

京都大学大学院 学生員 ○杉本 遼哉
京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. 序論

2040 年には架設後 50 年を経過した橋梁の割合が約 75%にも上ると推計されており、橋梁維持管理は深刻な課題である。現行の橋梁点検手法は目視点検が主な方法であるが、より効率的な維持管理手法が期待されている。効率的に橋梁の損傷を検知する手法の一つとして、近年車両重量を測定する Bridge Weigh-In-Motion¹⁾ (以下、「C-BWIM (Conventional B-WIM)」) 技術を用いた橋梁の状態評価法が提案されている^{2,3)}。C-BWIM は橋梁上を通過する車両の重量推定を目的とされてきたが、推定重量分布の経年的な変化は、橋梁の剛性低下と関連付けられる。既往研究では、損傷の有無と、損傷が橋梁の左右どちら側に位置するかを推定可能としている²⁾。本研究では、観測データとして、設置コストが低い加速度計から得られる回転角データの活用に着目し、さらに、異常検知手法として、損傷による橋梁の曲げ剛性の低下は変位や回転角の影響線の変化の原因になることに着目している。さらに、境界条件に依存しない影響線を活用した B-WIM である Point Load Approximation^{4,5)} (点荷重近似、以下、「PLA-BWIM」) を導入して重量推定し、既往の研究よりも詳細な損傷箇所の推定に取り組む。

2. 軸重推定の計算方法と橋梁異常検知手法

C-BWIM では、式(1)を用いて軸重が推定される。

$$P = (\delta^T \delta)^{-1} \delta^T (LE) \quad (1)$$

ここで、 P は軸重、 δ は影響線からなるシステム行列、 LE は Load Effect (荷重効果) である。

一方、古典的梁理論に有限差分法を導入し、分布荷重を近似する PLA-BWIM では、式(2)から軸重を推定する。

$$P = (\delta_{PLA}^T \delta_{PLA})^{-1} \delta_{PLA}^T \left(\sum_i^n \alpha_{x,i} LE(x_i) \right) \quad (2)$$

ここで、 δ_{PLA} は PLA の影響線システム行列、 n は利用するセンサ数、 X は有限差分法による微分回数、 $\alpha_{x,i}$ は i 番目のセンサの有限差分係数、 x_i は i 番目のセンサの位置を表す。

次に、PLA-BWIM による橋梁異常検知の手順について述べる。まず、観測初期の状態では PLA-BWIM によって軸重分布を推定し、マハラノビス距離を用いて統計的な 95%信頼区間を求める。一定期間後、同様に軸重を推定すると、経年劣化および諸々の原因によって橋梁の剛性が低下することで、推定重量の分布に変化が生じるシナリオを考える。新たに推定した新規分布が、初期の信頼区間の外側に位置するプロットの割合が多くなれば異常と判断される。さらに既往の研究手法である、左右の支点影響線の推定結果の違いも利用することで、詳細な損傷箇所の推定が可能となり、結果的に使用するセンサのうち、どのセンサ間に損傷があるのかが推定可能となる。

3. 模型橋梁車両走行シミュレーション

本研究ではシミュレーションによる損傷検知の可能性を検討する。ただし、今後の模型橋梁実験による検証を考慮し、模型橋梁と車両をシミュレーション対象とする。車両は、総重量 214.8N (21.9kgf) (前軸 107.4N (10.95kgf)、後軸 107.4N (10.95kgf))、軸間距離 0.4m の 2 軸車両であり、車両速度は 0.97m/s である。梁は要素数が 20 個 (左支



Fig. 1 : シミュレーションにおける、梁・回転角計測点・損傷箇所の様子

点の要素から順に要素番号 1...20) で、全ての損傷は 20%の曲げ剛性の減少として表現される。また、支間長を L とすると、回転角の計測場所は $0, 0.25L, 0.75L, L$ の 4 箇所 (各センサは左支点から順にセンサ①, ..., センサ④) である。観測データは、 $SNR20 \cdot$ サンプル周波数 200Hz で観測し、観測試行数を 50 回とする。

損傷のシナリオとして要素の 1 つが損傷した 2 ケース考える。1 つ目のシナリオは要素番号 3 ($0.10L-0.15L$) が損傷するケース、2 つ目のシナリオは要素番号 10 ($0.45L-0.50L$) が損傷するケースである。

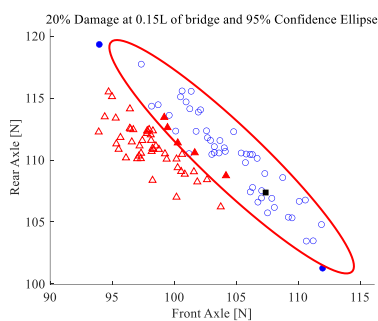
以上のシミュレーション梁、センサ配置、損傷箇所の様子を Fig. 1 に示す。

4. PLA-BWIM による異常検知結果と考察

$0.10L-0.15L$ が損傷したケースを、信頼区間に基づいて異常検知した結果を Fig. 2 に示す。同様に、 $0.45L-0.50L$ が損傷したケースを異常検知した結果を Fig. 3 に示す。以上の結果のように、損傷が 1 つのケースを想定すると、新規プロットは信頼区間外に位置し、PLA-BWIM で正しく異常判定されている。また、Fig. 2 と Fig. 3 は一例しか示していないが、一般的に Fig. 2 のように重量が小さく推定されるのは損傷がセンサ①②間またはセンサ③④間に位置するときで、重量が重く推定されるのは損傷がセンサ②③間に位置するときである。C-BWIM による異常判定とは異なり、PLA-BWIM では損傷箇所によって車両重量が重く推定される場合もあるが、小さく推定される場合もある。これは PLA-BWIM の計算において、各荷重効果に有限差分係数を掛け合わせた帰結として生じると考えられる。さらに、C-BWIM で左支点影響線と右支点影響線それぞれの推定重量の違いも考慮すると、さらなる詳細な損傷位置推定が可能となる。Fig. 4 は要素番号 3 が損傷した際に、C-BWIM の左右それぞれの支点影響線を用いて、GVW を推定した結果である。Fig. 4 では左支点影響線を用いた結果の方が右支点影響線を用いた結果より車両が重く推定されている。そのため、Fig. 2 と Fig. 4 を同時に用いると、まず Fig. 4 の結果から損傷が梁の左半分にあると絞られ、Fig. 2 の結果から損傷がセンサ①②間に位置すると推定される。この結果は、損傷が要素番号 10 の場合でも同様であり、PLA-BWIM と C-BWIM の組み合わせ手法による異常検知の可能性を示している。

5. 結論

本検討では、PLA-BWIM による異常検知手法を示した。C-BWIM のみを使用した異常検知では、損傷箇所を 2 パターンでしか推定できなかったが、PLA-BWIM と C-BWIM を併用することでより詳細な損傷箇所推定が可能となった。今後の検討内容は、パターン認識技術を活用した損傷箇所の詳細な特定と損傷度の推定である。



○：初期の推定車重 ●：偽陽性率 △：異常を正しく検知 ▲：異常を誤って検知 —：信頼区間

Fig. 2：センサ①②間が損傷

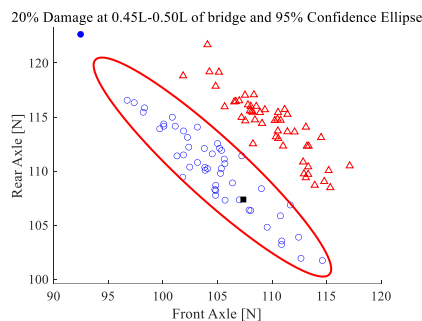


Fig. 3：センサ②③間が損傷

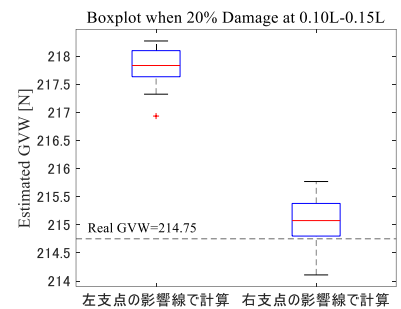


Fig. 4：C-BWIM の推定結果の違い

【参考文献】

- 1) Moses, F. : Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering Journal, Proceedings of ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233-249, 1979.
- 2) O'Brien, E. J. et al.: Identifying damage on a bridge using rotation-based Bridge Weigh-In-Motion, J Civil Struct Health Monit, 11, pp.175-188, 2021.
- 3) 横山ら：たわみ影響線の変化に着目した BWIM による橋梁の異常検知の可能性検討，構造工学論文集，Vol. 68A, pp.329-341, 2022.
- 4) 杉本ら：点荷重近似法による BWIM の可能性検討，2022 年度土木学会関西支部年次学術講演会，I-31，2022.
- 5) Cantero, D. : Moving point load approximation from bridge response signals and its application to bridge Weigh-in-Motion, Eng. Str., Vol.233, 111931, 2021.