

架設時荷重をも考慮した連続鋼斜張橋のケーブル形状および部材剛性の最適配置

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 O谷 脇一 弘

1. まえがき

長大斜張橋の設計においては、架設時の片持ばり系、使用時の連続ばり系と構造形式および荷重体系の全く異なる2つの構造系に対して安全となるように、各部材断面寸法およびケーブル配置を設計する必要がある。本研究は、実橋規模の鋼斜張橋の上記の2つの構造系および荷重系を同時に考慮し、総コストが最小となる最適部材断面寸法およびケーブル配置を決定する方法について述べるものである。

2. 架設時荷重をも考慮した鋼斜張橋の最適設計問題の定式化

(1) 鋼斜張橋の設計変数

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、各桁および塔要素の上・下フランジの板厚、各ケーブルの断面積を考慮し、これらをまとめて変数 Z として表わす。桁および塔要素の腹板の板厚は、応力度の制限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とした。またケーブル配置に関して、各ケーブルの桁および塔への定着位置 X_c, Y_c を設計変数として考慮している。主桁のフランジの有効幅は道路橋示方書に従って計算し、桁および塔のリブの断面は換算板厚として変数 Z に含めて考慮している。

(2) 使用時および架設時荷重を考慮した応力度の制約条件

本研究では、図-1に示す架設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・荷重系を解くことにより得られる部材力(N_E, M_E, S_E)および(N_S, M_S, S_S)による応力度を考慮し、道路橋示方書に規定されている次に示す桁、塔およびケーブルの応力度の制約条件に代入している。

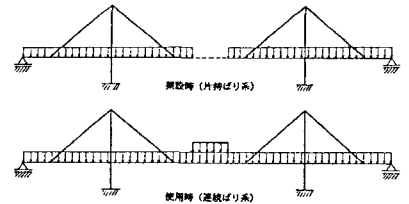


図-1 架設時および使用時の構造系

① 桁のフランジの応力度：

$$g_{\sigma_{Kj}}(Z, X_c, Y_c) = \sigma_{Ej} + \sigma_{Sj} - \sigma_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_k) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{Fj} : N_{Fj}, M_{Ej}$ による応力度、 $\sigma_{Sj} : N_{Sj}, M_{Sj}$ による応力度

② 塔のフランジの応力度：

$$g_{\sigma_{t1j}}(Z, X_c, Y_c) = \frac{\sigma_{Ecj} + \sigma_{Scj}}{\sigma_{cazj}} + \frac{\sigma_{Ebcyj} + \sigma_{Sbcyj}}{\sigma_{bagyj} (1 - \frac{\sigma_{Ecj} + \sigma_{Scj}}{\sigma_{cazj}})} - 1 \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$g_{\sigma_{t2j}}(Z, X_c, Y_c) = \sigma_{Ecj} + \sigma_{Scj} + \frac{\sigma_{Fbcyj} + \sigma_{Sbcyj}}{\sigma_{bagyj} (1 - \frac{\sigma_{Ecj} + \sigma_{Scj}}{\sigma_{cazj}})} - \sigma_{ca1j} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\sigma_{Ecj} : N_{Ej}$ による軸圧縮応力度、 $\sigma_{Scj} : N_{Sj}$ による軸圧縮応力度、

$\sigma_{Ebcyj} : M_{Ej}$ による曲げ圧縮応力度、 $\sigma_{Sbcyj} : M_{Sj}$ による曲げ圧縮応力度

③ ケーブルの応力度： $g_{\sigma_{cj}}(Z, X_c, Y_c) = \sigma_{Ej} + \sigma_{Sj} - \sigma_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, n_c) \quad \dots\dots\dots (4)$

上式の応力度の制約条件の他、塔要素の細長比の制限 $g_{l_j}(Z, Y_c)$ 、桁および塔要素の腹板の応力度、座屈を考慮した最小板厚の制限等も考慮している。

(3) 設計問題の定式化

(1)、(2)で述べた設計変数及び制約条件を考慮して、斜張橋の製作コスト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定式化するとつぎのようになる。

find Z, X_c, Y_c such that

$$\min. \text{TCOST}(Z, X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^{n_k} \rho_{ki} \cdot l_{ki}(X_c) \cdot A_i(Z) + \sum_{i=1}^{n_t} \rho_{ti} \cdot l_{ti}(Y_c) \cdot A_i(Z) + \sum_{i=1}^{n_c} \rho_{ci} \cdot l_{ci}(X_c, Y_c) \cdot A_{ci} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{s.t. } g_{\sigma_{Kj}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_k), \quad g_{\sigma_{t1j}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0, \quad g_{\sigma_{t2j}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t)$$

$$g_{\sigma_{cj}}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, n_c), \quad g_{l_j}(Z, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, n_t), \quad Z, X_c, Y_c \text{ の上・下制限制約} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 n_k ：主桁の要素数、 n_t ：塔の要素数、 l_i ：要素長、 ρ ：単位体積当りのコスト

この最適設計問題の解法として、本研究では原設計変数および逆変数を混用した凸近似法および双対法を用いている。使用時応力は応力の着目位置のN, S, Mの影響線を用いて最大、最小応力度を計算している。また架設時および使用時応力の設計変数に関するsensitivitiesの計算は、片持ばり系および連続ばり系において、各設計変数を微小変化させ再解析を行い差分法により計算している。この場合、片持ばり系の解析では板厚の変化および部材長の変化に伴う死荷重強度の変化をも考慮している。

3. 設計例および考察

設計例として図-2に示す左右対称の3径間連続鋼斜張橋に本設計法を適用し、本設計法の有効性について検討を行った。使用したヤング係数、コスト係数および許容応力度を表-1に示す。架設時の荷重に対しては、中央径間の中央部分の17部材を取り除いた片持ばり系で解析を行っている。この設計問題の設計変数および応力度の制約条件の数は左右対称のため半分のみを考慮しているが、それでもそれぞれ69個および164個となった。

ケーブル定着位置を固定した場合(X・Y固定)と変化させた場合(X・Y変化)の最適解の比較結果を表-2に、また最適解におけるケーブル配置、最大および最小曲げモーメントの比較を図-3に示す。

X・Y変化の場合、X₀、Y₀の1回の改良過程におけるmove limitの最大値を10%に規定し、最適解の近傍に達したのち徐々にmove limitを小さくする操作を行っているが、この場合でも、15回以内の改良により能率的に最適解が得られている。

X・Y固定の場合と比較して、X・Y変化のケーブル定着位置は桁上で最大24.8m移動し、塔の高さは9.1m低くなっている。桁の曲げモーメント分布については、塔位置および中央径間の中央部分ではさほど大きな差がみられないのに対し、側径間端部の曲げモーメントはX・Y変化の場合には36%と大きく減少している。また、X・Y変化の場合、桁および塔のコストが、それぞれ5.5%および21.3%減少しているのに対し、ケーブルのコストは逆に3.5%増加している。総コストではX・Y変化の場合がX・Y固定の場合と比べ8%減少している。

他の種々の設計例においても能率的に最適解が求められており、本研究の方法により使用時および架設時の荷重および構造系を考慮した実橋規模の鋼斜張橋の最適なケーブル配置および断面寸法をきわめて能率的に決定できることが明らかとなった。

表-2 最適解の比較結果

変数	X・Y固定	X・Y変化
X ₁ (m)	95.0	99.0
X ₄ (m)	60.0	47.8
X ₆ (m)	30.0	12.9
X ₇ (m)	30.0	11.8
X ₉ (m)	70.0	45.2
X ₁₂ (m)	130.0	122.7
Y ₀ (m)	50.0	40.9
¹⁾ ITE	12	15
桁コスト(円)	249535.0	235722.8
塔コスト(円)	93470.7	73592.3
ケーブルコスト(円)	56847.6	58822.0
総コスト(円)	399853.3	368137.1
²⁾ 総コストの比	1	0.92

1) 最適解を得るまでの反復改良回数

2) X・Y固定に対するX・Y変化の比

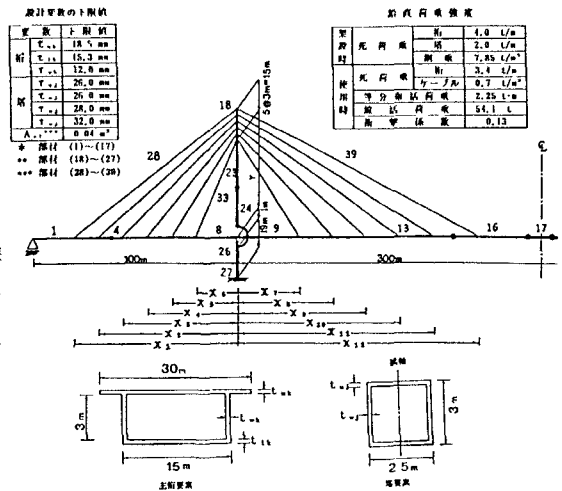


図-2 6段ケーブル3径間斜張橋モデル

表-1 1桁塔ケーブル系の設計条件

部材	部材番号	ヤング係数	コスト係数	許容応力度	許容せん断応力度
1 桁	(1)~(17)	$2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	500 円/m ³	1400 kg/cm ²	800 kg/cm ²
塔	(18)~(22)	$2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	700 円/m ³	1900 kg/cm ²	1100 kg/cm ²
	(23)~(27)			2600 kg/cm ²	1500 kg/cm ²
ケーブル	(28)~(30)	$2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	900 円/m ³	5100 kg/cm ²	

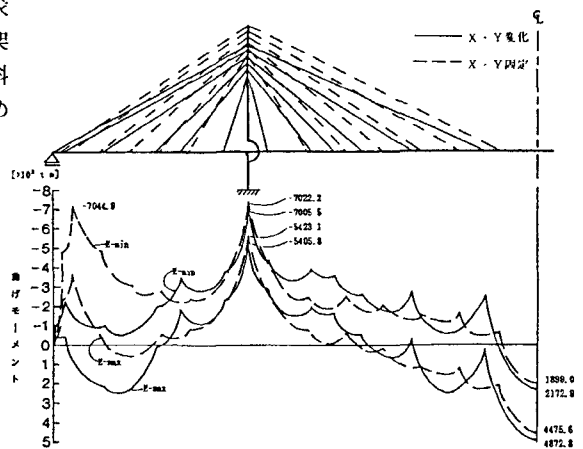


図-3 X・Y固定とX・Y変化のケーブル配置および曲げモーメント分布の比較