

地震荷重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 慎二
 愛媛大学 工学部 正会員 谷 脇 一弘
 アイサワ工業(株) 正会員 〇薄井 正統

1. まえがき

著者らは、これまでに死荷重および活荷重を考慮した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およびケーブルに導入すべきプレストレス量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。本研究は、この鋼斜張橋の最適設計システムを拡張し、死・活荷重のみならず地震時の荷重を受ける鋼斜張橋について、最適な断面寸法およびケーブル配置を決定することができる鋼斜張橋の耐震最適設計システムの開発を行い、設計例として地震時の水平変位を制限するための水平弾性ケーブルを塔位置に有する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. 鋼斜張橋の耐震最適設計問題の定式化および解法

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および使用時の連続ばり系の2つの異なる構造・荷重系を解析することにより得られる死・活荷重による応力度、使用時の地震荷重による応力度および桁端の水平変位を用い、道路橋示方書に規定されている死・活荷重および地震荷重による主桁、塔およびケーブルの応力度の制約条件および地震荷重による桁端の水平変位に関する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。地震荷重による変位および応力度の計算は、構造物の減衰等を考慮し道路橋示方書に規定されているⅠ種地盤の加速度応答スペクトルの1.5倍のスペクトルを用い、応答スペクトル解析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。

$$\begin{aligned} \text{Find } Z, X_c, Y_c \text{ which } & \text{minimize } \text{TCOST}(Z, X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^n \rho_i l_i (X_c, Y_c) A_i(Z) \\ \text{subject to } & g_{gj}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, mg) & \text{:主桁要素のフランジの応力度の制約条件} \\ & g_{tj}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, mt) & \text{:塔要素の応力度の照査に関する制約条件} \\ & g_{qj}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, nt) & \text{:塔要素の座屈安定の照査に関する制約条件} \\ & g_f(Z, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, nr) & \text{:塔要素の細長比に関する制約条件} \\ & g_{cj}(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \quad (j=1, \dots, nc) & \text{:ケーブル要素の引張応力度の制約条件} \\ & g_d(Z, X_c, Y_c) \leq 0 & \text{:地震荷重による桁端の最大水平変位に関する制約条件} \\ & Z^l \leq Z \leq Z^u, \quad X_c^l \leq X_c \leq X_c^u, \quad Y_c^l \leq Y_c \leq Y_c^u & \text{:設計変数の上・下限制約} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 n :全部材要素数、 mg :主桁要素の応力度の制約条件の数、 mt :塔要素の応力度の制約条件の数、 nr :塔の要素数、 nc :ケーブル要素数、 A_i :部材要素 i の断面積、 ρ_i :要素 i の材料の単位体積当りの製作費、 l_i :要素 i の部材長

本研究では、凸近似設計法および双対法を用いて上記の設計問題の最適解を決定している。

3. 地震荷重による変位および部材力の感度係数の計算

2.で述べた設計問題を解く過程において必要となる死・活荷重による部材力の感度係数の計算は差分により行っている。地震荷重による変位および部材力の感度係数の計算では、まず振動方程式から導入される固有値問題の基礎式を設計変

数 X_i ($X = [Z^T, X_c^T, Y_c^T]^T$) に関して偏微分することにより得られる r 次モードの固有値 λ_r および固有ベクトル $\{\phi\}_r$ の感度係数を用いて変位 u_r の感度係数を次式により求める。

$$\frac{\partial u_r}{\partial X_i} = \frac{\partial \{\phi\}_r}{\partial X_i} q_r + \{\phi\}_r \frac{\partial q_r}{\partial X_i} \quad (2)$$

上式の規準座標 q_r の感度係数は刺激係数 β_r および加速度応答スペクトル S_A を用いて次式により得ることができる。

$$\frac{\partial q_r}{\partial X_i} = \frac{S_A}{\lambda_r} \frac{\partial \beta_r}{\partial X_i} + \frac{\beta_r}{\lambda_r} \frac{\partial S_A}{\partial X_i} - \frac{\beta_r S_A}{\lambda_r^2} \frac{\partial \lambda_r}{\partial X_i} \quad (3)$$

部材要素 j に関する地震荷重による r 次モードの部材力 $f_{j,r}$ の X_i に関する感度係数は次式により計算することができる。

$$\frac{\partial f_{j,r}}{\partial X_i} = \frac{\partial k_{mj}}{\partial X_i} Q_j u_{j,r} + k_{mj} \frac{\partial Q_j}{\partial X_i} u_{j,r} + k_{mj} Q_j \frac{\partial u_{j,r}}{\partial X_i} \quad (4)$$

ここに、 k_{mj} は部材要素 j の剛性マトリックス、 Q_j は座標変換マトリックスをまた、 $u_{j,r}$ は部材 j の両端の節点変位を示す。

変位および部材力の最大応答値の感度係数は、各モードの応答値の二乗和平方根の計算式を設計変数 X_i に関して偏微分を行い、(2)式および(4)式で得られた感度係数を用いることにより容易に計算することができる。

4. 設計例および考察

設計例として図-1に示す死・活荷重および地震荷重を受ける2面吊りの6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、地震時の水平変位を制限するための水平弾性ケーブルを塔位置に有する形式（水平ケーブルあり）および水平ケーブルを有しない形式（水平ケーブルなし）の二つの構造形式について最適解の比較を行った。主桁要素ではSS400、塔要素ではSM490およびSM470の材種を用い、主桁、塔およびケーブルの単位体積当りの製作費をそれぞれ500万円/m³、700万円/m³および900万円/m³と仮定している。本研究では、不要なケーブルの断面積を0.0m²とすることができるようにケーブルの断面積の下限値を0.00001m²に設定している。また、地震荷重による桁端の最大水平変位を80cmに制限している。地震応答解析において、各モードの有効質量の和が全質量の95%以上となる1次から10次までの振動モードを考慮している。

水平ケーブルありおよび水平ケーブルなしの場合の最適解の比較を表-1に、最適ケーブル配置の比較を図-2に示す。水平ケーブルありおよび水平ケーブルなしの場合の最適解はそれぞれ17回および18回の改良反復回数により能率的に得られている。最適解において、水平ケーブルなしの場合には地震荷重による桁端の水平変位は80.0cmとなり、応力度および変位の制約条件が同時にアクティブとなっている。水平ケーブルありの場合には桁端水平変位は53.42cmと水平ケーブルなしの場合と比較して33.2%減少している。最適ケーブル配置は最大15.24m異なっており、塔高では水平ケーブルありの場合が4.19m高くなっている。総製作費では、水平ケーブルありの場合が1.1%減少している。

上記の基礎的考察により、本研究で述べた方法により地震荷重をも考慮した鋼斜張橋の最適設計を能率的に行うことができることが明らかとなった。

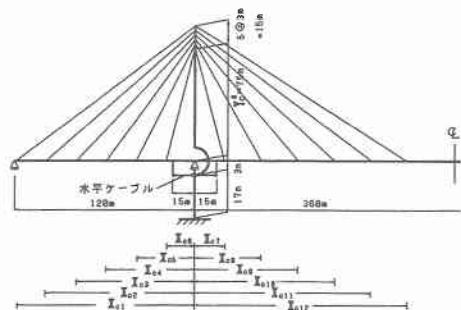


図-1 6段ケーブルを有する3径間連続鋼斜張橋

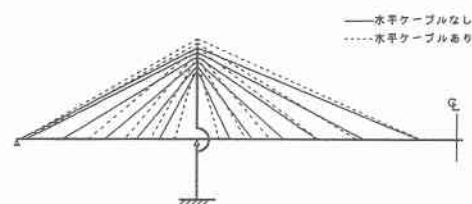


図-2 水平ケーブルなしおよび水平ケーブルありの場合の最適ケーブル配置

表-1 水平ケーブルなしおよび水平ケーブルありの場合の最適解の比較

変数	水平ケーブルなし		水平ケーブルあり	
	X_m	Y_i (m)	X_m	Y_i (m)
C_1	119.000	472	119.000	481
C_2	113.178	153	113.574	133
C_3	89.102	83	73.864	106
C_4	61.000	121	50.586	140
C_5	38.236	187	32.217	126
C_6	24.090	29	14.989	0
C_7	21.597	6	15.222	0
C_8	36.978	192	33.463	151
C_9	57.625	123	53.775	121
C_{10}	80.209	137	81.670	130
C_{11}	111.403	240	111.391	237
C_{12}	151.838	365	152.517	341
C_{13}	-	-	-	0.95
Y_c	46.339	-	50.528	-
$H^{(1)}$	61.339	-	65.528	-
桁端の水平変位量	80.000(cm)		53.42(cm)	
総製作費(万円)	493785.7		488417.4	
総製作費の比	1.000		0.989	

1) 主桁位置からの塔頂までの高さ

2) 水平ケーブルなしの場合の総製作費に対する水平ケーブルありの場合の総製作費の比