

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 微動により橋脚の健全性を評価する

橋脚の洗掘災害とは、河川増水により橋脚基礎周辺の土砂などが流出して基礎の根入れが減少し、橋脚が不安定化して沈下や傾斜に至るものです。このような洗掘災害が発生して、列車脱線事故などの重大事象や長期間にわたる輸送障害が生じた例があります。そのため、洗掘による橋脚の健全性の低下を常に監視することが求められます。ここでは、橋脚上に計測センサーを設置して得られた微動波形から橋脚の固有振動数を算出し、その変化に着目して健全性を評価する手法を紹介します。

## はじめに

橋脚の洗掘災害は、河川の増水により橋脚基礎周辺の土砂などが流出して基礎の根入れが減少し、橋脚が不安定化して沈下や傾斜、転倒に至るものです(図1)。直接基礎あるいは木杭基礎で根入れの浅い旧式橋脚で被災する事例が多く<sup>1)</sup>、過去には重大事故や長期の輸送障害を引き起こした事例もあります。しかし、河川の流水中にある基礎周りの状態を目視により確認することは困難なため、目視以外の手法により増水前後の橋脚の健全性を把握する技術開発が必要です。

橋脚の健全性を評価する手法として、橋脚で計測された振動波形のフーリエスペクトルの形状および位相差を基に同定した固有振動数を指標とする衝撃振動試験(参照)があります。この手法は、洗掘による緩みや根入れの減少などによって地盤の支持力が低下すると橋脚の固有振動数も低下するという原理に基づいています<sup>2)</sup>。しかし衝撃振動試験では30kgの重錘により橋脚を打撃加振して橋脚の応答波形を計測する必要があるため、増水時にこの試験を実施することが困難な場合が多くあります。そのため、橋脚を打撃加



**渡邊 諭**  
Satoshi Watanabe  
防災技術研究部  
地盤防災研究室  
主任研究員  
【専門分野】河川防災、  
斜面防災



**榎 健典**  
Takenori Keyaki  
前 防災技術研究部  
地盤防災研究室  
副主任研究員  
【専門分野】河川防災、  
斜面防災



図1 洗掘により橋脚が転倒した事例

振せずに増水した水の流れによって得られる橋脚の微動(☞参照)波形を計測して、衝撃振動試験と同様に固有振動数を評価する手法の開発を進めてきました。しかし、微動の波形をそのまま利用すると(以下、従来手法といいます)、フーリエ振幅スペクトルのピークが複数出現して固有振動数が同定できない場合がある<sup>3)</sup>ことや、小さな連続的な振動を利用するため位相の情報が得られず、適用範囲が限定的であることが課題でした。

そこで、従来の微動計測では固有振動数の同定が困難であった状況においても適用可能な手法を開発しました。この手法は、橋脚の天端上の両端部で計測された橋軸直角方向と鉛直方向の微動に着目し、フーリエ振幅スペクトルだけでなく位相差の情報も活用します。ここでは、この新しい手法(以下、新手法といいます)の概要と適用性の検証結果について紹介します。

### 固有振動数の同定の原理

橋脚の固有振動数とは、橋脚が自由振動した際に現れる、その橋脚が持つ固有の周波数のことです。鉄道橋脚は地盤で支持された構造物であるため、風や近くを走る自動車などの振動が地盤を通じて橋脚に常に伝わっており、その応答として橋脚が常に微小に振動しています。一般に、橋脚上で計測される波形を応答波形、その振動源

#### ☞ 衝撃振動試験

重錘などで構造物に直接打撃力を与え、構造物の固有振動数を測定して基礎的な諸元を得るとともに健全性を判定する非破壊検査法。

#### ☞ 微動

風・波浪などの自然現象や、道路交通・工場などの人口的な振動などを発生源として、構造物などが常に微小に振動する現象のこと。常時微動ともいう。

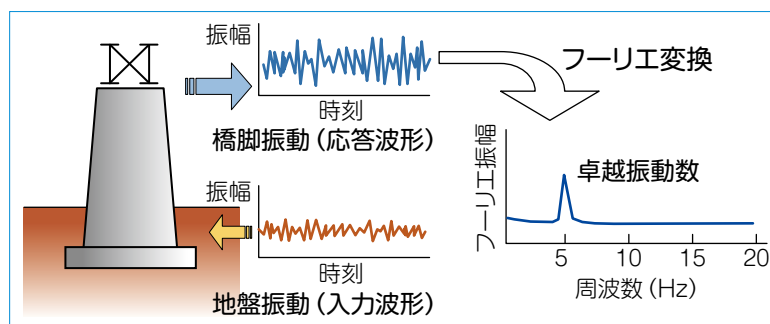


図2 橋脚振動のフーリエ振幅のイメージ

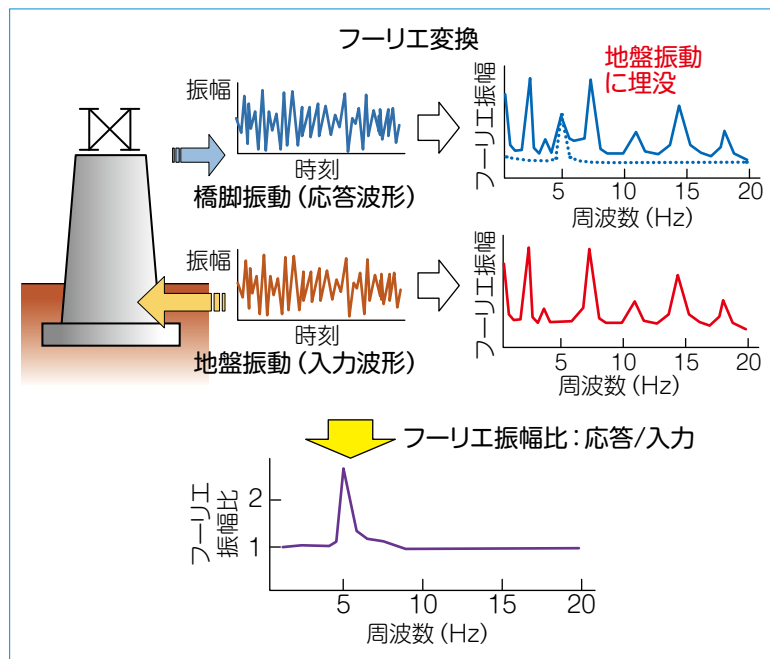


図3 橋脚振動と地盤振動のフーリエ振幅比のイメージ図

となる地盤振動を入力波形といいます。ここではそれぞれ橋脚振動、地盤振動と表記します。

地盤振動と橋脚振動との関係を比較するうえでよく用いられるものがフーリエ振幅です。これは計測された時刻歴の振動波形をフーリエ変換とよばれる数学的な信号処理を行い、周波数ごとに含まれる振動の強弱に変換して示したものです。たとえば、橋脚天端で図2のようなフーリエ振幅が得られた場合、全体波形のなかで5Hzの周波数の成分をもっとも多く含む、すなわちおよそ5Hzの周波数で揺れていることを表しています。

このように、計測された橋脚振動の

なかでもっともフーリエ振幅が卓越した振動数が一見すると固有振動数であるようにとらえられますが、仮に図3で示すような大きな振動が地盤振動に含まれていると、橋脚でもその振動が計測されるため、卓越振動数が橋脚の固有振動数ではない可能性があります。そこで、地盤振動の影響を除去するために、橋脚上で計測される橋脚振動と、橋脚の振動源となる地盤振動のそれぞれの波形のフーリエ振幅比を求めることで、橋脚振動のなかでどの周波数が地盤振動に対して卓越しているかを求めます。こうすると、振幅比が卓越している帯域が橋脚の固有振動数に相当する可能性が高くなります(図3)。

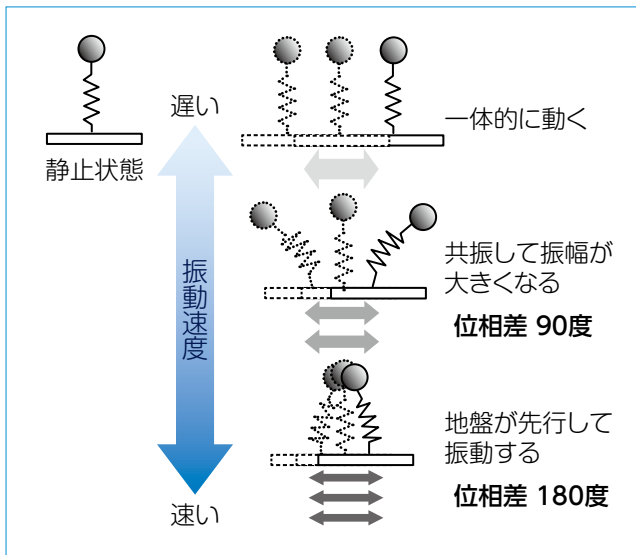


図4 振動速度と位相差のイメージ図

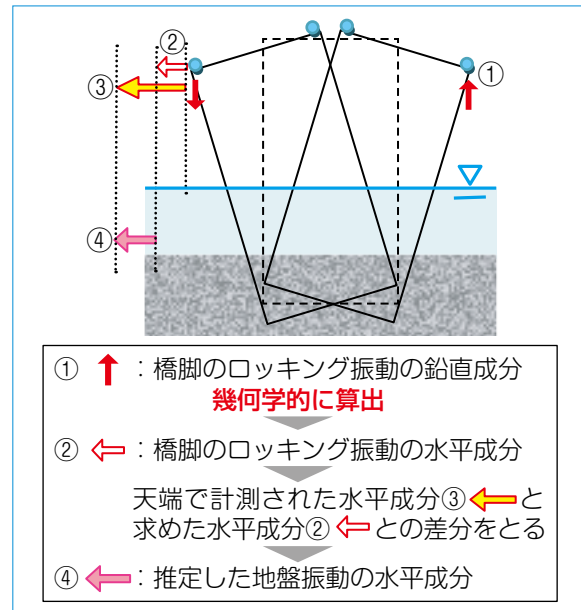


図5 新手法における振動波形処理の概要

次に地盤振動と橋脚振動の位相差に着目します。図4に示す単純なばねと質点の模型を例にすると、地盤をゆっくりと水平に振動させた場合、ばねと質点は地盤と一体的に動くことが想像できます。次に、振動を少しずつ速くすると、質点が地盤に対してもっとも大きく揺れる、すなわち共振する周波数があります。これが固有振動数です。このとき、地盤水平の振動に対して橋脚の振動は約90度(1/4周期)遅れています。さらに振動を速くすると、さらに地盤が先行して振動し、質点が取り残されるように振動します。このときの位相差は180度(1/2周期)となります。

以上のように、地盤と橋脚の振動の位相差に着目すると、橋脚が固有振動数付近で地盤と共振する場合には位相差が常に90度付近となり、そのときの振動数が上記のフーリエ振幅比の卓越振動数と一致していれば、この卓越振動数は橋脚の固有振動数であると判

断できます<sup>4)</sup>。このように、地盤振動の情報を得ることができれば橋脚の固有振動数の同定が行えます。

### 新手法の概要

実橋脚を考慮した場合においても、上記のように基礎周辺地盤での地盤振動を計測できれば固有振動数の同定に有効ですが、河川水や根固め工の存在などにより地盤振動を直接計測することが実際には現実的でない場合がほとんどです。そこで本手法では、橋脚上で計測された3成分の振動データから地盤振動を推定します。

図5に新手法における橋脚の振動波形処理の概要を示します<sup>5)</sup>。本手法の前提として橋脚の振動を剛体ロッキング振動(☞参照)(以下、ロッキング振動と記す)と仮定します。橋脚両天端で計測された3成分の振動データを橋脚のロッキング振動と地盤振動の成分の和であると仮定し、両天端の鉛直成分の差分から橋脚のロッキング振動の鉛直成分を抽出したうえで、幾何学的関係から橋脚のロッキング振動による水平成分を算出します。この橋脚のロッキング振動の水平成分を計測された元の水平成分から差し引くことで、地盤振動の

水平成分を求めることが可能となります。この推定した地盤振動の水平成分と、橋脚上の水平成分とを対象に、上述のフーリエ振幅比および位相差を求めることで固有振動数が同定できます。

### 新手法の適用性の検証

本手法を実橋りょうに適用した事例を紹介します。対象とした橋りょうは単線橋りょうで、その下部工は直接基礎型式の小判型コンクリート橋脚です(図6)<sup>3)</sup>。供用時および河川改修工事にもなう桁撤去後に微動計測を行っています。計測は橋脚天端の両端にセンサーA、Bを設置し、両者を同期した微動計測を実施しました。なお、別途実施した衝撃振動試験によって得られた固有振動数は、供用時が12.6Hz、桁撤去後が14.6Hzです。

橋脚上(センサーA)で計測した速度波形のフーリエスペクトルを図7に示します。図中の赤線は衝撃振動試験によって得られた固有振動数を示しますが、フーリエスペクトルのピークとはまったく一致していません。これは、図3で示したように地盤振動の大きさが橋脚の固有振動の大きさと比べて大きい場合、橋脚の固有振動数に相当す

#### ☞ 剛体ロッキング振動

曲げなどの変形が生じないブロック型構造物が、ある回転中心まわりに左右交互の揺れを繰り返す振動現象。

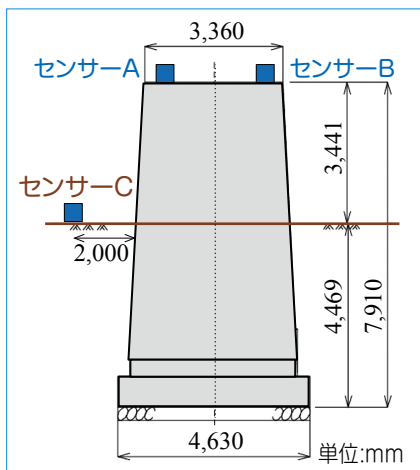


図6 対象橋脚の概要図<sup>5)</sup>

るピークが埋没し明瞭に現れない事例です。

次に、橋脚上で計測した振動と本手法によって求めた推定地盤振動のフーリエ振幅比および位相差を図8に示します。図中には衝撃振動試験から得られた固有振動数を赤線で示します。図からわかるように、衝撃振動試験による固有振動数付近において、フーリエ振幅比の卓越と位相の反転がみられることがわかります。ただし、位相差については固有振動数よりも高い振動数帯域において、ノイズがやや大きい結果となっています。また供用時のフーリエ振幅比をみると、8Hz付近に固有振動数とは別のピークがみられますが、位相差には大きな乱れが生じていないことがわかります。この8Hzのピークは桁の固有振動数であることを確認しており、地盤振動に対する橋脚の応答振動でないため、位相の反転がみられないと考えられます。このようにフーリエ振幅比と位相差をあわせて評価することで、ノイズは多いものの図7と比べると固有振動数の同定が容易に行えます。

なお、桁撤去後については地盤振動の検証用として橋脚付近の上流側の地盤にもセンサーCを設置し、実測の地盤振動と推定地盤振動とを比較してい

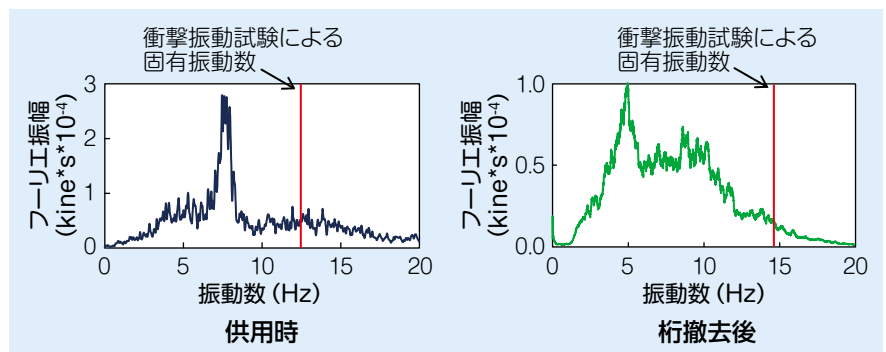


図7 橋脚上で実測した速度波形のフーリエスペクトル<sup>5)</sup>

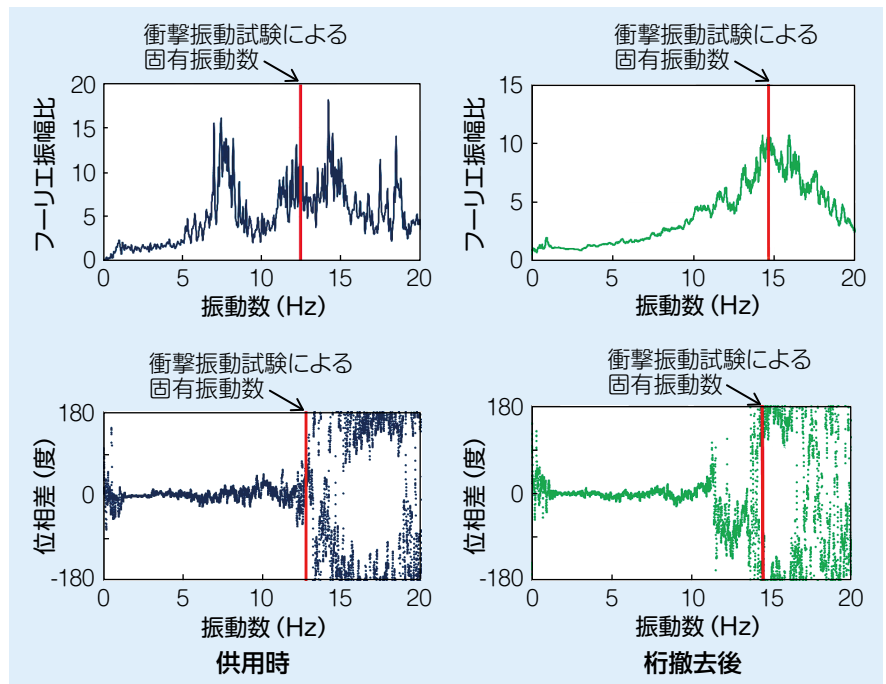


図8 橋脚上と地盤(推定値)のフーリエ振幅比および位相差<sup>5)</sup>を改変

ますが、高周波数帯の位相には差があるもののフーリエスペクトルの波形はよく一致していることを確認しています<sup>5)</sup>。

### おわりに

微動計測を用いた新たな手法の適用性を実橋脚の計測事例から検討した結果、従来手法では橋脚の固有振動数の同定が困難であった橋脚においても固有振動数の同定が可能となる可能性を示しました。今後はさらに実橋りょうにおける検証事例を蓄積して固有振動数の同定精度の向上や提案手法の適用範囲の明確化を目指します。[RRR]

### 文献

- 1) 村上温：鉄道橋の洪水時被災機構と安全管理に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1307，pp.118-127，1986
- 2) 西村昭彦，棚村史郎：既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.3，No.8，pp.41-49，1989
- 3) 渡邊諭，佐溝昌彦，淵脇晃，杉山友康：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
- 4) 土木学会土木振動学便覧編集小委員会：土木技術者のための振動便覧，pp.1-5，土木学会，1966
- 5) 樺健典，渡邊諭，宮下優也：橋脚天端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，No.20，2016