

橋脚の上下2箇所で計測した微動による固有振動数同定手法の提案

鉄道総合技術研究所 正会員 ○ 樺 健典 正会員 内藤 直人
 鉄道総合技術研究所 正会員 湯浅 友輝 正会員 渡邊 諭

1. はじめに

近年、豪雨が頻繁に生じており、河川橋脚基礎については増水時および増水後において安全性を確認する場面が多くなっている。鉄道の河川橋りょうにおける洗掘に対する健全度評価として、一般的には橋脚の固有振動数を指標とした手法が広く用いられている。また、常時モニタリング技術の進歩により、微動をもとに連続的に固有振動数の変化を捉える試みもなされているが、衝撃振動試験と比べると固有振動数の同定の難易度が高いことが多く、実用化に向けては課題が残る状況である。このことに対する解決策の一つとして、橋脚の上下2箇所における計測結果から固有振動数を同定する手法を検討したので報告する。

2. 固有振動数同定に微動を用いる場合の課題

微動をもとにした固有振動数同定手法としては、従来から橋脚の天端上の1点で計測した橋軸直角方向の微動を活用する手法¹⁾が試行されてきたが、適用範囲が限定的で、橋脚によっては必ずしも良好な結果が得られないケースがあった。原因としては、橋脚のロッキング振動の成分が地盤振動や桁の影響による振動成分に埋没してしまうことが挙げられる。これは、橋脚の健全度が高いほどロッキング成分が小さくなるため顕著になる傾向がある。

地盤振動の影響が大きくあらわれるケースに対しては地盤振動と橋脚上の伝達関数から固有振動数を同定する方法が有効であるが、河川内の地盤振動を直接計測することは困難なため、これまでに筆者らは橋脚上に設置したセンサの計測結果のみから地盤振動波形を推定することで固有振動数を同定できる手法²⁾を提案した。しかし、この手法は橋脚上にセンサを2箇所に設置し、双方で鉛直方向を、少なくとも片方で橋軸直角方向を計測する必要があることから計3軸のセンサを必要とし、コスト面においてやや不利であった。そこで、本研究ではより少ないセンサ数で同等の固有振動数同定を行うことができる手法について検討を行った。

3. 提案手法の概要

図1に示すように、直接基礎橋脚にセンサを橋軸直角方向に2軸、異なる高さに設置する。橋軸直角方向の振動は同じ高さであればどこで測ってもほぼ同じであるので、設置位置は端部でも良いが、なるべく高さの差が大きいことが望ましい。センサは加速度計でも速度計でも、2軸が同じ種類で同期されていれば良い。以下、 x 軸（橋軸直角）方向の微動に着目し、橋脚の材質は均質であるとする。ロッキング振動のみであれば振動中心は橋脚底面に位置するが、曲げ振動等の影響を受けて見かけの振動中心は図1に示すように橋脚底面より若干上部に位置する。ただし、橋軸直角方向の振動については振幅に占める曲げ振動の寄与は通常は小さいと考えられるので、センサA、Bの位置における底面からの高さを h_a 、 h_b とし、センサA、Bの位置におけるロッキング成分 x_{as} 、 x_{bs} の振幅比を表す係数を c とする（すなわち $x_{as} = c x_{bs}$ ）と、近似的に $c = h_a/h_b$ となる。

センサAの計測波形を x_a 、センサBの計測波形を x_b 、地盤振動を x_g とする。センサで計測される振動波形を、構造物の1次振動と地盤振動の和と仮定し、高次振動や桁など他の構造物の影響について無視することにすれば、 $x_a = x_{as} + x_g$ 、また、 $x_b = x_{bs} + x_g$ である。これらの式から、

$$x_g = \frac{h_a x_b - h_b x_a}{h_a - h_b} \tag{1}$$

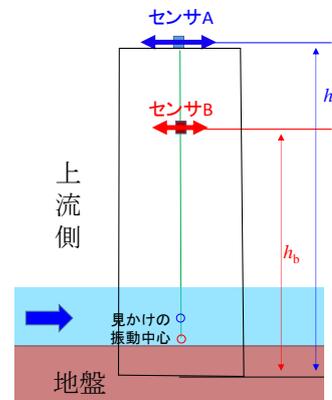


図1. 概要図

キーワード 橋脚, 直接基礎, 固有振動数, 微動

連絡先 〒185-8540 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 TEL 042-573-7263

とあらわすことができ、これにより地盤振動を推定することが可能である。 x_a と x_g のフーリエ変換 \hat{x}_a, \hat{x}_g は、理論的には以下の共振曲線によって表現される。

$$\frac{\hat{x}_a}{\hat{x}_g} = \frac{1 + \left(\frac{2h\omega}{f}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{f}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2h\omega}{f}\right)^2}} \quad (2)$$

ここで、 ω : 振動数(Hz)、 f : 橋脚の固有振動数(Hz)、 h : 減衰定数、である。計測波形 x_a および式(1)より推定した地盤振動 x_g から得られるフーリエ振幅比を式(2)にフィッティングさせることで、 f および h が得られる。

4. 模型実験による提案手法の検証

図2に橋りょう模型の側面図を示すが、模型の詳細については文献3)を参照されたい。本稿では図中央に示す1辺0.6mの正方形断面形状を有する橋脚の微動計測結果について検討した。橋脚模型は下部のコンクリート部と上部のH鋼部からなり、均質な構造となっていないが、これら上・下部の振動に位相のずれはなく、1つの構造体として挙動することを別途確認している。使用した速度センサはCR4.5-2Sであり、対象橋脚のH鋼部天端端部に1台、コンクリート部天端端部に1台を設置して橋脚振動を、更に推定した地盤振動の検証用として対象橋脚から橋軸方向に0.5m程度離れた地盤上に1台設置して実際の地盤振動を計測した。サンプリングレートは200Hzとした。

根入比0の場合の橋脚上での微動を図3に示すが、スペクトルのピークが複数みられ、この結果のみから固有振動数を同定することは難しい。本手法により推定した地盤振動と、検証用に設置したセンサで実測した地盤振動のフーリエスペクトルを図4に示すが、両者は良好に一致している。式(2)へのフィッティング状況を図5に示す。この結果から得られた本橋脚の固有振動数は8.7Hzで、衝撃振動試験や起振機試験の結果とも概ね一致していることを別途確認しており、提案手法から良好に固有振動数を同定できたことが分かる。

また、上述の模型橋脚において根入比を変えて計測した結果に本手法を適用したところ、根入比1.05までは衝撃振動試験等との結果の一致がみられた。橋脚の天端両端に設置した計3軸のセンサを使用する手法²⁾では根入比1.42まで一致しており⁴⁾、これと比較すると適用範囲は若干劣るものの、1軸のセンサのみのスペクトル形状(図3)から判断する手法¹⁾と比べれば適用範囲は大きく向上していると考えられる。

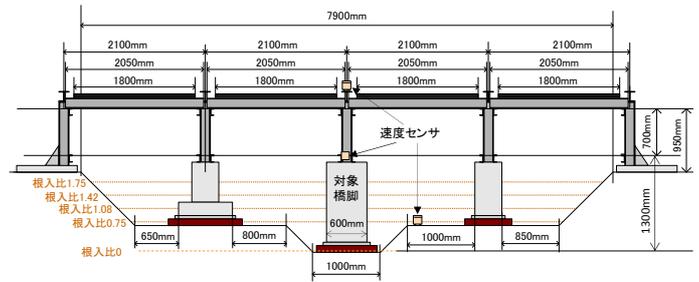


図2. 模型橋脚の側面図

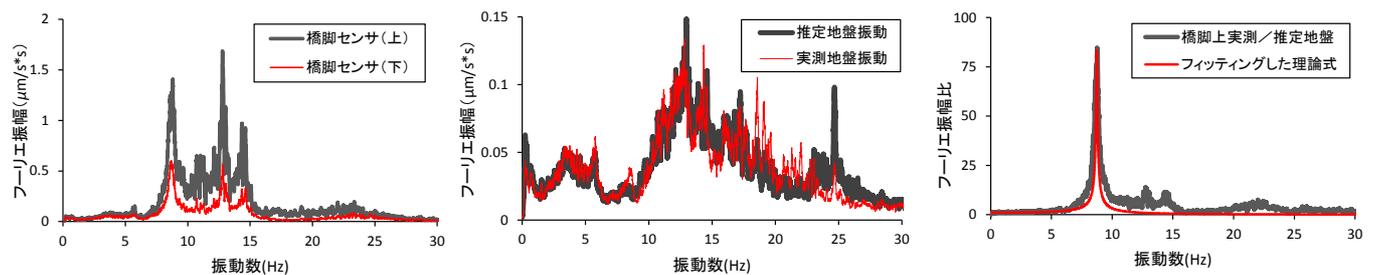


図3. 橋脚上で計測した微動スペクトル 図4. 実測と推定の地盤振動の比較 図5.理論式へのフィッティング結果

5. おわりに

本稿では、橋脚の上下2箇所における計2軸のセンサの計測結果から固有振動数を同定する手法を提案した。本手法は橋軸直角方向のみを計測できれば良いことから、非接触振動計測の活用も考えられる。今後は実橋りょうにおける検証を実施して実用化に向けた検討を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 渡邊ら：微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.31-36, 2007.
- 2) 樺ら：橋脚の両端部で計測した微動に着目した固有振動数同定手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp.61-68, 2016.
- 3) 生井ら：土被り量が橋脚の振動特性に及ぼす影響に関する実験, 第53回地盤工学研究発表会概要集, 2018 (投稿中).
- 4) 内藤ら：橋脚の微動計測により求めた地盤振動の推定精度に及ぼす根入れと不規則外乱の影響, 第53回地盤工学研究発表会概要集, 2018 (投稿中).