

## 常時微動による橋脚の固有振動数の同定精度向上に関する基礎検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○渡邊諭 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 入栄貴  
(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 藤原将真

### 1. はじめに

豪雨時の河川増水により橋脚周囲が洗掘を受け、最終的に傾斜や沈下などの災害に至る場合がある。筆者らは鉄道橋脚を対象とした常時微動計測に基づく固有振動数の状態監視手法を開発してきた<sup>1)</sup>が、普及にあたっては計測システムの低コスト化が必要不可欠である。そこで、本研究では、常時微動センサとして研究開発段階で用いた速度センサより安価な加速度センサを採用し、速度センサと同程度の同定精度が確保できるように固有振動数を同定する演算処理（以下、同定アルゴリズムという）を改良した。本稿では、洗掘を模擬した大型模型実験の結果を用いて実施した同定アルゴリズムの改良とこの検証結果を報告する。

### 2. 実験概要

橋脚模型および模型地盤の状況を図1に示す。橋脚模型は実物の1/3縮尺であり、幅1100mm、奥行き740mm、高さ1995mmの直接基礎形式である。根入れの初期条件は基礎底面より1mであり、200mmずつ段階的に掘削することで洗掘の進行性を模擬した。模型地盤の地盤材料は稲城砂( $\rho_{dmax}=1.765g/cm^3$ )、目標締固め度90%である。

各掘削段階において、開発段階で利用した速度センサと速度センサよりも安価な加速度センサを用いた計測システムにて常時微動の同時計測を行い、橋脚の固有振動数の同定精度を比較した<sup>2) 3)</sup>。使用した微動計およびその設置状況を図2に示す。また、常時微動計測における計測条件および計測データ数を表1に示す。

### 3. 固有振動数同定アルゴリズム

詳細は文献1)を参照されたいが、同定アルゴリズムは橋脚天端両端部で計測された微動波形から橋脚ロッキング振動に相当する応答波形と入力波形をそれぞれ算出してフーリエスペクトルを求め、両者の比(伝達関数)で表されるフーリエ振幅比に式(1)で示す理論解をフィッティングして固有振動数を同定するものである(図3)。

$$\frac{\hat{x}_a(f)}{\hat{x}_g(f)} = \frac{1 + \left(\frac{2hf}{f_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2hf}{f_0}\right)^2}} \dots \dots (1)$$

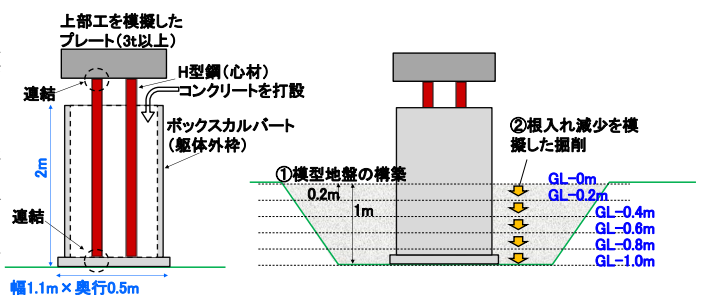


図1 模型橋脚および模型地盤の掘削の概要



図2 掘削状況の例とセンサ設置状況(橋脚天端)

表1 計測条件および計測データ数

センサ種別	センサ単体の相対価格	計測条件	データ数	掘削段階の内訳(データ数)
速度計	1とした場合	200Hz × 300秒	48	GL-0m(7)、GL-0.2m(8)
				GL-0.4m(6)、GL-0.6m(8)
				GL-0.8m(8)、GL-1.0m(11)
加速度計	約0.2~0.3	200Hz × 300秒	46	GL-0m(7)、GL-0.2m(8)
				GL-0.4m(6)、GL-0.6m(7)
				GL-0.8m(8)、GL-1.0m(10)

$\hat{x}_a(f)$ : 橋脚上の応答波形のフーリエ変換,  $\hat{x}_g(f)$ : 地盤の入力波形のフーリエ変換,  $f$ : 振動数(Hz),  $f_0$ : 橋脚の固有振動数(Hz),  $h$ : 減衰定数

### 4. 加速度波形の振動特性と同定アルゴリズムの改良

表1で示した各掘削段階におけるデータを対象として加速度計計測データの振動特性について整理する。加速度センサの特性として、図4に示すように低周波数帯において速度センサよりも感度が低いことが挙げられる。計測した加速度波形に対して改良前の同定アルゴリズムを適用すると、固有振動数の低下傾向はGL-0.6m程度までは

キーワード 洗掘, 常時微動, モニタリング, 低コスト

連絡先 〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 地盤防災 TEL042-573-7263

評価できるものの、全体を通じて衝撃振動試験による固有振動数と一致する結果を得ることができなかった。その理由についてフーリエ振幅比の形状から考察する。

図5は、同定アルゴリズムを適用して得られたフーリエ振幅比のうち、速度計および各加速度計の特徴を明示的に示した例である。速度センサで得られたフーリエ振幅比は卓越振動数が明瞭であり、周波数帯全体において外部ノイズとみられる振動も少なく振動理論解とよく一致する。それに比べ、加速度センサで得られたフーリエ振幅比はいずれも振幅が速度センサよりも1オーダー程度小さくなっており、ノイズが大きく波形に欠けがあるものも存在する(図中、ノイズ高の波形)。これは、上述のとおり低周波数帯の感度が低いこと、ノイズが大きいためロッキング振動成分が分離できず入力波形を過大に推定している可能性などが理由として考えられる。一方、振幅比は小さくなるものの速度波形で得られた伝達関数と相似形を呈す波形が存在しており、同様の特性を有する計測波形が多数存在することが分かった(図中、ノイズ低の波形)。すなわち、振動理論解のフィッティングにおいて新たな演算処理を追加することで、固有振動数の同定が可能になることを示唆している。

そこで、同定アルゴリズムの改良として、従来のフィッティング時の変数が固有振動数と減衰定数の二変数であったものに対し、新たにフーリエ振幅比の増幅率  $A$  を設け式(1)の左辺に乘じる形で追加した。

$$A \cdot \frac{\hat{x}_a(t)}{\hat{x}_g(t)} = \frac{1 + (2hf/f_0)^2}{\sqrt{\left\{1 - (f/f_0)^2\right\}^2 + (2hf/f_0)^2}} \dots (2)$$

この処理により、低周波数帯の感度が低い加速度計で得られたデータである固有振動数付近にフーリエ振幅比のピークが存在するもののフーリエ振幅比が著しく小さく同定不能となる波形に対し、その波形を増幅することで理論解にフィッティングすることが可能となる。図6は改良前後のフィッティング結果の一例を示したものである。上記の改良により、フーリエ振幅比が固有振動数付近に明瞭なピークを示しているのにも関わらず、理論解で十分なフィッティングが出来ないものを補完し、同定精度を向上させることが可能となっている。

5. まとめ

速度センサよりも低周波数帯の感度が低い加速度センサを用いた場合でも、固有振動数を同定するアルゴリズムの一部を改良することで速度センサと同様に固有振動数を同定可能であることが分かった。

参考文献

1) 櫻健典, 湯浅友輝, 内藤直人, 渡邊諭: 橋脚天端両端部の微動計測による橋脚基礎地盤の洗掘に対する健全度評価手法, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.319-327, 2018  
 2) 入栄貴, 渡邊諭, 藤原将真: 橋脚基礎底面の洗掘進行に伴う基礎の安定性の変化に関する実験的検討, 第56回地盤工学会研究発表会, 12-8-1-07, 2021  
 3) 藤原将真, 渡邊諭, 入栄貴: 基礎底面の洗掘進行に伴う直接基礎橋脚の傾斜挙動の把握のための模型実験, 第56回地盤工学会研究発表会, 12-8-1-06, 2021

【謝辞】本研究は、国土交通省の交通運輸技術開発推進制度 (JPJ002223) の助成を受けたものである。

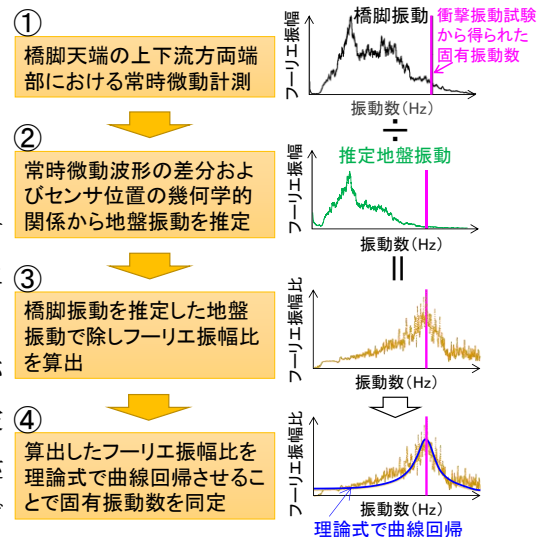


図3 同定アルゴリズムの処理フロー

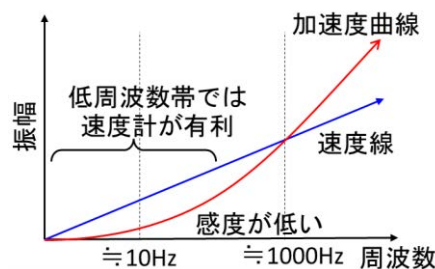


図4 加速度センサと速度センサの周波数帯別の感度イメージ

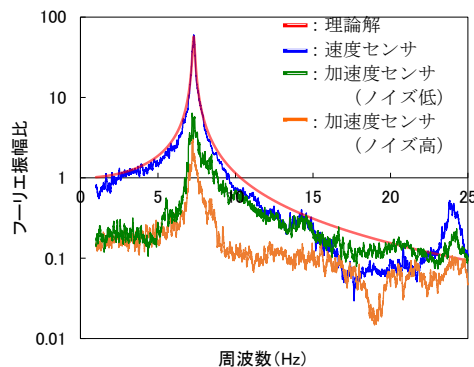


図5 特徴的なフーリエ振幅比の例

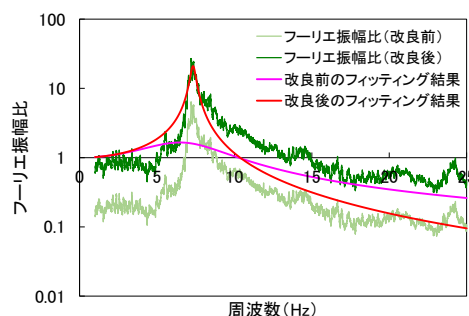


図6 改良前後のフーリエ振幅比と同定結果の例