

パシフィックコンサルタンツ(株) 正員 石黒 如

まえがき: P C 構造物の設計では, コンクリートのクリープ変形によって生じるプレストレスの減少量や断面力の移行量についての計算を行う。これらのクリープ解析においては, コンクリートの材令とともに進行するフロー歪みに加えて, 荷重載荷期間に伴って生じる遅れ弾性歪みを考慮する必要がある。そこで, 本報告では, 道路橋示方書の算式を用いて計算したプレストレス減少量および断面力移行量を段階的積分法を用いて得た値と比較することにより, 遅れ弾性歪みが適切に評価されているかについて調べた。

解法 I (道路橋示方書による解法): プレストレス導入から計算時刻 t までのコンクリートのクリープ係数を φ , 乾燥収縮度を ε_s とし, P C 鋼材の断面積を A_p , コンクリートに対する弾性係数比を $n_p = E_p / E_c$ とするとき, コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によって生じるプレストレス力の減少量 ΔP_φ は,

$$\Delta P_\varphi = \{A_p n_p \varphi \cdot (\sigma_{cd} + \sigma_{cpl}) + A_p E_p \varepsilon_s\} / R, \quad R = 1 + n_p \frac{\sigma_{cpl}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

で計算される。但し, 主桁自重および導入直後のプレストレスによる P C 鋼材図心のコンクリートの応力度を σ_{cd} , σ_{cpl} , 導入直後の P C 鋼材の引張応力度を σ_{pt} とする。コンクリート純断面に対する P C 鋼材の偏心を e_p とおけば, 曲げモーメントの変化量は $\Delta M_\varphi = \Delta P_\varphi e_p$ で表わされる。また, 最終構造系が形成されたときの荷重による曲げモーメントを M_1 とおき, 荷重を最終構造系に作用させたときの曲げモーメントを M_0 とおけば, クリープ・乾燥収縮による断面力の移行量は(2)式で計算される。

$$M_\varphi = (M_0 - M_1)(1 - e^{-\varphi}) \quad (2)$$

解法 II (段階的積分法): 最初の荷重作用から計算時刻 t までを n 個の微小時間 Δt に分割し, 断面力増分を $\{\Delta F_c\}_i (i=1, 2, \dots, n)$ とおけば, k 番目の Δt 間に生じるクリープ変形と乾燥収縮を拘束するのに必要な力 $\{\Delta F_{c\varphi a}\}_k$ は次式で与えられる。 $[K_c]_k$ は純断面の部材剛性マトリックス, $[E]$ は単位行列を表わす。 Δt 間の遅れ弾性歪み係数 $\Delta \varphi_d$ とフロー歪み係数 $\Delta \varphi_f$ は文献1), 弾性係数進行度 K_k は文献2)による。

$$\{\Delta F_{c\varphi a}\}_k = -K_k \sum_{i=0}^{k-1} \{\Delta F_c\}_i (\Delta \varphi_d + \Delta \varphi_f)_{i,k} - [K_c]_k [E] \{\Delta \varepsilon_s\}_k \quad (3)$$

ここで, 節点力 $\{F\}$, 変位 $\{\delta\}$ および Δt 間の乾燥収縮の増分 $\{\Delta \varepsilon_s\}$ は(4)式に示す通り。 ℓ は部材の長さ, 添字 l, r は部材の両端を表わす。 Δt 間の乾燥収縮度 $\Delta \varepsilon_s$ は文献1)による。

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} N_l \\ S_l \\ M_l \\ N_r \\ S_r \\ M_r \end{Bmatrix}, \quad \{\delta\} = \begin{Bmatrix} u_l \\ v_l \\ r_l \\ u_r \\ v_r \\ r_r \end{Bmatrix}, \quad \{\Delta \varepsilon_s\} = \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_s \ell / 2 \\ 0 \\ 0 \\ -\Delta \varepsilon_s \ell / 2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

一方, 拘束の解放によって合成断面に作用する等価節点力 $\{\Delta F_{\varphi 0}\}_k$ は次式で与えられる。ここで, 合成断面の変形量を純断面に変換するマトリックス $[D]_k$ については文献3)を参照されたい。

$$\{\Delta F_{\varphi 0}\}_k = K_k \sum_{i=0}^{k-1} [D]_k^T \{\Delta F_c\}_i (\Delta \varphi_d + \Delta \varphi_f)_{i,k} + [D]_k^T [K_c]_k [E] \{\Delta \varepsilon_s\}_k \quad (5)$$

この解放によって生じる不静定力を $\{\Delta F_{\varphi 1}\}_k$ とおき, Δt 間の合成断面に対する弾性変形による断面力増分を $\{\Delta F_e\}_k$ とおけば, $t \geq 0$ に対して(6)式が成り立つ。但し, $t=0$ では $\{\Delta F_c\}_k = [A]_k \{\Delta F_e\}_k$ 。

$$\{\Delta F_c\}_k = \{\Delta F_{c\varphi a}\}_k + [A]_k (\{\Delta F_e\}_k + \{\Delta F_{\varphi 0}\}_k + \{\Delta F_{\varphi 1}\}_k) \quad (6)$$

部材断面を構成するコンクリートと鋼材に断面力を分配するマトリックス $[A]_k$ については文献3)を参照されたい。以上より, 時刻 t におけるクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの減少量 $\{\Delta F_\varphi\}_n$ および断面力の移行量 $\{F_\varphi'\}_n$ は(7)式で表わされ, それらの値は数値積分によって求められる。

$$\{\Delta F_\varphi\}_n = \sum_{k=1}^n (\{\Delta F_{c\varphi a}\}_k + [A]_k \{\Delta F_{\varphi 0}\}_k), \quad \{F_\varphi'\}_n = \sum_{k=1}^n \{\Delta F_{\varphi 1}\}_k \quad (7)$$

比較計算：以下の例について解法Ⅰの計算結果を解法Ⅱを用いて得た値と比較する。いずれの場合についても、相対湿度を70%，コンクリート温度を20℃とし、硬化速度係数 α と仮想部材厚 h_{th} は図-1, 2, 3に示す値とした。

【Case-1】図-1のようなPC単純桁の打設から10日後にプレストレス $P=66.35\text{ t}$ を導入、主桁自重 $\omega=0.4\text{ t/m}$ を作用させた場合を考え、支間中央2でのプレストレスによる曲げモーメントの減少量 ΔM_p を計算する。

【Case-2】図-2のような片持ち梁の打設から10日後に持続荷重 $\omega=1.0\text{ t/m}$ を載荷し、弾性変形終了後にその先端を支持した場合を考え、固定端1における曲げモーメントの移行量 M_p を計算する。

【Case-3】図-3のような3連の単純T桁を打設、主桁自重 $\omega=1.7\text{ t/m}$ （支点部は $\omega=2.4\text{ t/m}$ ）を作用させてから10日後に中間支点を連結した場合を考え、中間支点2における曲げモーメントの移行量 M_p を計算する。

計算結果は表-1に示す通りである。いずれの例においても、遅れ弾性歪みを無視した場合には解法Ⅰの計算結果が解法Ⅱによる値とよく一致している。また、解法Ⅱの結果より、 $t=0$ の荷重作用に対する遅れ弾性歪みのみを考慮すると減少量 ΔM_p あるいは移行量 M_p は増加するが、 $t>0$ の減少量（または移行量）に対するものを含む全ての遅れ弾性歪みを考慮した場合にはそれらの値が減少することがわかる。これは、減少量（または移行量）に対する遅れ弾性歪みが、荷重作用に対するそれと異符号であるためと考えられる。

ところが、これに対して解法Ⅰでは遅れ弾性歪みをフロー歪みとして扱うため、逆に全ての遅れ弾性歪みを考慮したときの方が減少量（または移行量）の値が大きくなっている。

この傾向はCase-1に示した減少量の計算の場合よりCase-2, 3に示した移行量の計算の場合に顕著であり、解法Ⅱと比べたときの計算誤差は5%を大きく越えている。このことは、減少量では $t=0$ の荷重作用に対する遅れ弾性歪みが支配的であるのに対して、移行量では $t>0$ の移行量自体に対する遅れ弾性歪みの影響が大きいことを示していると考えられる。解法Ⅰにおけるこの誤差は設計上必ずしも安全側とは言えず、今後このような遅れ弾性歪みの特性を合理的に評価する方法についての検討が必要である。

まとめ：本研究により、PC構造のプレストレス減少量および断面力移行量の計算に道路橋示方書の算式を適用したときの結果における遅れ弾性歪みの影響について、以下のことがわかった。

- 1) 遅れ弾性歪みは減少量あるいは移行量を減少させる要因となるが、道路橋示方書の算式では逆に増加させる要因として評価されており、このことが計算誤差を生じさせる重要な原因となっている。
- 2) 減少量の計算では1)による計算誤差は十分小さく、設計上問題とはならない。
- 3) 移行量の計算では1)による計算誤差が5%を大きく越えており、また設計上安全側とも言えないため、遅れ弾性歪みの影響を合理的に評価する方法についての検討が必要である。

参考文献：1) 道路橋示方書・同解説(Ⅰ)(Ⅲ)，日本道路協会，1994

2) コンクリート道路橋設計便覧，日本道路協会，1985

3) 石黒 如：鋼材の拘束を考慮した段階的積分法によるPC斜張橋のクリープ解析，コンクリート工学年次論文報告集，vol.13，No.2，pp.121-126，1991

4) 猪股 俊司：多数段配置PC緊張材および普通鉄筋を有するPC断面のクリープ解，プレストレストコンクリート，1971.2

5) 佐藤 素啓；渡辺 実；佐藤 昇：変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析の基礎理論，プレストレストコンクリート，1980.4

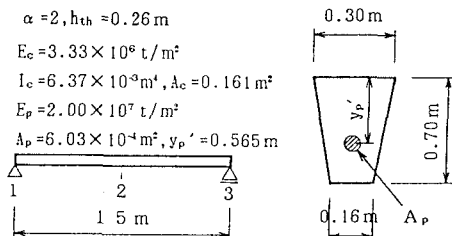


図-1 PC単純桁

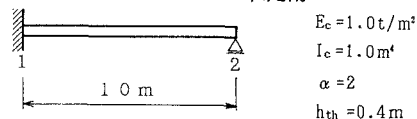


図-2 先端支持桁

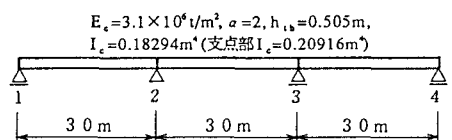


図-3 3径間連結T桁

表-1 計算結果

		φ_d を無視	荷重作用に対する φ_d のみ考慮	φ_d を考慮
Case-1 (ΔM_p)	I	1.615	1.804	1.804
	II	1.610	1.808	1.771
	I/II	1.003	0.998	1.019
Case-2 (M_p)	I	323.739	340.639	340.639
	II	325.865	363.495	316.921
	I/II	0.993	0.937	1.075
Case-3 (M_p)	I	-134.611	-142.007	-142.007
	II	-135.422	-147.350	-127.492
	I/II	0.994	0.964	1.114