

鋼斜張橋の最適設計システムについて

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

川田テクノシステム(株) 正会員 山野 長弘

1. まえがき

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・塔への定着位置、ケーブルのプレストレス量、ケーブル、主桁および塔の部材剛性の配分などの設計上考慮すべきパラメータの値により大きく影響を受け、その理論的に厳密な最適値を決定するためには数理計画法などの手法を利用することがぜひ必要となる。また、経済性や美観等も上記の設計パラメータの値に大きく依存しており、合理的な斜張橋の計画および設計を行うためには、力学的特徴、施工性、経済性などを総合的に考慮して、これらの多くの設計パラメータをバランスよく決定できる設計システムを確立する必要がある。ここでは、このような観点に立って開発してきた鋼斜張橋の最適設計システムについて述べるものである。

2. 鋼斜張橋の最適設計システムの概要

(1)設計変数 本研究で開発した最適設計システムでは、設計上決定すべきパラメータ（設計変数）のうち主桁および塔の各要素の鋼板厚、各ケーブルの断面積、各ケーブルの主桁における定着位置および塔の高さを設計変数として取り扱い、その最適値を決定することができる。また、ケーブル断面積の下限制約値をきわめて小さく設定することにより、最適化の過程において不要となるケーブルの断面積を 0 cm^2 とすることができ、最適なケーブル本数をも決定することができる。さらに、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、任意のケーブルの軸線方向に仮想荷重を設計変数として考慮することにより決定することができる。また設計変数として取り扱っていない桁高、塔断面の幅および支間割に関するパラメータの最適値は、これらのパラメータの値を離散的に種々変化させた場合の最適解を比較することにより決定することができる。

(2)制約条件 制約条件としては、現在のところ道路橋示方書に規定されている主桁、塔およびケーブルの応力度の制約条件および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考慮しているが、設計上のいかなる制約条件をも付加することができる。また、張り出し架設が行われる長大斜張橋では、架設閉合時の片持ばり系(死荷重載荷状態)および使用時の連続ばり系(死荷重の一部および活荷重の載荷状態)の実際の施工計画に合わせた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部材力を用いて応力度の計算を行うことができる。

(3)目的関数 目的関数としては鋼斜張橋の総製作費を考え、これを最小とするように上記の設計変数を決定しているが、最小重量など設計者の希望する任意の目的関数を取り扱うことが可能である。

(4)最適化の方法 本最適設計システムでは、上記の設計変数を二段階の最適化過程により最適化している。まず第一段階の最適化では、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および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。つぎに、ケーブルに導入すべき最適なプレストレスを決定したい場合には、第二段階の最適化として、実荷重に加えてさらに任意のケーブルの軸線方向に独立の単位仮想荷重を載荷した場合の最適解を求めることにより目的関数(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sensitivities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および各部材要素の断面寸法を決定している。各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り各ケーブルに作用する軸力として求められる。

3. 最適設計プロセス

上で述べた最適設計システムを用いた鋼斜張橋の標準的な最適設計プロセスは次の通りである。

- ① 支間割、桁高およびケーブル本数を仮定するとともに、設計上固定すべき設計パラメータを設定する。
- ② 第一段階の最適化により最適な部材要素の断面寸法、ケーブル配置、塔高およびケーブル本数を決定する。
- ③ 支間割および桁高を設計上可能な範囲で適当に変更して②の最適化を行い、得られた最適解を比較する

ことにより、最適な支間割および桁高を決定する。

④ ②より得られた最適なケーブル配置・塔高に基づき、設計者により経済性・美観・施工性を考慮してケーブル配置、塔高を決定する。

⑤ ケーブル配置および塔高を固定し、再度第一段階の最適化を行い、各部材要素の最適な断面寸法を決定する。

⑥ ケーブルにプレストレスを導入する場合には、第二段階の最適化により各ケーブルのプレストレス量を決定するとともに、最終的な各部材要素の断面寸法を決定する。

4. 設計例

設計例として図-1に示す死荷重および群集荷重を受ける5段ケーブルを有する3径間連続鋼斜張橋の歩道橋モデルについて、上記の方法により最終的なケーブル配置および部材要素の断面寸法を決定するプロセスについて述べる。

この設計モデルにおいて、施工性を考慮し腹板高を1m、支間割は美観等を考慮し図示のとおり決定されているものとする。また、計算に用いた主桁、塔およびケーブルの単位体積当りの製作費の比をそれぞれ1:1.33:3.33とした。また、主桁および塔の使用材種はすべてSS(SM)41とした。

この設計モデルにおいては、上記の最適設計システムを用い次の4つのSTEPにおける最適解を比較検討することにより最終的なケーブル配置および各部材要素の断面寸法を決定することができた。

STEP-1: ケーブル配置、塔高および各部材要素の断面寸法を設計変数として第一段階の最適化を行った結果、最上段および最下段ケーブルの定着位置を示す X_{C1} と X_{C10} および X_{C5} と X_{C6} の値がほぼ等しくなったことより(図-2-A)、この設計モデルにおいては左右対称のケーブル配置が望ましいことが明らかとなった。

STEP-2: STEP-1の結果より側径間と中央径間のケーブル配置を左右対称とし、主桁のダイアフラム間隔の制限等をも考慮して主桁のケーブル定着間隔を6mとして図-2-Bのごとくケーブルを配置し、再度塔高および各部材要素の断面寸法を設計変数として最適化を行った。その結果、最下断ケーブルの高さ Y_c の最適解としてSTEP-1と同じ9.5mが得られた。

STEP-3: STEP-2の結果より最適な塔高は9.5mとなるが、美観等を考慮してさらに塔を4.5m高くして最終的なケーブル配置とし、再度最適化を行い各部材要素の断面寸法の改良を行った(図-2-C)。

STEP-4: STEP-3で決定したケーブル配置について第二段階の最適化によりプレストレスをも考慮した最適解を求めた。この段階での最適解では、主桁、塔およびケーブルいずれも最小断面積となっている。最終的な総製作費はSTEP-1と比較して2.4%増加しているが、総合的な最適化の見地からSTEP-3のケーブル配置が最も望ましいと考えられる。

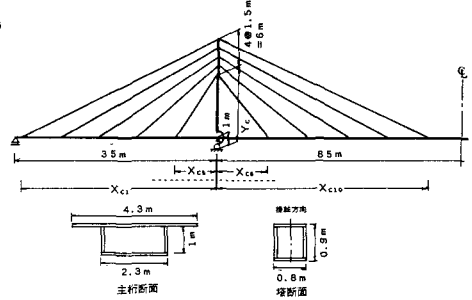


図-1 5段ケーブルを有する鋼斜張橋の設計モデル

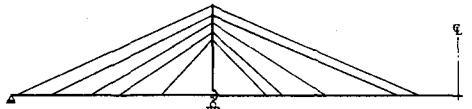


図-2-A ケーブル配置、塔高および各部材要素の断面寸法を設計変数とした最適化 (STEP-1)

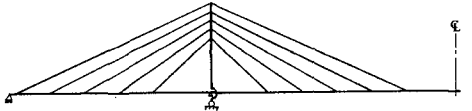


図-2-B 塔高および各部材要素の断面寸法を設計変数とした最適化 (STEP-2)

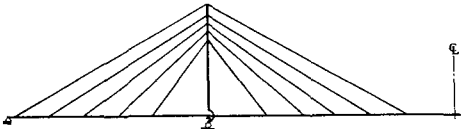


図-2-C 各部材要素の断面寸法のみを設計変数とした最適化 (STEP-3)

図-2 ケーブル配置、塔高および部材断面寸法の決定プロセス

表-1 ケーブル配置、塔高および部材断面寸法の決定プロセスにおける最適解の比較結果

変数	初期値	STEP-1	STEP-2	STEP-3	STEP-4
X_{C1}	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00
X_{C2}	27.25	28.05	28.00	28.00	28.00
X_{C3}	20.50	20.90	22.00	22.00	22.00
X_{C4}	13.75	16.53	16.00	16.00	16.00
X_{C5}	7.00	8.87	10.00	10.00	10.00
X_{C6}	9.00	9.40	10.00	10.00	10.00
X_{C7}	16.00	12.18	16.00	16.00	16.00
X_{C8}	23.00	19.81	22.00	22.00	22.00
X_{C9}	30.00	32.01	28.00	28.00	28.00
X_{C10}	37.00	35.64	34.00	34.00	34.00
Y_c	12.00	9.55	9.52	14.00	14.00
TCOSTの比*	1.000	1.002	1.033	1.024	

*) STEP-1に対する総製作費の比