

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18105

研究課題名（和文）橋梁のグローバル挙動逆算定に基づく省力形重量車両検出システムの開発

研究課題名（英文）Development of Acceleration-Record-Based Bridge Weigh-In-Motion

研究代表者

鈴木 啓悟 (Suzuki, Keigo)

福井大学・学術研究院工学系部門・講師

研究者番号：40546339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は加速度応答計測に基づく橋梁車両重量計測手法を構築した。コンクリート床版の活荷重応答は局所的な応答であるがゆえ、主構造と比較して応答周波数領域が高い。そのため、一般的な加速度計を用いても比較的精度良く記録できる周波数領域を対象として使用できる。加速度記録は2回の積分処理を経て変位応答記録へと変換される。このとき、数値のドリフトを避けるため、カルマンフィルタを適用した。カルマンフィルタをコントロールする3つのパラメータは、変位計を用いた床版のたわみ計測記録と最も近い結果となるパターンを用いた。加速度BWIMの結果、車両速度が比較的速くない状況において良好な重量算出が可能となった。

研究成果の概要（英文）：This study developed acceleration-response based Bridge Weigh-In-Motion (BWIM). The acceleration responses of concrete deck slab due to Live-load in the frequency domain is higher than those of beam; therefore, generic accelerometers can be applied for the developed BWIM. Acceleration records are converted to deflection data with twice trapezoidal integration process. Drift of the base line and noise effects in the process of integration were eliminated by Kalman filter. Three parameters that control the Kalman filter were determined with the integrated deflection data. The integral calculation was performed for each parameter change, and a parameter combination showing the calculation result which had been the closest to the real RC deck's deflection among them was used. The calculated slab deflection results showed the good agreement with the records of displacement meters. The acceleration-response based BWIM results showed the good results when in not high speed.

研究分野：土木工学

キーワード：車両重量 加速度応答 簡易計測

1. 研究開始当初の背景

重量車両の高頻度通行を原因として重交通路線を中心に疲労損傷が生じている。原因となる重量車両の交通実態を把握する手法は大きく分けて2手法が存在する。1つは、通行料金を徴収するゲートにおいて舗装内部あるいは舗装直下に敷設された軸重計測システムであり、もう1つは、橋梁の活荷重応答から車両重量を算出する Bridge-Weigh-In-Motion(以下 BWIM と称する)である。

BWIM は、橋梁部材に設置したひずみゲージから取得できる活荷重ひずみを利用するものであり、路面の工事を必要としないために、準備から測定に至るまで、交通流を妨げないことが利点である。しかしながら BWIM は主にひずみゲージを利用して橋梁の応答を定量化するため、ひずみゲージの設置やリード線の配線等、設置に時間と労力を要するといった欠点があるほか、計測時にはデータ記録用デバイス用外部電源の確保も考慮しなければならない。さらに、ひずみゲージの設置には層状に塗布された塗膜を除去するため、BWIM の計測終了後には塗装の再施工をする必要があるなど、計測上の点において労力が大きい。よって、より簡易に実施できる手法の開発が求められる。

2. 研究の目的

本研究はひずみ計測と比較して計測労力が大幅に低減できる加速度計測に着目する。重量車両が通行する際に生じる橋梁部材の加速度応答を基に通行する車両重量を算定する手法を提案する。

3. 研究の方法

橋梁の応答で荷重値と線形関係にあるのはたわみ量である。従って車両通行時に車両の位置とたわみ量を把握することで、車両重量を算出できる。加速度計測から変位応答を算出するプロセスを経ることで、車両重量算出に至る。

一般的に活荷重たわみが最も大きく生じるのはスパン中央部である。ただし、スパン中央部のたわみは橋梁の全体挙動に基づくため、車両の進入から退出まで応答が生じる。すなわち応答開始から応答が収束するまでの時間が長く、スパン 30m 程度の一般的な橋梁でいえば、応答が開始から収束するまで 1 秒以上の長周期変位動、すなわち低周波振動となることが多い。加速度計測において、1Hz 未満の低周波振動応答を計測することは計測精度の点で短所となり得る。そこで本研究は影響線長の短い床版応答の加速度応答を利用する。

図-1 に対象橋梁の平面図と設置したセンタ一の位置を示す。橋長 36.0m、幅員 9.2m、車線数 2、RC 床版 4 主桁鋼鈹桁橋梁、単純支持形式である。加速度センサは橋梁端部付近の床版下面に 1 車線あたり 2 箇所設置した。これらの応答時間差をから車両の走行速度を算出する。また、参照となる床版変位の取得を

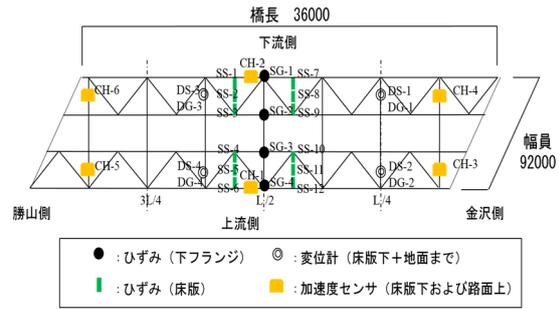


図-1 橋梁平面図およびセンサ配置

目的として、主桁に設置した変位計による床版変位応答を計測した。さらにひずみ応答に基づく BWIM を同時に実施するため、ひずみゲージを設置した。

加速度から変位への変換には 2 回の積分処理を要する。サンプリングレート 200Hz の離散加速度データを台形積分といった直接的に積分処理を施すと、データ全体的なドリフトなどの誤差が生じやすい。これを考慮し、本研究はカルマンフィルタを積分処理に付加することで、誤差の発生を抑えることとした。

カルマンフィルタは状態方程式(1-1)及び観測方程式(1-2)によって定義され、初期値を正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  と仮定し定めると、初期値に対し、①状態方程式の計算、②観測方程式の計算、を繰り返すことにより状態空間モデルを推定する手法である。

$$x_t = bx_t^{true} + cw \quad (1-1)$$

$$y_t = ax_t^{true} + v \quad (1-2)$$

上式において  $x_t$  と  $y_t$  の真値を  $x_t^{true}$ 、 $a$ 、 $b$  を拡大係数、 $c$  をカルマンゲインの推定値とし、 $x_t, y_t$  それぞれの誤差を  $cw, v$  とする。観測方程式、状態方程式はいずれも正規分布を利用しており、正規分布は平均値  $\mu$ 、分散  $\sigma^2$  のみで決まる確率分布なので、観測値を得た結果、平均値、分散がどのように更新されるかが重要となる。

初期状態(事前分布)  $N(\mu, \sigma^2)$  は観測方程式を用いて、事後分布  $N(\mu', \sigma'^2)$  へ更新される。その際に平均値  $\mu$  は  $\mu'$  へ式(1-3)のように更新され、分散  $\sigma^2$  は  $\sigma'^2$  へ式(1-4)のように更新される。

$$\mu' = \frac{\mu\tau^2 + \sigma^2 y}{\tau^2 + a^2\sigma^2} \quad (1-3)$$

$$\sigma'^2 = \frac{\sigma^2\tau^2}{\tau^2 + a^2\sigma^2} \quad (1-4)$$

また事後分布  $N(\mu_{t-1}, \sigma_{t-1}^2)$  は状態方程式を用いて、新たな事前分布  $N(\mu_t, \sigma_t^2)$  へ更新される。時刻が  $t-1$  から  $t$  へ変化するとき、平均値  $\mu_{t-1}$  は  $\mu_t$  へ、式(1-5)のように更新され分散  $\sigma_{t-1}^2$  は  $\sigma_t^2$  へ式(1-6)のように更新される。

$$\mu_t = b\mu_{t-1} \quad (1-5)$$

$$\sigma_t^2 = b^2\sigma_{t-1}^2 + c^2\rho^2 \quad (1-6)$$

カルマンフィルタを用いる際、実際の観測

値と単純な推定値(理論値)との差分の比率  $c$ (カルマンゲイン)および状態方程式におけるノイズの分散( $r = \rho^2$ ), 観測方程式におけるノイズの分散( $t = \tau^2$ )がパラメータとなり, その値の設定がフィルタをかける際重要となる。

本研究における変位応答の算出手順を下記に示す。

- ハイパスフィルタにより主桁の周波数帯を削除
  - カルマンフィルタによるノイズの削除
  - 加速度応答の一階積分を行うことで速度を算出
  - 積分時のノイズを取り除くため, カルマンフィルタ処理
  - c)同様に速度成分を一階積分し, 変位応答を算出
  - e)同様に積分時のノイズを取り除くため, カルマンフィルタ処理
- b), d), f)の3回のフィルタリングに際して, コントロールパラメータは $c, \rho, \tau$ ( $0 \leq c, \rho, \tau \leq 1$ )の最も適する数値を固定して使用した。パラメータはa)~f)の処理に基づいて10,000パターンを計算し, 変位計の計測記録と最も誤差二乗和が小さい変位となったパラメータを決定した。

以上の処理方法を予め軸重が既知な重量車両(表-1)を用いた走行試験記録に対して実施し, 加速度応答からの車両重量算出を行う。

表-1 試験車両の軸重 (kN)

第1軸	第2軸	第3軸	総重量
70.4	84.7	84.3	239.4

#### 4. 研究成果

得られた加速度応答履歴の一例を図-2に示す。試験車両が47km/hで走行した状況下で, 床版下面に生じる加速度レベルは $0.8\text{m/s}^2$ 以下であった。加速度履歴を基に算出した変位応答履歴を図-3に示す。計測変位は変位計で記録した床版変位応答で主桁との相対変位を示している。3軸車両が計測位置に近づくとつれて床版がたわみ, 後2軸が計測点を通過時に最大のたわみを記録した。実線で示した床版加速度応答からカルマンフィルタを利用して算出した応答は比較的良好に変位履歴を算出できていることがわかる。

図-4に下流側車線走行時の床版変位最大値, 図-5に上流側車線のそれを試験回ごとにまとめた結果を示す。本手法の適用により算出変位は良好な結果を示している。

BWIM 処理に際しては, 変位応答影響線を, 算出する必要がある。影響線は単位荷重, 本研究では10kNの移動によって生じる変位応答の波形である。導出には館石らの研究で提案されたフーリエ変換を用いた手法から算出する。また, 走行速度により活荷重が影響域に及ぼす時間が異なるため, 影響線を速度に応じて時間領域上で伸縮させる。各軸通過時刻歴に合わせて影響線を時間軸上で配置し,

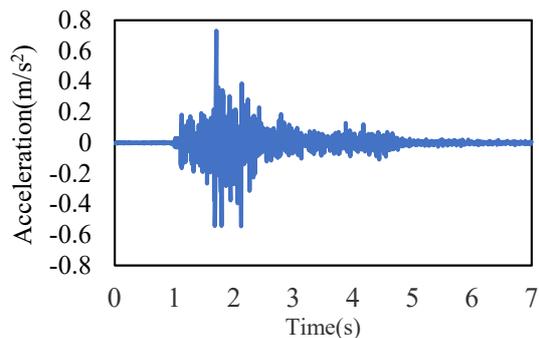


図-2 床版下面加速度応答履歴

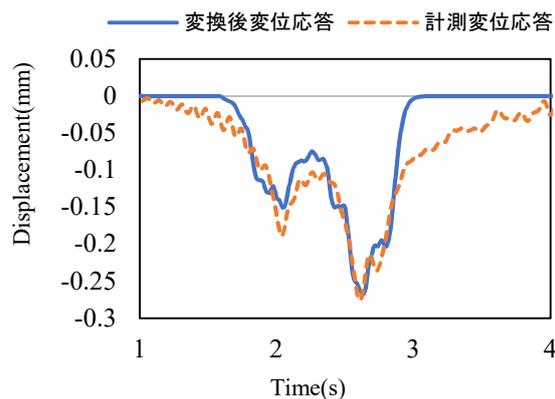


図-3 算出した床版変位応答履歴

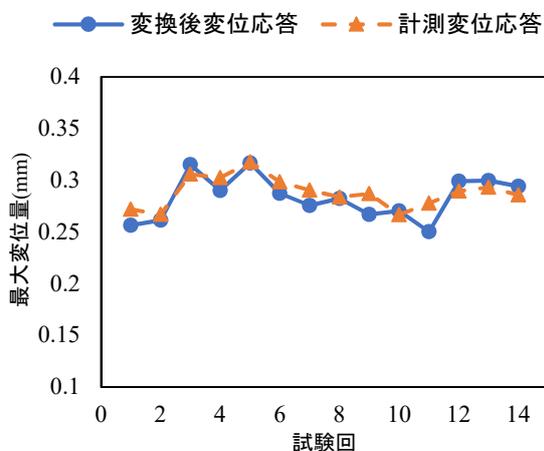


図-4 算出した最大床版変位(下流側車線)

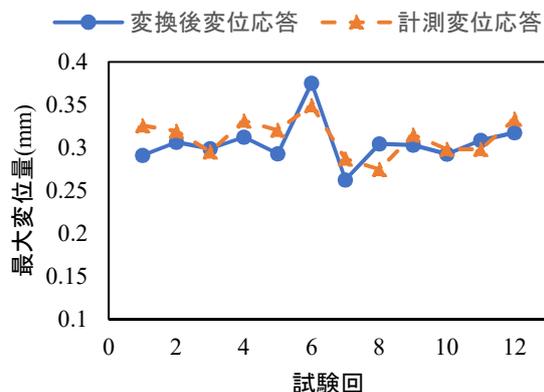
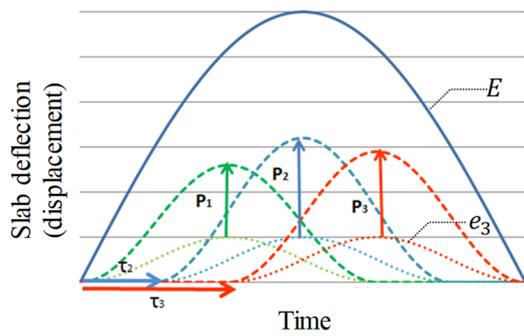


図-5 算出した最大床版変位(上流側車線)



$$E = P_1 e_1 + P_2 e_2 + P_3 e_3$$

$$G = P_1 + P_2 + P_3$$

$e_i$ : 第*i*軸影響線

$P_i$ : 第*i*軸軸重

$\tau_i$ : 第1軸と第*i*軸の時間差.

$E$ : 床版変位応答

$G$ : 車両総重量

図-6 BWIM 計算の概念図

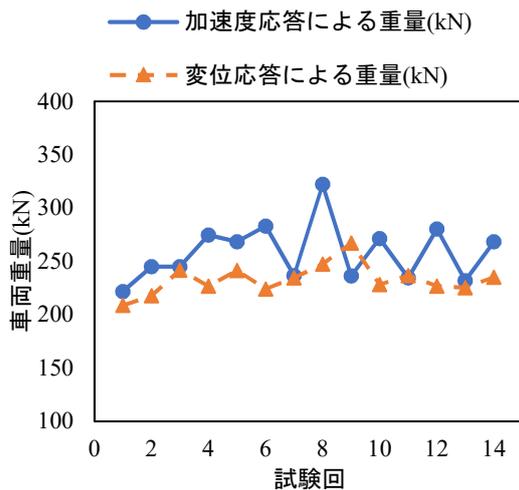


図-7 下流側斜線 BWIM 結果

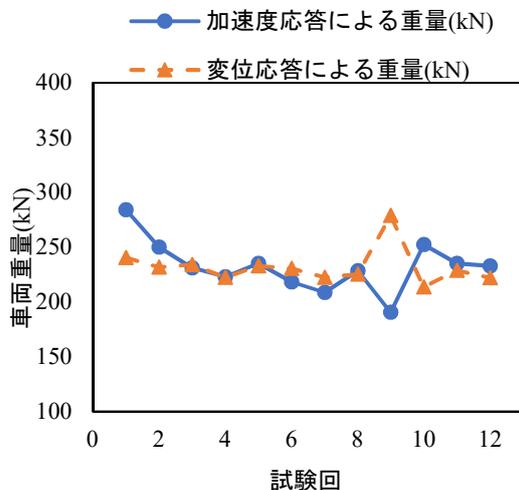


図-8 上流側斜線 BWIM 結果

カーブフィッティング(図-6)する. この時に各軸通過に合わせて配された影響線を線形倍するが, その倍数が軸重となり, 軸重を合計して車両総重量を得る.

図-7, 図-8 に算出した重量の結果を示す. 下流側車線では算出重量に誤差が生じているものの, 上流側車線においては, 比較的良好な結果となった. 下流側車線の誤差が大きかった試験回(偶数回)は車両を時速 60km/h で走行させたケースであり, 40km/h の走行記録を基に算出した影響線作成ケースと比較して, 算出した変位応答波形に差が生じた可能性が考えられる. 図-3 より, 加速度ベースの算出変位応答は, 波形の立ち上がりと収束が緩やかな傾向を示しており, 実変位応答では生じていないことがわかる. 速度が高いときにはフィルタリングのパラメータを変更するなどの処理が必要となる可能性があり, この点は課題である.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

K. Suzuki, K. Kawai, S. Fukada, Development of Bridge Weigh-In-Motion Using Acceleration Response of Concrete Deck Slab, Proceedings of SHMII-8, 査読有, 2018, 8 pages.

[学会発表] (計 1 件)

Keigo Suzuki, Development of Bridge Weigh-In-Motion Using Acceleration Response of Concrete Deck Slab, The 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2017

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 啓悟 (SUZUKI, Keigo)

福井大学・学術研究院工学系部門・講師

研究者番号: 40546339