

加速度計測に基づく橋梁たわみ推定の高精度化と実橋梁における検証

東京大学

学生会員

○李 相健

正会員

長山智則

横浜国立大学

正会員

西尾真由子

1. はじめに

橋梁たわみは設計時に使用性の観点から規定され支配的になることがあり、維持管理時においても実働活荷重の推定に活用が検討されるなど重要な物理量であるものの、直接的な計測は難しい。加速度計測値を2回積分する手法も多く提案されているが、積分誤差の蓄積が本質的な課題である。そこで、Zhang ら¹⁾は、加速度と傾斜角を観測量変数とし、モード変位、速度、加速度を状態変数とするカルマンフィルタを設計し、たわみ推定する方法を提案した式(1)–(6)。しかし、仮定したモード形と実モード形に乖離がある場合、や橋軸方向加速度成分が大きい場合にたわみ推定に誤差が生じる。計測した傾斜角を用いてモード形のキャリブレーションを行ったが、特に支間長が短い橋梁においてたわみ推定の精度が低かった。本研究では、たわみ推定誤差の原因を明確にした上、たわみ推定アルゴリズムの改善策を提案し、それを実橋梁で実証することを目的とした。

$$X_k = F * X_{k-1} + v_k \quad (\text{状態方程式}) \quad (1)$$

$$Z_k = H * X_k + w_k \quad (\text{観測方程式}) \quad (2)$$

$$z_{ak} = a_k = [0 \ 0 \ \phi_1 \ \cdots \ 0 \ 0 \ \phi_3] X_k + \text{error} \quad (\text{加速度観測方程式}) \quad (3)$$

$$z_{\theta k} = \theta_k = [C_1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ C_3 \ 0 \ 0] X_k + \text{error} \quad (\text{傾斜角観測方程式}) \quad (4)$$

$$X_k = [q_{1,k} \ \dot{q}_{1,k} \ \ddot{q}_{1,k} \ \cdots \ q_{3,k} \ \dot{q}_{3,k} \ \ddot{q}_{3,k}]^T \quad (\text{状態変数}) \quad (5)$$

$$z_k = d_k = [\phi_1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ \phi_n \ 0 \ 0] X_k \quad (6)$$

ただし、 ϕ_i は*i*次モードのモード位相、 C_i は*i*次モードの傾斜角のモード位相、 d_k はたわみである。

2. 数値解析による推定誤差の原因の把握

たわみ推定誤差の原因の1つである、橋軸方向の加速度の影響を数値解析で明らかにした。実橋梁で計測される傾斜角 θ には、重力加速度の射影である傾斜角成分 θ' と、橋軸方向の加速度運動による成分 $\ddot{u}/g$ が含まれる(式7)。鋼2主桁連続箱桁橋の有限要素モデルを構築し、橋梁たわみに伴い発生する橋軸方向の加速度運動を再現し、その影響を明確にした。その結果、速度の増加と共に橋軸方向の加速度が増加し、たわみ推定結果にも影響を与えることが確認できた(図1)。キャリブレーションを行っても推定精度の改善は限定的である。

$$\theta = \theta' + \ddot{u}/g \quad (7)$$

θ : 計測される傾斜角, θ' : 実際の傾斜角 (静的成分), $\ddot{u}/g$: 橋軸方向の加速度による傾斜角 (動的成分)

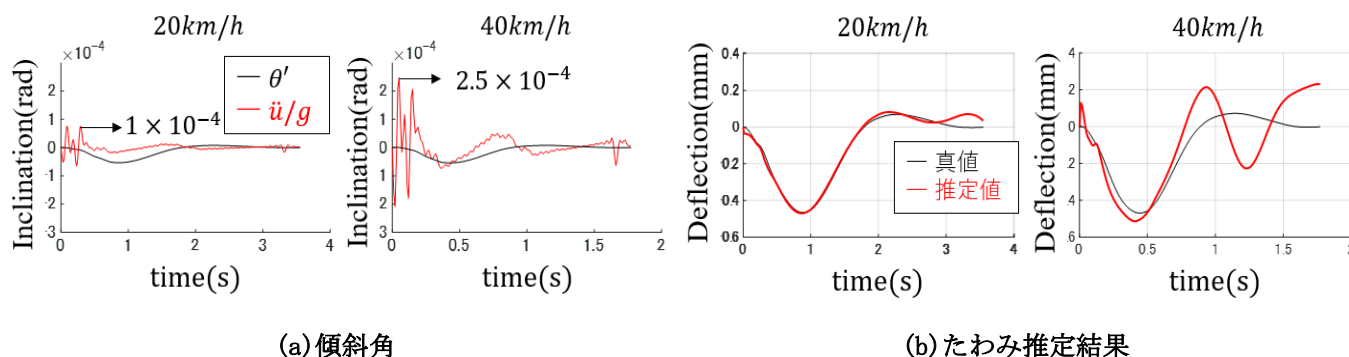


図1 橋軸方向の加速度の影響 (走行速度 20km/h と 40km/h 相当)

3. たわみ推定アルゴリズムの精度向上策の提案と数値解析での検証

既往研究のアルゴリズムに欠如していた、平滑化²⁾を、モード形キャリブレーションと合わせて適用したと

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学橋梁研究室 TEL 03-5841-6097

ころ(図2), たわみ推定の精度が向上されることが確認できた。しかし, 三つの異なる車両走行速度(走行速度 20, 30, 40 km/h) のデータに対して検証を行ったところ, キャリブレーションに適用した波形とは異なる走行速度下のデータにたわみ推定を適用すると必ずしも推定精度が高くないことが分かった。そこで, 最大速度と最小速度の波形を含めた複数の波形でキャリブレーションし, 精度が向上することが確認できた(図3)。

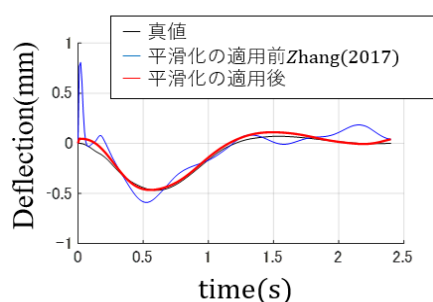


図2. 平滑化の適用

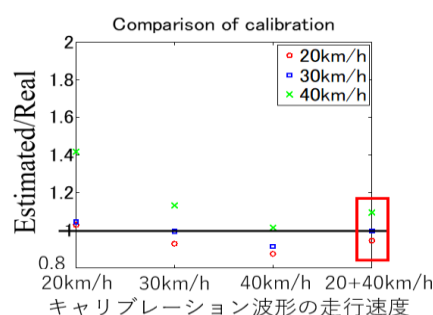
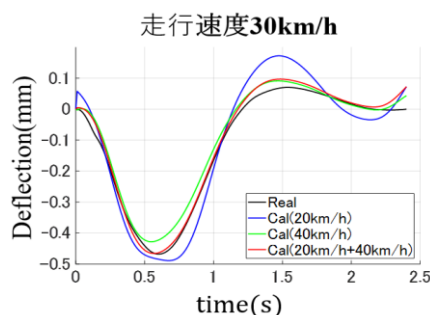


図3. 複数の波形のキャリブレーションによるたわみ推定結果

4. 実橋梁での計測の概要

提案した手法を, 実橋梁において検証を行った。無線加速度センサーを利用して, 計測点 5 点において加速度と傾斜角を測定した。そして, サンプリングモアレカメラを用いて橋梁のたわみの真値を測定した。

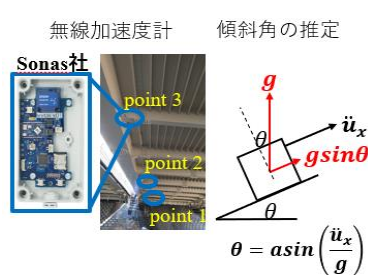


図4. 無線加速度計



図5. サンプリングモアレカメラ

5. 実橋梁での提案手法の適用結果

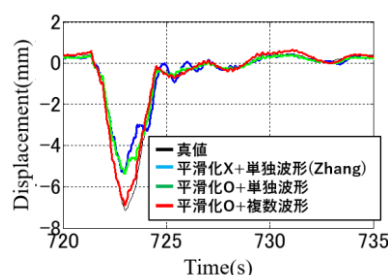


図6. たわみ推定結果

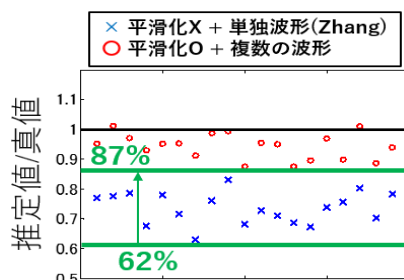


図7. たわみ最大値の比較

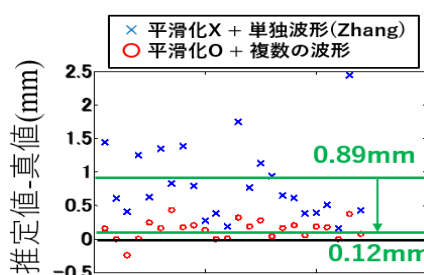


図8. 鉛直上方向のたわみ推定誤差

数値解析で検証した, 平滑化と複数波形でのキャリブレーションを適用した上, 既往研究のたわみ推定結果との比較を行った(図6)。比較指標としては, 鉛直下向きなたわみ最大値と, 除荷時に生じる鉛直上方向のたわみとした。最大変位 2mm 以上なたわみについてこれら 2 指標を算出したところ, 最大たわみの最低精度が 62%から 87%まで向上し(図7), 鉛直上方向へのたわみ推定誤差は 0.89mm から 0.12mm に低下した(図8)。

6. 結論

数値解析を通して橋軸方向の加速度運動成分がたわみ推定に大きく影響することを明らかにし, 実橋梁計測データに平滑化と複数波形に対するキャリブレーションを適用することによって, たわみ推定の精度が向上することを示した。

謝辞 本研究を進めるにあたり, 横浜市道路局橋梁課 宮岸涼氏, 大島尚樹氏に貴重なご意見を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献 1) 長山智則, Zhang Chunbo : A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement, 構造工学論文集, Vol63, pp.209-215, 2017, 2) Rauch, Herbert E, F. Tung, and Charlotte T. Striebel : Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems, AIAAjournal 3.8, pp.1445-1450, 1965