

# 常時微動計測による橋脚の固有振動数同定システムの導入マニュアルの概要

渡邊 諭\* 入 栄貴\* 藤原 将真\*

Introduction Manual of Natural Frequency Identification System of Bridge Piers by Constant Microtremor Measurement

Satoshi WATANABE Hiroki IRI Shoma FUJIWARA

In recent years, disasters have frequently occurred due to rapid river flooding and prolonged high water levels caused by typhoons and localized heavy rainfall. It is therefore necessary to establish a method for monitoring the destabilization of river piers during rising water. In response to this need, we have prepared an introduction manual for a natural frequency identification system, which that includes an the algorithm for identifying the natural frequencies of piers from microtremor measurements, the basic specifications of the acceleration sensors required to construct a microtremor measurement system, the application conditions of this system, and methods for evaluating the measurement results.

キーワード：固有振動数，常時微動，加速度センサ，導入マニュアル

## 1. はじめに

近年、台風や局所的な豪雨に伴う急激な河川の増水および高水位の長期化による災害が頻発化している。それに伴い、河川内に位置する橋脚基礎周囲の地盤が増水によって洗掘され、最終的に橋脚が沈下・傾斜・流出するといった災害が多発している。これらの災害は、場合によっては列車の河川への脱線転覆につながり大惨事に至る可能性がある。そのため、増水時において橋脚の健全度を監視することが今後さらに重要となる。

橋脚の健全度を評価する手法として、衝撃振動試験法<sup>1)</sup>がある。同手法は重錘により橋脚を直接加振することで健全度を示す指標である固有振動数を同定し、その値の低下度から橋脚の健全度を評価する手法である。しかし、この手法は重錘による打撃が必要なことから、増水時の計測が困難であるという課題があった。そこで、橋脚の固有振動数を連続的に計測することを目的として、常時微動（以下、微動という）を計測することで固有振動数を把握する手法の開発が鉄道総研で進められてきた。この研究の成果として、橋脚天端部2か所にセンサを設置して微動を計測することで、固有振動数を同定するアルゴリズムを開発した（以下、同定アルゴリズム<sup>2) 3) 4)</sup>。また、この同定アルゴリズムを模型実験および供用中の実橋脚の一部に適用し、固有振動数の同定が可能であることを確認するとともに<sup>5) 6)</sup>、計測センサとして低コストな加速度センサを用いた場合の同定精度を

向上する手法を開発した<sup>7)</sup>。

これら一連の開発成果を活用した固有振動数同定システム（以下、同定システム）の普及を図るため、固有振動数同定アルゴリズムとともに、常時微動計測システムの構築に必要な加速度センサの基本仕様、上記システムの適用条件や計測結果の評価方法等とを合わせたマニュアルを作成したので、その内容について解説する。

## 2. マニュアルの構成

作成したマニュアルの章構成は図1の通りである。マニュアルは全7章で構成されている。1章では常時微動

1章	常時微動計測の意義と本マニュアルの内容
2章	常時微動計測手法の適用範囲
2.1	既往の計測技術と適用範囲
2.2	適用対象となる基礎の構造条件
2.3	適用にあたっての留意点
3章	固有振動数同定アルゴリズム
3.1	固有振動数同定アルゴリズムの概要
3.2	固有振動数の自動算定手法の概要
3.3	固有振動数の評価方法
4章	常時微動計測システムの構築
4.1	常時微動計測システムの基本構成
4.2	計測システム構築にあたって検討すべき項目
4.3	計測システム構成の例
5章	微動計測用センサの選定
5.1	速度センサの仕様
5.2	加速度センサの仕様
6章	計測条件
6.1	サンプリング周波数・計測時間
6.2	計測頻度
7章	設置方法
7.1	計測システムの設置方法の例
7.2	設置にあたっての留意点

図1 マニュアルの章構成

\* 防災技術研究部 地盤防災研究室

計測の意義とマニュアルの内容をとりまとめており、2章以降に具体的な適用範囲やアルゴリズムなどを取りまとめている。以下にマニュアルの各章の内容を概説する。

### 3. 常時微動計測手法の適用範囲

マニュアル2章では、常時微動計測手法の特徴とともに、適用対象となる基礎構造や適用にあたっての留意点について記載している。以下にその内容を概説する。

常時微動計測手法は、衝撃振動試験と異なり打撃による加振が不要である。しかしながら、微小な振動現象である常時微動を利用した手法であるため、適用範囲は衝撃振動試験よりも限定される。そのため、①衝撃振動試験においても固有振動数の同定が困難な橋脚、②減衰定数が大きく卓越振動数が明瞭でない橋脚、③固有振動数付近に桁や付帯構造物などの卓越振動数が存在する橋脚の場合には適用できない可能性が高いとした。

本手法は、「直接基礎形式」、「直接基礎形式+木杭基礎」および「基礎部分が短いケーソン基礎」を対象とし、河川管理施設等構造令が制定・施行された1976年（昭和51年）以降に新設された橋脚、ラーメン構造形式、橋台などの抗土圧構造物には原則として適用しないこととした。なお、対象とする構造物においても、背の高い橋脚、斜角の程度が大きい橋脚、トラス桁や長大橋を支持する橋脚、背が低く土被りの厚い橋脚や高架橋の特徴を有するものについては、事前に衝撃振動試験のデータを確認あるいは新たに取得して、上記①～③の振動特性ではない橋脚かどうかを検討することを推奨している。

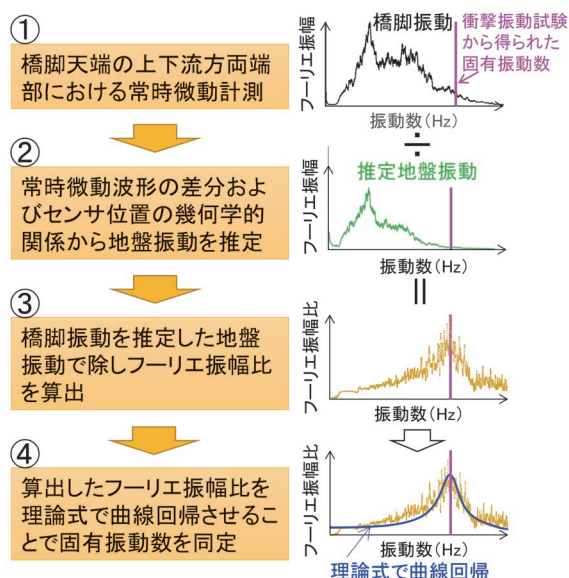


図2 同定アルゴリズムの処理フロー

### 4. 固有振動数同定アルゴリズム<sup>3)</sup> 8)

マニュアル3章では、同定アルゴリズムの詳細について整理している。

本手法では、橋脚天端で計測される橋脚振動（応答波形）を地盤の振動とそれに応答する橋脚のロッキング振動の和であると仮定している。また、洗掘による橋脚の傾斜の多くは桁の拘束の影響により上流方、すなわち橋軸直角方向に発生するため、橋軸直角方向の固有振動数の評価を基本とする。本手法による固有振動数の同定手順は以下のとおりである（図2）。

- ① 橋脚の天端両端部で橋軸直角方向の水平成分と鉛直成分の微動を計測する。
- ② 各微動センサにおける水平成分と鉛直成分を軌跡としてプロットしたりサーージュの角度と、センサ設置間隔との幾何学的関係からロッキング振動の回転中心位置を求める。また、前述した仮定を踏まえ、両端部における微動の鉛直成分の差分からロッキング振動の鉛直成分を求め、同様に幾何学的関係からロッキング振動の水平成分を算出する（図3）。橋脚上で計測した微動の水平成分から算出したロッキング振動の水平成分を差し引き、地盤振動の水平成分（入力波形）を求める。
- ③ 橋脚上で計測した微動の水平成分のフーリエ振幅を②で推定した地盤振動の水平成分のフーリエ振幅で除したフーリエ振幅比（伝達関数）を算出する。
- ④ 算出したフーリエ振幅比（伝達関数）に対し、地盤からの振動を入力とした場合の式(1)で表される減衰定数を有する振動モデルの理論解の波形をフィッティングさせ、両者が最も良く一致する際（決定係数が最大）の振動数を求める。

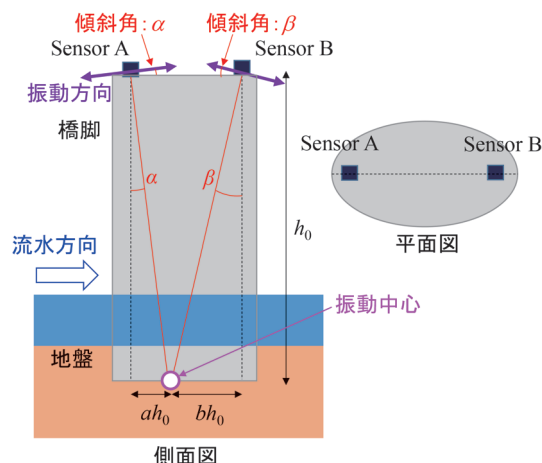


図3 橋脚の一次振動の概念図<sup>3)</sup>

表1 システム構築に関する主な検討項目と検討概要

検討項目	検討概要
堅牢性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 暴露環境を考慮した堅牢性の検討</li> <li>・ 防塵・防滴性能の保護等級 IP67 を推奨</li> </ul>
作動温度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設置地域を考慮した作動温度の確認</li> <li>・ 気温変化に伴う躯体内圧力変化による防水性能の保持が必要</li> </ul>
電源構成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設置状況を考慮した電源構成の決定</li> <li>・ 一次電池、二次電池の各特性の把握</li> <li>・ 省電力設計の必要性</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電化区間における耐電磁ノイズ性能の確保</li> <li>・ バラスト等の飛散物への耐久性の確保</li> </ul>

$$\frac{\hat{x}_a(f)}{\hat{x}_g(f)} = \sqrt{\frac{1 + (2hf/f_0)^2}{|1 - (f/f_0)^2|^2 + (2hf/f_0)^2}} \quad (1)$$

ここに、 $\hat{x}_a(f)$ は橋脚の水平方向振動のフーリエ振幅、 $\hat{x}_g(f)$ は橋脚の鉛直方向振動のフーリエ振幅、 $\hat{x}_a(f)/\hat{x}_g(f)$ はフーリエ振幅比（伝達関数）、 $f$ : 振動数 (Hz)、 $f_0$ : 橋脚の固有振動数 (Hz)、 $h$ : 減衰定数である。

同定手法の基本原理は上記①～④のとおりであるが、実際のアルゴリズムでは、その後、同定精度を高めるための複数の演算処理と、処理フローに基づく固有振動数の自動算定を実施している。詳細については文献<sup>8)</sup>を参照されたいが、これらを同定システムに実装するために必要な内容についてはマニュアルにも詳述している。

なお、同マニュアルにおける固有振動数に基づく橋脚基礎の健全度評価は、衝撃振動試験における固有振動数の評価に準拠<sup>9)</sup>することとした。

## 5. 常時微動計測システムの構築

マニュアル4章では、常時微動計測システムの構築について整理している。

システム構築にあたっては、微動センサ、データ収録部および電源に関する検討が、計測システムの設置にあたっては、橋りょう上で暴露される環境であることを考慮した検討が必要である。表1に、マニュアルに示した各検討項目とその内容を示す。

## 6. 微動計測用センサの選定

### 6.1 センサの仕様

マニュアル5章では、速度センサおよび加速度センサの選定について、各センサに要求される精度や性能の観点で整理している。

速度センサおよび加速度センサの仕様選定にあたっては、固有振動数同定アルゴリズムが十分に適用できるセンサの特性が必要である。マニュアルでは、開発段階で

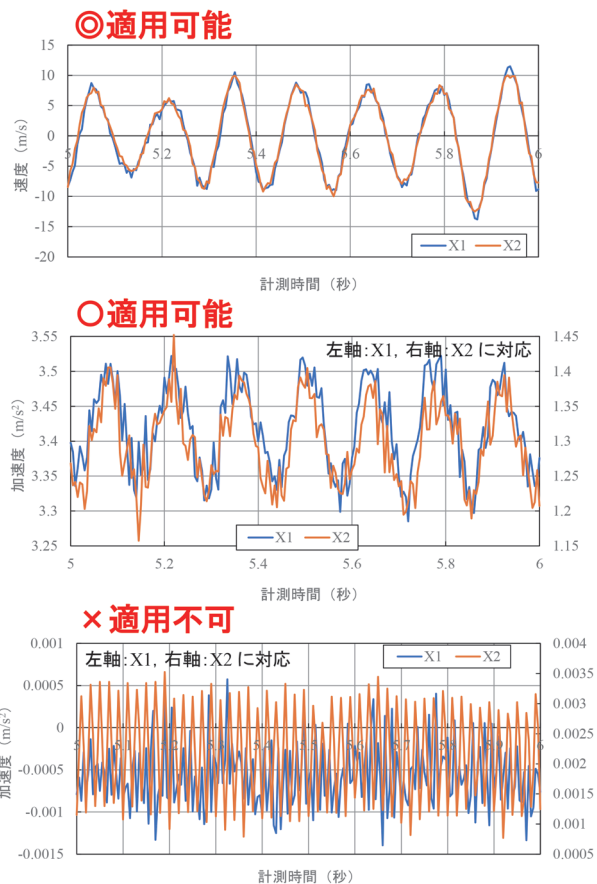


図4 橋軸直角方向の微動波形の一致度と適用可否のイメージ

利用した速度センサの仕様を参考として示すとともに、低コスト化を図る上で有利と考えられる加速度センサに求められる仕様をとりまとめている。以下に検討した加速度センサの仕様を述べる。

### 6.2 同期精度

固有振動数同定アルゴリズムの適用にあたっては、各センサにおいて高い同期性能を確保する必要があるとともに、個別のセンサ間での誤差が可能な限り小さい加速度センサを選定する。具体的には、①内部ノイズが小さいセンサ、②AD変換を伴わないデジタル出力のセンサあるいはノイズが少ないAD変換機能、③同じ場所に設置した際にセンサ間の各軸の出力が一致するセンサ、が必要である。マニュアル中には適用可否の目安となる同期精度を示している（図4）。

### 6.3 外部ノイズ

各加速度センサが有する内部ノイズに関する仕様上の特性と合わせて、計測システムの構築においては外部ノイズの影響を除去する必要がある。マニュアルでは、同定アルゴリズムが適用できる具体的なノイズレベルを示

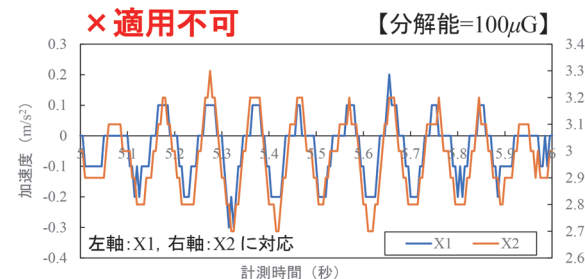
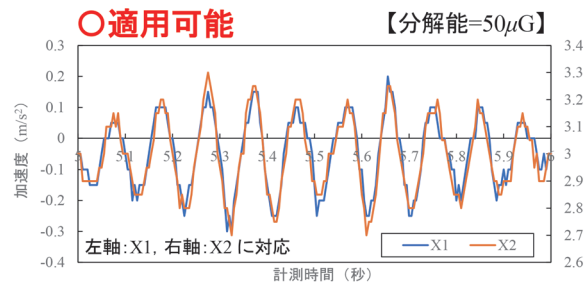
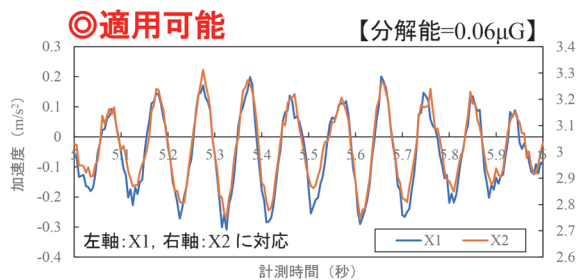


図5 分解能を変化させた場合の波形

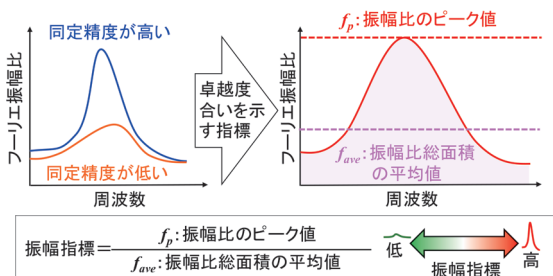


図6 振幅指標の定義概念図

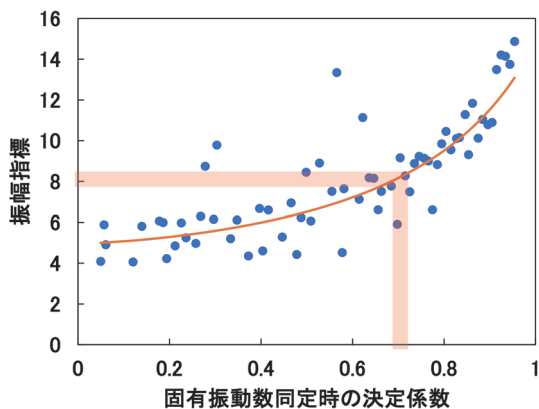


図7 固有振動数同定時の決定係数と振幅指標との関係の例

表2 加速度センサの選定例の主な仕様

項目	仕様
基本構成	デジタル3軸加速度計
センサ種類	周波数変化型
分解能	0.06μG/LSB AD分解能32bit 実行分解能28bit
帯域	DC～460 Hz
検出範囲	±15 G
サンプルレート	1,000 Sps(1msec)
ノイズ密度	0.5μG/√Hz
電源電圧	9～32 V
消費電流	35 mA(Typ.) @ 12V
動作温度範囲	-30～+70℃
防水・防塵	IP67

した。

#### 6.4 分解能

加速度計の最小分解能（センサの最小感度に相当）が同定精度に及ぼす影響を検討するため、元波形に対し最小分解能を段階的に変化させたデータを作成して同定された固有振動数ならびに理論解フィッティングの決定係数を比較した。その結果、最小分解能は最低でも50μG（全掘削条件における計測波形の振幅RMS値の約3%）が推奨されることを示した（図5）。

#### 6.5 伝達関数の形状に基づく適用性

同定アルゴリズムで求められる伝達関数の形状に基づいて整理している。伝達関数におけるフーリエ振幅比における振幅比総面積の平均値と振幅比のピーク値との比（振幅指標）を採用し（図6）、この指標と理論解とのフィッティング時の決定係数との関係を整理した。

結果として、固有振動数が同定可能なのは振幅指標が概ね5を超えた範囲であり、振幅指標が8を超えると同定精度が向上する（図7）。本手法の適用にあたっては、予備計測等により伝達関数の波形を得た段階で同定アルゴリズムの適用の可否を判断することを推奨している。

#### 6.6 加速度センサの仕様例

加速度センサの選定例として、固有振動数同定アルゴリズムの検討に用いた加速度センサの主な仕様を示した（表2）。

### 7. 計測条件・設置方法

マニュアル6、7章ではそれぞれ計測条件および設置方法とその留意点についてとりまとめた（図8、9）。マニュアルへの主な記載事項を表3に示す。また、微動センサの固定と保護の実例についても紹介している。

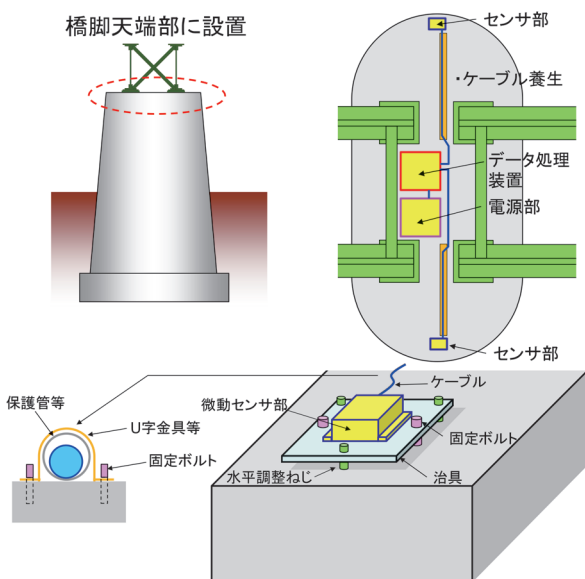


図8 計測システム設置イメージの一例  
(バッテリー駆動の場合)

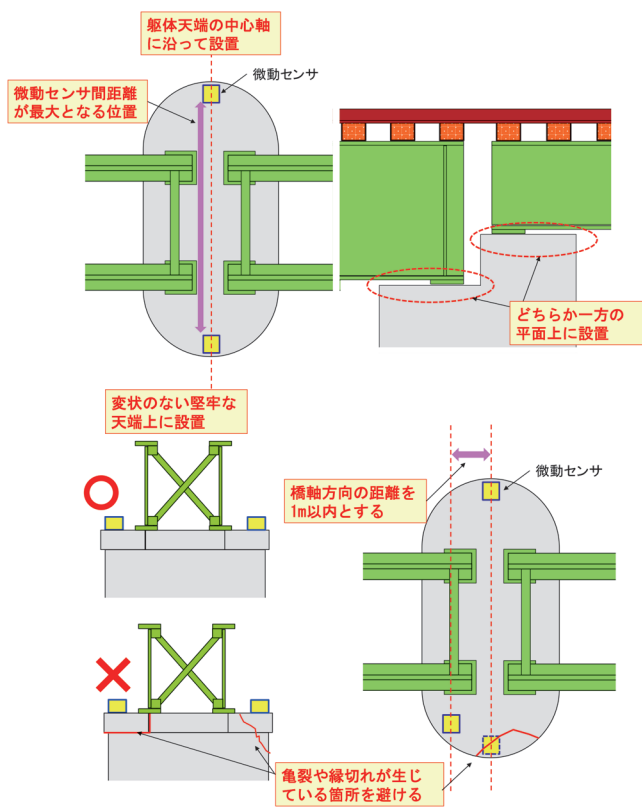


図9 微動センサ設置における留意点イメージ図

表3 計測条件・設置方法に関する主な記載事項

記載項目	内容
サンプリング周波数, 計測時間	・100Hz以上を推奨 ・5分間以上を推奨
計測頻度	・30分間隔以上を推奨
設置方法	・躯体天端の橋軸直角方向の中心軸に沿って, センサ間距離が最長となるように設置 ・桁座の高さが起終点で異なる場合には, 同一の天端平面上に設置 ・亀裂や縁切れのある位置は原則設置しない ・位置をずらす場合には, 微動センサ間の橋軸方向の距離の差が1m以内の差とする
微動センサの固定	・橋脚天端への剛結 ・ケーブルのバタつき防止

## 8. まとめ

本稿では、常時微動計測を用いた固有振動数同定システムの導入マニュアルについて解説した。このマニュアルは国土交通省を通じて入手することが可能であり、近年、発展が目覚ましいIoT関連分野の技術を合わせて活用することで、固有振動数の変化の情報を遠隔地でも簡易かつ迅速に確認することが可能となり、運行情報の発信や検査・補修体制の確保など、公共交通機関としての社会的サービスレベルの向上に寄与すると考えられる。なお、マニュアルの内容は今後新たな知見の蓄積によって加筆・修正する可能性がある。

## 謝辞

本研究は、国土交通省の交通運輸技術開発推進制度(JPJ002223)の助成を受けたものである。

## 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) 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, Vol.20, pp.61-68, 2016
- 3) 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性評価手法, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.319-327, 2018
- 4) 渡邊諭, 内藤直人, 湯浅友輝, 樺健典: 常時微動を用いた新たな固有振動数同定手法の実橋りょうへの適用性に関する検証, 土木学会第74回年次学術講演会, 3-206, 2019
- 5) 渡邊諭, 内藤直人, 湯浅友輝, 樺健典: 断面形状が異なる

- 橋脚模型を用いた新たな固有振動数同定手法の適用性の検証, 第54回地盤工学研究発表会概要集, pp.1175-1176, 2019
- 6) 内藤直人, 渡邊諭, 布川修, 櫻健典: 異なる地盤材料が直接基礎橋脚モデルの振動性状に及ぼす影響, 第54回地盤工学研究発表会概要集, pp.1177-1178, 2019
- 7) 渡邊諭, 入栄貴, 藤原将真: 常時微動による橋脚の固有振動数の同定精度向上に関する基礎検討, 土木学会全国大会 第77回年次講演会, III-37, 2022
- 8) 渡邊諭, 櫻健典, 内藤直人, 湯浅友輝: 河川橋脚の天端部両端での微動計測による固有振動数の自動算定手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.9, pp.11-16, 2019
- 9) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善出版, 2007