

I-PS 7 鋼斜張橋の最適ケーブルプレストレスの決定法について

愛媛大学工学部 正会員 ○谷脇 一弘
 愛媛大学工学部 正会員 大久保 禎二
 川田テクノシステム(株) 正会員 山野 長弘
 内フィッコンサルタンツ(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ケーブル配置、塔の高さおよび各構造要素の断面寸法を数理計画法の手法を用いて自動的に、かつ厳密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、鋼斜張橋の製作費を最小にする最適なケーブルプレストレス量を決定する方法について研究を行ったものである。

2. 二段階最適化による最適ケーブルプレストレスの決定法

本研究では、設計変数として各構造要素の断面寸法 Z 、図-1に示すケーブル配置 X_c 、塔の高さ Y_c および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している。鋼斜張橋の最適プレストレスを決定するためには、ケーブルにプレストレスを導入することにより総製作費がどのように変化するかを正確に評価する必要がある。このため本研究では鋼斜張橋をまずケーブルプレストレスなしの状態でも最適化し、その最適化された設計諸元を有する構造系のケーブルに仮想の荷重 P_L を付加することによる総製作費の変化を評価し、LPの手法を用いて各ケーブルの仮想の荷重 P_L の改良を繰り返すことにより最適な P_L を決定することができる。なお、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。したがって、最適なケーブルプレストレスを決定するためのアルゴリズムは、次の二段階の最適化問題を解くこととなる。

(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場合の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。

$$\text{find } Z, X_c, Y_c, \quad \text{which minimize } \text{TCOST}(Z, X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^n W_i(X_c, Y_c) \cdot A_i(Z) \quad (1)$$

$$\text{subject to } g_j(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m), \quad Z^{(L)} \leq Z \leq Z^{(U)}, \quad X_c^{(L)} \leq X_c \leq X_c^{(U)}, \quad Y_c^{(L)} \leq Y_c \leq Y_c^{(U)}$$

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、 $X_c \cdot Y_c$ 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_L^0 を載荷した場合の最適解を求めることにより、 ΔP_L^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。

$$\text{find } \Delta P_L, \quad \text{which}$$

$$\text{minimize } \Delta \text{TCOST}(\Delta P_L) = \sum_{i=1}^{nc} T_i \cdot \Delta P_{Li} \quad (2)$$

$$\text{subject to } \bar{g}_j(\Delta P_L) = \sum_{i=1}^{nc} d_{ij} \cdot \Delta P_{Li}$$

$$+ g_j(P_L^0) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m)$$

$$|\Delta P_{Li}| < \xi \Delta P_{Li}^0 \quad (i=1, \dots, nc)$$

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

上式をLPの手法を用いて解くことにより得られた ΔP_L を用いて P_L および Z は次式により改良される。

$$P_{Li} = P_{Li}^0 + \Delta P_{Li} \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3), \quad Z_j = Z_j^0 + \sum_{i=1}^{nc} \partial Z_j / \partial P_{Li} \cdot \Delta P_{Li} \quad (j=1, \dots, n) \quad (4)$$

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。なお、sensitivitiesの計算に

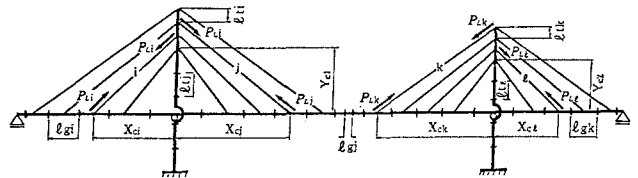


図-1 ケーブル配置に関する設計変数 X_c 、塔高に関する設計変数 Y_c およびケーブルプレストレスに関する設計変数 P_L

用いる ΔP_L の値はケーブル張力の5%とし、 ΔP_L 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。

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。なお、この設計モデルにおいて応力度の計算は、架設閉合時の片持ばり系および使用時の連続ばり系の2つの異なる構造系および荷重系を解析することにより得られる部材力を用いている。

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(t_{gu} , t_{gl})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、および上・下フランジの板厚分布を比較すると、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、 t_{gl} も15.9mm減少している。また、その他部分におけるM_{max}, M_{min}および t_{gu} の分布はほぼ同一となっている。

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

ケーブルの番号	P_L なし				P_L あり			
	¹⁾ A _c	²⁾ N _c	³⁾ σ/σ_a		¹⁾ A _c	²⁾ N _c	³⁾ σ/σ_a	⁴⁾ P _s
C ₁	483	2416	1.00		519	2602	1.00	5
C ₂	50	232	0.92		2	0	1.00	-10
C ₃	16	75	0.96		8	40	1.00	-2
C ₄	39	193	0.99		13	66	1.00	-3
C ₅	49	233	0.95		114	573	1.00	3
C ₆	110	440	0.80		79	399	1.00	55
C ₇	96	276	0.58		67	338	1.00	110
C ₈	9	13	0.30		0	1	1.00	1
C ₉	8	14	0.35		0	2	1.00	1
C ₁₀	93	314	0.68		109	549	1.00	138
C ₁₁	102	442	0.86		62	312	1.00	18
C ₁₂	66	323	0.97		76	382	1.00	-4
C ₁₃	101	508	1.00		96	482	1.00	-6
C ₁₄	75	374	1.00		95	476	1.00	1
C ₁₅	70	345	0.99		56	281	1.00	1
C ₁₆	289	1449	1.00		283	1418	1.00	-27
5) 総製作費の比								
P_L なし					P_L あり			
					0.976			

1) ケーブルの断面積 (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

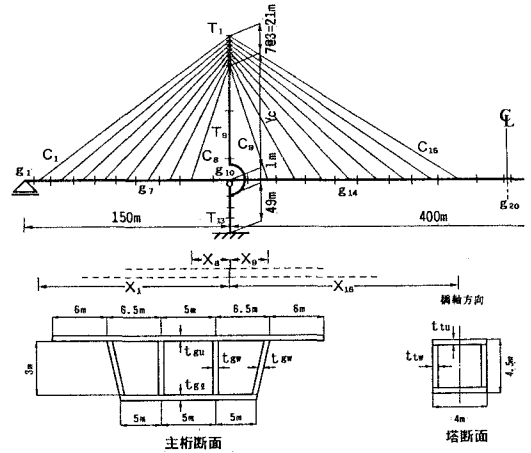


図-2 8段ケーブルを有する3径間連続鋼斜張橋

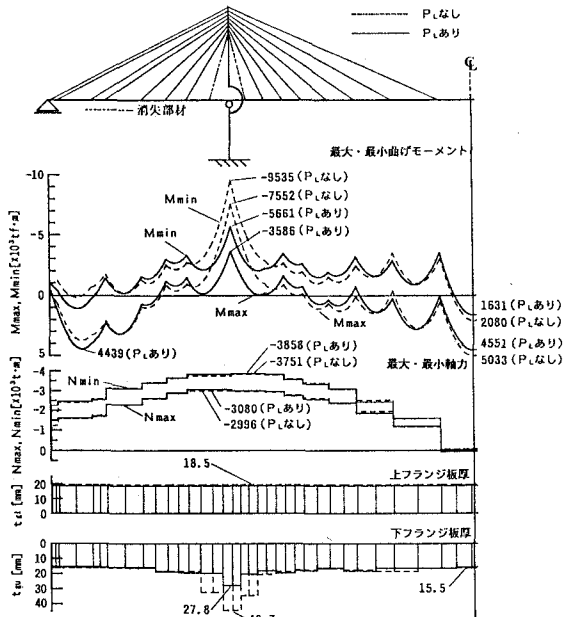


図-3 ケーブルプレストレスを考慮した場合としない場合における主桁の最大・最小曲げモーメント、軸力およびフランジ板厚の分布の比較