

耐風性に関する設計制約をも考慮した鋼斜張橋の最適設計

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

1. まえがき

吊橋、斜張橋などの可とう性に富む構造物に対しては、橋げたの風による振動に対する安全性を確保するため、動的耐風設計を行うことが義務づけられており、近年、風洞試験などの特別な調査や解析を行わずとも動的耐風設計が行えるように、道路橋の動的耐風設計要領が道路橋耐風設計便覧にとりまとめられている。

本研究では、これまで愛媛大学の構造工学研究室で開発してきた鋼斜張橋の最適設計システムに、道路橋示法書に規定する応力度の制約条件のみならず、道路橋耐風設計便覧に規定されている橋げたの鉛直たわみ渦励振およびねじれ渦励振の耐風性に関する制約条件をも付加し、鋼斜張橋の最適設計を行った結果について述べるものである。

2. 耐風性をも考慮した鋼斜張橋の最適設計システム

(1) 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。

(2) 耐風性に関する制約条件 制約条件として、道路橋示法書に規定されている主桁、塔およびケーブルの応力度、塔要素の細長比の制限、座屈を考慮した最小板厚の制限の他、橋げたの風による振動の制約条件および活荷重たわみの制限を考慮している。風によるフラッター、ギャロッピング、渦励振などの振動の照査は次式により行うことができる。

$$g_w = U_r - U_c \leq 0 \quad (1)$$

ここに、 U_c は発現風速であり、フラッター、ギャロッピングに関しては、これらの現象が構造物に発現する最小の風速を、また、渦励振に関しては、振幅が最大となる風速を用いる。また、 U_r は照査風速である。上式は、それぞれの振動に関して次の推定式を用いて表現することができる。

$$\cdot \text{フラッター: } g_{wf}(Z, X_c, Y_c) = 1.2 \cdot E_1 \cdot E_1 \cdot U_{10} - 2.5 \cdot f \cdot \theta \cdot B \leq 0 \quad (2)$$

$$\cdot \text{ギャロッピング: } g_{wg}(Z, X_c, Y_c) = 1.2 \cdot E_1 \cdot U_{10} - 8 \cdot f_h \cdot B \leq 0 \quad (3)$$

$$\cdot \text{鉛直たわみ渦励振: } g_{wvh}(Z, X_c, Y_c) = E_1 \cdot U_{10} - 1.68 \cdot B \cdot (W_L/W_D)^{1/2} \cdot \eta_L(Z, X_c, Y_c)^{-1/2} \leq 0 \quad (4)$$

$$\cdot \text{ねじれ渦励振: } g_{wv}(Z, X_c, Y_c) = E_1 \cdot U_{10} - 2.2344 \cdot B \cdot (W_L/W_D)^{1/2} \cdot \eta_L(Z, X_c, Y_c)^{-1/2} \leq 0 \quad (5)$$

ここに、 B : 橋げたの総幅(m), $f \cdot \theta$: ねじれの一次固有振動数(H_z), f_h : 鉛直たわみ一次固有振動数(H_z), W_L : 換算等分布荷重(tf/m), W_D : 主径間の死荷重強度(tf/m), $\eta_L(Z, X_c, Y_c)$: 最大活荷重たわみ(m), U_{10} : 基本風速, E_1 : 高度および地表粗度に関する補正係数, E_{r1} : 自然風の変動に基づく補正值。

本研究では、耐風性に関する制約条件をも考慮した鋼斜張橋の最適設計システムを開発するための基礎的研究として、最大活荷重たわみを用いた簡易式により照査することができる鉛直たわみ渦励振およびねじれ渦励振の制約を考慮している。さらに本研究では、活荷重たわみに関する制約条件をも考慮している。なお、活荷重たわみは影響線を用いて厳密に計算している。

$$g_g(Z, X_c, Y_c) = \eta_L(Z, X_c, Y_c) - \eta_{La} \leq 0, \quad \text{ここに、} \eta_{La}: \text{許容活荷重たわみ (m)} \quad (6)$$

(3) 鋼斜張橋の最適設計問題の定式化およびその解法

$$\text{find } Z, X_c, Y_c, \text{ which, minimize } \text{TCOST}(Z, X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^n W_i(X_c, Y_c) A_i(Z) \quad (7)$$

$$\text{subject to } g_{vj}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m): \text{主桁・塔・ケーブル要素の応力度の制約条件} \quad (8)$$

$$g_{wvh}(Z, X_c, Y_c) \leq 0: \text{鉛直たわみ渦励振に関する制約条件} \quad (9)$$

$$g_{wv}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad : \quad \text{ねじれ渦励振に関する制約条件} \quad (10)$$

$$g_a(Z, Y_c) \leq 0 \quad : \quad \text{活荷重たわみに関する制約条件} \quad (11)$$

$$Z^{(k)} \leq Z \leq Z^{(u)}, \quad X_c^{(k)} \leq X_c \leq X_c^{(u)}, \quad Y_c^{(k)} \leq Y_c \leq Y_c^{(u)} \quad : \text{設計変数の上・下限制約}$$

ここに、 n :全部材要素数、 m :応力度の制約条件数、 A_i : i 番目の部材要素の断面積、 $W_i = \rho_i \cdot l_i$ 、 ρ_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

上で定式化した鋼斜張橋の最適設計問題の解法として、本研究では、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求める方法を用いた。

3. 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2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、耐風性に関する制約条件を考慮した場合としない場合の最適解の比較検討を行い、さらに、桁高を離散的に変化させた場合の総製作費を比較することにより最適な桁高を決定した結果について述べる。耐風性に関する制約条件に用いた基本的な設計条件を表-1に、耐風性に関する制約条件を考慮した場合および考慮しない場合における最適なケーブル配置の比較を図-1に、また最適なケーブル断面積および総製作費の比較を表-2に示す。

耐風性に関する制約条件を考慮した場合と考慮しない場合のケーブル配置において、塔の高さは、耐風性を考慮した場合が1.846m高くなっているが、主桁位置においては最大0.917m異なるのみであり、いずれの場合もほぼ同じケーブル配置が得られている。ケーブル断面積 A_c では、耐風性を考慮した場合には、 C_3 のケーブルを除くすべてのケーブルの断面積が耐風性を考慮しない場合より増加しており、特に活荷重たわみに大きな影響を及ぼす最上段ケーブルは1.12~1.15倍大きくなっている。総製作費では、耐風性を考慮した場合が1.4%増加している。

つぎに、耐風性に関する制約条件をも考慮し、桁高を1.7mから0.2mごとに2.9mまで離散的に変化させた場合の総製作費の変化を図-2に示す。この設計問題では、いずれの桁高における最適解においても応力度および鉛直たわみ渦励振の制約条件がアクティブとなった。図-2より明らかなごとく、この設計問題における最適な桁高は2.35m程度となっている。

以上の考察の結果、本研究で述べた方法により、応力度の制約条件のみならず、耐風性に関する制約条件をも考慮した鋼斜張橋の最適設計を行うことができることが明らかとなるとともに、桁高を離散的に変化させた場合の最適解を比較することにより、鋼斜張橋の総製作費を最小にする桁高を容易に決定することができることが明らかとなった。

なお今後、固有値解析を行うことによりフラッター、ギャロッピングなどの制約条件をも考慮することができるよう開発を進めていく予定である。

(参考文献) 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧、1991年7月

表-1 耐風性に関する制約条件に用いた設計条件

自然風の変動に基づく補正值	E_z	1.10
高度および地表粗度に関する補正係数	E_s	1.33
基本風速	$U_{10}(\text{m})$	40.0
橋げたの上フランジの総幅	$B(\text{m})$	20.0
主径間の死荷重強度	$W_D(\text{tf/m})$	26.0
換算等分布活荷重	$W_L(\text{tf/m})$	5.37
許容活荷重たわみ	$\eta_{1.0}(\text{m})$	0.5

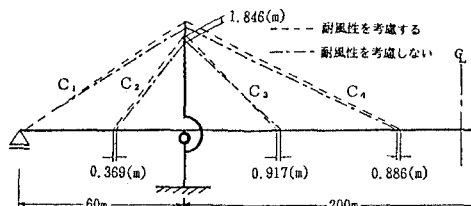


図-1 耐風性を考慮した場合と考慮しない場合のケーブル配置の比較 (桁高1.5m)

表-2 耐風性を考慮した場合と考慮しない場合の最適解の比較 (桁高1.5m)

変 数	考慮しない場合	考慮した場合
	$A_c(\text{cm}^2)$	$A_c(\text{cm}^2)$
C_1	356	410
C_2	118	139
C_3	160	154
C_4	290	325
総製作費 (万円)	199906.2	202608.7
総製作費の比	1.000	1.014

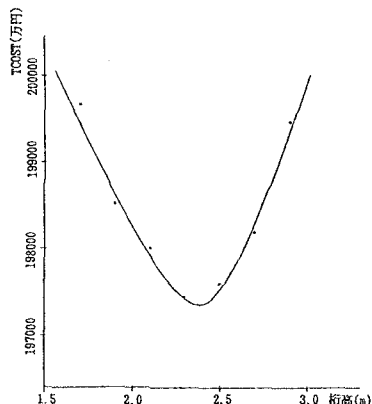


図-2 桁高を変化させた場合の総製作費の比較