

外力仕事最小規準による外ケーブル構造システムの 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*

東洋大学*

東洋大学*

学生員 齊藤智和

正会員 新延泰生

学生員 樋口幸太郎

学生員 福島啓之

1. はじめに

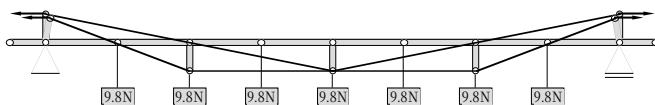
外ケーブル方式による補強目的は、車両の大型化による活荷重の増加、床版増厚による死荷重増加への対応としての補強が主となる。補強目的を明確にすることにより補強する桁への影響などを考慮した設計が可能となることより、本研究では後者の死荷重により梁に発生した曲げモーメントの改善を行う。

既設桁の健全度を回復させるために必要な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、複数配置された各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外力仕事最小の規準より求める。プレストレスの設計にあたり桁の断面性能、構造形式、定着部位置などを考慮し、ケーブル本数と配置の関係、総緊張力と1本あたりの緊張力の関係に着目して、設計を行う。

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、ケーブル端部でのケーブルの水平角度 θ_i 、ケーブルを支える縦部材の本数および配置である。梁自体の断面性能は同一とし、梁の曲げモーメント及び軸力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（端部及び支点上を除く）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変位の推定には感度解析法を用いた。ここで、設計変数に対する変位の感度係数は次式で示される。

$$\left\{ \frac{\partial z}{\partial f_{pi}} \right\} = [K]^{-1} \left\{ \frac{\partial F_p}{\partial f_{pi}} \right\} \quad \text{eq.(3-1)}$$

[K]：剛性マトリクス

{z}：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.(3-1)の左辺 $\{\partial z / \partial f_{pi}\}$ は設計変数 f_{pi} に対する変位の感度係数を示す。この感度係数は定数となるので、応答の変化はeq.(3-2)で示される。ここで m はケーブル本数を示す。

$$z_k = z_k^0 + \sum_{i=1}^m \frac{\partial z_k}{\partial f_{pi}} f_{pi} \quad \text{eq.(3-2)}$$

4. 外力仕事最小の規準

本研究の外力は、主桁の死荷重を等価節点力 P_{ek} , M_{ek} によって各節点に加えている。また、変位はケーブルプレストレス力 f_{pi} を感度変数とする線形結合式で表されるので、外力仕事最小の規準に基づく定式化は以下ようになる。

目的関数

$$\left| \sum_{k=1}^n \left\{ P_{ek} \left(v_k^0 + \sum_{i=1}^m \frac{\partial v_k}{\partial f_{pi}} f_{pi} \right) + M_{ek} \left(\theta_k^0 + \sum_{i=1}^m \frac{\partial \theta_k}{\partial f_{pi}} f_{pi} \right) \right\} \right| \longrightarrow \min.$$

制約条件

$$M_k^0 + \sum_{i=1}^m \frac{\partial M_k}{\partial f_{pi}} f_{pi} \leq X \quad M_k^0 + \sum_{i=1}^m \frac{\partial M_k}{\partial f_{pi}} f_{pi} \geq -X$$

$$l_i \leq f_{pi} \leq u_i$$

$$\sum_{i=1}^m f_{pi} \cos \theta_i \leq N_{cr} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad \text{eq.(4-2)}$$

eq.(4-1)

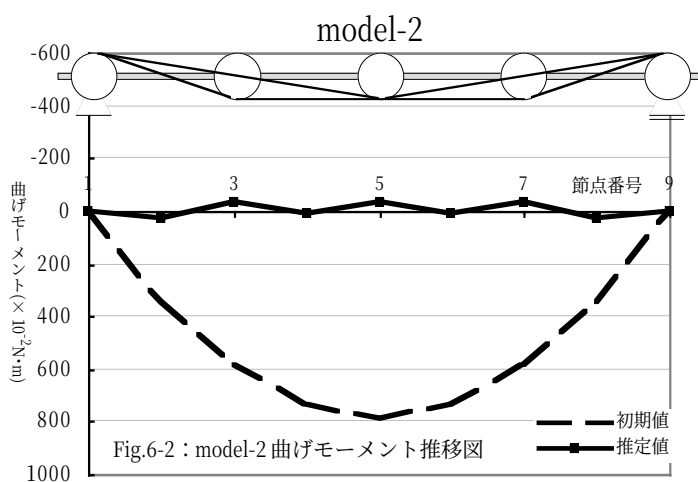
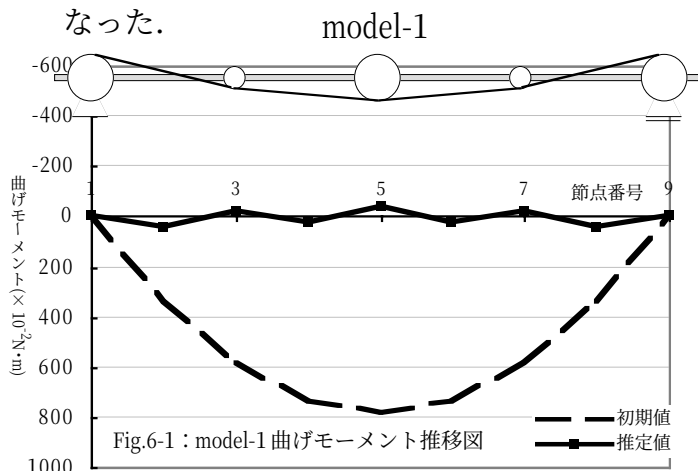
5. ケーブルプレストレス力の最適化

死荷重による外力仕事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比較的容易に導き出すことが出来る。ここで、制約条件は、梁に生じる曲げモーメントの上下限制約、ケーブルの許容張力、梁の挫屈を採用した。

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。

ケーブルにプレストレス力を導入した際の梁に生じる曲げモーメントの分布は下図のグラフ(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。ここで、プレストレス力に注目すると、ケーブル一本あたりのプレストレス力は、model-2ではmodel-1の約1/2となった。



7. 検証実験

死荷重とみなした外力を鋼材（梁）の各節点に集中荷重として载荷し、片側1本、計2本のmodel-1および、片側2本、計4本のmodel-2,3に対応する外ケーブルを梁に添加し、解析により求めた最適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。また、ケーブルプレストレス力とは独立した軸力を導入できるようにしてある。この梁のひずみを測定することにより、曲げモーメント（実験値）を求め、解析より求めた推定曲げモーメント（理論値）と比較し、解析の整合性、及び最適ケーブルプレストレス力の信憑性を確認する。

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、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誤差は見られるが、初期値が梁中央部で $784.5(\times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m})$ であったのに対し、 $30(\times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m})$ 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水平角度が大きなものが、比較的小さい値となっている。

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。

また、解析方法の確立のみならず、実際の施工を考慮に入れた設計を進めていきたい。