プレストレストコンクリート材の緊張力減退 に関する一近似解

正 会 員 坂 静 雄*
同 ○六 車 熙**

序 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)によつておこる、プレストレストコンクリート材(以下PC材と略記)の緊張力減退に関しては、理論的、実験的研究が数多くなされている。著者は先に厳密理論式を求め、多数段配置緊張材を持つPC材一般断面の緊張力減退の機構を明らかにし、これら厳密理論式が実験的にも正しく適用できることを示した^{1),2),3),4)}。しかし、これら厳密理論式は実用計算にあたつてかなり複雑であり、理論値の精度をそこなわない程度の近似化によつて理論式をより簡単にすることが望まれる。H. Baldauf 氏⁵⁾は任意時間までの緊張力減退量は合応力緊張材偏心位置でのコンクリートの自由クリープ歪(収縮歪も含む)に相当する全PC鋼材弾性荷重に比例すると仮定し、かつ、任意時間における微小時間におけるコンクリートと合応力緊張材との平面保持の仮定も適用して微分方程式を求め、この両者を組合わせることによつて近似理論解を求めた。A. Habel 氏⁶⁾は R. Busemann 氏⁷⁾のクリープ点を用いたクリープ解析法を応用して、多段配置緊張材を持つPC断面の緊張力減退理論式を求めている。R. Schwarz 氏⁸⁾、A. E. Komendant 氏⁹⁾は全緊張材がプレストスカ偏心位置に集まつて配置されているものと考えた仮想断面を用いて、多段配置緊張材を持つPC断面に対する近似式を示している。H. Baldaut 氏⁵⁾および A. Habel 氏⁶⁾の近似解ではプレストレスモーメント減退量の初プレストレスモーメントに対する比は、プレストレス力減退量の初プレストレス力に対する比と同じとなり、単にプレストレス力減退量だけの理論式を求めれば、これにプレストレス力偏心距離を乗ずることによつて、プレストレスモーメント減退量が得られるとしている点で著者厳密理論式の示すプレストレス力減退の特性¹⁾と矛盾し、また、R. Schwarz 氏⁸⁾および A. E. Komendant 氏⁹⁾の近似解では多段配置緊張材をあたかも一並配置緊張材とみなす点で、計算誤差が場合によつては著るしく大きくなり、近似解としては面白くない。

本研究においては以上の諸点を改め、緊張力減退量は近似的にコンクリートのクリープに正比例しておけるといふ著者厳密理論解^{1),3),4)}における研究結果を用いて、コンクリートのクリープ基礎方程式の近似化を行い、こ

れを用いて多段配置緊張材を持つPC部材一般断面についての緊張力減退近似理論式を求めた。

§1. コンクリートのクリープ基礎方程式の近似

PC材に作用する軸方向力および曲げモーメントは、プレストレス導入時からコンクリート断面に作用する一定プレストレス力 P 、一定プレストレスモーメント M 、時間の経過と共に増加する減退プレストレス力 $\Delta P(t-t_1)$ 、減退プレストレスモーメント $\Delta M(t-t_1)$ (ただし、 $t=t_1$ において $\Delta P(t-t_1)=0$ 、 $\Delta M(t-t_1)=0$)、設計荷重による外力が作用する場合にはこれらによるコンクリート断面の分担する軸圧力 P_{ct} 、曲げモーメント M_{ct} とである。いま、 P_{ct} および M_{ct} は作用しないものとして、プレストレス導入直後 $t=t_1$ から任意時間 t までにおこるコンクリート断面重心軸における軸方向歪変化量 $\delta_{c,t-t_1}$ および回転歪変化量 $\theta_{c,t-t_1}$ はつぎのようになる^{1),3),4)}。

$$\delta_{c,t-t_1} = \frac{P}{D_{co}}(1-k)(\varphi_t - \varphi_{t_1}) - \frac{\Delta P(t-t_1)}{D_{co}}(1-k\varphi_t) - \frac{1}{D_{co}} \int_{t_1}^t \Delta P(t-t_1) d\varphi_t + \frac{S_n}{\varphi_n}(\varphi_t - \varphi_{t_1}) \quad (1.1)$$

$$\theta_{c,t-t_1} = \frac{M}{K_{co}}(1-k)(\varphi_t - \varphi_{t_1}) - \frac{\Delta M(t-t_1)}{K_{co}}(1-k\varphi_t) - \frac{1}{K_{co}} \int_{t_1}^t \Delta M(t-t_1) d\varphi_t + \frac{\Delta S_n}{\varphi_n h}(\varphi_t - \varphi_{t_1}) \quad (1.2)$$

ここに、

$$D_{co} = E_{co} A_c, \quad K_{co} = E_{co} I_c \quad (1.3)$$

E_{co} 、 $t=0$ 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 、コンクリート断面重心軸に対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、 φ_n 、コンクリートのクリープ係数最終値、 S_n 、コンクリートの一様収縮歪最終値、 ΔS_n 、コンクリート断面上下縁の収縮差(下-上が正のときを正)、 h 、コンクリート断面高さ、 k 、コンクリートの弾性係数の変化を示す常数で、任意時間 t における弾性係数 E_{ct} は次式で表わされるものとした。

$$E_{ct} = E_{co} / (1 - k\varphi_t) \quad (1.4)$$

また、軸圧力 P は圧縮を正、 $\Delta P(t-t_1)$ は引張を正、曲げモーメント M はコンクリート下縁応力が圧縮となるものを正、 $\Delta M(t)$ は上縁応力が圧縮となるものを正、 $\delta_{c,t-t_1}$ は圧縮歪を正、 $\theta_{c,t-t_1}$ は下縁歪-上縁歪が正のとき正とした。以下 $\delta_{c,t-t_1}$ 、 $\theta_{c,t-t_1}$ のことを単にクリープ歪と略称する。

* 京都大学名誉教授、** 同講師

一方、著者の研究^{1),3),4)}によれば、減退プレストレス力 $\Delta P(t-t_1)$ および減退プレストレスモーメント $\Delta M(t-t_1)$ はそれぞれプレストレス導入直後からのコンクリートのクリープ係数 $\varphi_t - \varphi_{t_1}$ に近似的に比例する。すなわち、

$$\Delta P(t-t_1) = \Delta P_{n1} \frac{\varphi_t - \varphi_{t_1}}{\varphi_n - \varphi_{t_1}} \quad (1.5)$$

$$\Delta M(t-t_1) = \Delta M_{n1} \frac{\varphi_t - \varphi_{t_1}}{\varphi_n - \varphi_{t_1}}$$

ここに、 ΔP_{n1} 、プレストレス力減退量最終値、 ΔM_{n1} 、プレストレスモーメント減退量最終値である。クリープ基礎式 (1.1) および (1.2) に (1.5) の仮定を適用すれば、

$$\begin{aligned} \delta_{c,t-t_1} &= \frac{P}{D_{co}} (1-k) (\varphi_t - \varphi_{t_1}) - \frac{\Delta P_{n1}}{D_{co}} \cdot \frac{\varphi_t - \varphi_{t_1}}{\varphi_n - \varphi_{t_1}} \\ &\times (1-k\varphi_t) - \frac{\Delta P_{n1}}{D_{co}} \cdot \frac{(\varphi_t - \varphi_{t_1})^2}{2(\varphi_n - \varphi_{t_1})} + \frac{S_n}{\varphi_n} (\varphi_t - \varphi_{t_1}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \theta_{c,t-t_1} &= \frac{M}{K_{co}} (1-k) (\varphi_t - \varphi_{t_1}) - \frac{\Delta M_{n1}}{K_{co}} \cdot \frac{\varphi_t - \varphi_{t_1}}{\varphi_n - \varphi_{t_1}} \\ &\times (1-k\varphi_t) - \frac{\Delta M_{n1}}{K_{co}} \cdot \frac{(\varphi_t - \varphi_{t_1})^2}{2(\varphi_n - \varphi_{t_1})} + \frac{\Delta S_n}{\varphi_n h} (\varphi_t - \varphi_{t_1}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

$t \rightarrow \infty$ においては、軸方向および回転クリープ歪は、

$$\delta_{c,n1} = \frac{F(P)}{D_{co}} (\varphi_n - \varphi_{t_1}) - \frac{\Delta P_{n1}}{D_{co}} K_{\varphi n1} \quad (1.8)$$

$$\theta_{c,n1} = \frac{F(M)}{K_{co}} (\varphi_n - \varphi_{t_1}) - \frac{\Delta M_{n1}}{K_{co}} K_{\varphi n1} \quad (1.9)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} F(P) &= P(1-k) + D_{co} \frac{S_n}{\varphi_n} \\ F(M) &= M(1-k) + K_{co} \frac{\Delta S_n}{\varphi_n h} \\ K_{\varphi n1} &= 1-k\varphi_n + (\varphi_n - \varphi_{t_1})/2 \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

(1.6) と (1.8) および (1.7) と (1.9) より次式を得る。

$$\delta_{c,t-t_1} = \delta_{c,n1} \frac{\varphi_t - \varphi_{t_1}}{\varphi_n - \varphi_{t_1}}, \quad \theta_{c,t-t_1} = \theta_{c,n1} \frac{\varphi_t - \varphi_{t_1}}{\varphi_n - \varphi_{t_1}} \quad (1.11)$$

すなわち、(1.8) 式の近似によつて任意時間 t までにおこるクリープ歪 $\delta_{c,t-t_1}$ および $\theta_{c,t-t_1}$ もまたコンクリートのクリープ係数 $\varphi_t - \varphi_{t_1}$ に比例することになる。

以上のべたように、減退量最終値 ΔP_{n1} および ΔM_{n1} がわかれば無載荷 PC 材の任意時間 t までにおこる減退量 $\Delta P(t-t_1)$ および $\Delta M(t-t_1)$ は (1.5) 式から直ちに求められる。これを求めるためには (1.8) および (1.9) 式で表わされるクリープ歪最終値基礎式を用いる。以下にその方法を述べる。

§2. 無載荷 PC 材の緊張力減退理論解

第 1 図において AA' をプレストレス導入直後 $t=t_1$ における多段配置緊張材を持つ PC 材の任意コンクリー

第 1 図

ト断面とし、時間 t において BB' の位置にくるものとすると、 $AA'B'B$ は時間 $t-t_1$ 間におこるコンクリート歪変化量を示す。PC 鋼材のレラクセーション（またはクリープ）を無視すれば、各段の PC 鋼材はそれぞれ $AA'B'B$ 間の鋼材歪に相当する弾性歪を強制せられることになり、この弾性歪に相当する PC 鋼材圧縮力総和がプレストレス力減退量 $\Delta P(t-t_1)$ 、曲げモーメント総和がプレストレスモーメント減退量 $\Delta M(t-t_1)$ となる。

いま、 $D_s = E_s A_s$ 、 $K_s = E_s I_s$ 、 E_s 、緊張材弾性係数、 A_s 緊張材全断面面積、 I_s 、コンクリート断面重心軸に関する全緊張材断面 2 次モーメント、 $\nu = I_s / A_s e_g^2$ 、 e_g 、コンクリート断面重心軸からはかつた緊張材全断面重心軸の位置（第 1 図で下側にはかるとき正）とすれば、

$$\Delta P(t-t_1) = D_s \delta_{c,t-t_1} + K_s \theta_{c,t-t_1} / \nu e_g \quad (2.1)$$

$$\Delta M(t-t_1) = D_s e_g \delta_{c,t-t_1} + K_s \theta_{c,t-t_1} \quad (2.2)$$

となる^{3),4)}。ここに、 $e_g \neq 0$ とする。

§1. ですでのべたように、減退量最終値 ΔP_{n1} および ΔM_{n1} がわかれば任意時間までにおこる減退量は (1.5) 式から直ちに計算できるから、(2.1) および (2.2) 式においても $t \rightarrow \infty$ のときの関係式でこれを表わせば、

$$\Delta P_{n1} = D_s \delta_{c,n1} + K_s \theta_{c,n1} / \nu e_g \quad (2.3)$$

$$\Delta M_{n1} = D_s e_g \delta_{c,n1} + K_s \theta_{c,n1} \quad (2.4)$$

となる。(2.3) および (2.4) 式にクリープ基礎式 (1.8) および (1.9) 式を代入整理すれば、

$$\begin{aligned} \Delta P_{n1} (1 + n_0 p K_{\varphi n1}) + \Delta M_{n1} n_0 q K_{\varphi n1} / \nu e_g \\ = [n_0 p F(P) + n_0 q F(M) / \nu e_g] (\varphi_n - \varphi_{t_1}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{n1} n_0 p e_g K_{\varphi n1} + \Delta M_{n1} (1 + n_0 q K_{\varphi n1}) \\ = [n_0 p e_g F(P) + n_0 q F(M)] (\varphi_n - \varphi_{t_1}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここに、

$$n = E_s / E_{co}, \quad p = A_s / A_c, \quad q = I_s / I_c \quad (2.7)$$

である。(2.5) および (2.6) より ΔP_{n1} および ΔM_{n1} を求めるとつぎのようになる。

$$\Delta P_{n1} = \frac{n_0 p [1 + n_0 q K_{\varphi n1} (1 - 1/\nu)] F(P) + n_0 q F(M) / \nu e_g (\varphi_n - \varphi_{t_1})}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n1} + n_0^2 p q K_{\varphi n1}^2 (1 - 1/\nu)} \quad (2.8)$$

$$\Delta M_{n1} = \frac{n_0 p e_g F(P) + n_0 q [1 + n_0 p K_{\varphi n1} (1 - 1/\nu)] F(M)}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n1} + n_0^2 p q K_{\varphi n1}^2 (1 - 1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t_1}) \quad (2.9)$$

これらを(1.5)式に代入すれば $\Delta P(t-t_1)$ および $\Delta M(t-t_1)$ を得る (記述省略)。

つぎに、クリープ歪は $\delta_{c,n1}$ および $\theta_{c,n1}$ を求めておけば任意時間 t までのクリープ歪 $\delta_{c,t-t_1}$ および $\theta_{c,t-t_1}$

$$\delta_{c,n1} = \frac{1}{D_{co}} \cdot \frac{F(P)(1+n_0qK_{\varphi n1}) - n_0qK_{\varphi n1}F(M)/\nu e_g}{1+n_0(p+q)K_{\varphi n1} + n_0^2pqK_{\varphi n1}^2(1-1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (2.10)$$

$$\theta_{c,n1} = \frac{1}{K_{co}} \cdot \frac{F(M)(1+n_0pK_{\varphi n1}) - n_0pe_gK_{\varphi n1}F(P)}{1+n_0(p+q)K_{\varphi n1} + n_0^2pqK_{\varphi n1}^2(1-1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (2.11)$$

となる。

§3. 載荷 PC 材の緊張力減退理論解

一般の PC 部材は導入プレストレス以外に設計荷重による軸圧力 P_l (圧縮を正) および曲げモーメント M_l (プレストレスモーメント M と同方向も正) をうける。この場合、これらの $\Delta P(t-t_1)$ および $\Delta M(t-t_1)$ におよぼす影響は無視できない。 P_l および M_l は PC 鋼材を併せ考えた PC 材等価断面に作用するから、実際にはこれらはコンクリート断面と緊張材断面とに分かれて負担される。コンクリートのクリープに関係するのはこれら荷重のコンクリート断面分担のものについてだけである。すなわち、コンクリート断面の分担軸圧力 P_{cl} および分担曲げモーメント M_{cl} は

$$P_{cl} = \frac{D_{co}}{D_{co} + D_s} P_l, \quad M_{cl} = \frac{K_{co}'}{K_{co}' + K_s'} M_l \quad (3.1)$$

ここに、 $K_{co}' = E_{co} \cdot I_{c}'$, $K_s' = E_s I_s'$

I_{c}' = 等価断面重心軸に対するコンクリート断面 2 次モーメント (普通は近似的に $I_{c}' = I_c$ とする)

I_s' = 等価断面重心軸に対する PC 鋼材全断面 2 次モーメント (普通は近似的に $I_s' = I_s$ とする)

いま、 P_{cl} および M_{cl} の作用し始める時間を $t=t_2$ とし、それ以後における任意時間 t までにおこるプレストレス力減退量を $\Delta P(t-t_2)$ 、プレストレスモーメント減退量を $\Delta M(t-t_2)$ 、コンクリート断面重心軸における軸方向歪増分を $\delta_{c,t-t_2}$ 、回転歪増分を $\theta_{c,t-t_2}$ とし、 P_{cl} および M_{cl} 作用開始時 $t=t_2$ においておこる PC 鋼材引張力の瞬間的変化を無視すれば、 $t=t_2$ におけるコンクリート断面に作用する持続荷重および持続モーメントはそれぞれ $P+P_{cl}-\Delta P(t_2-t_1)$ 、 $M+M_{cl}-\Delta M(t_2-t_1)$ であるから、(1.5) 式と同様な仮定

$$\Delta P(t-t_2) = \Delta P_{n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}}, \quad \Delta M(t-t_2) = \Delta M_{n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}} \quad (3.2)$$

$\Delta P_{n2}, \Delta M_{n2}$ = それぞれ $\Delta P(t-t_2)$ 、 $\Delta M(t-t_2)$ 最終

値、 φ_{t2} = 時間 t_2 におけるコンクリートのクリープ係数のもとに、 $t=t_2$ 以後のコンクリートクリープ基礎式はつぎのように書くことができる⁴⁾。

$$\delta_{c,t-t_2} = \delta_{c,n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}}, \quad \theta_{c,t-t_2} = \theta_{c,n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}} \quad (3.3)$$

$$\delta_{c,n2} = \frac{F_l(P)}{D_{co}} (\varphi_n - \varphi_{t2}) - \frac{\Delta P_{n2}}{D_{co}} K_{\varphi n2} \quad (3.4)$$

$$\theta_{c,n2} = \frac{F_l(M)}{K_{co}} (\varphi_n - \varphi_{t2}) - \frac{\Delta M_{n2}}{K_{co}} K_{\varphi n2} \quad (3.5)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} F_l(P) &= [P + P_{cl} - \Delta P(t_2 - t_1)](1 - k) \\ &\quad + D_{co} \frac{S_n}{\varphi_n} \\ F_l(M) &= [M + M_{cl} - \Delta M(t_2 - t_1)](1 - k) \\ &\quad + K_{co} \frac{S_n}{\varphi_n} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

$$K_{\varphi n2} = 1 - k \varphi_n + \frac{\varphi_n - \varphi_{t2}}{2} \quad (3.7)$$

$\delta_{c,n2}, \theta_{c,n2}$ = それぞれ $\delta_{c,t-t_2}, \theta_{c,t-t_2}$ 最終値

$\Delta P(t_2 - t_1)$ = プレストレス導入時 t_1 から設計荷重載荷時間 t_2 においておこるプレストレス力減退量で (1.5) 第 1 式に $t=t_2$ を代入して得られる。

$\Delta M(t_2 - t_1)$ = 同上プレストレスモーメント減退量で (1.5) 第 2 式に $t=t_2$ を代入して得られる。

以上の諸式で軸圧力、曲げモーメントおよび歪の方向の正負はそれぞれ項の場合と同様にとつてある。

一方、 $t=t_2$ 以後におこるコンクリート断面の歪度化とプレストレス力減退との関係は、第 1 図の場合と全く同様に説明されるから、(2.3) および (2.4) 式の関係は $t=t_2$ 以後の歪変化に対してつぎのようになる⁴⁾。

$$\Delta P_{n2} = D_s \delta_{c,n2} + K_s \theta_{c,n2} / \nu e_g \quad (3.8)$$

$$\Delta M_{n2} = D_s e_g \delta_{c,n2} + K_s \theta_{c,n2} \quad (3.9)$$

したがって、 ΔP_{n2} および ΔM_{n2} も無載荷の場合の解 (2.8) および (2.9) 式と全く同形となる。

$$\Delta P_{n2} = \frac{n_0 p [1 + n_0 q K_{\varphi n2} (1 - 1/\nu)] F_l(P) + n_0 q F_l(M) / \nu e_g}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n2} + n_0^2 p q K_{\varphi n2}^2 (1 - 1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t2}) \quad (3.10)$$

$$\Delta M_{n2} = \frac{n_0 p e_g F_l(P) + n_0 q [1 + n_0 p K_{\varphi n2} (1 - 1/\nu)] F_l(M)}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n2} + n_0^2 p q K_{\varphi n2}^2 (1 - 1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t2}) \quad (3.11)$$

$\delta_{c,n2}$ および $\theta_{c,n2}$ もまた (2.1.) および (2.11) 式と全く同形となる。

$$\delta_{c,n2} = \frac{1}{D_{co}} \cdot \frac{F_l(P)(1 + n_0 q K_{\varphi n2}) - n_0 q K_{\varphi n2} F_l(M) / \nu e_g}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n2} + n_0^2 p q K_{\varphi n2}^2 (1 - 1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t2}) \quad (3.12)$$

$$\theta_{c,n2} = \frac{1}{K_{co}} \cdot \frac{F_l(M)(1 + n_0 p K_{\varphi n2}) - n_0 p K_{\varphi n2} e_g F_l(P)}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n2} + n_0^2 p q K_{\varphi n2}^2 (1 - 1/\nu)} (\varphi_n - \varphi_{t2}) \quad (3.13)$$

すなわち、以上の諸式はすべて無載荷材 PC の場合の諸式につきの記号変換を行つたものとなる。

$$F(P) \rightarrow F_I(P), \quad F(M) \rightarrow F_I(M), \\ K_{\varphi n1} \rightarrow K_{\varphi n2}, \quad \varphi_{t1} \rightarrow \varphi_{t2} \quad (3.14)$$

(3.14) 式の記号変換法則を知つておれば、無載荷材 PC の場合の理論解から直ちに載荷材 PC の載荷後に対する理論解を得ることができるので便利である。

なお、プレストレス導入直後からの減退量 $\Delta \bar{P}(t-t_1)$ および $\Delta M(t-t_1)$ 、歪変化量 $\delta_{c \cdot t-t_1}$ および $\theta_{c \cdot t-t_1}$ は $t > t_2$ に対して、

$$\Delta \bar{P}(t-t_1) = \Delta P_{n1} \frac{\varphi_{t2} - \varphi_{t1}}{\varphi_n - \varphi_{t1}} + \Delta P_{n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}} \quad (3.15) \times$$

$$\Delta P_{n1} = \frac{n_0 p F(P) + n_0 q F(M) / e_g}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n1}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (4.1), \quad \Delta M_{n1} = \frac{n_0 p e_g F(P) + n_0 q F(M)}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n1}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) = \Delta P_{n1} e_g \quad (4.2)$$

$$\delta_{c \cdot n1} = \frac{1}{D_{co}} \cdot \frac{F(P) (1 + n_0 q K_{\varphi n1}) - n_0 q K_{\varphi n1} F(M) / e_g}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n1}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (4.3)$$

$$\theta_{c \cdot n1} = \frac{1}{K_{co}} \cdot \frac{F(M) (1 + n_0 p K_{\varphi n1}) - n_0 p K_{\varphi n1} F(P) e_g}{1 + n_0 (p + q) K_{\varphi n1}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (4.4)$$

載荷 PC 材の ΔP_{n2} 、 ΔM_{n2} 、 $\delta_{c \cdot n2}$ 、 $\theta_{c \cdot n2}$ に対しては (3.4) 式の変換を行えばよい (記述省略)。

なお、(4.1) 式において、

$$\sigma_{cp} = \frac{P}{A_c} + \frac{P e_g^2}{I_c}, \quad \sigma_{sp} = \frac{P}{A_s}, \quad \varepsilon_s = \frac{S_n}{\varphi_n} + \frac{\Delta S_n e_g}{\varphi_n h} \quad (4.5)$$

とおけば、(4.1) 式は

$$\Delta P_{n1} = n_0 A_s \frac{(1-k) \sigma_p^2 + E_{co} \varepsilon_s}{1 + n_0 \sigma_{cp} K_{\varphi n1} / \sigma_{sp}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (4.6)$$

となる。また、コンクリートの弾性係数の時間的変化を無視することにすれば、 $k=0$ 、 $E_{co}=E_c$ 、 $n_0=n=E_s/E_c$ において (4.6) 式は

$$\Delta P_{n1} = A_s \frac{n \sigma_{cp} + E_s \varepsilon_s}{1 + n \sigma_{cp} \left(1 - \frac{\varphi_n - \varphi_{t1}}{2}\right) / \sigma_{sp}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (4.7)$$

となり、DIN 4227 解説に示されている計算式¹⁰⁾と一致する。すなわち、本研究において述べた理論式は DIN 4227 解説に示されている計算式を多段配置緊張材を持つ PC 材一般断面にも正しく適用できる拡張近似理論式であることがわかる。

4.2 $e_g=0$ の場合

この場合には $\nu = I_s / A_s e_g \rightarrow \infty$ となつて、上記の各理論式は適用できない。すなわち、理論式誘導の過程において、無載荷 PC 材では (2.3) および (2.4) 式、載荷 PC 材では (3.8) および (3.9) 式をそのまま用いることはできない。無載荷材を例にとるとこれらのかわりに

$$\Delta P_{n1} = D_s \cdot \delta_{c \cdot n1}, \quad \Delta M_{n1} = K_s \cdot \theta_{c \cdot n1} \quad (4.8)$$

を用いなければならない。したがつて、解は (4.8) 式に (1.8) および (1.9) 式をそれぞれ代入して

$$\Delta P_{n1} = \frac{n_0 p F(P)}{1 + n_0 p K_{\varphi n1}} (\varphi_n - \varphi_{t1}),$$

$$\times \Delta \bar{M}(t-t_1) = \Delta M_{n1} \frac{\varphi_{t2} - \varphi_{t1}}{\varphi_n - \varphi_{t1}} + \Delta M_{n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}} \quad (3.16)$$

$$\delta_{c \cdot t-t_1} = \delta_{c \cdot n1} \frac{\varphi_{t2} - \varphi_{t1}}{\varphi_n - \varphi_{t1}} + \delta_{c \cdot n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}} \quad (3.17)$$

$$\theta_{c \cdot t-t_1} = \theta_{c \cdot n1} \frac{\varphi_{t2} - \varphi_{t1}}{\varphi_n - \varphi_{t1}} + \theta_{c \cdot n2} \frac{\varphi_t - \varphi_{t2}}{\varphi_n - \varphi_{t2}} \quad (3.18)$$

から求められる。

§4. 特別な場合

4.1 PC 鋼材 1 段配置の場合

この場合には $\nu=1$ となる。したがつて、理論解は無載荷材 PC に対してつぎのようになる。

$$\Delta M_{n1} = \frac{n_0 q F(M)}{1 + n_0 q K_{\varphi n1}} (\varphi_n - \varphi_{t1}) \quad (4.9)$$

載荷 PC 材の $t=t_2$ 以後の減退量最終値については (4.9) 式に (4.14) 式の変換を行えば直ちに得られる (記述省略)。

§5. 結 語

本研究においては PC 材の緊張力減退は近似的にコンクリートのクリープと相似におこることを利用して、多段配置緊張材を持つ PC 一般断面に関する緊張力減退近似理論式を導いた。これらは DIN 4227 解説に示されている計算式を更に拡張したものであつて、多段配置緊張材を持つ PC 断面に対しより正確な計算ができる。本研究における理論式と著者の先に導いた厳密理論式とも比較すると、本理論式による減退量計算値は厳密理論式による場合とくらべて最大 10% 程度小さく計算されるようである。(算例は紙面の都合で省略)

【参考文献】

- 1) 坂、岡田、六車、学会論文集第 51 号、昭 30.9
- 2) 坂、岡田、六車、学会研究報告第 31 号、昭 30.5
- 3) S. Ban, K. Okada & H. Muguruma, 京都大学工学研究所研究報告、Vol. 7, No. 5, Report No. 39, Oct 1957.
- 4) 坂、六車、日本建築学会論文報告集、第 64 号、昭 35.2
- 5) H. Baldauf, Beton u. Stahlbetonbau, 49 Jg. H. 9, Sept. 1954.
- 6) A. Habel, Beton u. Stahlbetonbau, 49 Jg. H. 2, Feb. 1954.
- 7) R. Busemann, Der Bauing., 25 Jg. H. 11, Nov. 1950.
- 8) R. Schwarz, Der Bauing., 27 Jg. H. 3, März 1952.
- 9) A.E. Komendant, Prestressed Concrete Structures, 1952.
- 10) H. Rüsç, Spannbeton-Erläuterungen zu DIN 4227, 1954.