

(I - 19) 外ケーブル構造システムのケーブル形状及びケーブルプレストレス力の最適化に関する研究

東洋大学*
東洋大学
SK Engineering Co.,Ltd**
東洋大学

学生員 樋口幸太郎
正会員 新延泰夫
正会員 小山幸作
学生員 青島正三

1: はじめに

外ケーブル構造は、現在の橋梁設計基準に適合しない既存橋梁に対して緊張力を与えることにより、堅固にし補強する目的を持つ。またそれと同様に新設橋に適用することで、建設費用を削減できる有益な方法でもある。

本報告は、以上のような多くの利点を持つ外ケーブル構造のケーブル形状とケーブルプレストレス力の関係、及び両者の最適化に関する研究報告を行うものである。

2: 断面力の推定方法

ケーブルプレストレス力を設計変数とする断面力の推定には感度解析を用いた。設計変数に対する変位及び断面力の感度係数は次式で与えられる。

$$\left\{ \frac{\partial v}{\partial f_{pi}} \right\} = [K]^{-1} \left\{ \frac{\partial F_p}{\partial f_{pi}} \right\} \quad \text{eq. (2.1)}$$

$$\left\{ \frac{\partial r_j}{\partial f_{pi}} \right\} = [K] \left\{ \frac{\partial v_j}{\partial f_{pi}} \right\} + \left\{ \frac{\partial F_{pj}}{\partial f_{pi}} \right\} \quad \text{eq. (2.2)}$$

[K]: 剛性マトリクス

{v}: 変位ベクトル

{F_p}: ケーブルプレストレス力の荷重ベクトル

eq. (2.1) の左辺 {∂v/∂f_{pi}} は i 部材の設計変数 f_{pi} に対する変位の感度係数を示す。また eq. (2.2) の {∂r_j/∂f_{pi}} は、j 部材の設計変数 f_{pi} に対する断面力の感度係数を示す。これらの感度係数は定数になるので、応答の推定式は eq. (2.3) で行える。

$$z_{k+1} = z_k + \sum_{i=1}^m \frac{\partial z_k}{\partial f_{pi}} \delta f_{pi} \quad \text{eq. (2.3)}$$

3: グローバル評価法による最適化

グローバル評価法（多目的線形計画法）とは、それぞれの目的関数による単一目的線形計画法を解いて得られる理想値から目的関数の相対偏差を求め、次にその結果を目的関数の係数に持つ線形計画法を解くことにより、最良な妥協解を得る方法である。

本研究では、目的関数を梁の各節点における曲げモーメントとし、制約条件には、①曲げモーメントの上限値及び下限値、②ケーブルの許容応力を採用した。

4: 解析モデルと荷重条件

形状と張力の関係を観察するために8種類のケーブル添加形状を持つ解析モデルを考案した。いずれも実験との整合性を確認するために想定した解析モデルである。そのうちの2つのモデルを、MODEL2-1とMODEL4の要素図をFIG.4-1に示す。MODEL2-1はよく見受けられるクイーンポスト形式のものであり、MODEL4は本研究の結果最も梁の曲げモーメントを減少させたモデルである。

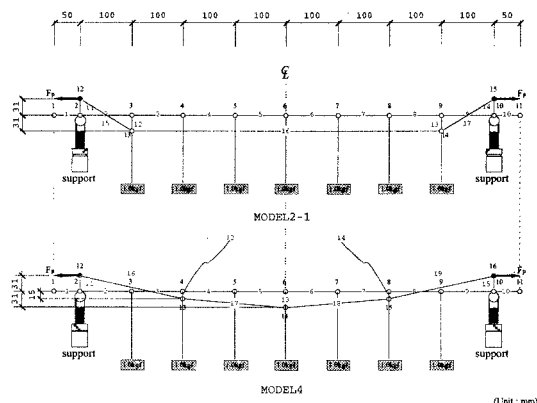


FIG.4-1 解析モデル要素図の一例

キーワード：外ケーブル、感度解析、グローバル評価法

* 東洋大学工学部 〒350-0815 埼玉県川越市鯨井2100

** 有限会社 SK エンジニアリング 〒350-0066 埼玉県川越市連雀町30 番地 4 ライオンマンション402 号

TEL : 0492-39-1391

TEL : 0492-22-9354

FAX : 0492-31-4482

FAX : 0492-24-0230

MODEL2-1とMODEL4は梁自体の断面性能および形状は同一であり、ケーブルの添加形状を変えることで、最適ケーブルプレストレス力とその採用時の構造応答の変化を観察出来るようにした。

梁に外ケーブルを添加する際には添加形状に変化を持たせる必要があるが、実験を想定した場合ケーブルの変形点における摩擦の抵抗によって張力の減少が考えられる。また小モデルにおいてケーブルの張力を正確に測定することは非常に困難である。そのため本研究ではケーブル形状の変形点にベアリングを採用し、張力の調整は分銅を使用することで実験による検証を可能にした。

荷重条件は死荷重のみを想定し、梁の各節点（節点番号3～9番）に1kgfの荷重を載荷した。（FIG.4-1参照。）

5：数値解析

以上の条件のもと、感度解析とグローバル評価法による最適ケーブルプレストレス力の決定を行った。感度解析では設計変数を外ケーブルに加えるプレストレス力とした場合の梁の曲げモーメントの感度係数を求めた。ケーブルにプレストレス力を与えた場合、梁上の各節点における曲げモーメントは $eq. (2.3)$ により節点数分の推定式が求められる。次にグローバル評価法を用い、得られた節点数分の目的関数を制約条件の下で最小化する設計変数、すなわち最適ケーブルプレストレス力を求めた。ただし実験モデルはモデルの安定性を確保するため、梁に平行して2本のケーブルを添加する。そのため感度係数をグローバル評価法で使用する際は、倍数を用いた。

グローバル評価法の制約条件には曲げモーメントの上限値・下限値を $\pm 200\text{kgf}\cdot\text{cm}$ とした。またケーブルの許容張力を $50\text{kgf}/1\text{cable}$ とした。

6：結論

TABLE6-1、TABLE6-2にMODEL2-1とMODEL4の解析値及び実験を、FIG.6-1、FIG.6-2に曲げモーメント推移図を示す。解析から得られた最適ケーブルプレストレス力はMODEL2-1が $4.68\text{kgf}/1\text{cable}$ 、MODEL4が $6.77\text{kgf}/1\text{cable}$ と推定された。これの張力を解析に導入し、また実験においては最適ケーブルプレストレス力採用時に加え、最適張力 $\pm 1\text{kgf}/\text{cable}$ の3種類の張力を採用し試験を行った。この結果2つのモデルとも最適解と実験値との整合性が得られ、本研究により推定したケーブルプレストレス力が最適であることが分かる。また形状の面から両者を比

較した場合、MODEL2-1に比べMODEL4の方が張力は若干大きくなるものの、曲げモーメントを均一かつ最小に収束させる面で優位であることを示す結果となった。本研究発表の場では以上の2形状の他に、6形状追加し比較検討を行う。

TABLE6-1：MODEL2-1 曲げモーメントの解析値及び実験値 (kgf cm)

MODEL CODE	1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4	OVER
COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS (Unit: kgf / cable)									4.68
NUMBER OF NODE	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COORDINATE OF NODAL POINT (Unit: cm)	5	15	25	35	45	55	65	75	85
INITIAL (analytical)	0.00	35.00	60.00	75.00	80.00	75.00	60.00	35.00	0.00
INITIAL (experimental)	0.00	36.15	64.50	80.80	85.76	80.80	63.79	36.15	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS (analytical)	0.00	-23.00	2.00	17.00	22.00	17.00	2.00	-23.00	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS (experimental)	0.00	-24.81	2.13	17.72	24.10	18.43	0.71	-24.81	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS -1 kgf (experimental)	0.00	-11.34	14.88	31.19	37.56	32.60	14.18	-11.34	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS +1 kgf (experimental)	0.00	-37.56	-10.63	4.96	10.63	5.67	-12.05	-36.86	0.00

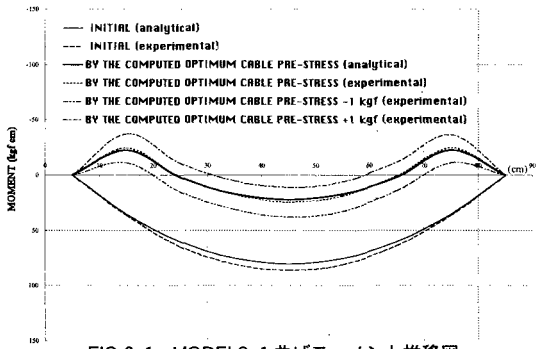


FIG.6-1：MODEL2-1 曲げモーメント推移図

TABLE6-2：MODEL4 曲げモーメントの解析値及び実験値 (kgf cm)

MODEL CODE	1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4	OVER
COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS (Unit: kgf / cable)									6.77
NUMBER OF NODE	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COORDINATE OF NODAL POINT (Unit: cm)	5	15	25	35	45	55	65	75	85
INITIAL (analytical)	0.00	35.00	60.00	75.00	80.00	75.00	60.00	35.00	0.00
INITIAL (experimental)	0.00	37.56	65.21	82.22	85.76	80.80	63.79	37.56	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS (analytical)	0.00	3.84	-2.32	1.84	-4.00	1.84	-2.32	3.84	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS (experimental)	0.00	4.25	-2.13	2.13	-3.54	2.13	-3.54	3.54	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS -1 kgf (experimental)	0.00	8.51	7.09	12.76	8.51	13.47	6.38	8.51	0.00
BY THE COMPUTED OPTIMUM CABLE PRE-STRESS +1 kgf (experimental)	0.00	-1.42	-12.05	-9.92	-17.72	-9.21	-13.47	-1.42	0.00

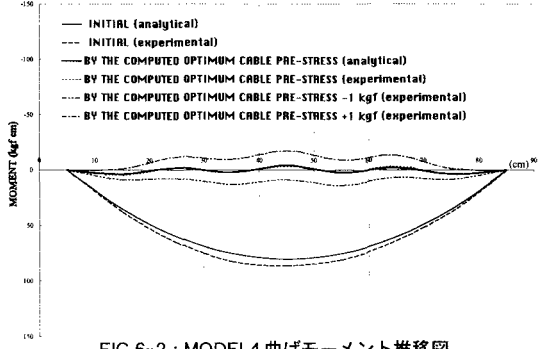


FIG.6-2：MODEL4 曲げモーメント推移図

<参考文献>
1) 樋口幸太郎、青島正三「斜張橋の最適ケーブルプレストレス力の決定法に関する研究」東洋大学学士論文
2) M. S. TROITSKY「PRESTRESSED STEEL BRIDGES Theory and Design」