

常時微動を活用した洗掘モニタリング装置の開発



木下 一孝*1



足立 啓二*2



加藤 健二*3

Development of scouring monitoring equipment using microtremor

Kazutaka KINOSHITA*1, Keiji ADACHI*2, and Kenji KATO*3

*1,2 Sub-chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

*3 Chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

In bridges over river, local scouring may occur around the bridge piers when the river level rises. Scouring can cause disasters such as tilting of bridge piers, and must be prevented for safe railway operation. In this study, for the purpose of improving the safety against scouring, we investigated a method of monitoring the stability of bridge piers from microtremor on the pier.

●**Keywords:** Scouring, Natural frequency, Monitoring, Microtremor

*1JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員 (現 仙台土木設備技術センター)

*2JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員

*3JR東日本研究開発センター 防災研究所 主幹研究員 (現 新潟土木設備技術センター)

1. 緒言

河川橋りょうでは、増水時において流水の作用により橋脚周りで河床材料が流される局所洗掘（以下、洗掘）が生じることがある（図1）。洗掘が進行すると根入量が減少し、支持力が不足することで橋脚が傾斜や沈下する場合があります、JR東日本では洗掘災害に対して鉄道の安全運行を確保するためハード対策に加えて、運転規制などのソフト対策を実施している（表1）。ソフト対策の中で洗掘計は、図2のように傾斜角が基準値に達すると列車抑止を行うが、傾斜に至るまで洗掘の進行を把握することはできない。そのため更なる安全性向上に向けて不定期に変化する橋脚の安定性をリアルタイムに把握したいというニーズがあった。そこで筆者らは、橋脚の安定性を常時モニタリングする手法を検討し、モニタリング機能を追加した次世代洗掘計の開発を行った。本稿では、次世代洗掘計の開発までの取組と機能の評価結果について報告する。



図1 橋脚周りの洗掘の例

表1 洗掘災害に対する措置

区分	概要
ハード対策	根固め工など基礎周辺の河床を防護することにより洗掘を防止する。
検査	洗掘の恐れがある橋りょうを対象に全般検査および河川増水後の随時検査において根入量、滯筋の移動などを確認する。
水位規制 ¹⁾	水位計を用いて河川の水位を観測し、規制水位に達すると運転規制を行う。
洗掘計 ²⁾	橋脚の天端に傾斜計を設置し、傾斜角が基準値に達すると運転規制を行う。

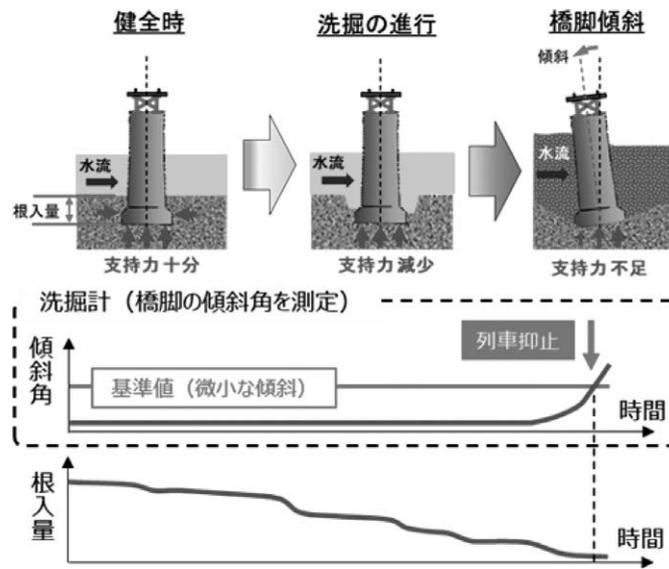


図2 洗掘計検知と根入量の低下の時間変化 (イメージ)

2. 橋脚の安定性を常時モニタリングする手法の検討

洗掘の進行をモニタリングするには根入量の計測が理想的であるが、根入量を直接計測するため水中に機器を設置することは難しい。そこで間接的に橋脚の安定性をモニタリングすることを考え、橋脚の根入量の変化と相関がある固有振動数に着目した。これは、洗掘により根入量が減少すると橋脚そのものの質量や剛性は変わらないが、地盤の剛性が低下するため固有振動数が低下するという現象を利用している。

従来から橋脚の固有振動数は安定性の判定に用いており、JR東日本では固有振動数の同定に衝撃振動試験³⁾を行っている。衝撃振動試験とは、重錘を用いて橋脚頭部に衝撃を与え、その応答から固有振動数を求める試験である。衝撃振動試験をモニタリング手法に適用すると衝撃を与える装置が大掛かりになってしまう。そこで常時微動を活用し、橋脚天端に設置した加速度計のみで固有振動数を算出する手法を検討した。

2・1 常時微動によるモニタリングの課題

ここで常時微動を活用したモニタリングの課題を2点述べる。

図3に常時微動をサンプリング周波数200Hzで72時間計測した結果の例を示す。図中のプロットは、計測された加速度波形を4,096データ、約20秒で抽出し、その抽出した波形(以下、20秒波)のスペクトル解析より求めた橋脚の固有振動数である。また、比較のため衝撃振動試験で同定した固有振動数4.8Hzを示している。図3より常時微動の20秒波による固有振動数は、衝撃振動試験の4.8Hzに対して断続的に最大で6Hz程度の値が現れることがあり、ばらつきが見られる。このようなばらつきの原因は、常時微動が微小な振幅であることから風などによる環境振動や列車振動などが影響していると推測される。したがって、常時微動から固有振動数を高い精度で求めることが1点目の課題である。

また、2点目の課題は、複数のスペクトルのピークから橋脚の固有振動数を特定することである。図4に常時微動から算出されたスペクトルの一例を示す。常時微動から得られるスペクトルでは必ずしも橋脚の固有振動数のみが卓越せず、橋桁や電柱などのピークも現れるため、どのピークが橋脚の固有振動数であるか特定することが困難である。なお、図4に示す各構造物の固有振動数は、予め衝撃振動試験から特定した結果である。

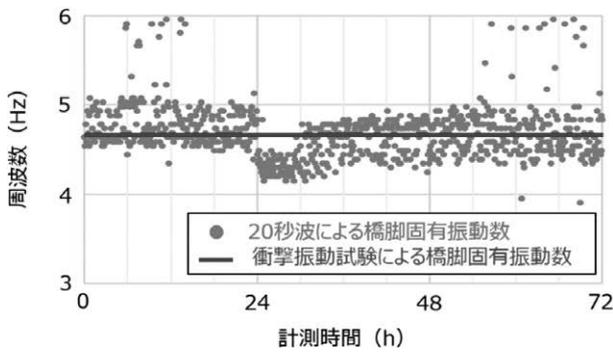


図3 常時微動で算出した固有振動数の時系列変化の例

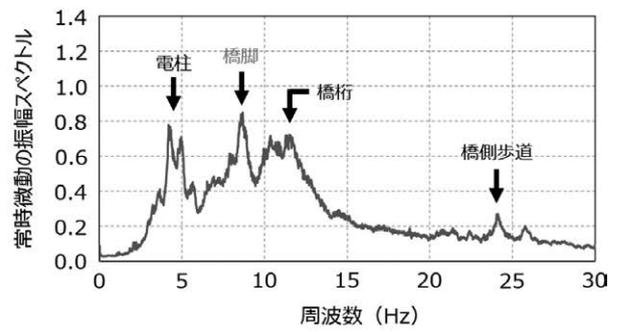


図4 常時微動で算出したスペクトルの例

2・2 常時微動によるモニタリングに向けた取組と成果

(1) 常時微動から算出する固有振動数の精度向上

実橋脚41基を対象に常時微動を計測し、得られた加速度波形を用いて、スペクトル解析に用いるデータ長を変更、または部分的な波形をランダムに抽出、この抽出した各波形から固有振動数を算定そして平均化をするなど、データ処理方法を試行錯誤し、固有振動数精度の確認を行った。その結果、計測した波形を一定時間で抽出し、平均化することで安定して高い精度を得ることができた。具体的には、20秒波の固有振動数を連続する60波で平均すると衝撃振動試験の結果に対して±3%の精度となった(図5)。

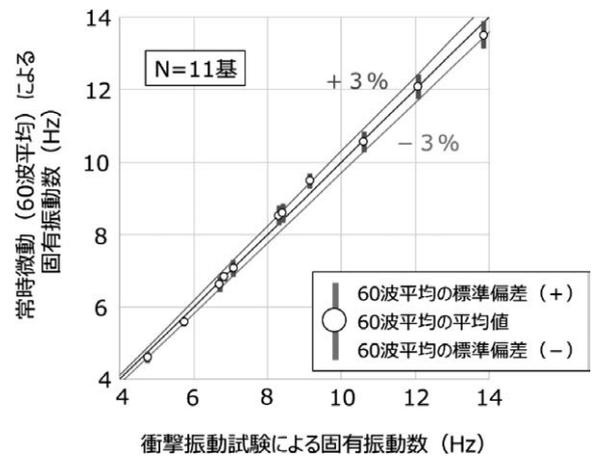


図5 常時微動による60波平均固有振動数の精度

(2) 橋脚の固有振動数を特定する手法の開発

橋脚の固有振動数を特定するため、モニタリング開始時に衝撃振動試験で固有振動数を同定し、これを初期値として事前に設定する。さらにピーク周波数の変化を追跡するアルゴリズム(以下、追跡アルゴリズム)を開発し、洗掘による固有振動数の変化に対応していくことにした。固有振動数の算出と追跡の手順を図6および以下に示す。

① 加速度波形からのデータ切り出し

常時微動から20秒波を切り出す。また、フーリエ変換前の窓処理に伴う情報量の欠如を抑えるためのオーバーラップ処理を行うこととした。そのため解析データの切り出し開始点を図6①のように5秒ずつずらし、波形の切り出しを行う。これにより5秒毎に20秒波が切り出されるため5分間で60波が得られる。

② スペクトル解析 (FFT) の実施

切り出した20秒波に対して順次スペクトル解析を行う。

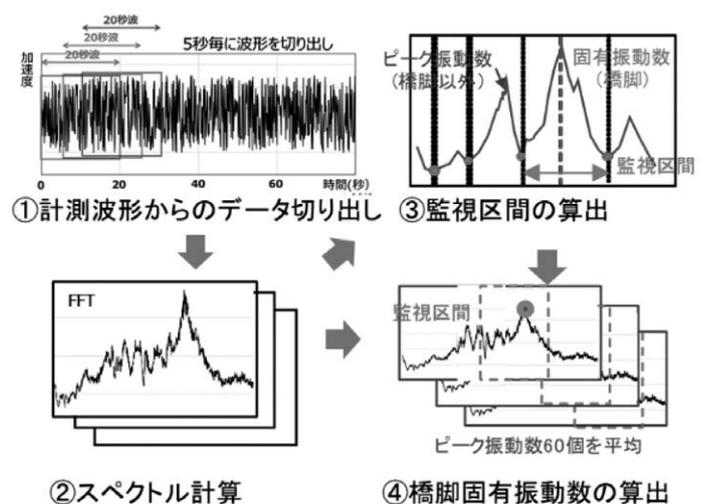


図6 追跡アルゴリズムの手順

③監視区間の算出

②で算出したスペクトル波形のピーク値を1.0に正規化し、この正規化した20秒波スペクトルを過去1時間分(720スペクトル)で平均化する。平均化したスペクトルを1時間平均スペクトルと呼ぶ。この1時間平均スペクトルから事前に把握した初期値を含む区間を監視区間として設定する。監視区間の設定は、初期値のピークを挟むスペクトルの谷部から決定する。なお、1時間平均スペクトルを算出するのは、谷部を安定して求めるにあたり円滑なスペクトル波形にするためである。

洗掘により固有振動数が初期値から変化した場合、監視区間が更新されることで固有振動数を追跡することができる。

④橋脚の固有振動数算出

洗掘により固有振動数が変化した場合、1時間で平均してしまうと固有振動数の変化が微少になることが懸念される。そこで、②で算出した波形スペクトルに対して③で求めた監視区間を当てはめ、ピーク周波数を求める。このピーク周波数60波分を平均化処理することで橋脚の固有振動数を5分毎に算出する。

常時微動を計測していた実橋脚に対して追跡アルゴリズムを適用した例を図7に示す。これは観測期間中に約2mの水位上昇が観測されたときの固有振動数算出記録である。図7には水位の変動を青線で示すが、水位上昇時に連動して黒プロットの固有振動数の低下が見られている。当該橋脚は、根固め工が施されており増水に伴う洗掘は見られていない。そのため一時的な固有振動数の低下は、増水に伴う付加質量⁴⁾と呼ばれる見かけの質量の影響と考えられる。この事例からわずかな固有振動数の変化を追跡アルゴリズムによって精度よく把握することが可能であることが確認できた。

(3) モニタリング困難な橋脚の把握

前述した(1)および(2)によりモニタリングが可能となった一方、モニタリングが困難な橋脚が一部で見られた。図8はモニタリング困難な橋脚で計測された常時微動のスペクトル(本手法を用いて、最大値を1として正規化)である。橋脚の固有振動数は衝撃振動試験から16.4Hzであったが、常時微動ではピークが見られない。この原因として、常時微動の外力が小さいことから、十分な支持力が確保されている場合、または橋脚高さが低い場合など、橋脚の振幅が小さくなる条件で生じるものと考えられる。このような橋脚は、計測を行った橋脚全41基中10基(全体の24%)で確認された。この結果を踏まえて、固有振動数モニタリングを開始する前にスペクトル波形の確認を行う必要があると考えている。

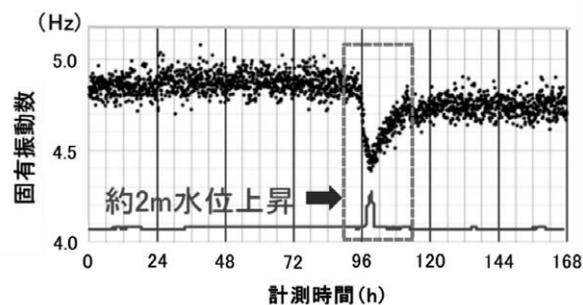


図7 増水中の固有振動数算出記録

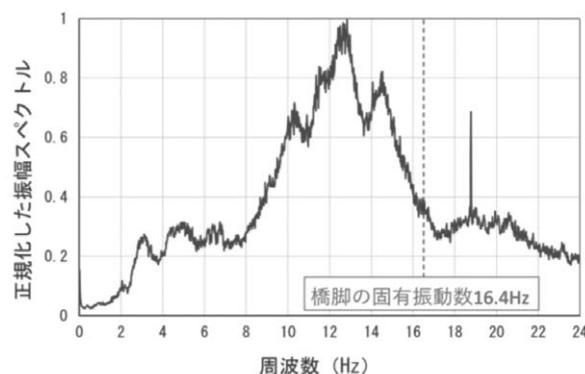


図8 モニタリング困難なスペクトルの例

3. 次世代洗掘計の実用化に向けた各種機能確認試験

開発した手法を活用するため、傾斜計測機能のみであった従来の洗掘計に、常時微動による固有振動数モニタリング機能を追加した次世代洗掘計を開発した。次世代洗掘計の試験機を製作し、実用化に向けて性能確認試験を行った。以下に試験内容と結果を報告する。

3・1 機能確認試験

固有振動数の精度と追跡機能を確認するため、φ0.3m×高さ1.0mのコンクリート製の模擬橋脚を用いた洗掘再現試験を行った。試験内容は、1.2m×1.2m×深さ0.5mの立て坑に模擬橋脚を設置、埋戻しを行う。模擬橋脚に加速度計を設置し、根入量を50mmずつ低下させながら開発した手法により計測を行い、固有振動数の変化を確認した(図9)。

図10に機能確認試験による固有振動数を時系列で示している。△プロットは5分毎に算出される20秒波の60波平均値であり、比較のため衝撃振動試験を実施した結果を□プロットで併記している。図上に根入量を、図中には掘削した時間帯を明記している。試験の結果、衝撃振動試験による固有振動数に対して平均2.9%の誤差で算出できていた。また、根入量低下に伴い固有振動数は連続的に低下しており、変化する固有振動数を追跡できていた。

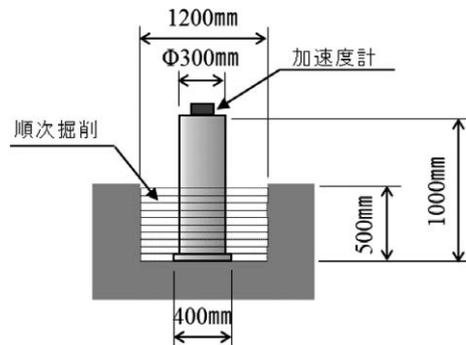


図9 模擬橋脚による試験略図

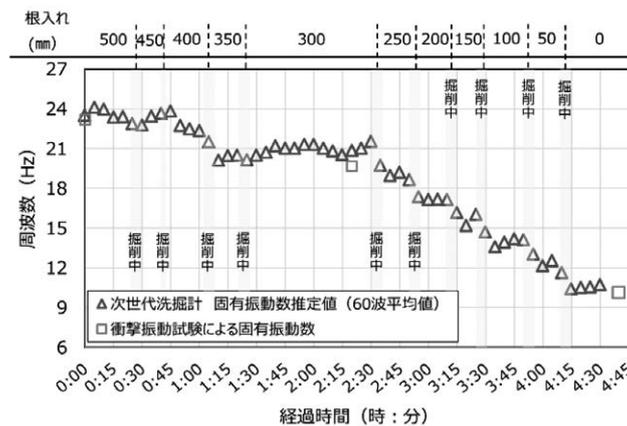


図10 機能確認試験結果

3・2 環境試験

極めて微小な振動を長期間計測することになるため、実橋りょうに試験機を設置し、列車振動や季節変動などの変化に対して安定稼働することを確認した。営業線の同一橋りょうの橋脚3基を対象に、2021年9月～2022年2月にかけて計測を行った。計測期間中、橋脚の根入量に変化は生じていないが、固有振動数の標準偏差は平均値に対して1.5% (平均値5.7Hz、標準偏差0.09)であった。

また、多種多様な環境下で使用していくことを踏まえ、センサ部やデータを収集する制御部を対象に、温度試験(JIS E 3019)、振動試験(JIS E 3014)、防水試験(JIS E 3017)を行った。その結果、各種試験において所定の機能を満足することを確認した。

4. 結言

常時微動を用いた橋脚の固有振動数モニタリング手法を検討し、洗掘災害に対する安全性向上に寄与する次世代洗掘計を開発した。各試験結果より実導入可能な機能を有していることを確認することができたため、現在は営業線橋りょうにおいて試験機を本設としモニタリングを継続している。現在、異常な固有振動数は見られていない(図11、図12)。

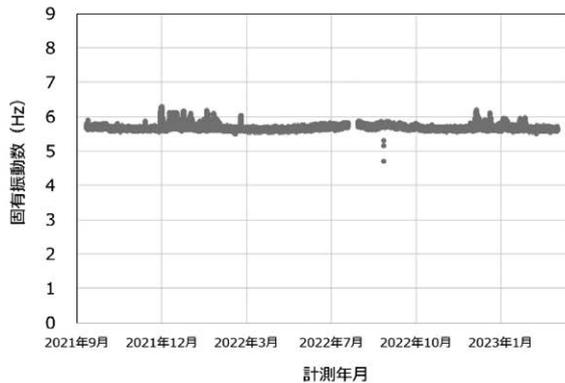


図11 営業線における固有振動数モニタリングデータ



図12 次世代洗掘計を設置した営業線橋りょう全景

今後は既存の洗掘計を次世代洗掘計に置き換えていくため導入箇所を具体的に検討していく。また、固有振動数の測定困難橋脚に対しては、データを蓄積しながら分析を行い、対応について検討をしていく。

最後に、次世代洗掘計の開発にあたり技術指導をいただいた(公財)鉄道総合技術研究所地盤防災研究室、基礎・土構造研究室の皆様がこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐溝昌彦: ワンポイント基礎知識 橋梁における水位規制、RRR、Vol.66、No.7、2009、pp.38
- 2) 加藤健二、島村誠、下山貴史: 傾斜検知型洗掘検知装置の開発、土木学会第53回学術年次講演会概要集、IV-216、2003、pp.432-433
- 3) 国土交通省鉄道局: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物、2007、pp.165-171
- 4) 中島大輔、萩原国宏、佐溝昌彦、小林徹、村石尚: 増水時における河川橋脚の挙動把握のための水理模型による基礎実験、第38回地盤工学研究発表会梗概、2003、pp.2241-2242