

活荷重変位の比による橋桁損傷検知の可能性

日本電気株式会社 正会員 ○矢島 義之 日本電気株式会社 正会員 久村 孝寛
 日本電気株式会社 正会員 Petladwala Murtuza 京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. はじめに

現在、高度経済成長期に多く建造された橋は供用開始から 50 年以上経ち、経年劣化が進行している。5 年に 1 度の定期点検が義務化されているが、近接目視点検を行う点検員の人数には限りがあり、近接目視が困難な場合もある。そのため、点検や状態確認の効率化が求められており、センサを用いたモニタリング技術が研究されている。

橋の状態をモニタリングする上で有用な物理量のひとつは鉛直方向の変位である。橋の鉛直方向の変位は交通荷重や温度により変化する。その変位の傾向を分析することで橋の状態を理解できる可能性がある。しかし活荷重変位は荷重に依存するため、橋の状態を理解するには荷重と変位、双方の値を知る必要があり、変位のみから橋の状態を理解することは難しいという課題がある。そこで活荷重変位を用い、荷重に依存せず橋の状態を評価する手法について検討し、模型橋を用いて実験的に評価する。

2. 変位比による橋の状態評価手法

活荷重変位の比 (変位比) を用いた橋の状態評価手法を提案する。長さ L 、曲げ剛性 EI の単純梁において、荷重 P が橋軸方向位置 a にある時、任意の位置 x における変位 y は

$$y|_{0 \leq x < a} = \frac{P(a-L)[x^3 + (a^2 - 2La)x]}{6LEI}, \quad y|_{a \leq x < L} = \frac{Pa[(x^3 - 2Lx^2) + (2L^2 + a^2)x - a^2L]}{6LEI}$$

と表せる。つまり、変位 y は P/EI に比例する。任意の 2 地点の変位比をとれば荷重の係数を消すことができるが、理想的な健全状態であれば任意の 2 地点の EI は等しく曲げ剛性の影響も消える。しかし、何らかの損傷がある場合は 2 地点の EI に違いが生じ、その影響が変位比に反映されると考えられる。従って、変位比の主たる成分は荷重にも曲げ剛性にも依存しないものの、橋の損傷状態には影響すると考えられ、橋の状態評価に変位比が有効な可能性がある¹⁾。損傷状態の違いによる変位比成分は交通荷重の移動速度や、計測誤差による分散等を含むため、決定的な値ではなく確率分布として評価するべきである。以上より、橋の状態変化は変位比の確率分布に差を生じさせると予想され、異常検知に応用可能と考える。さらに、変位比の確率分布は橋の構造パラメータの推定にも応用できる。ベイズ推定的アプローチと構造解析シミュレーションを組み合わせ、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を用いて計測データから構造パラメータの確率分布を求めることにより²⁾、橋の状態評価が可能となる。

3. 模型橋を用いた活荷重変位比の測定

変位比の確率分布から橋の状態を推定可能か、模型橋を使用し実験的に評価する。支間長 5.4 m 鋼製 H 型断面模型橋梁 (図 1) において質量 25 kg の模型車両を走行させ、活荷重変位を接触式変位計で計測し変位比を計算する。変位の計測点は図 1 の D1 から D5 である。D2 と D3 の間に亀裂を模したスリットがある。スリットの上から補強板を取り付けた状態を健全時、補強板を外した状態を損傷時と呼ぶことにする。

D2, D4, 2 つの変位計の値の比から橋の状態を推定する。まず、1 回の模型車両通過イベントにおいて D2, D4 それぞれの測定データで極小値となる時刻 ±0.5 秒の範囲の変位配列データを抽出する。そして、配列の要素ごとに D2, D4 の変位 y_{D2}, y_{D4} の変位比 $r = (y_{D4} - y_{D2})/y_{D2}$ を計算する。健全時・損傷時それぞれについて複数回の模型車両通過

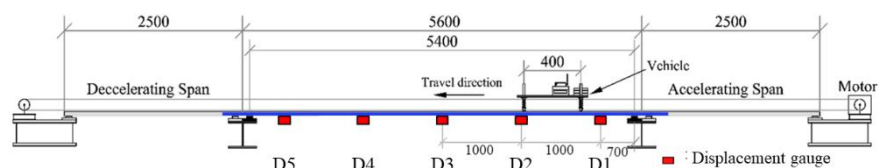


図 1. 模型橋の側面図とセンサ位置 (単位は mm).

イベントで変位比を計算し、その頻度分布からカーネル密度推定を用いて確率密度関数を求める。その結果を図2に示す。これらの確率分布の分散は計測誤差と模型車両速度の違いによって生じていると考えられる。

4. 活荷重変位シミュレーションと構造パラメータの確率分布の推定
 構造パラメータの確率分布を推定するため、模型橋の有限要素 (FE) モデルを作成する。FE モデルは梁要素を用い、構造パラメータとして固定支承部の回転バネ剛性 k_{R1} 、可動支承部の回転バネ剛性 k_{R2} 、橋梁中点から左右に分割した範囲の橋桁のヤング率 E_1, E_2 を設定する。図1中で k_{R1}, E_1 はそれぞれ右側の支承、右半分の橋桁、 k_{R2}, E_2 は左側の支承、左半分の橋桁に対応する構造パラメータである。

本論文では橋桁の損傷に着目するため、損傷による曲げ剛性の変化をヤング率の変化として表現し、 E_1, E_2 の確率分布の違いを議論する。回転バネ剛性 k_{R1}, k_{R2} は、FE モデルと計測結果を合わせるための仮想的なパラメータとなる。可動支承に対応する k_{R2} よりも固定支承に対応する k_{R1} が大きな値を持つように設定する。 k_{R1}, k_{R2} に一意な値を設定することが難しいため、健全時の測定結果を参考に、 $k_{R1} = 10^1 - 10^3 \text{ kN m rad}^{-1}$ 、 $k_{R2} = 10^{-1} - 10^2 \text{ kN m rad}^{-1}$ の定義域を持つように設定する。

E_1, E_2 は公称値 $2.05 \times 10^8 \text{ kN m}^{-2}$ の-25%を下限、+10%を上限とする。以上の設定にもとづいて、可変な構造パラメータ4個を持つ模型橋FEモデルにおいて、1kNの移動荷重に対するD2、D4地点の変位極小値を与える代理モデルを作成する。なお、代理モデルを得るために、Latin Hypercube Samplingで合計500組のサンプルを抽出して変位を計算し、ガウス過程回帰を使う。

MCMCにおいては上記で設定した定義域の一様分布を事前分布とする構造パラメータから値をサンプリングし、代理モデルを使って構造パラメータ値サンプルからD2、D4の変位極小値を求めて変位比を算出し、それを計測値から得た不変確率分布(図2)と比較して構造パラメータ値サンプルを採択するか判断する、という処理を繰り返す。計3万ステップ繰り返し、実験値の不変確率分布を再現できる可能性の高い構造パラメータ E_1, E_2 の頻度分布から事後確率分布を得る。なお、最初の5000ステップまではburn-inのため使わない。

5. 結果と考察

図3に推定された E_1, E_2 の事後確率分布を示す。図中の色付き破線は平均、黒破線は公称値を表す。 E_1, E_2 の確率分布が重なる面積を比較すると、健全時よりも損傷時の方が小さい。 E_1, E_2 間の期待値の差は健全時で $0.055 \times 10^8 \text{ kN m}^{-2}$ 、損傷時で $0.36 \times 10^8 \text{ kN m}^{-2}$ と後者で大きく増加していることが分かる。 E_1, E_2 間の期待値の差に対し、ある閾値を設けることで異常検知が可能と考えられる。さらに期待値の差が大きい損傷時において、期待値が小さい E_1 の方に異常があると判断できる。つまりこの結果から E_1 に該当する範囲の橋桁に発生した損傷を検知可能である。

6. おわりに

本論文では2地点で計測された活荷重変位の比の確率分布から橋桁のヤング率の確率分布を推定することにより、橋桁における損傷検知の可能性を模型橋実験で示した。2地点で計測された活荷重変位の比を使うことで交通荷重の大小に影響されないこと、変位比の確率分布を用いることで交通荷重の移動速度や計測誤差による変位比の分散も含めて評価することが特徴である。今後は支承固着など他の種類の損傷への応用や実橋応用について検討する。

参考文献

- 1) 市川ら, 日本実験力学学会誌 実験力学, Vol. 21, No. 2, pp. 97-103, 2021
- 2) 西尾ら, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 69, No. 2, pp. I_711-I_718, 2013

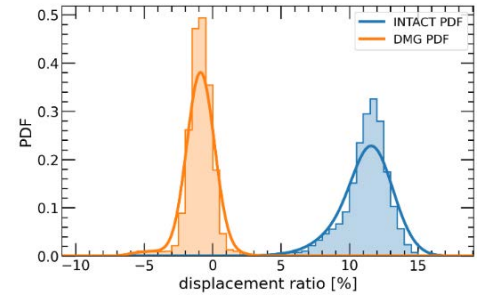


図2. 健全時(青), 損傷時(橙)における変位比の確率分布。

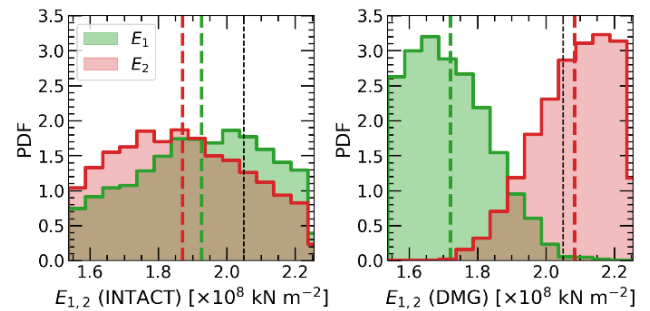


図3. 健全時(左), 損傷時(右)におけるヤング率の確率分布。