

PS I-4 架設時および使用時の構造-荷重系を考慮した連続鋼斜張橋の最適設計

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

1. まえがき

長大斜張橋の実際の設計においては、使用時の連続ばり系のみならず架設時の片持ばり系における応力度も考慮して、各部材断面寸法およびケーブル配置を決定する必要がある。本研究は、これらの構造形式および荷重体系の全く異なる2つの構造系および荷重系を同時に考慮し、道路橋示方書に規定する桁、塔およびケーブルの応力度の制約条件のもとで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、実橋規模の鋼斜張橋に本法を適用し、その有効性について検討を行ったものである。

2. 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。ただし、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市販板厚とした。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。さらに、ケーブルの桁および塔への定着位置 X_c, Y_c をも設計変数として考慮している。

3. 使用時および架設時の構造-荷重系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(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・載荷状態)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(N_E, M_E, S_E)および(N_S, M_S, S_S)による応力度を用い、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を考慮している。

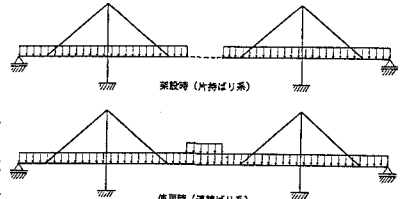


図-1 架設時および使用時の構造系

$$\textcircled{1} \text{ 桁のフランジの応力度: } g_{\sigma_{kj}}(Z, X_c, Y_c) = \sigma_{Ej} + \sigma_{Sj} - \sigma_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_g) \quad \dots\dots(1)$$

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

$$\textcircled{2} \text{ 塔のフランジの応力度: } g_{\sigma_{1j}}(Z, X_c, Y_c) = \frac{\sigma_{Eej} + \sigma_{Sej}}{\sigma_{caj}} + \frac{\sigma_{Ebcyj} + \sigma_{Sbcyj}}{\sigma_{bagj} \left(1 - \frac{\sigma_{Eej} + \sigma_{Sej}}{\sigma_{eaj}}\right)} - 1 \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t) \quad \dots\dots(2)$$

$$g_{\sigma_{2j}}(Z, X_c, Y_c) = \sigma_{Eej} + \sigma_{Sej} \frac{\sigma_{Ebcyj} + \sigma_{Sbcyj}}{\left(1 - \frac{\sigma_{Eej} + \sigma_{Sej}}{\sigma_{eaj}}\right)} - \sigma_{caj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m_t) \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 $\sigma_{Eej}, \sigma_{Sej}: N_{Ej}, N_{Sj}$ による軸圧縮応力度、 $\sigma_{Ebcyj}, \sigma_{Sbcyj}: M_{Ej}, M_{Sj}$ による曲げ圧縮応力度

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

上式の応力度の制約条件の他、塔要素の細長比の制限 $g_{lj}(Z, Y_c)$ 、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。桁および塔の各要素のフランジおよび腹板の応力度の検討位置は、各桁要素に関しては部材の両端および死荷重による M が極大となる中間点の上縁、下縁の6点、塔要素では部材の両端の上縁、下縁の4点とした。使用時の応力度の計算は、各桁、塔およびケーブル要素の応力度の着目点毎に N, S および M の各最大、最小状態の6種類の異なる活荷重・載荷状態を N, S, M の影響線を用いて求め、この6種類の載荷状態における応力状態について、上で述べた各制約条件を検討し、各応力着目点で最も支配的な応力度を与える活荷重・載荷状態を決定している。

4. 制約条件の Z, X_c, Y_c に関する一次の偏微係数の計算方法

本研究では、上で述べた設計変数および制約条件を考慮し、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鋼斜張橋の製作コストを最小にする設計変数 Z, X_c, Y_c を決定している。この最適

化の過程において必要となる各桁、塔、ケーブル要素の各応力度着目点の制約条件の設計変数 $X = [Z, X_0, Y_0]$ に関する偏微係数の計算は、各制約条件を X について直接偏微分して展開した計算式により行っている。なお、これらの計算式において必要となる $\partial N_E / \partial X$, $\partial M_E / \partial X$ および $\partial N_S / \partial X$, $\partial M_S / \partial X$ の計算は、それぞれ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近似的に計算している。この場合、各応力度着目点に対して最も支配的な応力度を与える活荷重の荷重状態は、 X が変化しても変化しないものと仮定した。ただし、 X_0 については X_0 の微小変化量 ΔX_0 による活荷重載荷位置の変化も考慮している。また、 $\partial N_E / \partial X$, $\partial M_E / \partial X$ の計算においては、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。

5. 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。架設時荷重に対しては中央径間の17部材を取り除いた片持ばり系で解析を行っている。この設計問題では構造が左右対称のため設計変数および制約条件の半数のみを考慮しているが、それでもそれぞれの数は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($X \cdot Y$ 固定)と変化させた場合($X \cdot Y$ 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。

$X \cdot Y$ 変化の場合、 X_0 , Y_0 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、15回程度の改良により能率的に最適解が得られている。

桁の最大および最小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、 $X \cdot Y$ 変化の側径間端部の曲げモーメントは $X \cdot Y$ 固定の場合の36%と大きく減少している。また、塔のコストが総コストに占める割合は20~23%と比較的大きく、 $X \cdot Y$ を変化させることにより、塔の高さが9.1mも低くなり、塔のコストは $X \cdot Y$ 固定の場合と比較して21.3%も減少している。これに対し、 $X \cdot Y$ 変化の場合の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 $X \cdot Y$ 変化の場合が8%の減少となっている。

その他種々の設計例においても同様の結果が得られており、本方法により使用時および架設時の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15回程度の反復改良によりきわめて能率的に決定できることが明らかとなった。

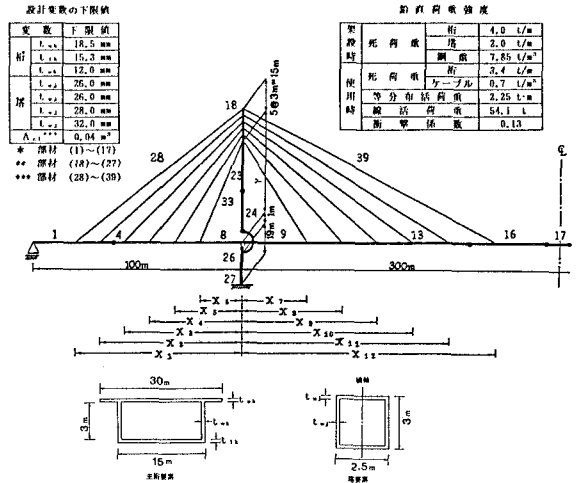


図-2 6段ケーブル3径間斜張橋モデル

部材番号	1~17	18~22 23~27	28~39
ヤング係数 (kg/cm ²)	2.1 × 10 ⁵	2.1 × 10 ⁵	2.0 × 10 ⁵
コスト係数	500	700	900
お容応力度 (kg/cm ²)	1400	1900 2600	5100
許容せん断応 力度 (kg/cm ²)	800	1100 1500	—

変数	X・Y固定	X・Y変化
X ₀ (m)	95.0	99.0
X ₁ (m)	60.0	47.8
X ₂ (m)	30.0	12.9
Y ₀ (m)	30.0	11.8
X ₃ (m)	70.0	45.2
X ₄ (m)	130.0	122.7
Y ₁ (m)	50.0	40.9
1) ITB	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

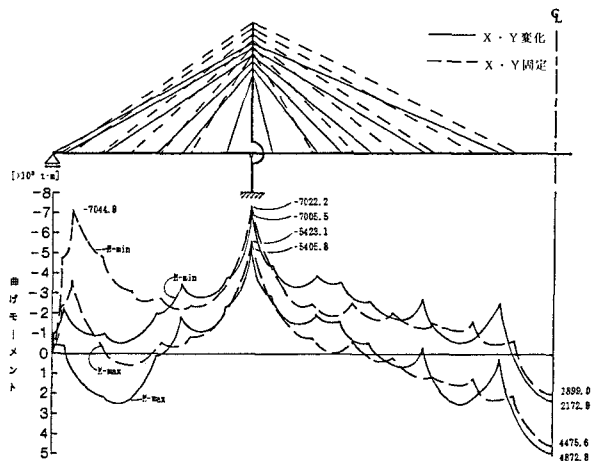


図-3 X・Y固定とX・Y変化のケーブル配置および曲げモーメント分布の比較