

# MEMS センサを活用した鋼道路橋の 疲労環境評価に関する研究

東京都市大学総合研究所 講師 関屋英彦

## 概要：

鋼道路橋に生じる疲労損傷は、ある一定の長さまで進展すると脆性破壊を引き起こす危険性があり、適切な維持管理が必要である。疲労損傷は、橋梁上を走行する車両による繰り返しの高い応力が主な発生要因となるため、疲労損傷に対する維持管理を行う上では、走行車両重量とその台数を把握することが重要となる。

そこで本研究では、Microelectromechanical system (MEMS) センサを活用した portable bridge weigh-in-motion (pBWIM) システムを構築し、特に複数の車両走行時を対象とし、その実用性を検証する。具体的には、供用中の橋梁にて現場計測を実施し、複数の車両が同時に対象橋梁上を走行した際の変位応答を MEMS センサを用いて計測した加速度記録から算出し、その精度を検証した。複数の車両が走行した際の変位応答に基づき、各車両の軸重量を推定する場合、その推定精度が低下することが懸念される。そこで、本研究では、車両通過時における桁端部における加速度応答を利用し、軸重の再推定を実施した。

キーワード: *Bridge Weigh-In-Motion*, MEMS センサ, 変位応答, 軸重

## 1. はじめに

鋼道路橋に生じる疲労損傷は、ある一定の長さまで進展すると脆性破壊を引き起こす危険性があり、適切な維持管理が必要である。疲労損傷は、橋梁上を走行する車両による繰り返しの高い応力が主な発生要因となるため、疲労損傷に対する維持管理を行う上では、走行車両重量とその台数を把握することが重要となる。

そこで、本研究では、Microelectromechanical system (MEMS) センサを活用した portable bridge weigh-in-motion (spBWIM) システムを構築し、その実用性を検証する。MEMS センサは、小型であり、マグネット治具等によって、簡易に鋼橋への取り付けが可能であるため、施工性に優れている。さらに、MEMS センサは低消費電力のため、電力確保の面では、ひずみゲージ等の計測機器とは異なり、長期的な計測に適した計測機器である。

本研究では、特に複数の車両走行時を対象とし、供用中の実橋梁における現場計測を実施することによって、pBWIM システムの実用性を検証する。具体的には、まず複数の車両が走行した際の変位応答を MEMS センサを用いて計測した加速度記録から算出し、その精度を検証する。算出した複数の車両走行時の変位応答に基づき、各車両の軸重量を推定する場合、その推定精度が低下する

ことが懸念される。そこで、本研究では、車両通過時における桁端部の加速度応答を利用し、軸重の再推定を行い、その実用性を検証する。

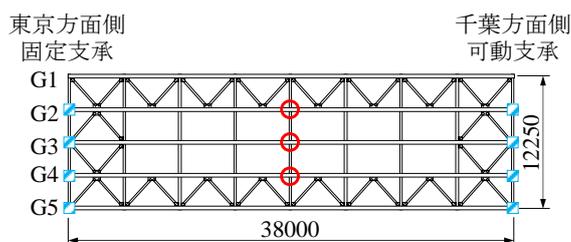
## 2. 試験橋梁および計測機器

試験橋梁および計測機器設置位置を図-1 に示す。試験橋梁は、3 車線の鋼単純剛性 5 主 I 桁橋である。

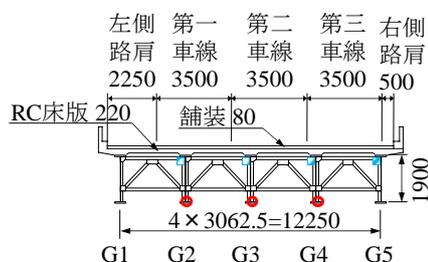
本研究では、MEMS 加速度センサを用いて、橋軸中央部の変位応答を計測し、その変位応答から Moses が提案した BWIM の理論<sup>2)</sup>に基づき、車軸重を推定する。

MEMS 加速度センサの設置位置を図-1(a), (b) に示す。pBWIM システムでは、図-1(a), (b) に示す橋軸中央部に設置するセンサにて加速度記録を計測し、その加速度記録から変位応答の算出を行う。MEMS 加速度センサを用いて計測した加速度記録から変位応答を算出する際に必要となる車両が橋梁へ進入するタイミングおよび車両が橋梁から退出するタイミングの検知は、図-1(a), (b) に示す MEMS 慣性センサを使用した。

MEMS 加速度センサと MEMS 慣性センサの仕様を表-1 に示す。本研究では、MEMS 加速度センサにより計測した変位応答の精度検証を目的とし、MEMS 加速度センサを設置した位置の近傍において接触式変位計による変位応答計測も実施した。



(a) 平面図



(b) 正面図（主桁端部，可動支承側）

- MEMS加速度センサ（変位算出用）と接触式変位計
- MEMS慣性センサ（車両検知用）（進入側、退出側）

図-1 試験橋梁<sup>1)</sup>

表-1 変位算出用加速度センサおよび車両検知用加速度センサの仕様

	型番	加速度 範囲 [G]	周波数 帯域 [Hz]	サンプリング 周波数 [Hz]	分解能 [μG]	自己ノイズ (平均値) [μGrms/√Hz]
変位算出用センサ	SEIKO EPSON M-A550-AC	±5.0	DC-20 (-6dB)	100	1.0	0.8
車両検知用センサ	SEIKO EPSON M-G550-PC	±3.0	DC-148 (-3dB)	500	125	100

### 3. pBWIM システム

pBWIM システムでは、まず軸重と軸距が既知の荷重車試験を実施し、対象橋梁の影響線の算出を行う。次に、(1)得られた影響線、(2)走行車両重量による変位応答、(3)車両検知応答から走行車両の車軸重を推定する。MEMS センサによる pBWIM システムは、ひずみゲージによる BWIM システムと同様に、少ない計測点にてシステムの構成が可能である。

### 4. 複数車両走行時における変位応答算出結果

変位応答は、筆者らが提案している自由振動仮定法<sup>3)</sup>を用いて、MEMS センサにて計測した加速度記録から算出した。なお、変位応答の算出は、計測データを全自動処理することによって実施した<sup>1)</sup>。複数の車両が走行した際の変位応答は、先頭の車両が橋梁に進入した瞬間から最後の車両が橋梁から退出した瞬間までを強制振動区間

とし、変位応答を算出している。

図-2 より、MEMS センサを用いて計測した変位応答と、接触式変位計を用いて計測した変位応答は良く一致しており、複数の車両が走行した場合においても変位応答を精度良く算出できることが確認できた。

### 5. 複数車両走行時における軸重の推定

走行車両の軸重の推定は、Moses が提案した BWIM の理論<sup>2)</sup>に基づき、推定する。しかしながら、車両が走行した際の変位応答から影響線を用いて、軸重の推定を行う場合、総重量の推定精度に比べ、軸重の推定精度が低いことが課題である。さらに、複数の車両が走行した際、重量の分配が出来ないことが課題となっている。

そこで、本研究では、総重量を推定した後、車両通過時の応答を利用して、軸重の再分配を実施し、複数の車両が走行した際の重量の推定を行う。なお、全ての車両走行に対して、G3 桁に対する影響線と G3 桁の変位応答

のみを使用する。

図-3(a), (b)に軸重の再配分前後の軸重推定結果を示す。図-3(a)より、軸重の再配分前は、軸重が負の値になっているケースが多く確認できるが、図-3(b)では、軸重の値は全て正の値となっており、軸重の推定精度が向上できていると考えられる。今後は、重量が既知の荷重車が複数台走行した際の結果の分析を進め、複数台の車両が走行した際の重量推定精度を検証し、疲労環境の評価を実施する。

## 6. まとめ

本研究では、複数の車両走行時を対象とし、供用中の実橋梁における現場計測を実施することによって、pBWIMシステムの実用性を検証した。

まず、複数の車両が走行した際の変位応答算出精度に関しては、強制振動区間を先頭の車両が橋梁に進入する瞬間から、最後の車両が橋梁から退出する瞬間とすることによって、複数台の車両が同時に走行した場合においても、加速度記録から変位応答を精度良く算出できることが示された。

次に、Moses が提案した BWIM の理論に基づき、総重量を推定した後、車両通過時の応答を利用して軸重の再配分を実施し、複数の車両が走行した際の軸重量の推定を行った。その結果、軸重の再配分前は、軸重が負の値になっているケースが多く確認できるが、再配分後は軸重の値は全て正の値となり、軸重の推定精度が向上できていると考えられる。

今後は、複数の車両が走行した際の軸重および車両重量の推定精度を検証し、得られた車両重量データおよびその通行量に基づき、疲労環境の評価を実施する。

## 謝辞

本研究の現場計測は、首都高速道路株式会社の本ノ本様、平野様にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 関屋英彦,小西拓洋,木ノ本剛,三木千壽: MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1, Vol.72, pp.364-379, 2016.
- 2) Moses, F: Weigh-in-motion system using instrumented bridges., Journal of Transportation Engineering, Vol.105, pp.233-249, 1979.
- 3) 関屋英彦,木村健太郎,三木千壽: 橋梁の加速度記録から変位応答算出を行う一方法, 土木学会第 70 回年次学術講演会, I-409, pp.817-818, 2015.

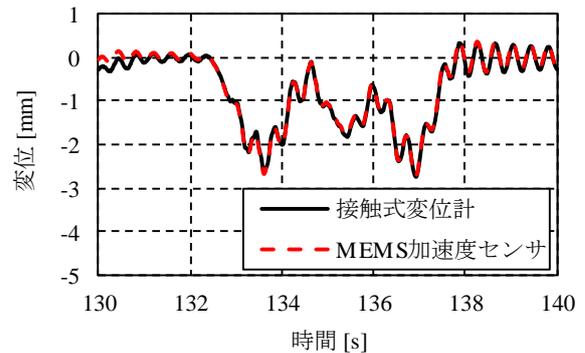
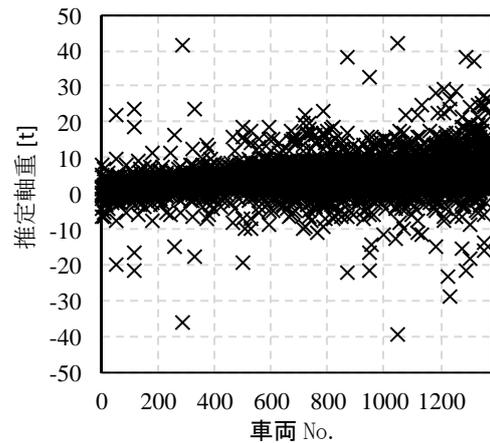
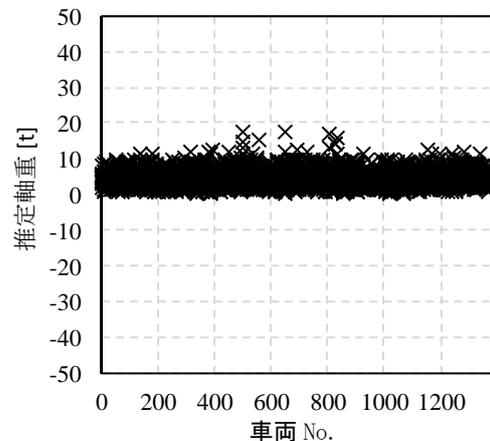


図-2 複数の車両走行時の変位応答算出例



(a) 軸重の再配分前



(b) 軸重の再配分後

図-9 軸重の再配分前後の比較