

多点加速度計測による橋梁変位と相対ひずみの同定

京都大学大学院工学研究科 教授 金 哲佑

1. はじめに

橋梁の異常検知や維持管理における性能推定を目的として、振動ヘルスマモニタリングの有効性は長年にわたり研究されてきた。振動特性に着目した異常検知の可能性については多く報告されている一方で、振動特性を用いた定量的な構造的な性能評価は困難であるとの認識が強くなっている。橋梁維持管理において、構造的な性能を直接的に評価可能な指標である変位（たわみ）は極めて重要な物理量である。しかし、変位計測には固定点が必要であるため、適用可能な対象が限定されるという課題がある。近年では、レーザ変位計や画像処理技術を用いた変位同定が可能となっているものの、高価であり、長期計測には必ずしも適していないのが現状である。

本研究は、振動モニタリングを通じた橋梁の構造的な性能評価を目的とし、加速度からたわみ角を導出することで、橋梁の変位およびひずみを同定可能とする手法の実証を目指すものである。加速度の時間積分において初期値が不明な場合に変位同定が極めて困難であるという従来の課題に対し、本研究では、加速度から得られるたわみ角を空間的に積分することでこれを克服することを目指している。すなわち、空間積分における積分定数に対して、力学的に自明な橋梁の境界条件（ピン支点およびローラー支点における変位および曲げモーメントがゼロ）を適用することにより、変位を算定可能である点に着目している。さらに、たわみ角の空間差分を用いたひずみ推定についても検討対象とする。

具体的には、「橋軸方向の加速度から空間的に連続した橋軸方向のたわみ角曲線を同定し、その空間積分によって変位を推定する手法」および「たわみ角曲線の空間差分により、加速度からひずみを同定する手法」の妥当性について検討を行う。図1に本提案手法の概念を示す。

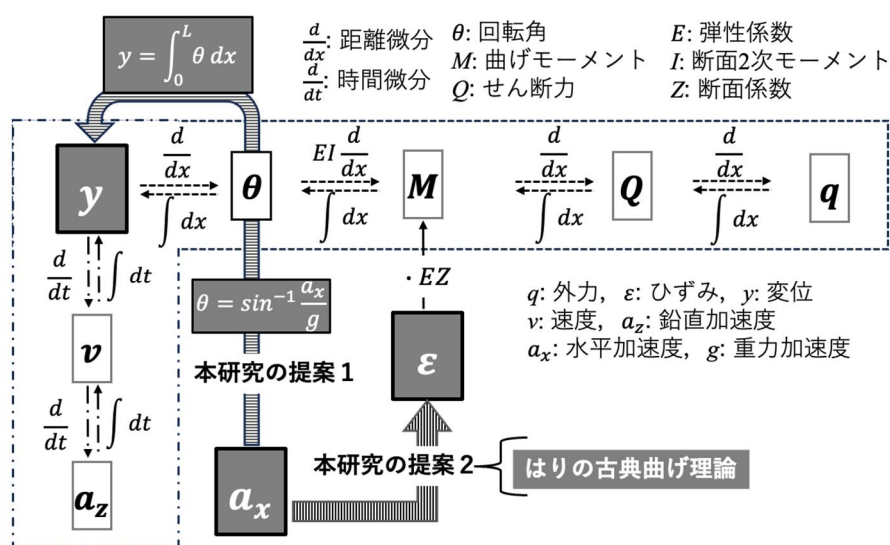


図1 橋軸方向の加速度計測による「たわみ角曲線」、「たわみ」および「ひずみ」の同定概念

2. 梁の多点加速度計測によるたわみとひずみ推定手法

「加速度計測に基づく橋梁のたわみとひずみ同定法」のためのの中核を担う研究項目は「加速度を用いた回転角の時系列の同定」と「回転角の時系列を用いた橋軸方向の空間的に連続なたわみ角曲線の同定」の 2 点である。空間的に連続なたわみ角曲線が精度良く同定できれば、梁の古典曲げ理論に基づき「たわみ角曲線の空間積分により橋梁のたわみ」を、「たわみ角曲線の空間差分により橋梁のひずみ」を同定することができる。ただし、共用中の橋梁の現有の中立軸の把握には別途の実験を必要とするなど容易でないことから、設計図書から中立軸を改定し、ひずみを求め、そのひずみの相対的な変化から構造物の性能評価を行うことができる。このような点から、本研究では「相対ひずみ」と称している。曲げ剛性 EI が既知であれば、曲げモーメントやせん断力の推定も可能であることは特記すべき点である。

3. 妥当性検証

提案週報の妥当性検証のために，RC 梁の載荷実験を行った．図 2 に RC 梁の試験体の諸元と加速度計（B1～B9），変位計（A1～A9）と載荷位置（L1 と L2）を示す．図 2(c)は RC 梁試験体のセンサ設置写真の一部を示している．また，載荷シナリオを表 1 にまとめる．

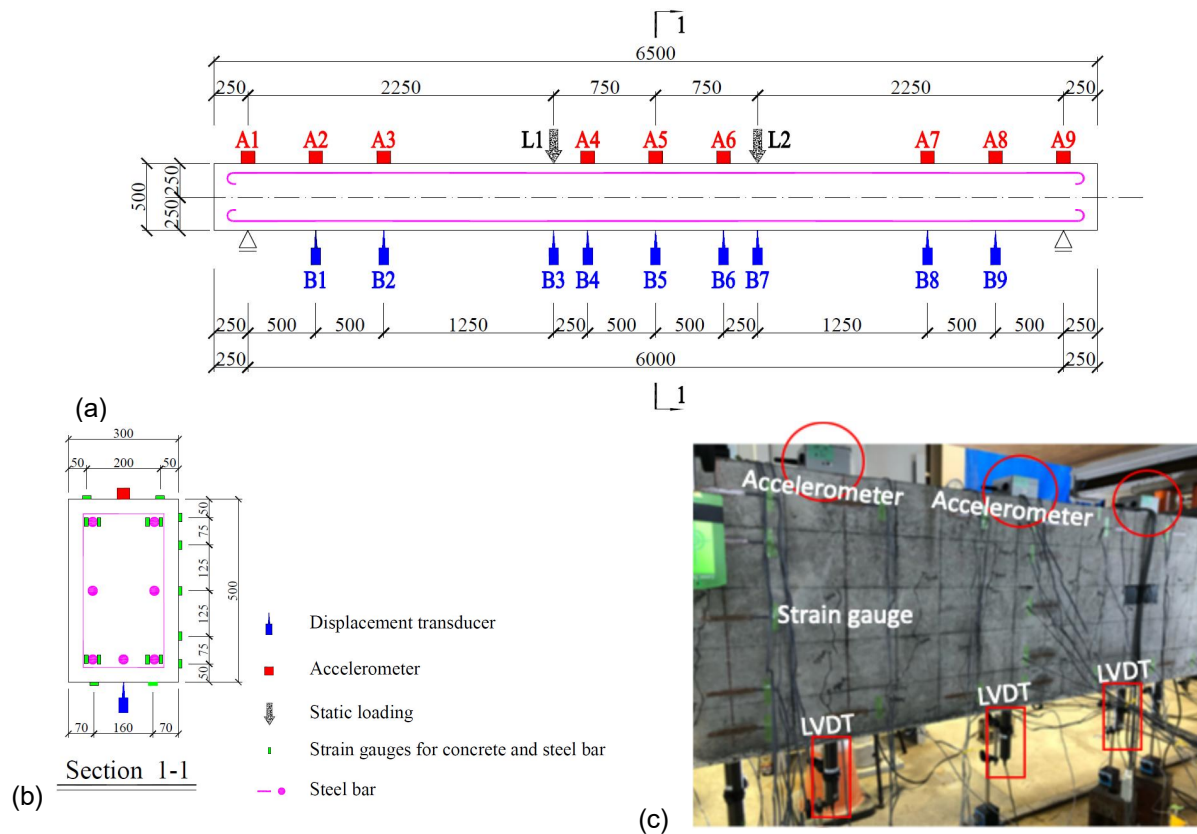
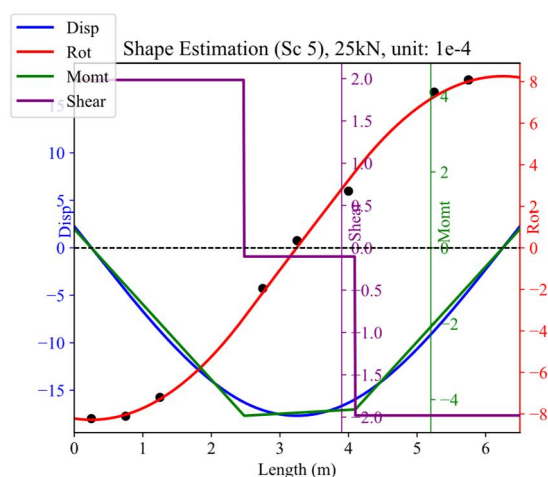


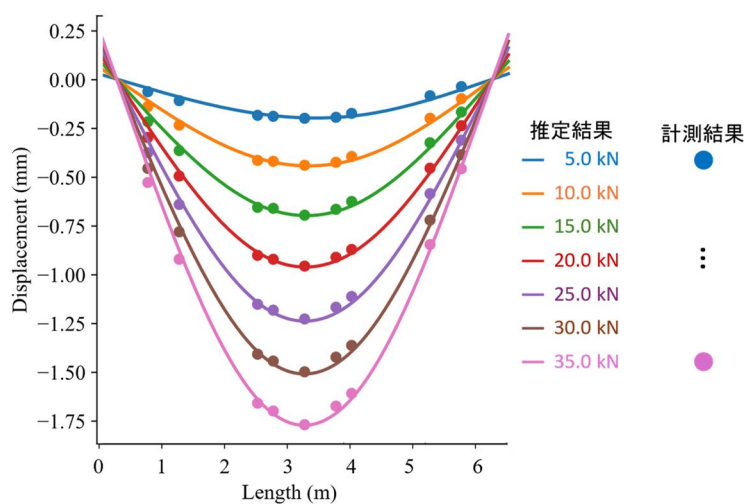
図 2 RC 梁試験体とセンサ設置図

表 1 載荷シナリオ

[illegible]



(a) たわみ角から推定したたわみ角曲線, たわみ曲線, 部材力図

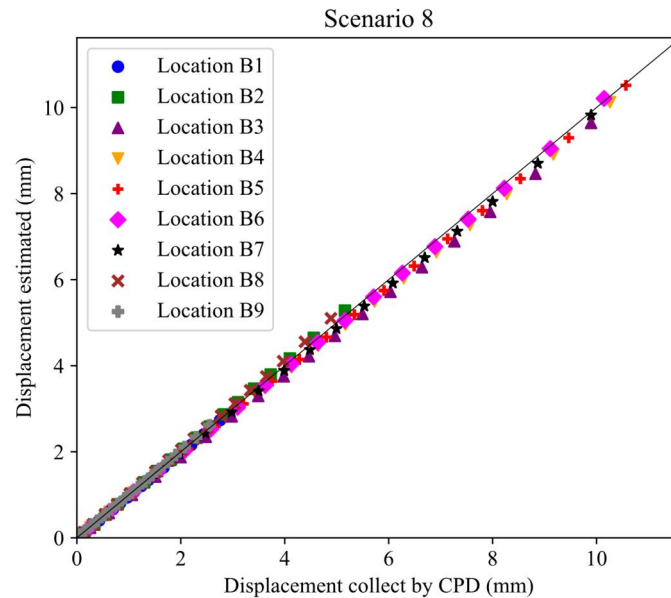


(b) 推定たわみ曲線

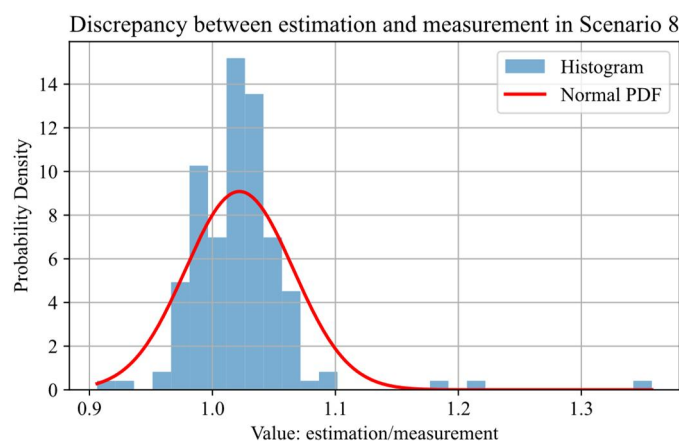
図3 载荷シナリオ No.5 のたわみ推定結果の比較

3.1 たわみ推定

図2に示したRC梁の载荷シナリオ No.5 におけるたわみ角曲線とたわみの推定結果を図3に示す。図3(a)には、25kN 载荷時における各加速度計から算定したたわみ角（黒点），推定たわみ角曲線（-Rot），推定たわみ曲線（-Disp），ならびに EI を仮定して推定した曲げモーメント（-Momt）とせん断力（-Shear）図を示す。また、载荷シナリオ No.5 における各载荷段階（5.0kN～35.0kN）について、加速度計計測から推定したたわみ角曲線と、変位計により計測したたわみを図3(b)に示す。これより、本研究で提案する、加速度から推定したたわみ曲線に基づくたわみが高い精度で推定可能であることが確認できる。



(a) 推定たわみと計測たわみの相関



(b) 推定たわみと計測たわみの比のヒストグラム

図4 载荷シナリオ no.8 のたわみ推定結果の比較

他の载荷シナリオについても検討を行い、概ね同様のたわみ推定精度が得られることを確認した。例えば、载荷シナリオ No.8 について、加速度計計測から推定したたわみと、変位計で計測したたわみとの相関図を図 4(a)に示す。すべての観測点において、高いたわみの推定精度が確認できる。また、加速度計計測から推定したたわみと、変位計で計測したたわみとの比のヒストグラムを図 4(b)に示す。中央値が 1.02 であり、高い推定精度を示している。ただし、加速度計測から推定したたわみは、変位計で計測したたわみに比べて約 2% 過大評価する傾向があることがわかる。

3.2 ひずみ推定

たわみ角曲線が推定できれば曲率の推定が可能となり、さらに中立軸が既知であればひずみを推定することができる。ただし、共用中の既設橋梁においては、現有の中立軸位置が設計図面上の中立軸位置と一致しているかは不明である。そのため、加速度計測から推定されるひずみの比を用いることで、橋梁維持管理への応用が可能であると考えられる。

図 2 の RC 梁の試験体について、中立軸が断面中央に位置すると仮定し（図 5），ひずみの推定を行った。得られた結果を図 6 に示す。図 6 のひずみ推定結果から、引張域における鉄筋ひずみの推定結果（Bar-Bottom (Loading)と Bar-Bottom (Unloading)）は、ひずみゲージによる測定結果と高い相関を示していることがわかる。ただし、 $1400\mu\epsilon$ までの範囲では、推定ひずみが計測ひずみよりも大きな値を示し、 $1400\mu\epsilon$ を超えると、推定ひずみは計測ひずみよりも小さな値を示す傾向が確認された。理由として、載荷実験前の試験体の中立軸は、仮定した初期中立軸の位置より下方に位置し、載荷が進むにつれて引張域にひび割れが発生し、実際の中立軸が圧縮側へ移動していることが考えられる。この要因として、載荷実験開始前の試験体における実際の中立軸位置が、仮定した初期中立軸位置よりも下方に存在していた可能性が考えられる。また、載荷の進行に伴い引張域にひび割れが発生し、これにより実際の中立軸が圧縮側へ移動したことが影響していると推察される。

一方、圧縮側におけるコンクリートおよび鉄筋のひずみ推定結果は、計測ひずみと比較して小さな値を示している。引張側のひずみは主に鉄筋の伸びにより支配されるため比較的安定しているのに対し、圧縮側ではコンクリートが圧壊にいたる直前に局所的に圧縮ひずみの集中が生じやすい。また、圧縮破壊の起点となる微細なひび割れの発生位置や進展経路は一定ではなく、局所的な材料強度のばらつきとして顕在化した可能性がある。

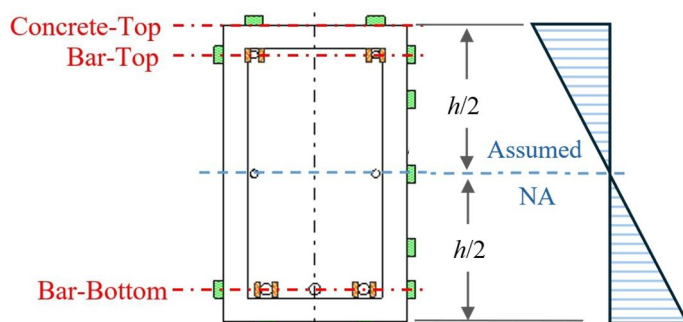


図 5 ひずみ推定における中立軸仮定とひずみ推定位置

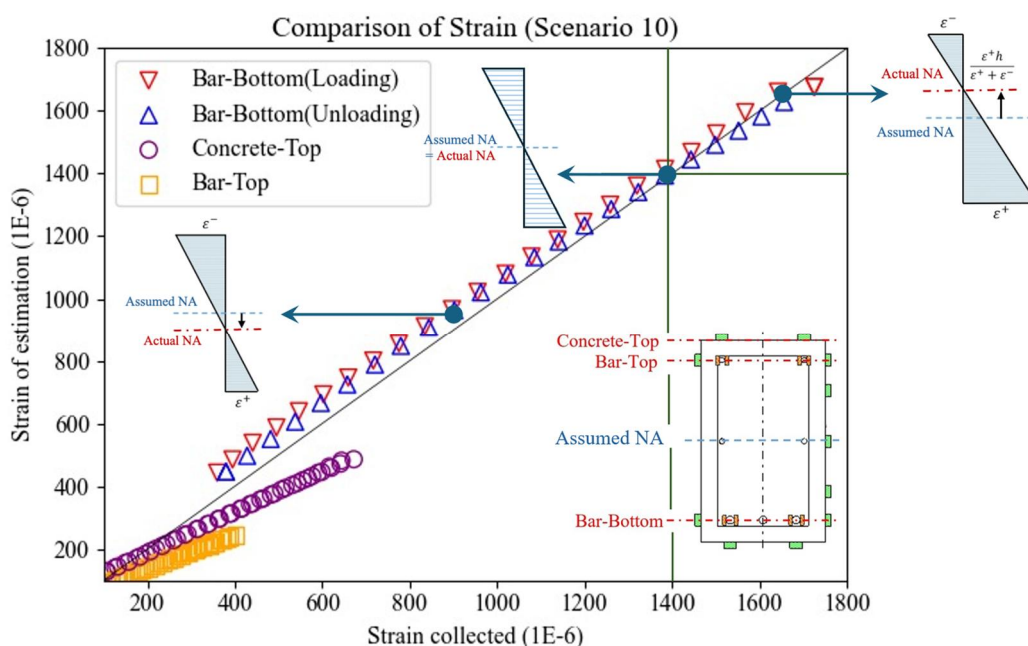


図 6 載荷シナリオ no.10 における推定ひずみと計測ひずみの相関

4. まとめ

本研究は、振動モニタリングを通じた橋梁の構造性能評価を目的とし、加速度計測データからたわみ角を導出することで、橋梁の変位および相対ひずみを同定可能とする手法の妥当性を検討した。具体的には、「橋軸方向の加速度から空間的に連続した橋軸方向のたわみ角曲線を同定し、その空間積分により変位を推定する手法」および「たわみ角曲線の空間差分により、加速度からひずみを同定する手法」について、RC 梁の載荷実験を通じて検証を行った。

たわみの推定に関しては、加速度から推定したたわみ角曲線に基づく変位が高い精度で推定可能であることを確認した。また、ひずみについては、中立軸の仮定が推定精度に影響を及ぼすものの、RC 梁の引張鉄筋ひずみは高精度で推定可能であることが示された。特に、ひずみに関しては、中立軸が未知である場合を想定し、ひずみ比などの相対的なひずみに着目することで、加速度計測に基づく構造性能評価が可能になると考えられる。

連続橋への適用など汎用性を有する手法とするため、理論の拡張および共用中の橋梁における実証実験を今後の検討課題とする。