

河川堤防の変状検知システム実験結果

(光ファイバによる検知)

令和3年3月

エヌ・ティ・ティ・インフラネット株式会社

報告書

4. 提案されたシステムの性能の確認結果

1. エヌ・ティ・ティ・インフラネット株式会社

1. システムの概要

光ファイバに振動が加わると、光波長信号に干渉波が生じる。干渉波をモニタリングすることで、振動発生位置および振動レベルを検知するシステムである。現在、道路下に埋設されているガス管等に対して、掘削工事等による損傷事故を未然に防止するための振動検知システムとして実用化されているものである。

実験では、模擬堤防の堤体内に光ファイバケーブルを埋設し、計測ハウス内に設置した計測機器で干渉波のモニタリングを行うことで、模擬堤防で発生する流水および堤防侵食による光波長信号の変化をとらえ、侵食の発生位置や程度を検知しようとするものである。

2. システムの原理

2-1. 基本原理

光ファイバケーブルによる光通信では、光ファイバに振動が加わると、光ファイバの屈折率が変化することにより、光ファイバ内を通る光の伝搬速度が変化することとなる。一定の長さの光ファイバにおいて、振動により光の伝搬速度が変化した場合、光の伝搬時間が変化することとなり、光ファイバの見かけ上の長さが変化したこととみなされる。

$$\text{光ファイバ内の光の速度} = \text{光の速度} (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \div \text{屈折率} (\text{約 } 1.45)$$

この基本原理を利用して、図 2-1 に示すような光源・フォトダイオード受光部 (PD) ・ 1 対 1 カプラ・光ファイバリングからなる光回路構成において、光源から出射された光はカプラにて分岐され、光ファイバリングの両端に入射される。入射された光は、時計回りの CW 光 (clockwise) と反時計回りの CCW 光 (counterclockwise) として光ファイバリングを伝搬し、再びカプラにて合成され、干渉波として PD で検出される。

光ファイバリングに振動が加わると、光ファイバ内の屈折率が変化する。屈折率が変化することにより、光ファイバ中の光路長変化 (屈折率が変化することにより光の伝搬時間が変化するため、見かけ上の長さ変化に相当) が発生する。PD 側から見ると、振動による光路長変化により CW 光と CCW 光の位相変調が発生することとなり、干渉 (合成) 光の強度が変化する。

この際の光レベルの変動を検出することにより、振動 (強度と位置) を検知することができる。

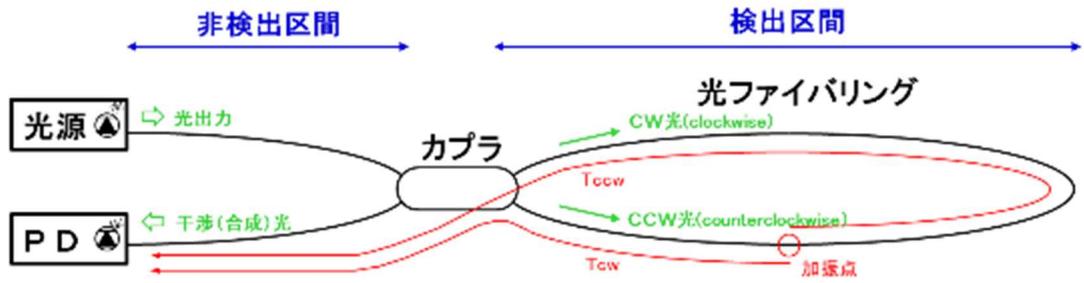


図 2-1 光ファイバリングによる計測原理

2-2.計測方法

実際の計測では、振動発生位置、振動レベルを検知するために、2つの測定波長（1.31 μm 、1.55 μm ）を組み合わせ使用し、振動位置および振動検出レベルをそれぞれの干渉波の位相差から求める。計測システムにおける光回路構成を図 2-2 に示す。

始点分岐結合器と終点分岐結合器とで挟み込んだ区間で光ファイバリングを構成し、計測区間を構築する。計測装置からの出力光がセンサ光ケーブル（光ファイバリング）に照射されている際に、センサ光ケーブルに振動が加わると照射されている光の干渉波強度が変化する。計測装置の信号処理部でこの干渉波強度変化を処理することにより、振動検出レベルおよび振動検出位置を算出する。

計測システムにおける光ファイバ心線接続図を図 2-3、装置仕様を表 2-1、外観を写真 2-1 に示す。

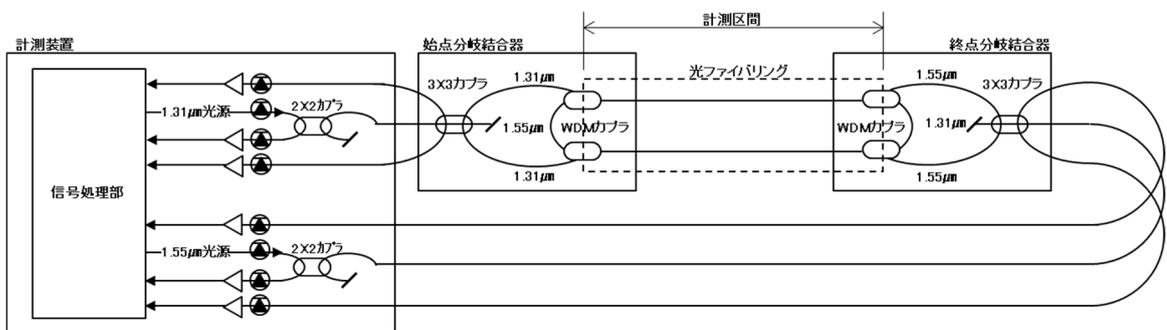


図 2-2 振動検知システム構成

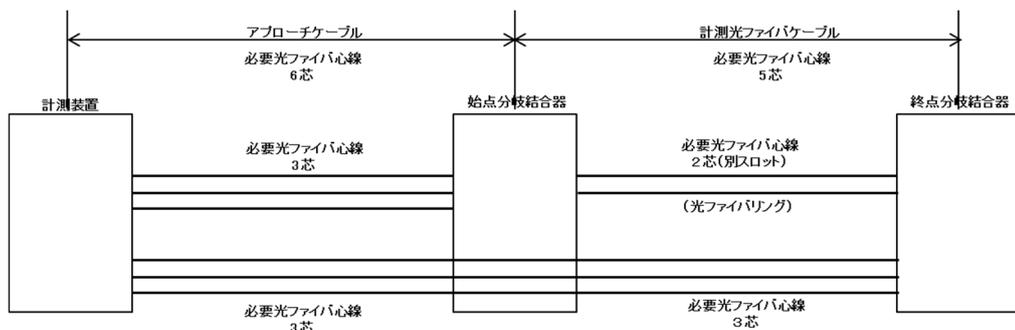


図 2-3 光ファイバ接続図

表 2-1 振動検知システム装置仕様

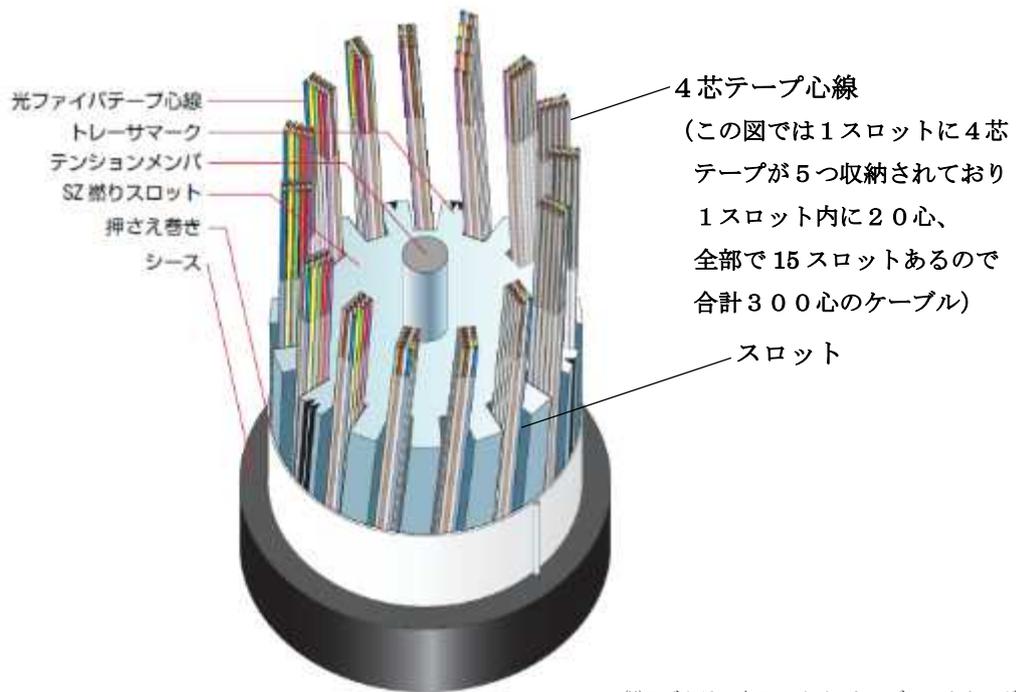
項目	仕様
監視距離 (センサケーブル長)	200m ~ 10km
検出距離精度	センサケーブル全長に対して ±2.5%
検出周波数範囲	100Hz ~ 10kHz
寸法(mm)	482(W) × 350(D) × 129(H)
電源	AC100V 50-60Hz



写真 2-1 振動検知システム 計測装置外観

図 2-3 において、アプローチケーブル区間は光ファイバ心線が 6 芯必要となる。計測光ファイバ区間では、光ファイバリングを形成するための光ファイバ心線が 2 芯と、始点分岐結合器から終点分岐結合器間の光ファイバ心線が 3 芯必要で、都合、5 芯の光ファイバ心線が必要である。なお、光ファイバリングを形成する 2 芯の光ファイバ心線は、それぞれ異なるスロットから心線を選定する必要がある (図 2-4 に光ファイバケーブルのスロット構造例を示す)。

このため、本システムでは、最低 8 芯以上の光ファイバケーブルを使用する必要がある。



(株)フジクラ 光ファイバ・ケーブル カタログより

図 2-4 光ファイバケーブルのスロット構造例 (300 心ケーブルの例)

3.技術の特徴

振動検知システムは、最長 10Km までの区間を 1 システムで、リアルタイムに計測することが可能であるため、低コストで構築が可能である。

センサとなる光ファイバケーブルには機械構造や電気回路がなく、また、電源線や信号線等の配線も不要であり、雷害の影響を受けることがない。光ファイバの変形や切断による監視ではないため、一度、構築すれば長期間の使用が可能である。

システムは、24 時間リアルタイムに計測が可能であり、計測システムに閾値等を設定しておくことにより、振動の発生個所をシステムの地図上に表示させることも可能である。計測は、天候に左右されることなく、年間を通じて安定的に運用が可能である。

また、光ファイバケーブルは、堤防に埋設されている現行の河川管理用光ファイバケーブルを活用することも可能で、その場合には、新規に光ファイバケーブルを埋設する必要がないため、さらなる低コスト化が可能である。

3-1.導入コスト

本システムの導入（構築）コストを表 3-1 に示す。

表 3-1 構築コスト

項目	単位	価格	100m 当たり単価	備考
計測システム	1 式	8,500,000	85,000	付属品含む
システム構築	1 式	1,700,000	17,000	
測定用 PC 等	1 式	1,500,000	15,000	測定ソフト含む
光ファイバ埋設	100m	1,800,000	1,800,000	天端 20cm 深さに埋設、復旧費混み
		合計	1,917,000	

※構築は、10Km 区間を 1 計測システムとし、コスト試算した。

※光ファイバの埋設は、堤防天端の 20cm 深さに、配管埋設とした。

3-2.維持管理コスト

維持管理コストとして、年に 2 回、光ファイバケーブルの埋設状況の点検および振動計測システムの動作確認点検費用を見込んだ。維持管理コストを表 3-2 に示す。

表 3-2 維持管理コスト

項目	単位	単価	回数	価格	備考
ケーブル点検	1 回	150,000	2	300,000	10Km 区間
システム動作点検	1 回	400,000	2	800,000	10Km 区間
			合計	1,100,000	

3-3.選考基準の満足度

表 3-3-1 選考基準の満足度

No.	項目	満足度
①	応募資格を満たしていること。	満たしている
②	導入コストおよび維持管理コストが低価格であること。 [期待する要件④] ・導入コスト：300万円以下/100m ・維持管理コスト：低価格であること	満たしている。 ・導入コスト：約 200 万円/100m ・維持管理コスト：約 110 万円/年 ※10km 計測時のシステム構成によるコスト。
③	堤防周辺における河川利用や交通の妨げとならないこと。 [期待する要件③]	満たしている。 システムは堤防に埋設するものであり、河川利用や交通に影響はない。
④	アイデア段階のものではなく、システムを中心となる計測装置がすでに試作され、計測装置の計測精度が確認されていること。 [求められる要件④]	満たしている。 計測システムは、2016年より、ガス埋設導管の保守管理等に実用化されている。(2021.3 時点の監視延長：39Km)
⑤	以下の実現可能性が認められること。 (ア)数百 m から数 km 区間に設置することを想定しており、区間内で変状が発生した場合、その箇所を即時に特定できること。 [求められる要件①]	満たしている。 システムは、200m～最長 10Km までの区間を 1つの計測システムで連続的に計測可能であり、システムにて閾値を設定することにより変状が発生した場合にアラーム発報等により瞬時に把握が可能である。また、計測システム上では、変状発生箇所を地図上で表示可能で、即座に変状発生位置の把握が可能である。
	(イ)後述する実験で性能を確認できること。 [求められる要件②]	本報告書参照。
	(ウ)昼夜・天候を問わず、変状を検出可能なこと。 [求められる要件③]	満たしている。 システムは、堤防内に埋設した光ファイバ内を伝搬する光波長を管理事務所等に設置した機器で計測監視するもので、24 時間、連続的な計測が可能。また、天候による影響もない。

表 3-3-2 選考基準の満足度

No.	項目	満足度
⑤	<p>(エ)計測装置およびシステムに耐候性と耐久性があること。 [求められる要件⑤]</p>	<p>満たしている。 計測用の光ファイバケーブルは、一般通信や河川管理用に使用されているケーブルと同等であり、対候性および耐久性を兼ねそろえている。以下の環境条件の範囲内で動作を保証する。 [計測器] ①温度条件 ・動作温度：0～45℃ ・保存温度：-20～60℃ ②湿度条件 ・動作湿度：20～80% ・保存湿度：20～80% ※ただし、結露しないこと [分岐結合器] ①動作温度；0～45℃</p>
	<p>(オ)天端幅の欠損の過程を連続的に検知できること。 [期待する要件①]</p>	<p>満たしている。 堤体内に埋設した光ファイバケーブルが、欠損等により流出・切断しない限り、連続的に計測が可能である。</p>
	<p>(カ)機器の配置、電源供給、通信方法等。 [期待する要件④] 実現可能性が高いこと</p>	<p>満たしている。 堤体内に埋設する光ファイバケーブルを振動センサとするが、埋設する光ファイバケーブルには機械構造や電気回路がなく、また、電源線や信号線等の配線も不要である。 また、本システムは、光ファイバケーブルの変形や断線による監視ではないため、長期間の運用も可能である。</p>

4.現場実装で想定する配置方法

実際の河川では、河川事務所等に計測装置を設置し、事務所から堤防へ光ファイバケーブルを配置する。堤防の計測区間（最長 10Km）の始点位置と終点位置にハンドホールを設置し、始点・終点装置を設置する。次の計測区間も同様に始・終点装置を設置し、連続した計測を行うことが可能である。

光ファイバケーブルは堤体内に埋設・配置するが、埋設位置・深さ等の条件が計測条件に合致し、光ファイバケーブルに空き心線が確保できれば、既存の管理用光ファイバケーブルの活用も可能である。

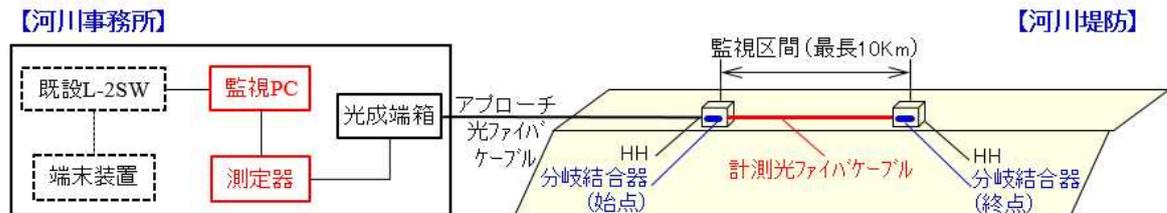


図 4-1 現場実装でのシステム配置イメージ

5.実験の計画

5.1 目的

本システムは、光ファイバを敷設するだけで、光波長信号の変化から振動発生と振動発生位置を検知するシステムである。実験では、堤防侵食に関して、以下の2つの観点での振動計測を想定し、実験を計画した。

- A.堤防侵食により局部的に発生する堤防崩落による振動
- B.局部的な堤防崩落開始後に崩落部で増大する水流による振動

Aについては、堤体の一部が崩落する際に振動が発生すると考え、崩落の発生位置や規模を計測把握するものである。Bについては、崩落が始まった堤体は、崩落個所で水流による振動が増大すると考え、崩落の進行状況を計測把握するものである。

実験では、堤体内への光ファイバケーブルの配線は、実際の堤防への適用と同様に堤防の縦断方向に配線し、埋設した光ファイバケーブル全長を振動センサとして計測できるようにして、堤防全長での変状をとらえることとした。

また、堤防自体が粒度を調整した砂を材料として築造されており、転圧等も行われていないため、固く締め固まっていない状態である。このことから、侵食水流による振動をよりとらえやすくするために「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」では、配線した光ファイバケーブルに「振動補助金物」を取り付けることとした。これにより、「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」では、侵食の始まりと侵食の進行を振動補助金物でとらえることとした。

これにより、堤防のどこかに発生する変状を計測するとともに、特定区間の侵食をより顕著に計測することを目的に、計測システムを計画した。

5.2 システム配置

本実験では、実際の河川管理用光ファイバケーブルの設置形態に合わせ、計測ハウスから堤防へ樹脂製の管路を配管し、管路内へ光ファイバケーブルを敷設した。

堤防区間の配線は、光ファイバケーブルの上流側固定部に「終端分岐結合器」、下流側固定部に「始端分岐結合器」を配置し、接続した。各分岐結合器間の光ファイバケーブルを配管内に敷設したうえで堤体内に埋設し、堤体全長の振動計測が可能なように配置した。

堤体内は、堤防の侵食・崩落による光ファイバケーブルの流出を防ぐため、流水側の反対に配置した。埋設深さは、水位等を考慮して天端から 40 cm 下に配置した。(写真 5-1)

今回の実験では、堤体構築に砂を使用し締固めを行わずに構築されていることから、振動が光ファイバケーブルに伝搬しづらいと考え、振動補助金物を「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」にそれぞれ一か所設置した。(写真 5-2) また、一般部の振動補助金物はより振動を明確に捉えられるよう埋設表示シート(情報ボックス管路用シート:幅 150mm、長さ 200mm,400mm,600mm)を取り付け、水流による抵抗の増大を狙った。(写真 5-3)

また、本計測システムの距離分解能が約±8.6mであるため、「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」の各測定区間の距離が短く、そのままでは距離分解能未満になってしまうため、「一般部」と「橋台部」の間および「護岸部」と「護岸橋台部」の間にそれぞれダミー光ファイバケーブル(各 100m)を割り込み、計測システム上の各測定点を分離した。ダミー光ファイバケーブルは、各区間に設置した中間クロージャ内に収納した(図 5-3)。

計測ハウス内では、光成端箱にて光ファイバケーブルを成端し、コネクタケーブルにて計測装置に接続し、計測用パソコンにてデータ収録を行った。

システム配置は図 5-1、図 5-2 のとおりである。

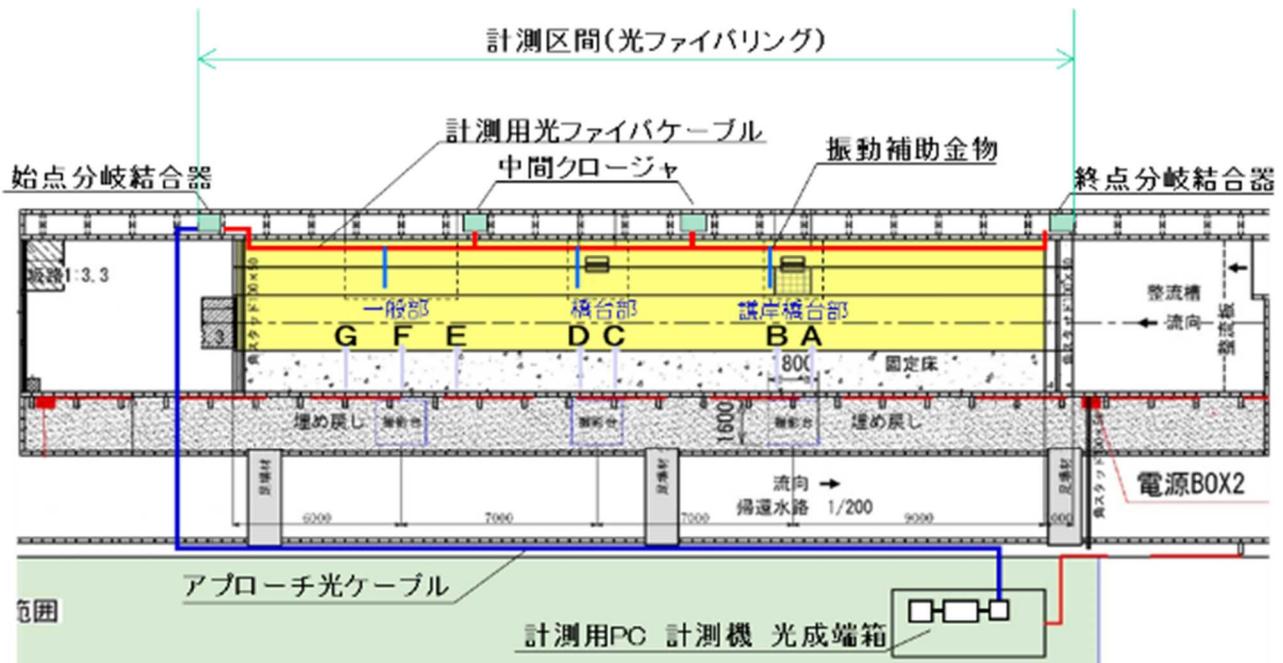


図 5-1 システム配置図 (平面)

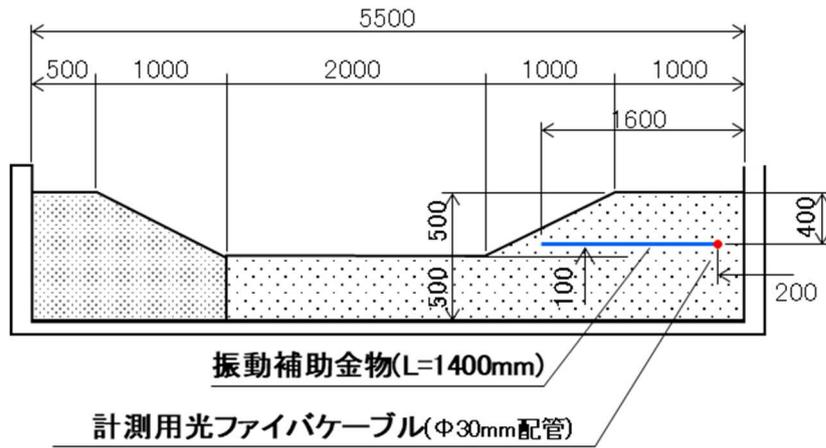


図 5-2 システム配置図 (断面)

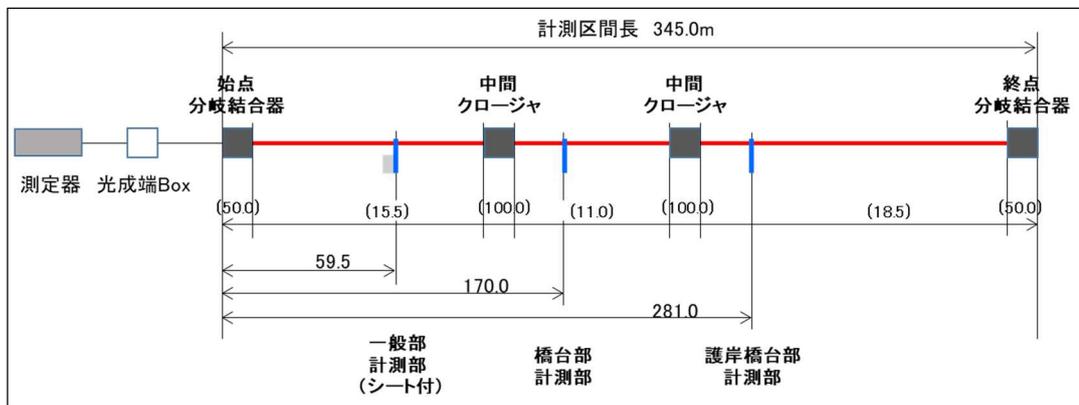


図 5-3 ケーブル接続図



写真 5-1 配管状況（天端より 40cm 下がり）



写真 5-2 振動補助金物配置（「橋台部」「護岸橋台部」）



写真 5-3 埋設表示シート付振動補助金物（「一般部」）

6.実験結果

6.1 計測波形

計測した振動波形を図 6-1 および添付図に示す。横軸が計測時間、左縦軸（青グラフ）が計測した振動発生位置、右縦軸（橙グラフ）が計測した振動強度である。なお、データは、ノイズキャンセル等を行わない生データである。

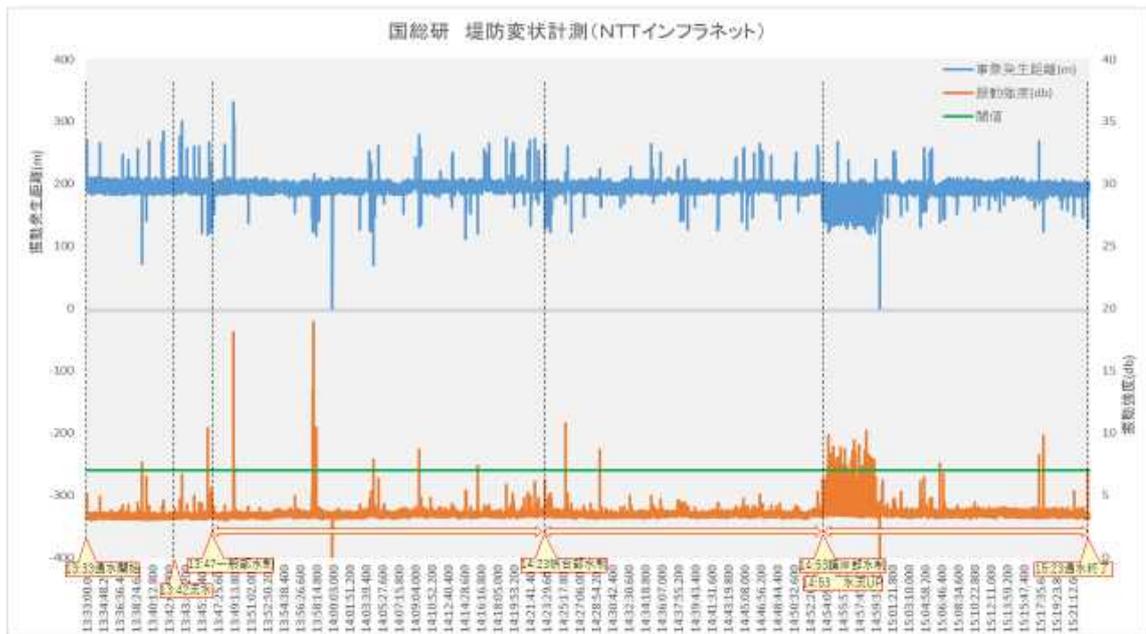


図 6-1 計測結果

本システムの特徴として、光ケーブル全長にわたり検知した振動は、計測システムの計測長のほぼ中間あたりの位置に検知される。このため、川の流れのような堤防全体に伝搬する振動は、計測システム全長で捉えることとなるため、上記の計測波形のように、計測システムの中に近い発生距離 190mあたりに連続的に計測されている。波形グラフの部分的な拡大図を図 6-2 に示す。

また、計測ソフトの仕様で、毎時 00:00 に計測ファイルの自動保存が行われる。この際に距離データ、振動データとも「0」を記録してしまうため、上記計測波形で、14:00:00 と 15:00:00 で、「0」値が記録されている。

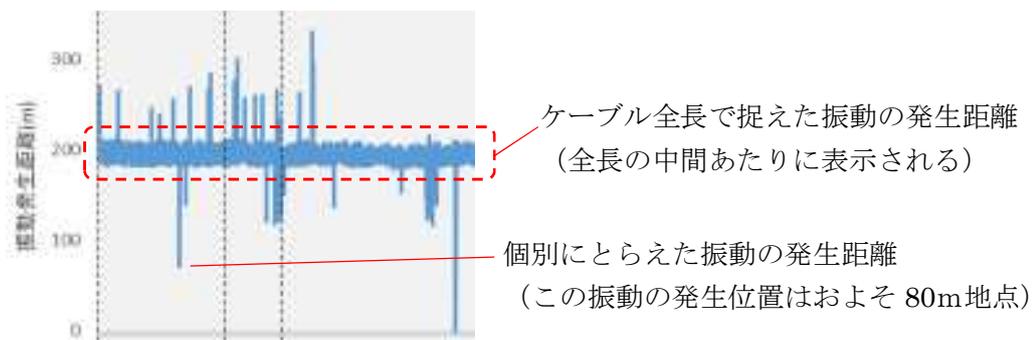


図 6-2 振動発生距離（ケーブル全長で捉えた振動）

6.2 実験結果

6.2.1 水流による振動

上記の計測波形からノイズ成分をキャンセルしたうえで、単位時間ごとの振動レベルの変化を求めた。表 6-1 に振動レベル値を、図 6-3 に振動強度グラフを表す。

表 6-1 振動レベル値

イベント	計測時間帯	計測時間帯における平均振動強度(db)	イベント期間における平均振動強度(db)
通水を始めて流れができるまでの期間	13:33:00 ~ 13:37:00	3.3621	3.3378
	13:37:00 ~ 13:42:00	3.3135	
流れができてから一般部に水制を設置するまでの期間	13:42:00 ~ 13:47:00	3.3780	3.3780
「一般部」に水制を設置している期間	13:47:00 ~ 13:52:00	3.3884	3.4586
	13:52:00 ~ 13:57:00	3.4435	
	13:57:00 ~ 14:02:00	3.4206	
	14:02:00 ~ 14:07:00	3.4449	
	14:07:00 ~ 14:12:00	3.5101	
	14:12:00 ~ 14:17:00	3.4997	
「橋台部」に水制を設置している期間	14:17:00 ~ 14:23:00	3.5028	3.4829
	14:23:00 ~ 14:28:00	3.5116	
	14:28:00 ~ 14:33:00	3.4467	
	14:33:00 ~ 14:38:00	3.4958	
	14:38:00 ~ 14:43:00	3.4755	
	14:43:00 ~ 14:48:00	3.5043	
「護岸橋台部」に水制を設置している期間	14:48:00 ~ 14:53:00	3.4636	3.5813
	14:53:00 ~ 14:58:00	3.8141	
	14:58:00 ~ 15:03:00	3.5975	
	15:03:00 ~ 15:08:00	3.5374	
	15:08:00 ~ 15:13:00	3.5524	
	15:13:00 ~ 15:18:00	3.5149	
	15:18:00 ~ 15:23:00	3.4717	

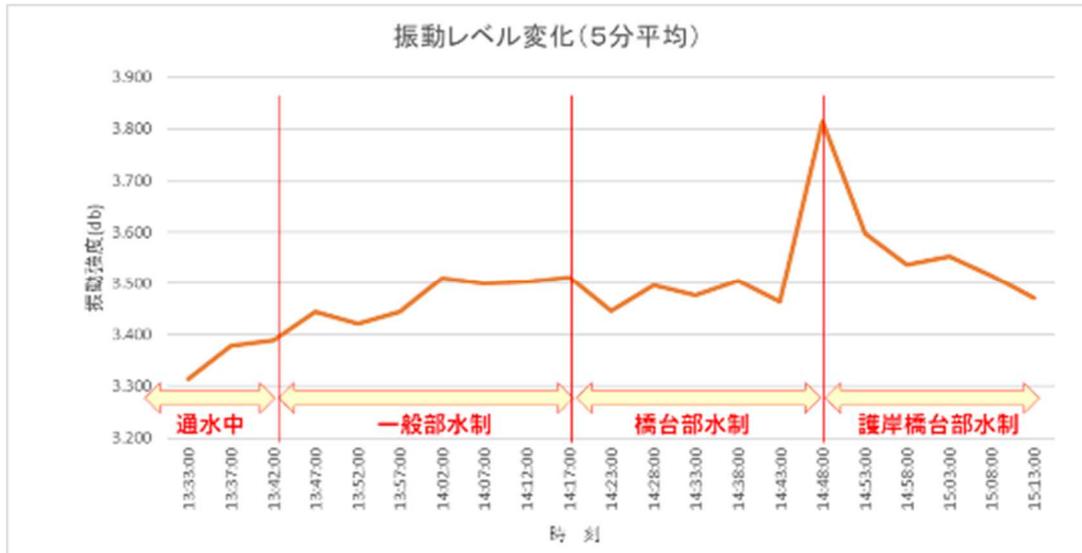


図 6-3 振動レベル変化

振動レベルでは、通水開始から徐々に振動強度が増加している。これは通水により発生した振動をとらえ始めていると考えられる。(13 : 33～13 : 42 の期間)

水路全体に水が行き渡り、川の流れが発生すると、更に振動強度が増加している。(13 : 42～13 : 47 の期間)

「一般部」に水制を設置すると振動強度はさらに強くなり、水量の増加および水制による振動増加をとらえているものと考えられる。(13 : 47～14 : 17 の期間)

「橋台部」に水制を設置した後も同様な振動強度をとらえている。(14 : 17～14 : 53 の期間)

「護岸橋台部」に水制を設置した後は、より大きな振動強度をとらえている。水制設置と同時に水量を増加させた現象をとらえていると考えられる。

特に、流量増加後、5分間程度は非常に大きな振動(14:53～14:58の5分間平均で3.8141db)をとらえている。それ以降は少し低い振動強度となっている。これは、水量増加により一時的に振動も増加したが、水流等で砂が押し流され、川の流れが安定したことにより振動レベルが下がったものと考えられる。

しかしながら、14 : 58 以降の振動強度平均は 3.5348db を計測しており、「護岸橋台部」に水制を設置する前の「橋台部」に水制を設置した期間の平均振動強度 3.4829db よりは大きいことから、水量の違いが振動強度としてとらえているものと考えられる。

6.2.2 侵食による振動

本実験では、侵食による振動増加をより明確に計測するために、「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」にそれぞれ振動補助金物を設置し、護岸侵食により補助金物が露出し水流との抵抗による振動をとらえることとした。

図 6-1 の全体波形を見ると、13:33 の通水開始から 13:47 の一般部への水制設置まで、幾つかの強い振動（おおむね 7db 以上）をとらえている。これらの振動は、通水により堤防が水浸することで、堤体内に配管した管路が水圧等で動き、中に敷設されているケーブルに振動が発生したことなどが考えられる。

一般部の水制設置後に、13:49:03 と 13:57:51 に 20db 程度の大きな振動をとらえている。この振動検知が侵食の始まりを検知したと考えられる。

14:05 ごろに、一般部に設置した埋設表示シート付振動補助金物が目視で確認できた。図 6-4 に示す振動強度としては、14:02 ごろから振動波に乱れが生じ始めている。徐々に乱れが目立つようになり、14:04:30 に 7.87db をとらえている。シートが露出し始めた時点で振動が発生し始め、徐々に露出が進み、先端のシート全体が露出した段階で大きな振動をとらえたと考えられる。この時点で、補助金物に取り付けた先端のシート位置まで侵食が進んだと考えられる。

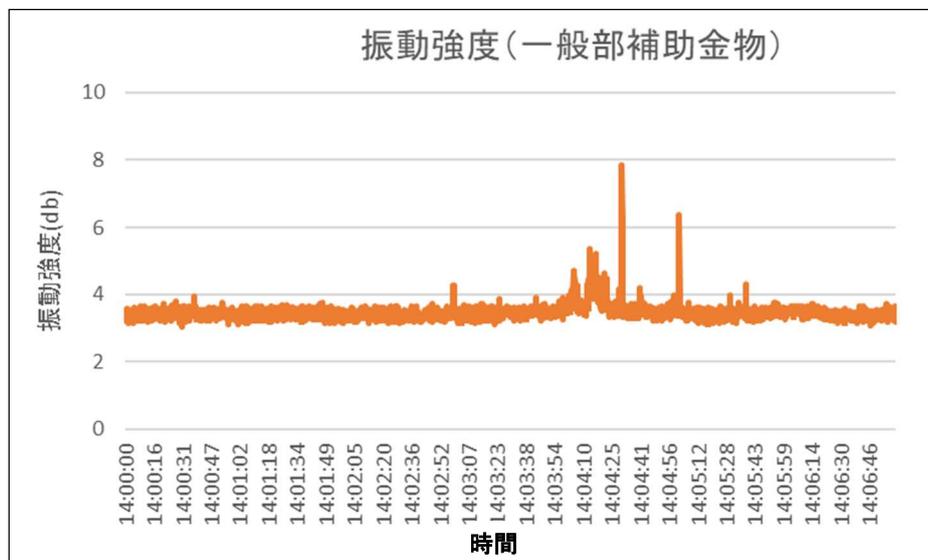


図 6-4 振動レベル変化 (14:00~14:07)

その後、橋台部に水制を設置した後の 14:30 ごろまでいくつかの振動強度をとらえている。橋台部から一般部へかけての堤体の崩落がかなり進んできており、その侵食に合わせて振動が計測されたと考えられる。

14:30 以降は、特に強い振動強度の検知はなく比較的落ち着いた振動強度が計測されている。これは、侵食の進行により、かなり崩落が進んだことと、堤体の侵食に伴い河道が拡張し流速が低下したためと考えられる。

14:53 に護岸橋台部に水制を設置したとともに、水量を増加させたことにより、図 6-5 に示すような大きな振動強度をとらえている。15:00 程度まで約 7 分間程度、連続的に大きな振動をとらえている。

15:00 ごろに大きな振動はほぼ収まり、その後はいくつかの振動が計測されている。

これらの振動は、流量増加に伴い流速が増加したことから、光ファイバケーブルや補助金物に伝わる振動を増加させたことが要因と考えられる。

また、その後の時間の経過とともに、流速が低下したことに加え、振動補助金物付近が堆砂したことにより、振動強度も低下したものと考えられる。振動補助金物周辺の砂の堆積については、流水停止後の現地状況で確認できる。(写真 6-1)

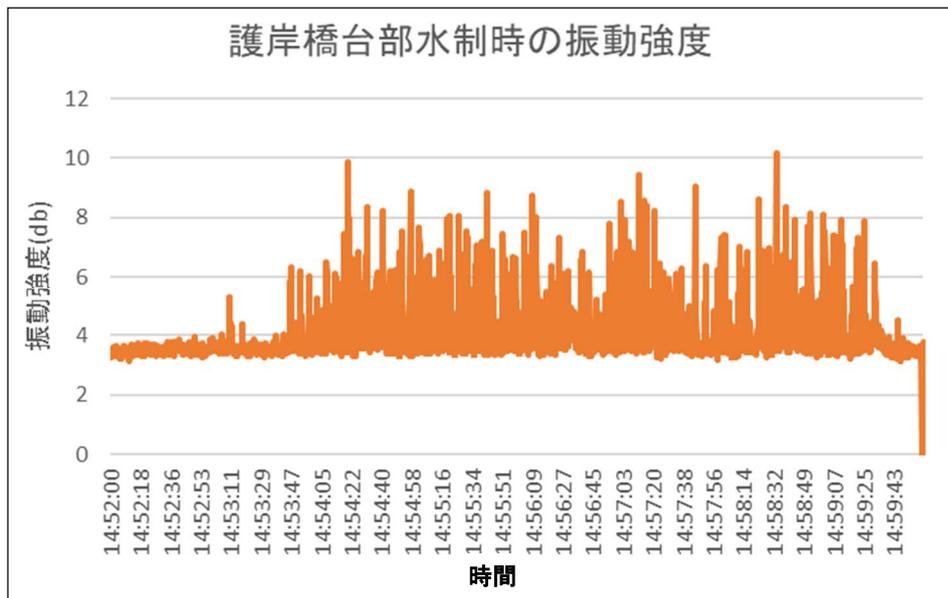


図 6-5 護岸橋台部水制設置時の振動強度

6.2.3 振動発生位置

なお、振動位置の計測結果については、①距離分解能が測定長に対して±2.5%であり、今回の計測システムでは全長 345m に対して±8.6m程度である。模擬堤防は全長で約 30m であり、「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」と 3 つの測定区間に分割すると、それぞれの区間長さは 9~10m 程度であり、距離分解能とほぼ同等であることから、距離精度が担保できなかった。②加えて、本システムでは、近接する地点で同時に複数の振動を検知すると、検知距離は平均的な地点をとる特徴があり、今回のように短い区間で多数の振動を同時検知するような構成では、計測距離が平均化されてしまい、距離精度が担保できなかった。

以上の理由により、本実験のスケールでは、明確な振動の発生位置はとらえていないが、実河川のスケールでは、位置検知は技術的に十分可能と考えている。



写真 6-1 実験後の振動補助金物（「一般部」「橋台部」「護岸橋台部」）

6.3 考察

- ・堤防崩落等による振動が想定よりも弱かった。このため、流水から発生した多くの振動に紛れてしまい、崩落による振動は明確にとらえることができなかった。流水振動はノイズ成分としてフィルタリングし、崩落等の振動成分を抽出する必要がある。なお、流水による振動は、流量の変化を明確にとらえている。
- ・分解能が±8.6m（計測長の±2.5%）程度であるため、実験では中間クロージャを入れ計測全長を長距離化した。計測区間そのものが10m程度と短かったため、計測誤差が増大した。また、中間クロージャ部は地上に露出させたため、水流以外のノイズ成分も含んでいる。
- ・模擬堤防を構築した際に砂を締めておらず実際の堤防と大きく異なる柔らかい状態であったため、振動が伝わりづらい状態であった。加えて、実堤防への適用と同様に考え光ファイバケーブルを配管に収容して堤体に埋設したため、振動がさらに弱まることとなり、検知した振動強度が全体的に弱かったと考える。
- ・実際の堤防と模擬堤防では土の締まり度合いが異なることから振動が伝搬しづらいと考え、振動補助金物を設置して振動の増大化を考えた。変状の振動を一部でとらえることができたが、振動補助金物の一部しか水流に露出せず、大部分が砂に埋まったままであったため、想定した機能の効果は一部にとどまった。
- ・実験では、計測システム長345m、堤防長29mという短い区間での計測であったため、水流による全体的な振動と、部分的に侵食をとらえた振動とが重なり合い、振動発生距離に誤差が生じ、振動発生位置の特定が困難となった。ただし、計測システムの特長上、長い距離（最大10Km）のほうが誤差の発生が少ないことから、実河川のスケールでは、位置検知は技術的に十分可能と考えている。



写真 6-2 実験終了後の河床

7.現場実装へ向けた考察

- ・本計測方式は、広範囲を計測するほど単位長さ当たりのコストを低減できることから、最低検知区間長等の適用条件の設定が必要である。
- ・水流による振動成分をフィルタリングし堤防侵食による振動成分を抽出するためのパラメータの特定が必要。
- ・実堤防における伝搬特性を加味した光ファイバケーブルの埋設位置・方法および振動補助金物等の有無の検討が必要。

これには継続的な実験による検証が必要である。

【付帯実験】光ファイバ浸水センサによる侵食検知

光ファイバケーブルによる振動検知実験に加えて、光ファイバケーブルの保守等で使用する浸水検知装置の応用で、堤防侵食の前段階となる堤体内部への水の浸透状態の検知について、合わせて計測したので報告する。この計測方法では、既存の河川管理用の光ファイバケーブルの監視システムを活用して計測が可能であり、適用性が高いと考える。

1. システムの概要

光ファイバによる振動検知システムの補助として、堤防の侵食の初期段階である浸潤による土中水分飽和状態をファイバ損失にて検知するシステムである。堤体内に設置した浸水検知センサにて堤体内への浸透水を検知するもので、浸水により浸水センサ内の光ファイバに発生する曲げ損失を検知し、浸水の状況を把握するシステムである。

また、侵食が進行し破堤に繋がる大きな侵食があった場合や破堤時には、浸水センサを構成する光ファイバが断線することで、危険な状況を検知することも可能である。

2. システムの原理

測定装置は光パルス測定器を使用し、OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)法を用いて光パルスを検知(監視)用光ファイバに送出することで、レーリー散乱による後方散乱光及びフレネル反射による反射光を抽出するものである。

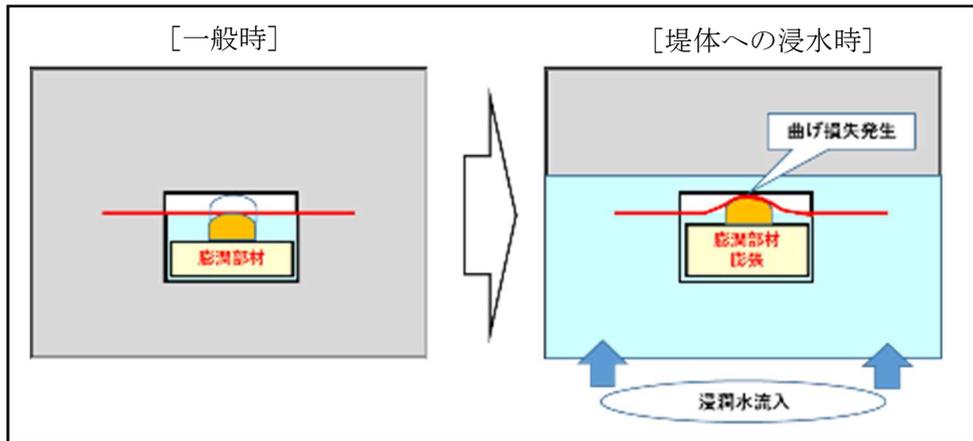
今回使用した光パルス測定器は、河川管理用光ファイバケーブルの線路監視に用いられている装置と基本的には同等の精度を発揮する。

(国土交通省 光ファイバ線路監視装置標準仕様書 H29.10 版参照)

光パルス測定器の測定精度は、損失測定確度で表し、 $\pm 0.05\text{db}$ である。

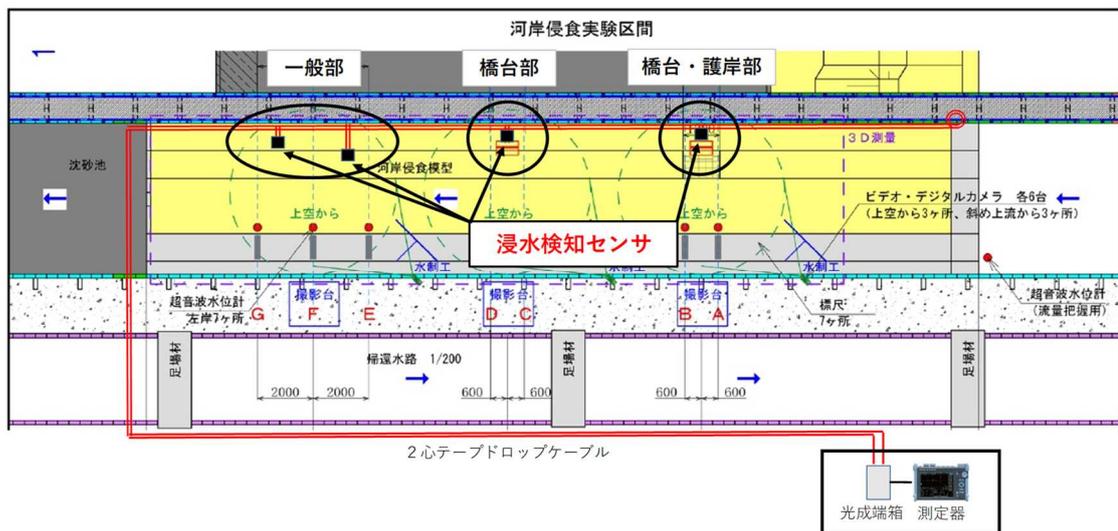
ファイバ損失及びファイバ断線箇所の測定距離確度は、 $\pm 0.75\text{m} + \text{測定距離} \times 2 \times 10^{-5} + \text{サンプリング分解能}$ であるが、今回の測定条件において測定距離確度は $\pm 1.0\text{m}$ 以下である。

堤体内へ埋設設置した浸水検知センサの原理を図付 2-1 に示す。センサ内に飽和状態となった土中からの湿潤水が流入することで、センサ内の膨潤部材が膨張し、膨潤部材に近接して配置している光ファイバに一定量の曲げ損失が発生する。



図付 2-1 浸水検知センサの原理

機器の配置を図付 2-2 に示す。



図付 2-2 浸水センサ配置図(平面)

3.技術の特徴

浸水検知センサを用いて侵食検知システムを構築する場合、現行の河川管理用光ファイバケーブルの線路監視装置を活用できるため、新規に測定装置を準備する必要はない。

浸水検知センサのしくみは、堤体内が浸潤水により飽和状態になった際に、浸潤水が浸水検知センサ内へ侵入し、膨潤部材が膨張し、膨張部材に沿うように配置している光ファイバ心線に曲げが生じ、送信している光信号に放射損失が発生する。

この放射損失を測定器で検知することで、堤体の侵食の初期段階と認識し、注意レベルのアラートを発信することを目的とする。

監視する堤防までは、既存の河川管理用光ファイバケーブルを伝送路とし、対象となる堤防区間へ浸水検知センサを一定間隔で埋設設置する。

各浸水検知センサとの連結は低コストである光ファイバドロップケーブル(2心)を使用する。

[導入コスト(概算額)] 1,169,000 円/100m 当たり換算 (浸水センサは5 m毎に設置)

- ・浸水検知センサ：20 個×9,500 円(希望小売価格)=190,000 円
- ・連結埋設光ケーブル(2心ドロップケーブル):180m(センサ内収納長含む)×50 円/m=9,000 円
- ・埋設設置費(単独の場合)： 労務費=660,000 円、材料費(埋戻材等)=50,000 円
- ・諸経費：260,000 円

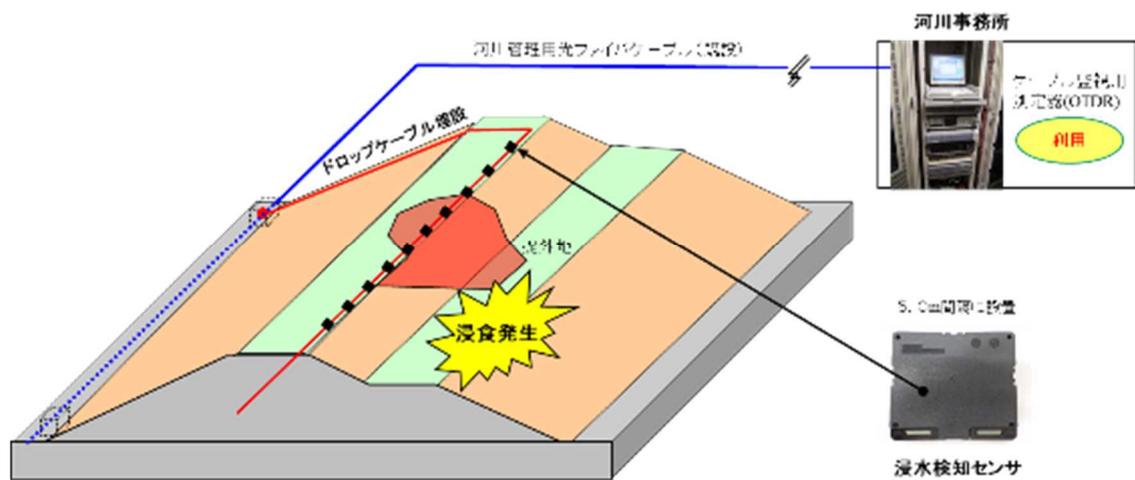
監視用測定装置は、昼夜問わず連続監視となっているため、特に問題はない。

4.現場実装で想定する配置方法

現場での配置方法について、図付 4-1 に示す。

監視装置および事務所から堤防までの配線は、河川事務所に設置されているケーブル監視用測定装置の空きポートおよび河川管理用光ファイバケーブルの空き回線を利用し、堤防の変状監視区間に浸水検知センサ用のドロップケーブルを埋設する。

浸水検知センサについては 5.0m 間隔にて埋設設置する。



図付 4-1 浸水検知システムの現場実装図

5.実験の計画

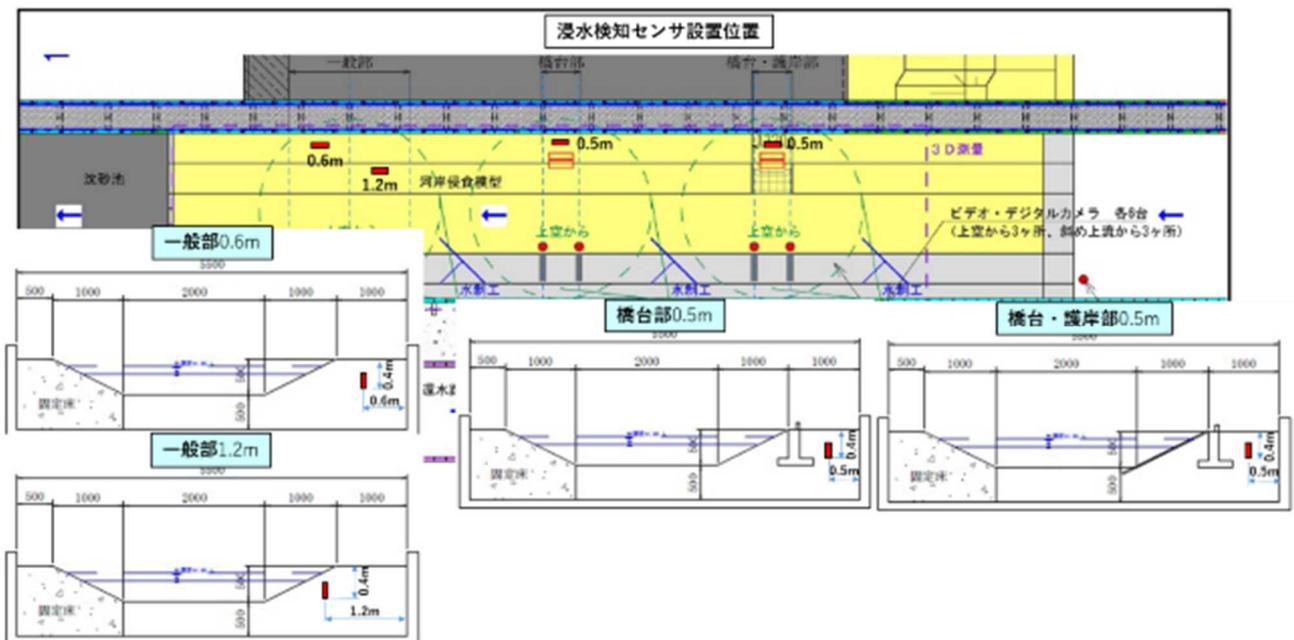
今回の技術公募では、光ファイバによる振動検知システムを用いて、堤防天端幅が1m程度欠損することを即時に検出可能なシステムの構築を目的とした。

しかしながら、侵食の初期段階の振動を捉えることが容易ではないことを想定し、補助的役割として、侵食の初期段階を堤体内への浸透水の増加現象と考え、浸透水を浸水検知センサで捉えられないかというのが、本付帯実験の試みである。

浸水検知センサの基本的役割としては、振動検知補助棒付近の侵食状況に関連し、どのような時間軸で堤防天端幅が欠損していくのか捉えようとした。

浸水検知センサの埋設設置位置は図付 5-1 のとおりである。

一般部に2つ、橋台部、護岸橋台部にそれぞれ1つ配置した。



図付 5-1 浸水検知センサの埋設設置位置

6.実験での検証結果

堤体に埋設設置した浸水検知センサの測定結果を表付 6-1 に示す。

表付 6-1 浸水検知センサの測定結果

設置位置		一般部0.6m	一般部1.2m	橋台部0.5m	橋台・護岸部0.5m	終端	備考
距離		907.9m	910.9m	920.9m	930.9m	1022.3m	距離レンジ:2 km
							測定波長:1550nm
損失初期値	13:33	0dB	0.184dB	0dB	0dB		群屈折率:1.467
							パルス幅:10ns~30ns
時間/損失	14:22	0dB	0.373dB	0dB	0dB		
	14:29	0dB	0.486dB	0dB	0dB		
	14:36	0dB	0.693dB	0dB	0dB		●浸水検知(一般部1.2m)
	14:39	0.225dB	0.737dB	0dB	0dB		
	14:41	0.295dB	0.812dB	0dB	0dB		
	14:42	0.509dB	0.882dB	0dB	0dB		●浸水検知(一般部0.6m)
	14:43	0.788dB	1.103dB	0dB	0dB		
	14:45	0.983dB	1.255dB	0dB	0dB		
	14:46	1.224dB	1.382dB	0dB	0dB		
	14:49	2.282dB	1.723dB	0dB	0dB		
	14:50	2.846dB	1.963dB	0dB	0dB		
	14:57	5.333dB	2.767dB	0dB	0dB		
	15:05	5.421dB	5.543dB	3.138dB	2.654dB		●浸水検知(橋台部)
	15:07	不明	不明	3.772dB	5.738dB		

一般部 1.2m に設置した浸水検知センサの損失初期値が 0.184db であり、河川管理用線路監視測定装置の最小読取り値が 0.5db であることから、0.5db を超える値に達した時点で浸水検知と判断した。

$$5\text{db} < 0.693\text{db} - 0.184\text{db} = 0.509\text{db}$$

詳細な測定結果は図付 6-1 に示す測定装置画面の損失波形のとおりである。



図付 6-1 測定装置画面の損失波形

実験において、振動センサが侵食の初期段階を検知したと思われる時間が 13:57 であった。

浸水検知センサが侵食の初期段階であるとされる浸水を検知した明確な時間は 14:36 である。
(計測初期値から 0.5db 以上の変化が生じた時点)

この時間のずれは、センサの膨潤部材が水を吸収して膨張し光ファイバ心線に損失が現れるまでにタイムラグがあるためである。

このタイムラグ(遅延)は、30 分～40 分であることは事前に判明している。浸水検知センサにより侵食の初期段階を判定するには、遅延の発生を考慮する必要がある

実際に適用した場合、侵食の始まりの第一報(アラート)が 30 分～40 分の遅れで発信されることとなるため、この遅延が問題となることが懸念される場合には、膨潤部材の膨張反応の早い材質のものに変更する必要があると考える。

結論として時間のずれはあるものの、侵食の初期段階は捉えていると言える。

また、侵食の進行に伴い一般部 0.6m の位置の浸水検知センサは、侵食始まりから 6 分後の 14:42 に浸水を検知していることから、確実に侵食の進行速度を捉えていると言える。

このように一般部 1.2m と一般部 0.6m のそれぞれ違った位置へセンサを設置することで、浸透水の浸潤速度の推測ができる可能性がある。

このため、現場適用に向けて課題はあると思われるが、侵食の初期段階を捉えるには有効な検知システムであると考えられる。

写真付 6-1 は、一般部 1.2m の浸水検知センサの実験完了後の状況である。



写真付 6-1 浸水検知センサの実験完了後の状況

7.現場実装へ向けた考察

侵食が顕著に現れた場合、土砂流失と同時にセンサも流され、結果、センサ内の光ファイバが断線することで破堤したと判断することは可能と思われるが、実験においては侵食の初期段階の土中水分飽和状態を検知した。

これは実験堤体が3号砂であり透水係数が 2.67×10^{-3} 程度と思われ、顕著に飽和状態であったと推測し、浸潤水が容易に浸水検知センサ内へ流入したことよると考える。

低浸透性の堤体へ現場実装した場合、低透水性土砂の現場が多く飽和状態になりにくいことも考えられ、降雨、洪水ともに堤体内に顕著な浸潤が起きないことが考えられる。

侵食が起きた時点を捉える浸潤がどのように関係するのか、そのメカニズムおよび程度が明確でないため、必ずしも浸水検知センサが思ったほど反応せず検知できないことが考えられる。

降雨による浸透水に浸水検知センサが反応しないための対策として、浸水検知センサの下側に砂を敷く等の対応により解決策になると思われる。

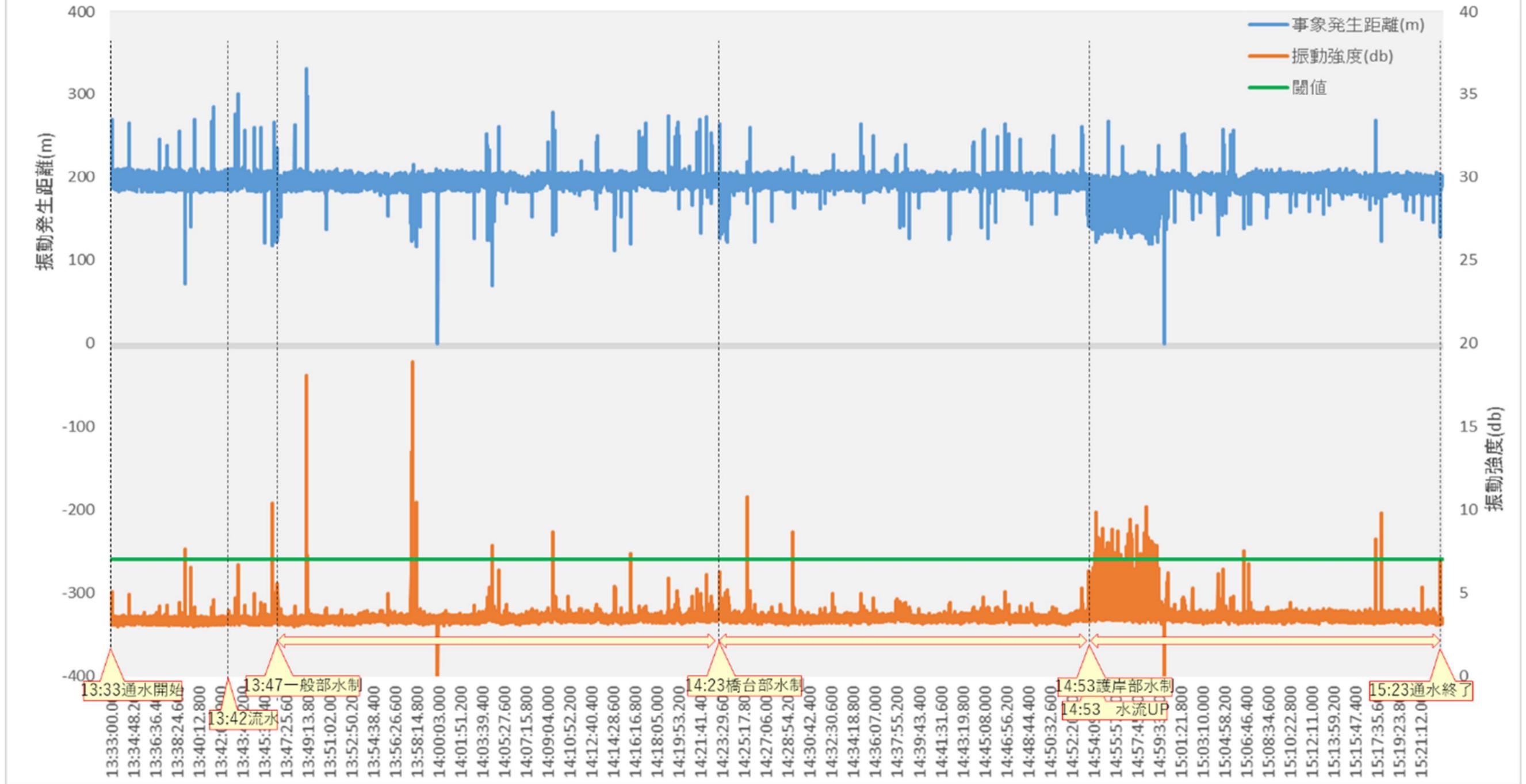
なお、これには継続的実験が必要である。

以上

◇本件に関する問い合わせ先

エヌ・ティ・ティ・インフラネット株式会社
東京都中央区東日本橋一丁目8番1号
ソリューション事業推進本部 堤 志信
e-mail : shinobu.tsutsumi.th@nttinf.co.jp
Tel:03-6381-6220 / 090-5577-5617

国総研 堤防変状計測 (NTTインフラネット)



別添図 計測結果 (図 6-1 と同じもの)