

河川橋脚の洗掘に対する常時微動を活用したモニタリング手法に適用するセンサの比較

(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 渡邊諭
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 藤原将真

1. はじめに

河川橋脚では、豪雨時の増水により橋脚周辺地盤が掘られ、橋脚基礎の根入れが減少し、傾斜や沈下等の災害に至る場合がある。鉄道では増水前後の橋脚基礎の安定性を評価するため、橋脚を重錘により打撃する衝撃振動試験により健全度の指標である固有振動数を把握する手法が広く行われている。しかしながら、安全面から増水時に実施できないことなどを背景に、橋脚天端両端部で常時微動を計測し固有振動数を同定する手法（以下、提案手法）が開発された¹⁾。本稿では、提案手法のセンサの適用範囲を明らかにするため、従来用いていた速度センサと低コストで汎用性の高い加速度センサを用い、洗掘により変状が顕在化する状況を再現した模型実験を実施し、両センサの固有振動数の同定精度を比較した。

2. 実験概要

(1) 橋脚模型および洗掘模擬条件

橋脚模型(図1)は幅1100mm、奥行き740mm、高さ2045mm(基礎底面コンクリートは幅1300mm、奥行き900mm、厚さ100mm)の直接基礎形式であり、模型上部には上部工荷重を模擬したプレートを設置している。根入れ長は初期1000mmで、側面を5段階(200mmずつ、根入れ低下率20%ずつ)掘削する。側面掘削終了後、根入れ長が0mmの状態から底面を9段階(50mmずつ、底面掘削率4%ずつ)掘削する²⁾³⁾。

(2) 微動計

微動計の外観を図2に示す。速度センサはANET製(CR4.5-2)を使用する。一般的な橋脚基礎の固有振動数の範囲内に当たる0.5~18Hzにおける周波数特性は最大-3dbである。なお、同センサは提案手法を構築する過程において用いたセンサであり、衝撃振動試験の結果との整合性も確認されている。加速度センサはEPSON製(M-A552AC1)を使用する。測定周波数は高周波数帯まで計測可能であるが、最小分解能(センサの最小感度に相当)が $0.06\mu\text{G}$ であり、低ノイズ、高分解能のセンサである。計測はいずれのセンサでも側面掘削では $200\text{Hz}\times 5$ 分間 $\times 5$ 回、底面掘削では $1\text{kHz}\times 1$ 分間 $\times 5$ 回の計測としている。底面掘削においては傾斜が逐次進行するため、高周波数での計測としている。

(3) 提案手法

固有振動数の同定にあたっては、橋脚天端両端部2か所で橋軸直角方向と鉛直方向の微動データを計測し、その差分と

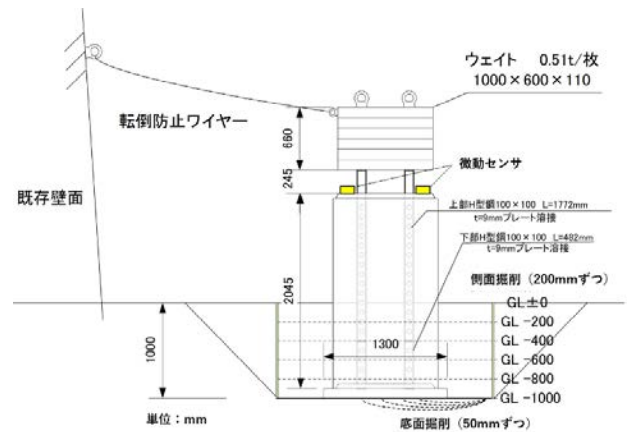


図1 橋脚模型



図2 微動計

(左：速度センサ，右：加速度センサ)

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

$\hat{x}_a(f)$: 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, A : 増幅率, f : 振動数(Hz), f_0 : 橋脚の固有振動数(Hz), h : 減衰定数

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

センサの幾何学的位置関係から橋軸直角方向の橋脚振動と地盤振動を算出し、それぞれの波形のフーリエ振幅比を求める。さらに、求めたフーリエ振幅比に対し、理論解をフィッティングして固有振動数を同定するが¹⁾、式(1)で示す理論解は、加速度センサにおいても速度センサと同様の同定精度を確保するように、固有振動数同定アルゴリズムの改良（増幅率 A を追加）を実施したものである。

3. 実験結果と考察

図3, 4は、微動計測結果に提案手法を適用して同定した固有振動数の結果である。各掘削段階においては5データ収録しており、その内、同定可能（計測値から算出した伝達関数と理論解との決定係数が0.7以上）と判定したものをプロットしている。

図3は、側面掘削時の固有振動数の変化を示す。真値としているのは橋脚模型に対して衝撃振動試験（強制加振は掛矢打撃）を実施した値である。速度センサは、真値とほぼ同値を示し、最も大きな誤差で6.4%（根入れ低下率100%）であり、各掘削段階での5データの平均誤差は3.4%（根入れ低下率100%）であった。一方、加速度センサも真値と同値を示しており、最も大きな誤差で14.4%（根入れ低下率40%）のデータが存在するものの、各掘削段階での5データの平均値で見ると平均誤差は3.9%（根入れ低下率40%）であった。このことから、根入れが徐々に減少していく洗掘の初期段階における固有振動数の同定は衝撃振動試験の結果と速度センサ、加速度センサとも同等の評価値が得られることを示した。

図4は、底面掘削時の固有振動数の変化を示す。ここでは、5データの平均値をプロットする。速度センサの値を真値とし、微動データのみを考慮して上記の最大誤差を参考に±7%を真値範囲として比較する。加速度センサの値が真値範囲内となるのは10個中6個で、真値範囲外となる値の乖離は最大5.1%（底面掘削率23%）であり、速度センサと同等の結果が得られた。底面掘削時は、橋脚の変位・傾斜による影響や低周波数帯での加速度センサの感度低下の影響が考えられたが、橋脚の固有振動数の範囲内では十分に計測可能であることを示した。

固有振動数を同定可能と判定した割合を表1に示す。速度センサ、加速度センサともに同定可能と判定される割合は高く、加速度センサでも速度センサと同等の補足率を有していることが分かる。一方、センサコストは、速度センサ1に対して、本検討に用いた加速度センサは0.3倍であり、提案手法の低コスト化の可能性を示した。

4. まとめ

本検討により、加速度センサでも速度センサと同様の固有振動数の同定が可能となり、提案手法に適用するセンサの拡大が期待できる。今後は、実橋りょうに適用した事例を分析していく予定である。

参考文献

- 1) 樺健典, 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（JJPJ002223）の助成を受けたものである。

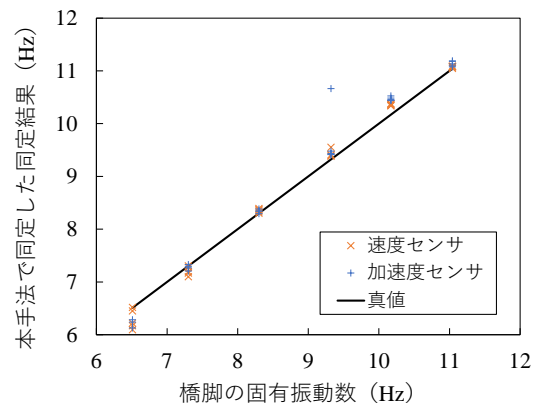


図3 同定結果の比較（側面掘削）

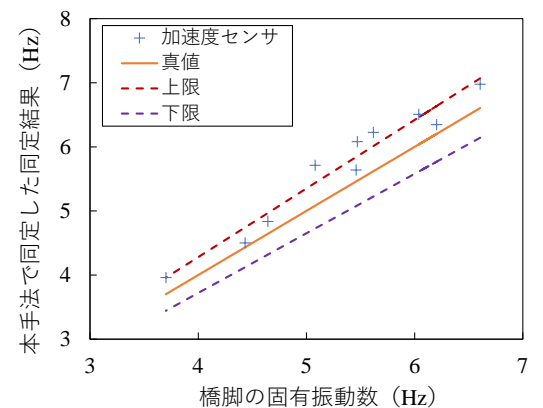


図4 同定結果の比較（底面掘削）

表1 同定可能捕捉率の比較

| | 同定可能捕捉率 | |
|--------|---------|--------|
| | 速度センサ | 加速度センサ |
| 側面掘削 | 97 | 87 |
| 底面掘削 | 100 | 100 |
| センサコスト | 1 | 0.3 |