

(VI-13) 外ケーブル構造システムのケーブル形状および 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* 学生員 齊藤智和
東洋大学* 正会員 新延泰生
SK Engineering Co.,Ltd** 正会員 小山幸作
東洋大学* 学生員 樋口幸太郎

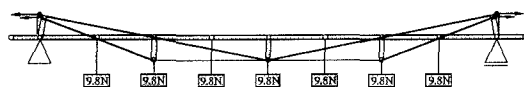
1. はじめに

外ケーブル構造とは、橋梁の主桁の外側に複数のケーブルを配置し、プレストレス力を与えることにより剛性を向上させる工法である。この工法は、ケーブル定着部の局所的な施工で済むことやケーブルの損傷度合いの確認および取り換えが非常に容易であり、また、交通規制の大幅な削減など多くの利点を持つ。従って、現在の設計基準に適合しない構造物または新設橋に採用され始めている。しかし、様々な制約条件を満たす有用なケーブルプレストレス力の決定方法は確立されていない。

そこで、本研究では、複数配置されたケーブルの最適ケーブルプレストレス力を感度解析法およびグローバル評価法より求める。またケーブル形状については3種類の解析モデルを想定し、その中で最適なケーブル形状を求めた。

2. 解析モデルおよび荷重条件

検証実験を考慮し、3種類の解析モデルを考案した。これらの相違点は、ケーブルの本数、ケーブルを支える縦部材の数および配置である。梁自体の断面性能は同一とし、構造応答の変化を観察できるようにした。また、荷重の載荷状態は死荷重のみを想定し、梁の各節点（節点番号3～9）に9.8Nの集中荷重を載荷した(Fig.2-1参照)。これらの条件より、ケーブルの形状とプレストレス力の関係を観察する。以下に本研究で採用したMODEL-2を示す。



MODEL-2

Fig.2-1 解析モデルの一例

3. 変位の変動量の推定方法

ケーブルプレストレス力を設計変数とする各節点の断面力の推定には感度解析法を用いた。ここで、設計変数に対する断面力の感度係数は次式で示される。

$$\left\{ \frac{\partial r_j}{\partial f_{pi}} \right\} = [K_j] \left\{ \frac{\partial v_j}{\partial f_{pi}} \right\} + \left\{ \frac{\partial F_{pi}}{\partial f_{pi}} \right\} \quad \text{eq.(3-1)}$$

$[K_j]$: 剛性マトリクス

$\{v_j\}$: 変位ベクトル

$\{F_{pi}\}$: ケーブルプレストレス力の荷重ベクトル

eq.(3-1)の左辺 $\left\{ \frac{\partial r_j}{\partial f_{pi}} \right\}$ 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。この感度係数は定数となるので、応答の推定式はeq.(3-2)となる。

$$z_{k+1} = z_k + \sum_{i=1}^m \frac{\partial z_k}{\partial f_{pi}} f_{pi} \quad \text{eq.(3-2)}$$

4. グローバル評価法

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もつ線形計画問題を解くことにより、最良な妥協解を得る。

目的関数

$$f_k(x) = \sum_{j=1}^n c_{kj} x_j \quad (k=1,2,\dots,l) \quad \text{eq.(4-1)}$$

制約条件

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i=1,2,\dots,m) \quad \text{eq.(4-2)}$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1,2,\dots,n)$$

各理想値から各目的関数の相対偏差(s)を以下の式より求める。

キーワード：外ケーブル、感度解析法、グローバル評価法

*東洋大学工学部

〒350-0815 埼玉県川越市鯉井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 ライオンズマンション402号

TEL: 0492-39-1391 FAX: 0492-31-4482

TEL: 0492-22-9354 FAX: 0492-24-0230

$$s = \frac{f_x(x) - \sum_{j=1}^n c_{kj} x_j}{f_k(x)} \quad (k=1,2,\dots,l) \quad \text{eq.(4-3)}$$

この相対偏差Sの和を最小にするような線形計画問題を解くと最良な妥協解が得られる。

$$f(x) = \sum_{k=1}^l \left\{ \frac{f_x(x) - \sum_{j=1}^n c_{kj} x_j}{f_k(x)} \right\} \rightarrow \min \quad \text{eq.(4-4)}$$

5. ケーブルプレストレス力の最適化

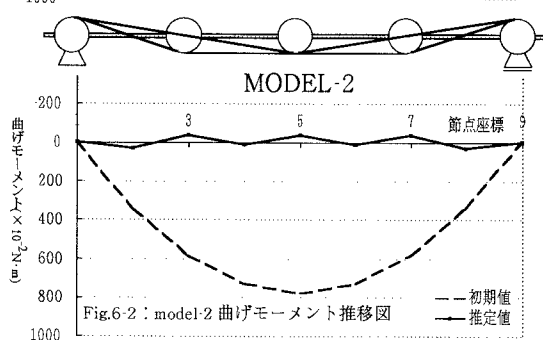
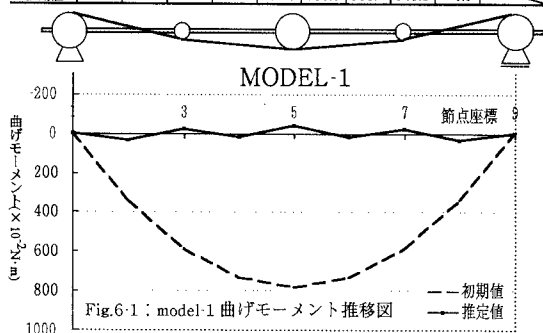
梁の各節点の曲げモーメントを目的関数とする線形計画問題を解くことで、最適ケーブルプレストレス力を導き出すことが出来る。ここで、制約条件は、曲げモーメントの上限値および下限値を示すeq.(4-2)。その他にケーブルの許容応力を採用した。

6. 解析結果の検討

片側1本、計2本の外ケーブルを添加したMODEL-1および、片側2本、計4本のMODEL-2の解析値の結果を示す。

Table.6-1：曲げモーメントの分布表

(unit: $\times 10^3 \text{ N}\cdot\text{cm}$)										
節点番号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	張力(N)
MODEL-1	0.0	37.7	-22.6	18.2	-39.0	18.2	-22.6	37.7	0.0	132.8
MODEL-2	0.0	32.5	-33.0	16.0	-33.0	16.0	-33.0	32.5	0.0	63.3/68.6
初期値	0.0	343.2	588.4	735.5	784.5	735.5	588.4	343.2	0.0	



ケーブルにプレストレス力を与えた時の梁に生じる曲げモーメントの分布は、表(Table.6-1)およびグラフ(Fig.6-1),(Fig.6-2)になる。それぞれよく死荷重による曲げモーメントを均一に低減させていることが分かる。しかし、ケーブル一本あたりのプレストレス力は、model-1ではmodel-2の約2倍となっている。

7. 検証実験

死荷重を想定して荷重を載荷してある鋼材(梁)に片側1本、計2本および、片側2本、計4本の外ケーブルを添加し、解析により求めたケーブルプレストレス力を分銅を用いて与える。今回の実験では、ケーブルの偏向点(turning point)にベアリングを採用することにより、偏向点における摩擦の抵抗によって張力が減少するのを最小限に留め、形状を容易に変化させる装置を作成した。この装置により梁のひずみを測定し、得られたひずみより曲げモーメント(実験値)を求め、解析より求めた推定値(理論値)と比較し、解析の整合性を確認する。

解析結果と検証実験の結果の比較は、本研究発表の場で3形状について行う。

8. 結論

ケーブルの本数および、添加形状の変化による曲げモーメントの低減状況は、各MODELとも、以下(table8-1)のように、梁全体にわたって均一に低減させることが出来た。これは、ケーブルの本数および偏向点の数や配置で多少変化は見られるが、初期値が梁中央部で784.5($\times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$)であったのに対し、30($\times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$)前後まで低減している。ケーブルプレストレス力の面では、ケーブルの偏向点での角度が大きなものが、比較的小さい値をとっている。

Table.8-1：曲げモーメントの分布表

(unit: $\times 10^3 \text{ N}\cdot\text{cm}$)										
節点番号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	張力(N)
MODEL-1	0.0	37.7	-22.6	18.2	-39.0	18.2	-22.6	37.7	0.0	132.8
MODEL-2	0.0	32.5	-33.0	16.0	-33.0	16.0	-33.0	32.5	0.0	63.3/68.6
MODEL-3	0.0	-25.0	24.0	-25.0	24.0	-25.0	24.0	-25.0	0.0	94.9/27.7
初期値	0.0	343.2	588.4	735.5	784.5	735.5	588.4	343.2	0.0	

9. 今後の課題について

様々な制約条件を満たす最適ケーブル形状の理論的決定方法は未だ確立されていない。今後は、ケーブル変形点の座標を変数とし、形状最適化の理論を用いて最適ケーブル形状を検討したい。

<参考文献>

- 1 齊藤智和、佐藤森太郎、小林好実、樋口幸太郎「外ケーブル構造システムのケーブル形状およびケーブルプレストレス力の最適化に関する研究」東洋大学学士論文

2 M.S.TROITSKY「PRESTRESSED STEEL BRIDGES Theory and Design」