I-156　斜張橋のケーブルおよび桁剛性の最適配置に関する基礎的考察

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
住友重機械工業(株)　正会員　浅井　一浩

1．まえがき

斜張橋は経済性と美観上の見地から支間長500m以上の長大橋梁から歩道橋のような小規模の橋梁まで広範囲に利用される構造形式であるが、その挙動は塔の高さ、ケーブルの剛性および配置、桁の剛性などの多くの設計パラメーターの値により大きく影響を受け、複雑な構造特性を有する高次の不静定構造物であり、合理的な斜張橋の設計を行うためにはこれらの設計パラメーターをバランスよく決定することが重要な問題となる。本研究は、このように多くの設計パラメーターを有する斜張橋の合理的な設計法を確立するための基礎的な研究として、原設計変数および逆変数を混用したNew Dual法を用いて、応力度の制約条件のもとで総コストが最小となるように各部材要素の断面積およびケーブルの断面積と定着位置を決定する方法について考察を行ない、比較的単純な斜張橋のモデルについて計算を行なった結果について報告するものである。

2．斜張橋の最適設計問題の定式化

斜張橋の設計パラメーターとしては各桁および塔要素の断面寸法、ケーブルの断面積および定着点の位置などが考えられる。本研究では基礎的な考察を行うことを目的としているので、斜張橋の桁および塔要素の部材断面として図-1に示す箱形断面を考え、上記の設計パラメーターのうち、フランジ幅b、桁高h、ウェブ板厚t_wは設計条件より与えられるものとした。さらに、塔および桁の各要素の上・下フランジは同一の板厚で変化するものと仮定することにより、各要素の断面寸法に関する設計変数を断面積$\mathbb{A}$のみに集約させることとした。このような単純化を行うことにより、応力度の制約条件を考慮した斜張橋の最適設計問題はつぎのように定式化される。

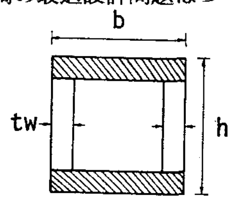

図-1　断面形状

Find　$\mathbb{A},\mathbb{X},\mathbb{Y}$　such that

minimize　$$\mathrm{TCOST}(\mathbb{A},\mathbb{X},\mathbb{Y})=\sum_{i=1}^{n}\rho_i\cdot\ell_i(\mathbb{X},\mathbb{Y})\cdot A_i \quad\cdots\cdots(1)$$

subject to　$$g_k(\mathbb{A},\mathbb{X},\mathbb{Y})=\left|\frac{N_k}{A_k}\right|+\left|\frac{M_k}{I_k(A_k)}\cdot y\right|\leqq\sigma_{ak}\quad(k=1,\cdots,m)$$

ここに、　n：全要素数，ρ_i：各要素の製作単価，σ_{ak}：許容応力度
m：制約条件の数，$\ell(X,Y)$：要素長，N_k：要素に作用する軸力，M_k：要素に作用する最大曲げモーメント，
$I_k(A_k)$：断面二次モーメント，y：中立軸からの距離，
$\mathbb{X}\cdot\mathbb{Y}$：ケーブル定着点位置（図-2参照）

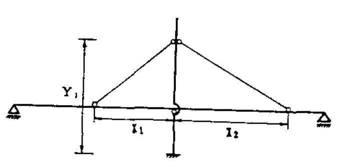

図-2　ケーブル定着点位置

3．New Dual法による最適化の方法

2．で定式化した最適化問題の解法としては、種々の非線形計画法の適用が考えられるが、本研究では、大久保らの長年の研究により汎用性、信頼性および能率性がすぐれている混合変数を用いたNew Dual法により最適化を行なった。この方法による最適化のアルゴリズムの概要は次の通りである。

① まず設計問題の目的関数および制約条件の設計変数に関する1次の偏微係数を求め、この偏微係数の符号の正負により原変数あるいはその逆数を用いて原設計問題の近似設計問題を導入する。この方法により、原設計問題よりもひかえめで確実に凸の設計空間を設定することができる。

② ①で作成した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$\boldsymbol{\lambda}$について最大化、$\mathbb{A},\mathbb{X},\mathbb{Y}$について最小化することにより$\mathbb{A},\mathbb{X},\mathbb{Y}$の改良解を求める。ラグランジュ関数を最大にする$\boldsymbol{\lambda}^*$はニュートン法により、また最小化する$\mathbb{A}^*$、$\mathbb{X}^*$、$\mathbb{Y}^*$は$\boldsymbol{\lambda}^*$を用いて解析式により求めることができる。

③ ②で求めた改良解を新たな初期値として①、②の操作を繰り返すことにより最適解を決定する。

上記の反復改良過程において、$\mathbb{X},\mathbb{Y}$の変化量が大きい場合にはしばしば不合理な解に収束したり、解が大

きく振動する場合が生ずる。そのため、本研究では𝕏，𝕐の１回の改良過程におけるMove Limitを10%に規定することにより、スムーズに最適解に収束させることが可能となった。

４．数値計算例および考察

３．で述べた最適化の方法により、図-３に示す中央径間250mの二段ケーブルを有する左右対称の斜張橋について𝔸のみの改良を行なった場合（ケース１）、𝔸およびX_1～X_4・Y_1の改良を行なった場合（ケース２）、異なるX_1～X_4の初期値からケース２と同様の改良を行なった場合（ケース３）について最適化を行なった結果の比較を表-１に示す。

ケース２および３では、ケース１と比較して設計変数が18個から23個と増加しているので、最適解を得るまでの反復改良回数はケース１と比較して6～10回程度多くなっているが収束状況はきわめて良好である。初期値の異なるケース２および３の結果が全く一致していることより、ケース２の解は全域的な最適解であると考えられる。ケース１、２の総コスト(TCOST)の比は1:0.79となっており、斜張橋においてはケーブルの定着点𝕏・𝕐を設計変数とすることがきわめて重要であることがわかる。

このTCOSTの変化を検討するため、ケース１および２のケーブル軸力、桁の軸力および曲げモーメント分布を求めると図-４のようになる。

ケース２において各段の左右のケーブル張力がほぼ等しくバランスしているのに対し、ケース１では左右のケーブル張力が大きく異なっている。また、ケーブル張力の合計もケース２の方が小さくなっている。ケース２では塔の高さが57%も増加しているにもかかわらずケーブル張力に関する上記の理由により、ケーブルと塔のコストの合計はケース２の方がケース１より15%減少している。次に桁の軸力はほぼ桁全体にわたってケース２の方がケース１より43%～56%減少している。また、桁の曲げモーメント分布についても、ケース１の場合は桁の端部に極端に大きな曲げモーメントが見られるが、ケース２では曲げモーメントは桁全体に均等化され、かつ絶対値が小さくなっている。これらの理由により、ケース２の桁の総コストはケース１と比較して21.6%も減少している。

以上の考察により、本研究の方法で得られた斜張橋の最適な𝔸，𝕏，𝕐はきわめて妥当な値であることが明らかとなった。

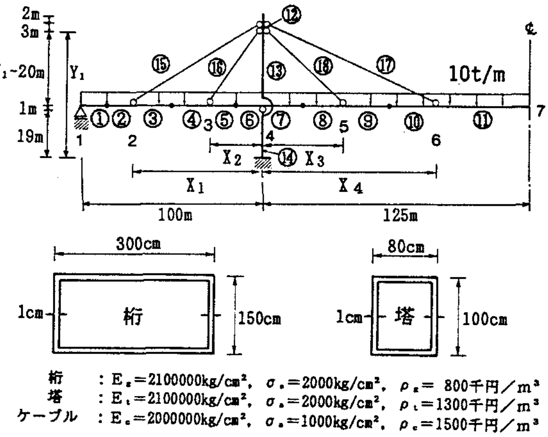

図-３　二段ケーブル斜張橋

表-１　二段ケーブル斜張橋の最適解の比較

	変　数	ケース１	ケース２	ケース３
初期値	A_3 (m²)	0.626	0.626	0.626
	A_{11} (m²)	0.626	0.626	0.626
	A_{14} (m²)	0.176	0.176	0.176
	A_{15} (m²)	0.080	0.080	0.080
	X_1 (m)	80.00	80.00	60.00
	X_2 (m)	40.00	40.00	30.00
	X_3 (m)	50.00	50.00	30.00
	X_4 (m)	90.00	90.00	70.00
	Y_1 (m)	57.00	57.00	57.00
	TCOST(千円)	166862.5	166862.5	155873.8
最適解	A_3 (m²)	0.625	0.164	0.167
	A_{11} (m²)	0.241	0.196	0.202
	A_{14} (m²)	0.190	0.136	0.136
	A_{15} (m²)	0.181	0.090	0.091
	X_1 (m)	80.00	94.32	94.21
	X_2 (m)	40.00	47.51	46.64
	X_3 (m)	50.00	50.08	50.06
	X_4 (m)	90.00	94.64	93.90
	Y_1 (m)	57.00	89.67	89.31
	ITE.	4	10	14
	TCOST(千円)	123605.7	97363.6	97425.9
	TCOSTの比	1	0.79	0.79

ITE.= NUMBER OF ITERATION,　TCOST = TOTAL COST

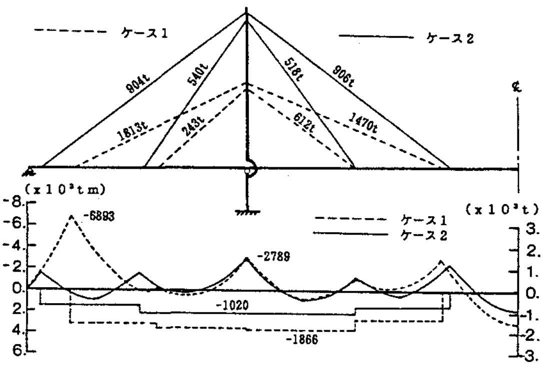

図-４　二段ケーブル斜張橋のケーブル張力、桁軸力および曲げモーメント分布

参考文献　S.Ohkubo et.al.:Total Optimization of Truss Considering Shape, Material and Sizing Variables, Structures Congress, 1989.