

河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者	氏 名 （ふりがな）	所 属	役 職
	依田 幸英(よだ ゆきひで)	日本電気株式会社	プロフェッショナル
②研究テーマ	名称 分布型音響センシング技術を活用した河川堤防の変状検知に関する技術研究開発		
③研究経費 （単位：万円） ※端数切り捨て。	令和 4年度	令和 5年度	合 計
	198 万円	397 (199) 万円	595 (397) 万円
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏 名		所属機関・役職 （※令和5年3月31日現在）	
田中 規夫		埼玉大学 教授	
八木澤 順治		埼玉大学 准教授	
五十嵐 善哉		埼玉大学 助教	
⑤技術研究開発の目的・目標			
近年、気候変動を原因として全国的に大規模な水害が発生しており、今後さらに増加する恐れがある。河川で越水や決壊等の氾濫が発生した際には、発災をリアルタイムに把握し、迅速な初動対応につなげることが重要である。また堤防の日常点検ではモグラ穴や不等沈下の発生などを目視で発見するのは難しく、これらは浸透や天端亀裂などの原因にも成り得る。そのため、河川堤防の変状を、24 時間連続・堤防全域をリアルタイムに観測する技術が求められている。 一方で近年、既設の光ファイバをセンサ化した環境モニタリング、インフラ保守点検が注目されている。光ファイバは環境耐性が高く、維持管理コストが小さいというメリットがあり、電源供給も不要である。さらに堤防では光ファイバがすでに敷設されている区間もあり、このファイバが通信だけでなく、センサとして堤防の変状検知に活用できれば、他のセンサと違い堤体全体を連続してリアルタイムにモニタリングできる。 既設の光ファイバは振動モニタ用に敷設されたわけではないため堤防の振動をモニタする場合は、感度が重要となる。光ファイバセンシングの技術の 1 つである分布型音響センシング（Distributed Acoustic Sensing）は、高感度モニタを実現する方式であり、堤防の常時微動のモニタに適していると考えられる。令和 2 年度の国土技術政策総合研究所にて実施された「河川堤防の変状検知システムに関する技術公募」での検証実験では、模擬堤体を使い、越水および河岸侵食の開始と進行をモニタすることができている。 本研究では、小畔川の堤防に埋設されている既設の光ファイバに、NEC 製光ファイバセンシング装置（SpectralWave® LS3200）を接続し、堤防全体の振動データの常時取得・解析することにより、越水/河岸侵食/浸透の事象発生に伴う実堤防の変状を検知する。および日常や地震発生後の点検時に要点検箇所を抽出できるか検証を行う。 また、令和 2 年度の「河川堤防の変状検知システムに関する技術公募」では未実証であった浸透現象にフォーカスし、浸透検知の検証を行う。本検証では埼玉大学に擬似的なテストベッド（模擬堤体）を作製し、光ファイバケーブルも敷設し、NEC 製光ファイバセンシング装置を接続した上で、この模擬堤体に浸透現象（パイピング現象）をおこし、光ファイバセンシングによる振動データを取得・解析を行い、浸透検知の可否を検証。また、実スケールに近い模擬堤体に空洞を設け、この空洞の大きさを変えながら堤体内の空洞有無の検知可否を実証する。			

⑥研究成果

1) 小畔川堤防での常時微動による河川堤防の変状検知

入間川出張所に取り込まれている既設の光ケーブルを NEC 製光ファイバセンシング装置 (SpectralWave® LS3200) に接続し、振動データ採取を行った。図 1 に今回の実験で使用した既設ファイバのケーブルルートを示す。今回、データは 8 k m 区間全体を取得した。図 1 の赤太線と点線がそれに該当する。また、5 k m までの区間までファイバ位置合わせ (緯度経度とファイバ長のすり合わせ) ができたので、入間川出張所から落合橋までの区間をメインの観察対象とした。図 1 の赤太線がそれに該当する。

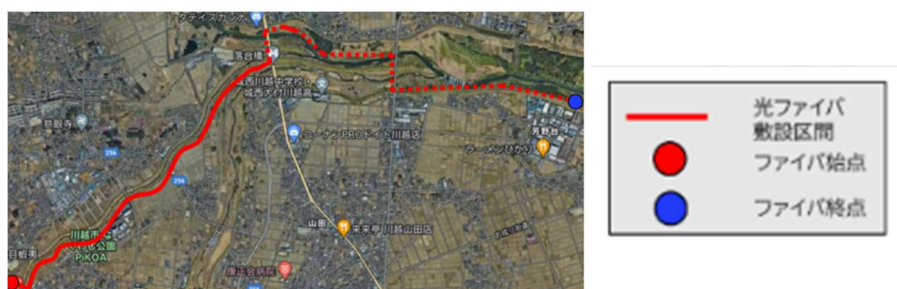


図 1 光ファイバルート

既設ファイバから取得した堤防全体の振動データの内、6 0 0 0 mポイントでの 1 0 分間の振動の FFT 解析 (周波数毎強度) を実施した結果を図 2 に示す。この解析により、周波数 3 ~ 5 H z 付近にピークがあることが観測できた。本ピークは他地点および車両通行の有無にかかわらず常時発生していた。さらに、” 常時微動による河川堤防と地盤の卓越周期の相関 (地盤工学会第 4 4 回地盤工学研究発表会) ” での発表でも速度計による堤防の固有振動周波数の測定で 3 H z 付近に振動を観測しており、この傾向は小畔川堤防でも固有振動数と思われる周波数特徴が 3 ~ 5 H z 付近にあると確認できた。

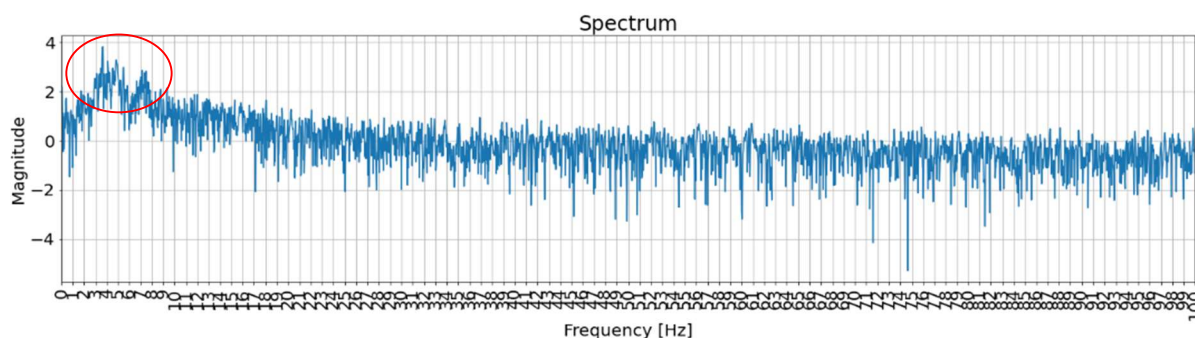


図 2 ファイバで取得した堤防の振動の周波数分布データ

続いて、長期間のデータ観察で、この振動がどのように変化しているかを分析した。図3は、2023年6月～2024年1月までの振動データ（常時微震）の振動データをフーリエ変換し、0～5 Hzの周波数ピークを抽出し、箱ひげ図でプロットしたものである。時期毎の周波数ピークを観察すると、どのポイントでも1～5 Hz以内にピークが存在していることが分かる。ただし、各ポイントでピークの中央値が異なっており、これは堤防の構造、川からの距離等、構造・環境要因が各地点で異なるからだと推測される。また、この分析期間で、分析期間内で複数回の地震（震度1～3）が発生したが、期間内の変化量は1 Hz以内であり、この規模の地震では大きな周波数変化を生じることはなかった。

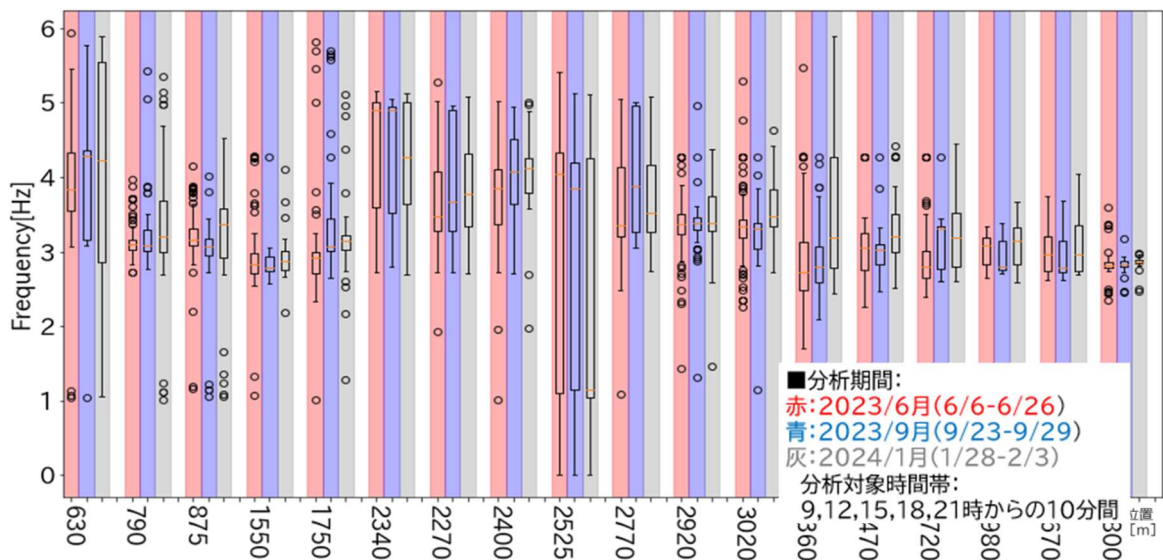


図3 地点ごとの1～5 Hz付近の卓越周波数の分布および中心値

2) 埼玉大学 模擬堤体で空洞の有無による振動周波数の変化検知

図4のような模擬堤体を形成し、空洞の大きさを変えながら小畔側堤防の常時微動と同等レベルの振動を本堤体に起こして、堤体の振動を計測した。その結果、空洞有無で卓越周波数の平均値に差異がでることを確認した。さらに空洞が大きくなるに従い、空洞がない状態との周波数差異が大きくなることから、実際の堤防でも常時微動の周波数の変化を観測することで内部の空洞の有無が検知に有効と考えられる。

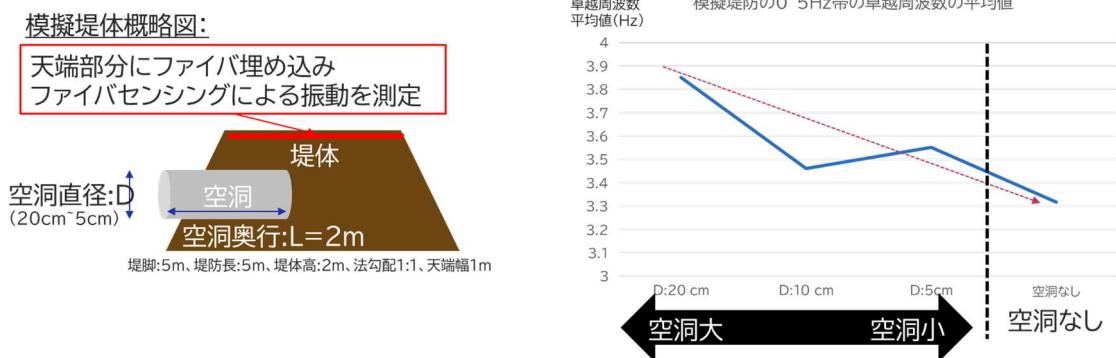


図4 模擬堤体および空洞有無による模擬堤体の1～5 Hz付近の卓越周波数

3) 小畔川堤防での地震による影響の検知

小畔川堤防での地震発生時の振動強度を、堤防全体にわたって可視化した様子を図5に示す。堤防のロケーション毎に地震による影響（振動強度＝揺れやすさ）と継続時間の可視化がリアルタイムで表示できた。また推定震度3～2と推定震度1以下を比較すると相対的に震度の強さと堤防の振動に相関があることが確認できた。地点毎に着目すると、桶管付近は振動が比較的強めであり、1900m地点と2500m地点の橋がある付近は振動が弱い（堤防の作りが違くと推測）。また、ファイバが橋を渡る区間は、地震よりも交通振動の方が影響大であることが確認できた。

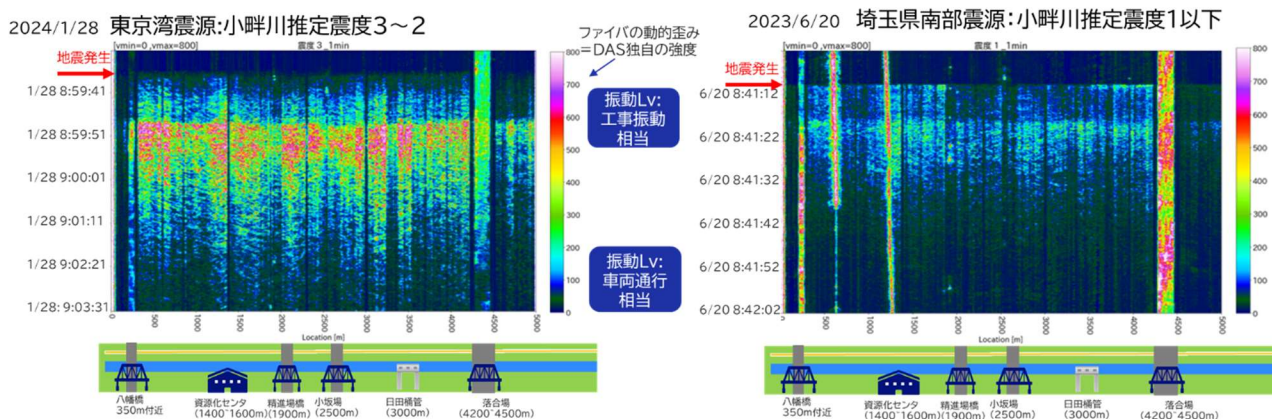


図5 地震発生時の小畔川全体の振動強度変化の様子

4) 模擬堤体でのパイピング発生に伴う振動検知

埼玉大学に模擬堤体を作製、本堤体に光ファイバケーブルを敷設、光ファイバセンシング装置を接続し、本堤体にパイピング現象をおこし、堤体崩落を発生させ、振動データを取得した。その様子を図6に示す。崩落前に徐々に振動が大きくなっていく様子が観測されており、その周波数に着目すると1Hzから20Hzに推移していることが確認できる。本周波数の変化は、崩落前の予兆とみられ、実際の堤防でもこのような事象が観測されれば、崩落前の予兆を捉えるのに有効と考えられる。また、崩落発生時は強い振動が発生しているため、崩落検知も可能と考える。

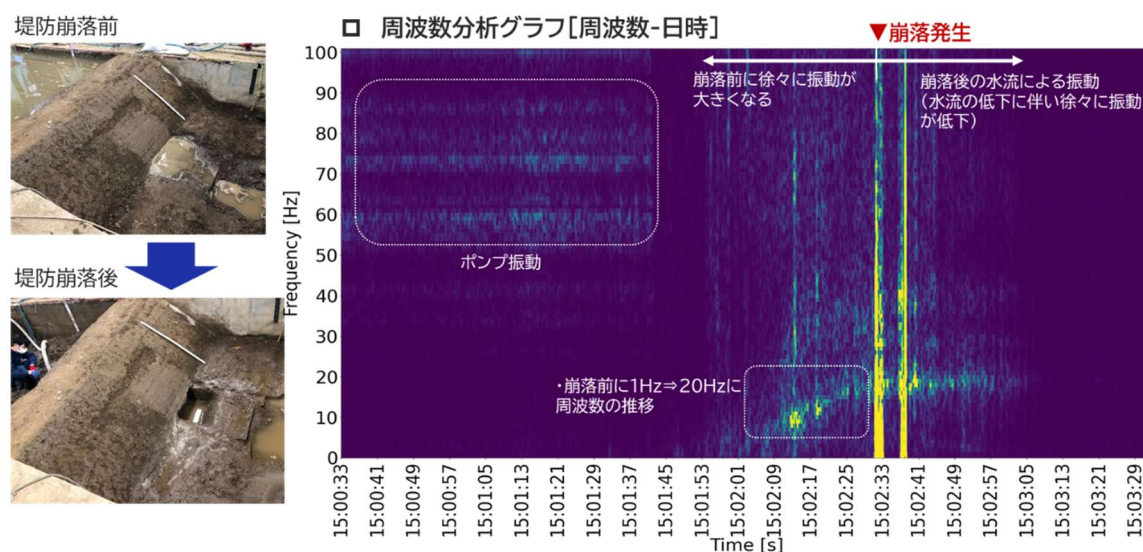


図6 模擬堤体でのパイピング発生時の振動の周波数変化

5) 小畔川堤防での機械振動の検知

小畔川草刈り作業で、草刈り機の機械振動にて検知可否を検証した。図7に草刈り機動作時の振動の様子を示す。左の図では、小畔川付近の2300m付近にて、6月5日 8:30～17:30までにジグザク動く振動を検知しており、この速度は150m間を2分間隔で往復しているため時速換算で4.5km/hと推定される。右の図ではこの地点の周波数分布を行った結果である。5Hz付近、20Hz(その通倍の40Hz)付近で他より大きな振動があり、20Hzの振動は草刈り機械が動いている時間と連動していたため、草刈り機の機械振動を検知できていることが分かる。なお、5Hzの振動は草刈り機械が動いている時間と連動とは関係なく、日中帯で常時発生していたため、堤防の常時微動が持つ固有振動周波数と考えられる。

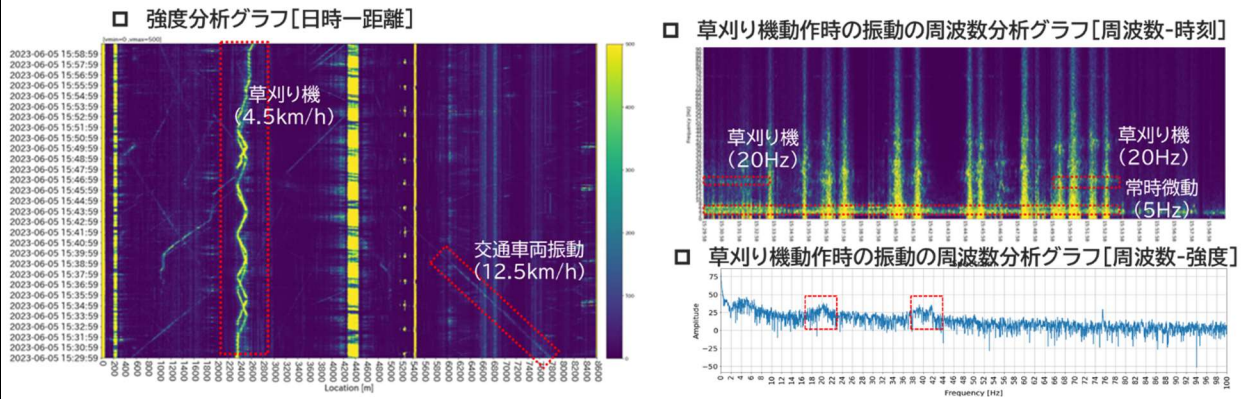


図7 小畔川での機械振動発生時の振動の変化の様子

⑦研究成果の発表状況・予定

今年度得られた知見について令和6年度中に特許出願を計画している。

⑧研究成果の社会への情報発信

1) 第11回河川堤防技術シンポジウム論文集

「透水性基礎地盤を有する堤防における浸透破壊現象の段階に応じた光ファイバセンシングによる早期検知の可能性」

我妻大誠、齋藤創汰、田中規夫、五十嵐善哉、依田幸英

2) 土木学会関東支部発表会

「光ファイバセンシングによる狭義パイピング現象時の変状検知に関する実験」

我妻大誠、齋藤創汰、田中規夫、五十嵐善哉、依田幸英

⑨表彰、受賞歴

土木学会関東支部発表会

「光ファイバセンシングによる狭義パイピング現象時の変状検知に関する実験」
優秀発表者賞

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

本研究では既設光ファイバを用いた堤防全体の常時計測し、堤防の常時微動の周波数（1～5 Hz）が検知でき、その変化を常時モニタすることで変状検知できることが実証できた。これは既設光ファイバが通信だけでなく、そのままセンサとして利用可能であることを示しており、この振動データをさらに解析することで維持点検など他業務での活用に応がっていくと考えられる。今後は実際の堤防でデータの蓄積を進めていき、以下にあげられるような諸条件下での検証が有効と考えられる。

- ・革新的河川技術プロジェクト（第6弾）護岸構造物「空洞化点検の高度化」技術開発に合わせて空洞箇所でのデータ採取
- ・空洞が発生しやすい樋管や水門など構造物周辺、施工方法が異なる接合部分でのデータ採取
- ・河川堤防の耐震点検業務で、沈下や亀裂の発生につながる強振動発生個所の抽出。
- ・震度4クラスの地震が発生しやすい区間でのデータ採取
- ・堤防施工実施直後の箇所や粘り強い河川堤防の構造評価箇所でのデータ採取

また、これまでも模擬堤体で確認できた成果のうち越水や河岸浸食は、検知可能であることが確認できているため、24時間光ファイバ敷設区間をモニタし、現時点で実用可能なアプリケーションとして越水発生の監視をつづけながら、平行してデータを蓄積し、更なる活用可能性の検証を進めていきたい。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究では実堤防の既設光ファイバを用いた堤防全体の振動の常時計測に成功し、図⑪-1 記載の4点を実証することができた。それぞれの成果の活用案についても同図に示す。

No	実証概要	実証結果	活用案
1	小畔川堤防での常時微動による河川堤防の変状の検知	小畔側堤防の常時微動を観測し、この振動周波数 1～5Hz付近が検知できることを実証	維持点検 ① 堤体内の空洞調査箇所の一次スクリーニング (表面波探査の簡易版) ① 堤体施工箇所のモニタリング (特に不同沈下) ① 樋門など河川施設付近のモニタリング
2	埼玉大 模擬堤体での空洞の有無による振動周波数の変化検知	模擬堤体での常時微動相当の振動の周波数が空洞の有無で変化することを確認	
3	小畔川堤防での地震による震動強度の検知	場所によって地震の影響(揺れやすさ)、振動の継続時間を可視化できることを実証	地震発生時 ① 地震後、常時微振動のモニタリングで変状検知 ② 振動が大きい箇所の抽出、特に重点箇所以外
4	埼玉大 模擬堤体でのパイピング発生に伴う振動検知	・ 崩落前に1Hz⇒20Hzに周波数の推移を観測 ・ 崩落時に強度の高い振動を捉えることにより検知可能であることを実証	洪水時 ① 浸透による空洞発生 ③ 浸透による崩落発生 ④ 越水検知
参考	越水・河岸侵食の検知 (R2国総研河川堤防変状検知に関する技術公募)で実証	越水開始、堤防の欠損進行の検知に有効であることを実証	

図⑪-1