

点荷重近似法による BWIM 精度向上を観点としたセンサ配置の決定

京都大学 学生員 ○杉本 遼哉
 京都大学大学院 学生員 横山 拓海
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. 序論

現在、日本に現存する橋梁の過半数は高度経済成長期に架設されたものであり、2031年には架設後50年を経過した橋梁の割合が約57%にも上ると推計され、橋梁維持管理が大きな課題となっている。橋の維持管理の場合、通過する交通荷重を把握することが重要である。交通荷重を測定する手法に、車両通過時に生じる橋梁部材の応答から影響線を用いて逆解析し、車両重量を測定する Bridge Weigh-In-Motion (以下、「BWIM」) が Moses¹⁾によって提案された。以後、BWIM の研究は活発に議論されており、一般的にはひずみ応答が用いられている。

本研究では、理論的には加速度、速度、変位を用いた軸重同定を可能にする、点荷重近似法 (Point Load Approximation) (以下、「PLA 理論」²⁾) を用いた BWIM を検討する。PLA 理論では、様々な荷重効果 (変位、速度、加速度、変位角、曲げモーメント) を、微積分することなく、計測データをそのまま使用することが可能であるという特長がある。

著者による既往の研究³⁾では、ローパスフィルタを施した信号を PLA 理論に適用することにより、既存の BWIM よりも高精度で重量を推定できる可能性が確認された。本研究では、PLA 理論の適応において論点となるセンサ配置の決定について検討する。

2. 点荷重近似法 (PLA)

PLA 理論とは、古典的梁理論を拡張したものであり、離散的に計測した荷重効果から、有限差分法により外部荷重 (分布荷重) を近似する理論である。橋梁応答と影響線から、最小二乗法によって軸重を求める点では、従来の BWIM と似た構造であるが、既存の BWIM とは異なる点を以下の説明する。PLA



Fig.1 Beam model for simulation with mechanical properties.

理論では有限差分法を導入するため、微分する回数を X 回、利用するセンサ数を n 個、有限差分係数を α 、荷重効果を LE 、求める重量を P 、影響線を δ_{LE} とすると、PLA 理論では、式(1)の誤差の二乗和が最小になるように重量推定する。

$$\sum_i^n \alpha_{x,i} LE(x_i) = P \cdot \delta_{LE} \quad (1)$$

式(1)は、線形式なので重ね合わせが可能であり、 N 個の車軸を考慮し、さらに時間領域にも拡張可能である。式(1)を拡張した PLA 理論の一般式が、式(2)である。

$$\sum_i^n \alpha_{x,i} \sum_j^N \frac{d^m}{dt^m} (LE_{i,j}(t)) = \sum_j^N P_j \cdot \frac{d^m}{dt^m} (\delta_{LE}(x_{P,j}(t))) \quad (2)$$

ここで、 $x_{P,j}(t)$ は、 j 番目の軸の時刻 t の位置を表し、 d^m/dt^m は時間に対する m 回微分を意味する。

PLA 理論では、時間領域にも拡張可能であり、速度、加速度を積分することなく使用できる。加えて、影響線はセンサ間の距離によって解析的に求まることから、橋長が長い橋にも適用可能となる。

3. 模型橋梁車両走行シミュレーション概要

本研究では、ノイズなどの環境要因を考慮する必要のない条件下での重量推定精度の確認を目的として、模型橋梁車両走行実験装置⁴⁾の橋梁と車両を対象にシミュレーションを行った。シミュレーションで使用した単純梁モデルと諸元を Fig.1 に示す。単純梁モデルは20の要素に分割されており、各節点にセンサを配置することを想定する。車両は、総重量21.9kg (前軸10.95kg, 後軸10.95kg)、軸間距離0.4mの2軸車両モデルである。車両速度は0.97m/sであり、サンプリング周波数は200Hzである。着目する荷重効果は、変位、速度、加速度である。橋梁応答には橋梁を4分割したその節点に3つのセンサを配置し、応答が常に0である仮想センサを支点上に配置する。仮想センサを含む合計5つのセンサの橋梁応答をシミュレートする。

Fig.2 に、シミュレーションによる変位、速度、加

キーワード BWIM, PLA 理論, 影響線, 変位, 速度, 加速度

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

速度応答を PLA に適用した軸重同定例³⁾を示す。精度よく軸重推定ができることが確認できる。

4. 推定精度の向上を観点としたセンサ配置の決定

適切なセンサ配置の決定を重量推定精度の向上の観点から検討する。PLA 理論は有限差分法に依拠することから、重量推定精度はセンサ間の距離によって変化する。本検討では、センサ間の距離と重量推定精度に関する普遍的な相関関係について検討する。普遍性の確保のため、ある特定の路面凹凸がある梁と、路面凹凸がない梁における同定精度の違いについて検討を行った。

荷重効果に変位を用いた場合について考察する。センサ配置と推定精度の関係を視覚的に容易に認識するため、影響線を用いて比較する。ここで、影響線は、センサ配置が決まると一意に求まる。センサの配置箇所について、仮想センサは支点上に固定し、実センサの設置箇所は節点番号が1から19の中から3箇所を選択して応答を求める。

橋梁に路面凹凸がある梁において、車両総重量推定精度が高い上位50パターンのセンサ配置の影響線を Fig. 3 に示す。次に、路面凹凸がない梁において、推定精度が低い下位50パターンのセンサ配置の影響線を Fig. 4 に示す。Fig.3 と Fig.4 の影響線の形状は、影響線全パターンの形状の中で比べても、酷似した形状となっている。つまり、橋長や剛性、構造が同じ橋梁においても、路面形状が変化するだけで、ある梁において最適なセンサ配置が、別の梁においては反って不適切な配置となる可能性があることが示唆される。紙面の制約で省いているが、車両総重量推定のみならず、軸重推定においても、また荷重効果が速度や加速度であっても、普遍的に推定精度が高くなるセンサ配置の特定は難しいことが分かった。

5. 結論

本検討では、PLA 理論の適応において検討すべきセンサ配置の決定について、シミュレーションによって重量推定精度の向上の観点から検討を行った。軸重および車両総重量推定において、路面形状が変化することによって最適なセンサ配置が大きく変化することが確認され、この傾向は変位以外の荷重効果においても同様の結果が得られた。結論として、推定精度向上を目的とした普遍的なセンサ配置の決定の困難さが明らかとなり、適切なセンサ配置の決

定は精度向上以外の観点から検討されるべき可能性が示唆された。

PLA 理論の軸重推定精度の向上と普遍的な推定可能性の確認を目的として、多様な橋梁形式、車両条件での重量推定について検討を進める予定である。

【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) Cantero, D. : Moving point load approximation from bridge response signals and its application to bridge Weigh-in-Motion, Engineering Structures, Vol.233, 2021.
- 3) 杉本ら：点荷重近似法を用いた重量推定の精度検討，土木学会関西支部，5月，2022.
- 4) 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.

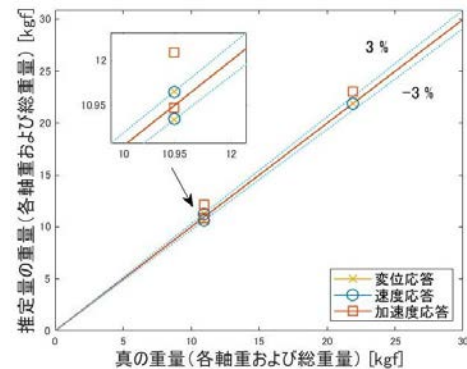


Fig. 2 Accuracy of gross vehicle weight identification from simulation.

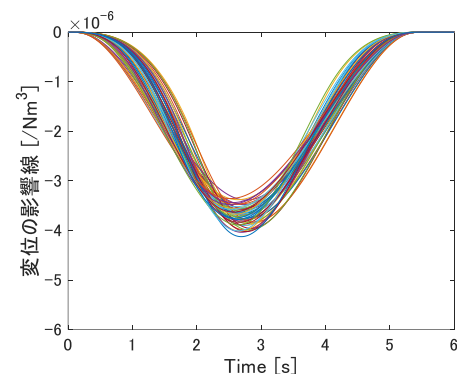


Fig. 3 50 influence lines of high accuracy sensor placement on beams with uneven road surfaces.

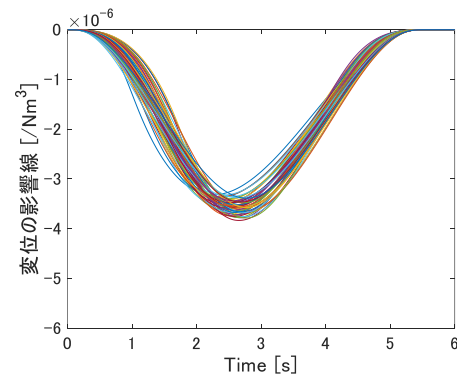


Fig. 4 50 influence lines of low accuracy sensor placement on beams with smooth road surfaces.