

常時微動を用いた洗掘が懸念される鉄道河川橋脚 の固有振動数推定手法

防災技術研究部 地盤防災研究室室長

渡邊 諭

本日の発表

◆研究背景・目的

- ◆固有振動数推定アルゴリズムの概要
- ◆アルゴリズム検証のための模型実験
- ◆低コスト化の取り組み
- ◆常時微動計測の導入マニュアルの作成
- ◆まとめと成果の活用

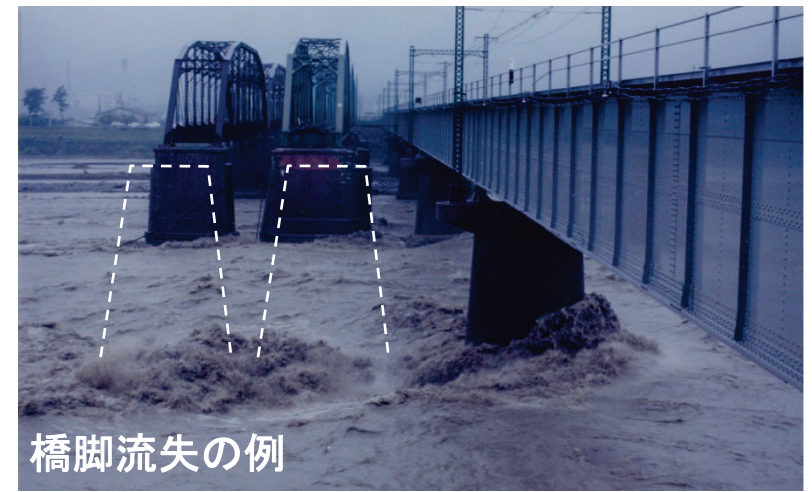
■ 研究背景

局所的豪雨や降雨量の増加により河川橋りょう
(旧式構造)の洗掘被害が頻発

↓ 場合によっては脱線・転覆等の可能性

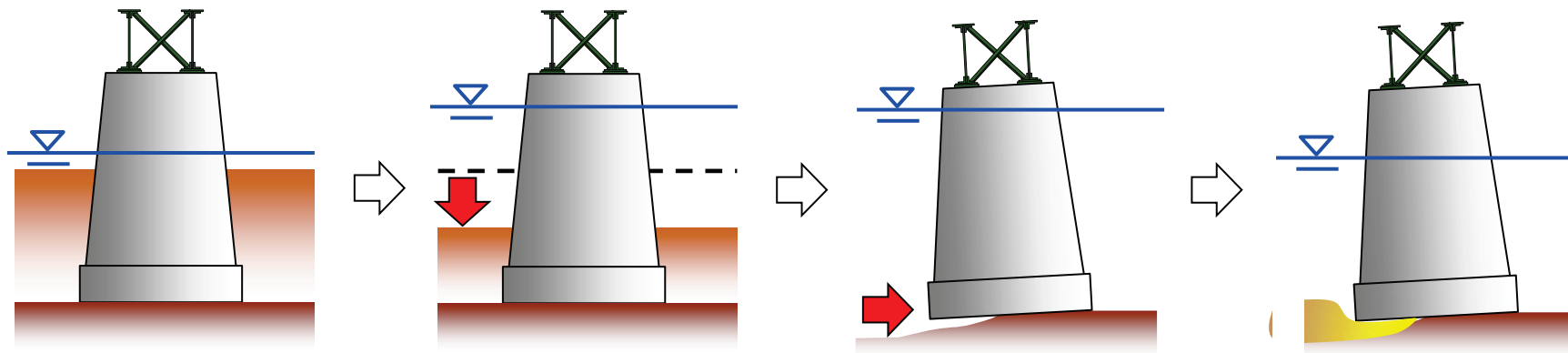
【維持管理・運行管理の課題】

- 河川橋りょうは膨大で全てを補強することが困難
- 増水時における根入れの低下を直接確認できない
- 変状がない場合も増水が収まるまで列車を止める必要あり



橋脚流失の例

出典: 日本鉄道施設協会誌 1991年6月号
「東海道本線富士川橋りょう河床洗掘対策工」



増水前
(初期)

増水中
(根入れ減少)

増水中
(底面流失)

増水後
(再堆積)

増水前後の根入れの変化

基礎の健全性を目視
以外の方法で確認す
る必要がある

■ 研究背景

基礎の健全性を評価する手法 ➡ 衝撃振動試験

【特徴】

- 重錘による加振で固有振動数を精度よく推定
- 増水前後の変化により健全性の低下が把握できる

【増水時の課題】

- 作業員の危険を伴う重錘による加振が困難
- 連続的に固有振動数を推定することが困難

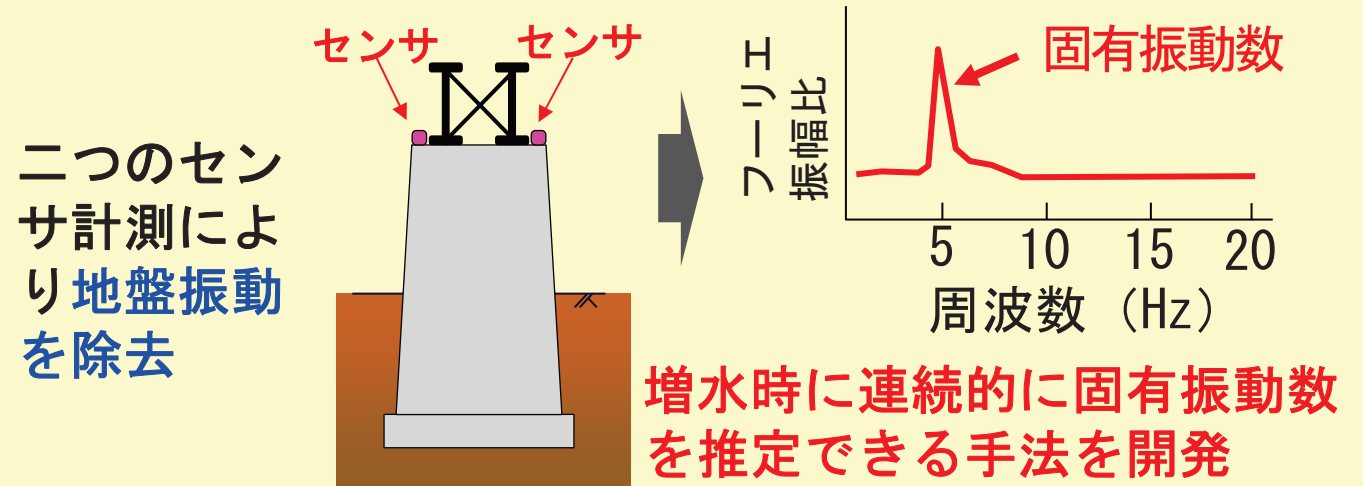


出典：鉄道総合技術研究所：Railway Research Review, 特集 夏の気象に備える, Vol.80, No.3, 2023

増水時には変状の初期段階から連続的に健全度を評価することが重要

常時微動計測による連続的なモニタリング手法の開発

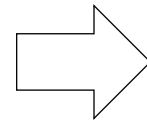
常時微動による固有振動数推定手法



目的

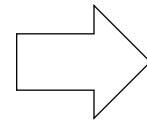
常時微動を用いた固有振動数推定システムの実用化・普及を図る

推定手法の実用性の検証



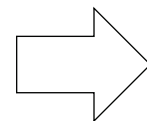
洗掘の状態を模擬した大型模型（実物縮尺1/3）に本手法を適用し、洗掘の状態に応じた固有振動数を推定できるか検証

システムの低コスト化



コストダウンを図るため、従来の速度センサよりも安価な加速度センサの適用性を検証

普及促進



本手法の概要やシステム構築に必要な検討内容等を盛り込んだマニュアルの作成

本日の発表

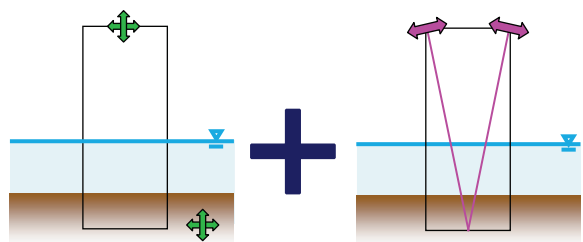
- ◆研究背景・目的
- ◆固有振動数推定アルゴリズムの概要
- ◆アルゴリズム検証のための模型実験
- ◆低コスト化の取り組み
- ◆常時微動計測の導入マニュアルの作成
- ◆まとめと成果の活用

固有振動数推定アルゴリズムの概要

仮定

橋脚振動

≡ 地盤振動 + ロッキング



【メリット】

- ・ 常時微動を用いるため重錘打撃が不要
- ・ 設置により連続的な計測が可能

以下、本手法を「微動手法」という

① 橋脚天端の上下流方両端部における常時微動計測



② 常時微動波形の差分およびセンサ位置の幾何学的関係から地盤振動を推定



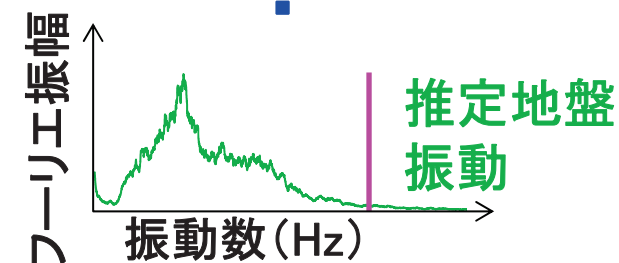
③ 橋脚振動を推定した地盤振動で除しフーリエ振幅比を算出



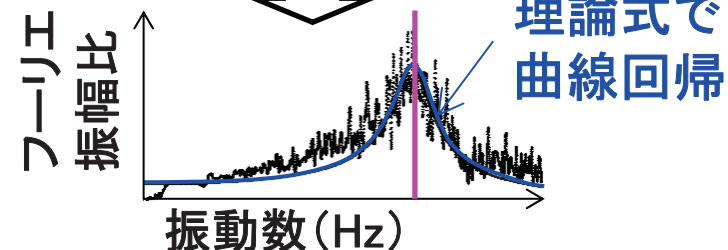
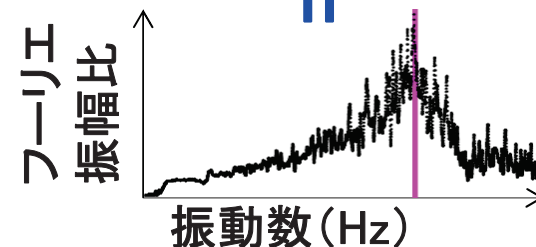
④ 算出したフーリエ振幅比を理論解で曲線回帰させることで固有振動数を推定



÷



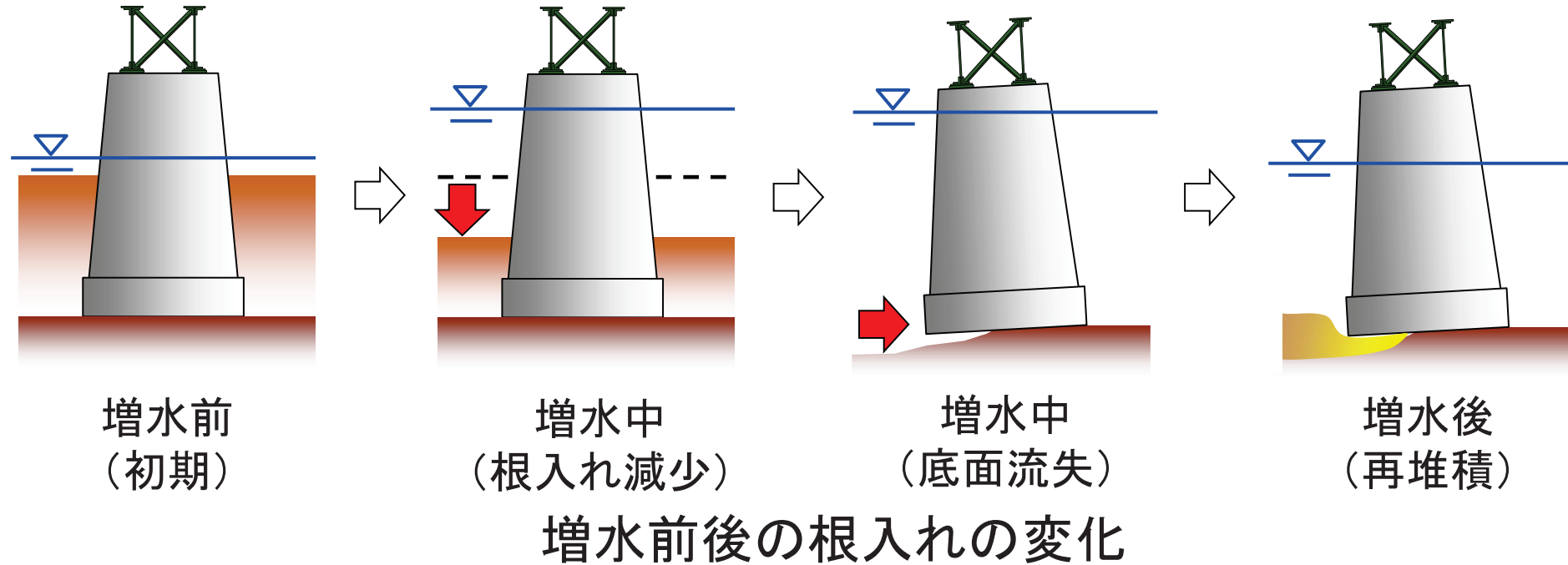
||



本日の発表

- ◆研究背景・目的
- ◆固有振動数推定アルゴリズムの概要
- ◆アルゴリズム検証のための模型実験
- ◆低コスト化の取り組み
- ◆常時微動計測の導入マニュアルの作成
- ◆まとめと成果の活用

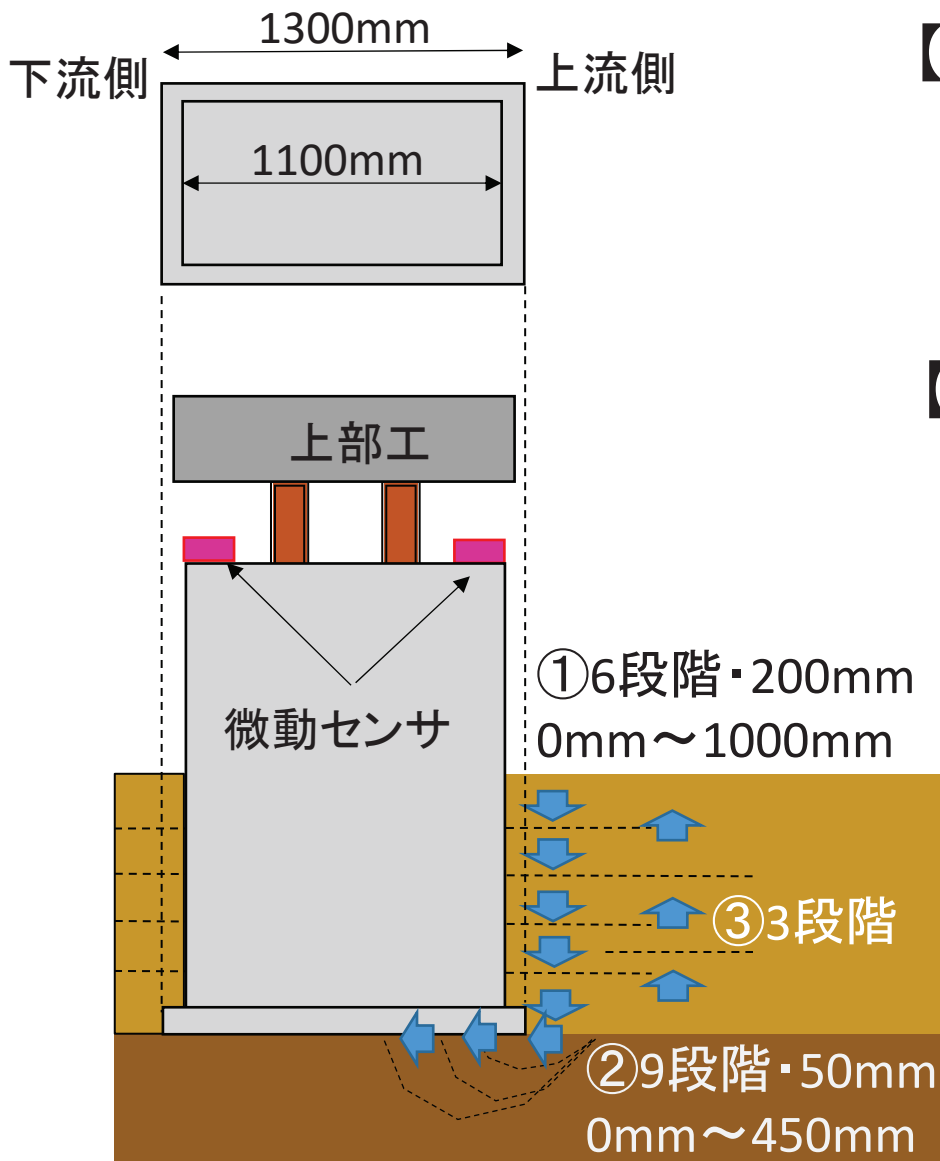
■ アルゴリズム検証のための模型実験



- 増水前後で連続的に根入れが変化するため、橋脚基礎の安定性も変化
- 洗掘の進行度合いに応じた基礎の安定性の変化を把握する必要がある

実物縮尺1/3の橋脚模型を用いて、洗掘が進行していく過程を模擬した大型模型試験を実施し、基礎の連続的な安定性の変化について検討

■ アルゴリズム検証のための模型実験：橋脚模型概要



【橋脚模型】

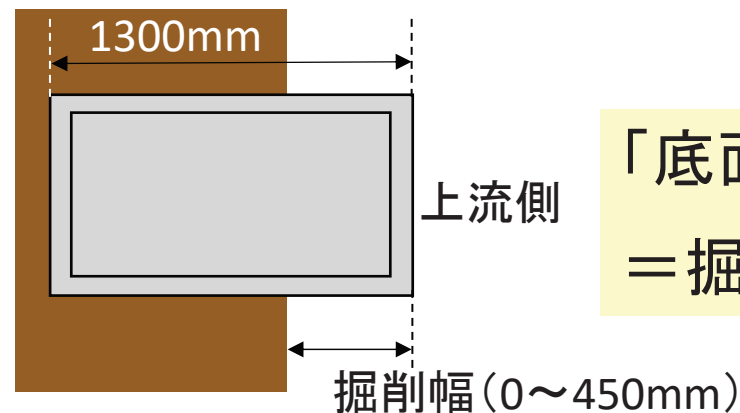
- ・基礎幅1300mm(橋脚幅1100mm)
- ・奥行き740mm、高さ1995mm
- ・上部工の荷重を模擬

【地盤材料】

- ・稲城砂
- ・初期根入れ1000mm

【掘削条件】

- ①側面掘削実験 1段階200mm・6段階(根入れ比の低下)
- ②底面掘削実験 1段階50mm・9段階(底面の侵食)



「底面掘削率(%)」

$$= \text{掘削幅} \div 1300\text{mm} \times 100$$

- ③再埋め戻し実験 3段階(増水後の再堆積)
(-700mm、-400mm、-±0mm)

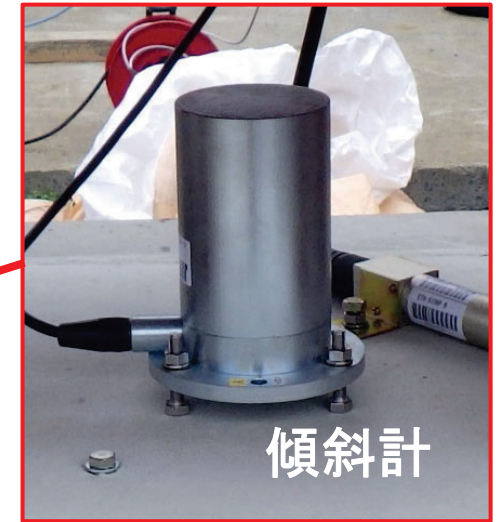
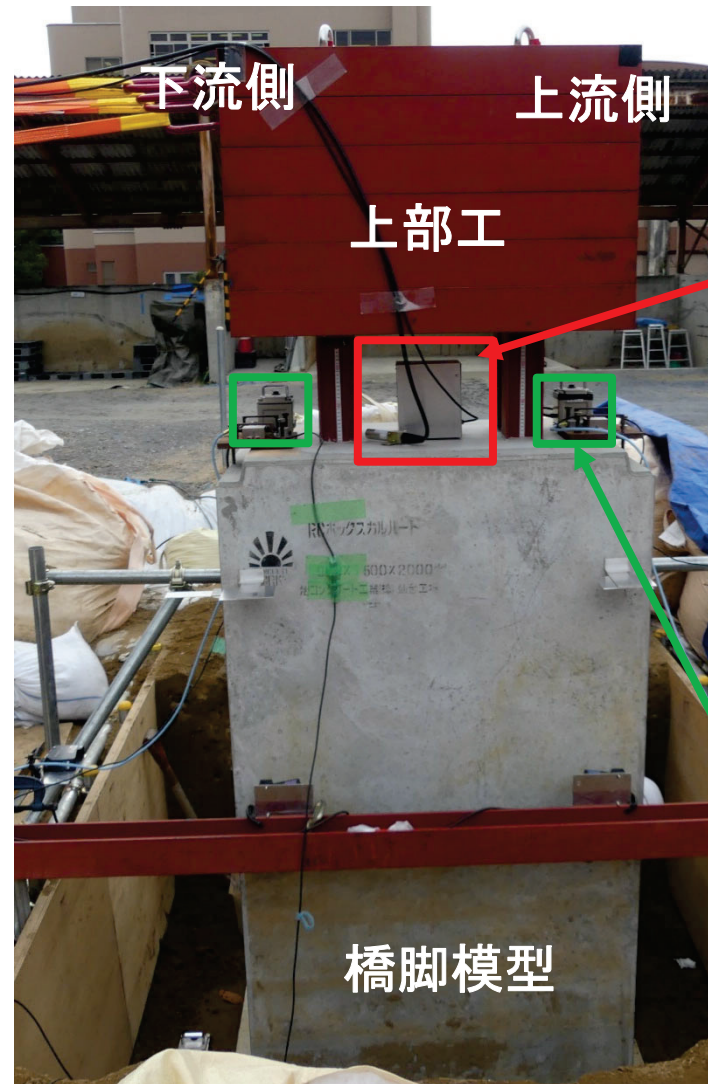
■ アルゴリズム検証のための模型実験：計測機器

微動計(速度計)

- ANET製(CR4.5-2S)
- 橋脚天端両端部に設置
- 側面掘削：200Hz×5分
- 底面掘削：1000Hz×1分
- 1掘削段階あたり5データを収録

傾斜計

- 坂田電機製(LK-G505)
- 橋脚天端中央部に設置
- 1分間隔で計測



計測機器の設置状況

■ アルゴリズム検証のための模型実験：実験結果

衝撃振動試験と微動手法の比較

衝撃振動試験(真値)と微動手法の比較

掘削深さ(mm)	真値(Hz)	微動(Hz)	誤差の割合(%)
GL±0	11.04	11.07	+0.32
GL-200	10.17	10.36	+1.86
GL-400	9.32	9.44	+1.27
GL-600	8.30	8.35	+0.62
GL-800	7.30	7.21	-1.24
GL-1000	6.51	6.29	-3.35

➤ 微動手法により衝撃振動試験の結果と同等の値を得られることを確認

各掘削段階の微動手法の最大値・最小値

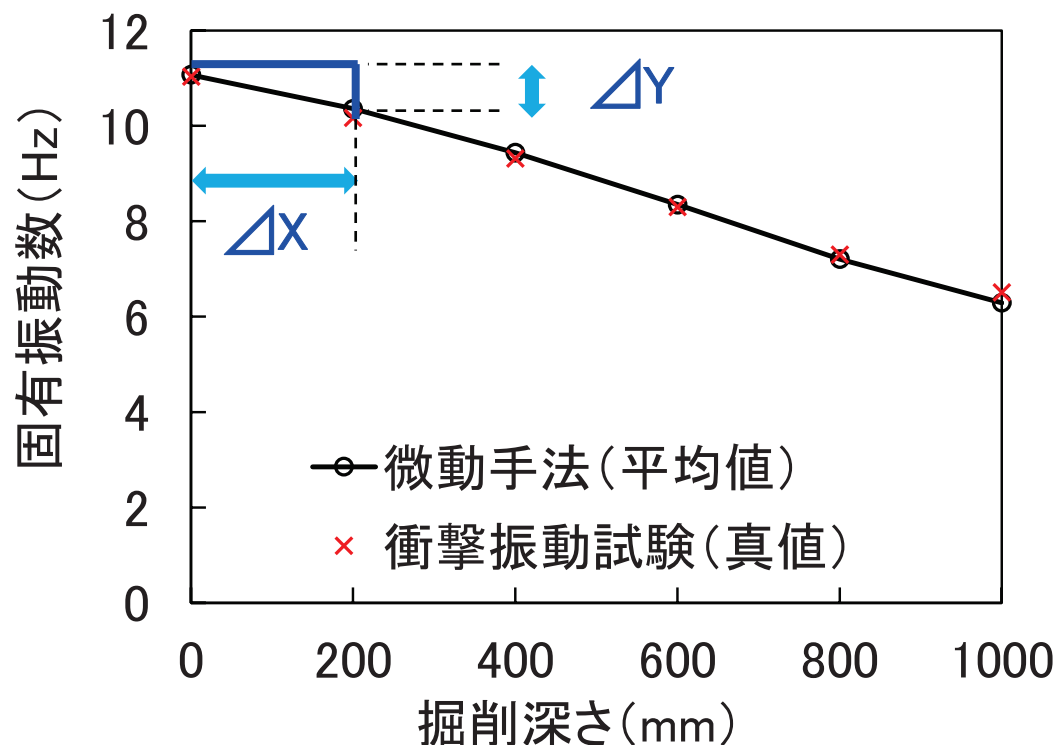
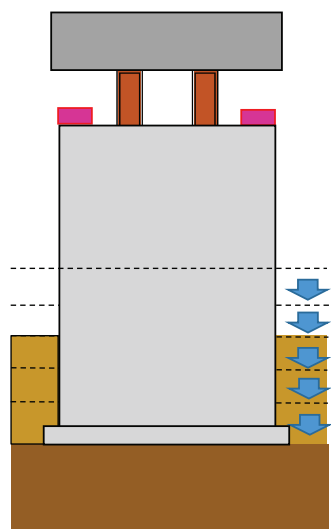
掘削深さ(mm)	最大値(Hz)	最小値(Hz)	計測誤差(Hz)
GL±0	11.09	11.05	0.04
GL-200	10.38	10.34	0.04
GL-400	9.55	9.38	0.17
GL-600	8.39	8.31	0.09
GL-800	7.31	7.10	0.21
GL-1000	6.52	6.10	0.42

➤ 計測誤差としては小さく、安定したデータが得られていることが確認

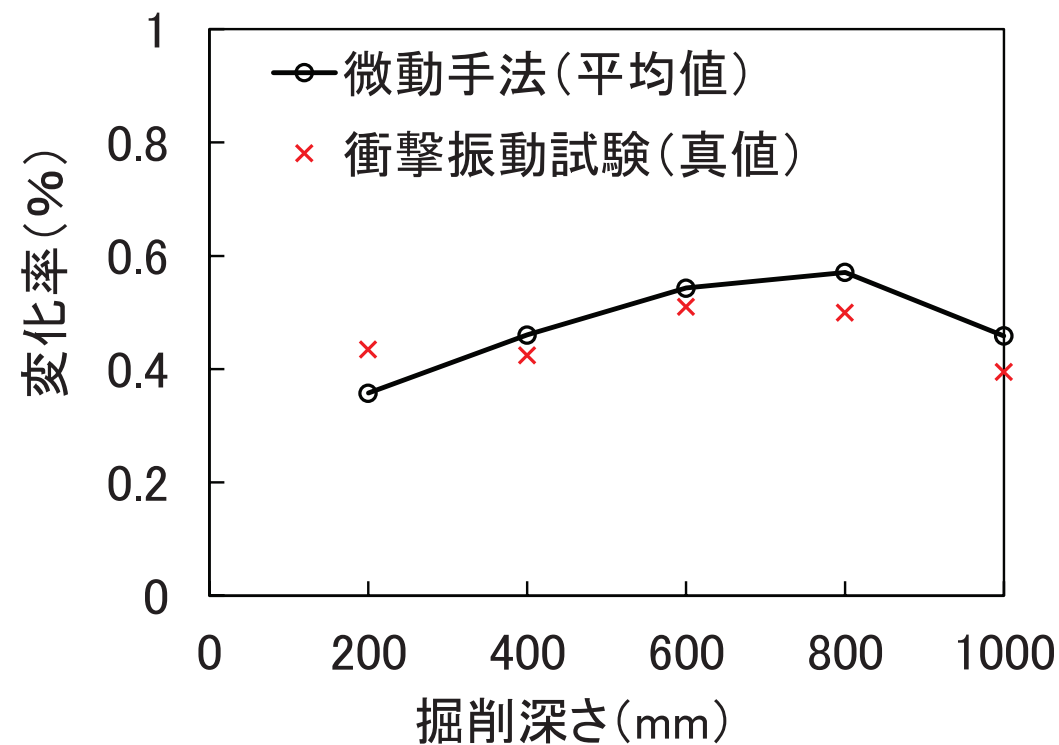
■ アルゴリズム検証のための模型実験：実験結果

側面掘削実験

$$\text{変化率} = \Delta Y (\text{固有振動数の変化量}) / \Delta X (\text{根入れの変化量} = 200\text{mm})$$



固有振動数の変化 (側面掘削)

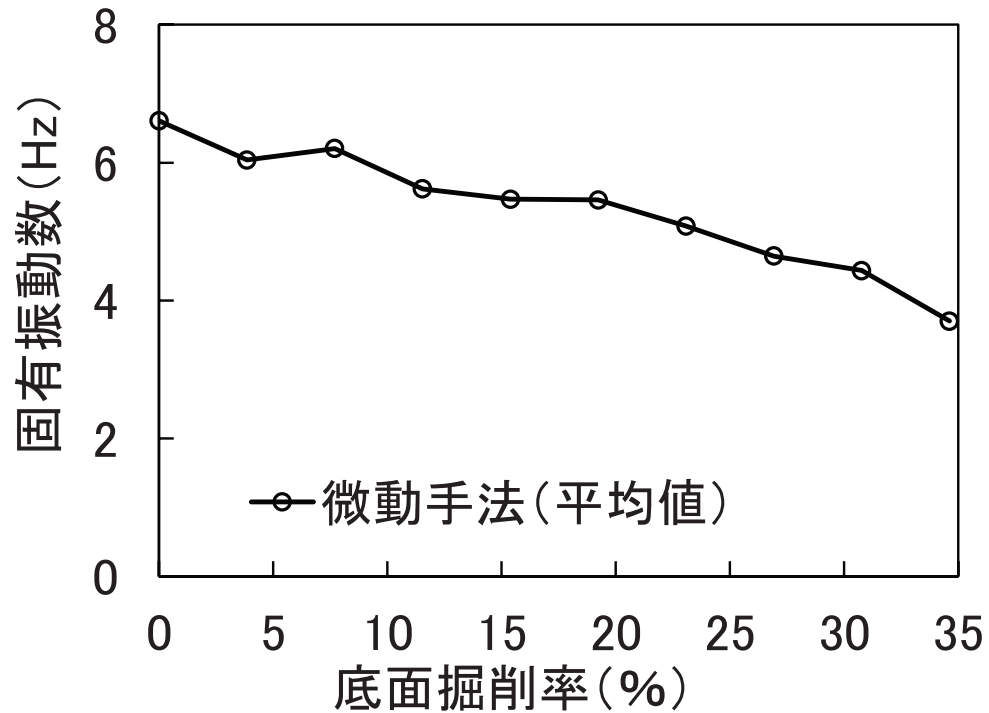
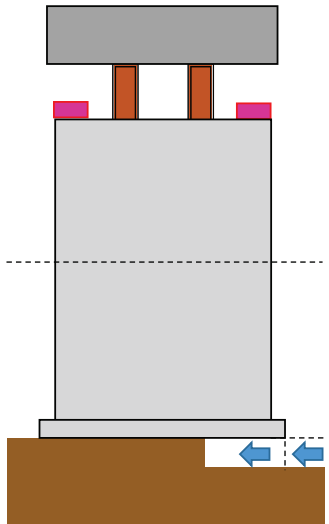


固有振動数の変化率 (側面掘削)

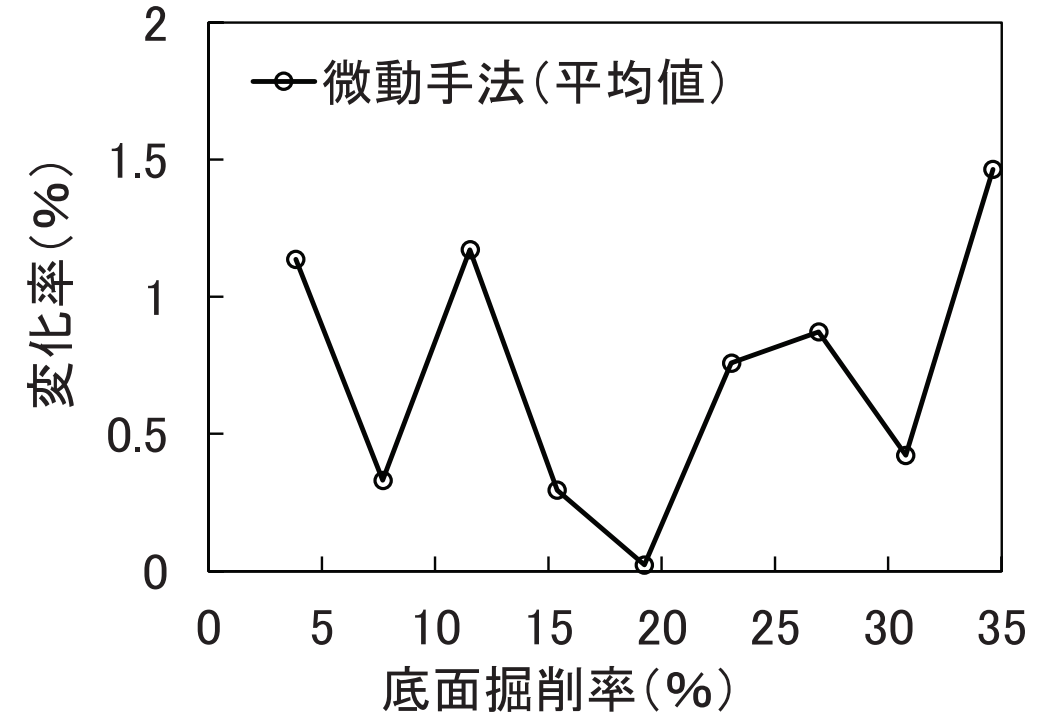
- ・ 200mmずつの根入れの減少に伴い、固有振動数は約1Hzずつ低下
- ・ 側面の根入れが流失した状態 (埋め戻し層0mm) で初期値11.07Hz → 6.29Hzに減少
- ・ 固有振動数の変化率は、0.4～0.5%の範囲で掘削深度によらず線形に近い低下傾向

実験結果

底面掘削実験

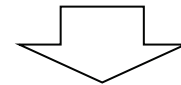


固有振動数の変化(底面掘削)



橋脚の傾斜と変化率(底面掘削)

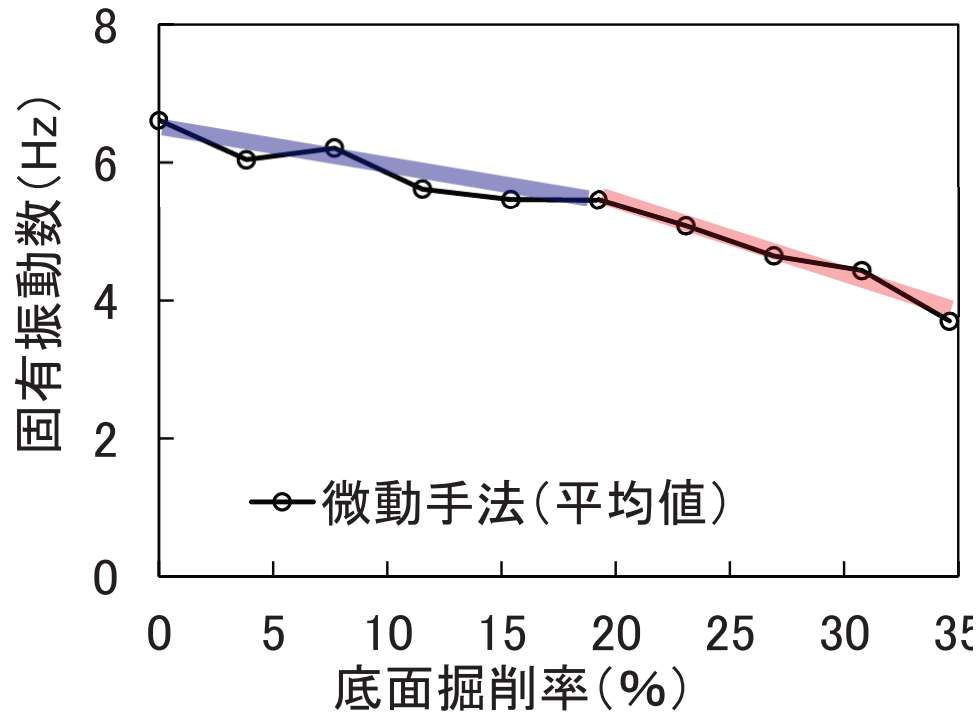
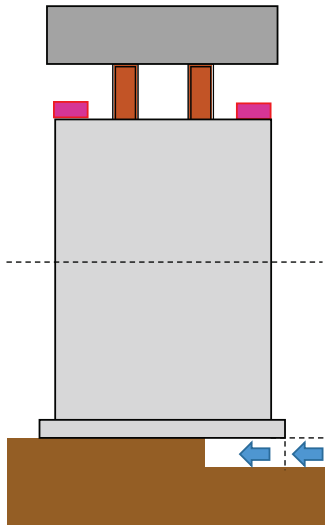
固有振動数が側面掘削のように一定の変化率では低下しない



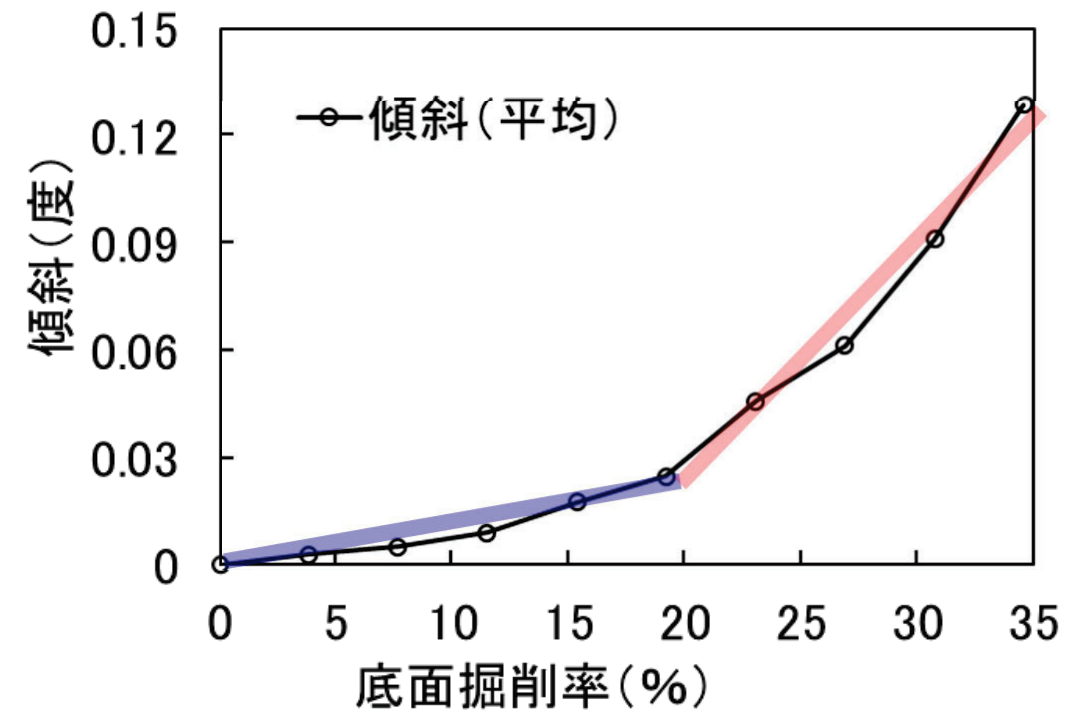
橋脚が傾斜することで振動挙動が不安定化し、側面掘削よりもばらつきが大きくなる

実験結果

底面掘削実験

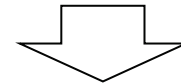


固有振動数の変化(底面掘削)



橋脚の傾斜と変化率(底面掘削)

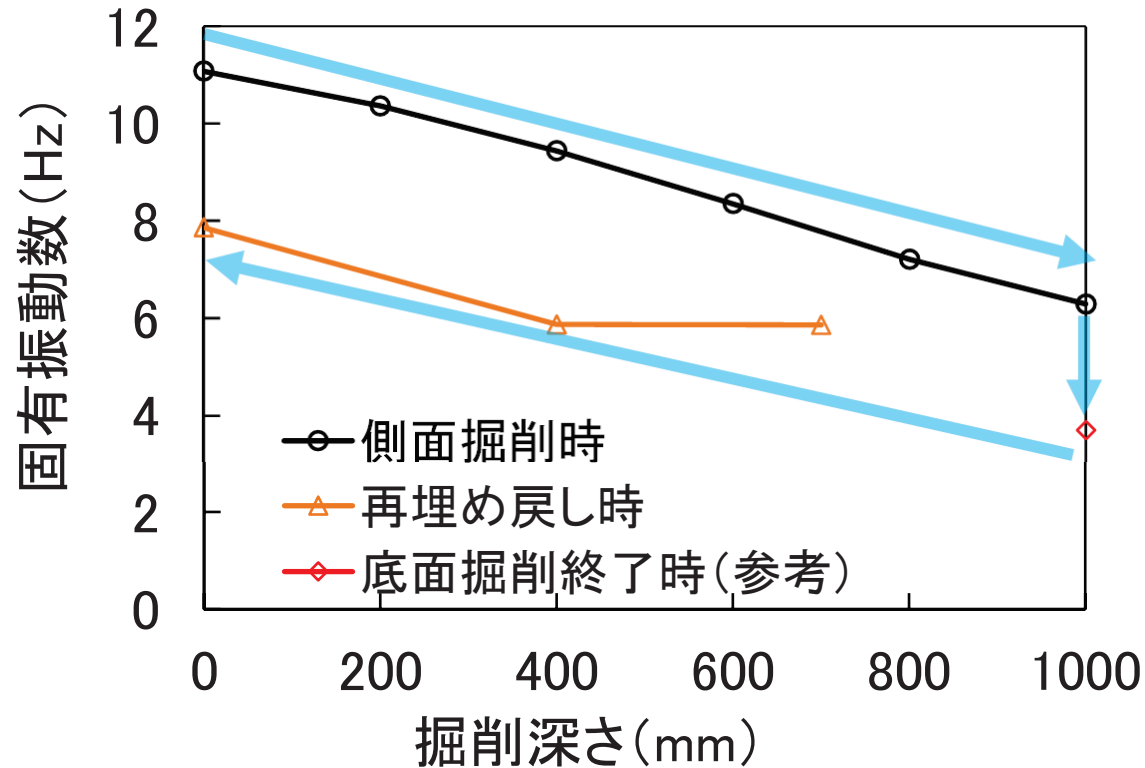
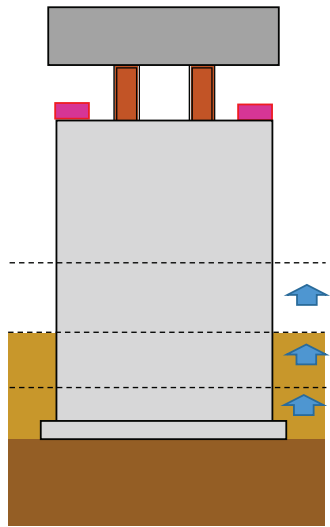
固有振動数の低下に合わせて傾斜は増加傾向を示し、
底面掘削率20%以降から傾斜の変化率が急激に増加



- 底面掘削で基礎の不安定性はより顕在化
- 傾斜の進行に伴った固有振動数の低下傾向

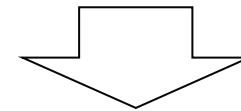
■ アルゴリズム検証のための模型実験：実験結果

再埋め戻し実験



再埋め戻し実験の固有振動数の変化

- 根入れ300、600mmで5.9Hzに1000mmで7.9Hzに回復
- 初期状態と比較すると、固有振動数は完全には回復することなく、約70%の値に留まる



根入れが回復しても再堆積のような緩い場合：固有振動数は3割近く低下している可能性がある

本日の発表

- ◆研究背景・目的
- ◆固有振動数推定アルゴリズムの概要
- ◆アルゴリズム検証のための模型実験
- ◆低コスト化の取り組み
- ◆常時微動計測の導入マニュアルの作成
- ◆まとめと成果の活用

■ 低コスト化の取り組み: 加速度センサの採用

【開発段階: 速度センサ】

- ・低周波数帯において高精度
- ・高コスト ➡ 普及阻害の一要因

【普及段階: 加速度センサ】

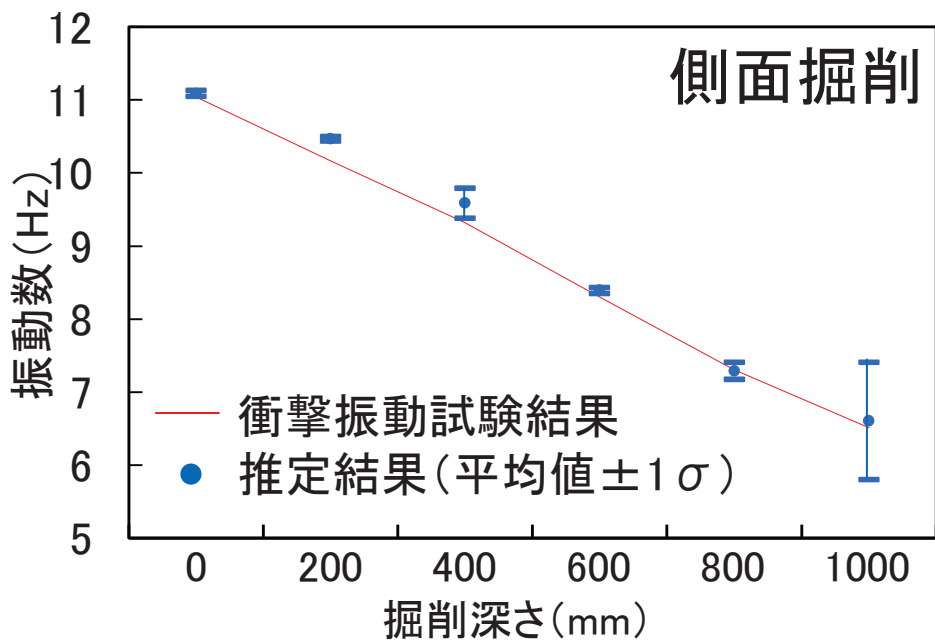
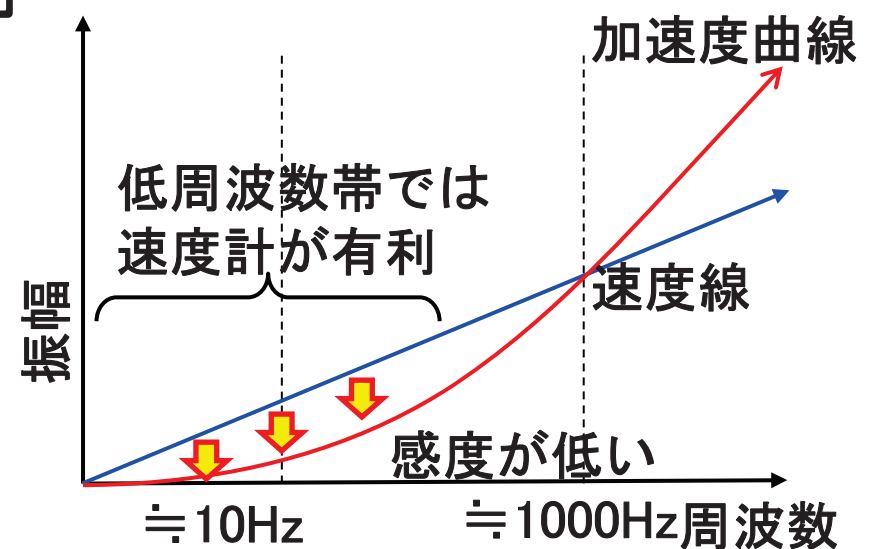
- ・低周波数帯において精度が劣る
- ・速度センサよりも大幅に低コスト



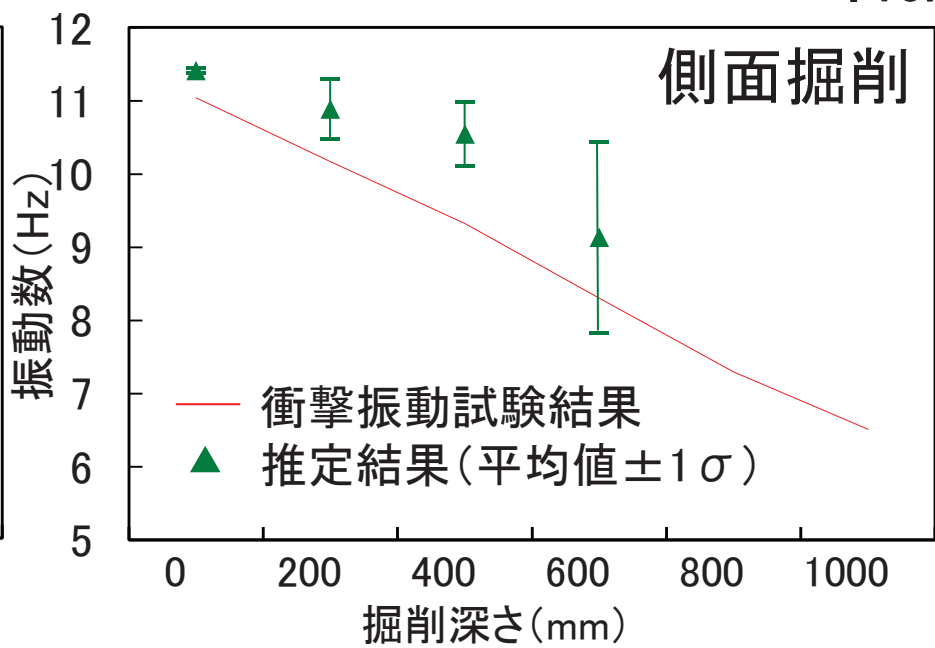
加速度センサ
を採用



推定精度の確保

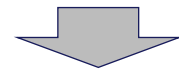


【速度センサ】



【加速度センサ】

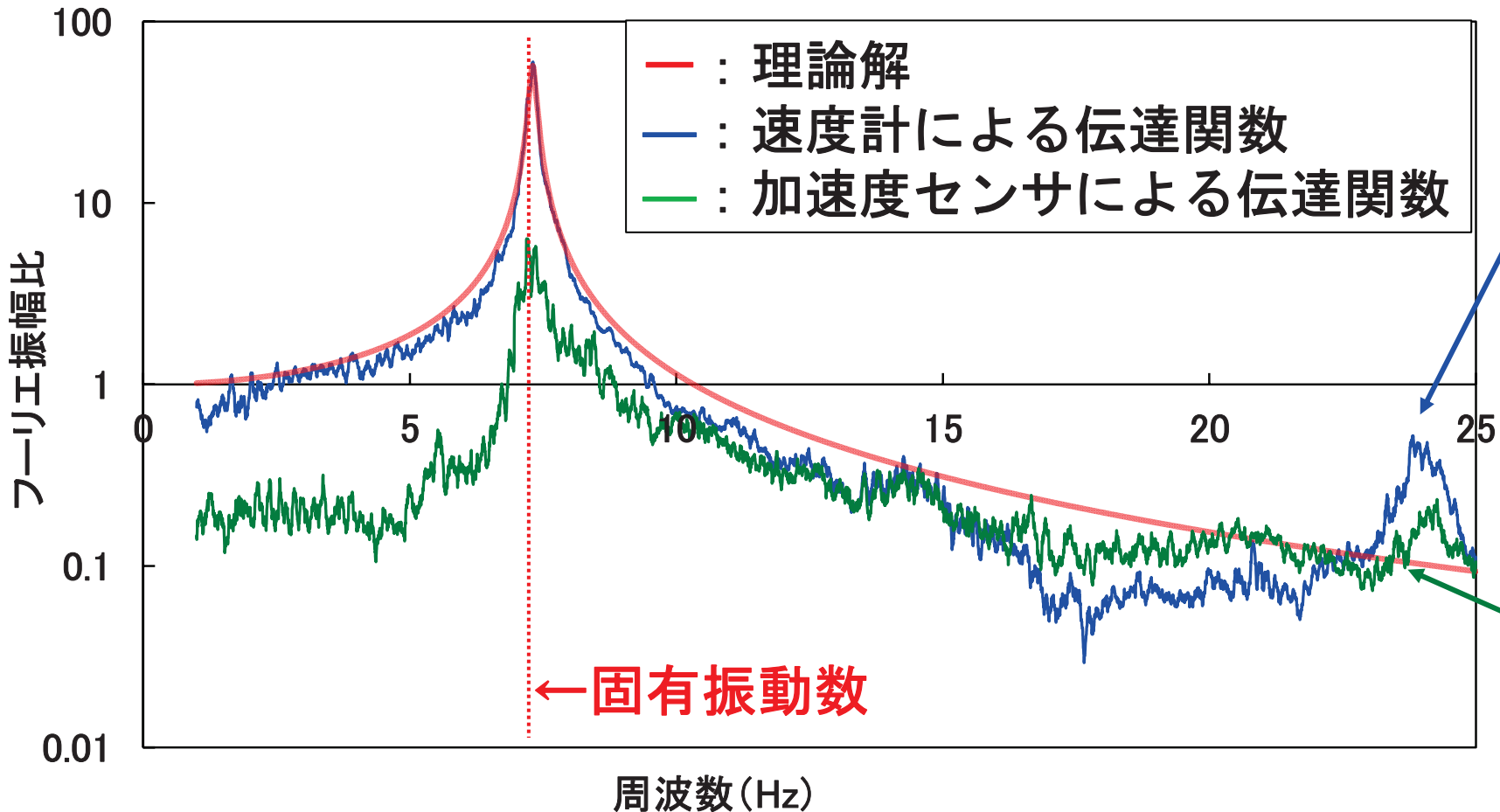
当初は加速度センサによる推定精度に課題有



伝達関数の波形から理由を検証



■ 低コスト化の取り組み：加速度センサの採用



【速度センサ】
伝達関数と振動理論解の
フィッティングは良好

【加速度センサ】

- フーリエ振幅比は小さい
が卓越振動数が明瞭で
ノイズが少ない
- 速度計による伝達関数
と相似

同様の計測結果
が多数存在



振動理論解のフィッティングの工夫により
固有振動数の推定精度を向上可能

■ 低コスト化の取り組み: 加速度センサの採用

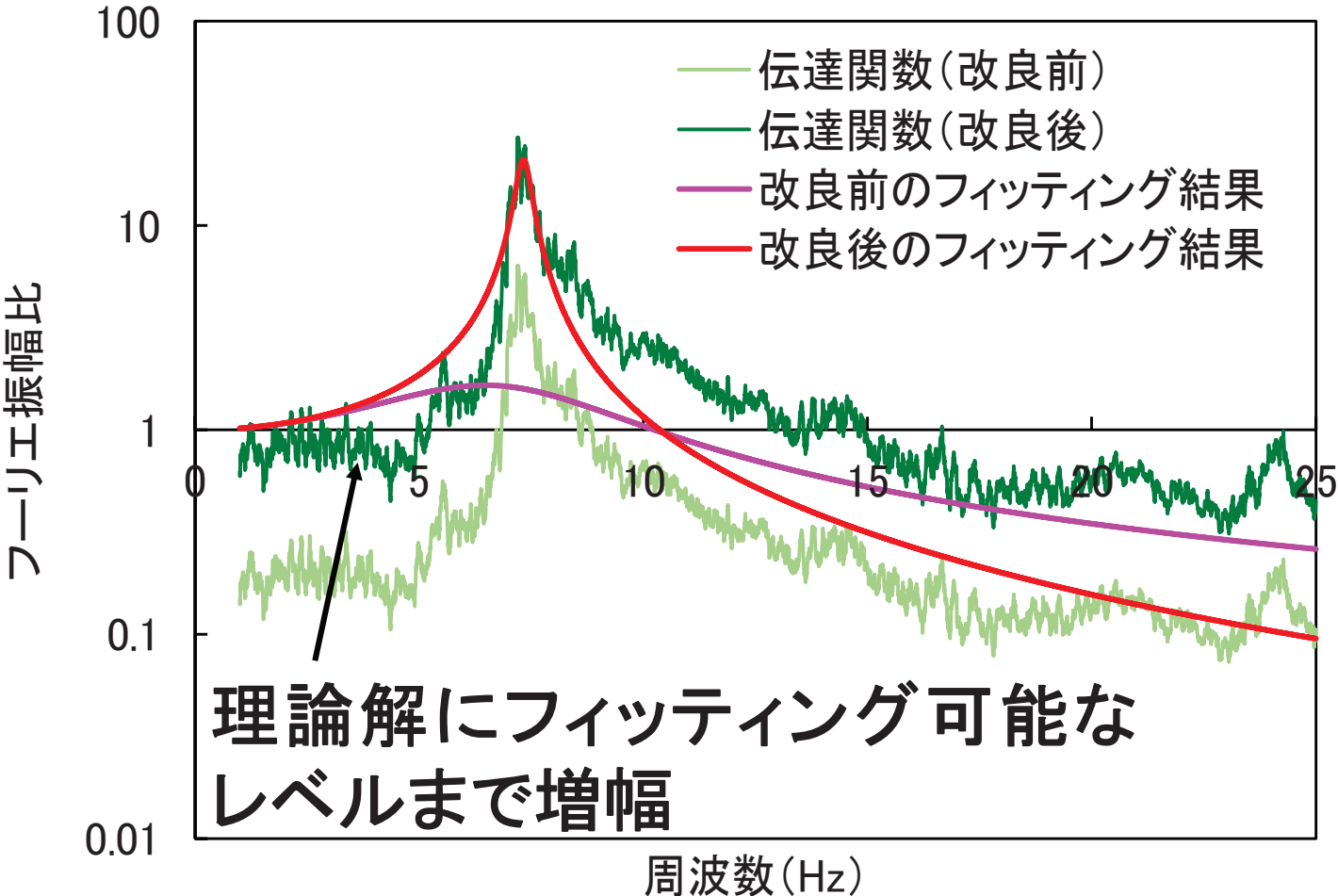
理論解のフィッティング変数に伝達関数全体の増幅率を追加

理論解 =
$$\frac{1 + \left(\frac{2hf}{f_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2hf}{f_0}\right)^2}}$$

↓ フィッティング

$A \times \frac{\text{橋脚のフーリエ振幅}}{\text{地盤のフーリエ振幅}}$

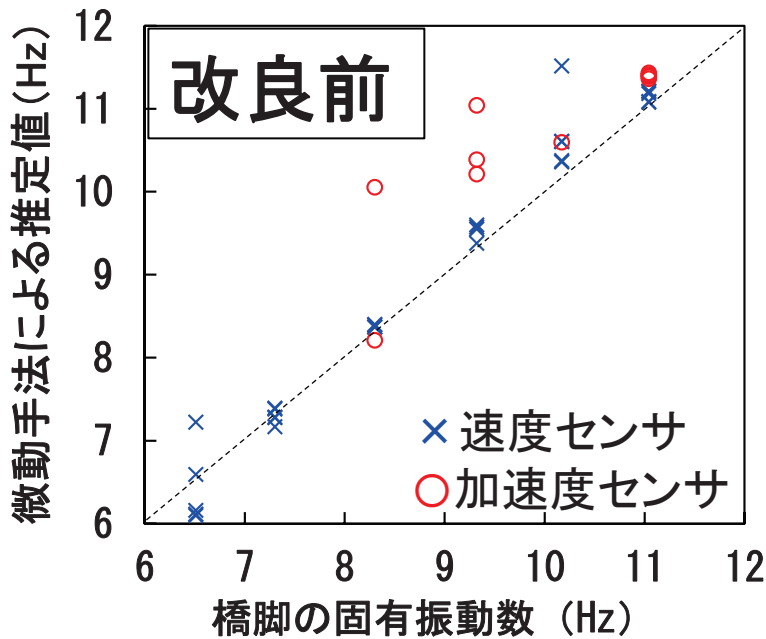
- f : 振動数(Hz)
- f_0 : 橋脚の固有振動数(Hz)
- h : 減衰定数
- A : 増幅率



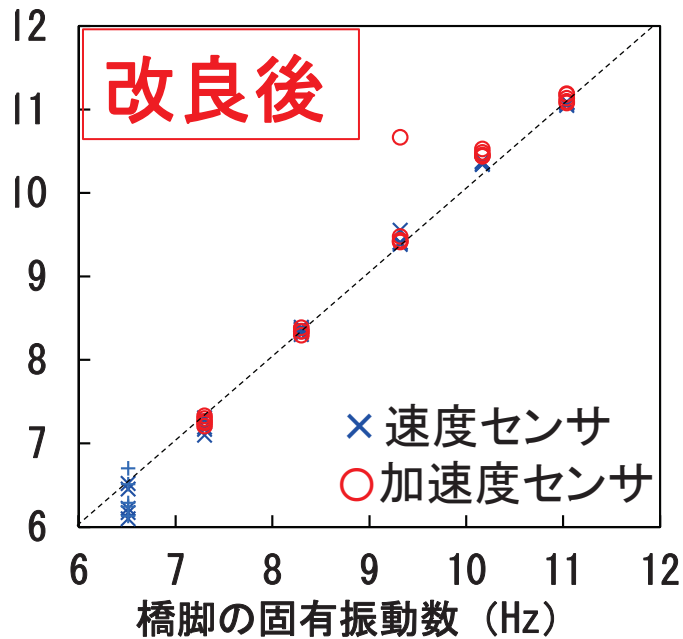
改良前後のフィッティング結果の比較例

■ 低コスト化の取り組み：加速度センサの採用

横軸：衝撃振動試験による固有振動数



側面掘削
0mm ← ← ← 1000mm



センサ種別	推定可となる割合 (%)		コスト比較 ※速度センサを1とする
	改良前	改良後	
加速度	30	87	0.3

低コスト化に目処

・衝撃振動試験との乖離が減少

本日の発表

- ◆研究背景・目的
- ◆固有振動数推定アルゴリズムの概要
- ◆アルゴリズム検証のための模型実験
- ◆低コスト化の取り組み
- ◆常時微動計測の導入マニュアルの作成
- ◆まとめと成果の活用

常時微動計測の導入マニュアルの作成

普及促進のための資料としての導入マニュアルを作成

【マニュアルの章構成】

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

3章 固有振動数推定アルゴリズム

4章 常時微動計測システムの構築

5章 微動計測用センサの選定

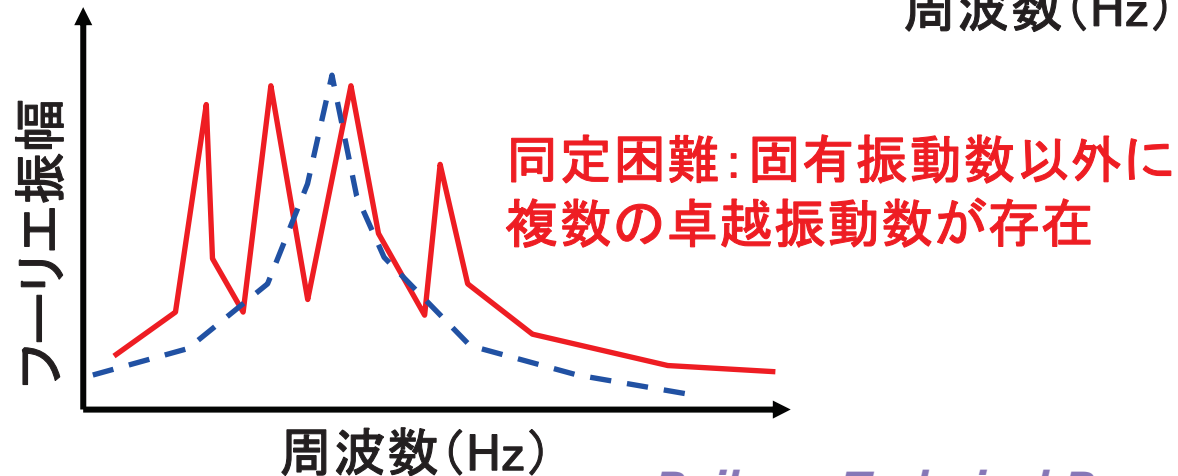
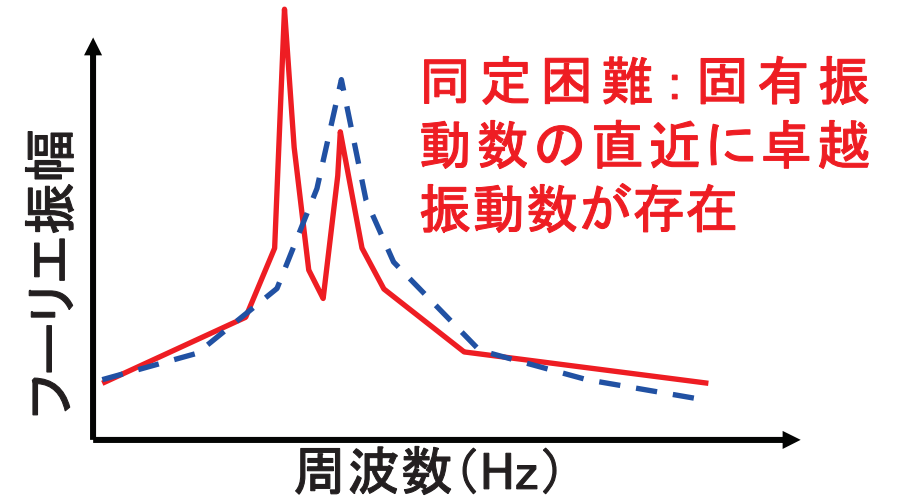
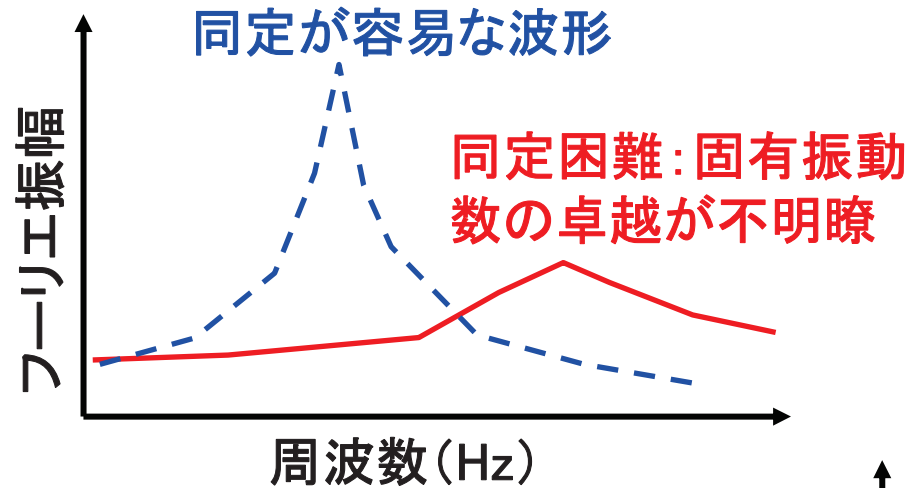
6章 計測条件

7章 設置方法

■ 常時微動計測の導入マニュアルの作成：微動手法の適用範囲

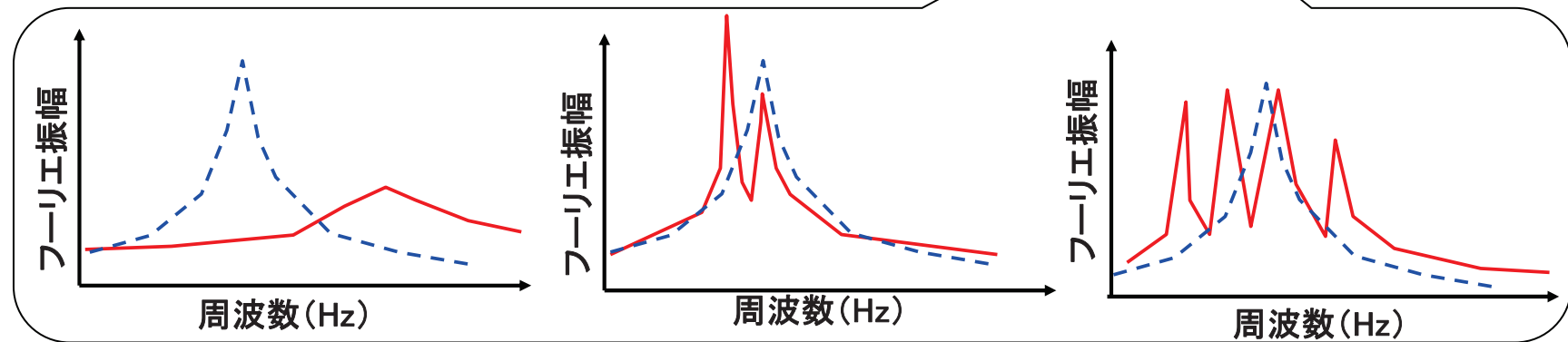
- ① 衝撃振動試験においても固有振動数の推定が困難な橋脚
- ② 減衰定数が大きく卓越振動数が明瞭でない橋脚
- ③ 固有振動数付近に桁や付帯構造物などの卓越振動数が存在する橋脚

適用できない
可能性が高い



■ 常時微動計測の導入マニュアルの作成：微動手法の適用範囲

- 「直接基礎形式」、「直接基礎形式＋木杭基礎」、「基礎部分が短いケーソン基礎」が対象
- 河川管理施設等構造令(1976年)以降の新設構造物には原則として適用しない
- 「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橋脚」は事前に衝撃振動試験等を実施し①～③の振動特性かどうか確認することを推奨



常時微動計測の導入マニュアルの作成：計測システムの構築

表 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

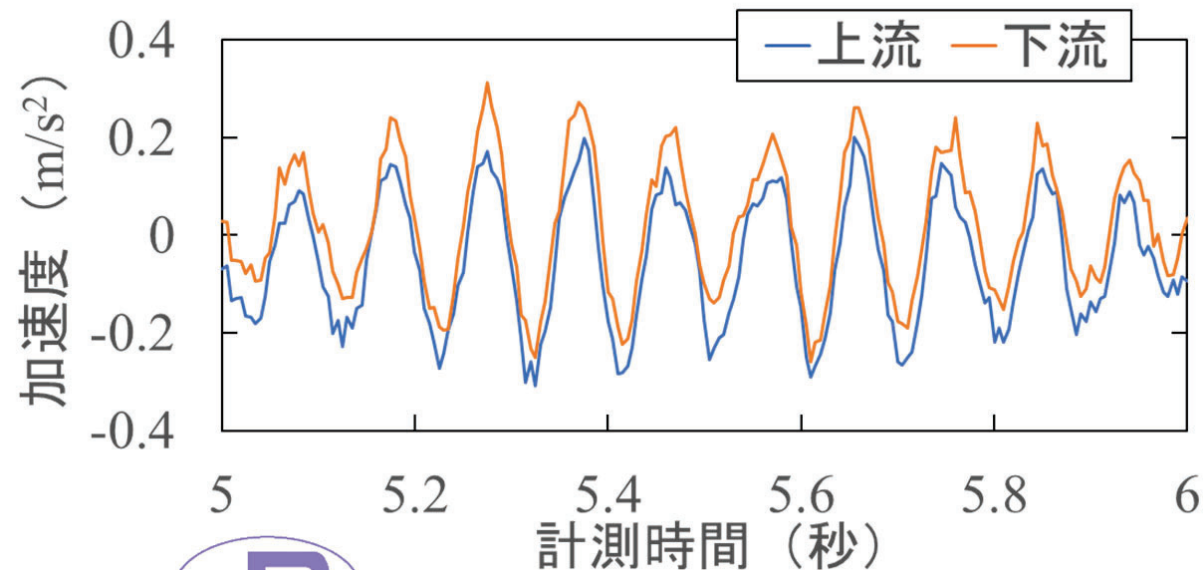
■ 常時微動計測の導入マニュアルの作成：微動計測用センサの選定

加速度センサの分解能

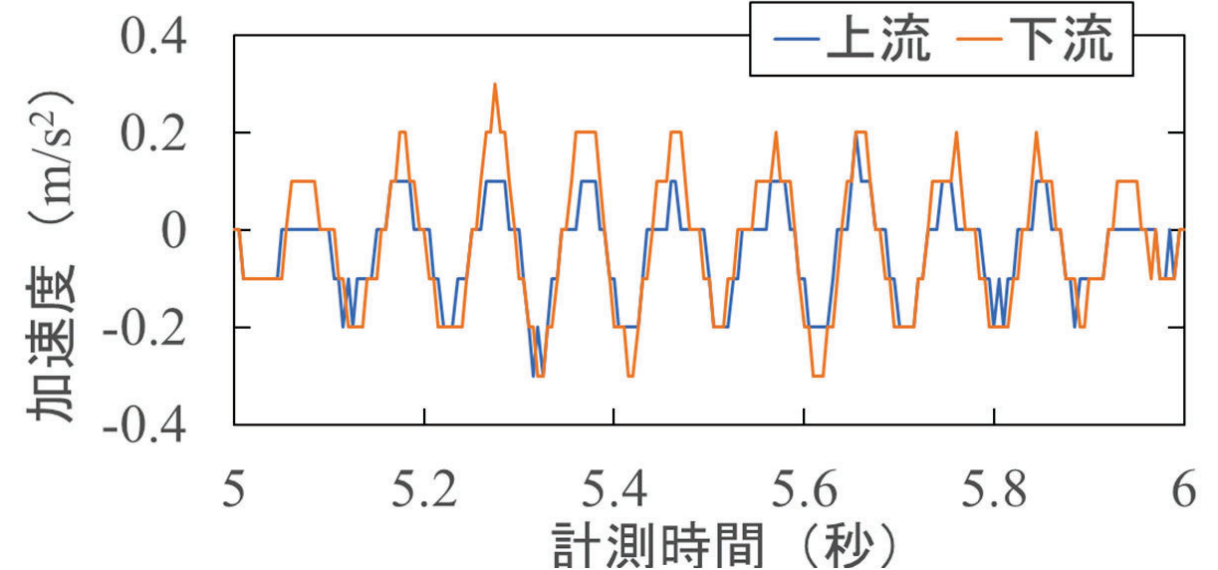
信号をどの程度細かく検出できるかを示す能力で、分解能が高いほどアナログ値をより正確にデジタル値に変換できる

- 分解能が荒くなる(大きくなる)と推定精度が低下
- 最小分解能は最低でも $50 \mu\text{G}$ (計測波形の振幅RMS値の約3%)を推奨
※振幅RMS値：振幅を二乗した値の平均値の平方根

◎適用可能【分解能= $0.06 \mu\text{G}$ 】



×適用不可【分解能= $100 \mu\text{G}$ 】



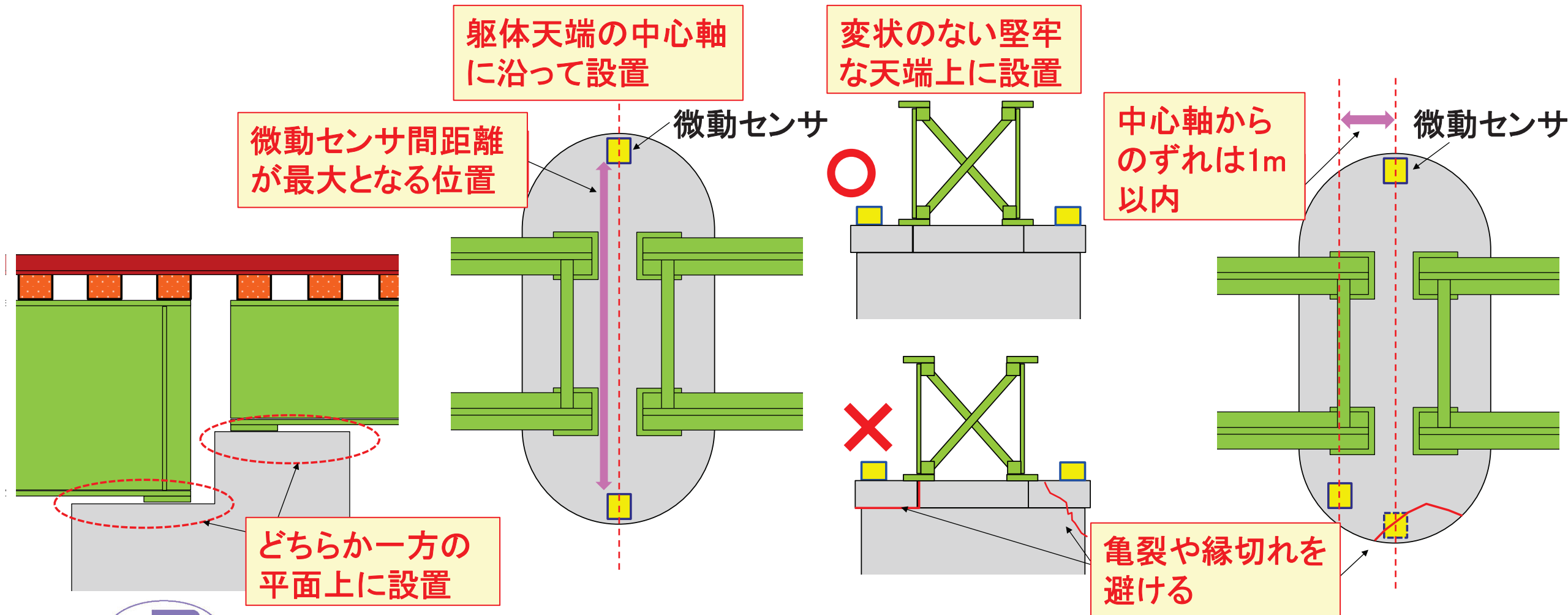
■ 常時微動計測の導入マニュアルの作成: 計測条件・設置方法

サンプリング周波数: 100Hz以上を推奨

計測時間: 5分間を推奨

計測頻度: 30分間隔より高頻度を推奨

設置方法: 下図参照



本日の発表

- ◆研究背景・目的
- ◆固有振動数推定アルゴリズムの概要
- ◆アルゴリズム検証のための模型実験
- ◆低コスト化の取り組み
- ◆常時微動計測の導入マニュアルの作成
- ◆まとめと成果の活用

■ まとめ

【アルゴリズム検証のための模型実験】

- 微動手法による推定値は衝撃振動試験による結果と精度よく一致
- 基礎周辺の洗掘を模擬した側面掘削実験、底面掘削実験、埋め戻し実験において固有振動数の低下と回復の傾向を精度よく把握することができた



微動手法の適用性を確認

【低コスト化・マニュアル化】

- 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、固有振動数推定アルゴリズムを改良しセンサコストを約7割削減した
- システムの構築に必要な加速度センサの基本仕様を整理し、手法の概要なども含めた導入マニュアルを作成した



常時微動計測システムの普及促進に貢献

成果の活用

- 微動手法を実装した常時微動計測システムとして【常設型】および【可搬型】の試作機を作成
- 次期衝撃振動試験装置 (IMPACTUS) に実装することで、衝撃加振が不要な橋脚における**固有振動数測定**の**省力化**に寄与する



微動計



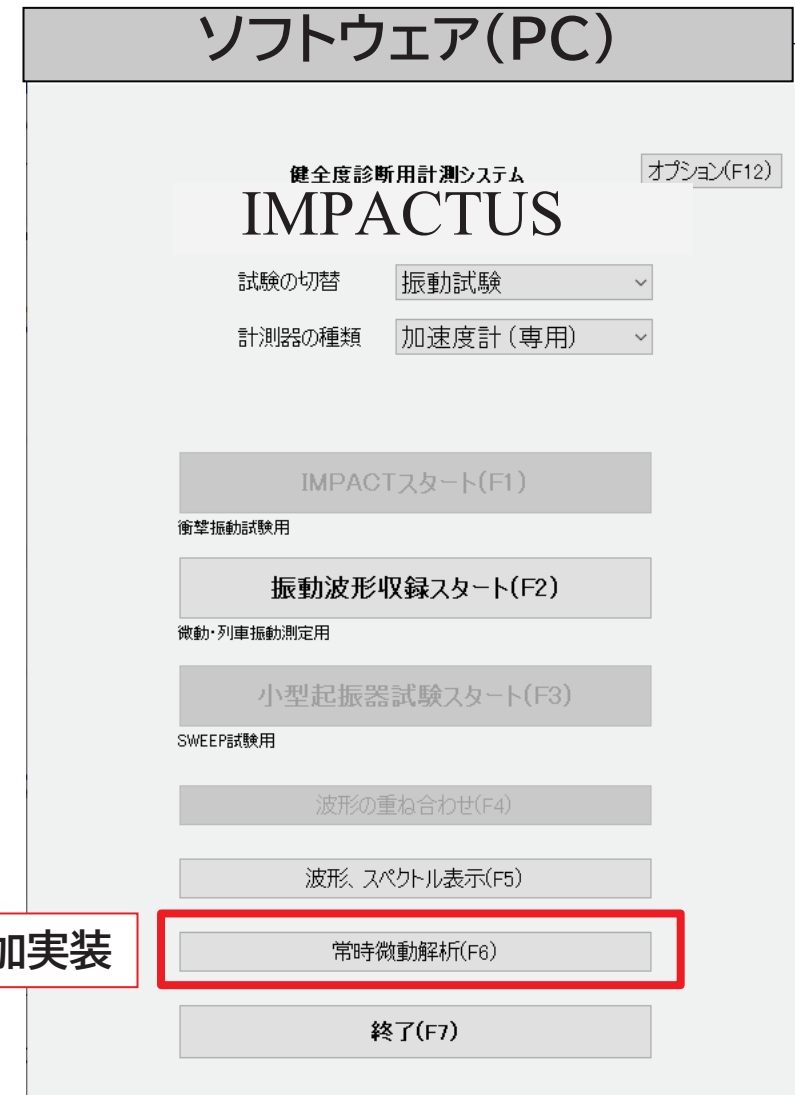
信号装置



【可搬型システムの外観】

【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す



追加実装

【IMPACTUSメニューイメージ】

※開発中画面



参考文献

- 1) 樗健典, 渡邊諭, 宮下優也, 太田直之: 橋脚の両端部で計測した微動に着目した固有振動数推定手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp.61-68, 2016
- 2) 渡邊諭, 樗健典, 内藤直人, 湯浅友輝: 河川橋脚の天端両端部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
https://www.rtri.or.jp/publish/rtrirep/2019/rep19_09_J.html
- 3) 入栄貴, 藤原将真, 渡邊諭: 洗掘の進行過程に応じた橋脚基礎の固有振動数の推定に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 19, No.1, pp.79-87, 2024
- 4) 渡邊諭, 入栄貴, 藤原将真: 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, 鉄道総研報告, Vol. 37, No.12, pp.35-40, 2023
https://www.rtri.or.jp/publish/rtrirep/2023/rep23_12_J.html