

中間支承を有しない鋼斜張橋に関する一考察

愛媛大学工学部 正会員 大久保 慎二
 愛媛大学工学部 正会員 谷 脇 一弘
 川田工業(株) 正会員 中西 正道

1. まえがき

著者は、これまでに鋼斜張橋の最適な断面寸法のみならず、最適なケーブル配置をも理論的に厳密に決定することができる最適設計システムを開発し、実橋規模の鋼斜張橋に適用することによりその有効性について述べてきている。ところで、従来から建設されている中間支承を有する鋼斜張橋の最適なケーブル配置および剛性配分の状態においては、その構造特性から中間支承上に負の突出した曲げモーメントが生じ、大きな板厚を必要とすることとなる。そこで本研究では、鋼斜張橋の主桁全体の曲げモーメント分布を平均化する一つの方法として、中間支承を有しない鋼斜張橋を考え、死・活荷重の応力状態において、中間支承を有する構造形式および有しない構造形式の二つの鋼斜張橋の最適解を比較することにより、それぞれの構造特性について最適化の見地から考察を行ったものである。

2. 鋼斜張橋最適設計問題の定式化

本研究では、構造要素の断面寸法に関する設計変数として、各主桁および塔要素の上・下フランジの板厚、ケーブルの断面積を考慮し、これらをまとめて Z と表わす。主桁および塔の腹板の板厚は、各要素に作用するせん断力による応力度、軸力・曲げモーメント・せん断力による合成応力度、および最小板厚の制限のいずれかで決定される最大の板厚を用いている。また、主桁および塔のフランジのリブの剛性は換算板厚として変数 Z に含めて考慮している。さらに、ケーブル配置に関する設計変数として塔軸線より各ケーブルの主桁への定着点までの距離 X_c 、主桁軸線より塔の最下段ケーブルまでの高さ Y_c を考慮している。制約条件として、架設閉合時の片持ばり系(死荷重載荷状態)および使用時の連続ばり系(死荷重の一部および活荷重の載荷状態)の2つの異なる構造一荷重系を解析することにより得られる応力度を用い、道路橋示方書に規定されている主桁、塔およびケーブルの応力度の制約条件を考慮している。さらに、塔要素の細長比の制限、座屈を考慮した最小板厚の制限等をも考慮している。また、主桁および塔の各要素に作用する応力度の計算に用いる死・活荷重、衝撃係数、フランジの有効幅、塔の有効座屈長などは道路橋示方書に従って計算し、活荷重による応力度の計算は、応力度の検討点について影響線を作成することにより計算を行っている。以上の設計変数および制約条件を考慮して、鋼斜張橋の総製作費 $TCOST$ を最小にする設計変数 Z, X_c, Y_c を決定する設計問題をつぎのように定式化することができる。

$$\begin{aligned} &\text{find} \quad Z, X_c, Y_c, \text{ which} \quad \text{minimize} \quad TCOST(Z, X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^n W_i(X_c, Y_c) A_i(Z) \quad (1) \\ &\text{subject to} \quad \begin{aligned} &g_{\sigma_{kj}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_k) \quad : \text{主桁要素のフランジの応力度の制約条件} \\ &g_{\sigma_{t1j}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t) \quad : \text{塔要素の応力度の照査に関する制約条件} \\ &g_{\sigma_{t2j}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t) \quad : \text{塔要素の座屈安定の照査に関する制約条件} \\ &g_{l_j}(Z, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, n_t) \quad : \text{塔要素の細長比に関する制約条件} \\ &g_{\sigma_{cj}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, n_c) \quad : \text{ケーブル要素の引張応力度の制約条件} \end{aligned} \end{aligned}$$

$Z^{(l)} \leq Z \leq Z^{(u)}, \quad X_c^{(l)} \leq X_c \leq X_c^{(u)}, \quad Y_c^{(l)} \leq Y_c \leq Y_c^{(u)} \quad : \text{設計変数の上・下限制約}$
 ここに、 n :全部材要素数, n_t :塔要素数, n_c :ケーブル要素数, A_i : i 番目の部材要素の断面積
 $W_i = \rho_i \cdot l_i \quad \rho_i$: i 番目の要素の材料の単位体積当りの製作費, l_i : i 番目の要素の部材長

3. 最適設計問題の解法

2.で定式化した斜張橋の最適化問題の解法として種々の非線形計画法の適用が考えられるが、本研究では、これまでの研究により汎用性、信頼性および収束性がすぐれていることが明らかとなっている原変数あるいはその逆変数を用いて変数分離型の凸近似設計問題を導入し双対法により改良解を求めることを反復することにより最適解を得る方法を用いて設計問題の最適解を決定した。この方法では、2.で定式化した設計問題の目的関数および制約条件の Z, X_c, Y_c に関する一次の偏微分係数を求め、この偏微分係数の符号の正・負により原変数あるいはその逆変数を用いて原設計問題の近似問題を導入する。この凸近似設計問題のラグランジュ関数を導入し、これをラグランジュ乗数 λ について最大化、 Z, X_c, Y_c について最小化することにより $Z, X_c,$

Y_c の改良解を求める。ラグランジュ関数を最大にする λ^* はニュートン法により、また最小化する Z^*, X_c^*, Y_c^* は λ^* を用いて解析式により求めることができる。

4. 設計例および考察

設計例として図-1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ついて、中間支承を有する形式および有しない形式の二つの構造形式の最適解の比較を行った。中間支承を有する形式(中間支承あり)および有しない形式(中間支承なし)の最適解の比較結果を表-1に、また、最適解におけるケーブル配置、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})および上フランジ・下フランジ板厚の分布を図-2に示す。

中間支承ありと中間支承なしの場合の最適なケーブル配置を比較すると、表-1から明らかなように、最適な X_c は側径間において最大26.0m、中央径間において最大7.15m、 Y_c では0.42m異なるが、いずれの場合においても側径間の上二段のケーブルは桁端に集中して配置され、中央径間においては、各ケーブルが等比級数的にバランスよく分散して配置されている。中間支承ありの場合のケーブル断面積は、下段から中段では58~141 cm^2 、上段では47~432 cm^2 と大きく変化しており、最下段ケーブルは最小断面積の不必要なケーブルとなっている。このことに対し、中間支承なしの場合では、最下段から中段のケーブル断面積は45~117 cm^2 、上段では150~353 cm^2 と比較的均一な断面積の分布となっている。

つぎに、主桁の最大・最小曲げモーメント分布を比較すると、中間支承なしの場合の M_{min} および M_{max} は、塔位置において中間支承ありの場合の40.5%および24.2%と大きく減少し、主桁全体に同一の曲げモーメント分布となっている。これにともない、中間支承なしの場合の下フランジ板厚の分布は15.5mm~21.0mmと平均化されている。

また、総製作費では、中間支承なしの場合が中間支承ありの場合の1.9%減少している。

以上の考察により、中間支承を有しない鋼斜張橋は主桁全体の曲げモーメント分布を平均化する方法としてきわめて有効な構造形式であることが明らかとなった。

表-1 中間支承を有する形式と有しない形式における最適解の比較結果

形 式	中間支承なし		中間支承あり	
変 数	$X_2^*(\text{m})$	$X_c^*(\text{m})$	$X_c^*(\text{m})$	$A_c^*(\text{cm}^2)$
C_1	140.00	149.00	353	149.00
C_2	124.00	143.30	218	143.27
C_3	108.00	104.33	150	115.48
C_4	92.00	77.64	117	103.65
C_5	76.00	58.72	67	73.63
C_6	60.00	42.45	54	53.18
C_7	44.00	26.53	56	36.16
C_8	28.00	8.77	73	16.45
C_9	28.00	12.14	75	13.30
C_{10}	48.00	31.13	45	28.01
C_{11}	68.00	47.60	58	43.63
C_{12}	88.00	65.90	87	59.43
C_{13}	108.00	87.49	99	80.76
C_{14}	128.00	110.60	153	103.45
C_{15}	148.00	138.10	183	133.66
C_{16}	168.00	172.25	323	172.67
Y_c^*	85.00	56.90	56.48	
ITE ¹⁾		20	19	
総製作費(円)		639361.1	651918.9	
総製作費の比 ²⁾		0.981	1.00	

- 1) 最適解を得るまでの改良反復回数
2) 中間支承ありに対する中間支承なしの比

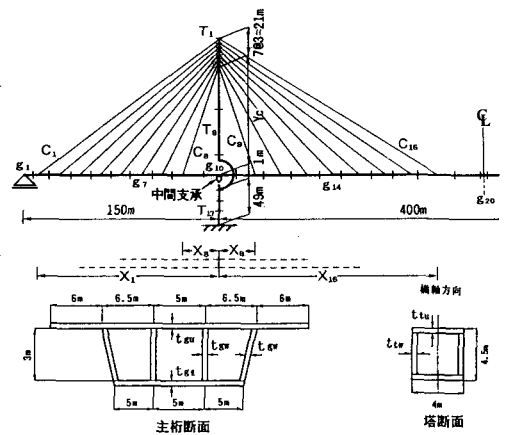


図-1 8段ケーブルを有する3径間連続鋼斜張橋

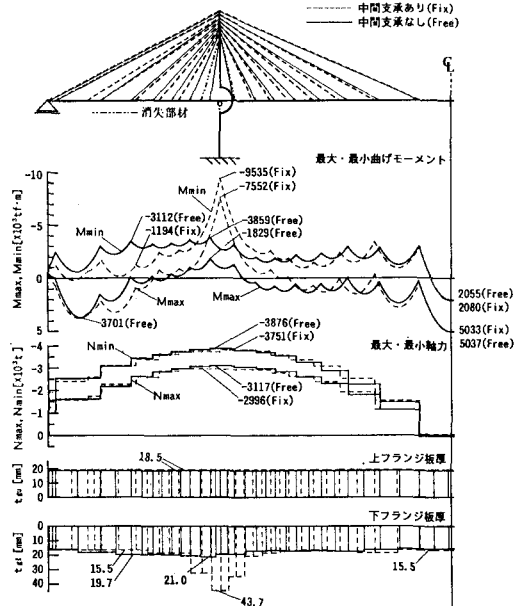


図-2 中間支承を有する形式と中間支承を有しない形式における最適ケーブル配置、主桁の最大・最小曲げモーメント、軸力分布およびフランジ板厚の比較