

V-81

斜材張力最適化におけるクリープ移行量の評価に関する一考察

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, 架設時および完成時の各種許容値から定まる制約条件の下で斜材鋼材量を最小にする斜材張力の組合せを最適値と考えて, 単一目的線形計画法を用いて斜材張力の最適化を行う方法とその計算例を示す。なお, PC斜張橋は高次の不静定構造である上に, コンクリート製の主桁・主塔と鋼製の斜材から成る複合構造でもあるため, クリープ・乾燥収縮による移行量が重要な問題となるが, 本報告では, これらの要因を総合的に評価するため, 斜材張力最適化の前提となるクリープ解析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ている。また, 計算例では, 斜材調整による移行量を決定変数に含めた場合と荷重項に含めた場合の比較を行う。

解析方法: 外力作用時刻から移行量計算時刻 t までを n 個の小さな時間間隔 Δt に分割し, 各 Δt 間の断面力の増分を $\{\Delta F_c\}_i (i=1, 2, \dots, n)$, 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 $\{\Delta F_{c_{\phi\phi}}\}_n$, 拘束の解放によって部材換算断面に作用する等価節点力を $\{\Delta F_{\phi\phi}\}_n$, 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 $\{\Delta F_{\phi 1}\}_n$ とする。いま, 外力としてただ一回の斜材調整を考え, 単位調整量 $\{P^*\}$ によって生じる断面力を $\{F^*\}$ とすれば, $t=0$ (即ち $i=0$) のとき $\{\Delta F_{c_{\phi\phi}}\}_0 = \{\Delta F_{\phi\phi}\}_0 = \{\Delta F_{\phi 1}\}_0 = 0$, $\{\Delta F_c\}_0 = [A]_0 \{F^*\}$ となる。また, $t > 0$ (即ち $i=1, 2, \dots, n$) のときは, (1)式で計算される。ここで, 換算マトリックス $[D]$ および分配マトリックス $[A]$ については, 文献1)を参照されたい。

$$\begin{aligned} \{\Delta F_{c_{\phi\phi}}\}_k &= -K_k \sum_{i=0}^{k-1} \{\Delta F_c\}_i (\Delta\phi_d + \Delta\phi_t)_{ik}, \\ \{\Delta F_{\phi\phi}\}_k &= K_k \sum_{i=0}^{k-1} [D]_i \{\Delta F_c\}_i (\Delta\phi_d + \Delta\phi_t)_{ik}, \\ \{\Delta F_c\}_k &= \{\Delta F_{c_{\phi\phi}}\}_k + [A]_k (\{\Delta F_{\phi\phi}\}_k + \{\Delta F_{\phi 1}\}_k) \end{aligned} \quad (1)$$

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 $\{P\}_j = \{P^*\}_j \cdot x_j$ とすると, 断面力の合計が許容値 $\{F_s\}$ を満足するためには,

$$\sum_{j=1}^N \{F_c\}_{nj} \cdot x_j \leq \{F_s\} - \{F_w\}_n \quad (2)$$

となるような 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,

$$[I_v] \{X\} \leq \{V_s\} - \{V_w\} \quad (3)$$

ここで, $[I_v]$ は斜材調整量の各種設計変数に対する影響値, $\{V_s\}$ は各種設計変数の許容値, $\{V_w\}$ 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。また, $\{X\}$ は単位調整量に対する倍率を表わす決定変数であり, 斜材調整量は $\{P\} = \{X\}^T \{P^*\}$ で与えられる。

一方, (3)式と同様の考え方によって, 斜材調整量の各斜材張力に対する影響値を $[I_t]$, 斜材調整以外の荷重および乾燥収縮による各斜材張力を $\{T_w\}$ とすれば, 各斜材の合計張力 $\{T\}$ は(4)式で表わされる。

$$\{T\} = [I_t] \{X\} + \{T_w\} \quad (4)$$

ここで, 斜材に使用する鋼材が一種類ならば単位張力に対する各斜材の必要断面積が等しいことと $\{T_w\}$ が定数項であることに着目すれば, 制約条件(3)の下で(5)式に示す目的関数 Z を最小にする $\{X\}$ を求めることにより, 斜材鋼材量が最小となる最適斜材調整量を決定できる。但し, $\{L\}$ は各斜材の長さを表わす。

$$Z = \{L\}^T [I_t] \{X\} \quad (5)$$

これは単一目的線形計画の問題であり, $\{X\}$ の最適解はシンプレックス法を用いて計算することができる。

計算例: 図-1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。計算に使用する施工順序および日数は図-2に示す通りであり, 斜材調整は各斜材とも張出し施工時の一次調整と橋体完成後の二次調整の二回ずつ行うものとする。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に示す通りである。表中の CASE-1 は斜材調整による移行量を決定変数に含めた場合の計算結果を, CASE-2 は荷重項に含めた場合の計算結果を示している。但し, CASE-2 では単位調整量による移行量に CASE-1 で求めた $\{X\}$ の最適解の平均値を乗じて補正を行っている。

表-1 最適解

	{ P* }	CASE-1		CASE-2	
		{ X }	{ P }	{ X }	{ P }
S1次	1200.0	0.6114	733.7	0.6114	733.7
S2"	1200.0	0.7790	934.8	0.7392	887.0
S3"	1200.0	0.7199	863.9	0.7711	925.3
S4"	1200.0	0.7336	880.3	0.7336	880.3
S5"	1200.0	0.6468	776.2	0.6047	725.6
S6"	1200.0	0.6332	759.8	0.6332	759.8
S1二次	300.0	0.5779	173.4	0.5683	170.5
S2"	300.0	0.6204	186.1	0.9174	275.2
S3"	300.0	2.1977	659.3	1.1624	348.7
S4"	300.0	0.1387	41.6	1.0298	208.9
S5"	300.0	0.0233	7.0	0.2288	68.6
S6"	300.0	-0.3336	-100.1	-0.2177	-65.3

また, 今後の課題として残された点は次の通りである。

- 1) CASE-1 の 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。その結果, 何を目的関数とするかは重要でなくなることも考えられる。
- 2) CASE-2 では, 移行量を荷重項として扱うことによる誤差が生じるため, 移行量の補正をしながら最適化計算を繰り返す必要がある。しかし, 本例では最初の最適化でかなり良い結果が得られており, クリープ移行量を構造全体について平均的に扱う, より簡便な計算方法の有用性を示唆していると考えられる。

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られる。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, また, 今後の課題が示された。さらに, 本報告でその値を仮定した部材の断面性能および主桁 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) 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
 2) 藤井 学・宮本 文穂・小深田 祥法: PC 斜張橋の斜材張力および主桁プレストレスの最適化に関する研究, 土木学会論文集, vol.408, V-11, Aug.1989
 3) 新井 英雄・春日 昭夫・熊谷 紳一郎・角谷 務・古川 浩平: 最適化手法を用いた PC 斜張橋の斜材張力決定法, 橋梁と基礎, Dec.1990

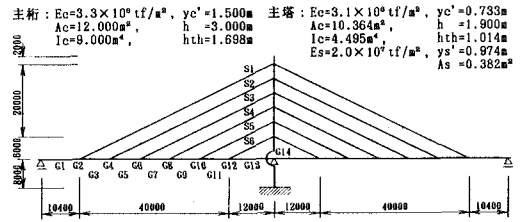


図-1 計算用モデル

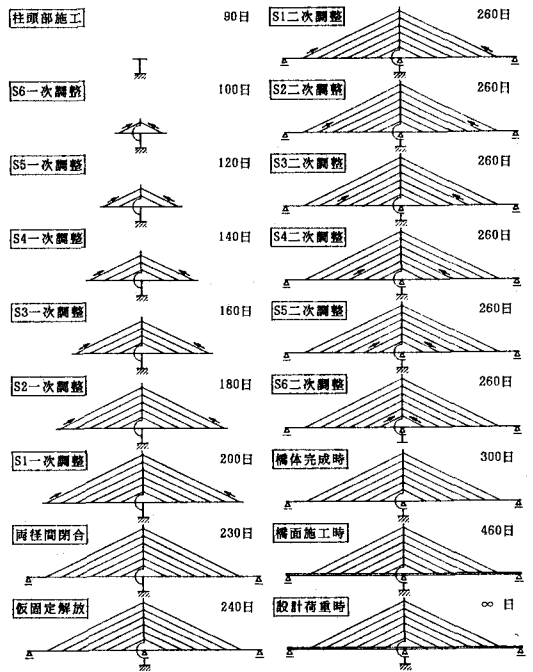


図-2 施工順序