

分布型光ファイバ振動センサを用いた河川堤防の決壊・河岸侵食の検知

○町島祐一¹・海老原悠馬¹¹株式会社レーザック

1. はじめに

近年、台風や前線の影響により、施設能力を上回る氾濫が頻発しており、堤防の決壊や河岸の侵食等の災害対応（図-1）への迅速化を図るため、リアルタイムな情報収集が重要となっている。とりわけ、豪雨・浸水によって人が近づけない、ドローンが飛べない、夜間の視野劣化やカメラの死角などの現場的問題が存在しており、それらを克服することのできる堤防決壊・河岸侵食の検知技術が求められている。

筆者らは地熱分野向けに、地下数 km に吊り下げられる光ファイバケーブルの全線を振動センサとして機能させる分布型光ファイバ振動センサの開発を進めてきた⁽¹⁾。従来の多連型地震計の機能を 1 本の光ファイバケーブルで実現する画期的な技術である。一方、国管理の河川堤防においては、水門の制御管理用として堤防内に通信用の光ファイバケーブルが多く埋設されている。分布型光ファイバ振動センサで使用する光ファイバは、通信用に使われているシングルモード光ファイバと同様であり、もしこの既設光ファイバケーブルを決壊・侵食検知センサとして使用することができれば、豪雨や夜間においても、人の目視によらず早期に確認することができる。

そうした利点を踏まえ、今般、国土交通省・国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）が実施した、越水及び河岸侵食の水理模型実験（「河川堤防の変状検知システムに関する技術公募」に応募・採択⁽²⁾）に参加した。本実験において、模擬堤防内に埋設した光ファイバによって、越水による堤防決壊、及び洪水（ここでは「河川流量の大幅な増加」、以下同様）による河岸侵食を明確に検知できたので、その概要を報告する。



図-1 左：堤防決壊 右：河岸侵食

2. 分布型光ファイバ振動センサ

2.1 センシング原理

1 本の光ファイバ上に作用する振動を分布的に検出するには、一般に C-OTDR (Coherent-Optical Time Domain Reflectometry) という技術を用いる。振動分布検出用途の C-OTDR は DAS (Distributed Acoustic Sensor)、或いは DVS (Distributed Vibration Sensor) とも呼ばれ、パルス光によって位置を検出する一方、局所的なレイリー散乱光の位相変動で振幅を検知する手法である。レイリー散乱光の位相を検知する C-OTDR の構成例を示す（図-2）⁽³⁾。

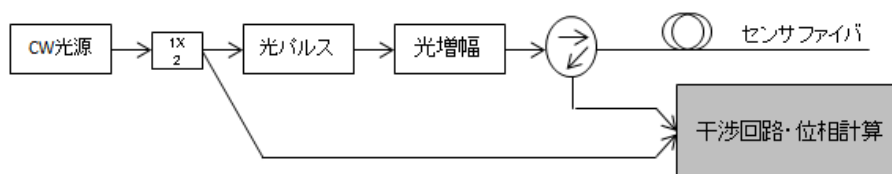


図-2 位相を検知する C-OTDR

2.2 本システムの特徴

以下に、越水による堤防決壊及び洪水による河岸侵食の検知を行う上での、本システムの特徴を整理した。

- (1) 分布型光ファイバ振動センサとは、1本の光ファイバで長手方向の振動分布を直視でき、振動分布の時間変化をモニタ、記録できる装置である。堤防や河岸に埋設された光ケーブルを用いて、昼夜・天候を問わず、とりわけ豪雨時等、人やドローンが容易に現地確認できない際にこのシステムを稼働することで、遠隔に現地の状況を推測することができる。変状の特定は、変状箇所及び振動の大きさによる。
- (2) 光ファイバケーブルは耐候性および耐久性を備えている。計測装置は、耐候性および耐久性を備えた屋外キャビネット、または屋内施設に配備する。計測装置は、電源供給および通信手段を確保した場所とする。LAN環境があれば、遠隔操作・監視が可能である。消費電力も小さいため、太陽電池及び蓄電池等の自立型電源による稼働も可能である。

3. 水理模型実験の概要

3-1. 実施主体

国総研・河川研究部は2020年11月に、越水や侵食に伴う河川堤防の変状を捉える「変状検知システム」を技術公募し、応募のあった技術のうち選考された技術について、性能確認試験を実施した。本報告はこの性能確認試験として、茨城県つくば市土木研究所実験設備内で実施された水理模型実験の結果に基づくものである。

なお公募では、変状検知システムに求める技術は下記としていた。

- (1) 越水による堤防決壊では、堤防天端高が10 cm程度低下することを即時に検出可能なシステム
- (2) 洪水による河岸侵食では、堤防天端が1m程度欠損することを即時に検出可能なシステム

3-2. 水理模型実験装置

図-3に水理模型実験の全体を示す。同図右側の量水槽から上部の越水用模擬堤防に至る流路と、下部の侵食用模擬河岸に至る流路の2つが設けられている。図-4に越水用模擬堤防の平面図と断面図を示す。堤防の寸法は、長さ6m、高さ1m、天端幅1m、法面底辺幅2mであり、盛土をランマーで締め固めた構造である。図-5に侵食用模擬河岸の平面図と断面図を示す。流路長さ30m、侵食対象河岸は高さ0.5m、底辺幅1mである。3箇所の特定観察箇所（上流から順に橋台護岸部、橋台部、一般部）を設け、それぞれに水制（邪魔板）を用いて侵食を促進させた。なお、河岸は一般的な海岸砂で形成されており、締め固め等は行われていない。

光ファイバの設置位置は、越水用模擬堤防については天端中央部深さ10cmの位置に光ファイバを埋設した。侵食用模擬河岸では、法面中央部付近深さ約3cmの所に埋設した。図-4及び図-5において、黄色塗り実線と黄色塗り丸印で示している。

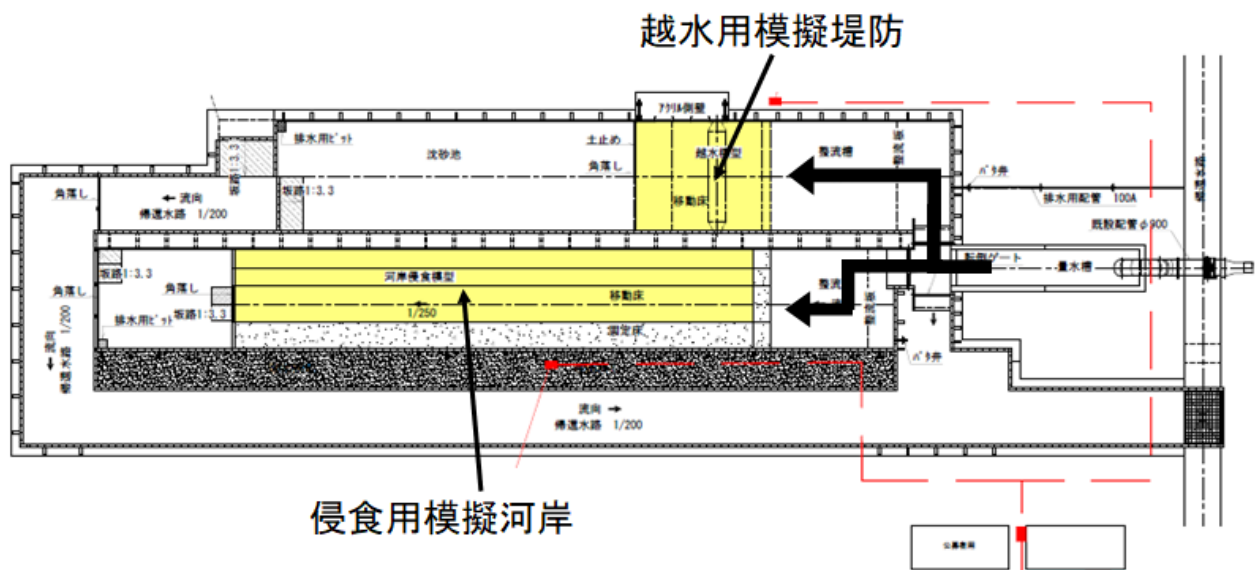


図-3 水理模型実験の全体

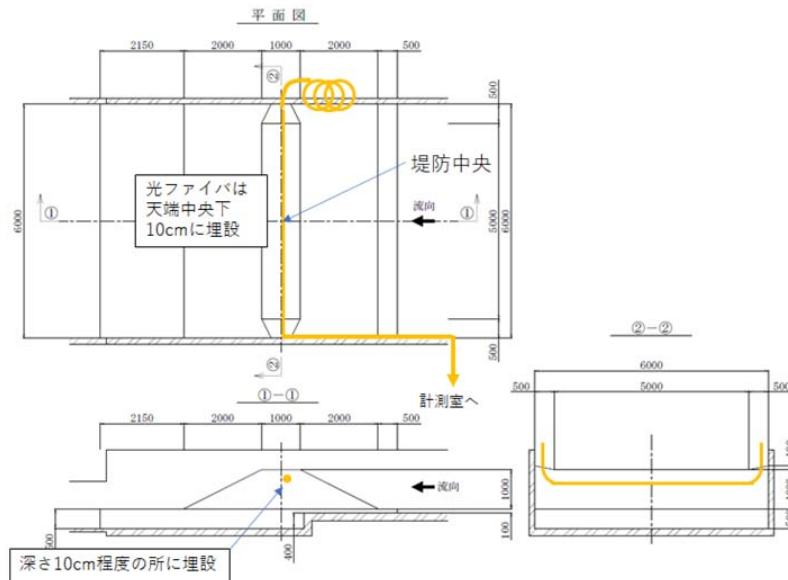


図-4 越水用模擬堤防

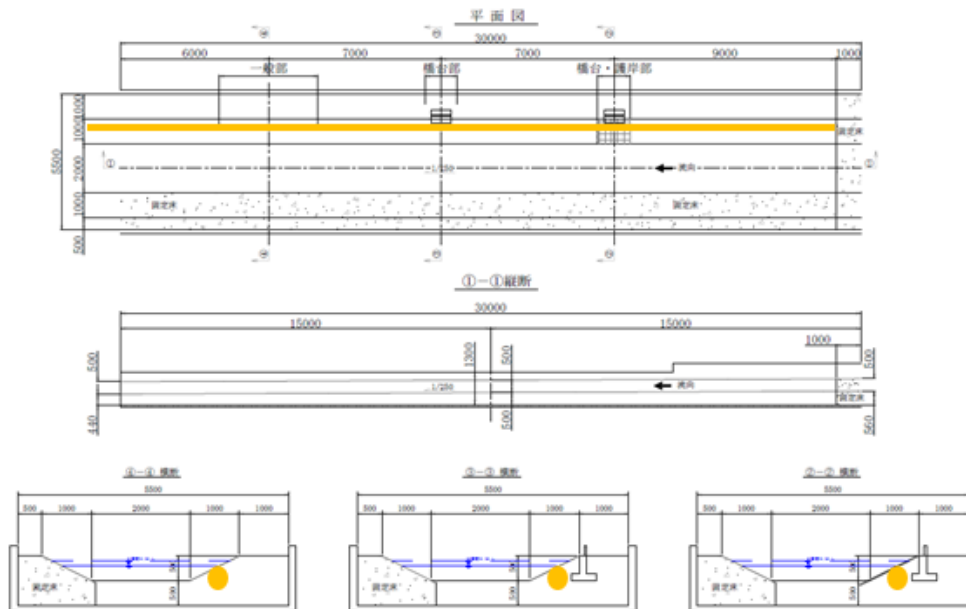


図-5 侵食用模擬河岸

4. 計測およびデータの条件

試験に際しての計測条件は表-1の通りである。空間サンプル分解能とは、5mの空間分解能をずらしていく距離に相当する。即ち、今回は5mを20cmずつずらしながらデータを収録している。5mの空間分解能であることから、各箇所のデータはその位置を中心とする前後2.5m(計5m)の平均振動値($\mu\text{m}/\text{sec}$:変位速度)である。振幅データは明瞭のため、1kHzで収録した値を5秒毎の標準偏差で整理した。

表-1 計測条件

| 項目 | 仕様 |
|----------------------------------|------------|
| サンプリング速度 | 1kHz |
| 空間分解能 | 5m |
| 空間サンプル分解能 | 0.2m |
| 振幅値 ($\mu\text{m}/\text{sec}$) | 1 σ |

5. 越水による堤防決壊試験

まず表-2 で発生事象と時刻を示す。次に、図-6 で堤防決壊試験全体の振動分布をコンターで示す。横軸に時刻，縦軸に位置（計測室を 0m），コンターで振幅である。14：43 頃に堤防天端が決壊し，光ファイバが露出して直接越流水が当たり始めたが，同時刻より振幅が急上昇していることが明瞭に判別できる（収録動画とも一致）。図-7 では堤防中央部に解析位置を定めて振幅の時間経過を示した。図-8 に決壊によって露出した光ファイバの画像を示す。

さらに予兆検知の可能性を検証するために，図-9 において図-7 の縦軸を拡大した。これによって，表-2 に示す越流開始や流量増加の事象も検知できていることが確認できた。

表-2 発生事象と時刻

| 時刻 | 発生事象 |
|-------|--|
| 12：00 | 注水中の振動 |
| 12：33 | 堤防を越流開始（この時の流量，天端上 5cm 目安） |
| 13：03 | 流量増加（天端上 10cm 目安），振幅で $1\mu\text{m/s}$ の増加 |
| 14：03 | 流量増加（天端上 12.5cm 目安），振幅で $0.8\mu\text{m/s}$ の増加 |
| 14：43 | 光ファイバ露出 |

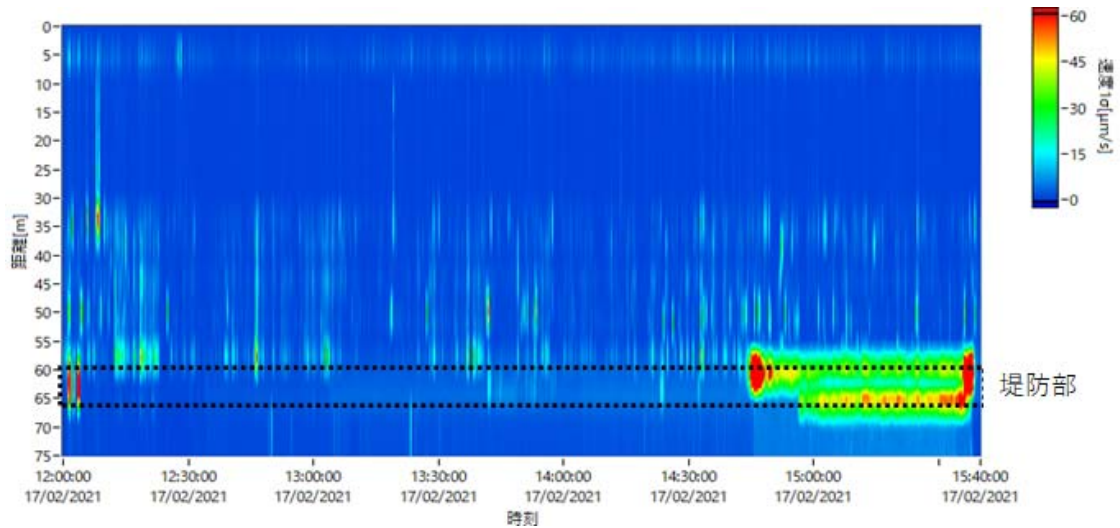


図-6 堤防部の挙動

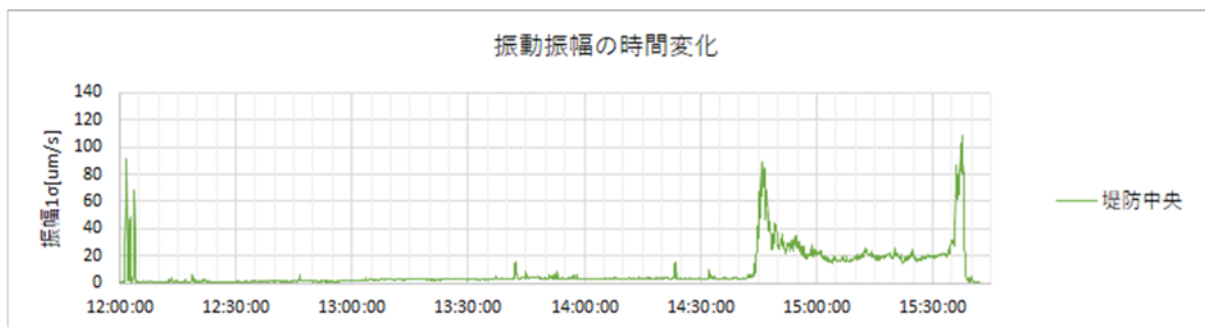


図-7 堤防中央部_全経過時間のデータ



図-8 模擬堤防の決壊

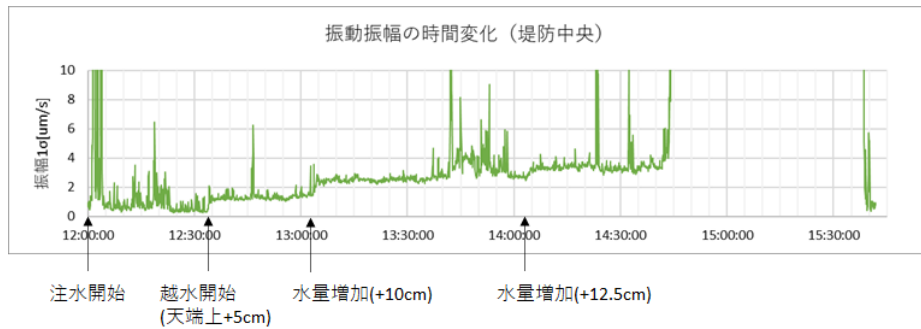


図-9 図-7の縦軸拡大

6. 洪水による河岸侵食試験

まず図-10で、河岸侵食試験全体の振動分布をコンターで示す。横軸に時刻、縦軸に位置（計測室を0m）、コンターで振幅である。表-3の通り、13:15より一般部近傍の水制（邪魔板）が設置された後、下流側から河岸侵食が進んでいることが明瞭に識別できている。図-11では特定観察箇所である3箇所の振幅の時間経過を示した。一般部の水制設置に伴い、一般部近傍の振幅が急上昇、橋台部では水制設置前から近傍の光ファイバの露出が進んで振幅が上昇、橋台・護岸部の水制設置に伴い、橋台・護岸部近傍の光ファイバが露出し、振幅が急上昇している。図-12に河岸侵食の画像を示す。

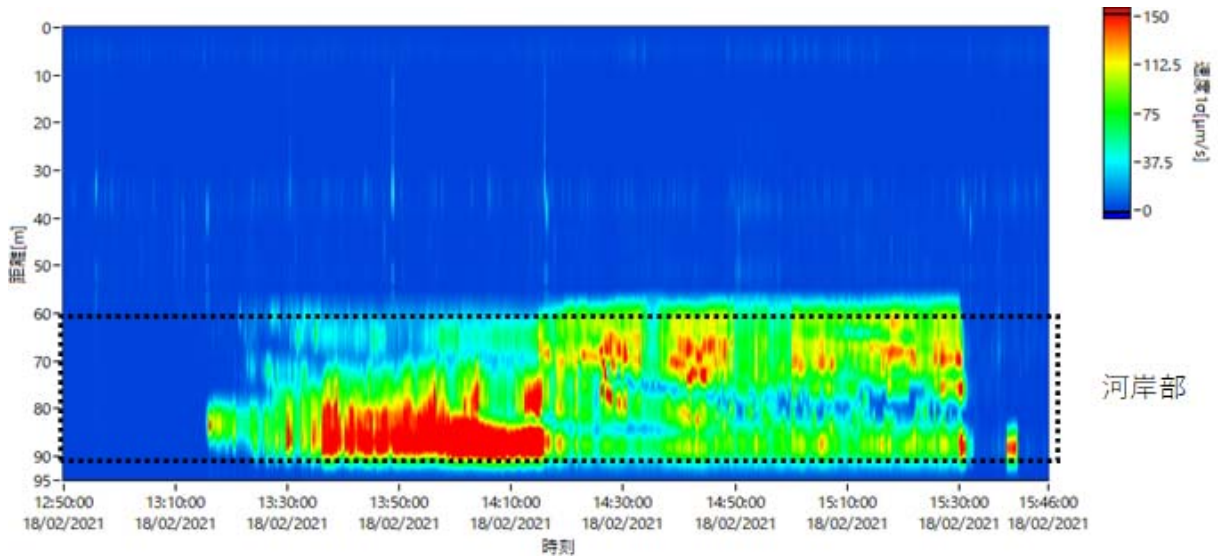


図-10 河岸侵食全体の挙動

表-3 時刻と発生事象

| 時刻 | 発生事象 |
|-------|-----------------------------|
| 13:15 | 一般部の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出 |
| 13:26 | 橋台部近傍の光ファイバが水制設置の前に露出 |
| 13:45 | 橋台部の水制設置 |
| 14:15 | 橋台・護岸部の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出 |

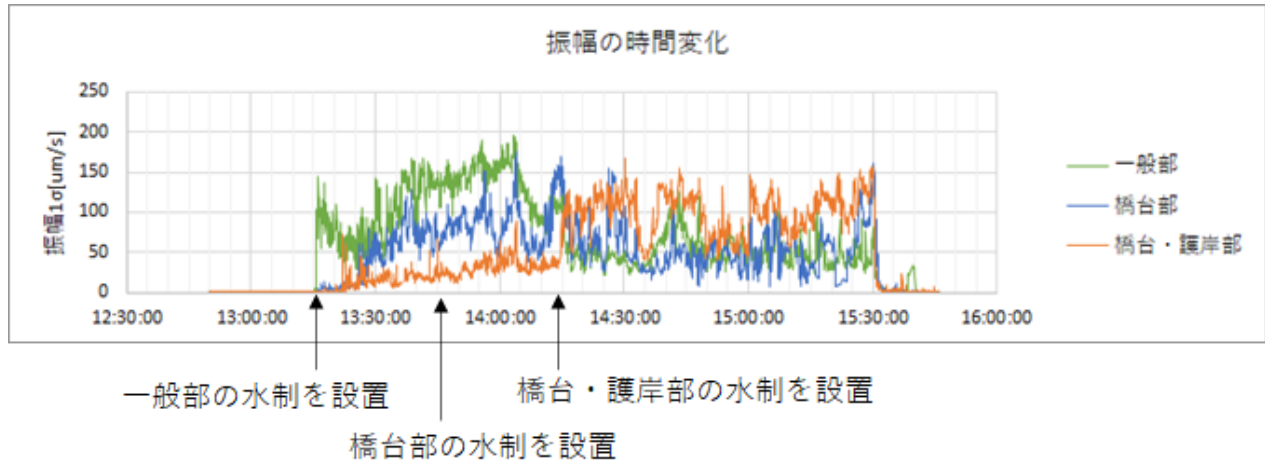


図-11 特定観察箇所_全経過時間のデータ



図-12 河岸侵食の様子

6. おわりに

越水による堤防決壊及び洪水による河岸侵食を模擬した水理模型実験に対して、分布型光ファイバ振動センサの適用を試験した。その結果、越水による堤防決壊では、堤防天端高が 10 cm 程度低下することを即時に検出することが確認できた。また、洪水による河岸侵食では、堤防天端の欠損に至る前から河岸が侵食されていく現象が検出できた。

今後の課題としては既設ケーブル活用を視野に入れ、本邦で行われている光ケーブル埋設手法（U字溝等）環境での検証を行いたいと考えている。溝に水流が侵入することで、通常とは大きく異なる振動が観測できると予測している。

謝辞：試験への参加，及び試験データ利用に関する許可につきまして，国土交通省・国土技術政策総合研究所・河川研究部・河川研究室には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 町島祐一・浅沼宏：超臨界地熱開発のための 550℃耐熱光ファイバセンサの試作と初期評価，日本地熱学会・令和元年学術講演会・講演要旨集，A17, p.56, 2019
- 2) 国土交通省・国土技術政策総合研究所・河川研究部・河川研究室：河川堤防の変状検知システムに関する技術公募，実験結果，<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/gijyutsukoubou.html>
- 3) An Introduction to Distributed Optical Fiber Sensors, Arthur H. Hartog, CRC Press, 2017