

交通運輸技術開発推進制度
研究成果報告書
(ダイジェスト版)

常時微動計測による橋脚の
固有振動数同定システムの開発

令和4年3月

公益財団法人鉄道総合技術研究所

I. 研究開発成果の要約

作成年月	令和4年3月
研究課題名	常時微動計測による橋脚の固有振動数同定システムの開発
研究代表者名	公益財団法人鉄道総合技術研究所 渡邊諭
研究期間	令和元年8月30日～令和4年3月31日
研究の目的	本研究では、橋脚健全度の評価指標である固有振動数を橋脚天端2か所で計測した常時微動データから同定するアルゴリズム（以下、同定アルゴリズムという）の実用化を目指す。そのために、同定アルゴリズムの適用性を増水前後における実橋梁で検証し、実橋梁および模型実験の検証データから実用化に向けた低コスト化と常時微動計測の基本仕様の策定を行う。さらに、計測センサの設置・計測方法、計測結果の評価方法をまとめたマニュアルを作成する。
研究成果の要旨	（1）大型模型橋脚を用いた実験により、開発段階で用いた速度センサよりも約7割安価な加速度センサによる計測値の特徴を把握した。この結果に基づき、加速度センサを用いても速度センサと同程度の精度が得られるように、固有振動数同定アルゴリズムを改良した。 （2）改良した固有振動数同定アルゴリズムを適用できる条件を定量的に示した。具体的には、計測結果から求められるフーリエスペクトル比全体の平均値とフーリエスペクトル比のピーク値との比を振幅指標と定義し、この振幅指標が概ね5を超えた範囲から固有振動数が同定可能、さらに約8を超えると同定精度が顕著に向上することを明らかにした。 （3）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と、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。
知的財産権 取得状況	例) 特許出願 1件 著作権登録 0件
研究成果発表実績	論文発表：国内0件、海外 0件 口頭発表：国内2件（令和3年度に3件を予定）、海外 0件 その他 ：

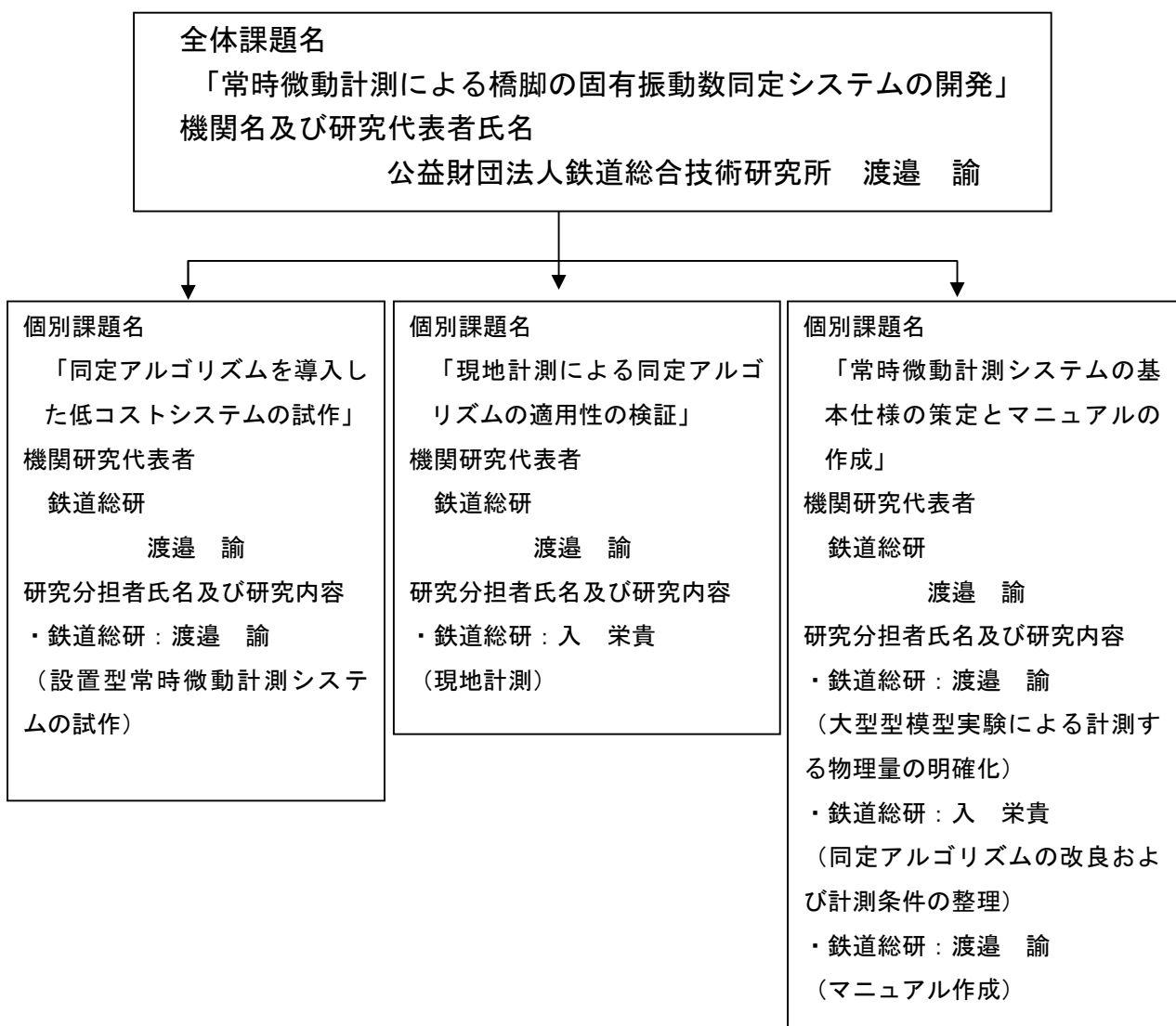
II. 研究開発の目的と実施体制

(1) 研究開発の目的

本研究では、橋脚健全度の評価指標である固有振動数を橋脚天端 2 か所で計測した常時微動データから同定するアルゴリズム（同定アルゴリズム）の実用化を目指す。そのために、同定アルゴリズムの適用性を増水前後における実橋りょうで検証し、実橋りょうおよび模型実験の検証データから実用化に向けた低コスト化と常時微動計測の基本仕様の策定を行う。さらに、計測センサの設置・計測方法、計測結果の評価方法をまとめたマニュアルを作成した。

(2) 研究実施体制

本研究は、鉄道総研が単独で実施する。個別課題との関係を示す体制図は以下の通りである。



III. 研究開発の成果

1. 序論

豪雨時には、河川増水により鉄道橋梁の橋脚基礎周囲が局所的な洗掘を受け、最終的に傾斜や沈下などに至る場合があり、ひとたび発生すれば重大な事故につながりうる。

このような災害を未然に防ぐためには、洗掘に伴う基礎の健全度の変化を捉えることが求められる。しかしながら、増水時には基礎周囲の洗掘を目視で確認することができないため、基礎の健全度を評価する手法として、衝撃振動試験法¹⁾が広く用いられている。同手法は30kgの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(図1²⁾)、増水時の計測が困難な場合がある。また、加振を要することから、増水前から増水中および増水後に至るまでの連続的な固有振動数の変化を計測するには課題がある。

そこで筆者らは鉄道橋脚を対象とした常時微動の(以下、微動という)計測に基づき、洗掘発生時の固有振動数の変化を状態監視する手法を開発してきた³⁾。しかし、普及にあたっては本手法の適用性の検証と低コスト化が課題であった。そこで、微動センサとして研究開発段階で用いた速度センサより安価な加速度センサを採用し、速度センサと同程度の精度が確保できるように固有振動数を同定する演算処理(以下、同定アルゴリズムという)に改良した。また、大型模型実験ならびに実橋梁における現地計測により改良した同定アルゴリズムの適用性を検証し、常時微動計測の基本仕様を策定した。さらに、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と、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。

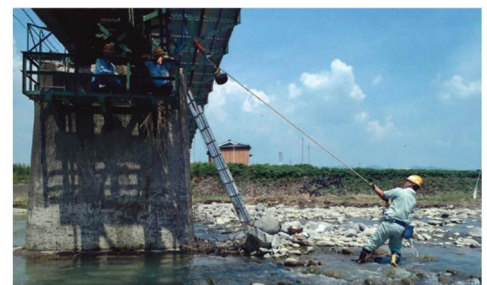


図1 衝撃振動試験における打撃例²⁾

2. 加速時計を用いた設置型常時微動計測システムの作製

低コスト化を目指し、加速度センサを採用した設置型常時微動計測システム(以下、加速度計システム)を作製した。これは、電源部、計測データ処理装置および加速度センサから構成される。実橋梁に設置可能な防水性能や堅牢性を有し、内部電源駆動により長期間の常時微動計測を可能とする。図2に作製したシステムの外観を示す。



図2 作製したシステムの外観

3. 大型模型実験

橋脚模型および模型地盤の状況を図3に示す。橋脚模型は実物の1/3縮尺であり、幅1100mm、奥行き740mm、高さ1995mmの直接基礎形式である。根入れの初期条件は基礎底面より1mであり、200mmずつ段階的に掘削することで洗掘の進行性を模擬した。模型地盤の地盤材料は稲城砂($\rho_{\text{dmax}} = 1.765\text{g/cm}^3$)、目標締固め度90%である。

各掘削段階において、開発段階で作製した速度セ

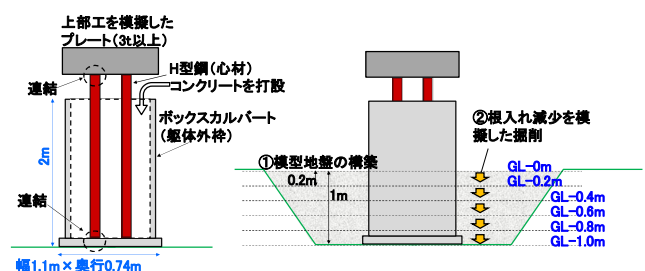


図3 模型橋脚および模型地盤の掘削の概要

ンサを用いたシステムと図 1 に示した加速度センサを用いたシステムで常時微動の同時計測を行い、橋脚の固有振動数の同定精度を比較した⁴⁾⁵⁾。使用した微動計およびその設置状況を図 4 に示す。また、常時微動計測における計測条件および計測データ数を表 1 に示す。なお、当該模型実験では底面掘削を実施しての計測も行っているが⁶⁾、本稿では上記側面の掘削実験結果について述べる。



図 4 掘削状況の例とセンサ設置状況（橋脚天端）

表 1 計測条件および計測データ数

センサ種別	センサ単体の 相対価格	計測条件	データ数	掘削段階の内訳 (データ数)
速度計	1とした場合	200Hz × 300秒	48	GL-0m(7)、GL-0.2m(8)
				GL-0.4m(6)、GL-0.6m(8)
				GL-0.8m(8)、GL-1.0m(11)
加速度計	約0.2～0.3	200Hz × 300秒	46	GL-0m(7)、GL-0.2m(8)
				GL-0.4m(6)、GL-0.6m(7)
				GL-0.8m(8)、GL-1.0m(10)

4. 固有振動数同定アルゴリズムの改良

4.1 固有振動数同定アルゴリズム³⁾⁷⁾

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する。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 5）。

- 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。上記の仮定を踏まえ、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、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。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で同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式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。

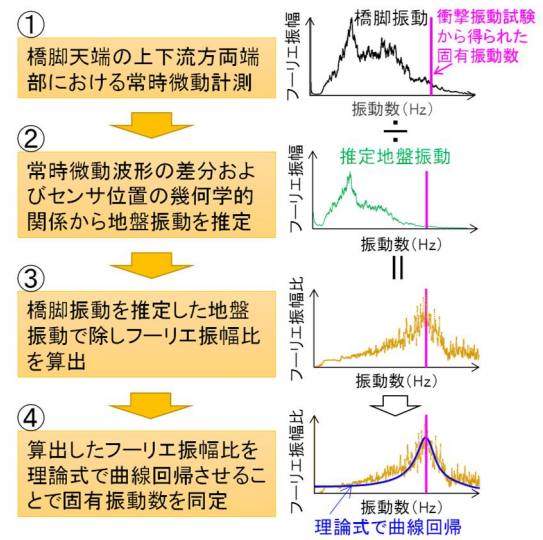


図 5 同定アルゴリズムの処理フロー

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

ここに、 $\hat{x}_a(f)$ は橋脚の水平方向振動のフーリエ振幅、 $\hat{x}_g(f)$ は同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、実際のアロリズムでは、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 7 を参照されたい。

4.2 加速度波形の振動特性と同定アルゴリズムの改良

表 1 で示した各掘削段階におけるデータを対象として加速度計計測データの振動特性について整理する。加速度センサの特性として、図 6 に示すように低周波数帯において速度センサよりも感度が低いことが挙げられる。計測した速度波形および加速度波形に対して改良前の同定アルゴリズムを適用し衝撃振動試験結果と比較したものを図 7、図 8 に示す。図 8 をみると、固有振動数の低下傾向は GL-0.6m 程度までは評価できるものの、全体を通じて衝撃振動試験による固有振動数と一致する結果を得ることができなかった。その理由をフーリエ振幅比の波形形状から考察する。

図 9 は、同定アルゴリズムを適用して得られたフーリエ振幅比のうち、速度センサおよび各加速度センサの特徴を明示的に示した一例である。速度センサで得られたフーリエ振幅比は卓越振動数が明瞭であり、周波数帯全体において外部ノイズとみられる振動も少なく振動理論式と整合する。それに比べ、加速度センサで得られたフーリエ振幅比はいずれも振幅が速度センサよりも 1 オーダー程度小さい。さらにノイズが大きく波形に欠けがあるものも存在する（図中、ノイズ高の波形）。この理由として、上述のように低周波数帯の感度が低いこと、ノイズが大きいためロッキング振動成分が分離できず入力波

形を過大に同定している可能性などが考えられる。一方、振幅比は小さくなるものの速度波形で得られた伝達関数と相似形を呈す波形が存在しており、同様の特徴を有する計測波形が多数存在することが分かった（図中、ノイズ低の波形）。すなわち、振動理論式のフィッティングにおいて新たな演算処理を追加することで、固有振動数の同定が可能になることを示唆している。

そこで、同定アルゴリズムの改良として、従来ではフィッティング時の変数を固有振動数と減衰定数の二変数としていた方法に対し、新たにフーリエ振幅比の増幅率 A を設定して式(1)の左辺に乗じた。

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

この処理により、固有振動数付近にフーリエ振幅比のピークが存在するもののフーリエ振幅比が著しく小さく同定不能となる加速度センサで得られた波形に対し、その波形を増幅することで理論式にフィッティングすることが可能となる。図 10 は改良前後のフィッティング結果の一例を示したものである。

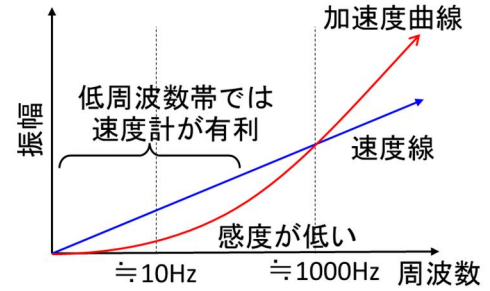


図 6 各センサの周波数帯別の感度イメージ

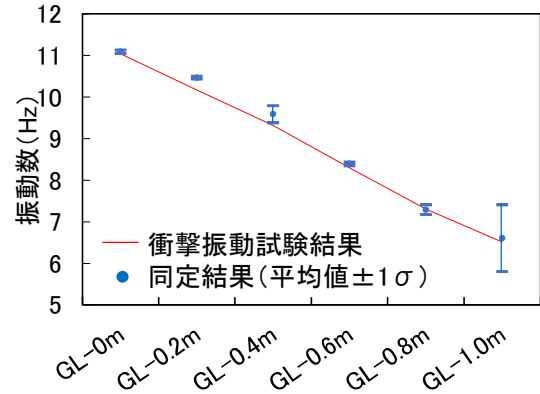


図 7 速度センサで同定した掘削段階別の固有振動数

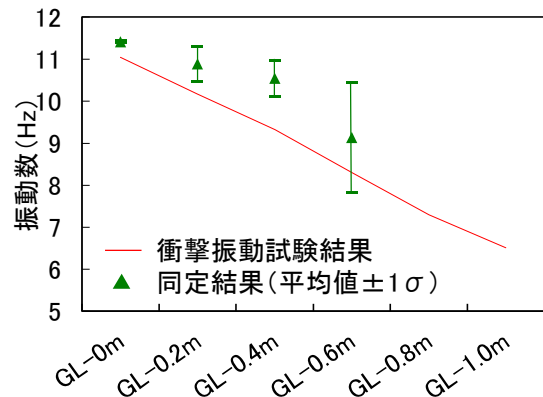


図 8 加速度センサで同定した掘削段階別の固有振動

上記の改良により、フーリエ振幅比が固有振動数付近に明瞭なピークを示しているのにも関わらず、理論式で十分なフィッティングが出来ないものを補完し、同定精度を向上させることが可能となっている。

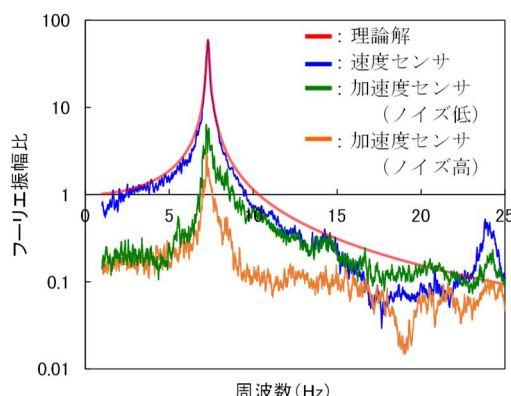


図9 特徴的なフーリエ振幅比の例

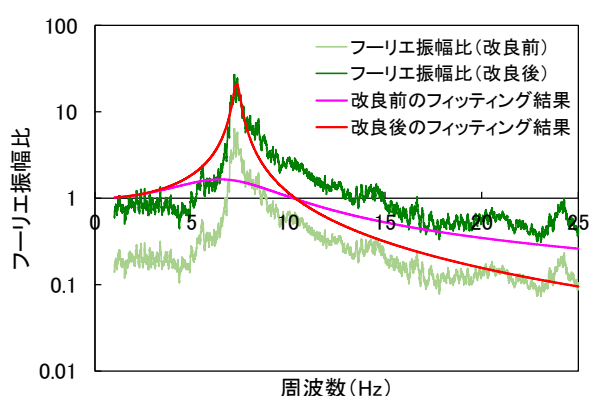


図10 改良前後のフーリエ振幅比と同定結果

4.3 改良前後における同定精度の比較

図11に改良前・改良後における固有振動数の同定結果を衝撃振動試験の結果(図の横軸)と比較して示す。図から、改良によって衝撃振動試験結果との乖離が著しく減少していることが分かる。また、加速度センサのみならず速度センサにおいても固有振動数との乖離が小さくなっており、同定精度が向上していることがわかる。この処理により、加速度センサによって固有振動数が同定可能な割合は、改良前が約30%であったのに対し、改良後は約90%まで向上することが確認できた。

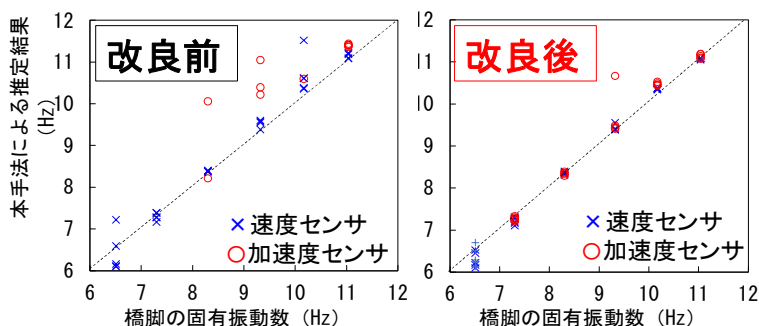


図11 改良前後における同定結果の比較

5. 実橋梁への適用と検証

5.1 実橋梁への設置概要

実橋梁における長期的な連続計測によって本手法の適用性を検証するため、図12に示す直接基礎形式の橋梁に計測システムを設置した。橋脚は円形断面で高さは約21mである。2021年8月に鉄道事業者が実施した衝撃振動試験では固有振動数を6.8Hzと同定している。橋脚天端両端部への加速度システムの設置状況を図12中に示している。計測期間は約2年間実施したが、本稿では2021年10月7日～2022年1月7日の3ヶ月を対象とした整理結果を報告する。計測頻度は30分に1回(エラーデータは除く)、サンプリング周波数は200Hz、計測時間は5分間である。



図12 対象橋脚およびシステム設置状況

期間中は洗掘が発生する規模の増水は発生しなかった。そのため、衝撃振動試験の結果を真値として比較する。図13に対象期間の30分ごとの固有振動数の同定結果の全結果を示す。ばらつきはあるもの

5.2 実橋梁への設置概要

期間中は洗掘が発生する規模の増水は発生しなかった。そのため、衝撃振動試験の結果を真値として比較する。図13に対象期間の30分ごとの固有振動数の同定結果の全結果を示す。ばらつきはあるもの

の同定結果は概ね 6.8Hz 付近に集中している。

ここで、列車通過等の影響がない深夜帯（午前 0 時～5 時）の連続的な固有振動数の変化の例を図 14 に示す。同時間帯では 6.8Hz 付近に同定結果が集中していることが確認できる。図 13 の同定値のばらつきの原因として、常時微動は様々な環境要因に起因する振動を含んでいるため、計測中に列車通過等の大きな振動が含まれていたり、強風等の気象条件により橋脚以外の振動が卓越したりする場合に同定精度が低下してしまうことが考えられる。しかしながら、連続計測によりばらつきは一時的なものであることが確認でき、洗掘による固有振動数の低変化はないと判断できる。この時、6.8Hz との誤差平均値は 4.9% であり、模型試験による衝撃振動試験と本手法との誤差平均実績 7% と比較すると⁸⁾、深夜帯の限られた計測データではあるが、実橋梁でも高い同定精度を有することを示した。

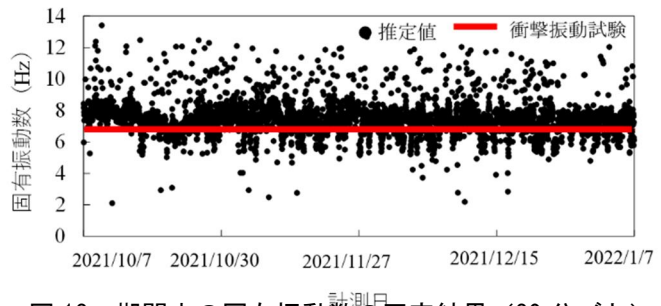


図 13 期間中の固有振動数の同定結果（30 分ごと）

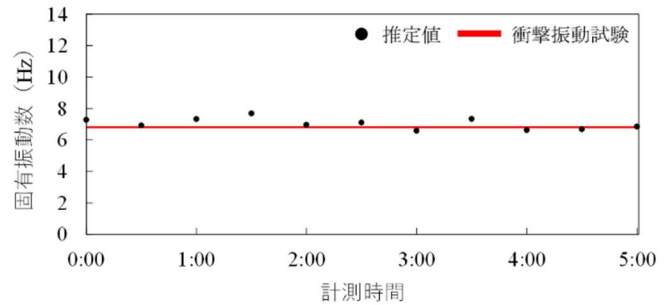


図 14 深夜帯の固有振動数の同定結果

6. フーリエ振幅比の波形形状に基づく適用性

従来、常時微動により固有振動数を同定する手法の適用範囲は衝撃振動試験よりも狭いと考えられてきた。ここでは、改良した同定アルゴリズムが適用可能な条件を明確に示すことを目的として、模型実験で計測した全データを対象に分析を行った。

本検討では、伝達関数の卓越度合いを示す指標として、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 15）、この指標と理論式とのフィッティング時の決定係数との関係を整理した。振幅指標は値が大きくなるほど明瞭なピークを呈することを示しており、上述の減衰定数をパラメータとして内包している。図 16 に、理論式フィッティング時の決定係数と振幅指標との関係を示す。図から、固有振動数を同定可能であったのは振幅指標が概ね 5 を超えた範囲であることが分かる。また、振幅指標が 8 を超えると同定精度が向上することが分かった。

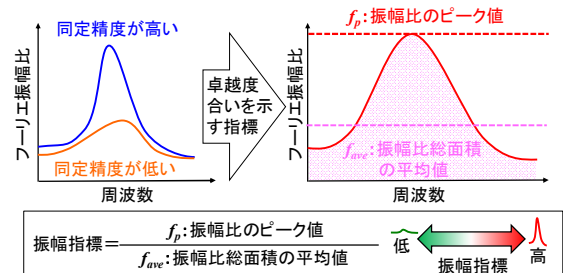


図 15 振幅指標の定義概念図

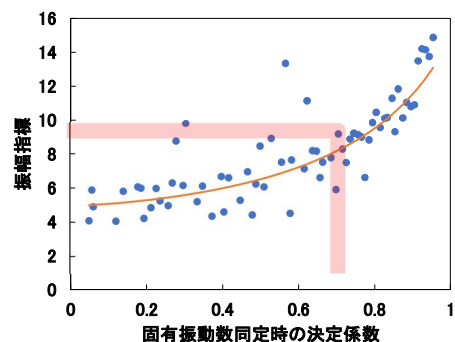


図 16 固有振動数同定時の決定係数と振幅指標との関係の例

従来は一定期間の試験的な計測期間を設けて、衝撃振動試験と同様の固有振動数を同定可能か確認した上でしか本手法の適用性が評価できなかった。しかし、この振幅指標を用いることで、少なくとも予備計測で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が判断できるようになったと考えられる。

7. 固有振動数同定システムの導入マニュアルの概要

7.1 概要

本稿 6 章までに述べた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。

7.2 マニュアルの構成

作成したマニュアルの章構成は図 17 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。

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 17 マニュアルの章構成

7.3 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。

7.4 固有振動数同定アルゴリズム³⁾⁷⁾

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。ここでは本稿 4 章で詳述したので省略する。なお、同定アルゴリズム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。また、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⁹⁾することとした。

7.5 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2に、マニュアルに示した各検討項目とその内容を示す。

7.6 常時微動センサの選定

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。

表2 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	・暴露環境を考慮した堅牢性の検討 ・防塵・防滴性能の保護等級 IP67 を推奨
作動温度	・設置地域を考慮した作動温度の確認 ・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
電源構成	・設置状況を考慮した電源構成の決定 ・一次電池、二次電池の各特性の把握 ・省電力設計の必要性
その他	・電化区間における耐電磁ノイズ性能の確保 ・バラスト等の飛散物への耐久性の確保

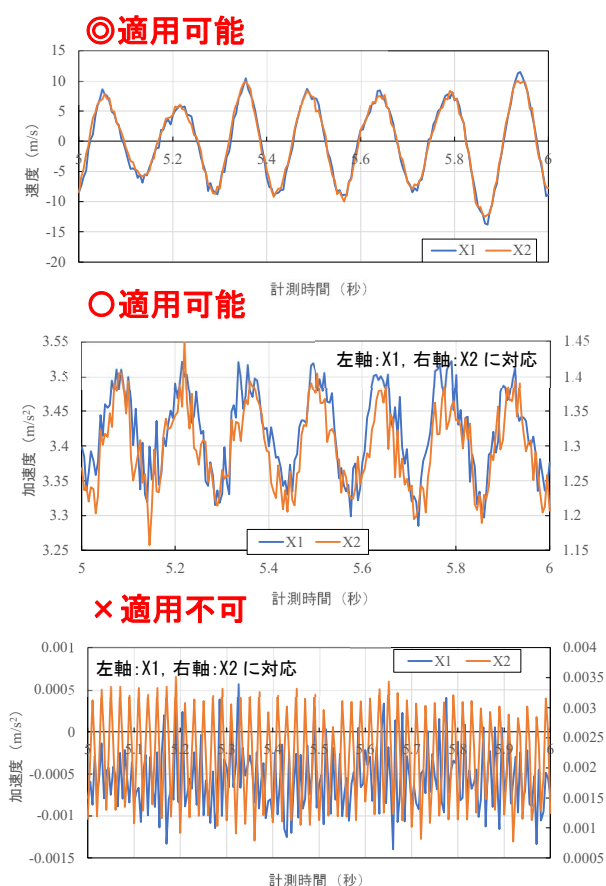


図18 橋軸直角方向の微動波形の一致度と適用可否のイメージ

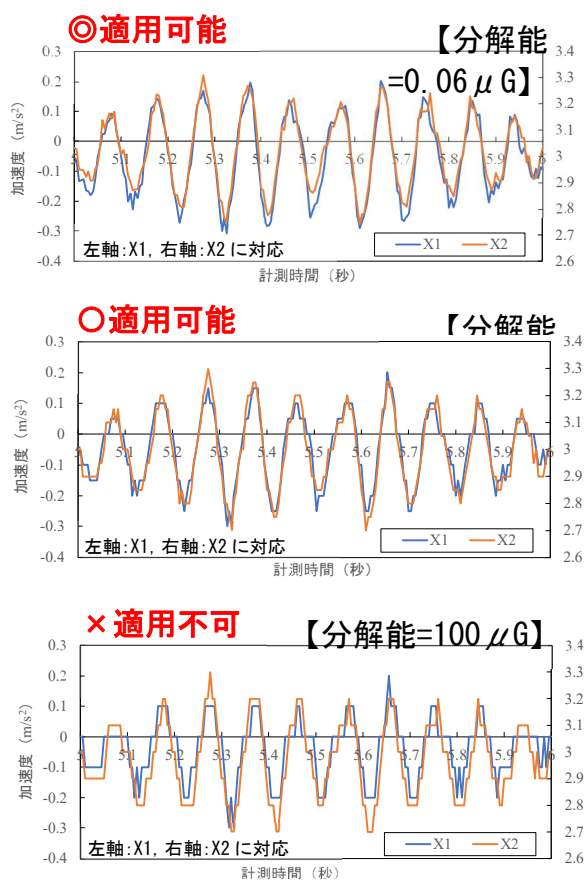


図19 分解能を変化させた場合の波形

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 18）。

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した。

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 50 μ G（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 19）。

5) 伝達関数に基づく適用性

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。ここでは本稿 6 章で詳述したので省略する。

6) 加速度センサの仕様例性

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 3）。

表 3 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	0.06 μ G/LSB AD分解能32bit 実行分解能28bit
帯域	DC～460 Hz
検出範囲	±15 G
サンプリングレート	1,000 Sps(1msec)
ノイズ密度	0.5 μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$
電源電圧	9～32 V
消費電流	35 mA(Typ.) @ 12V
動作温度範囲	-30～+70 $^{\circ}$ C
防水・防塵	IP67

表 4 設置条件・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

7.7 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 20, 21）。マニュアルへの主な記載事項を表 4 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。

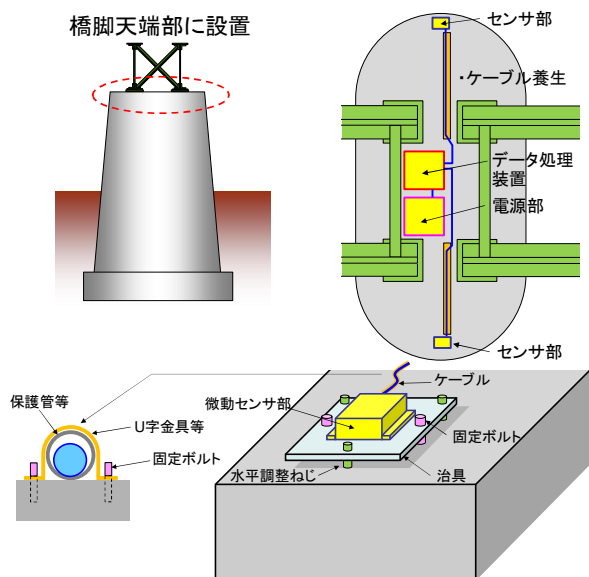


図 20 計測システム設置イメージの一例
(バッテリー駆動の場合)

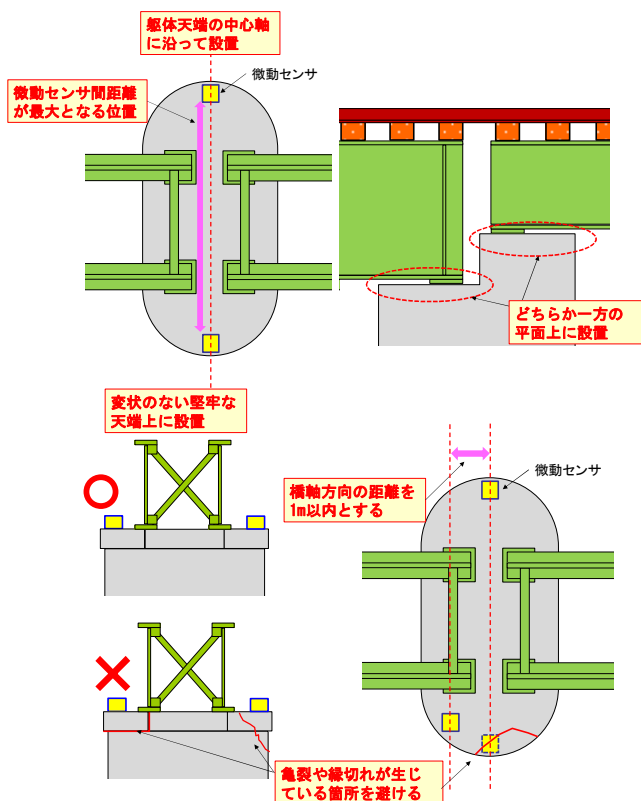


図 21 微動センサ設置における留意点イメージ図

8. まとめ

近年、増水による河川橋脚の洗掘被災事例が増加しており、河川橋脚の健全度を評価する状態監視手法の確立が求められている。これを受けて、鉄道総研では河川橋脚の健全度の指標となる固有振動数を常時微動により同定するアルゴリズムを開発してきたが、同システムの展開にあたっては、実用レベルにコストを削減する必要があった。そこで本研究では、低コストセンサの導入に伴う固有振動数同定アルゴリズムの改良を実施した。得られた成果を以下に示す。

(1) 大型模型橋脚を用いた実験結果に基づき、固有振動数同定アルゴリズムを改良した。この改良により、開発段階で用いた速度センサよりも約 7 割安価な加速度センサを用いても、ほぼ同等の精度が得られることが分かった。

(2) 改良した固有振動数同定アルゴリズムを適用できる条件を定量的に示した。具体的には、計測結果から求められるフーリエスペクトル比全体の平均値とフーリエスペクトル比のピーク値との比を振幅指標と定義し、この振幅指標が概ね 5 を超えた範囲から固有振動数が同定可能、さらに約 8 を超えると同定精度が顕著に向上することを明らかにした。

(3) 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とともに、上記システムの適用条件や計測結果の評価方法等を合わせたマニュアルを作成した。

9. 知的財産権取得状況

特許出願 1 件

- ・ 発明者：渡邊諭，入栄貴
- ・ 発明の名称：特開 2023-135266 固有振動数特定装置及び固有振動数特定方法
- ・ 出願日，公開日：2022 年 3 月 15 日，2023 年 9 月 28 日

10. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 0 件、海外 0 件

2) 口頭発表

国内 2 件 (2022 年度に 3 件予定)、海外 0 件

- [1] 基礎底面の洗掘進行に伴う直接基礎橋脚の傾斜挙動の把握のための模型実験, 第 56 回地盤工学会研究発表会, 12-8-1-06
- [2] 橋脚基礎底面の洗掘進行に伴う基礎の安定性の变化に関する実験的検討, 第 56 回地盤工学会研究発表会, 12-8-1-07
- [3] 橋脚基礎の洗掘に伴う連続的な固有振動数の变化に関する実験的検討, 第 63 回地盤工学シンポジウム (令和 4 年度に予定)
- [4] 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, 土木学会第 77 回年次学術講演会 (令和 4 年度に予定)
- [5] 河川橋脚の洗掘に対する常時微動を活用したモニタリング手法に適用するセンサの比較, 土木学会第 77 回年次学術講演会 (令和 4 年度に予定)

3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等)

- ・第 5 回交通運輸技術フォーラム ポスターセッション

11. 参考文献

- 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) 鉄道総合技術研究所: Railway Research Review, 特集 夏の気象に備える, Vol.80, No.3, 2023
- 3) 樗健典, 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度評価手法, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.319-327, 2018
- 4) 入栄貴, 渡邊諭, 藤原将真: 橋脚基礎底面の洗掘進行に伴う基礎の安定性の变化に関する実験的検討, 第 56 回地盤工学会研究発表会, 12-8-1-07, 2021
- 5) 藤原将真, 渡邊諭, 入栄貴: 基礎底面の洗掘進行に伴う直接基礎橋脚の傾斜挙動の把握のための模型実験, 第 56 回地盤工学会研究発表会, 12-8-1-06, 2021
- 6) 入栄貴, 藤原将真, 渡邊諭: 橋脚基礎の洗掘に伴う連続的な固有振動数の变化に関する実験的検討, 第 63 回地盤工学シンポジウム, 1-3.1
- 7) 渡邊諭, 樗健典, 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, 33 巻, 9 号, 2019
- 8) 入栄貴, 渡邊諭, 藤原将真: 河川橋脚の洗掘に対する常時微動を活用したモニタリング手法に適用するセンサの比較, 土木学会全国大会第 77 回年次講演会, III-38, 2022
- 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