

第 I 部門 橋梁応答の限定的利用による移動車両橋梁点検の検討

京都大学 学生員 ○矢野友貴宏
京都大学大学院 正会員 張 凱淳

京都大学大学院 正会員 金 哲佑
京都大学大学院 学位員 長谷川 聡一郎
京都大学大学院 学位員 藤士 尚也

1. 序論

現在、日本には約 72 万橋の橋梁が存在しており、建設後 50 年を経過しているものは約 30%、10 年後には約 55%まで増加する見込みである¹⁾。このような状況の中、時間的および経済的に効率的な橋梁点検手法の確立が急務とされている。現在提案されている手法の 1 つに橋梁にセンサーを設置し橋梁の振動特性に注目する構造ヘルスマモニタリングがある。しかし、センサーの設置や管理、さらにはセンサーそのものの費用を考えると高価でありコスト面に課題が残る。そこで考案されたのが橋梁上を通過する車両の応答を用いた移動車両橋梁点検である。しかし、車両応答に含まれている橋梁振動成分の強度が車両振動の強度に比べて極めて弱いことから未だ実用化に至るほどの十分な精度の異常検知は行えていない。

上述の内容を踏まえ、本研究では、車両応答に加えて、橋梁への最小限のセンサーの設置を想定し、車両応答と橋梁応答の 2 種類の応答を用いて検討を行う。まず、異常検知に利用する橋梁応答を決定するための感度解析を行い、次に感度解析によって選ばれた橋梁応答および車両応答を用いたシミュレーションによる異常検知を行う。

2. 理論

橋梁の異常検知を行うにあたり、橋梁を 8 分割した有限要素モデルを用い、車両-橋梁連成振動解析を行う。車両のバウンス振動数は 2.36Hz、橋梁の曲げ一次振動数は 2.54Hz のモデルを用いる。各橋梁要素の剛性の変化を表す損傷ベクトル $\mathbf{d}$ を考え、 $\mathbf{d}$ を逆解析により求めることで損傷位置および損傷程度の検知を試みる。車両加速度の 2~3Hz の領域をウェーブレット変換し、ウェー

レット係数のパワーを P_u とする。橋梁応答は 2~3Hz の領域を PSD に変換し、これを Q_u とする。実測値(今回はシミュレーションによって算出する)の P_u 、 Q_u との差の二乗をそれぞれ式(2-1)、式(2-2)の通り算出する。

$$v_{i,j}(\mathbf{d}) = |P_u(a_i, b_j) - P_{u(\mathbf{d})}(a_i, b_j)|^2 \quad (2-1)$$

$$b_k(\mathbf{d}) = |Q_u(f_k) - Q_{u(\mathbf{d})}(f_k)|^2 \quad (2-2)$$

ここで a, b, f はそれぞれシフト、スケール、周波数を表す。 P_u のデータ数が Q_u よりも多いことを仮定し、 $v_{i,j}(\mathbf{d})$ をランダムに足し合わせ、データ数を揃えこれを $v_k(\mathbf{d})$ とする。式(2-3)の通り $v_k(\mathbf{d})$ 、 $b_k(\mathbf{d})$ に重みづけをし、足し合わせ目的関数 L^k を算出する。 W は重みを表す。

$$L^k = W v_k + (1 - W) 10^{13} b_k \quad (2-3)$$

算出された目的関数を最適化するためのアルゴリズムには Adam²⁾ を用いる。

3. 損傷に対する感度解析

異常検知に用いる橋梁応答決定のため、損傷に対する感度解析を行う。橋梁位置、損傷位置、応答の種類(加速度、速度、変位、それぞれ鉛直方向および回転方向)、領域(時間領域、周波数領域、時間周波数領域)を変化させながら式(3-1)で表される指標を用いて損傷への感度を評価する。

$$index = \left| 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_{d,i}^2}{\sum_{i=1}^N y_{o,i}^2}} \right| \quad (3-1)$$

$y_{o,i}$ は損傷のない場合の橋梁応答、 $y_{d,i}$ は損傷がある場合の橋梁応答である。損傷位置 3 ヶ所での $index$ の平均を考え、最終的な判断材料とした。

感度解析の結果、橋梁中央の角加速度の PSD が最も感度が良いことがわかった。

4. シミュレーションによる異常検知

感度解析の結果より、橋梁中央の角加速度を PSD に変換したものを異常検知に利用する。異常検知アルゴリズムには2章で説明したアルゴリズムを用いる。車両モデルは2自由度ハーフカーモデル、路面形状は全てのケースにおいて同じものを用いる。

結果をFig.1に示す。Fig.1より、損傷位置に関わらず、 $W = 0, 0.5$ の場合は3回の全ての試行において d が様々な値に収束し、精度よく異常が検知できているとは言えない。一方、 $W = 1$ つまり車両応答のみの場合は、3回全ての試行において d が同様の値に収束し、損傷のある要素に対応する d の値が小さくなっていることから比較的精度よく異常が検知できていると言える。

以上の結果から、橋梁応答を含めた場合は、局所解に陥ることが推測される。一方車両応答のみの場合は大局解に収束していると考えられる。

5. 結論

感度解析では、橋梁中央の角加速度の PSD が最も損傷に敏感であることがわかった。

シミュレーションによる異常検知では、橋梁応答を含めない場合が、最も異常検知の精度が良いということがわかった。原因として橋梁応答を用いた場合は局所解に陥りやすいことが推測される。

本研究では、目的関数の傾きを用いる最適化アルゴリズムであるAdamを用いたが、局所解に陥りやすいことが推測されるため、粒子フィルタや遺伝子アルゴリズム等の傾きを用いない最適化手法の利用が考えられる。

Table1は車両応答の感度解析の結果を橋梁応答の感度と比較したものである。このTable1より、車両応答の損傷に対する感度は橋梁応答に比べて極端に悪いことがわかる。このことから、今回の手法において異常検知への有用性は損傷への感度に依存しないと考えられる。すなわち、新たな評価基準を定め、異常検知に有用な橋梁応答を選択する必要性が考えられる。

【参考文献】

- 1) 国土交通省，道路局：道路メンテナンス年報，2020。（2021/1/7 閲覧）
- 2) Diederik P. Kingma, Jimmy Lei Ba, ADAM: A METHOD FOR STOCHASTIC OPTIMIZATION, ICLR 2015

Table1 Result of sensitivity analysis of acceleration

応答の種類 \ 損傷位置	時間領域	PSD	CWT
1/4	0.023209	0.030531	0.033179
1/4(角)	0.006363	0.017572	0.018513
1/2	0.004365	0.02009	0.020287
1/2(角)	0.142756	0.531746	0.340569
車両鉛直	0.002477	0.015111	0.020394

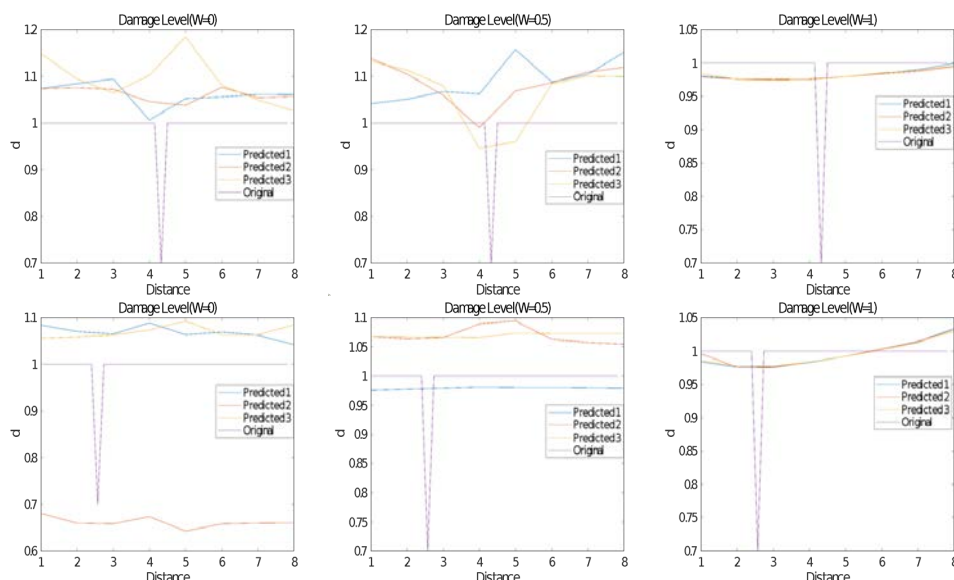


Fig.1 Results of anomaly detection