

(4) 双対法による斜張橋のケーブルおよび 桁剛性の最適配置の決定法について

OPTIMIZATION OF CABLE AND GIRDER ARRANGEMENT
IN CABLE-STAYED BRIDGE BY USING DUAL METHOD

大久保 禎二* 谷 脇 一弘**
Sadaji OHKUBO, Kazuhiro TANIWAKI

From the static analysis viewpoint the cable anchorage positions can be considered as one of the most fundamental and important design variables in the optimum design problem of cable-stayed bridge superstructure.

In this paper a minimum cost design problem of cable-stayed bridge superstructure is formulated in terms of the cable anchorage positions on the girder and tower together with cross sectional sizes of cables, girder and tower elements. The cost minimization problem subjected to stress constraints and fixed loading is solved by using dual method with mixed direct/reciprocal design variables.

The global optimum solutions are obtained quite effectively and the significance of the cable anchorage positions as the design variables is emphasized by demonstrating considerable reduction in the total costs of the bridges.

Key Words : Cable-stayed bridge, Optimization, Cable anchorage positions,
Girder and tower sizes, Dual method

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、その挙動はスパン割、塔の高さ、ケーブルの配置および剛度、ケーブルのプレストレス量、桁の剛性など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、合理的な斜張橋の計画および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。このような斜張橋の最適化に関する研究は1970年代の後半から始められ、山田らは⁴⁾ケーブルと主桁の剛比およびプレストレス量に着目した最適規準設計法に関する研究を行い、前田らは⁵⁾SLP法を用いて主桁、塔およびケーブルの最適断面寸法を決定した例について述べている。また小林らは⁶⁾、主桁支持方式の異なる3種類の斜張橋モデルについて、多段階最適化手法により最適設計を行った例について述べている。最適化手法としてはSLP法を用いている。このように従来の斜張橋の最適化に関する研究においては、斜張橋の塔の高さおよびケーブル定着位置を固定し、ケーブル、塔、桁の最適断面剛性を決定することに主眼が置かれている。しかし、斜張橋においてはケーブルの定着位置およびその剛性が主桁の曲げモーメントおよび軸力分布に大きな影響を与えることから、斜張橋の最適化を行う場合にはケーブル定着位置も重要な設計変数として考慮すべきであると考えられる。

そこで本研究では、各桁要素および塔要素の板厚、各ケーブル要素の断面積のみならず、ケーブルの桁お

*工博 愛媛大学教授 工学部土木工学科

**工修 愛媛大学助手 工学部土木工学科

よび塔における定着位置をも設計変数とし、斜張橋の計画および設計を最適に行える設計システムを開発することとした。最適化の手法として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、応力度の制約条件のもとで総コストが最小となるような設計変数を決定する方法について述べている。設計例として固定荷重を受ける4段ケーブルおよび6段ケーブルを有する斜張橋モデルについて最適化を行い、本論文の設計法の有効性を示すとともに、斜張橋の最適設計においてはケーブルの桁および塔における定着位置を設計変数として考慮することがきわめて重要であることを明らかにしている。

2. 最適設計問題の定式化

(1) 斜張橋の設計変数

斜張橋の主桁および塔要素の断面形状として箱型断面を考える。図-1に示すごとく、斜張橋を設計する場合に決定すべき設計パラメーターはきわめて多いが、本研究では断面寸法に関する設計変数として主桁および塔要素の板厚 t_u , t_l , t_w およびケーブルの断面積 A_c を考慮している。また、ケーブル配置に関する設計パラメーターとして桁および塔のケーブル定着位置 X および Y を考慮した。

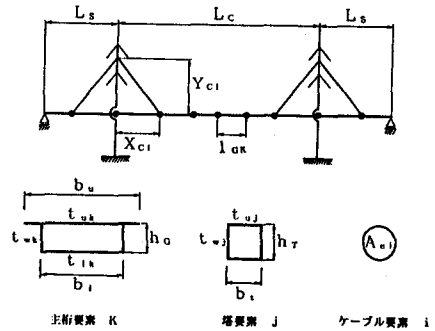


図-1. 斜張橋の設計パラメーター

(2) 制約条件

斜張橋の挙動に関する制約条件として次式に示す桁および塔の上・下フランジの応力度、腹板のせん断力による応力度およびケーブルの応力度を考慮した。

上・下フランジの応力度

$$g_{\sigma j} = \left| \frac{N_j}{A_j} \pm \frac{M_j}{I_j} \cdot y \right| - \sigma_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (1)$$

ここに、 y ：中立軸からの距離、 m ：制約条件の数
符号の-は上フランジ、+は下フランジの場合を示す。

腹板のせん断力による応力度

$$g_{\tau j} = |S_j / A_{wj}| - \tau_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (2)$$

ここに、 A_{wj} ：腹板の断面積、 m ：制約条件の数

ケーブル要素の応力度

$$g_{\sigma i} = N_i / A_{ci} - \sigma_{ai} \leq 0 \quad (i=1, \dots, nc) \quad (3)$$

ここに、 A_{ci} ：ケーブルの断面積、 nc ：ケーブルの本数

応力度の検討位置は、図-2に示すように、桁要素に関しては部材の両端および曲げモーメント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。

上記の式(1)~(3)の応力度に関する制約条件の他、座屈等を考慮した最小板厚の制限および設計変数の上限値の制約をも考慮している。

(3) 最適設計問題の定式化

(1)、(2)で述べた設計変数および制約条件を考慮して斜張橋の製作コストを最小にする設計変数 $Z = [t_u, t_l, t_w, A_c]^T$, X_o , Y_o 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_o, Y_o such that

$$\text{minimize} \quad \text{TCOST}(Z, X_o, Y_o) = \sum_{i=1}^{nc} \rho_{ki} \cdot l_{ki}(X_o) \cdot A_i(Z)$$

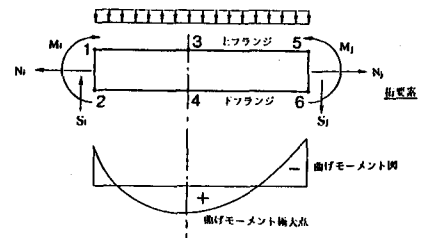


図-2. 応力度の着目位置

$$\text{subject to} \quad + \sum_{i=1}^{nt} \rho_{ti} \cdot \ell_{ti}(Y_o) \cdot A_i(Z) + \sum_{i=1}^{nc} \rho_{ci} \cdot \ell_{ci}(X_o, Y_o) \cdot A_{ci} \quad (4)$$

$$g_{\sigma_j}(Z, X_o, Y_o) = \sigma_j(Z, X_o, Y_o) - \sigma_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (5)$$

$$g_{\tau_j}(Z, X_o, Y_o) = \tau_j(Z, X_o, Y_o) - \tau_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (6)$$

上・下限制約に関して

$$Z_l \leq Z \leq Z_u, \quad X_{o,l} \leq X_o \leq X_{o,u}, \quad Y_{o,l} \leq Y_o \leq Y_{o,u} \quad (7)$$

ここに、ng：主桁の要素数、nt：塔の要素数、nc：ケーブルの本数、

ρ ：単位体積当りのコスト、 ℓ_i ：要素長、m：制約条件の数

桁の要素長 ℓ_{ki} は、ケーブルの定着間隔が20m程度と短い場合はケーブル間隔と等しくとり、この間隔が長い場合にはケーブル定着点の中間に解析上の節点を追加して部材を分割し、断面寸法が変化し得るようにしている。

3. 最適化の方法の概要

2.で定式化した斜張橋の最適化問題の解法として、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^{たとえ3)}により汎用性、信頼性および収束性がすぐれていることが明らかとなっている混合変数を用いて設計空間を凸近似し、双対法により最適化を行う方法を用いて設計問題の最適解を決定した。最適化アルゴリズムの概要はつぎの通りである。

(1) 最適化アルゴリズム^{3), 1), 2)}

① まず、2.で定式化した設計問題の目的関数および制約条件の設計変数 Z, X_o, Y_o 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つぎに示す原設計問題の近似設計問題を導入する。この近似により、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。

find Z, X_o, Y_o such that

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \Delta \text{TCOST}(Z, X_o, Y_o) = \sum_{i=1}^k W_{ik} \cdot A_i(Z) \\ & + \sum_{k=1}^L (\sum_{i=1}^n W_{X_{ik}} \cdot A_i(Z^0))_+ \cdot X_{ok} - \sum_{k=1}^L (\sum_{i=1}^n W_{X_{ik}} \cdot A_i(Z^0))_- \cdot (X_{ok}^0)^2 \cdot \frac{1}{X_{ok}} \\ & + \sum_{l=1}^L (\sum_{i=1}^n W_{Y_{il}} \cdot A_i(Z^0))_+ \cdot Y_{ol} - \sum_{l=1}^L (\sum_{i=1}^n W_{Y_{il}} \cdot A_i(Z^0))_- \cdot (Y_{ol}^0)^2 \cdot \frac{1}{Y_{ol}} \end{aligned} \quad (8)$$

subject to

$$\begin{aligned} g_{\sigma_j}(Z, X_o, Y_o) = & \sum_{i=1}^n (a_{ij} Z_i - a_{ij} (Z_i^0)^2 \cdot \frac{1}{Z_i}) + \sum_{k=1}^K (x_{kj} X_{ok} - x_{kj} (X_{ok}^0)^2 \cdot \frac{1}{X_{ok}}) \\ & + \sum_{l=1}^L (y_{lj} Y_{ol} - y_{lj} (Y_{ol}^0)^2 \cdot \frac{1}{Y_{ol}}) + \bar{U}_j \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \end{aligned} \quad (9)$$

$$g_{\tau_j}(Z, X_o, Y_o) = \tau_j(Z, X_o, Y_o) - \tau_{aj} \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (10)$$

設計変数の上・下限制約に関して

$$Z_l \leq Z \leq Z_u, \quad X_{o,l} \leq X_o \leq X_{o,u}, \quad Y_{o,l} \leq Y_o \leq Y_{o,u} \quad (11)$$

ここに、n=ng+nt+nc、K： X_o の変数の数、L： Y_o の変数の数、 $\bar{U}_j$ ：制約条件の定数項

$$W_i = \rho_i \cdot \ell_i, \quad W_{X_{ik}} = \frac{\partial W_i}{\partial X_{ck}}, \quad W_{Y_{il}} = \frac{\partial W_i}{\partial Y_{cl}}, \quad a_{ij} = \frac{\partial g_{\sigma_j}}{\partial Z_i}, \quad x_{kj} = \frac{\partial g_{\sigma_j}}{\partial X_{ck}}, \quad y_{lj} = \frac{\partial g_{\sigma_j}}{\partial Y_{cl}}$$

各偏微係数の値は差分法により求めた。また、記号 $()_+ \cdot ()_- \cdot (+) \cdot (-)$ は符号の正・負を表す。

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 λ について最大化、 Z, X_o, Y_o について最小化することにより Z, X_o, Y_o の改良解を求める。ラグランジュ関数を最大にする λ^* はニュートン法により、また最小化する Z^*, X_o^*, Y_o^* は λ^* 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 X_0 、 Y_0 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_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。

(2) 初期値の決定

(1)でのべた最適化アルゴリズムでは、いくつかの制約条件がアクティブ、すなわちニュートン法においていくつかのラグランジュ乗数 λ がある値を持つように設計変数の初期値を決定し改良を行う。もしアクティブとなる制約条件がない場合にはスケーリングにより設計変数を修正し、アクティブな制約条件を発生させる必要がある。

このことより、本研究では設計変数の初期値として X_0 、 Y_0 を固定し、任意の初期値 Z^0 に対して得られた断面力を用いて、各要素毎に式(5)、(6)、(7)の制約条件のもとで断面積 $A_i(Z_i)$ を最小とする Z_i を決定するsuboptimizationを要素毎に行い、得られた Z を原設計問題の初期値 Z^0 として用いている。

4. 設計例および考察

(1) 設計条件

3.で述べた最適化の方法により、図-3に示す4段ケーブルの2径間斜張橋、左右対称の3径間斜張橋、および図-4に示す6段ケーブルを有する左右対称の3径間斜張橋の3つの設計モデルについて最適化を行い種々の検討を行った。

主桁および塔の断面寸法の固定値として図-5に示す値を仮定し、各設計変数の上・下限値を表-1のように仮定した。また、桁、塔およびケーブルのヤング係数、コスト係数、許容応力度、載荷した鉛直荷重強度を表-

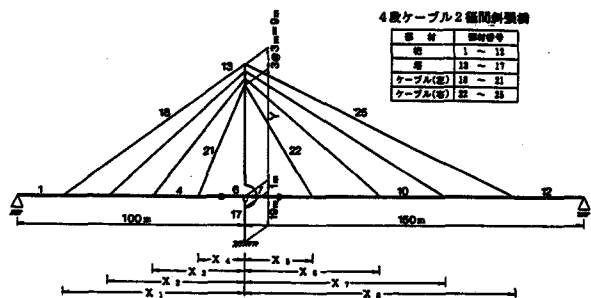


図-3. 4段ケーブルモデル

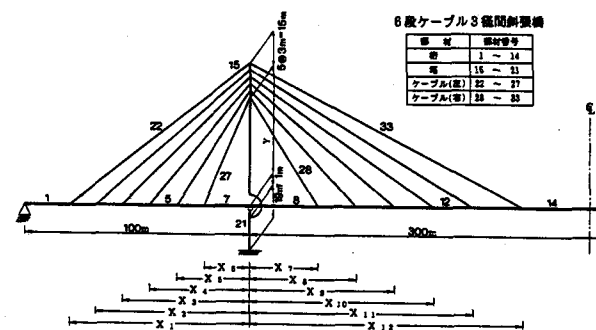
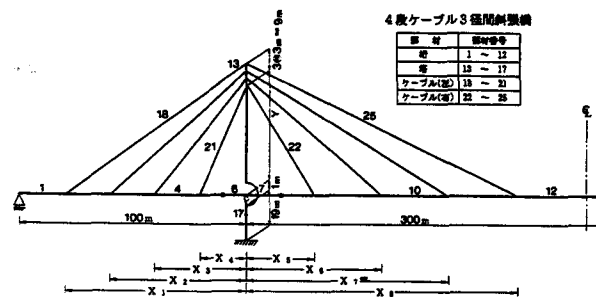


図-4. 6段ケーブルモデル

表-1 設計変数の上・下限値

変数	上限値	下限値
桁	—	18 mm
塔	—	12 mm
ケーブル	—	20 mm
ケーブル	—	22 mm
A_{ci}	—	0.004 m ²
X_1	99.0 m	—
X_2	98.0 m	—

*ケーブルの断面積

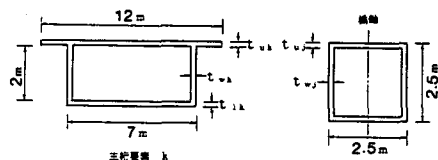


図-5. 断面寸法

表-2 主桁・塔・ケーブル要素の設計条件

部材	ヤング係数	コスト係数	許容応力度	許容せん断応力度	鉛直荷重
主桁	2.1×10^6 kg/cm ²	500 円/m ³	¹⁾ 1000 kg/cm ² ²⁾ 1400 kg/cm ² ³⁾ 1900 kg/cm ²	⁴⁾ 800 kg/cm ² ⁵⁾ 1100 kg/cm ²	12.0 t/m
塔	2.1×10^6 kg/cm ²	700 円/m ³	1900 kg/cm ²	1100 kg/cm ²	2.0 t/m
ケーブル	2.0×10^6 kg/cm ²	900 円/m ³	5100 kg/cm ²	—	8.5 t/m ³

1) 主桁の許容応力度
2) 4段ケーブルの1～5番材、6段ケーブルの1～6番材、9～14番材の許容応力度および許容せん断応力度
3) 5段ケーブルの6～7番材、6段ケーブルの7～8番材の許容応力度および許容せん断応力度

2に示す。この設計モデルにおいて、主桁は2面のケーブルで吊られているものとし、片側一面のみを考慮して最適化を行っている。左右対称な3径間モデルにおいては、左側半分の設計変数のみを考慮している。4段ケーブルモデルにおいて、ケーブル定着点間が大きく、かつ曲げモーメントが大きく変化する塔付近の桁断面では、最下段ケーブルの桁への定着位置と塔との中間点に解析上の節点を設け、桁断面が変化し得るようにしている。

なお以下の設計例の記述において、ケース1はケーブル定着位置を固定し桁および塔の部材要素およびケーブルの断面積のみを設計変数とした場合であり、ケース2はケーブルの定着位置X、Yをも設計変数として考慮した場合である。また、各設計モデルについて、塔や桁のケーブル定着位置X、Yを種々変化させ、初期値を大きく変化させても全く同一の最適解が得られることを確認している。

表-4 4段ケーブル2径間モデルのケーブル軸力

ケーブル	ケース1	s/s_0^*	ケース2	s/s_0^*
18	1199.3 t	0.43	572.7 t	0.59
19	101.3 t	0.51	464.1 t	0.67
20	143.1 t	0.71	485.5 t	1.00
21	493.4 t	0.68	335.6 t	0.66
22	171.1 t	0.41	323.9 t	0.60
23	606.4 t	1.00	647.3 t	1.00
24	784.2 t	0.86	444.7 t	0.66
25	476.0 t	0.34	466.3 t	0.45
**コスト	12363.9(万円)		10076.1(万円)	

* 許容応力度に対する実応力度の割合
** ケーブルのコスト(万円)

表-5 4段ケーブル3径間モデルのケーブル軸力

ケーブル	ケース1	s/s_0^*	ケース2	s/s_0^*
18	2195.4 t	0.77	1111.3 t	1.00
19	133.3 t	0.66	505.8 t	0.97
20	120.1 t	0.60	510.9 t	0.94
21	351.6 t	0.59	364.2 t	0.58
22	138.9 t	0.40	298.4 t	0.50
23	556.6 t	0.95	448.9 t	0.93
24	653.0 t	1.00	714.4 t	1.00
25	1530.9 t	0.91	973.1 t	0.81
**コスト	12415.4(万円)		11554.2(万円)	

* 許容応力度に対する実応力度の割合
** ケーブルのコスト(万円)

表-3 4段ケーブル斜張橋モデルのケース1とケース2の最適解の比較結果

設計変数		2径間モデル		3径間モデル	
		ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
主桁断面	T_{14}, T_{14} (mm)	18.0, 16.0	18.0, 16.0	18.0, 22.7	18.0, 20.0
	T_{15}, T_{15} (mm)	19.0, 39.2	18.0, 35.7	18.0, 50.1	18.0, 42.6
	T_{17}, T_{17} (mm)	18.9, 40.0	18.0, 35.9	18.0, 51.1	18.3, 41.7
	T_{110}, T_{110} (mm)	24.1, 16.0	27.0, 16.0	18.6, 27.6	18.0, 20.0
	T_{112}, T_{112} (mm)	41.4, 48.7	33.8, 39.7	72.6, 85.8	18.0, 22.4
塔	A_{17} (m ²)	0.2151	0.2082	0.2930	0.3341
X・Y	X_1 (m)	90.0	99.0	90.0	99.0
	X_2 (m)	80.0	91.9	80.0	97.6
	X_7 (m)	80.0	94.8	80.0	90.2
	X_8 (m)	110.0	104.5	110.0	128.1
	Y (m)	45.0	56.7	45.0	64.8
1) ITE		16	18	9	9
2) TCOST (万円)		118441.5	105307.8	148221.9	106704.6
3) TCOSTの比		1.00	0.89	1.00	0.72

1)最適解を得るまでの改良反復回数
2)総コスト(万円)
3)ケース1に対するケース2の総コストの比

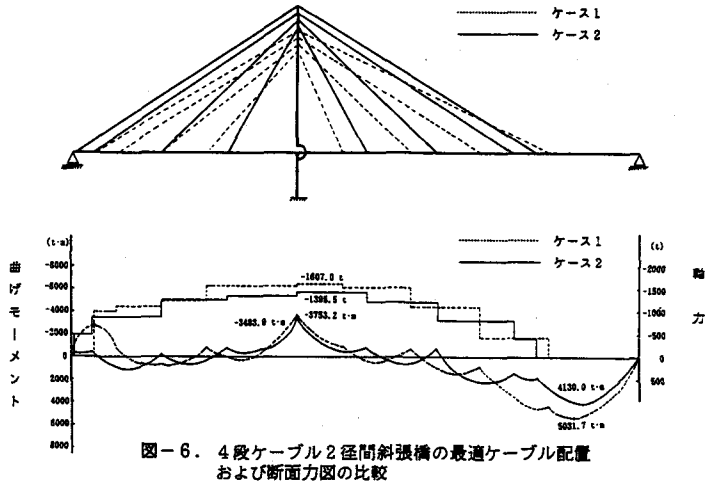


図-6. 4段ケーブル2径間斜張橋の最適ケーブル配置および断面力図の比較

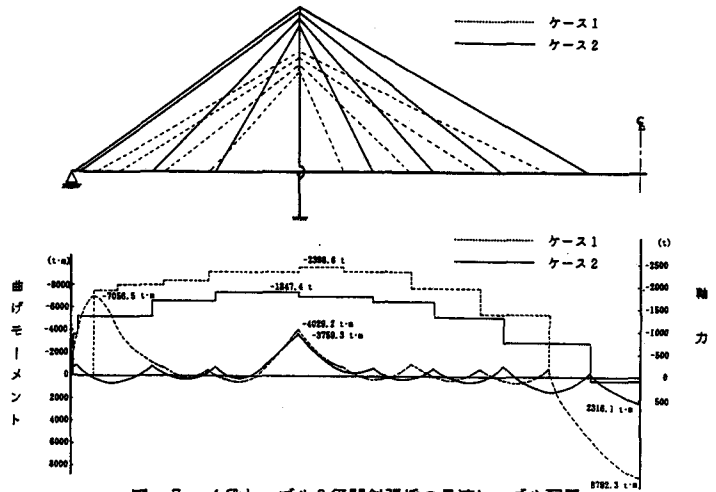


図-7. 4段ケーブル3径間斜張橋の最適ケーブル配置および断面力図の比較

(2) 4段ケーブル斜張橋

図-3に示す4段ケーブルを有する2径間および3径間斜張橋のケース1と2の最適解の比較を表-3に示す。2径間モデル、3径間モデルともに、ケース1では設計変数が37個、応力に関する制約条件式90式、ケース2ではそれぞれ46個および90式と、ケース2の方が設計変数の数が9個多くなっているが、最適解を決定するために必要とした改良反復回数(ITE)はほとんど変化せず、ほぼ同じ回数で最適解を決定している。なお、2径間モデル、3径間モデルともに設計変数の数が等しいにもかかわらず2径間モデルのITEが3径間モデルの約2倍と多くなっているのは、2径間モデルの場合でも総コスト(TCOST)は9回程度で最適解近傍に収束しているが、一部のケーブルの断面積が一定値に収束するまでにさらに9回程度の反復改良を必要としたためである。

図-6、7および表-4、5に示すごとく、2径間モデル、3径間モデルともにケース1とケース2の主桁の曲げモーメント、軸力およびケーブル張力の分布は大きく異なる。特にケース2の左端の最大曲げモーメントはケース1での値より85%~88%減少し、また右端あるいは支間中央部でもケース1より18%~74%と大きく減少し桁全体に曲げモーメントが平均化されている。桁の最大軸力もケース2の方が13%~25%減少している。ケーブル張力は表-4、5から明らかなように、ケース1では各ケーブル間で大きくばらついているのに対し、ケース2ではかなり均等化されている。また、最適解ではすべてのケーブルが必ずしも全応力断面とはならず、ケース2で応力的に最大55%余裕のある断面となっているケーブルもある。ケース2のケーブルコストは2径間モデルで18.5%、3径間モデルで6.5%ケース1より減少している。この結果、ケース1と比較してケース2の総コストが2径間モデルで11%、3径間モデルで28%と大きく減少している。このことより、斜張橋の最適設計を行う場合には、ケーブルの定着位置を設計変数として考慮することがきわめて重要であることが明らかとなった。

つぎにケース2の最適なケーブル定着位置とケース1の定着位置を比較すると、2径間モデルの場合桁上で最大14.8m、3径間モデルでは最大18.1m移動し、塔における最下段ケーブルの最適な定着位置も、2径間モデルで45.0mから56.7mと11.7m、3径間モデルで45.0mから64.8mと19.8m高くなっている。また、端支点付近の桁のケーブル定着点の位置は、桁上から定着点がはみ出さないために設定したケーブル定着位置の上限値と等しくなっている。また、橋の端支点付近に大きな断面のケーブルが集中していることも斜張橋の構造特性を考慮すればき

表-6 6段ケーブル斜張橋モデルのケース1とケース2の最適解の比較結果

設計変数		ケース1	ケース2
主桁の板厚	T_{u6}, T_{l6} (mm)	18.0, 33.4	18.0, 16.0
	T_{u7}, T_{l7} (mm)	18.0, 50.1	18.0, 44.1
	T_{u8}, T_{l8} (mm)	18.0, 53.1	18.0, 43.0
	T_{u12}, T_{l12} (mm)	21.7, 16.0	18.0, 16.0
	T_{u14}, T_{l14} (mm)	40.4, 45.7	18.0, 23.2
塔	A_{21} (m ²)	0.3952	0.3525
X・Y	X_1 (m)	90.0	99.0
	X_2 (m)	80.0	98.0
	X_7 (m)	40.0	19.7
	X_8 (m)	55.0	33.4
	X_{10} (m)	85.0	76.2
	X_{12} (m)	120.0	132.8
	Y (m)	40.0	55.0
1) ITE		8	9
2) TCOST (万円)		146800.0	104918.7
3) TCOSTの比		1.00	0.71

1)最適解を得るまでの改良反復回数 2)総コスト(万円)
3)ケース1に対するケース2の総コストの比

表-7 6段ケーブル3径間モデルのケーブル軸力

ケーブル	ケース1	e/e_n^*	ケース2	e/e_n^*
22	2152.5 t	0.70	1087.7 t	1.00
23	114.8 t	0.57	509.9 t	0.97
24	97.3 t	0.49	230.1 t	1.00
25	89.7 t	0.45	332.1 t	0.96
26	89.2 t	0.44	294.4 t	0.75
27	299.3 t	0.46	151.2 t	0.36
28	353.7 t	0.84	52.4 t	0.27
29	301.4 t	0.90	183.5 t	0.64
30	376.3 t	0.96	340.9 t	0.90
31	348.4 t	1.00	465.7 t	1.00
32	286.5 t	1.00	723.2 t	1.00
33	1315.1 t	0.90	776.3 t	0.87
**コスト	13663.7(万円)		11284.1(万円)	

* 許容応力度に対する実応力度の割合
** ケーブルのコスト(万円)

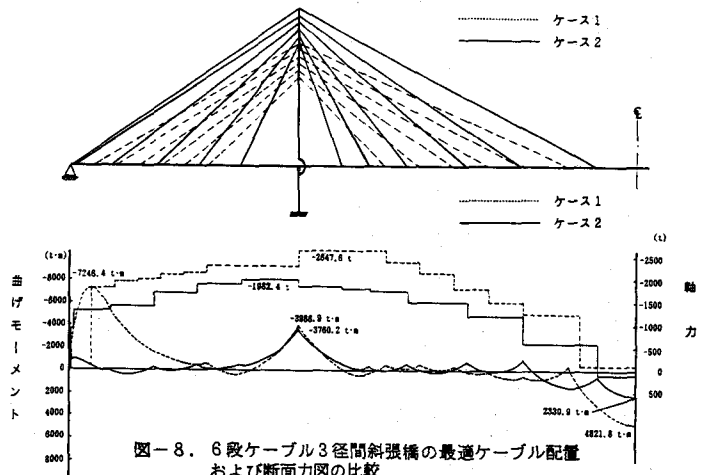


図-8. 6段ケーブル3径間斜張橋の最適ケーブル配置および断面力図の比較

わめて妥当なケーブル配置であることがわかる。最適なケーブル配置は全体として幾何学的にきわめてバランスのとれた美しい配置となっている。

(3) 6段ケーブル斜張橋

図-4に示す6段ケーブルの3径間斜張橋の最適解を表-6、7および図-8に示す。この設計モデルでは、ケース2の場合設計変数60個、応力に関する制約条件式110式と4段ケーブルモデルに比べそれぞれ14個および20式と多くなっているが、最適解を決定するために必要としたITEは8回および9回とほぼ同一であり、本研究で適用している最適化手法が設計変数や制約条件の数にあまり影響を受けず、きわめて能率的に最適解を決定し得ることが理解できよう。最適解の力学的特性は先に述べた4段ケーブルモデルの場合と同様である。6段ケーブルモデルのケース2における最適解の総コストはケース1の場合と比較して29%減少しており、この例からもケーブル定着点を設計変数とすることの重要性が明らかである。桁のケーブル定着位置の最大移動量は21.6m、最下段ケーブルの塔の定着位置は40mから55mと37.5%高くなっており、全体としてのケーブル配置も、きわめてバランスのとれた美しい配置となっている。

5. 結 論

本論文において、斜張橋の各桁要素および塔要素の板厚、各ケーブルの断面積のみならず、ケーブルの桁および塔における定着位置をも設計変数とし、応力度の制約条件のもとで総コストを最小化する最適設計法について述べ、固定荷重を受ける4段ケーブルおよび6段ケーブルを有する斜張橋に適用した例および検討結果を示した。この研究において得られた結論の主なものは次のとおりである。

- ① 本論文で提案した方法により、固定荷重を受ける実橋規模の斜張橋のケーブルの定着位置と断面積、桁および塔要素の板厚の最適解を10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。
- ② 固定荷重を受ける斜張橋の最適設計を行う場合には、ケーブルの塔および桁への定着位置を設計変数として考慮することがきわめて重要である。ケーブル定着位置を設計変数として考慮した場合には、主桁の曲げモーメント、軸力およびケーブル張力の分布が全体的に平均化され、定着位置を設計変数として考慮しない場合と比較して桁の最大曲げモーメントおよび軸力が大きく減少し、本研究の計算例において総コストが11~29%減少しており、その重要性を理解することができる。
- ③ ケーブル配置および桁・塔要素剛性の最適な配分の状態では、ケーブルは必ずしも全応力状態にはなっていない。さらに、端支点には大きな断面のケーブルが集中して配置されている。

なお、本研究では固定荷重を受ける斜張橋の最適設計問題について述べたが、固定荷重のみならず移動荷重も載荷する場合の最適化問題、設計変数として桁高をも考慮した場合等については今後検討を進めていく予定である。

参 考 文 献

1. Fleury, C. and Braibant, V.: Structural optimization; a new dual method using mixed Variables, Int. J. for Num. Meth. in Engng., Vol.23, pp.409-428, 1986.
2. Fleury, C. and schmit, L.A.: Dual Methods and approximation concepts in structural synthesis, NASA. CR-3226, 1980.
3. Ohkubo, S. et.al.: Total optimization of truss considering shape, material and sizing variables, COMPUTER UTILIZATION IN STRUCTURAL ENGINEERING, ASCE, pp.247-256, 1989.
4. 山田善一・大宮司尚: 斜張橋の最適基準設計に関する研究, 土木学会論文集, 第253号, pp.1-12, 1976年9月.
5. 前田幸雄・林 正・靱 一: 斜張橋の最適設計法, 日本鋼構造協会第13回大会研究集会マトリックス解析法研究発表論文集, pp.321-326, 1979年.
6. 小林一郎・三池亮次・佐々木高・大塚久哲: 主桁支持方式の異なる斜張橋の多段階最適設計, 土木学会論文集, 第392号/I-9, 1988年4月.
7. 長井正嗣・赤尾宏・佐野信一郎・井澤衛: 3径間連続マルチケーブル斜張橋の基本形状決定に関する一考察, 土木学会論文集, 第362号/I-4, 1985年10月.

