

論文・報告

鋼斜張橋の最適化手法に基づく 自動設計支援システムの開発

Development of Automatic Design System by Optimum
Techniques for Steel Cable-Stayed Bridges

藤 江 和 久*
Kazuhisa FUJIE

山 野 長 弘**
Nagahiro YAMANO

菅 野 晃 生**
Akio SUGANO

As the cable-stayed bridge is high-order statistically indeterminate structure, its mechanical behavior is strongly influenced by the stiffness and size of the members, and the amount of prestresses applied to cables. And therefore, when making a fundamental plan or designing the bridge rationally, a design system will be helpful, in which its design variables are determinable so that they might keep a balance in the view of its economy and beauty. From this point of view, an optimal automatic design system for cable-stayed bridges has been successfully developed considering various kind of constraints. In this optimum design system, at the first stage of optimization process, the height of the tower and the cable anchor positions are considered as design variables, and simultaneously optimized in relation to the structural system. Further, virtual loads are applied in the direction of the cables on the basis of member dimension so as to find out the objective function and the coefficient of sensitivity. Thus, the linear programming algorithm has enabled to calculate the optimal amount of cable prestresses and the sectional sizes.

Keywords : Cable-Stayed bridge, cable anchor position, cable prestress, sectional size

1. まえがき

斜張橋の経済設計の観点に立った最適設計法に関する研究においては、従来、塔の高さおよびケーブルの主桁、塔への定着位置を固定した条件下で、完成時の連続梁系における応力度に関する制約条件を考慮して、主桁の曲げモーメント分布を均等化し、さらに、その絶対値を最小化する目的で各ケーブルに導入する最適なプレストレス量を決定することに主眼がおかれていた^{1)~3)}。

しかしながら、斜張橋は高次の不静定構造物であるため、その力学的挙動はスパン割、塔の高さ、ケーブルの主桁および塔への定着位置、主桁・塔・ケーブルの部材剛性、ケーブルプレストレス量など、設計において決定すべきパラメータに大きく影響を受ける。また、経済性や美観等も上記の設計パラメータに大きく依存しており、斜張橋の基本的な計画および設計を合理的に行うためには、力学的特性、美観、施工性、経済性などを総合的に考え、これらの設計パラメータをバランスよく決定することがきわめて重要な問題である。

このような観点から、本設計システムは主桁、塔、ケーブルの断面寸法およびケーブルプレストレス量のみならず、塔の高さおよびケーブルの主桁と塔への定着位置をも理論的に厳密かつ自動的に決定できるよう開発を行

ったものである^{4)~9)}。さらに、これらの設計変数が実用上問題なく求められるように、架設閉合時および供用時の2種類の構造-荷重系における各構造要素の応力度を考慮することができるとともに、道路橋示方書¹⁰⁾に規定する主桁、塔およびケーブルの応力度に関する各種の制約条件をも考慮している。

本設計支援システムでは、次の2段階の最適化過程により最適な設計変数の値を決定している。すなわち、まず、第1段階の最適化では、各部材要素の断面寸法、ケーブル配置および塔高に着目し、原設計変数および逆変数を混用した凸近似法と双対法を用いて総製作費を最小とする設計変数の値を決定している。次に、ケーブルに導入すべき最適なプレストレス量を決定したい場合には、第2段階の最適化として、実荷重に加えてさらにケーブルの軸線方向に任意の独立した単位仮想荷重を載荷し、目的関数（総製作費）および各構造要素の応力度に関する制約条件の感度係数を求め、LPの手法を用いて各ケーブルに作用させる最適な仮想荷重、各部材要素の断面寸法を決定している。このときケーブル部材の最適なプレストレス量は、各ケーブルに作用させる仮想荷重によって生じるケーブル軸力として求められる。

本文では、8段ケーブルを有する実橋規模のファン型3径間連続鋼斜張橋モデルに本設計支援システムを適用

*川田テクノシステム株開発部開発一課係長 **川田テクノシステム株開発部開発一課

した場合の設計例、および本システムによって求められた最適な構造寸法を美観等を考慮して変更した場合の設計例を示し、本設計支援システムの特徴である2段階の最適化によって、鋼斜張橋のケーブルプレストレス量、構造および断面寸法を合理的に決定することができることを示すとともに、本設計支援システムが実際の鋼斜張橋の設計に有効に利用できることを示す。

2. 鋼斜張橋の最適設計問題の定式化

(1) 鋼斜張橋の設計変数

本設計システムでは、鋼斜張橋の支間長、ケーブルの初期本数、および主桁、塔、ケーブルの各要素に使用する鋼種は与えられているものとする。また、主桁、塔要素の断面形状は、それぞれ図-1の(a), (b)に示す箱型断面を考え、これらの断面において、断面の高さおよび上・下フランジ幅は一定値と仮定する。断面寸法に関する設計変数としては、主桁、塔の各要素の補剛リブを考慮した上・下フランジの換算板厚 (t_{gu} , t_{gl}), (t_{tu} , t_{tl}) およびケーブルの断面積 A_c を考慮し、これらの断面寸法に関する設計変数を Z と表現することとすれば、

ここに、 $n = n_g + n_t + n_c$ (n_g , n_t , n_c はそれぞれ主桁, 塔およびケーブルの要素の数である)。また、主桁と塔の腹板の板厚 $t_w = [t_{gw}^T, t_{tw}^T]^T$ は、各要素のせん断応力度, 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ることにしている。

次に、ケーブル配置、塔高に関する設計変数として、図-2に示すように、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 を考慮する。

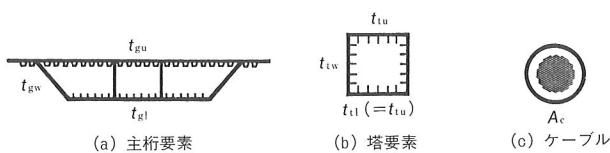


図-1 断面寸法に関する設計変数Z

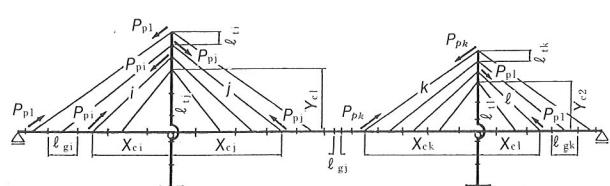


図-2 ケーブル配置, 塔高, ケーブルプレストレスに関する
設計変数 X_c , Y_c , P_c

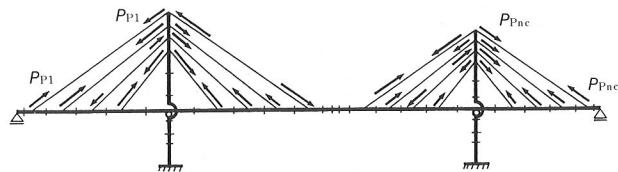


図-3 ケーブルプレストレスの計算

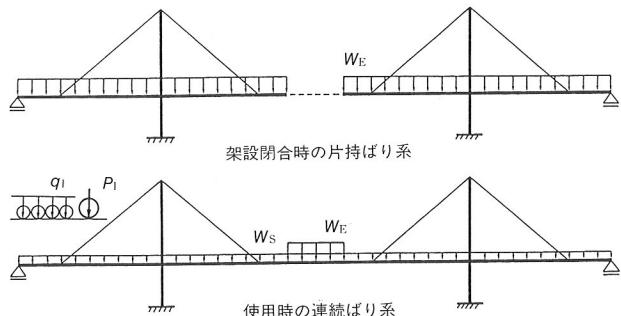


図-4 架設閉合時、供用時の構造-荷重系

ここに、 K 、 L はそれぞれ X_c 、 Y_c の変数の数である。また、ケーブルプレストレスに関する設計変数としては、図-3に示す各ケーブルの軸線方向の仮想荷重 P_p を考慮している。

なお、各ケーブルに導入すべき最適なプレストレス量 P_s は、各ケーブルに最適な仮想荷重 P_p^* を載荷することにより生ずるケーブル軸力 N_c^* と P_p^* を用いて、次式より算定することができる。

(2) 制約条件

本設計支援システムでは最適化の過程において、次に示す道路橋示方書に規定されている応力度の制約条件を考慮している。

- ① 主桁要素のフランジの縁応力度
: $g\sigma_g(Z, X_c, Y_c, P_p)$
 - ② 塔要素のフランジの縁圧縮応力度
: $g\sigma_{t1}(Z, X_c, Y_c, P_p)$
 - ③ 塔要素の局部座屈 : $g\sigma_{t2}(Z, X_c, Y_c, P_p)$
 - ④ ケーブル要素の引張応力度
: $g\sigma_c(Z, X_c, Y_c, P_p)$
 - ⑤ 塔要素の細長比 : $g_1(Z, Y_c)$
 - ⑥ 設計変数の上・下限値

$$\therefore Z^{(L)} \leq Z \leq Z^{(U)}, \quad X_{\circ}^{(L)} \leq X_{\circ} \leq X_{\circ}^{(U)},$$

$$Y_{\circ}^{(L)} \leq Y_{\circ} \leq Y_{\circ}^{(U)}, \quad P_n^{(L)} \leq P_n \leq P_n^{(U)}$$

また、主桁、塔、ケーブルの各要素に作用する応力度として、図-4に示す架設閉合時の片持梁系および供用時の連続梁系の2種類の構造-荷重系における応力度を考慮している。各主桁要素におけるフランジおよび腹板の応力度の検討点は、図-5(a)に示すようにケーブル定着

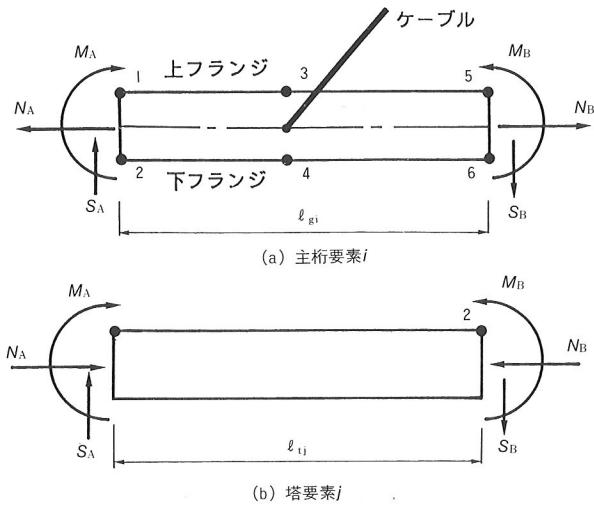


図-5 応力度の検討点

点とケーブル定着点間の中点の上・下縁 6 点を考慮し、また塔要素では、図-5 (b) に示すように要素の両端点の 2 点で応力度の検討を行っている。このとき、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、フランジの有効幅などは道路橋示方書に従って算定している。また、各構造要素の応力度の検討点における活荷重による応力度の最大・最小値は、影響線解析により軸力・曲げモーメント・せん断力の最大値あるいは最小値を与える 6 種類の載荷状態の応力度を算定し、これらを比較検討することにより決定している。

このようにして、主桁および塔の各要素の応力度検討点における最も支配的な応力状態が決定されると、主桁、塔に関する制約条件のなかで、最も厳しい条件に対して安全となるように各要素の板厚が決定される。

(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 , P_p を決定する設計問題を次のように定式化する。

$$\begin{aligned}
 & \text{設計変数: } Z, X_c, Y_c, P_p \\
 & \text{目的関数: } TCOST(Z, X_c, Y_c, P_p) \\
 & = \sum W_i \cdot A_i(Z_i) + \sum T_{pk} \cdot P_{pk} \\
 & \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \min \\
 & (i=1, \dots, n), (k=1, \dots, n_c)
 \end{aligned}$$

$$\text{制約条件: } g_j(Z, X_c, Y_c, P_p) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, m)$$

ここに, $g = [g\sigma_g^T, g\sigma_{t1}^T, g\sigma_{t2}^T, g\sigma_c^T, g_1^T]^T$, $W_i = \rho_i \cdot L_i$, ρ_i は各要素の単位体積当たりの製作費, L_i は部材長, A_i は部材の断面積, T_{pk} は仮想荷重 P_{pk} の単位量載荷に要する費用, m は制約条件の数を表わす。また, 添え字中の(U), (L)は設計変数の上・下限値を表わす。

3. 2段階最適化による Z , X_c , Y_c , P_p の決定法

2章で述べた設計変数および制約条件を考慮して鋼斜張橋の最小製作費を与える設計問題を解く場合、実際にケーブルプレストレスを導入するためのコストはほとんどゼロであり、また P_p は荷重であるので Z , X_c , Y_c とともに P_p をも設計変数として考慮し最適解を求める場合には、 P_p に関する感度係数が不定となり、最適解を決定することが不可能となる。 P_p の最適値は P_p なしの場合の最適解に対し、 P_p を付加した場合どのような影響を与えるかを正確に評価することにより初めて決定することができます。

そこで本設計支援システムでは、鋼斜張橋をまず P_p なしの状態で最適化し、その最適化された構造諸元を有する構造系の任意のケーブル i に図-6 に示す単位仮想荷重 ΔP_{pi} を単独に付加し、これによる目的関数、制約条件、断面寸法の変化量を求めることにより単位仮想荷重に関するこれらの感度係数を計算し、LP の手法を用いて最適な P_p を決定することとした。したがって、各ケーブルに作用させる最適な仮想荷重 P_p 、すなわち、最適なケーブルプレストレスを決定するためのアルゴリズムは、次の 2段階の最適化問題を解くことにより決定できる。

(1) 第1段階最適設計問題の定式化

まず、 Z , X_c , Y_c のみを設計変数として次の最適化問題を解くことにより、ケーブルプレストレスを考慮しない場合の最適なケーブル配置 X_c^* , 塔高 Y_c^* , 各部材要素の断面寸法 Z^* を決定する。

$$\begin{aligned}
 & \text{設計變數: } Z, X_c, Y_c \\
 & \text{目的函數: } TCOST(Z, X_c, Y_c) \\
 & \quad = \sum W_i \cdot A_i(Z) \longrightarrow \min \\
 & \quad (i = 1, \dots, n), \\
 & \text{制約條件: } g_j(Z, X_c, Y_c) \leq 0 \\
 & \quad (j = 1, \dots, m) \\
 & \left. \begin{array}{l} Z^{(L)} \leq Z \leq Z^{(U)} \\ X_c^{(L)} \leq X_c \leq X_c^{(U)} \\ Y_c^{(L)} \leq Y_c \leq Y_c^{(U)} \end{array} \right\} \dots \dots \dots
 \end{aligned}$$

上式によって定式化した第1段階最適設計問題の解法として本設計システムでは、原設計問題を原変数あるいはその逆数を求ることにより最適解を決定している。

(2) P_p に対する目的関数、各構造要素の応力度および各部材断面寸法の感度係数の計算

仮想荷重 P_p の最適解を決定する過程において必要となる $\Delta \overline{P_{pi}}$ に対する目的関数、各構造要素の応力度および断面寸法の感度係数は、次のようにして求める。すなわち、 X_c, Y_c を(1)節で得られた X_c^*, Y_c^* に固定し、図-6 に示すように実荷重に加えて、さらに任意のケーブルの軸線方向に単独に単位仮想荷重 $\Delta \overline{P_{pi}}$ を載荷した場合の最適設計問題を、(1)節で述べた解法を用いて Z について解く。

設計變數： Z ($\Delta \overline{P_{ni}}$)

表-1 主桁・塔・ケーブル要素の設計条件

要素番号	1) E (kg/cm ²)	2) ρ (万t/m ³)	3) σ_{ta}	4) τ_a	5) B_{ew} ℓ_1 (m)	6) B_{er} ℓ_2 (m)	7) t_u^e (mm)	8) t_e^e (mm)	9) t_u^e (mm)	10) t_e^e (mm)	11) t_w^e (mm)
g ₁ ~g ₈	2.1×10 ⁶	500	1 400	800	30.00	15.00					
g ₉					29.60	15.00					
g ₁₀					28.80	14.90	18.5	15.5			
g ₁₁					29.60	15.00					
g ₁₂ ~g ₂₀					30.00	15.00					
T ₁ ~T ₇	2.1×10 ⁶	700	1 900	1 100	3.0	3.0	26.0	26.0	26.0		
T ₈ ~T ₁₀			2 600	1 500	(Y _c +1)	(Y _c +1)	28.0	28.0	32.0		
T ₁₁ ~T ₁₃			2 600	1 500	98.0	39.2	28.0	28.0	32.0		
C ₁ ~C ₁₆	2.0×10 ⁶	900	5 100	—	—	—	A _c ^e =0.00001(m ³)				

1) 弹性係数 2) 単位体積当たりの製作費

3) 許容引張応力度(kg/cm²) 4) 許容せん断応力度(kg/cm²)

5) 主桁の上フランジ有効幅 6) 塔の橋軸方向有効座屈長

7) 主桁の下フランジ有効幅 8) 塔の橋軸直角方向有効座屈長

9) 補剛しているリブの断面積をも含めた上フランジの最小板厚

10) 補剛しているリブの断面積をも含めた下フランジの最小板厚

11) 補剛しているリブの断面積をも含めた腹板の最小板厚

表-2 架設閉合時および供用時の荷重強度

架設 合 設時	死荷重	主桁 ¹⁾	4.0 tf/m
		塔 ¹⁾	2.0 tf/m
		鋼重	7.85 tf/m ³
使用 時	死荷重	主桁 ²⁾	3.4 tf/m
	等分布活荷重		2.25 tf/m
	線活荷重		54.1 tf
	衝撃係数		0.11

1) 主桁および主塔断面以外の死荷重
(ケーブル定着部の重量など)

2) アスファルト舗装などの死荷重

表-3 設計係数を変化させた場合の最適解の比較

ケース	A			B			C			D			E			
設計変数	Z			Z, X _c , Y _c			Z, P _p			Z			Z, P _p			
荷重	実荷重のみ			実荷重のみ			実荷重+仮想荷重			実荷重+仮想荷重			実荷重+仮想荷重			
最適化過程	第1段階			第1段階			第2段階			第1段階			第2段階			
変数	X _c ⁰ , Y _c ⁰ (m)	A _c (cm ²)	$\sigma/\sigma_a^{(2)}$	X _c ⁰ , Y _c ⁰ (m)	A _c (cm ²)	$\sigma/\sigma_a^{(2)}$	A _c (cm ²)	P _p (tf)	$\sigma/\sigma_a^{(2)}$	X _c , Y _c (m)	A _c (cm ²)	$\sigma/\sigma_a^{(2)}$	A _c (cm ²)	P _p (tf)	P _s (tf) ⁽¹⁾	$\sigma/\sigma_a^{(2)}$
C ₁	140.00	483	1.00	149.00	432	1.00	508	982.8	1.00	149.00	496	1.00	527	743.8	46.34	1.00
C ₂	124.00	50	0.92	143.27	111	0.97	40	79.3	1.00	118.59	142	1.00	79	98.8	-28.27	0.96
C ₃	108.00	16	0.96	115.48	47	1.00	23	38.5	1.00	91.92	90	1.00	165	302.6	-23.13	1.00
C ₄	92.00	39	0.99	103.66	141	1.00	163	273.1	1.00	68.52	126	0.84	66	166.9	15.44	1.00
C ₅	76.00	49	0.95	73.64	96	0.94	89	170.1	1.00	48.00	157	0.62	128	425.7	140.37	1.00
C ₆	60.00	110	0.80	53.18	126	0.74	96	259.4	1.00	30.00	51	0.34	9	2.9	-10.70	0.27
C ₇	44.00	96	0.58	36.16	116	0.47	78	285.2	1.00	—	—	—	—	—	—	—
C ₈	28.00	9	0.30	16.45	0 ⁽³⁾	0.08	0 ⁽³⁾	0.0	0.03	—	—	—	—	—	—	—
C ₉	28.00	8	0.35	13.30	0 ⁽³⁾	0.06	0 ⁽³⁾	0.0	0.00	—	—	—	—	—	—	—
C ₁₀	48.00	93	0.68	28.01	58	0.37	20	80.5	1.00	—	—	—	—	—	—	—
C ₁₁	68.00	102	0.86	43.63	109	0.64	100	300.4	1.00	30.00	63	0.38	34	105.9	84.79	1.00
C ₁₂	68.00	66	0.97	59.43	84	0.83	70	143.1	1.00	50.00	154	0.68	120	203.1	101.85	1.00
C ₁₃	108.00	101	1.00	80.76	82	0.96	78	80.3	1.00	73.60	107	0.90	92	39.5	-18.40	1.00
C ₁₄	128.00	75	1.00	103.45	140	1.00	170	55.2	1.00	101.45	144	1.00	148	-13.7	-76.32	0.99
C ₁₅	148.53	70	0.99	133.66	227	1.00	175	-46.0	1.00	134.31	241	1.00	190	42.5	-45.22	1.00
C ₁₆	168.00	289	1.00	172.67	328	1.00	350	-123.8	1.00	173.11	323	1.00	369	263.4	90.77	1.00
Y _c	85.00	—	—	56.90	—	—	—	—	—	62.00	—	—	—	—	—	—
ITE ⁽⁴⁾	6			19			10			6			13			
TCOST (YEN)	707 234.3×10 ⁴ (1.085) ⁽⁵⁾			651 918.9×10 ⁴ (1.000) ⁽⁵⁾			635 109.9×10 ⁴ (0.974) ⁽⁵⁾			651 026.5 (0.999) ⁽⁵⁾			634 301.2 (0.973) ⁽⁵⁾			

1) ケーブルプレストレス量 2) 許容応力度に対する実応力度の比 3) 最小断面積 4) 最適解を得るまでの反復改良回数

5) ケースBの総製作費に対する比

Zのみ考慮した場合に比べ、Zの他にX_c, Y_cをも考慮した場合の方が、中間支点上の曲げモーメントが18%程度減少している。また、主塔曲げモーメントの絶対値についても、後者の方が10%~30%程度減少している。

以上の結果、ZのみならずX_c, Y_cをも設計変数として考慮した場合の最小製作費は前者に比べ8%程度減少しており、鋼斜張橋の製作費を最小とする設計問題においては、X_c, Y_cをも設計変数として考慮することがきわめ

て重要であると思われる。

(2) Z, P_pを考慮した場合の最適解

(1)節で述べた設計例BにおけるX_cとY_cの最適値を固定しZ, P_pを設計変数として第2段階の最適化を行った結果を表-3のCに示す。また、主桁の最大・最小曲げモーメント、最大・最小軸力および上・下フランジ板厚の分布を図-8に、塔の断面積、最大・最小曲げモーメント、最大・最小軸力の分布を図-9に、それぞれ実線で示す。

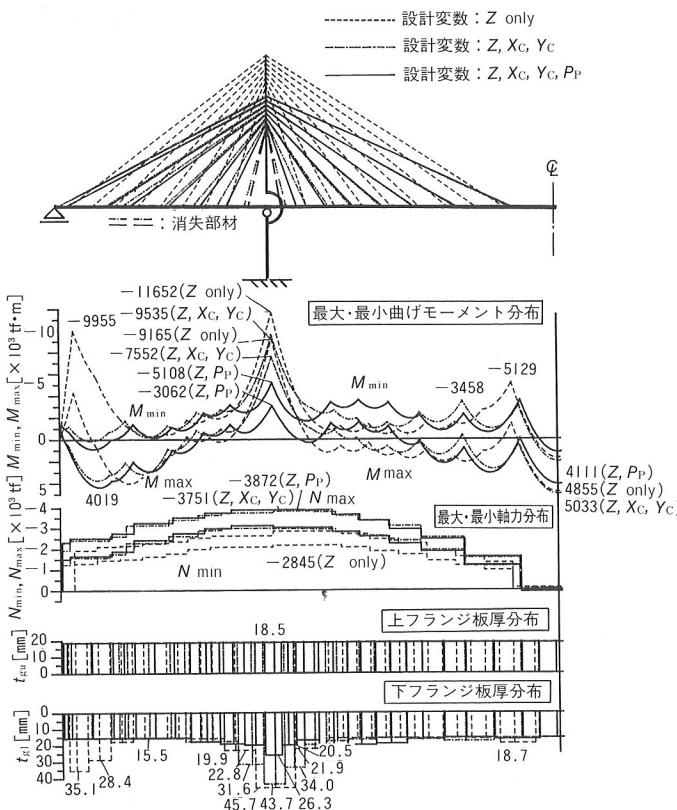


図-8 最適ケーブル配置、主桁の最大・最小曲げモーメント、軸力分布およびフランジ板厚の比較

主桁曲げモーメントに着目すると、Bの場合と比較して中間支点上の曲げモーメントは50%程度減少しており、主桁全長にわたってほぼ完全に平均化され、かつその絶対値も最小化されている。また、塔の曲げモーメントも全体にわたって大きく減少している。一方、ケーブルに着目すれば、Bの場合は各ケーブル応力度の許容応力度に対する余裕値にばらつきがみられたが、Cの場合には全てのケーブルについて、有効に張力が導入された結果となる。

以上の結果、Cの場合の最小製作費はBに対して3%弱減少した。

(3) 美観等を考慮し X_c , Y_c を修正した場合

表-3に示す設計例では、力学的な観点から最適な設計変数値を求めたが、ここでは、より実際的な設計をする立場から、美観等の観点からも検討を加え、ケーブルの定着点および本数を上述の最適値より多少変更した場合の最適設計例について述べる。

図-10および表-3に示すDは、設計例BおよびCにおける最適な設計変数の値を参考にし美観等を考慮してケーブル本数を6本、 Y_c を62.0 m、主桁のケーブル定着点の間隔を側径間側で1:1.14の等比級数で、中央径間側で1:1.18の等比級数で配置し、最適な X_c , Y_c とほぼ等しくなるようにした設計モデルである。この設計モデルを、 Z のみを設計変数として最適化した結果を表-3のDに、

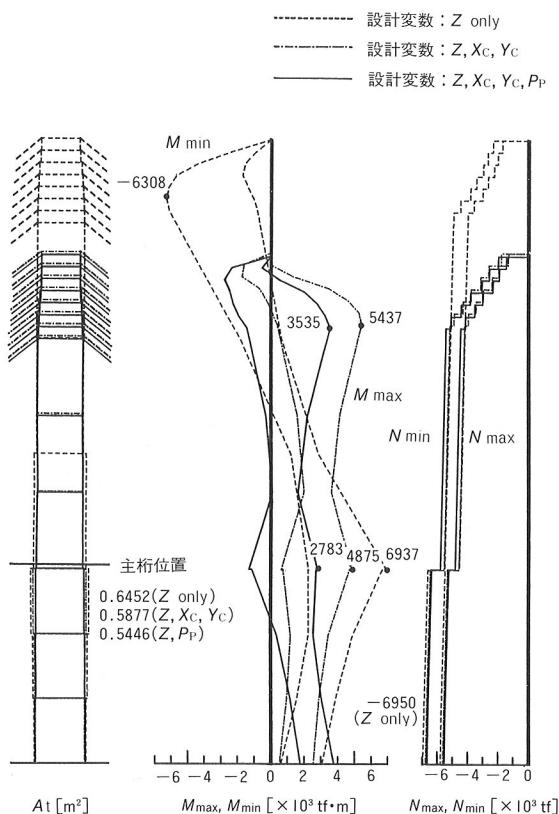


図-9 塔の断面積、最大・最小曲げモーメントおよび軸力分布の比較

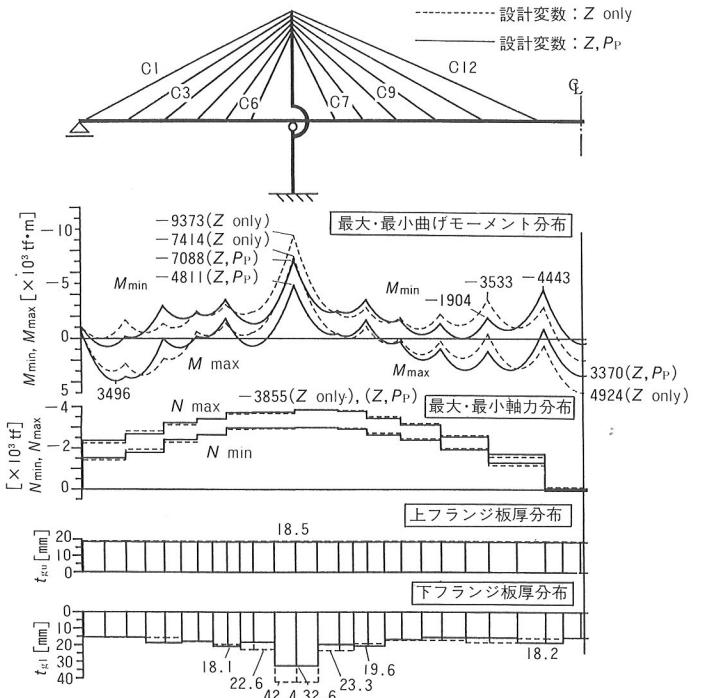


図-10 美観等を考慮して X_c , Y_c を修正し、設計変数として Z のみ、および Z , P_p を考慮した場合の M_{\max} , M_{\min} , N_{\max} , N_{\min} , t_{gu} , t_{gl} の比較

また最適解における主桁断面力分布を図-10に点線で示す。この例では、最小製作費や断面力の分布状態もBの設計例とほぼ等しくなっている。

次に、 Z のみならず P_p をも設計変数として考慮した場合の最適化した結果を表-3のEに、主桁断面力の分布を図-10に実線で示す。このとき主桁曲げモーメントの最大・最小値の分布はCの場合と比較して中間支点上では40%程度大きくなっているが、支間中央における正の最大曲げモーメントが20%程度小さくなっている結果として、最小製作費はDと比較して0.17%増加しているにすぎない。この例のように、理論的に最適な X_c , Y_c を基本として、美観等を考慮したうえで最適解から多少変更して構造寸法を設定しても、 Z , P_p を最適化することにより、最適解として求めた最小製作費とほとんど変わらないような鋼斜張橋の設計を行うことができる。

5. あとがき

以上のことから、次のようなことがいえる。

- ① 本設計システムで取り扱える設計変数は、斜張橋設計時にきわめて重要なパラメータとなる断面寸法、ケーブル配置、塔高およびケーブルプレストレスであり、これらの設計変数群を自由に組み合わせることによって設計者の意図する設計が可能となり、汎用性・実用性に富んでいる。
 - ② 本設計システムでは、2段階の最適化により、構造系に着目した最適化とケーブルプレストレスに着目した最適化が可能である。また、第1段階の最適化により得られた断面寸法、ケーブル配置、塔高を参照し、美観や製作・架設等も考慮し、最適解より多少変更した構造諸元に対しても、最適なプレストレス量を確実に決定することができる。
 - ③ 主桁の曲げモーメント分布については、上述の設計変数を考慮することにより中間支点上の負の曲げモーメントを大きく減少させることができるとともに、曲げモーメント分布を主桁全体にわたって均等化し、かつ、その絶対値も最小化することができる。この結果、主桁の上・下フランジの板厚の分布も、ほぼ一様とすることができます。
- 本設計支援システムでは、道路橋示方書の規定を制約条件として応力度の計算を行っており、最初に構造モデルの初期値と設計変数を与えておけば、活荷重の処理や断面計算はシステムの流れとして一連の処理を自動的に実行することができる。なお、本設計システムではケーブル配置と初期断面寸法を固定とした条件で、各部材の応力度を小さくするようなケーブルプレストレス量のみを決定することも可能である。

本設計システムを平面・立体骨組の有限変位解析プログラムを中心とする吊橋の設計支援システム¹¹⁾と機能させることにより、鋼斜張橋設計支援システムとして計画設計の段階から詳細設計にいたるまで幅広く適用可能

設計支援システムであると思われる。

なお末筆ながら、本設計システムの開発にあたっては、愛媛大学・大久保禎二教授、谷脇一弘助手には、多大なご指導と貴重なご助言をいただいたことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山田善一・古川浩平・江草拓・井上幸一：斜張橋ケーブルの最適プレストレス量に関する研究、土木学会論文集、第356号、1985年4月。
- 2) 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、1985年10月。
- 3) 星埜正明：斜張橋のケーブルプレストレスの一計算法、土木学会論文集、第374号、1986年10月。
- 4) 大久保禎二・谷脇一弘：鋼斜張橋のケーブル配置および部材断面の最適設計法、土木学会論文集、第428号、1991年4月。
- 5) Ohkubo, S., Taniwaki, K.: Shape and sizing optimization of steel cable-stayed bridges, IN *Optimization of Structural Systems and Industrial Applications*, Elsevier Applied Science, London, New York, 1991.
- 6) 大久保禎二・谷脇一弘・山野長弘：鋼斜張橋の最適ケーブルプレストレスの決定法、第二回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、1991年11月。
- 7) Ohkubo, S., Taniwaki, K. and Yamano, N.: Optimum design system for steel cable-stayed bridges dealing with shape, sizing variables and cable pre-stresses, *Microcomputers in Civil Engineering*, Elsevier Science publishers Ltd., 1992.
- 8) Ohkubo, S., Taniwaki, K. and Yamano, N.: Optimum design system for steel cable-stayed bridges dealing with shape, sizing variables and cable pre-stresses, *STRUCTURAL OPTIMIZATION*, Proceedings of the Korea-Japan Joint Seminar had in Seoul, Korea, May 1992.
- 9) Ohkubo, S., Taniwaki, K. and Yamano, N.: Development of computer aided optimum design system for steel cable-stayed bridges, *Proceedings of EPMESC IV*, Dolian, China, July 1992.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説II鋼橋編、丸善、1980年2月。
- 11) 林 正・前田研一・増井由春・内海 靖・山野長弘：長径間吊橋の立体有限変位解析、構造工学論文集、Vol. 37A, 1991.