

V-12

プレストレストコンクリート斜張橋のクリープ解析について†

ドービー建設工業(株) 正員 石黒 如

1. まえがき

近年、我が国の橋梁建設においても景観が重視されるようになり、その新しい空気の中で、PC斜張橋が一躍脚光を浴びるようになってきた。しかし、PC斜張橋は、その構造形式が従来のプレストレストコンクリート橋と大きく異なるため、特にクリープによる断面力移行量の解析に関して多くの問題が残されている。その主なものを列挙すれば、次の通りである。

- 1) 斜材による拘束
- 2) 各ブロック(部材)の間のフロー歪みの差
- 3) 各荷重(断面力)の間の遅れ弾性歪みの差
- 4) 各ブロック(部材)の間の乾燥収縮度の差
- 5) コンクリートの弾性係数の変化
- 6) 鉄筋、PC鋼材による拘束
- 7) 各鉄筋、PC鋼材の間の偏心の差
- 8) 鉄筋、PC鋼材のレラクセーションの変化
- 9) 施工時のクリープによる影響

これに対して、これまでのプレストレストコンクリート橋の設計に用いられてきた手法、或いは論文等で提案された解析方法としては、次のようなものが挙げられる。

- a) クリープ速度法(Dischinger解法)
- b) 有効弾性係数法
- c) 平均応力法
- d) aging-coefficient法(Trostによる提案)
- e) 小宮・酒井・前田による提案‡

これらのうち、a)～d)は、これまでの設計に多く用いられてきた手法であるが、いずれも、主として前掲の問題点の2)～4)のみに注目した方法であり、斜材および鉄筋、PC鋼材による拘束をどう扱うかという大きな問題については、まだ未解決のままである。また、e)では、2)～4)以外の問題点についても検討が行われているが、その解析方法は本論文で用いたものと異なる。加えて、e)では、1), 5), 9)についての検討が行われていない。しかし、北海道のように冬季間の施工が困難な地域においては橋梁の建設が多年度に渡るため、9)の問題は無視できない。

本論文では、鉄筋およびPC鋼材の拘束を考慮した段階的積分法を用いてPC斜張橋のクリープによる断面力移行量についての厳密計算を行うことにより、前掲の1)～9)の問題を解決した。

2. 解析方法

各計算ケースの時間間隔 Δt が十分に小さい場合、この Δt 間におけるコンクリートとPC鋼材のクリープ変形および乾燥収縮の差によって生じる断面力は、次式によって計算される。

$$\Delta N_{cys} = \sum_{i=1}^{n-1} \{ K_{en} \cdot \Delta \varphi \{ (\Delta F_c) + (\Delta F_{cp}') + (\Delta F_{cp}) \}_i \} + E_c A_c \Delta \varepsilon_{cs}$$

これを、軸力と曲げモーメントに分けて表わせば、

† Analysis of creep effects in prestressed concrete cable stayed bridges.

‡ 参考文献7)を参照のこと。

$$\Delta N_{cya} = \sum_{i=1}^{n-1} \{ K_{en} (\Delta \varphi_{di} + \Delta \varphi_{fn}) (\Delta N_c + \Delta N_{cp'} + \Delta N_{cp})_i \} + E_c A_c \Delta \varepsilon_{cs}$$

$$\Delta M_{cya} = \sum_{i=1}^{n-1} \{ K_{en} (\Delta \varphi_{di} + \Delta \varphi_{fn}) (\Delta M_c + \Delta M_{cp'} + \Delta M_{cp})_i \}$$

ここに、 ΔN_{cya} 、 ΔM_{cya} ：コンクリート純断面に Δt 間のクリープ変形および乾燥収縮によって生じる内部断面力

ΔN_c 、 ΔM_c ：純断面に対する各 Δt 間の死荷重またはプレストレスの増加による軸力および曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{cp'}$ 、 $\Delta M_{cp'}$ ：純断面に対する各 Δt 間のクリープ・乾燥収縮による軸力および曲げモーメントの移行量（静定分）

ΔN_{cp} 、 ΔM_{cp} ：純断面に対する各 Δt 間のクリープ・乾燥収縮による軸力および曲げモーメントの移行量（不静定分）

$\Delta \varphi_d$ ：各荷重についての Δt 間の遅れ弾性ひずみ係数

$\Delta \varphi_f$ ：各部材についての Δt 間のフローひずみ係数

$\Delta \varepsilon_{cs}$ ：各部材についての Δt 間の乾燥収縮度

K_e ：各部材についての E_c の進行度

E_c ：コンクリートの弾性係数

n ：減少量計算時期の架設ケース番号

この時、 Δt 間のクリープ・乾燥収縮による断面力移行量のうちの静定分は次式より求まる。さらに、これを Δt について累計することにより、各計算ケースでの値を算出する。

$$\Delta N_{cp'} = \alpha_c \cdot \Delta N_{y0} + \beta_c \cdot \Delta M_{y0} + \Delta N_{cya}$$

$$\Delta M_{cp'} = \gamma_c \cdot \Delta M_{y0} + \Delta M_{cya}$$

$$\Delta P_p = \sum_{j=1}^n \{ \alpha_p (\Delta N_{y0} + \Delta N_{y1}) + \beta_p (\Delta M_{y0} + \Delta M_{y1}) \}_j$$

$$\text{但し、} \quad \Delta N_{y0} = -\Delta N_{cya}$$

$$\Delta M_{y0} = -\Delta M_{cya} - \Delta N_{cya} (y'_e - y'_c)$$

$$\alpha_c = \frac{A_c}{A_e}, \quad \beta_c = \frac{A_c}{I_e} (y'_e - y'_c), \quad \gamma_c = \frac{I_c}{I_e}$$

$$\alpha_p = \frac{n \cdot A_p}{A_e}, \quad \beta_p = \frac{n \cdot A_p}{I_e} (y'_e - y'_p), \quad n = \frac{E_p}{E_c}$$

ここに、 ΔN_{y0} 、 ΔM_{y0} ：換算断面に対する Δt 間のクリープ・乾燥収縮による軸力および曲げモーメントの移行量（静定分）

ΔN_{y1} 、 ΔM_{y1} ：換算断面に対する Δt 間のクリープ・乾燥収縮による軸力および曲げモーメントの移行量（不静定分）

ΔP_p ： Δt 間のクリープ・乾燥収縮による PC 鋼材緊張力の減少量

A_e 、 I_e 、 y'_e ：換算断面の断面諸数値

A_c 、 I_c 、 y'_c ：純断面の断面諸数値

A_p 、 E_p 、 y'_p ：PC 鋼材の諸数値

m ：減少量計算時期までに緊張が終了している PC 鋼材の本数

Δt 間のクリープ・乾燥収縮による断面力移行量のうちの不静定分は、変形法による平面骨組理論を用いることにより、次式で計算される。これを累計して各計算ケースでの値を算出する。

$$\{\Delta \delta_p\} = [K]^{-1} \{\Delta F_{y0}\}$$

$$\{\Delta F_{y1}\} = [K] \{\Delta \delta_p\}$$

$$\text{但し, } \{ \Delta F_{p0} \} = \{ \Delta N_{p0} \quad \Delta M_{p0} \}^T$$

$$\{ \Delta F_{p1} \} = \{ \Delta N_{p1} \quad \Delta M_{p1} \}^T$$

$$\Delta N_{cp} = \alpha_c \cdot \Delta N_{p1} + \beta_c \cdot \Delta M_{p1}$$

$$\Delta M_{cp} = \gamma_c \cdot \Delta M_{p1}$$

3. 諸 定 数

各計算時期でのコンクリートのクリープ係数は、次式によって計算する。但し、 φ_{d0} 、 β_d 、 β_f の値は後掲の図表から求める。(参考文献1)による)

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{d0} \cdot \beta_d(t - t_0) + \varphi_{f0} \cdot \{ \beta_f(t') - \beta_f(t_0') \}$$

$$\text{但し, } t', t_0' = \alpha \cdot \frac{\Sigma(T+10) \cdot \Delta t}{30}, \quad h_{th} = \lambda \cdot \frac{A_c}{u}$$

ここに、 $\varphi(t, t_0)$ ：材令 t_0 日に持続荷重が載荷されたコンクリートの材令 t 日におけるクリープ係数。

t, t_0 ：持続荷重の載荷時期およびクリープ係数の計算時期までの実経過日数。

t', t_0' ：持続荷重の載荷時期およびクリープ係数の計算時期までのコンクリートのクリープに対する有効経過日数。

α ：セメント種類の影響を考慮した、コンクリートの硬化速度に関する係数。

T ：コンクリートの温度。

$\Delta t'$ ：コンクリートの温度が $T(^{\circ}\text{C})$ である期間の実日数。

φ_{d0} ：遅れ弾性ひずみに対する基本クリープ係数。(=0.4)

φ_{f0} ：フローひずみに対する基本クリープ係数。

β_d ：持続荷重載荷後の実経過日数($t - t_0$)の関数で、遅れ弾性歪みの進行度を表わす。

β_f ：コンクリートの有効経過日数および仮想部材厚の関数で、フロー歪みの進行度を表わす。

h_{th} ：部材の仮想厚さ。

u ：部材の周長。

計算時期におけるコンクリートの乾燥収縮度は、次式によって計算する。但し、 ε_{s0} 、 β_s の値は後掲の図表から求める。(参考文献1)による)

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \{ \beta_s(t') - \beta_s(t_0') \}$$

$$t', t_0' = \frac{\Sigma(T+10) \cdot \Delta t'}{30}$$

ここに、 $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ ：材令 t_0 日から t 日までの間の乾燥収縮度。

ε_{s0} ：コンクリートの基本乾燥収縮ひずみ。

β_s ：コンクリートの有効経過日数および仮想部材厚の関数で、乾燥収縮の進行度を表わす。

また、コンクリートの弾性係数は、28日より若材令の部材の弾性変形について、次の補正係数 K_e を考慮する。但し、その値は後掲の図から求める。(参考文献2)による)

$$E_t = K_e \cdot E_{28}$$

ここに、 $E(t)$: 材令 t におけるコンクリートの弾性係数。

E_{28} : 材令 28 日におけるコンクリートの弾性係数。

レラクセーションの進行度については、参考文献 8) に示されている次式を用いて計算する。尚進行度の値については、後掲の図に示す通りである。

$$\Delta r(t, t_0) = r_0 \{g(t) - g(t_0)\}$$

$$\text{但し、} \quad g(t) = \sqrt[3]{\frac{(2.21 + m) \cdot m}{1 + (3.6 + m) \cdot m}} \quad , \quad m = \frac{T}{30}$$

ここに、 $r(t, t_0)$: 時刻 t から t_0 の間に進行する PC 鋼材の見かけのレラクセーション率。

r_0 : PC 鋼材の見かけのレラクセーション率。

$g(t)$: レラクセーションの進行度。

T : 実経過日数。

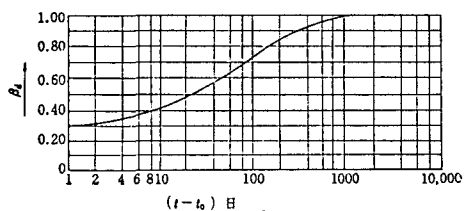


図-1 遅れ弾性歪みの進行度 β_d

環境条件	$\phi / \%$	λ	ϵ_{d0}
水中	0.8	60	-10×10^{-5}
相対湿度 90%	1.3	10	$+10 \times 10^{-5}$
" 70%	2.0	3	$+25 \times 10^{-5}$
" 40%	3.0	2	$+40 \times 10^{-5}$

表-1 クリープ・乾燥収縮の基本値

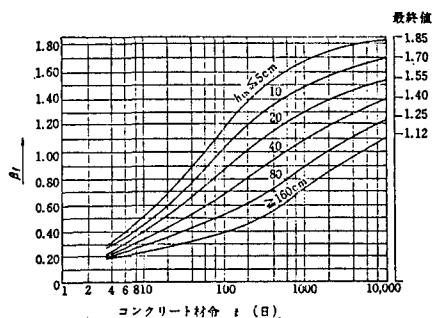


図-2 フロー歪みの進行度 β_f

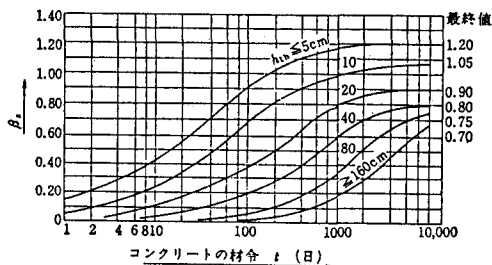


図-3 乾燥収縮の進行度 β_s

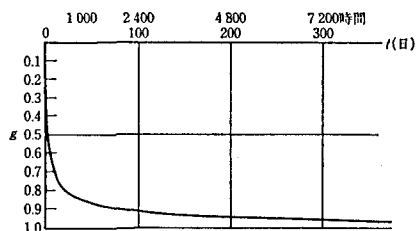


図-4 レラクセーションの進行度 g

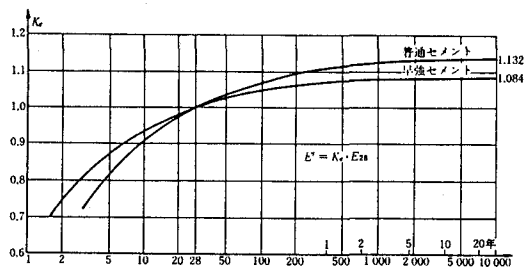


図-5 弾性係数の補正係数 K 。

4. 計算例

次図のような PC 斜張橋を支保工上で一括施工した場合について、前述の解析方法を用いたクリープ・乾燥収縮による断面力移行量の計算例を示す。

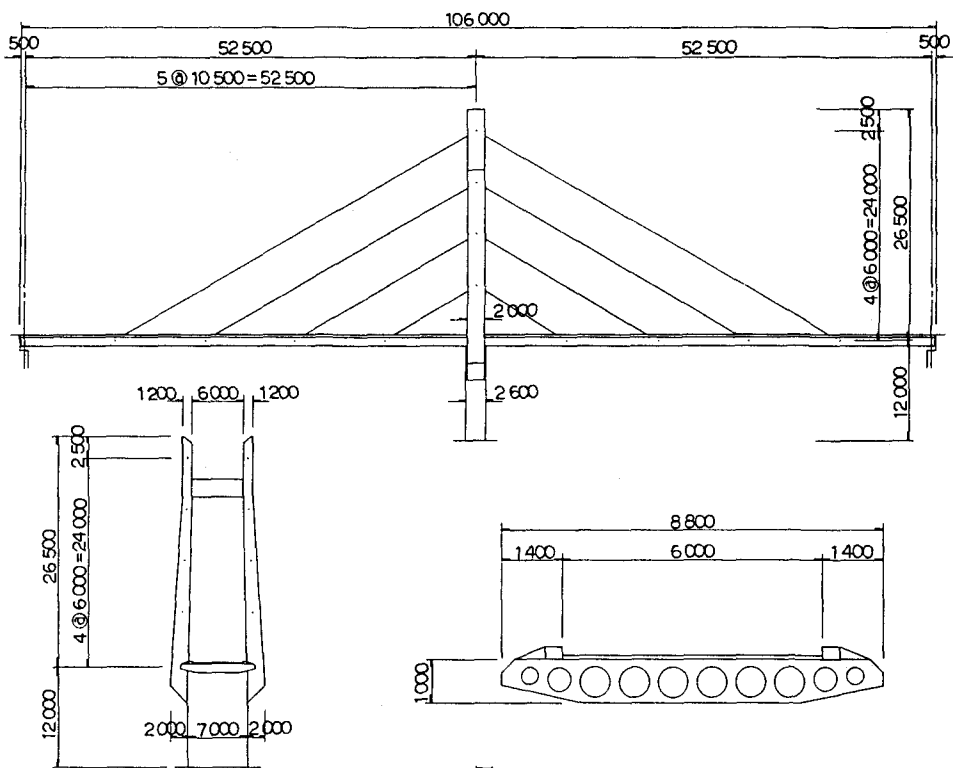


図-6

但し、施工工程は次のように仮定する。

主桁打設(0日)→主桁緊張(5日)→主塔打設(90日)→斜材緊張(120日)→橋面施工(180日)

この計算結果をグラフで示せば、以下の通りである。

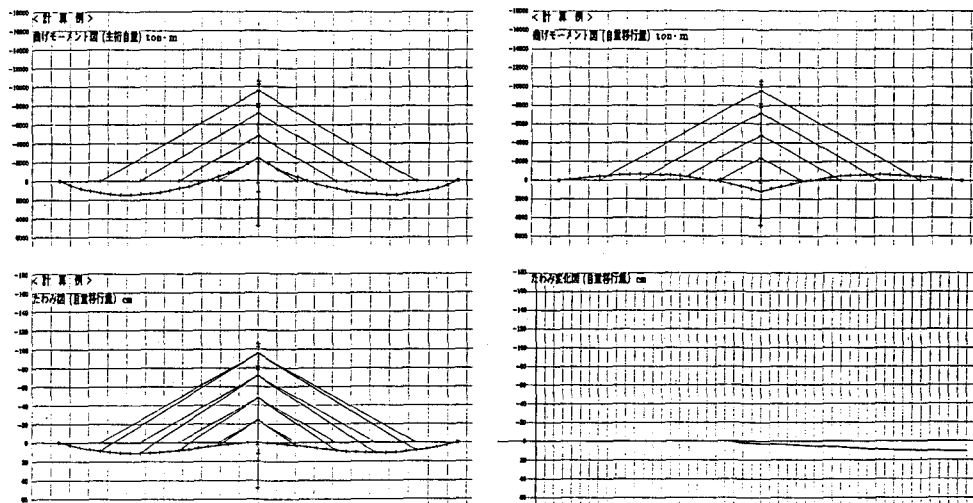


図-7

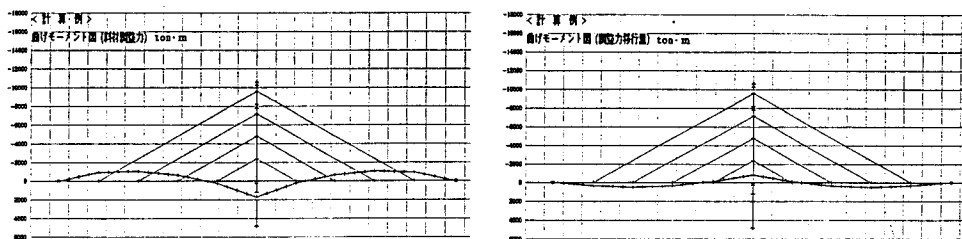


図-8

5. ま と め

前掲のグラフからも明らかなように、PC斜張橋におけるクリープによる断面力移行量の値は、荷重による断面力に比べても、小さなものではない。設計思想としては、クリープによる移行量の影響が小さくなるような構造諸元および施工順序を選択するという方策も考えられる。しかし、そのためには、PC斜張橋の構造諸元等がその移行量に与える影響を、予め十分に把握しておく必要がある。また、工費全体に占める斜材コストの低減ということも重要な問題になるが、その際には、クリープによる移行量について一層正確な分析が必要となる。このような検討を行う場合、本論文で示した解析方法は非常に有効であると考えられる。

尚、本論文では一つの計算例を示すに留まったが、今後は、PC斜張橋の構造諸元がクリープによる断面力移行量に与える影響、段階的積分法における時間分割の間隔が移行量の計算精度に与える影響等について、さらに詳しく検討を重ねる必要があると考えられる。

6. 参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説(I)(II), 日本道路協会, 1978
- 2) コンクリート道路橋設計便覧, 日本道路協会, 1985
- 3) Rüsch.H; Jungwirth.D; 百島 裕信(訳): コンクリートのクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976
- 4) Nevielle.A.M: Creep of Concrete—Plain, Reinforced and prestressed, North-Holland Publishing Company Amsterdam, 1970
- 5) Joachim.Q: Zeitabhängige Spannungumlagerungen bei seilabgespannten Massivbrücken, Werner-Verlag, 1980
- 6) 角田 与史雄: 曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状, 土木学会論文集, 1978.8
- 7) 小宮 正久; 酒井 一; 前田 晴人: 任意形コンクリート構造物のクリープ解析法に関する一提案, プレストレストコンクリート, Mar 1987
- 8) 猪股 俊司: プレストレストコンクリート部材中でのPC鋼材のレラクセーション, プレストレストコンクリート, June 1973
- 9) 石原 重孝: PC斜張橋のクリープ解析の基本, プレストレストコンクリート, Mar 1985