

ケーブルプレストレスが鋼斜張橋の最適化に及ぼす効果の評価法

愛媛大学工学部 正会員 大久保 禎二
 愛媛大学工学部 正会員 谷 脇 一弘
 川田テクノシステム(株) 正会員 山野 長弘
 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 ○芳野 仁

1. まえがき

著者らは、これまでに、道路橋示方書に規定する主桁・塔およびケーブルの応力度の制約条件のもとで、死荷重および活荷重を受ける鋼斜張橋の最適なケーブル配置、塔の高さおよび各構造要素の断面寸法を自動的に決定できる最適設計システムを開発しているが、本研究では、この基本的な最適設計システムを拡張して、ケーブルに導入するプレストレス量が鋼斜張橋の最適化におよぼす効果を定量的に正確に評価するとともに、LPの手法を用いて、上で述べた設計変数に加えてさらに最適なケーブルプレストレス量をも決定し得る最適設計システムの開発を行ったものである。

2. 二段階最適化によるケーブルプレストレスの効果の評価法

本研究では、ケーブル配置 X_c 、塔の高さ Y_c および各構造要素の断面寸法 Z に加えてさらに、図-1に示す任意のケーブルの軸線方向の仮想荷重 P_L をも設計変数として考慮することにより、ケーブルに導入するプレストレスが鋼斜張橋の最適化におよぼす効果を評価している。各ケーブルに導入すべき最適なプレストレス量は、各ケーブルに導入する最適な仮想荷重を載荷することにより導入されるケーブル張力として算定することができる。

ケーブルプレストレスをも考慮した鋼斜張橋の総製作費(TCOST)を最小にする最適設計問題の定式化において、 P_L による目的関数(総製作費)のsensitivitiesの計算は、 P_L が構造系全体にどのような影響を与えるかを正確に評価することにより行う必要がある。そこで本研究では、次の二段階の最適化を行うことにより最適な Z^* 、 X_c^* 、 Y_c^* 、 P_L^* を決定することとした。

(1)第一段階の最適化 まず、 Z 、 X_c 、 Y_c のみを設計変数として、次の最適設計問題を解くことにより、ケーブルプレストレスを考慮しない最適なケーブル配置 X_c^* 、塔高 Y_c^* および各部材要素の断面寸法 Z^* を決定する。

$$\begin{aligned} &\text{find } Z, X_c, Y_c, \quad \text{which} \\ &\text{minimize } \text{TCOST}(Z, X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^n W_i(X_c, Y_c) \cdot A_i(Z) \\ &\text{subject to } g_j(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (1) \\ &Z^{(L)} \leq Z \leq Z^{(U)}, \quad X_c^{(L)} \leq X_c \leq X_c^{(U)}, \quad Y_c^{(L)} \leq Y_c \leq Y_c^{(U)} \end{aligned}$$

ここに、 $W_i = \rho_i \cdot l_i$ 、 ρ_i :単位体積当りの製作費、 l_i :部材長

n :要素数 m :制約条件の数

(2)第二段階の最適化 つぎに、上で得られた最適な Z^* 、 X_c^* 、 Y_c^* の状態に対して、 X_c 、 Y_c を固定し、実荷重に加えてさらに任意のケーブルの軸線方向に独立に単位仮想荷重 ΔP_{Li}^0 を載荷した場合の最適解を求めることにより、 ΔP_{Li}^0 による目的関数および各構造要素の応力度に関する制約条件のsensitivities T_i, d_{ij} を求め、この T_i および d_{ij} を用いて目的関数および制約条件の線形近似を行い、設計変数として P_L の変化量 ΔP_L を、また目的関数としてTCOSTの変化量 ΔTCOST を考慮することにより次の線形計画問題を導入することができる。

$$\begin{aligned} &\text{find } \Delta P_L, \quad \text{which} \quad \text{minimize } \Delta \text{TCOST}(\Delta P_L) = \sum_{i=1}^{nc} T_i \cdot \Delta P_{Li} \quad (2) \\ &\text{subject to } g_j(\Delta P_L) = \sum_{i=1}^{nc} d_{ij} \cdot \Delta P_{Li} + g_j(P_L^0) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m), \quad |\Delta P_{Li}| < \xi \Delta P_{Li}^0 \quad (i=1, \dots, nc) \end{aligned}$$

ここに、 $T_i = \partial \text{TCOST}(P_L^0) / \partial P_{Li}$ 、 $d_{ij} = \partial g_j(P_L^0) / \partial P_{Li}$ 、 nc :ケーブル本数

この線形計画問題をLPの手法を用いて解く場合、 ΔP_{Li} の値が負の値をも取り得るように次式に示す新たな非負の変数 $\Delta P_{Li}'$ および $\Delta P_{Li}''$ を導入し改良を行っている。

$$\Delta P_{Li} = \Delta P_{Li}' - \Delta P_{Li}'', \quad \Delta P_{Li}' \geq 0, \quad \Delta P_{Li}'' \geq 0 \quad (3)$$

sensitivitiesの計算に用いる ΔP_{Li}^0 の値はケーブル張力の5%とし、 ΔP_{Li} の1回の改良における大きさの限度は、ケーブル張力の10%までとしている。

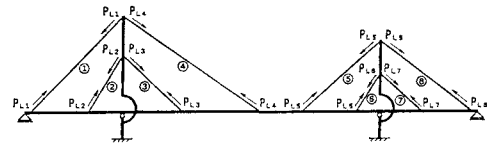


図-1 ケーブルプレストレスに関する設計変数

上式を解いて得られた ΔP_L を用いて P_L, Z は次式により改良される。

$$P_{L,i} = P_{L,i}^0 + \Delta P_{L,i} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (4), \quad Z_j = Z_j^0 + \sum_{i=1}^{nc} \partial Z_j / \partial P_{L,i} \cdot \Delta P_{L,i} \quad (j=1, \dots, n) \quad (5)$$

上記の過程により改良された P_L および Z を用いて再び構造解析, sensitivitiesの計算, 線形計画問題を解くことを繰り返すことにより最終的に最適な Z^*, P_L^* を決定することができる。

3. 設計例および考察

本研究で述べた方法を図-2に示す死・活荷重を受ける2面吊りの8段ケーブルを有する左右対称の3径間連続鋼斜張橋に適用し、ケーブルにプレストレスを導入した場合としない場合の最適解の比較を行った。 Z, X_c, Y_c のみの最適化を行った場合(P_L なし)および Z, X_c, Y_c, P_L の最適化を行った場合(P_L あり)の最適解の比較結果を表-1に、また、最適ケーブル配置、主桁の最大・最小曲げモーメント(M_{max}, M_{min})、最大・最小軸力(N_{max}, N_{min})および上・下フランジ板厚の分布を図-3に示す。

P_L なしの場合の下段ケーブルには、50%以上応力度に余裕があるものも存在するのに対し、 P_L ありの場合では、-43tf~158tfのケーブルプレストレスが有効に導入され、すべてのケーブルは全応力度設計となっている。なお、最下段ケーブルはいずれの場合においても最小断面面積の不必要なケーブルとなっている。

主桁の最大・最小曲げモーメント分布を比較すると、塔位置において P_L ありの場合の M_{max} および M_{min} は、 P_L なしの場合の48%および60%と減少している。また、主桁に生じる N_{max} および N_{min} はいずれの場合も同じ圧縮力となっている。

以上の考察の結果、プレストレスを考慮することにより総製作費を2.4%減少させることができた。

その他種々の実橋規模の鋼斜張橋の最適設計例より、本研究で述べた方法により、鋼斜張橋のケーブルに導入すべき最適なプレストレス量を理論的に厳密に決定できることが明らかとなるとともに、ケーブルにプレストレス(仮想荷重)を導入しない場合の最小製作費と比較して、最適プレストレス(最適仮想荷重)を導入することにより2~3%程度、総製作費を減少させ得ることが明らかとなった。

表-1 ケーブルプレストレスを考慮した場合と考慮しない場合における最適解の比較

ケーブル索数	P_L なし			P_L あり			σ/σ_s
	$^1) A_c$	$^2) N_c$	$^3) \sigma/\sigma_s$	A_c	N_c	σ/σ_s	
C_1	432	2177	1.00	503	2533	1.00	33
C_2	111	541	0.97	45	229	1.01	9
C_3	47	239	1.00	23	114	0.98	-7
C_4	141	713	1.00	156	788	1.00	-43
C_5	96	455	0.94	96	475	0.98	-30
C_6	126	473	0.74	92	465	1.00	52
C_7	116	276	0.47	82	416	1.00	158
C_8	0	0	0.08	0	0	0.02	0
C_9	0	0	0.06	0	0	0.02	0
C_{10}	58	108	0.37	22	109	1.00	55
C_{11}	109	351	0.64	95	481	1.00	112
C_{12}	84	351	0.83	70	355	1.00	23
C_{13}	82	400	0.96	68	344	1.00	-10
C_{14}	140	707	1.00	167	842	1.00	-26
C_{15}	227	1145	1.00	193	972	1.00	-22
C_{16}	328	1652	1.00	344	1733	1.00	19
主桁製作費(円)	359921.4			351286.4			
塔製作費(円)	189138.9			185829.9			
ケーブル製作費(円)	102858.7			98993.5			
総製作費(円)	651918.9			636109.8			
$^1)$ 総製作費の比	1.0			0.976			

1) ケーブルの断面面積 (cm²) 2) ケーブル張力 (tf) 3) ケーブルプレストレス (tf)
4) 実応力度の許容応力度に対する比 5) P_L なしに対する P_L ありの総製作費の比

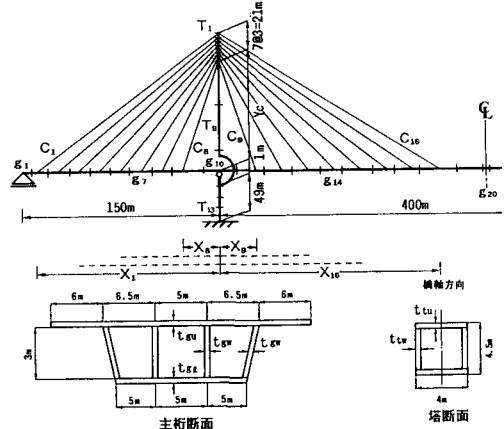


図-2 8段ケーブルを有する3径間連続鋼斜張橋

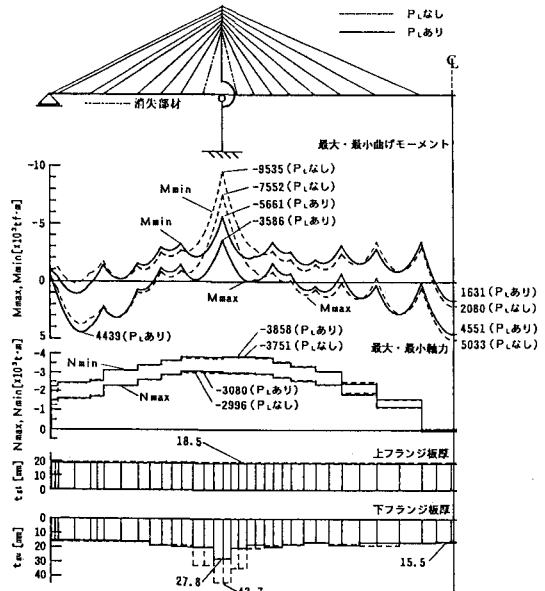


図-3 ケーブルプレストレスを考慮した場合としない場合における主桁の最大・最小曲げモーメント、軸力分布およびフランジ板厚の比較