

第 I 部門

点荷重近似法による BWIM の可能性検討

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になっている。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、車両が通過した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が、ひずみゲージには設置にコストがかかるという問題点がある。

本研究では、画像認識技術の発展に伴い活用が期待される変位と、低コストで計測できる加速度を計測データとして用い、さらに境界条件に依存しない解析的な影響線が使用可能である点荷重近似法（Point Load Approximation）（以下、「PLA 理論」²⁾）を用いた重量推定を検討する。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。そこで本研究では、変位、速度、加速度に着目した PLA 理論による軸重および車重の推定可能性について検討を行う。

2. 理論

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。既存の BWIM では、荷重効果を LE 、影響線を δ_{LE} 、軸重を P とすると、式(1)による逆解析から軸重推定を行う。

$$LE = P \cdot \delta_{LE} \quad (1)$$

既存の BWIM に対し、PLA 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 とすると、PLA 理論では、式(2)の誤差の二乗和が最小になるように軸重を推定する。

$$\sum_i^n \alpha_{X,i} LE(x_i) = P \cdot \delta_{LE} \quad (2)$$

式(2)は、線形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(2)を拡張した、PLA 理論の一般式が式(3)である。

$$\sum_i^n \alpha_{X,i} \sum_j^N \frac{d^m}{dt^m} (LE_{i,j}(t)) = \sum_j^N P_j \cdot \frac{d^m}{dt^m} (\delta_{LE}(x_{P,j}(t))) \quad (3)$$

$x_{P,j}(t)$ は、 j 番目の軸の時刻 t の位置を表している。

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なので、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



Fig.1 Beam model for simulation with mechanical properties.

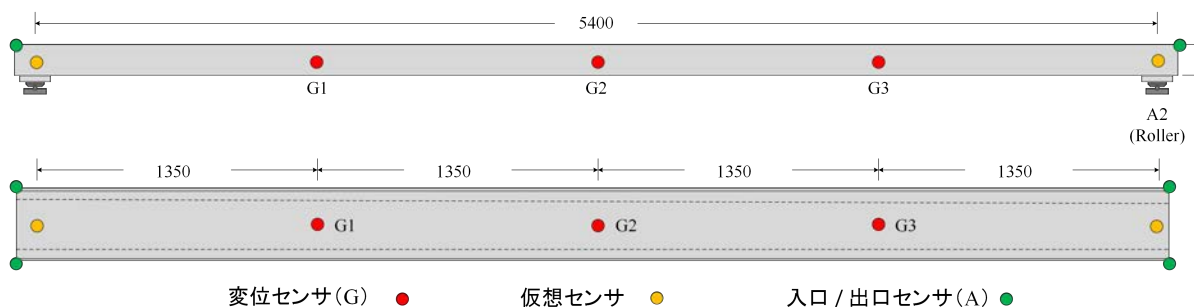


Fig.2 Model bridge and sensor deploying map.

はセンサ間の距離によって解析的に求まるので、橋長が長い橋にも適用することが可能となる。

3. 模型橋梁車両走行シミュレーションおよび実験

本研究では、PLA 理論による軸重および車重同定を目的として、シミュレーションと走行車両による動的載荷実験を模型橋梁により行った。シミュレーションで使用した橋梁と諸元を Fig. 1 に示す。模型梁の模式図を Fig. 2 に示す。シミュレーションおよび模型橋梁で用いた車両は、総重量 21.9kg(前軸 10.95kg, 後軸 10.95kg)、軸間距離 0.4m の 2 軸車両である。車両速度は、シミュレーションでは 0.97m/s、模型橋梁実験では 1.05m/s で実験している。また、サンプリング周波数はともに 200Hz である。模型橋梁実験では各走行による偏りを減らすために、各シナリオに対して 10 往路ずつ測定した。着目する荷重効果は、シミュレーションでは変位、速度、加速度であり、模型橋梁では変位である。橋梁応答計測には、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橋梁の支点上に配置する。シミュレーションおよび模型実験ともに、仮想センサを含め合計 5 つのセンサを等間隔に配置して橋梁応答を取得する。

4. PLA 理論の適用結果

PLA 理論を BWIM に導入することによる軸重および総重量推定について、シミュレーションの結果を Fig. 3、模型橋梁実験の結果を Fig. 4 に示す。ただし、各信号にはローパスフィルタを施している。シミュレーションの結果より、変位と速度応答は軸重推定誤差 3% 程度、総重量推定誤差 0.1% 以内であり、加速度の場合は軸重誤差最大 11% 程度、総重量誤差が 5% 程度であった。また、模型橋梁実験の結果は、軸重推定が 2% 以内、総重

量誤差が 1% 以内の結果となった。キャリブレーションしていない影響線を用いた既存の BWIM による変位応答を用いた重量推定と比較すると、シミュレーションでは PLA 理論と同様の精度であったが、模型橋梁実験においては、既存の BWIM による推定では軸重および総重量推定誤差が 3.8% 程度であり、PLA 理論による重量推定の方が精度が高いことが分かった。

また、以上の結果より、PLA 理論では総重量が比較的高精度で推定可能であることが確認された。

5. 結論

結論として、PLA 理論を BWIM に導入することで、既存の BWIM と比較し、高精度に重量推定が可能であることが分かった。また、本検討と追加して、センサ配置の変更による推定精度向上を検討したが、適切なセンサ配置は路面形状によって変化することが分かっており、現段階の検討においては、最適なセンサ配置を決定することは難しいといえる。

今後の検討としては、以下のことがあげられる。

- ・本検討とは異なる橋梁形式、車両条件での重量推定
- ・本検討以外の信号処理による静的な信号への近似
- ・正則化の導入による過学習対策

【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.

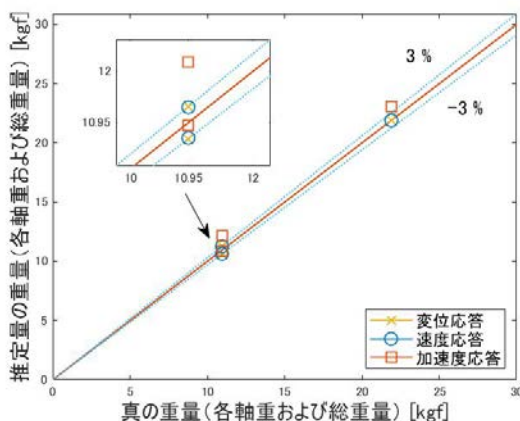


Fig. 3 Accuracy of GVW identification from simulation.

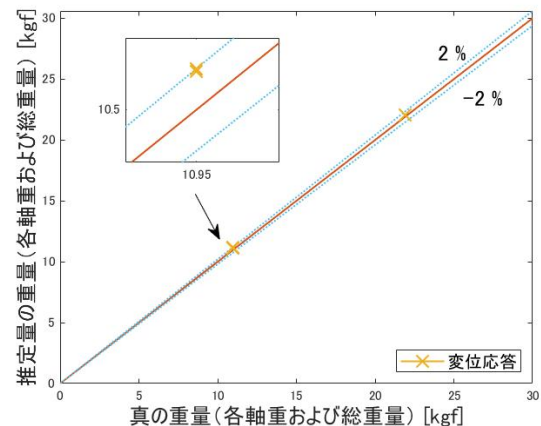


Fig. 4 Accuracy of GVW identification from experiment.