橋脚基礎の振動から安定性を評価する

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あり，過去には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監視することが重要です。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健全性指標である固有振動数を推定する基本原理を概説するとともに，実橋脚への適用事例と実用性について紹介します。

渡邉　諭
Satoshi Watanabe
防災技術研究部
地盤防災研究室
主任研究員

欅　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

はじめに

近年，台風や局所的な豪雨にともなう急激な河川の増水が頻発しており，それにともない橋脚周囲の地盤が洗掘され，最終的に橋脚が沈下・傾斜・流出するといった災害が増加しています（**図1**）。河川内の橋脚基礎は水中にあるため，増水時において基礎周囲の地盤の正確な状態を確認することは困難です。また，洗掘が発生した後に，減水時に上流方から河床材料が供給されて埋め戻しが生じ，仮に目視では根入れが回復していても基礎の健全性を精度よく評価できない場合があります。そのため，増水後の運転再開の可否を判断するためにはモニタリングにより橋脚の健全性を正しく評価することが求められています。

そこで，これまで鉄道総研では，橋脚の健全性の指標として従来から衝撃振動試験（☞参照）で評価されている橋脚の振動特性に着目し，その変化をとらえることで橋脚の健全性を連続的に評価する手法の開発を目指してきました。ここでは，橋脚の振動特性を自動的に把握する手法について紹介します。

固有振動数を指標とした橋脚の健全性評価

ここでは，固有振動数が橋脚の健全性を評価する指標となる基本的な考え方について述べます。橋脚は，その質

図1　洗掘により橋脚が転倒した事例

図3　センサーの設置イメージ

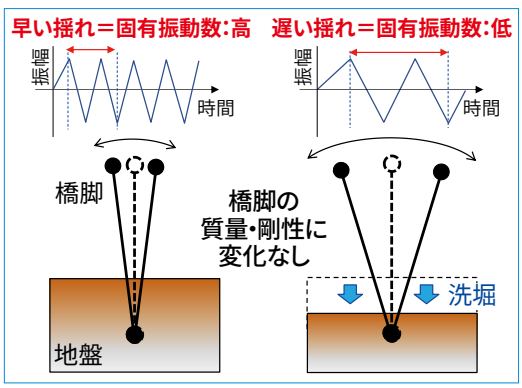

図2　洗掘にともなう固有振動数の低下イメージ

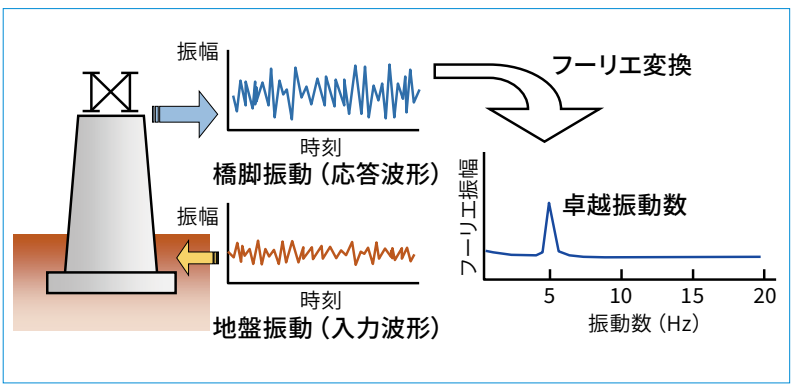

図4　橋脚振動のフーリエ振幅のイメージ

量と周辺地盤の剛性との関係から固有の振動数（ここでは一秒間に何回揺れているかの数）をもっており，堅い健全な地盤では高い固有振動数（早い揺れ）を呈し，逆に軟弱な地盤では低い固有振動数（ゆっくりした揺れ）を呈します。洗掘が発生した場合，**図2**に示すように，地盤の消失により周辺地盤の剛性が低下しますが，橋脚自体の質量と剛性は変化しないまま橋脚の固有振動数が低下します。すなわち，洗掘による基礎の不安定化現象をこの全体剛性の低下ととらえると，橋脚の固有振動数の変化を把握することで橋脚の健全性の変化を評価することができます。

この固有振動数の変化を把握する手法のひとつに衝撃振動試験[1]があり，橋脚基礎の健全性の評価に広く用いられています。この手法は30kgの重錘で橋脚を打撃し強制加振することで，橋脚の固有振動数を精度よく把握できますが，連続的な加振を行うことが困難であるため，状態監視手法として実際に用いるには上記の課題を解決する必要があります。

そこで，橋脚の天端両端部に設置した二か所のセンサー（**図3**）により常時微動（以下，微動という）（☞参照）を計測し，そのデータから固有振動数を特定する新たな手法[2)3)]を開発しました。過去にも，単独の微動センサーから固有振動数を推定する試みがありましたが，検査足場などの付帯構造物の振動が卓越する橋脚や，健全性が高い橋脚の場合などでは固有振動数の特定が困難であることなどの課題がありました。一方，新手法では二か所のセンサーを用いることでこの課題を解決しています。

新手法における固有振動数特定方法の概要[2)3)]

鉄道橋脚は地盤で支持された構造物であるため，地盤を通じた微動（以下，地盤振動という）の応答として橋脚も振動しています（以下，橋脚振動という）。

橋脚振動の特徴を把握するうえでよく用いられるものがフーリエ振幅（☞参照）です。たとえば，橋脚天端で**図4**のようなフーリエ振幅の波形が得られた場合，全体波形のなかで5Hz

☞ **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。

☞ **常時微動**
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。単に微動ともいう。

☞ **フーリエ振幅**
微動をさまざまな周期の振動の集まりとし，周期ごとの振動の強さに分解したものをフーリエスペクトルといい，その振動の強さをフーリエ振幅という。

の周波数の成分をもっとも多く含む，すなわち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フーリエ振幅がもっとも卓越した振動数が固有振動数であるように一見するととらえられますが，仮に，**図5上**のように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，同図中に示すように卓越振動数が橋脚の固有振動数ではない場合があります。

そこで，地盤振動の影響を除去するため，橋脚振動のフーリエ振幅と地盤振動のフーリエ振幅を算出し，両者の比（フーリエ振幅比という）の波形を求めることで，橋脚振動のうち，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。例えば，地盤振動において卓越している周波数は，橋脚振動のフーリエ振幅においても同様に卓越しますが，このような振動はフーリエ振幅比を算出することで1に近づき，逆に地盤振動よりも相対的に振動しやすい固有振動数は振幅比が大きくなります。このイメージを示したものが**図5下**です。このような処理を行うことで，フーリエ振幅比が卓越している振動数，すなわち橋脚の固有振動数を特定することができます。

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特定に有効ですが，河川中に存在する橋脚では地盤振動を直接計測することが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水平と鉛直成分の振動データのみから地盤振動を推定します。

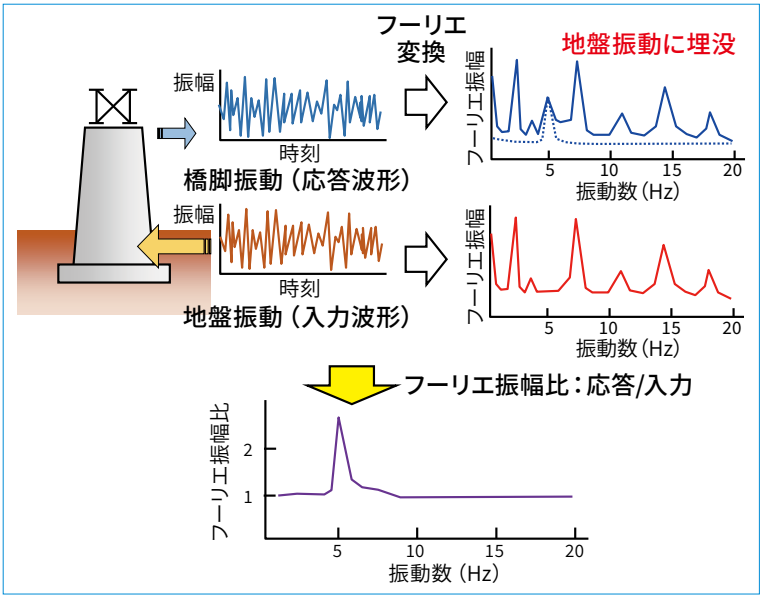

図5　橋脚振動と地盤振動のフーリエ振幅比のイメージ図

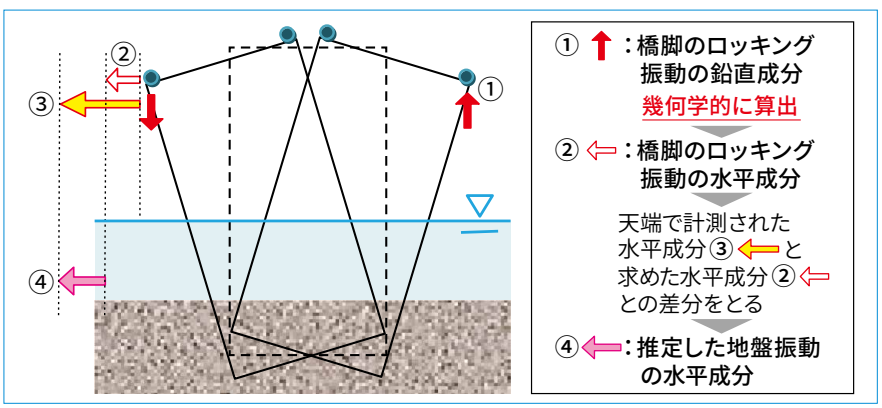

図6　新手法における橋脚振動の波形処理の概要

図6に新手法における橋脚振動の波形処理の概要を示します。本手法の前提として橋脚の振動をロッキング振動（☞参照）と仮定します。橋脚両天端で計測された振動成分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の波形を求めます。

次に，算出したフーリエ振幅比の波形に対し，固有振動数を物理的に表現する理論的な関数の波形（以下，関数という）の一致度を求めます。具体的には，関数の変数である振動数をさまざまに変化させ，算出したフーリエ振幅比の波形と関数の波形との誤差がもっとも小さくなる振動数を求めます。その振動数の値を橋脚の固有振動数とします。新手法では，計測した橋脚振動波形に対し上記の演算処理を連続的に行うことにより固有振動数を自動的に特定することができます。

図7は，上記の手法により得られたフーリエ振幅比の波形とその波形と一致度がもっとも高い関数，ならびに固

☞ **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。

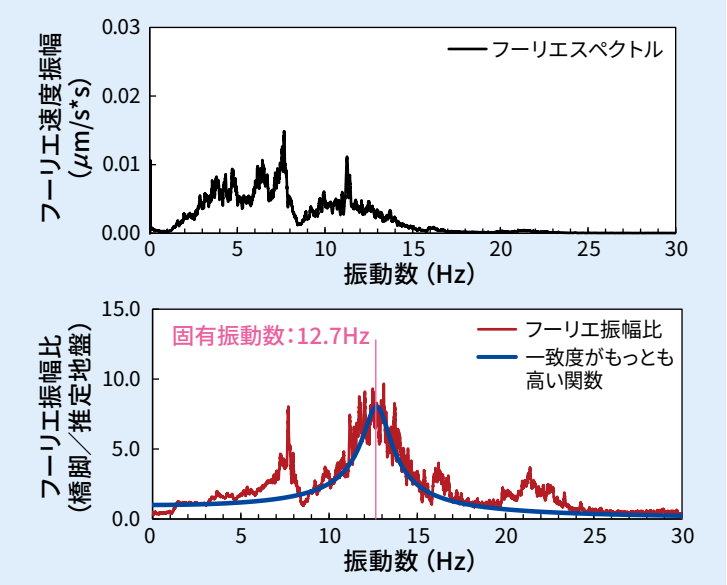

図7　新手法の適用例

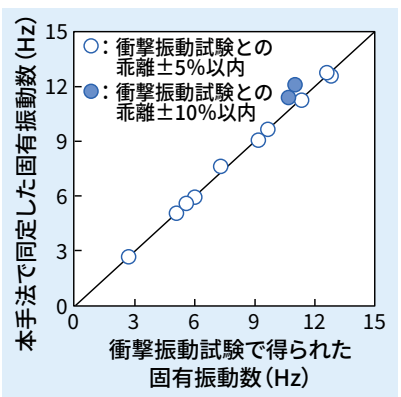

図8　本手法により特定した固有振動数と衝撃振動試験との比較

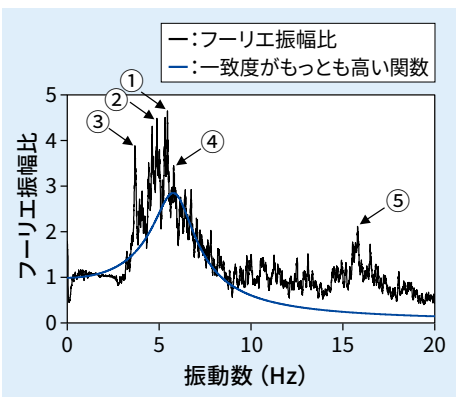

図9　実橋りょうにおけるフーリエ振幅比と一致度がもっとも高い関数の例[3)]

有振動数の例を示したものです。橋脚振動のフーリエ振幅の波形（新手法を適用しない場合）（**図7上**）には固有振動数の卓越はみられませんが，新手法を適用して得られたフーリエ振幅比の波形（**図7下**）では固有振動数が明瞭に卓越し，さらに関数と一致していることがわかります。

実橋りょうを対象とした新手法の適用性の検証

本手法を供用されている実橋りょう12基に適用し，特定された固有振動数と衝撃振動試験で得られた固有振動数とを比較することで，本手法の適用性を検証しました（**図8**）。図中には，衝撃振動試験で得られた固有振動数との乖離（かいり）が±5%以内と±10%以内に分けてプロットしています。結果として，本手法により固有振動数を特定した12基のうち，10基が乖離±5%，残りの2基についても乖離±10%以内で固有振動数を特定しており，常時微動計測による固有振動数評価の適用性が衝撃振動試験とほぼ同等で，かつ十分な実用性を有することが確認できました。

もう一つ，新手法の大きな特徴は，仮に算出したフーリエ振幅比の波形に明瞭な卓越振動数が複数発現する場合にも，橋脚の固有振動数を精度よく特定することが可能であることです。**図9**は，**図8**中に示した実橋りょうのうち，フーリエ振幅比の波形とその波形と一致度がもっとも高い関数の一例です。図中矢印で示すような卓越が多数ある場合，これらの中から適切な固有振動数を特定することは容易ではありません。このような場合でも新手法では，フーリエ振幅比の波形と関数との一致度がもっともよい固有振動数を自動的に特定できます。結果として新手法では図中の矢印④とほぼ同じ5.7Hzの固有振動数が特定されました。このように新手法では評価者の経験に関わらずつねに一定の特定結果が得られ，実用性をさらに高めています。

おわりに

ここでは，橋脚天端両端部での微動計測結果から，橋脚の固有振動数を自動的に特定する手法とともに，実橋りょうでの検証結果と本手法の特徴について紹介しました。

今後も実橋りょうにおける適用事例を蓄積し，より詳細な適用範囲について検討を行う予定です。RRR

文　献

1) 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
2) 欅健典，渡邉諭，宮下優也，太田直之：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，Vol.20，pp.61-68，2016
3) 欅健典，湯浅友輝，内藤直人，渡邉諭：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性評価手法，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No.4，pp.319-327，2018
4) 中村豊，田母神宗幸，佐藤新二，立花三裕：常時微動を用いた新しい橋脚健全度評価法の提案，鉄道総研報告，Vol.8，No.5，pp.47-52，1994