

影響線を用いた橋梁支承部に関する簡易的健全度評価手法

東京都市大学 学生会員 ○丸山 晃平
正会員 吉田 郁政
正会員 関屋 英彦

1. はじめに

鋼橋は高速自動車国道の橋梁延長の約 40%を占めており、経済活動を支える重要な交通インフラの 1 つである。鋼橋の劣化形態の一つに、腐食や土砂の堆積等による可動支承部の固着がある。支承部が固着し拘束されている場合、ソールプレート部に大きいひずみが生じ、疲労き裂が生じる可能性がある。

支承部に関して適切な健全度評価が重要であるとし、関屋らは可動支承部および主桁下フランジの加速度応答から変位応答を算出し、その比率に基づき健全度を評価できる可能性を示している¹⁾。その他にも支承部を対象とした健全度評価手法が提案されているが、推定精度やコスト、複雑な数値計算が必要である点に課題があり実用化には至っていない。そこで本研究では、計算コストが低く現場への適用が容易な手法の開発を目標として、支承部の劣化に伴う影響線の変化に着目した手法を提案する。また、実測データを対象に提案手法を適用する。

2. 対象橋梁の概要

対象橋梁²⁾は走行車線（車線 1）と追越車線（車線 2）の 2 車線から成る支間長 33.65 m の 3 主桁鉸桁橋で支承部は鋼製支承である。変位応答を計測するために、橋軸直角方向中央に位置する主桁の支間中央部に接触式変位計を設置している。影響線算定のために必要な情報である試験車の入退出時刻は、桁 1 と桁 3 の両端部に設置した計 4 台の加速度センサを用いて検出した。橋梁および計測の詳細は Yoshida et al.²⁾を参照されたい。試験車は車軸重量（以下では軸重）が既知の 2, 3, 4 軸車の計 3 台を用いている。対象データは試験車が単独で走行した際に計測した 11 ケース³⁾の変位応答で、車線 1 を走行した際の応答が 5 ケース、車線 2 を走行した際の応答が 6 ケースである。これらのデータを用いて次章で示す方法で影響線の算定を行う。

3. 影響線算定手法の定式化²⁾

試験車による変位応答に基づき影響線を算定する。

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}_w \mathbf{x}_I + \mathbf{v} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{z}$ を観測量（本研究では変位応答時刻歴ベクトル）、 $\mathbf{H}_w$ を各車軸の載荷情報から作成した観測行列、 $\mathbf{x}_I$ を算定する影響線ベクトル、 $\mathbf{v}$ を観測値と計算値の残差ベクトルとする。最小二乗法を用いて影響線ベクトル $\mathbf{x}_I$ を算定する。この時の目的関数を、式 (2)に示す残差二乗和とする。

$$J = (\mathbf{z} - \mathbf{H}_w \mathbf{x}_I)^T (\mathbf{z} - \mathbf{H}_w \mathbf{x}_I) \quad (2)$$

これを解くと次の最小二乗解が求まる。

$$\mathbf{x}_I = (\mathbf{H}_w^T \mathbf{H}_w)^{-1} \mathbf{H}_w^T \mathbf{z} \quad (3)$$

式 (3)を用いて算定した影響線には動的応答の影響が含まれるため、1.0Hz のローパスフィルタで除去した。著者らの既往の検討³⁾では試験車の入退出時刻の前後数秒を含む長い時間の変位応答から影響線を算定していたが、本検討では 1 軸目の進入時刻から最後尾の車軸の退出時刻までを用いた。フィルタリング後の影響線を車線ごとに区別して図-1に示す。

4. 実測データを対象とした検討

変位応答から算定した影響線と梁モデル³⁾による構造解析から算定した影響線について最小二乗法により以下の支承部のばね定数と桁部に関する EI の 5 つのパラメータ（以下では構造パラメータ）を推定する。支承部のばねとして、全体剛性行列 $\mathbf{K}$ において両端の節点に鉛直ばね定数 k_{v1} , k_{v2} と回転ばね定数 k_{r1} , k_{r2} を加える。下添え字の 1 が左端、2 が右端である。これを用いて、相反作用の定理から計測点に単位荷重を作用させた際の変位応答すなわち影響線ベクトル $\mathbf{h}_I(\mathbf{x}_K)$ を算定することができる。

$$\mathbf{h}_I(\mathbf{x}_K) = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{f}$ は外力ベクトルであり、計測点に対応する自由度番号の要素が 1、それ以外は 0 のベクトル、 $\mathbf{x}_K$ は推定対象とする構造パラメータである。

キーワード 支承部、影響線、健全度評価、固着

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 都市工学科 TEL 03-5707-0104

橋梁の変位応答から算定した影響線を z_I として、構造パラメータを推定する際の目的関数を以下のよう

$$J=(z_I - h_f(x_K))^T(z_I - h_f(x_K)) \quad (5)$$

これを最小化する解析解は存在しないため最適化手法の1つである BFGS 法を用いて x_K を算定する。

推定した x_K を用いて着目する支承部の状態を示す無次元量について考える。以下ではこれを回転抵抗指数 I_r と呼ぶ³⁾。着目する支承部の反対側の回転ばね定数を 0 とし、推定した EI 及び着目する端部の回転ばね定数を用いて影響線を算定し、着目する支点たわみ角 θ を求める。それらを用いて回転抵抗指数を次のように定義する。

$$I_r = 1 - \theta/\theta_0 \quad (6)$$

ここで、 θ_0 は両端の回転ばね定数が 0 の場合の支点たわみ角である。注目する端部の回転ばね定数が 0 の場合に回転抵抗指数は 0 になり、完全に固着して回転抵抗が無限大になったときに 1 となる。

図-1 の影響線について、構造パラメータ x_K と回転抵抗指数 I_r の推定をそれぞれ行い、その結果を図-2 に示す。安定した推定値が得られているが多少のばらつきが生じている。両端の回転ばね定数を比較すると左端の方が 3 倍以上大きくなっていることに伴い、回転抵抗指数も大きい。車線 2 の影響線 z_I と推定した構造パラメータに基づく影響線 $h_f(x_K)$ を図-3 に示す。両者は良く一致しているにも関わらずばね定数がばらついていることから、一つの影響線に基づく EI と両端のばね定数の同時推定には限界があるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では影響線に基づく支承部の健全度評価手法を提案した。支承部における回転への抵抗を示す指標として回転抵抗指数を提案し、11 ケースの実測データを対象に推定した。梁モデルを用いて変位応答から算定した影響線を高精度に再現することができたが、推定したパラメータにはばらつきが生じることが確認された。今後は、実験データを対象に支承部における実際の健全度と回転抵抗指数の関係を明らかにして実橋梁にて長期モニタリングを実施し、劣化の進展状況の把握について検討を行いたい。

謝辞

現場計測は、国土交通省による『社会インフラへの

モニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発』により実施したものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 関屋ら：MEMS 加速度センサを用いた二箇所同時変位計測に基づく支承部の健全度評価の試み，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.73, No.2 (応用力学論文集，Vol.20)，pp.I_649-I_660, 2017.
- 2) Yoshida et al.: Bayesian Bridge Weigh-In-Motion and Uncertainty Estimation, *ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civil Engineering*, Vol.7, No.1, 04021001, 2021.
- 3) 丸山ら：影響線に基づく支承部の回転ばね定数の推定に関する基礎研究，構造工学論文集，Vol.69A, 2023. 掲載決定

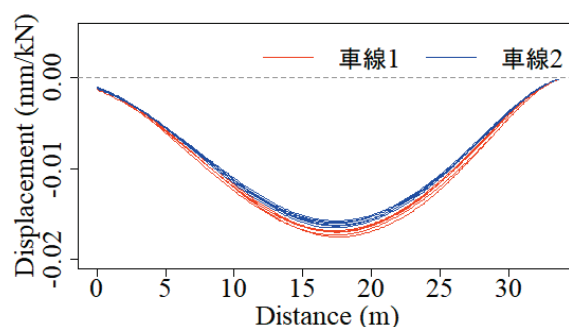


図-1 実橋梁の変位応答から算定した影響線

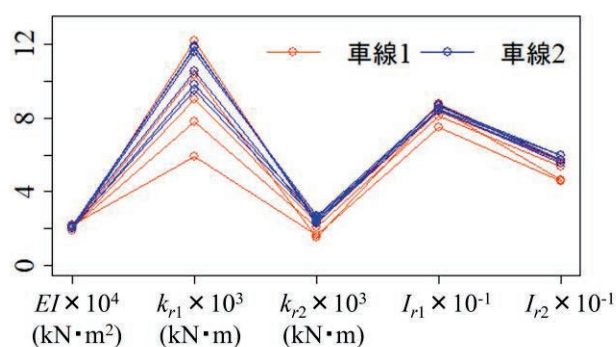


図-2 構造パラメータ及び回転抵抗指数の推定結果

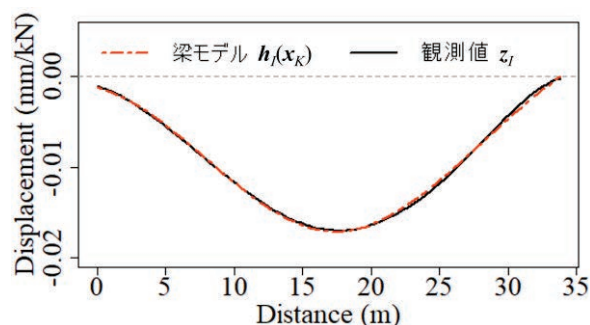


図-3 構造パラメータの最適化による影響線