon qK_{\varphi n1})F(P)-\varepsilon qK_{\varphi n1}F(M)/\nu e_g}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}+\varepsilon^2 pqK_{\varphi}{}^2{}_{n1}(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(66)$$

$$\theta_{cn}=\frac{1}{K_{co}}\cdot\frac{(1+\varepsilon_p K_{\varphi n1})F(M)-\varepsilon pe_g K_{\varphi n1}F(p)}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}+\varepsilon^2 pqK_{\varphi}{}^2{}_{n1}(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(67)$$

$$\bar{\delta}_{cn}=\frac{1}{D_{co}}\cdot\frac{(1+\varepsilon q K_{\varphi n2})\overline{F}(P)-\varepsilon q K_{\varphi n2}\overline{F}(M)/\nu e_g}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n2}+\varepsilon^2 p q K_{\varphi}{}^2{}_{n2}(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots(68)$$

$$\bar{\theta}_{cn}=\frac{1}{K_{co}}\cdot\frac{(1+\varepsilon p K_{\varphi n2})\overline{F}(M)-\varepsilon p e_g K_{\varphi n2}\overline{F}(P)}{1+\varepsilon(p+q)K_{\varphi n2}+\varepsilon^2 p q K_{\varphi}{}^2{}_{n2}(\nu-1)/\nu}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots(69)$$

特別の場合として $e_g=0$ のときには，

$$\delta_{cn}=\frac{1}{D_{co}}\cdot\frac{F(P)}{1+\varepsilon pK_{\varphi n1}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots(70)$$

$$\theta_{cn}=\frac{1}{K_{co}}\cdot\frac{F(M)}{1+\varepsilon pK_{\varphi n_1}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots(71)$$

$$\bar{\delta}_{cn}=\frac{1}{D_{co}}\cdot\frac{\overline{F(P)}}{1+\varepsilon pK_{\varphi n2}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots(72)$$

$$\bar{\theta}_{cn}=\frac{1}{K_{co}}\cdot\frac{\overline{F(M)}}{1+\varepsilon qK_{\varphi n2}}(\varphi_n-\varphi_{t_1})\cdots\cdots(73)$$

となる。

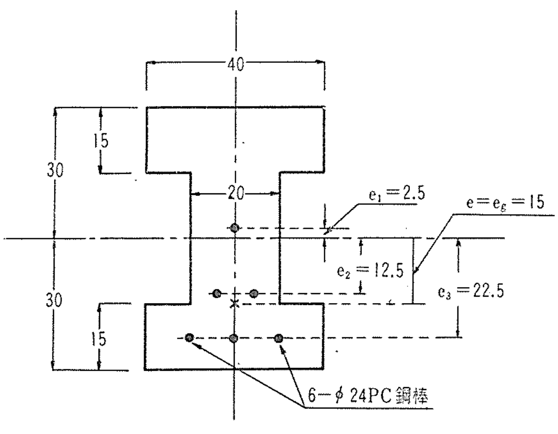
8. 計　算　例

図—3 に示すＰＣバリ断面に対してコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力およびプレストレス モーメント減退量を求める。使用 ＰＣ 鋼材は 6-φ 24 mm 鋼棒（1 本あたりの断面積 4.047 cm²）とし，図示のように配置するものとする。導入プレストレス力は $P=150$ t（鋼棒 1 本あたり 25 t），コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみ最終値は

$$\left.\begin{array}{l}\varphi_t=\dfrac{0.5\,t}{1.5+0.25\,t}\ (t\text{ の単位は週})\\ S_n=2\times10^{-4},\ \varDelta S_n=0\end{array}\right\}\cdots\cdots(\mathrm{a})$$

とする。また，コンクリートおよびＰＣ鋼棒の弾性係数は $E_{co}=350\,000$ kg/cm², $E_s=2\,000\,000$ kg/cm² とし，コンクリートの弾性係数の時間的変化はこれを無視するものとする($k=0$)。図—3 よりプレストレス力偏心距離を求めると $e=15$ cm となり，したがって，導入プレストレス モーメントは $M=Pe=150\times0.15=22.5$ t·m である。

図—3



まず無載荷バリとして計算することにすれば，計算式は(27) および (28) 式である。導入時材令を $t_1=1$ 週とすると，

$$\varphi_{t_1}=\frac{0.5}{1.5+0.25\times1}=0.284,\quad \varphi_n=\frac{0.5}{0.25}=2$$

$$\therefore\ \varphi_n-\varphi_{t_1}=2-0.284=1.716\ \cdots\cdots(\mathrm{b})$$

計算に必要な諸数値を求めると，つぎのようになる。

$A_c=1\,800$ cm², $A_s=24.282$ cm²

$I_c=6.75\times10^5$cm⁴

$I_s=7\,436.4$ cm⁴

$\therefore\ p=0.0135,\ q=0.0110$

$\varepsilon=5.714$

$K_{\varphi n1}=1.858$

$\therefore\ \varepsilon p=0.0771,\ \varepsilon q=0.0629$

$\varepsilon p K_{\varphi n1}=0.143,\ \varepsilon q K_{\varphi n1}=0.117$

$F(P)=213\,000$ kg

$F(M)=M=2\,250\,000$ kg·cm

$e_g=15$ cm　$\therefore\ \nu=I_s/A_s e_g{}^2=1.361$

$(\nu-1)/\nu=0.265$

$\varepsilon(p+q)K_{\varphi n1}=0.260$

$\varepsilon^2 p q K_{\varphi}{}^2{}_{n1}(\nu-1)/\nu=0.0044$

$\varepsilon p[1+\varepsilon q K_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]=0.0795$

$\varepsilon q[1+\varepsilon p K_{\varphi n1}(\nu-1)/\nu]=0.0653$

$\varepsilon q/\nu e_g=0.003\,08$

$\varepsilon p e_g=1.157$

以上の諸数値を (27) および (28) 式に代入して，

$$\left.\begin{array}{l}\varDelta P_n=32.38\ \mathrm{t}\\ \varDelta M_n=533.86\ \mathrm{t\cdot cm}\end{array}\right\}\cdots\cdots(\mathrm{c})$$

プレストレス力有効率 η_p およびプレストレス モーメント有効率 η_m は

$$\left.\begin{array}{l}\eta_p=\dfrac{P-\varDelta P_n}{P}=0.7841\\ \eta_m=\dfrac{M-\varDelta M_n}{M}=0.7627\end{array}\right\}\cdots\cdots(\mathrm{d})$$

となって，η_m と η_p とはきわめて接近はしているが異なった値をとる。このことは著者の厳密理論式に関する研究においても理論的に示されている。

つぎに，比較のために全ＰＣ鋼材がプレストレス力偏心位置に全部集合してあるものと考え，(31)および(32)式を 図—3 の断面に適用することにすると，$\varDelta P_n$ および $\varDelta M_n$ はつぎのようになる。

$$\left.\begin{array}{l}\varDelta P_n=35.22\ \mathrm{t}\\ \varDelta M_n=\varDelta P_n e_g=528.3\ \mathrm{t\cdot cm}\end{array}\right\}\cdots\cdots(\mathrm{e})$$

また，有効率は

$$\eta_p=0.7652(=\eta_m)\ \cdots\cdots(\mathrm{f})$$

となって，η_p は (d) 式よりも約 3 %小となる。

つぎに，$t_2=4$ 週で，$M_c=-35$ t·m が作用するときの減退量 $\overline{\varDelta P_n}$ および $\overline{\varDelta M_n}$ を求める。計算式は (51) および (52) 式を用いる。

計算に必要な諸数値を求めるとつぎのようになる。

$\varphi_{t_2}=0.8$　　$\therefore\ \varphi_n-\varphi_{t_2}=1.2$

$K_{\varphi n2}=1.6$

$\varepsilon\, p\, K_{\varphi n2}=0.1234$

$\varepsilon\, q\, K_{\varphi n2}=0.1008$

$\varepsilon(p+q)K_{\varphi n2}=0.2242$

$\varepsilon^2 p\, q\, K_{\varphi n2}{}^2(\nu-1)/\nu=0.0033$

$\varepsilon\, p\,[1+\varepsilon\, q\, K_{\varphi n2}(\nu-1)/\nu]=0.0792$

$\varepsilon\, q\,[1+\varepsilon\, p\, K_{\varphi n2}(\nu-1)/\nu]=0.0650$

$$\varDelta P_{t_2}=\varDelta P_n\frac{\varphi_{t_2}-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}=9.74\text{ t}$$

$$\varDelta M_{t_2}=\varDelta M_n\frac{\varphi_{t_2}-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}=160.53\text{ t·cm}$$

$$M_c\frac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}=-2\,447.55\text{ t·cm}$$

$$\therefore\ \overline{F(P)}=F(P)-\frac{\varDelta P_{t_2}}{2}=208.13\text{ t}$$

$$\overline{F(M)}=F(M)+M_c\frac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}-\frac{\varDelta M_{t_2}}{2}=-277.82\text{ t·cm}$$

これらを(51)および(52)式に代入すれば，

$$\left.\begin{array}{l}\overline{\varDelta P_n}=21.85\text{ t}\\ \overline{\varDelta M_n}=311.39\text{ t·cm}\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(g)}$$

有効率は

$\eta_p=0.8543,\ \eta_m=0.8616$ ……………………(h)

となって，無載荷の場合とくらべてかなり有効率が大きくなる。

なお，(31)および(32)式に(50)式を記号変換を行なったものを適用することにすれば，(e) より

$$\left.\begin{array}{l}\varDelta P_{t_2}=\varDelta P_n\dfrac{\varphi_{t_2}-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}=10.59\text{ t}\\ \varDelta M_{t_2}=\varDelta M_n\dfrac{\varphi_{t_2}-\varphi_{t_1}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}=158.86\text{ t·cm}\end{array}\right\}\cdots\cdots\text{(i)}$$

したがって

$$\left.\begin{array}{l}\overline{F(P)}=F(P)-\dfrac{\varDelta P_{t_2}}{2}=207.7\text{ t}\\ \overline{F(M)}=F(M)+M_c\dfrac{\varphi_n-\varphi_{t_2}}{\varphi_n-\varphi_{t_1}}-\dfrac{\varDelta M_{t_2}}{2}\\ \quad=-276.98\text{ t·cm}\end{array}\right\}\cdots\cdots\text{(j)}$$

これらを(31)および(32)式に(50)式の記号変換を行なったものに代入すれば，

$$\left.\begin{array}{l}\overline{\varDelta P_n}=20.23\text{ t}\\ \overline{\varDelta M_n}=\overline{\varDelta P_n}\,e_g=303.45\text{t·cm}\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(k)}$$

有効率は，

$\eta_p=0.8651(=\eta_m)$ ……………………………(l)

となって，多段配置ＰＣ鋼材として取扱った値 (h) 式よりもやや大きい有効率となる。

つぎに，M_c 載荷開始時期 $t_2=4$ 週を無視して，M_c も $t=t_1=1$ 週から作用し始めるものと仮定して，$\overline{\varDelta P_n}$ および $\overline{\varDelta M_n}$ 近似値を求める。すなわち，(51) および(52)式に $t_2=t_1$ を代入したもの，すなわち，(27) および (28) 式で $F(P)\to\bar{F}(P)$，$F(M)\to\bar{F}(M)$ なる記号変換を行なったものを用いる。$\bar{F}(P)$，$\bar{F}(M)$の値は(46)式に $t_2=t_1$ とおいたものからつぎのようになる。

$$\left.\begin{array}{l}\bar{F}(P)=F(P)=213\text{ t}\\ \bar{F}(M)=F(M)+M_c=-1\,250\text{ t·cm}\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\text{(m)}$$

よって，(27) および (28) 式から，

$$\left.\begin{array}{l}\overline{\varDelta P_n}=17.76\text{ t}\\ \overline{\varDelta M_n}=359.40\text{ t·cm}\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(n)}$$

有効率は

$\eta_p=0.8816,\ \eta_m=0.8403$ ……………………(o)

となって，精算した有効率 (h) 式とくらべて η_p では約3％大，η_m では約２％小さい。

なお，これと同様な計算を (31) および (32) 式を用いて計算すると（ただし，$F(P)\to\bar{F}(P), F(M)\to\bar{F}(M)$ の記号変換を行なう），

$$\left.\begin{array}{l}\overline{\varDelta P_n}=15.23\text{ t}\\ \overline{\varDelta M_n}=\overline{\varDelta P_n}\,e_g=228.45\text{ t·cm}\end{array}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(p)}$$

有効率は，

$\eta_p=0.8985(=\eta_q)$ ………………………………(q)

となって，精算値 (h)式とくらべると約５％大となっている。

以上の数値計算結果を **表―1** にまとめておく。

表―1

精算，略算の別*	$\varDelta P_n, \varDelta M_n$等の計算に使用した理論式	無載荷の場合		載荷の場合	
		η_p(%)	η_m(%)	η_p(%)	η_m(%)
精算	(27)および (28) 式	78.41	76.27	—	—
略算	(31)および (32) 式**	76.52	76.52	—	—
精算	(51)および (52) 式	—	—	85.43	86.16
略算	(31),(32) 式に (50) 式の記号変換	—	—	86.51	86.51
$t_2=t_1$ 精算	(27),(28)式に $F(P)\to\overline{F}(P), F(M)\to\overline{F}(M)$	—	—	88.16	84.03
$t_2=t_1$ 略算	(31),(32)式に$F(P)\to\overline{F}(P)$, $F(M)\to\overline{F}(M)$**	—	—	89.85	89.85

* 精算とは多段配置ＰＣ鋼材を持つ断面として計算する場合，略算とは偏心位置に全ＰＣ鋼材が集合してあるとした仮想断面について計算する場合をいう。

** DIN 4227 解説に示されている計算式と一致する。

9. 結　　論

コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるＰＣ部材のプレストレス力 および プレストレスト モーメント減退は，コンクリートのクリープひずみに比例しておこると仮定して，多段配置ＰＣ鋼材を持つＰＣ部材のプレストレス力 および プレストレスト モーメント減退近似計算式を求めた。数値計算例からもわかるように，設計荷重載荷の場合と無載荷の場合とでは前者の有効率がかなり大きくなり，部材断面設計上有利である。載荷部材に対する理論計算式もあわせて示した。また，本研究で