

複数の計測データを用いた逆問題に基づく実橋梁施工時の変位推定

東京都市大学 学生会員 ○和田 涼太郎 正会員 吉田 郁政
正会員 関屋 英彦 正会員 森近 翔伍
清水建設 正会員 前田 利光 正会員 中島 淳太

1. はじめに

橋梁施工において、橋梁面の高さ管理、すなわち、橋梁に変位が生じた際に高さを調整する必要があり、各段階で測量の実施が必要である。近年のセンシング技術を活用することで、こうした測量の負担軽減の可能性がある。施工時の負担軽減や供用時の維持管理への活用を想定して光ファイバセンサを用いたモニタリングの研究が報告されている¹⁾。

本報告では、施工時の実橋梁について光ファイバセンサに加え、ひずみゲージ、傾斜計、加速度計（重力方向から傾斜角算出）によって得られた情報から、逆解析を用いて施工時の橋梁の変形状態の把握ができるかについて述べる。

2. 仮想外力を用いた逆解析の定式化

片持ち張出し架設工法によって施工中の実橋梁について各種計測を実施した²⁾。対象となる橋梁の打設の状況を図-1、各センサの設置概要を図-2に示す。別途、レベル測量により鉛直方向の変位を計測している。

本研究では逆解析に基づき変位の推定を行う。逆解析の未知量 $\mathbf{x}$ は橋梁に作用する仮想外力とする。図-3に示す3次元FEMモデルを考え、1番目から200番目までの領域に作用する鉛直方向の仮想外力（等分布荷重）を考える。すなわち、未知量ベクトル $\mathbf{x}$ は鉛直方向の力の大きさを表すサイズ200の1次元ベクトルとなる。観測量は光ファイバによるひずみ $\mathbf{z}_{so}$ 、ひずみ計によるひずみ $\mathbf{z}_{sg}$ 、傾斜計あるいは加速度計による回転角（傾斜角） $\mathbf{z}_a$ を考える。観測量 $\mathbf{z}$ と仮想外力 $\mathbf{x}$ を関係つける $\mathbf{H}$ 行列をそれぞれ $\mathbf{H}_{so}$ 、 $\mathbf{H}_{sg}$ 、 $\mathbf{H}_a$ とする。各 $\mathbf{H}$ 行列は図-3に示す3次元FEMを用いて算定する。例えば、行列の i 行、 j 列の成分は i 番目の領域に大きさ1の仮想外力を与えたときに生じる j 番目の観測点のひずみ、あるいは回転角である。

$\mathbf{H}$ 行列と仮想外力から算定する計算量と観測量の正則項を考慮した残差二乗和は式(1)で示すことができる。

$$J = \beta_{so}(\mathbf{z}_{so} - \mathbf{H}_{so}\mathbf{x})^T(\mathbf{z}_{so} - \mathbf{H}_{so}\mathbf{x}) + \beta_{sg}(\mathbf{z}_{sg} - \mathbf{H}_{sg}\mathbf{x})^T(\mathbf{z}_{sg} - \mathbf{H}_{sg}\mathbf{x}) + \beta_a(\mathbf{z}_a - \mathbf{H}_a\mathbf{x})^T(\mathbf{z}_a - \mathbf{H}_a\mathbf{x}) + \alpha\mathbf{x}^T\mathbf{x} \quad (1)$$

ここで、右辺の1から3番目の項はそれぞれの観測量と計算量の一致度、4番目の項は正則化項を表している。正則化項は単純に未知量ベクトルの二乗ノルムとしているが様々な方法が考えられる。 α と β は正則化と各残差二乗和の重みを決める係数である。式(1)の最小化、すなわち最小二乗法により仮想外力 $\mathbf{x}$ は式(2)により簡単に求めることができる。

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{z} \quad (2)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} + \alpha\mathbf{I})^{-1} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{H}$ 行列、 $\mathbf{z}$ ベクトルは次のように3種類の観測量についてまとめたものである。また、 $\mathbf{R}$ 行列は各 β を格納した対角行列である。

$$\mathbf{H}^T = [\mathbf{H}_{so}^T, \mathbf{H}_{sg}^T, \mathbf{H}_a^T], \quad \mathbf{z}^T = (\mathbf{z}_{so}^T, \mathbf{z}_{sg}^T, \mathbf{z}_a^T) \quad (4)$$

変位については式(2)から求めた仮想外力 $\hat{\mathbf{x}}$ に変位と仮想外力の関係を表す行列 $\mathbf{H}_d$ に乗じることで求めることができる。 $\mathbf{H}_d$ は3次元FEMから他の $\mathbf{H}$ 行列と同様に算定した。 α や β については周辺尤度関数の最大化の条件から定める。

3. 推定された仮想外力と再現された観測量

図-1の8BL左側の打設終了の11:45時のレベル測量による変位が最も大きい。そこで8時を基準とした11:45時点の観測量の増分値に対して検討を行った。推定された仮想外力を図-4に示す。仮想外力は橋梁の床版上面に載荷される荷重であり、鉛直下向きを正として示している。0から-52.5mでは負の外力となっており、鉛直上向きの仮想外力となっている。0から52.5mでは鉛直下向きの領域が多いが部分的に上向きの領域も見られる。実現象としては施工部分のみに鉛直下向きの力が作用するが、モ

キーワード 傾斜計、ひずみ計、3次元FEM解析、変位推定

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL03-5707-0104

デル化誤差も含めて解が求められているため、このような分布となる。なんらかの理由で生じる局所的なひずみや回転角と整合するような仮想外力が求められている。

観測量と推定された仮想外力を用いた推定値を図-5 に示す。ひずみについては概ね光ファイバによるひずみと一致する推定値となっている。ひずみ計と光ファイバによるひずみにある程度の差があるため両者を同時に満たすひずみは存在しない。回転角では観測量と推定値が良好に一致している。

4. レベル測量による変位の推定

上記の仮想外力を用いて推定した変位とレベル測量による変位の比較を図-6 に示す。両者は良好に一致している。比較のため、ひずみの観測情報は用いずに回転角の観測情報だけから逆解析を行い変位推定も行ったところ、ほぼ同じ程度の推定変位が得られた。

5. おわりに

ひずみ、および回転角の観測情報からレベル測量とほぼ同程度の鉛直方向変位を推定できることを確認した。本検討の対象とした時刻では剛体回転的な成分が支配的であったため、たわみが卓越する別の時刻についても別途検討を行ったが、良好に推定できることを確認している。これについては当日報告する。

参考文献

- 1) 岩城ら：長大 PC 斜張橋の長期モニタリングに向けた分布型光ファイバセンサの適用性に関する研究，構造工学論文集 A1，Vol.62A，pp.585-594，2016.
- 2) 谷川ら：施工中の PC 橋梁モニタリングに関する基礎的な研究，令和 4 年度土木学会全国大会年次学術講演会，CS9-20，2022.

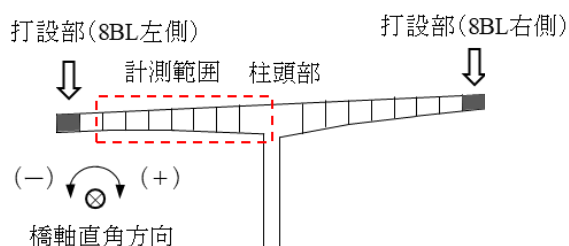


図-1 橋梁施工、打設の状況 2)

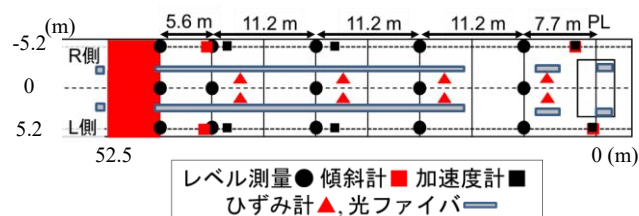


図-2 各センサの設置位置

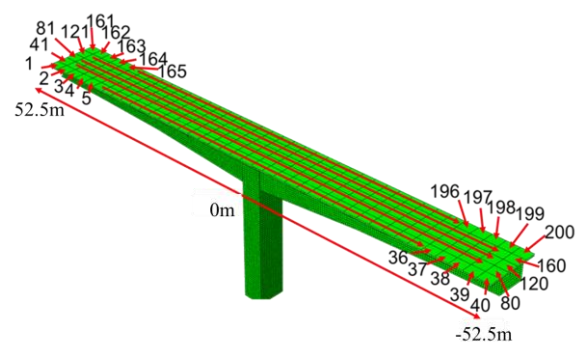


図-3 橋梁の3次元FEMモデル

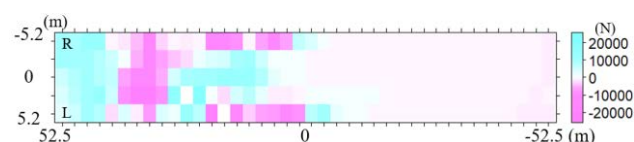


図-4 逆解析による仮想外力の分布

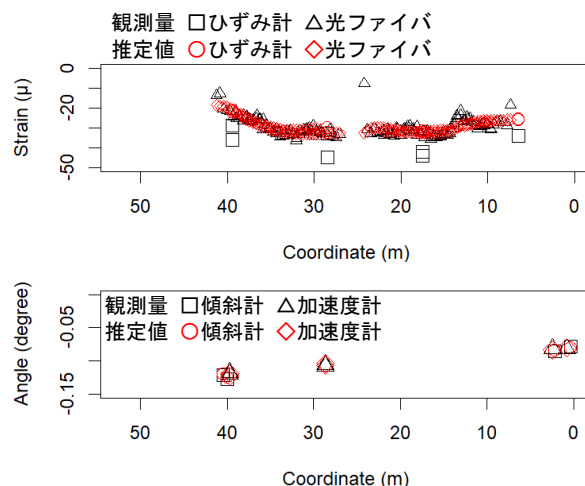


図-5 観測量の逆解析による再現

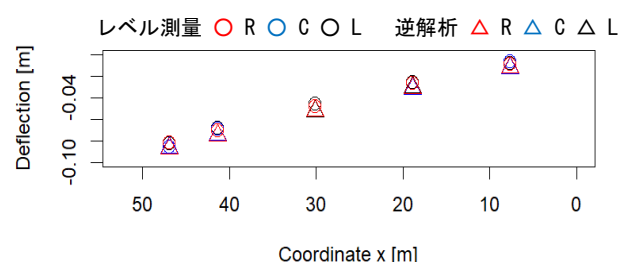


図-6 レベル測量と逆解析による変位の比較