

パシフィックコンサルタンツ(株) 正員 石黒 如

まえがき：本報告では、PC斜張橋の部材断面と主桁PC鋼材配置を仮定した場合に、架設時と完成時の各種許容値から定まる制約条件の下で斜材量が最小となる斜材張力組合せを最適解と考えて、斜材張力の最適化を行う方法を示す。なお、Optimizerには单一目的線形計画法を用い、高次不静定の複合構造であるPC斜張橋のもつクリープに関する次の諸要因を総合的に評価するため、Analyzerには鋼材の拘束とコンクリートの弾性係数の変化を考慮した段階的積分法を用いる。

- 1) 荷重の作用時刻による遅れ弾性歪み係数の違い。(図-1)
- 2) コンクリートの材令による弾性係数、フロー歪み係数、乾燥収縮度の違い。(図-1)
- 3) 鉄筋、PC鋼材によるコンクリートの変形の拘束。
- 4) クリープ進行中に繰り返し起きる構造系の変化。

解析方法：荷重作用時刻 t_0 から計算時刻 t までを n 個の微小時間隔 Δt に分割し、各 Δt 間の断面力増分を $\{\Delta F_c\}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$)、時刻 $t - \Delta t$ から t までに部材純断面に生じるクリープ・乾燥収縮による変形を完全に拘束するのに必要な固定端力を $\{\Delta F_{c\varphi}\}_n$ 、拘束の解放によって部材の合成断面に作用する等価節点力を $\{\Delta F_{\varphi 0}\}_n$ 、等価節点力が全体構造系に作用したときの移行量の不静定分を $\{\Delta F_{\varphi 1}\}_n$ とする。外力としてただ一回の斜材調整を考え、単位調整量 $\{P^*\}$ による断面力を $\{F^*\}$ とすれば、 $t = t_0$ (即ち $i = 0$) のとき $\{\Delta F_{c\varphi}\}_0 = \{\Delta F_{\varphi 0}\}_0 = \{\Delta F_{\varphi 1}\}_0 = 0$ であるから $\{\Delta F_c\}_0 = [A]_0 \{F^*\}$ となる。また $t > t_0$ (即ち $i = 1, 2, \dots, n$) のときは(1)式で計算される。換算マトリックス $[D]$ 、分配マトリックス $[A]$ 、斜材調整以外の荷重および乾燥収縮による移行量の計算については、文献3)を参照されたい。

$$\begin{aligned} \{\Delta F_{c\varphi}\}_k &= -K_k \sum_{i=0}^{k-1} \{\Delta F_c\}_i (\Delta \varphi_d + \Delta \varphi_f)_{i+k}, \\ \{\Delta F_{\varphi 0}\}_k &= K_k \sum_{i=0}^{k-1} [D]_k^T \{\Delta F_c\}_i (\Delta \varphi_d + \Delta \varphi_f)_{i+k}, \\ \{\Delta F_c\}_k &= \{\Delta F_{c\varphi}\}_k + [A]_k (\{\Delta F_{\varphi 0}\}_k + \{\Delta F_{\varphi 1}\}_k) \quad (1) \end{aligned}$$

時刻 t における斜材調整による断面力と移行量の合計を $\{F_c\}_n = \sum_{k=0}^n \{\Delta F_c\}_k$ とおけば、 $\{F_c\}_n$ は $\{F^*\}$ および $\{P^*\}$ に対して線形である。さらに、斜材調整を N 回行うものとして $\{F_c\}_n$ を $\{F_c\}_{nj}$ ($j = 1, 2, \dots, N$)、斜材調整以外の荷重および乾燥収縮による断面力とそれらの移行量を $\{F_w\}_n$ とおき、斜材調整量を $\{P\}_j = \{P^*\}_{j+1} x_j$ とするとき、断面力の合計がそれらに対する許容値 $\{F_s\}$ を満足するためには $\sum_{j=1}^N \{F_c\}_{nj} x_j \leq \{F_s\} - \{F_w\}_n$ となるよう x_j の組合せを計算すればよい。この関係は断面力と変位、異なる n が混在しても成り立つから、単位調整量に対する実調整量の倍率 $\{X\}$ を決定変数にとれば、(2)式に示す制約条件を伴う目的関数 Z を最小とする $\{X\}$ を求ることにより、斜材鋼材量が最小となる最適斜材調整量を決定できる。詳細については、文献4)を参照されたい。

$$Z = \{L\}^T [I_v] \{X\}, \quad [I_v] \{X\} \leq \{V_s\} - \{V_w\} \quad (2)$$

上式で $\{L\}$ は各斜材の長さ、 $[I_v]$ は斜材調整量の各斜材張力に対する影響値、 $[I_v]$ は斜材調整量の各種設計変数に対する影響値、 $\{V_s\}$ は各種設計変数に対する許容値、 $\{V_w\}$ は斜材調整以外の荷重および乾燥収縮による各種設計変数の値を表わす。

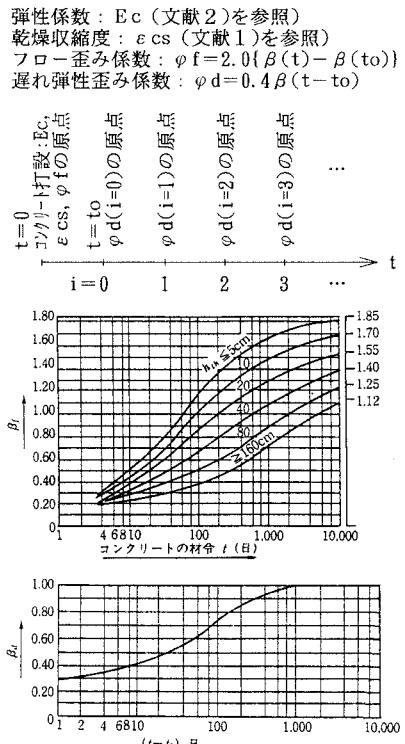


図-1 コンクリートの諸定数

AnalyzerとOptimizerを使った斜材張力最適化の流れは、図-2に示す通りである。ここで、時間分割数の増加に伴う計算時間およびデータファイル容量の増大が問題となるが、 $\Delta\varphi_t = 0.2$ 程度の粗い時間分割でも十分な計算精度を確保できることが文献3)で確認されている。これは、クリープ係数をはじめとするコンクリートの諸定数が、図-1に示すようななめらかな単調増加関数であるためと考えられる。

計算例: 図-3のようなPC斜張橋について、本報告の方法を用いた斜材張力の最適化を行う。斜材調整は各斜材に対して、主桁の張出し施工サイクルにあわせて下段の斜材から順に行う一次調整と、側径間を閉合し橋脚上の主桁仮固定を撤去した後で上段の斜材から順に行う二次調整の二回ずつとする。また、各斜材調整の実施時期 t_0 は表-1に示す通りである。許容値は、一次調整時の主桁曲げモーメント($M \geq 0 \text{ tf}\cdot\text{m}$)と斜材張力($N \geq -1165 \text{ tf}$)、橋面施工時の主桁たわみ($50 \geq \delta \geq -25 \text{ mm}$)、設計荷重時の斜材張力($N \geq -500 \text{ tf}$)と主桁コンクリート応力度($0 \geq \sigma_c \geq -15 \text{ kgf/cm}^2$)とする。結果は表-1に示す通りであり、S3斜材二次調整量が他の斜材に比べ突出した値となっている。これは制約条件の選定や許容値の余裕から生じたものである。このようなバラツキを防ぐため、斜材張力の最適化では制約条件を厳しく設定する必要がある。また、その幅が十分に狭まれば何を目的関数とするかはあまり重要でなくなることも考えられる。

まとめ: 本報告で示した方法は、斜材張力の最適化計算に鋼材の拘束とコンクリート弾性係数の変化を考慮した段階的積分法を導入した点に意義があると考える。計算例についても最適値として満足できる結果が得られた。PC斜張橋のクリープ移行量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移行量の影響が小さくなるような構造諸元や施工順序を選択するという方策も考えられるが、その場合でも、PC斜張橋のクリープ特性を正しく把握する上で本報告で示した方法は有効であると考える。さらに、本報告でその値を仮定した部材の断面性能と主桁PC鋼材配置を変化させて検討すれば、PC斜張橋としての総合的な最適設計を行うことができる。

- 参考文献: 1) 道路橋示方書・同解説(I)(III), 日本道路協会, 1990
 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) 石黒 如・今村 晃久・立神 久雄: 段階的積分法によるクリープ解析を導入した斜材張力の最適化, コンクリート工学年次論文報告集, vol. 14, No. 2, pp. 595-600, 1992

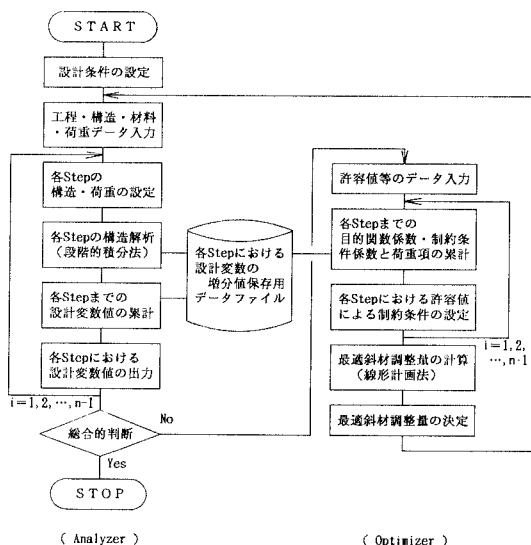


図-2 最適化計算フローチャート

主塔: $E_c = 3.3 \times 10^4 \text{ tf/m}^2$, $y_c' = 1.500 \text{ m}$ 主塔: $E_c = 3.1 \times 10^4 \text{ tf/m}^2$, $y_c' = 0.733 \text{ m}$
 $A_c = 12.000 \text{ m}^2$, $h = 3.000 \text{ m}$ $A_c = 10.364 \text{ m}^2$, $h = 1.900 \text{ m}$
 $I_c = 9.000 \text{ m}^4$, $h_{th} = 1.698 \text{ m}$ $I_c = 4.495 \text{ m}^4$, $h_{th} = 1.014 \text{ m}$
斜材: $E_s = 2.0 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$, $A_s = 0.0134 \text{ m}^2$ $E_s = 2.0 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$, $A_s = 0.974 \text{ m}^2$
 $y_s = 0.382 \text{ m}$

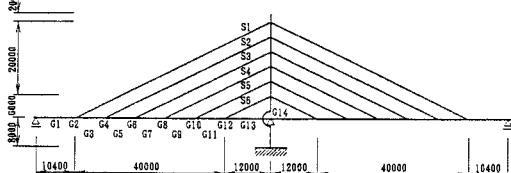


図-3 計算用モデル

表-1 最適解

	t_0	{ P* }	{ X }	{ P }
S6斜材一次調整	100日	1200.0t	0.6332	759.8t
S5 "	120	1200.0	0.6468	776.2
S4 "	140	1200.0	0.7336	880.3
S3 "	160	1200.0	0.7199	863.9
S2 "	180	1200.0	0.7790	934.8
S1 "	200	1200.0	0.6114	733.7
S1斜材二次調整	260	300.0	0.5779	173.4
S2 "	260	300.0	0.6204	186.1
S3 "	260	300.0	2.1977	659.3
S4 "	260	300.0	0.1387	41.6
S5 "	260	300.0	0.0233	7.0
S6 "	260	300.0	-0.3336	-100.1