

点荷重近似法の導入による加速度計を用いた Bridge Weight-In-Motion

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

日本は高度経済成長期に架設された多くの橋梁が老朽化しているという深刻な問題を抱えており、2032年には建設後50年を経過した橋梁の割合は約59%に上ると推計されている。全交通の0.3%の過積載の大型車両が、道路橋の劣化影響全体の9割以上を占めるとされており、予防保全を目的として橋梁を通過する車両重量を把握することが重要である。橋梁上を通過する車両の重量を推定する手法として Bridge Weight-In-Motion¹⁾ (以下、「B-WIM」)がある。B-WIMは橋梁に設置したセンサデータと橋の影響線から、車両重量を推定する理論である。

本研究では、B-WIMの派生理論である点荷重近似法 (Point Load Approximation)²⁾ (以下、「PLA理論」)により車両重量を推定することを検討する。既存のB-WIMは一般的にひずみゲージを使用されてきたが、ひずみゲージを用いる場合は設置に手間がかかる。そこで、設置が比較的容易である加速度計を用いたB-WIMが期待される。著者³⁾による既往研究では、変位・速度・加速度データをシミュレーション上でPLA理論に適用し、その精度を検討している。その結果、PLA理論では変位だけではなく、速度と加速度データも扱うことができ、さらに既存のB-WIMよりも精度が高い可能性が示唆された。本研究では、廉価で設置しやすい加速度計を用いたB-WIMの実現に向け、加速度データを回転角データに変換した上でPLA理論に適用し、その精度を模型橋梁車両走行実験で確認する。

2. 点荷重近似法 (PLA理論)

PLA理論とは、古典的梁理論を有限差分法によって拡張した理論である。古典的梁理論は連続関数の空間微分によって橋梁の変位やひずみを分布荷重と関連付ける理論であるが、この連続関数の空間微分を、離散荷重の有限差分法による微分として置き直したものがPLA理論である。これにより、橋梁に設置した複数の

センサを組み合わせることで橋梁応答を外部荷重に関連付けることが可能となる。さらに、有限差分法による微分過程で、橋梁の境界条件が消えることから、PLA理論は橋梁の境界条件に依存しない理論であると言える。

次にPLA理論の具体的な理論式を式(1)に示す。

$$\sum_i^n \alpha_{x,i} \sum_j^N \frac{d^m}{dt^m} (LE_{i,j}(t)) = \sum_j^N P_j \cdot \frac{d^m}{dt^m} (\delta_{LE}(x_{p,j}(t))) \quad (1)$$

ここで n は利用するセンサの数、 N は軸数、 X は有限差分法による微分回数、 d^m/dt^m は時間領域の微分回数、 P_j は j 番目の軸重、 $LE_{i,j}$ は j 番目の軸重による i 個目のセンサ応答、 δ_{LE} はPLA理論の影響線を表している。そして、PLA理論では式(1)両辺の誤差の二乗和が最小となるように軸重を推定する。 $\alpha_{x,i}$ は X 次の有限差分法のための i 番目のセンサに乗算する有限差分係数を表す。 $x_{p,j}(t)$ は時刻 t における j 番目の軸の位置を表す。

PLA理論では、変位やひずみのみならず、理論的には橋梁の加速度や回転角も扱うことが可能である。本研究では、橋梁応答を計測する方法として加速度計を設置し、加速度応答を回転角に変換した上でPLA理論に適用する。加速度応答と回転角に変換する方法として、式(2)の物理量変換を施す。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (2)$$

ここで、 θ は橋梁の回転角、 a_x は橋梁の橋軸方向の加速度、 g は重力加速度である。理論的には加速度データをB-WIMに適用することも可能であるが、既往の研究から加速度応答を直接PLA理論に適用することは困難であった。その理由として、PLA理論は静的な条件式である古典的針理論の拡張版であり、理論に適用する信号データは橋梁の静的な応答を含むことが期待される。しかし、加速度応答にローパスフィルタを用いた場合でも加速度応答から静的な成分を抽出することは既往の研究において困難であったため、本研究では比較的静的成分を抽出しやすい回転角データをPLA理論に適用することを検討した。

キーワード B-WIM, PLA理論, 影響線, 加速度, 回転角

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-183 社会基盤創造工学分野 TEL 075-383-3421

3. 模型橋梁車両走行実験の概要

本研究では、不確実性の低い環境で PLA 理論の可能性を検討するため、模型橋梁車両走行実験をおこなった。実験で用いた模型橋梁と車両を **Fig. 1** に示す。車両は 2 軸の車両で、速度が 0.91m/s、軸間距離が 0.2m、総重量 (GVW: Gross Vehicle Weight) は 165.9 N で各軸にそれぞれ 83.0 N の荷重がかかっている。橋梁は、支間長 5.4m、レール幅 1.99m である。支承部は進入側がピン支承、出口側がローラー支承となっている。走行は 15 往路実施し、そのうちの 5 回分の往路から橋梁の曲げ剛性を推定し、10 回の走行から重量推定精度を確認した。曲げ剛性の推定については PLA 理論を用いて、回転角の応答から行った。センサは合計 5 点設置しており、両支点から 0.14m、0.80m、1.35m の点と、橋梁中央に設置した。

4. 点荷重近似法の模型橋梁実験結果への適用

加速度応答を回転角データに変換し、正則化最小二乗法を用いて 10 往路分の軸重と GVW を求めた。その推定誤差分布を **Fig. 2** に示す。ただし、ここでの正則化は Tikhonov の L2 正則化を用いており、ハイパーパラメータの決定には L-curve 法を用いて算出した。**Fig. 2** に示すとおり、軸重推定誤差は概ね 5%以内に収まっている。GVW 推定誤差は概ね 2%程度であった。

次に、既存の変位に着目する B-WIM と同定精度を比較する。既存の B-WIM に変位データを適用し、軸重と GVW を推定した。その推定誤差分布を **Fig. 3** に示す。**Fig. 3** より、既存の B-WIM による軸重推定精度は 15%程度であり、PLA 理論による B-WIM の方が既存の B-WIM よりも軸重推定精度は高いことが分かる。ただし、GVW の推定精度については概ね同程度であった。

5. 結論

本検討では、橋梁の加速度計応答を PLA 理論に適用し、軸重や車両重量の推定可能性および推定精度について検討を行った。検討を進めるにあたり、不確実性の低い模型橋梁車両走行実験を行った。軸重の算出方法としては、加速度応答を回転角データに変換した上で、正則化項を加えた最小二乗法を適用した。検討結果として、当手法によって軸重推定誤差は概ね 5%以下に収まった。この結果は、変位データを用いた既存の B-WIM よりも精度が高いことが確認され、加速度計を用いた新たな B-WIM の可能性が示唆された。



Fig. 1 In-house experiment on a model bridge under a moving vehicle.

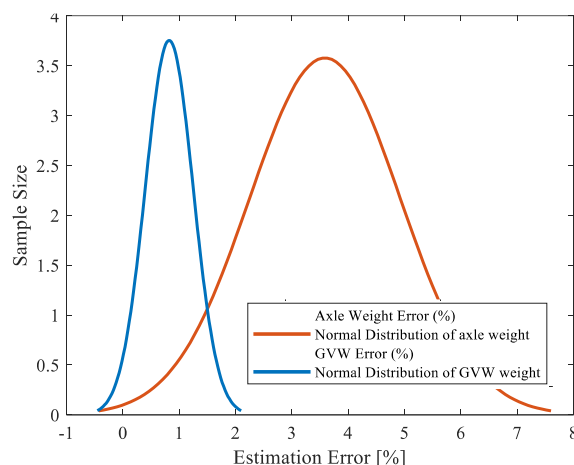


Fig. 2 Axle load and GVW estimation errors by PLA method using rotation angle of the model bridge.

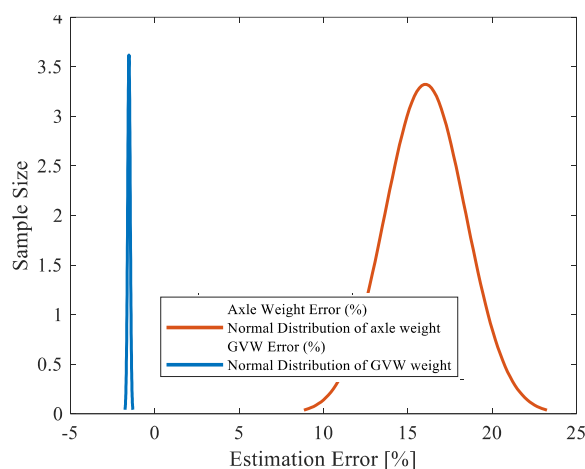


Fig. 3 Axle load and GVW estimation errors by conventional B-WIM theory using deflection of the model bridge.

参考文献

- 1) Moses, F.: Weigh-in-motion system using instrumented bridges, Transportation Engineering J, Proc. of ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233-249, 1979.
- 2) Cantero, D.: Moving point load approximation from bridge response signals and its application to bridge Weigh-in-Motion, Eng. Struct., Vol.233, p.111931, 2021.
- 3) 杉本ら: 点荷重近似法を用いた重量推定の精度検討, 2022 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, I-31, 2022.