

河川堤防の変状検知システム実験結果 (無線機内蔵カプセルセンサによる検知)

令和3年3月

株式会社トランスコア
株式会社ファーストライト
合同会社 EWC

目 次

(1) システム概要	4
1) カプセルセンサ	4
2) 適用場所例	5
3) 特許	5
(2) システムの原理	6
1) センサの動作	6
2) 伝送	6
3) システム構成	7
(3) 技術の特徴	8
1) 無線装置	8
2) 計測精度	8
3) 計測機能	8
4) センサ・機器の配置	9
5) 通信方式	10
6) 信頼性	10
7) 電源	10
8) 記録および表示	11
9) データ伝送処理	11
10) 寿命	11
11) 環境負荷	12
12) 維持管理性	12
(4) 現場実装で想定する配置方法	13
1) 設置個所	13
2) センサの埋設	13
3) センサの埋設間隔	13
4) 受信装置の設置	14
5) データ伝送	15
6) 維持管理	15
7) コスト	15
(5) 実験の計画	16
1) 実験目的	16
2) 実験場所	16
3) 実験スケジュール	16
4) 実験機器配置	17

5) センサ配置	19
(6) 実験結果	30
1) 越水試験の結果	30
2) 河岸侵食試験の結果	50
(7) まとめ	82
1) 公募要件	82
2) センサ機能の確認	82
(8) 現場実装へ向けた考察	83
1) カプセル構造	83
2) 埋設深さと間隔	83
3) 施工記録	83
4) 施工工具	83
5) 埋設表示	83
6) 通信方式	84
7) センサの回収	84
8) コスト縮減	84

(1) システム概要

1) カプセルセンサ

カプセルセンサは、図 1 に示す外形 62mm φ、無線機内蔵の小型カプセルセンサです。このカプセルセンサを堤体や高水敷、河床等に埋設し、出水での土砂移動でカプセルが流出することで自動的に発出する無線信号を、警報情報として周知するシステムです。災害発生の予兆をいち早く捉えます。

特徴は以下のとおりです。

- ① 24 時間連続して監視します。夜間・降雨の影響がありません。
- ② 埋設中は電池をしません。電池切れの心配はありません。
- ③ 同一監視エリア内で越水、河岸侵食、高水敷洗堀、河床洗堀、更には河口堆砂など河川、砂防、海岸エリアで多目的監視が行えます。
- ④ 同一監視エリア内で使用できるセンサ数にはほぼ制約はありません。
- ⑤ 施工が簡単です。直径 6 cm のセンサを埋めるだけです。
- ⑥ 埋設なので天端舗装や改築に支障を与えません。
- ⑦ 埋設なので河川利用者、河川維持管理作業に支障を与えません。
- ⑧ 監視エリアの拡張は簡単です。センサの追加埋設だけです。

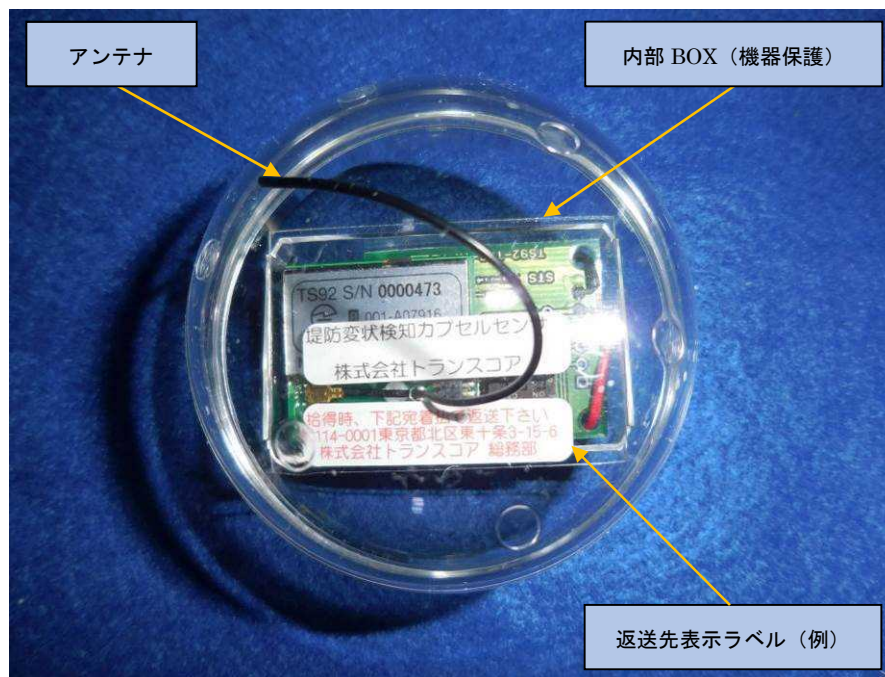


図 1 カプセルセンサ外観 (62 mm φ)

2) 適用場所例

カプセルセンサは、図 2 の設置イメージの河川エリアの他、土砂移動監視が必要な場所に適用できます。

- ・ 河川：越水、河岸侵食、高水敷洗堀、河床洗堀
- ・ 構造物：橋台周囲洗堀、樋門・樋管周囲の空隙発生
- ・ ダム：ダム湖堤防侵食
- ・ 砂防：崩落
- ・ 海岸：河口砂州、砂流出

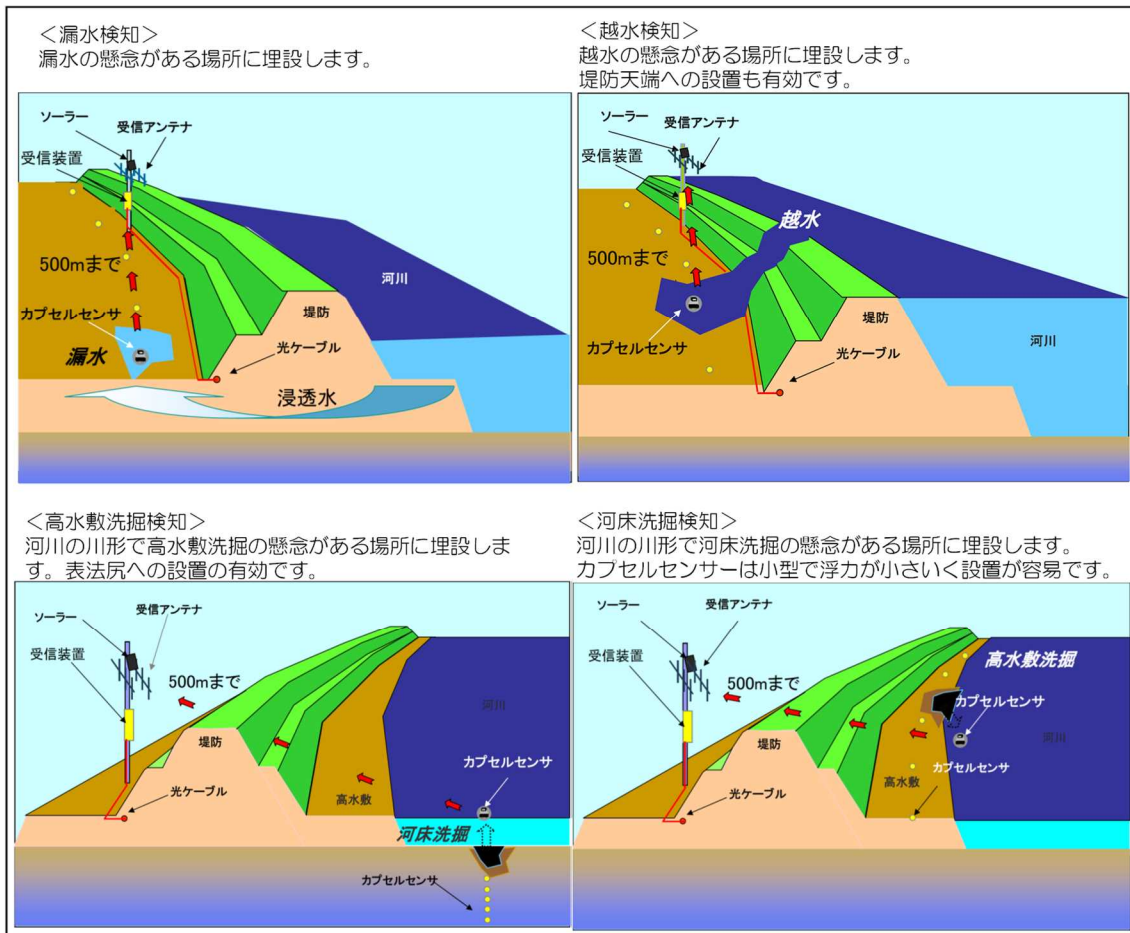


図 2 河川での設置イメージ

3) 特許

特許第 5654542 号 (2011 年 11 月 28 日登録)

(2)システムの原理

1) センサの動作

カプセルセンサの動作を、下記および図 3 に示す。その

- ① 重い電池部を上にして埋設する。
- ② 埋設後、周囲の土砂が移動すると、電池部を下に自然に回転する。
- ③ 回転すると無線機の電源が自動で入り無線送出を開始する。
- ④ 水面上に浮上し、信号を継続して発信する。

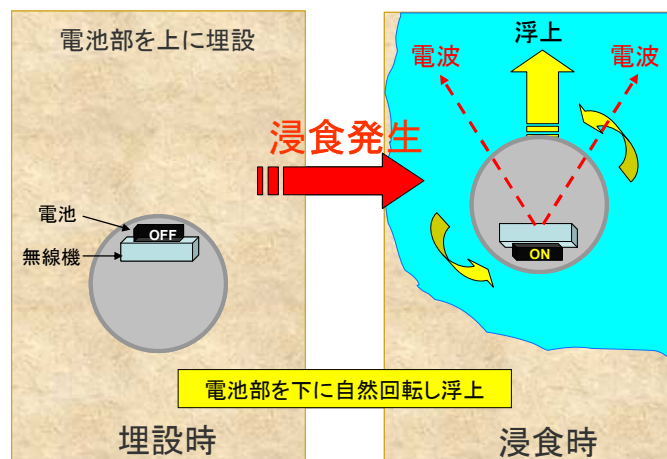


図 3 センサの動作

2) 伝送

高利得 3 素子八木アンテナを使用した時、カプセルセンサと受信装置間の距離は見通しで 500m 以下を基本とします。

高利得八木アンテナを使用することで、十分なシステムマージンを確保しています。

図 4 のように、スタックアンテナ構成などで、更に受信エリアの拡張ができます。

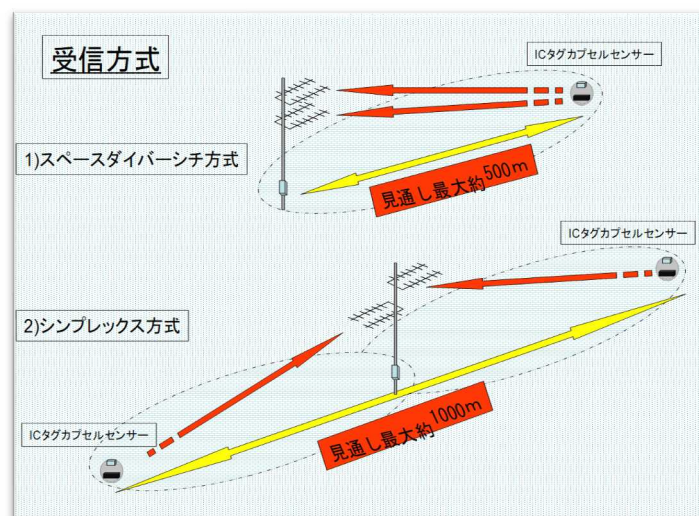


図 4 伝送距離 (スタックアンテナ構成の例)

3) システム構成

図 5 に受信装置がソーラー電源方式の時のシステム構成例を示します。
システムを構成するエリアは、下記 3 エリアである。

- ① センシングエリア
- ② 受信装置
- ③ 処理表示装置

(注) ・受信装置内の送信用無線機は、受信機機能の自己診断用である。
・受信装置には、機側でデータ確認ができる機種もある。

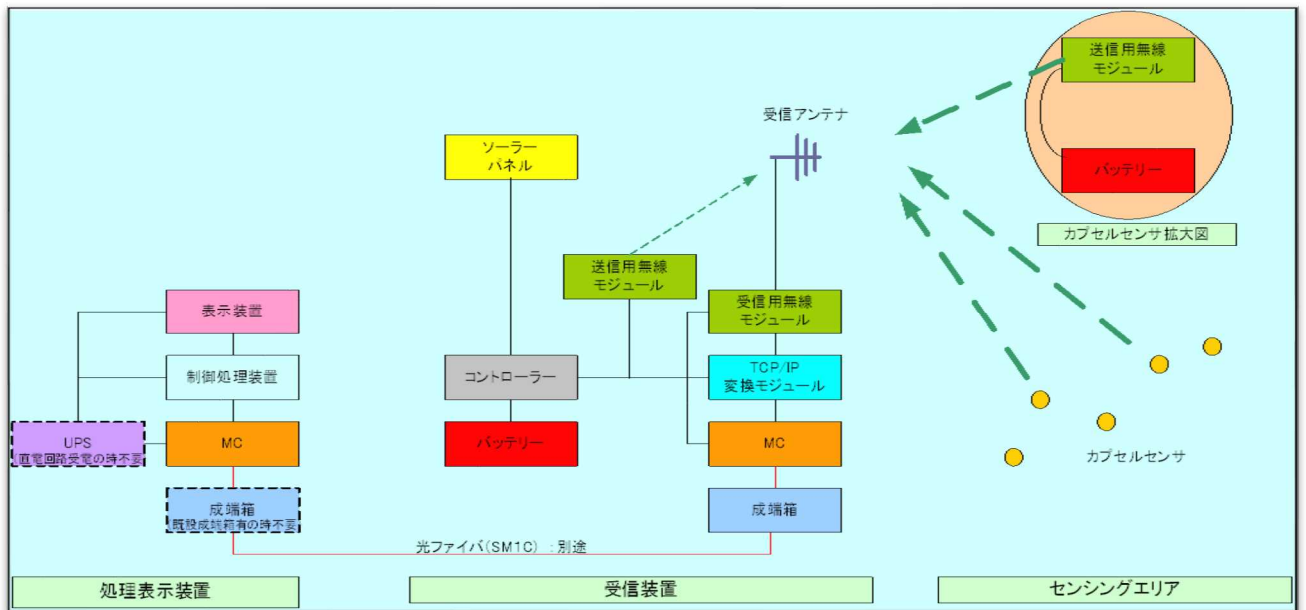


図 5 システム構成図 (ソーラー電源の例)

(3)技術の特徴

1) 無線装置

無線機は、周波数 920MHz 帯の特定小電力*の機種である。

*特定小電力無線局（とくていしょうでんりょくむせんきょく）は、免許を要しない無線局、その内のいわゆる小電力無線局の一種である。

2) 計測精度

計測値は、無線機 ID 信号の受信の有無になる。

また、無線機は実用実績が多い機種で、組み込んでいる傾斜計は単純な動作機構の機種を採用しており故障の発生は極めて低いものである。従って、無線送信は確実に行われるため、無線信号の有無で判断する計測精度（受信の確実性）は高い設計である。

3) 計測機能

受信機能の概要を図 6 に示す。

① 計測時間（即時性）

- ・センサが水面上浮上など回転動作すれば 2 秒間隔で無線送信を開始する。
- ・無線信号が受信されれば、即時にデータ処理され、管理者に伝達される。

② 受信範囲

- ・センサと受信装置間の距離は、3 素子八木アンテナ受信時見通し 500m 以下である。
500m 以上の川幅の時、左右岸に受信装置を設置する。
- ・3 素子八木アンテナを使用時には、十分なシステムマージンがある。
- ・アンテナの仕様と構成の変更で、更に広い受信エリアの構築ができる。
- ・アンテナの偏波面は、図 7 に示す水平偏波を用いる。



図 6 受信機能

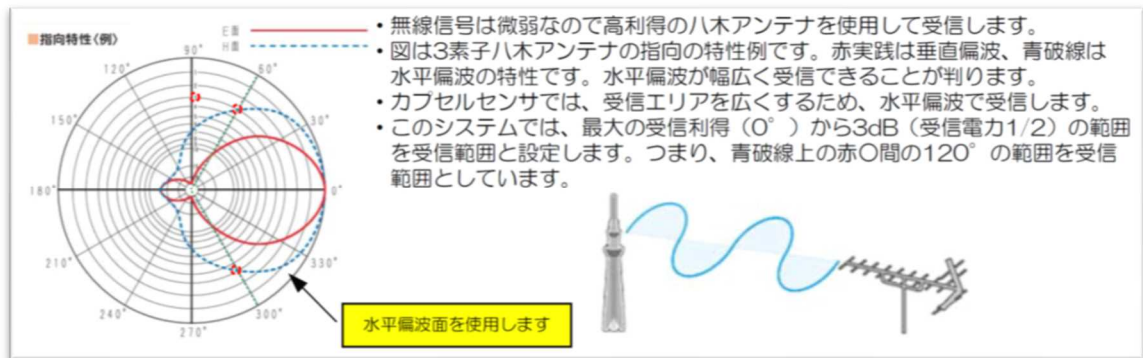


図 7 指向性 3 素子八木アンテナ指向特性（水平偏波で受信）

③計測の連続性

A 時間・距離の連続性

- ・無線信号は連続して送出される。
- ・指向性アンテナのため、指向方向の後ろ側では受信エリアは狭くなる。
- ・下流側に別の受信装置があれば、その受信装置でも受信が可能となる。

B 設置可能センサ数

- ・無線機には、全て異なる ID が付与されます。多数のセンサの配置が可能である。
- ・ID は 7 桁です。エリア内に多数のセンサの設置が可能である。

④ 時間、気象での継続性

- ・無線信号で計測します。夜間や降雨などの影響を受けません。

4) センサ・機器の配置

①カプセルセンサ

- ・設置場所：河川：越水、河岸侵食、高水敷洗堀、河床洗堀、河口堆砂
海岸：護岸侵食、海岸砂浜・砂州流出
砂防：急傾斜地崩落など
- ・埋設深さ：センサを 4~6 cm 程度の土被りで埋設する。
- ・埋設杭：センサ埋設表示杭（埋設方向、埋設ピッチ、埋設深さ）を設置し、掘削事故を防止する。舗装部用の埋設ピンを使用する。

②受信装置

- ・受信装置は軽量であり、自営柱、CCTV 柱、橋梁下部などに設置が可能である。
- ・受信アンテナは、指向性 3 素子八木アンテナを標準としている。
- ・受信装置の設置位置、アンテナの向きなどは、現地環境と受信エリア設定などで決定が必要である。

③処理表示装置

- ・事務所や出張所などに設置する。PC やサーバを使用、内部にセンサ埋設データ（Kp、位置、埋設深さ、無線機 ID、施工年月日など）のデータベースを作成する。
- ・検知情報はモニタ表示、Web 配信、メール配信などで周知が可能である。
- ・処理表示装置設備費用の削減のため、データセンターでデータを一元管理し、Web 配信、メール配信などを行う方法も選択できる。

5) 通信方式

通信方式は下記となる。

- ①光ファイバ
- ②無線 LAN

6) 信頼性

① 無線機能の信頼性

- ・無線機は、専用に周波数を使用しているため、他のシステムとの干渉はない。
- ・送信時間は約 70ms と短時間としている。また、無線は 2 秒間隔で送信であり、この時間内に複数の信号が送出される可能性があるが、衝突回避のため、無線機は送出開始時、他の無線機が送信中であれば送信を保留し、時間を置いて再送信する機能がある。
- ・この衝突回避機能によって、確実な信号の送出を行う。

② 材料・構造

- A カプセルの材料はポリカーボネートである。ポリカーボネートは車のヘッドライトカバーに使用されているように、温度、湿度、紫外線等に対して十分に安定している。
- B カプセルは球体の中に、立方体の収容部を設け構造体に収容している。無線機は 2 重に保護されている。

7) 電源

①使用電源

電源供給方式は下記となる。

- ・カプセルセンサ：電池
- ・受信装置：ソーラー、商用電源
- ・処理表示装置：商用電源

③ 電池寿命

- ・センサが動き傾斜計が動作することで無線機に電源が入る機構である。従って、センサ埋設時は電池を消耗しない。
- (参考) 電池はメーカー保証 5 以上

8) 記録および表示

①記録

設置時個々のセンサについて、検知対象、目的、位置（kp、右岸左岸等）、埋設深さ、設置高さ、無線機 ID などであり、データベースに入力する。

②表示

受信した無線機 ID をデータベースと照合し、土砂移動発生個所を確認する。

確認した結果は、メール配信、Web 配信などでリアルタイムに管理者に配信する。

9) データ伝送処理

データ伝送のフローを図 8 に示す。

伝送には必要により中継装置を使用する。

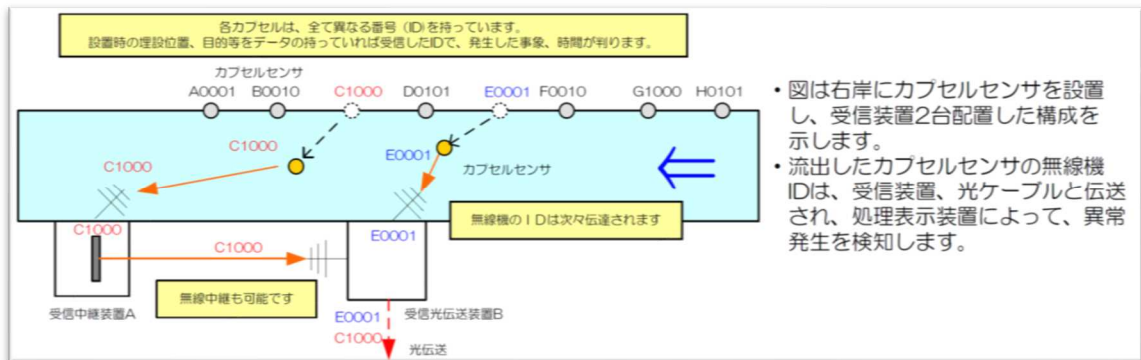


図 8 データフロー

10) 寿命

① カプセルセンサ：浮上して初めて無線機に電源が入る。

埋設中は電池を消耗しない。

動作開始後、約 24 時間無線送信を続ける（標準電池使用時）

電池の製品寿命が 5 年程度以上*のものを実装している。

(*電池メーカーデータ)

② 受信装置：通常の電子機器と同等で概ね 5 年です。

③ 処理表示装置：通常の電子機器と同等で概ね 5 年です。

④ 製品保証：カプセルセンサシステムの製品保証は 1 年である。

11) 環境負荷

- ・センサ内に目的と取得時の返送先を明示し、流出センサの回収を行う必要がある。

12) 維持管理性

①システム

- ・埋設時の記録のデータベースと照合し、変状検知情報を瞬時に判定する。
- ・流出センサの位置に、新しいセンサの追加で現状復帰を行う。

②堤防などの施設

- ・埋設ですので、河川利用者、除草等の維持管理の支障にはならない。
- ・天端の舗装作業に支障を与えない。

(4)現場実装で想定する配置方法

1) 設置箇所

カプセルセンサは以下の箇所に適用が可能である。河川での適用イメージを図 9 に示す。

- ・河川 : 越水、河岸侵食、高水敷洗堀、河床洗堀
- ・構造物 : 護岸、橋台、樋門・樋管等の構造物
- ・ダム : ダム湖堤防侵食
- ・砂防 : 崩落
- ・海岸 : 河口砂州、砂流出
- ・ため池 : 護岸
- ・道路 : 法面
- ・鉄道 : 法面

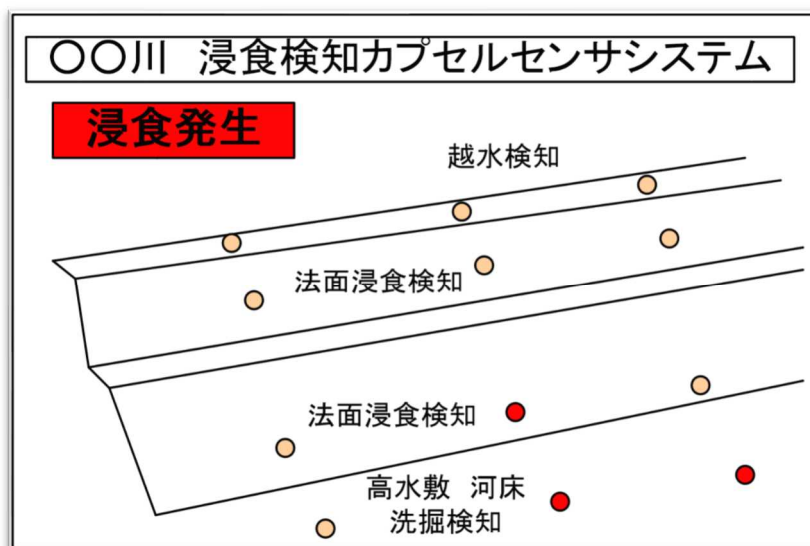


図 9 河川のセンサ設置位置例（裏法面・法尻にも適用可能）

2) センサの埋設

- ・直径 10 cm 程度と深さが 10~12 cm 程度の掘削孔を設ける。
- ・センサの土被りは 4~6 cm 程度とする。
- ・センサは電池部を上向きに埋設する。
- ・掘削土で埋め戻す。

3) センサの埋設間隔

- ・重要水防箇所では 1m ピッチとする。
- ・他の箇所は 2m~5m ピッチとする。

4) 受信装置の設置

- 図 10 に、今回の試験用受信装置を示す。
- 受信装置はセンサ設置エリアを 500m 以内で見通せる場所に設置する。
橋梁を利用した設置概要図を図 11 に示した。
- 川幅が 500m を超えるときは、左右岸に受信装置を設置する。
- 受信アンテナ高さは、第三者が容易に触れない、3m 以上に設定する。
道路の場合、アンテナ高さは道路の基準に従うこと。
- 受信装置は直径 20 cm 程度の自営柱か、付近の CCTV 柱やテレメータ柱を使用する。
- 受信装置の電源は商用電源、ソーラー電源から選択ができる。



図 10 試験用受信装置（無線 LAN 伝送、190 mm×120 mm×100 mm、質量 1.5kg）

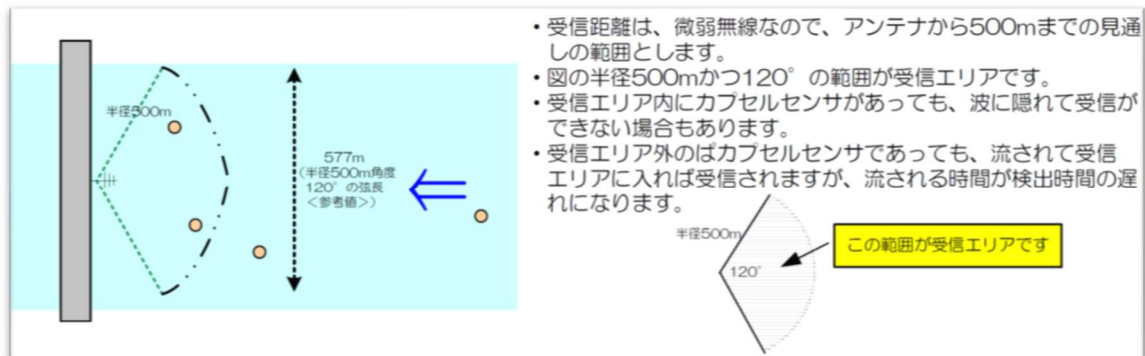


図 11 受信エリア模式図（橋梁に受信装置を配置した例）

5) データ伝送

- ・データ伝送は、管理用光ファイバあるいは無線 LAN とする。

6) 維持管理

- ・埋設なので、河川利用者、除草などの河川維持管理に支障がなくメンテナンスは不要である。
- ・受信装置は自己診断機能を持っており、故障があれば処理表示装置から通報される。
- ・万一、工事等で掘り起こされた場合には、その時点で検知される。
- ・被災箇所の復旧やセンサエリアの拡張は追加埋設で行う。

7) コスト

①設置費用

- ・センサ 500m 設置で、100m 当たりでコスト算出。(単位：百万円/100m)

1m ピッチ埋設 機器・材料費 2.04、 工事費 0.85 、合計 2.89

5m ピッチ埋設 機器・材料費 0.80、 工事費 0.52 、合計 1.32

10m ピッチ埋設 機器・材料費 0.64、 工事費 0.48 、合計 1.12

(費用にはセンサ、受信装置、処理表示装置の材料と工事費を含む。)

②維持管理費用

- ・センサ : 維持管理費は発生しない。センサ内電池の寿命は5年(参考)。

- ・受信装置 :

平常時 : 機器年点検、ただし、受信装置に自己診断機能があり、維持管理の費用は発生しないと想定。

変状発生後 : 流出センサのみ追加設置とサーバーデータの更新を実施。

被災部はセンサ埋設のみ。

センサ増設 : センサ埋設とデータベース更新を実施。

(5)実験の計画

1) 実験目的

今回の試験は、以下のセンサ機能の確認を目的に実施した。

①検知伝送機能

- ・河川変状に伴うセンサの動作確認（センサ回転→無線発信）
- ・河川変状発生と検知時間（リアルタイム検知）の確認
- ・国総研設置の I C タグとの混信の有無の確認
- ・多数のセンサが同じ時間帯で発信する条件での、無線の受信可否の確認
- ・受信装置の受信機能と無線 LAN 伝送機能の確認
- ・処理表示装置の表示機能の確認

②設置環境

- ・センサの埋設位置、深さの検討
- ・センサの施工性の確認
- ・締固めに対するセンサ強度の確認
- ・センサ流出時の河川変状との関連の確認
- ・センサ流出中の送信姿勢保持の確認
- ・橋台部や護岸部の周囲変状時の検知性の確認
- ・センサ防水性の確認

2) 実験場所

国土交通省国土技術政策総合研究所（茨城県つくば市）構内

3) 実験スケジュール

実験は令和3年1月27日に越水試験、同28日に河岸侵食試験の2日の日程で行った。

詳細スケジュールは表1のとおりである。

表 1 実験スケジュール

項目	25	26	27	28	29	30
	月	火	水	木	金	土
越水試験	準備	準備	実験	撤去	予備	予備
河岸侵食試験	予備	予備	準備	実験	撤去	予備

4) 実験機器配置

① 機器配置

図 12 に実験設備と実験機器配置を示した。

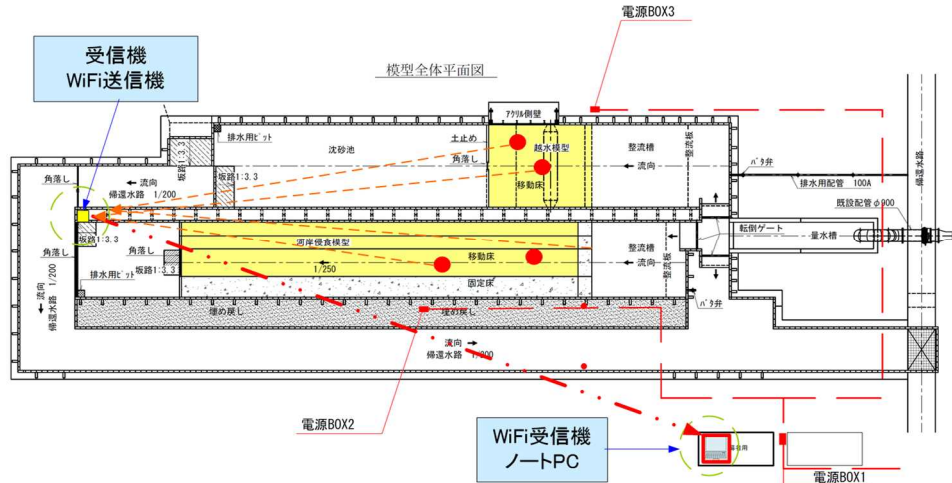


図 12 設備と実験機器配置

② センサ設置数

越水試験では、センサは天端、法面、法尻に 15 台、河岸侵食 31 台、合計 46 台を土被り約 4~6 cm の深さに埋設した。

③ 試験堤防と流水条件

越水試験は粘性土を使用し、標準の締固めを行った幅 5m 高さ 1m の堤防を構築し越水させた。

河岸侵食試験は砂を用いた高さ 0.5m の堤防で、中間に護岸や橋台を設けた約 30m 長さの堤防を構築し、水深 0.3m 流速 1~1.5m/s で流水を行った。

④ 受信機等の配置

試験堤防の下流側に受信装置を設置し、受信データは上流側の処理表示装置に遠隔監視を想定し無線 LAN で伝送した。データは処理表示装置 (PC) 内に時刻を付したデータベースに保存した。

受信装置の設置状況を図 13 に、計測表示状況を図 14 に示した。



図 13 受信装置（上：受信装置、下：電池ボックス）

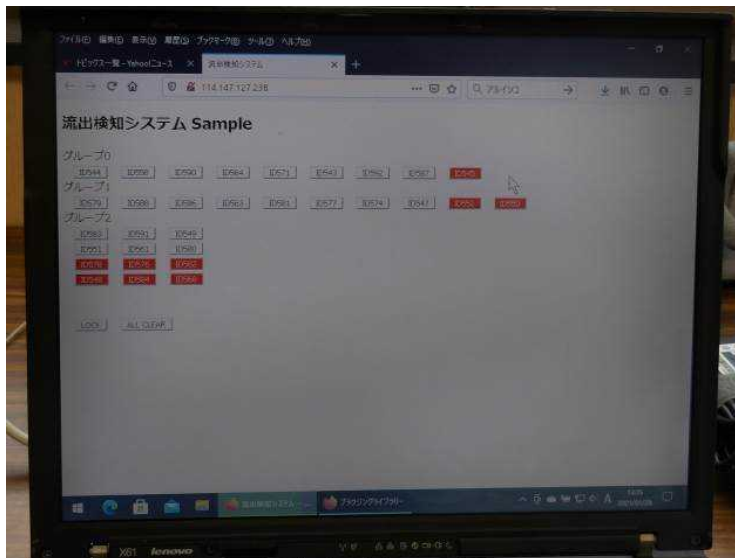


図 14 受信画面表示

5) センサ配置

①越水試験

センサは、越水で影響を最も受け易いと想定した裏法尻の他、裏法面、天端表法肩さらに天端裏法肩の1側線5台で合計3側線の配置とした。

センサ設置位置図を図 15 および図 16 に示した。

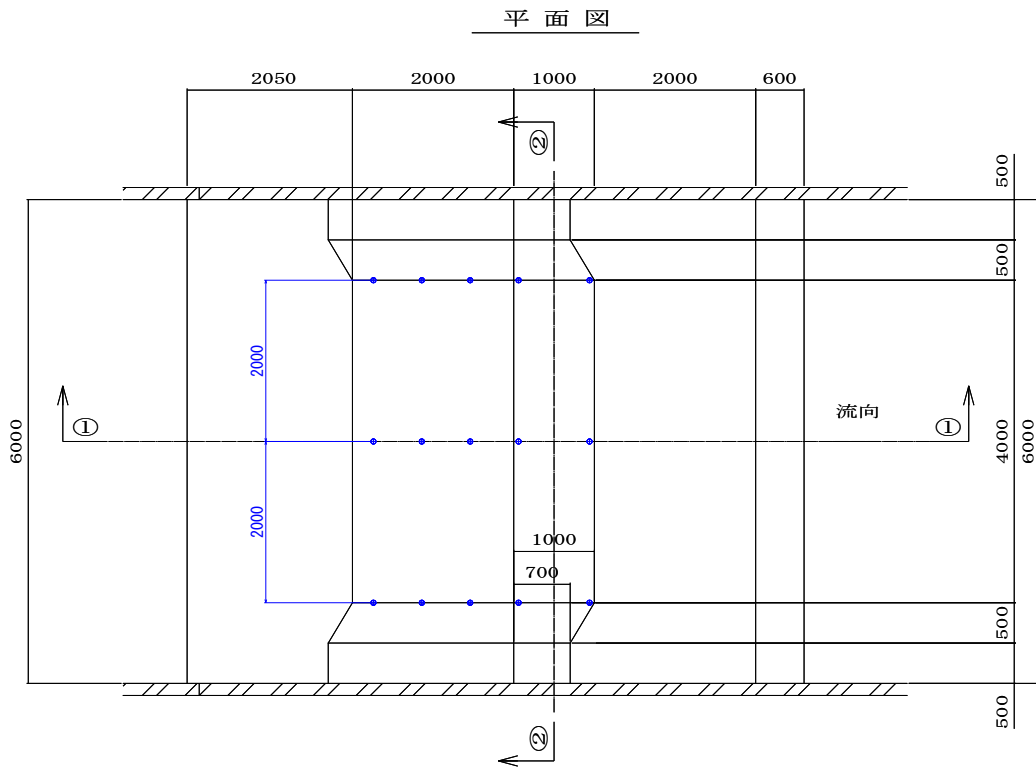


図 15 平面図 (青丸：センサ)

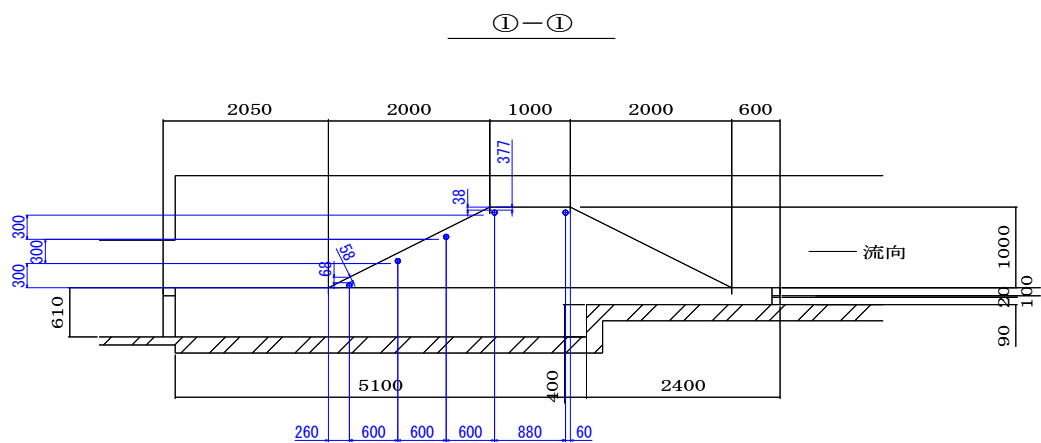


図 16 断面図 (青丸：センサ)

センサの埋設は、堤防が15 cm単位で締め固めて構築されるため、垂直方向は30 cm間隔とし、センサの土被りは法尻、法面では6 cm程度、天端では4 cm程度とした。

なお、いずれのセンサ位置においても、国総研側で準備したICタグ、加速度計、水位計のデータ取得のために併設して設置された。

センサ位置決め状況を図17に、締め固め状況を図18および図19に、完成した試験堤防を図20に示した。

また、図21は試験堤防の詳細図面である。



図17 センサ位置決め



図18 締め固め作業(1)



図 19 締固め作業(2)



図 20 完成した越水試験堤防

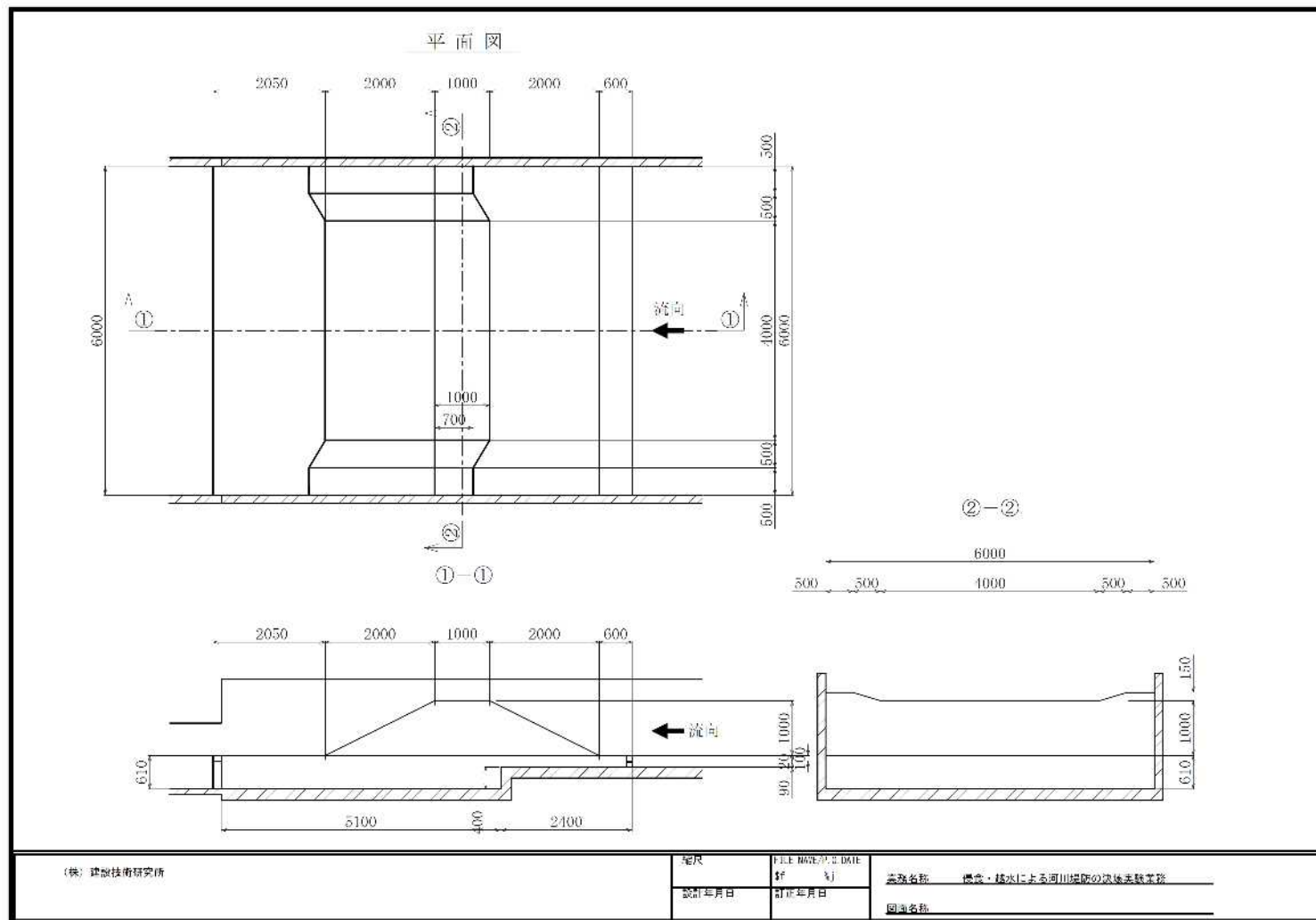


図 21 越水試験堤防詳細図

② 河岸侵食

図 22 は、センサの埋設状況、図 23 は完成した試験堤防である。

図 24 に河岸侵食センサ試験堤防の詳細図を、図 25 にその拡大図、図 26～図 28 にセンサ埋設位置の詳細を示す。

河岸侵食試験では、橋台+護岸、橋台および一般部の 3 エリアが設定されている。

また、河岸侵食試験時の水深は最大で 0.3m である。

その条件から、センサは流水の影響を初めに受ける法尻、水深 0.3m の位置、更に天端法肩および天端奥とした。

また、橋台や護岸にはセンサを近接して設置し、センサによる河川施設の施設周囲の変状監視の実証も行うことにした。

なお、いずれのセンサ位置においても、国総研側で準備した IC タグ、加速度計、水位計がデータ取得目的でセンサに併設設置された。



図 22 法尻センサ設置作業



図 23 完成した試験水路

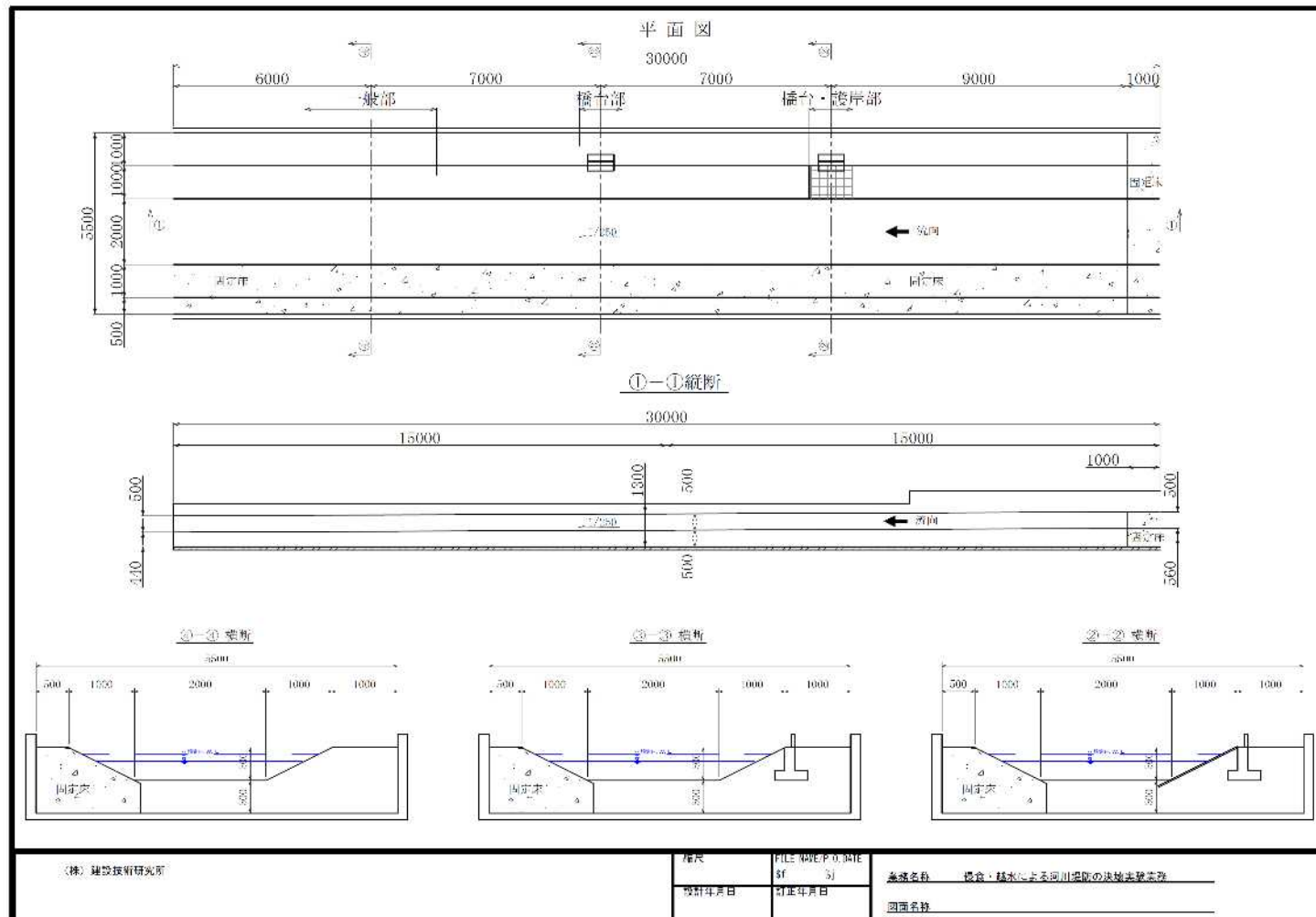


図 24 河岸侵食センサ試験堤防詳細図

【平面図（拡大）】

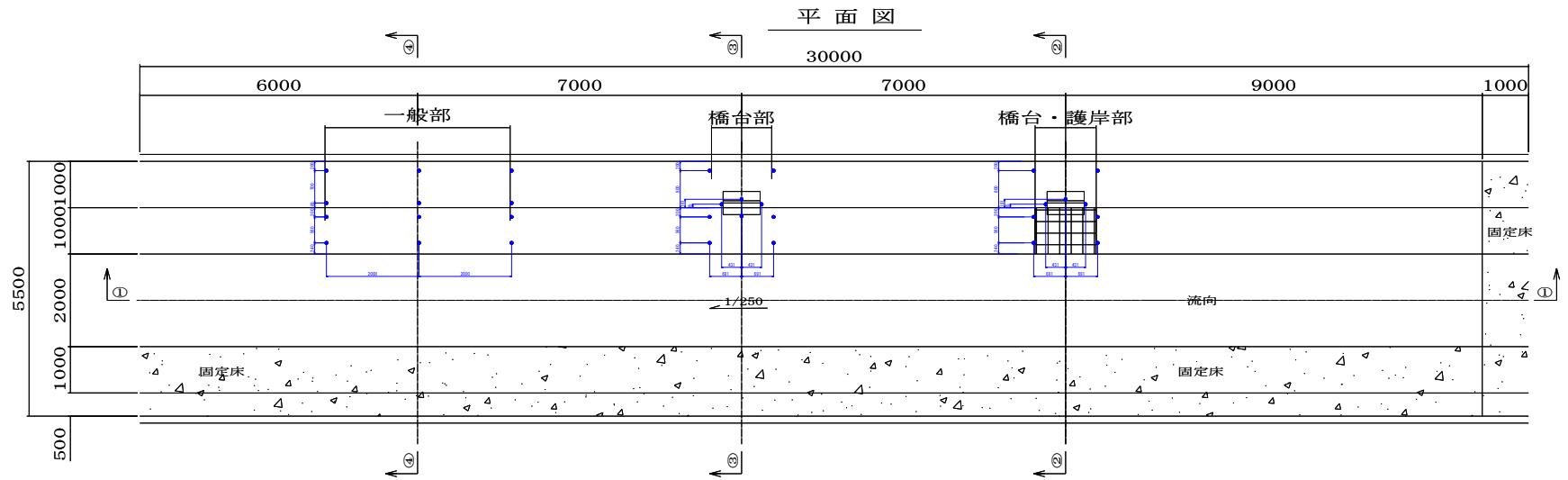


図 25 センサ配置図

一般部

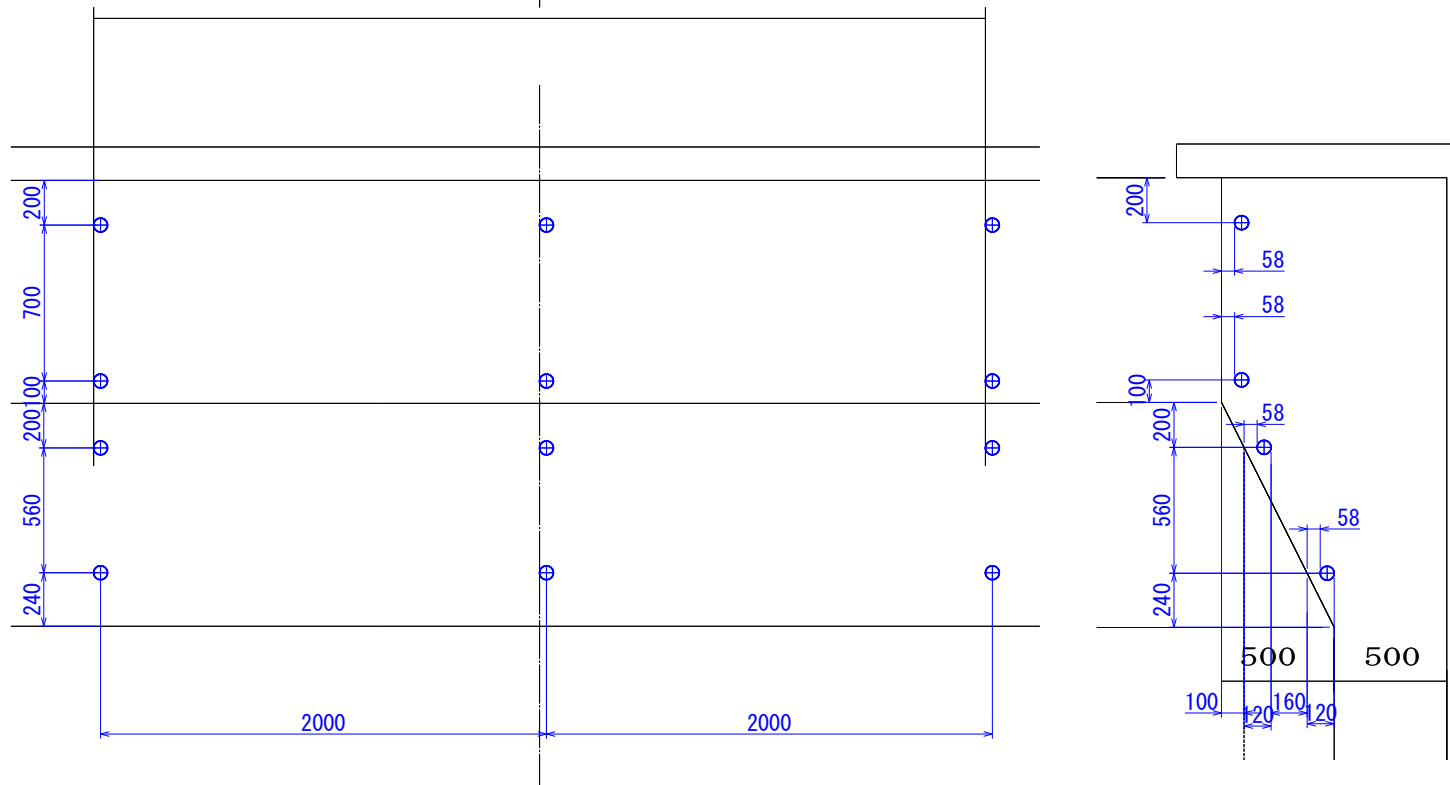


図 26 一般部 平面図・断面図 (センサ：青○)

橋台部

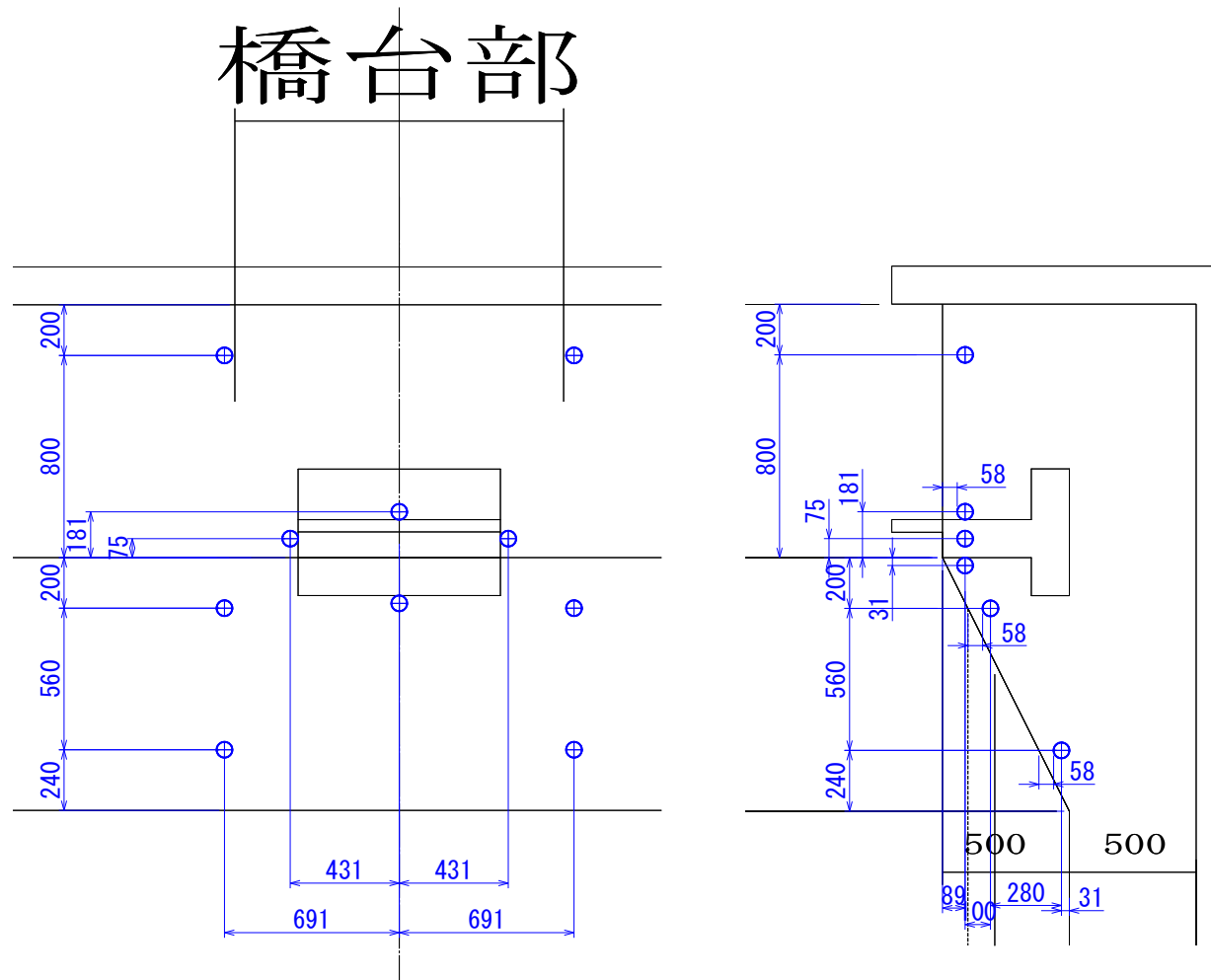


図 27 橋台部 平面図・断面図 (センサ：青○)

橋台・護岸部

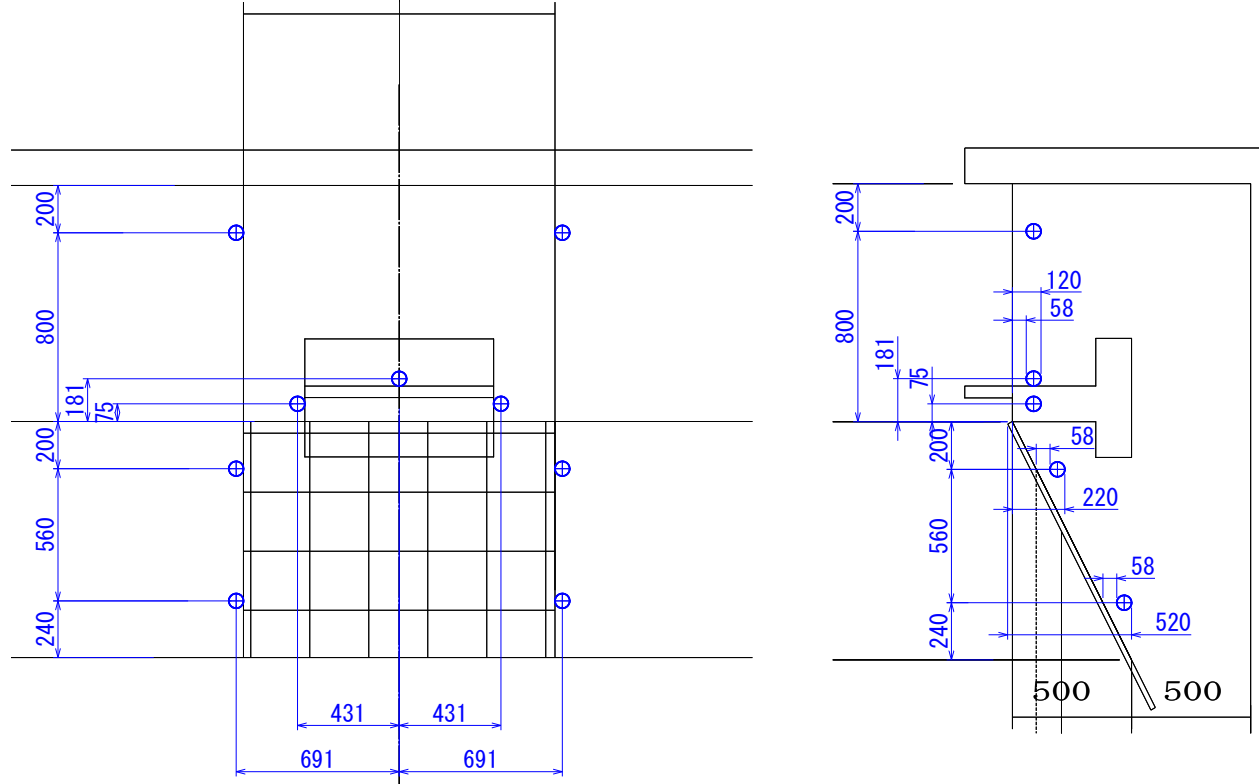


図 28 橋台部+護岸部 (センサ：青○)

(6) 実験結果

実験結果は以下のとおりであった。

1) 越水試験の結果

A 試験データ

越水試験で得られたデータは以下のとおりである。

- ① 水位データ（標高）・・・図 32 (P34)
- ② 検知位置図（最終）・・・図 33 (P35) ～図 34 (P35)
- ③ 検知写真・・・ 図 35 (P36) ～ 図 44 (P45)
- ④ 検知時系列表示・・・ 図 44 (P45) ～ 図 46 (P47)

B 試験結果

① 検知率

センサの検知結果を表 2 に纏めた。表 2 において、非流出センサとは、試験終了時まで堤体内に閉じ込められ流出しなかったセンサをいう。

流出したセンサは、全ての無線機の信号を受信しており、また混信や誤検知はなく、検知率は 100% であった。なお、試験後に流出センサは全て回収した。

これは、流出すれば検知の確実性が高いことを示している。

表 2 センサ検知結果

項目	センサ数・検知率		備考
a) 設置センサ（台）	15		測線：3（1 側線 5 台埋設） 配置：裏天端、法面 2 段 裏法尻、裏法尻
b) 流出／非流出センサ数（台）	流出センサ 10	非流出センサ 5	非流出：天端 3 台、 裏法尻 2 台
c) 非検知センサ数（台）	0	—	流出センサは全信号受信
d) 誤検地センサ数（台）	0	—	誤計測は無かった
e) 検知センサ数（台）	10	—	流出全数検知
f) 検知率（%）	100	—	

(注) 流出センサ、非流出センサは全数回収した

② リアルタイム検知評価

図 29 に試験開始時刻、図 30 に検知時の写真一例と計測時間ログを示した。

試験開始はアナログ時計で 12 時 54 分、また、ビデオ記録のデジタル時計で 0 時 33 分 12 秒を示している。

図 30 は、最初に検知したセンサの写真である。アナログ時計で 14 時 02 分（1 時間 08 分経過）、また、ビデオ記録のデジタル時計で 1 時 39 分 12 秒（1 時間 06 分経過）を示し

ている。このように、1時間程度の間で、両時計が2分異なるので、アナログ時計を基本として評価を行うことにした。(河岸侵食も同様である)

カプセルセンサはその機能のとおり、回転すれば無線機の電源が入り、自動的に無線信号が送信される。図 30 のセンサは、堤内地側に向かって右側、法尻+30 cmの位置(緑矢印)に埋設されていたもので、映像では赤矢印位置に移動している。移動時間は流速から1秒未満と考えるが、図 31 の掘削事例(図 31 のセンサは非流出、非検知)のような空洞ができたとき、センサがその中で回転すれば緑矢印の位置に留まったまま、無線信号が送出される状況になる。

しかし、センサの周囲が洗堀されたが、まだ空洞に留まったままの状態としても、センサ周囲は洗堀されている状況にあり、この状態でも洗堀したと判断すべきである。

従って、無線信号受信=越水侵食として結果の整理を行った。

以上の評価から、図 30 は無線時刻ログの時間にリアルタイムで計測したと判断した。

従って、無線時刻ログの時間を計測時間の正、写真は参考として扱うことにした。



図 29 試験開始時刻



図 30 計測事例



図 31 非流出センサ（上流方向向かって右法尻）

C 考察

図 33 および図 34 に越水試験における検知センサ位置を整理した。

今回の試験においては、当初早い段階で検知を想定した裏法尻が検知しないセンサが存在する結果となった。

図 33～図 34 に検知の時系列表示を示した。

図 47 は午後 4 時終了直前の堤防と水流の写真であるが、天端は終了時点においても、ほぼ初期の高さで、かつ均一な水流になっており、天端自体が余り侵食されていないことを示している。

終了後の天端は図 48 に示す状況からも裏付けられる。

裏法尻部で一部センサが検知されなかったのは、裏法尻の直上の締固めの段差部で水が跳びはねて裏法尻を通過したためと考えられる。

図 49 は、裏法尻部の堤内地側に向かい右端のセンサで、露出したがセンサは回転などしなかったため、非検知になったものである。

D 所見

- ① センサは堤防の締固めの圧力に耐えることが確認できた。特に、天端部では土被り 4 cm の条件であっても異常は発生しなかった。センサは直径 6 cm のため、公募の命題であった天端 10 cm 低下時の検知が可能であることが立証された。
- ② 今回、堤防構築に水分を含んだ土が使用されたためと思われ、締固めで極めて強固な堤防となった。このため、当初早期の検知を想定した裏法尻が 3 個中 1 個のみ検知し、残る 2 個は堤体に埋設のままで非検知で終了した。
- ③ センサが侵食され流出すれば、ほぼリアルタイムで検知が可能であることが立証できた。

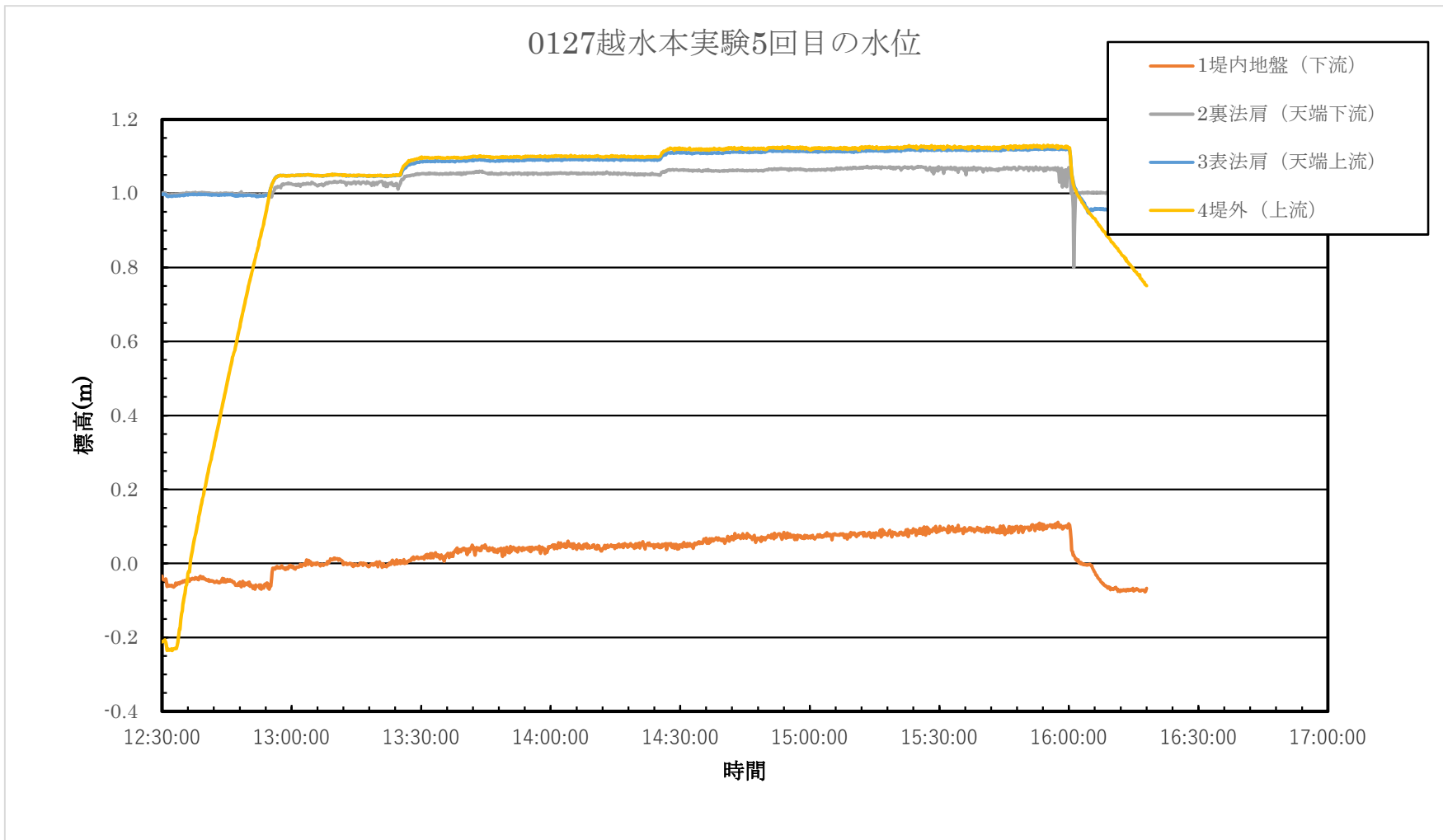


図 32 越水試験時の水位データ (国総研提供)

越水検知平面図 (15台)

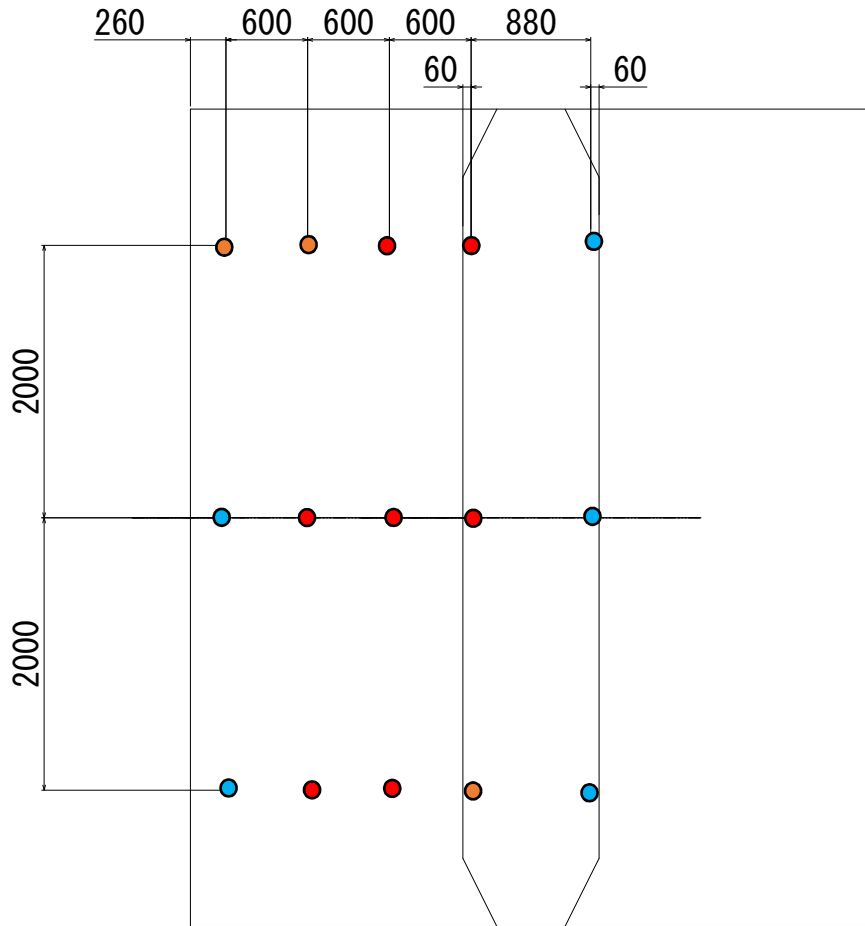


図 33 越水センサ検知位置 (最終) (●検知 ●試験中止のため非検知)

越水検知断面図

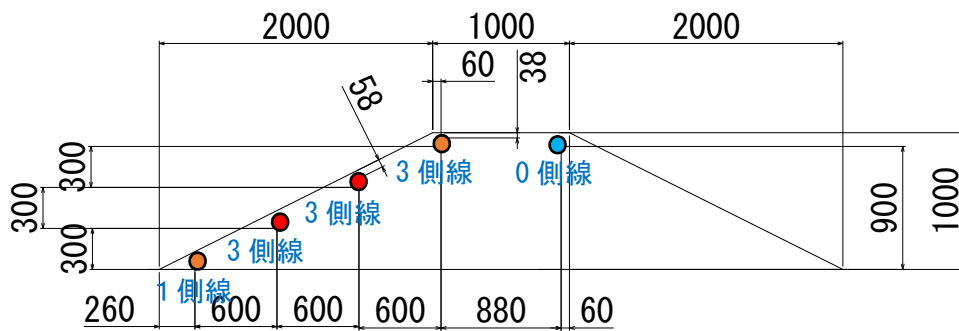


図 34 越水センサ検知位置 (最終) (●検知 ●試験中止のため非検知)



図 35 越水試験検知写真 (1)



図 36 越水試験検知写真 (2)



図 37 越水試験検知写真 (3)



図 38 越水試験検知写真 (4)



図 39 越水試験検知写真 (5)



図 40 越水試験検知写真 (6)



図 41 越水試験検知写真 (7)



図 42 越水試験検知写真 (8)



図 43 越水試験検知写真 (9)



図 44 越水試験検知写真 (10)

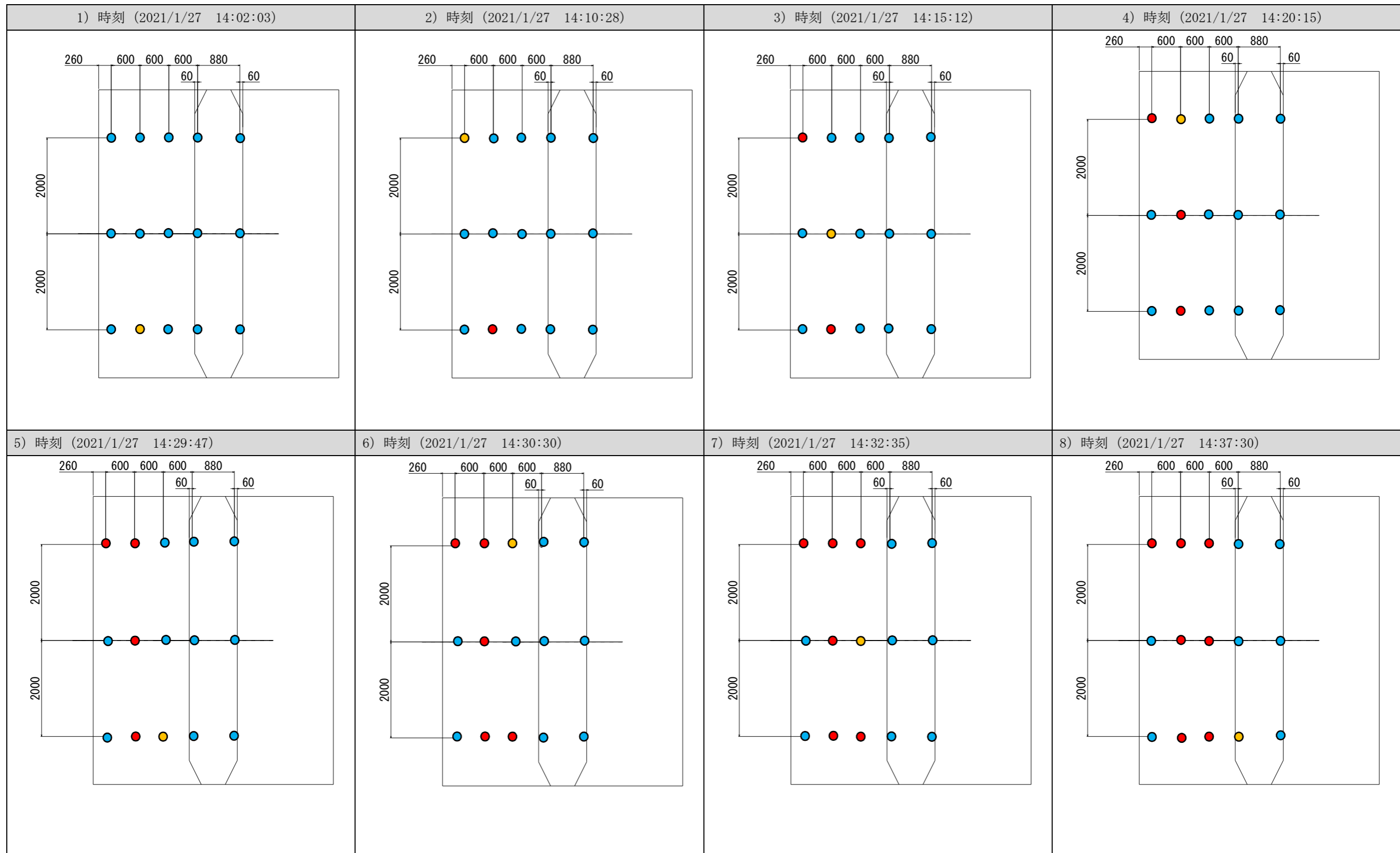


図 45 越水試験検知センサの時系列表示 (●: 検知 ●: 既検知 ●: 未検知) 1/2

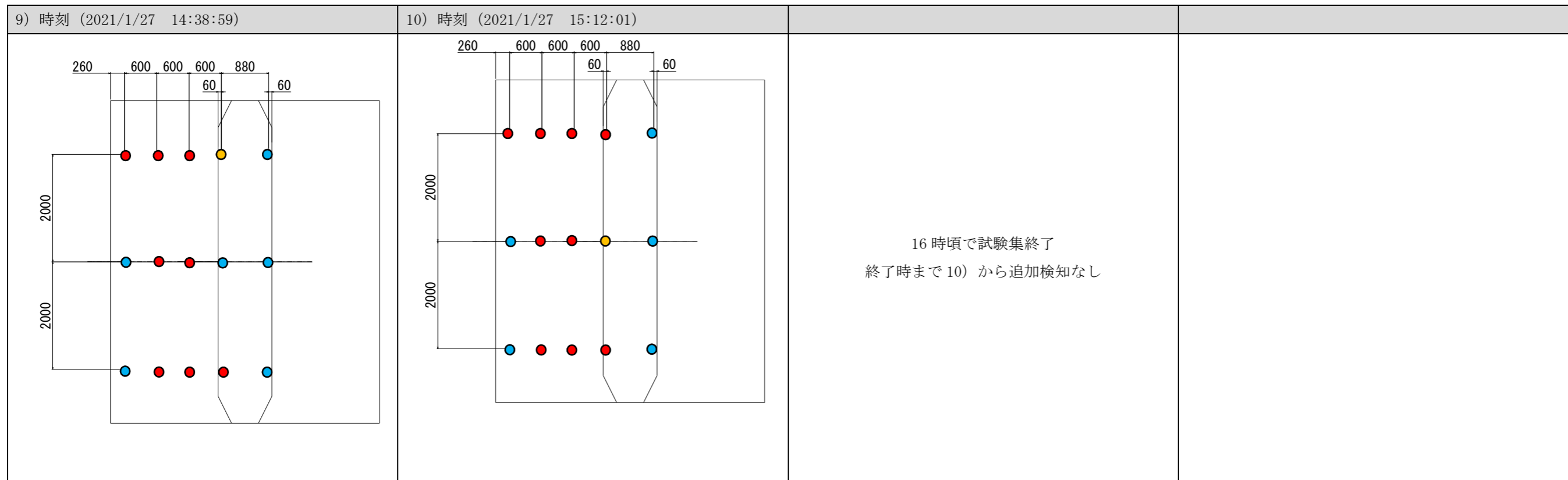


図 46 越水試験検知センサの時系列表示 (●: 検知 ●: 既検知 ●: 未検知) 2/2



図 47 越水試験（午後4時 終了直前）



図 48 試験終了後の堤体状況



図 49 裏法尻センサ（未検知 上流に向かって右端）

2) 河岸侵食試験の結果

A 試験データ

河岸侵食試験で得られたデータは以下のとおりである。

- ⑤ 水位データ（標高）・・・図 51 (P53)
- ⑥ 水位データ（水深）・・・図 52 (P54)
- ⑦ 検知位置図（最終）・・・図 53 (P55)
- ⑧ 検知写真・・・ 図 54 (P56) ～ 図 75 (P77)
- ⑨ 検知時系列表示・・・ 図 76 (P78) ～ 図 79 (P81)

B 試験結果

① 検知率

センサの検知結果を表 3 に纏めた。表 3 において、非流出センサとは、試験終了時まで堤防内に閉じ込められていたセンサを言う。

流出したセンサは、全ての無線機の信号を受信しており、また混信や誤検知はなく、検知率は 100% であった。また、流出したセンサは試験終了後、全数回収した。

表 3 センサ検知結果

項目	センサ数・検知率		備考
a) 設置センサ (台)	31		一般部：3 側線 (12 台) 橋台部：2 側線 (6 台) + 橋台回り (4 台) 橋台+護岸部 ：2 側線 (6 台) + 橋台回り (3 台)
b) 流出／非流出センサ数 (台)	流出センサ 22	非流出センサ 9	非流出：天端奥 (7 台) 橋台裏 (2 台)
c) 非検知センサ数 (台)	0	—	流出センサは全信号検知
d) 誤検地センサ数 (台)	0	—	誤計測なし
e) 検知センサ数 (台)	22	—	流出センサは全数検知
f) 検知率 (%)	100	—	

(注) 流出センサ、非流出センサは全数回収

② リアルタイム検知性

カプセルセンサは、その機能のとおり、回転すれば無線機の電源が入り、自動的に無線信号が送信される。ただし、空洞ができたとき、あるいはセンサが崩れた法面を滑って平行移動したとき、センサから無線信号が送出されない場合も想定される。

越水試験での考えかたと同様にすると、今回の検知時間ログとアナログ時計時刻は、

ほぼ合致しており、リアルタイムで検知したと判断した。

今回砂の堤防のため、橋台前、脇のセンサでは、センサが法面を平行移動している状態が見られたが、その滑り時間は無線送信が行われず、非検知時間となる。

図 50 に橋台脇のセンサ状況を示した。実際の堤防でこのような事例は少ないと想像されるが、平行移動時間は非検知時間のため、測定誤差となる。このセンサも、数十秒後、流出し検知センサとなった。



図 50 橋台脇のセンサ (ずり落ちていた)

C 考察

① 水流および水深による影響

- ・ (橋台+護岸部) の下流側センサを除き、初期の水深 7 cm で流水に流されることで検知した。
- ・ (橋台+護岸部) の下流側センサは水深 20 cm で流水により検知した。
- ・ 法尻以外のセンサは、全て堤体崩壊による検知であった。

② 検知までの時間

【法尻】

- ・ (一般部) の法尻センサは一般部付近に水流が達してから僅か 30 秒程度で全数を検知した。
- ・ (橋台部) は試験開始から 3 分 30 秒程度で検知したが、(一般部) と堤防の構造的な差はなく、水流の条件は同じため同程度の時間であったと考えられる。
- ・ (橋台+護岸部) は、試験開始から 7 分 30 秒程度の時間を要した。これは護岸の効果によるものである。

【表法面上段 30 cm】

- ・（一般部）10分50部～19分30秒で検知。堤体崩壊の進行である。一般部付近の水流が、流水調整板の影響で早い傾向にあったことが一因である。
- ・（橋台部）25分30秒～42分で検知。堤体崩壊の進行である。（一般部）また（橋台部）内センサ間での検知時間の違いは水流の強さ、流水調整板での水向の違いによるものと考ええる。
- ・（橋台+護岸部）1時間12分～1時間14分30秒で、堤体崩壊の進行である。護岸の効果が顕著であることが明らかで、1時間以上を要した。

【表法肩】

- ・（一般部）37分30秒～41分30秒で検知。堤体崩壊の進行である。最上流端は1時間13分であったが、水流、水向の影響が少なかったことによる。
- ・（橋台部）設置なし
- ・（橋台+護岸部）設置なし

【天端奥】

- ・（一般部）試験中止で非検知
- ・（橋台部）試験中止で非検知
- ・（橋台+護岸部）試験中止で非検知

③ 河川構造物付近の検知

- ・（橋台部）橋台中央川面位置では48分、橋台上下流側面部では、49分～49分程度で検知、橋台の構造物としての影響で水流が渦巻く状況が見られたが、ほぼ堤体崩壊の延長での検知と考えられる。
橋台部川裏方向背面は試験中止で非検知。
- ・（橋台+護岸部）橋台上下流側面部は1時間14分～15分であった。（橋台部）の同位置と25分程度の差があるのは、護岸があり侵食速度が遅くなったためである。

D 所見

- ① 砂の堤防のため、水没した法尻部は短時間で検知した。
- ② ①以外は、水流の直接的な影響はなく、堤体の崩壊による検知であった。
- ③ 護岸の侵食抑止効果は顕著であった。
- ④ 橋台の周囲へのセンサ設置は、侵食開始の情報として有用であると思われる。

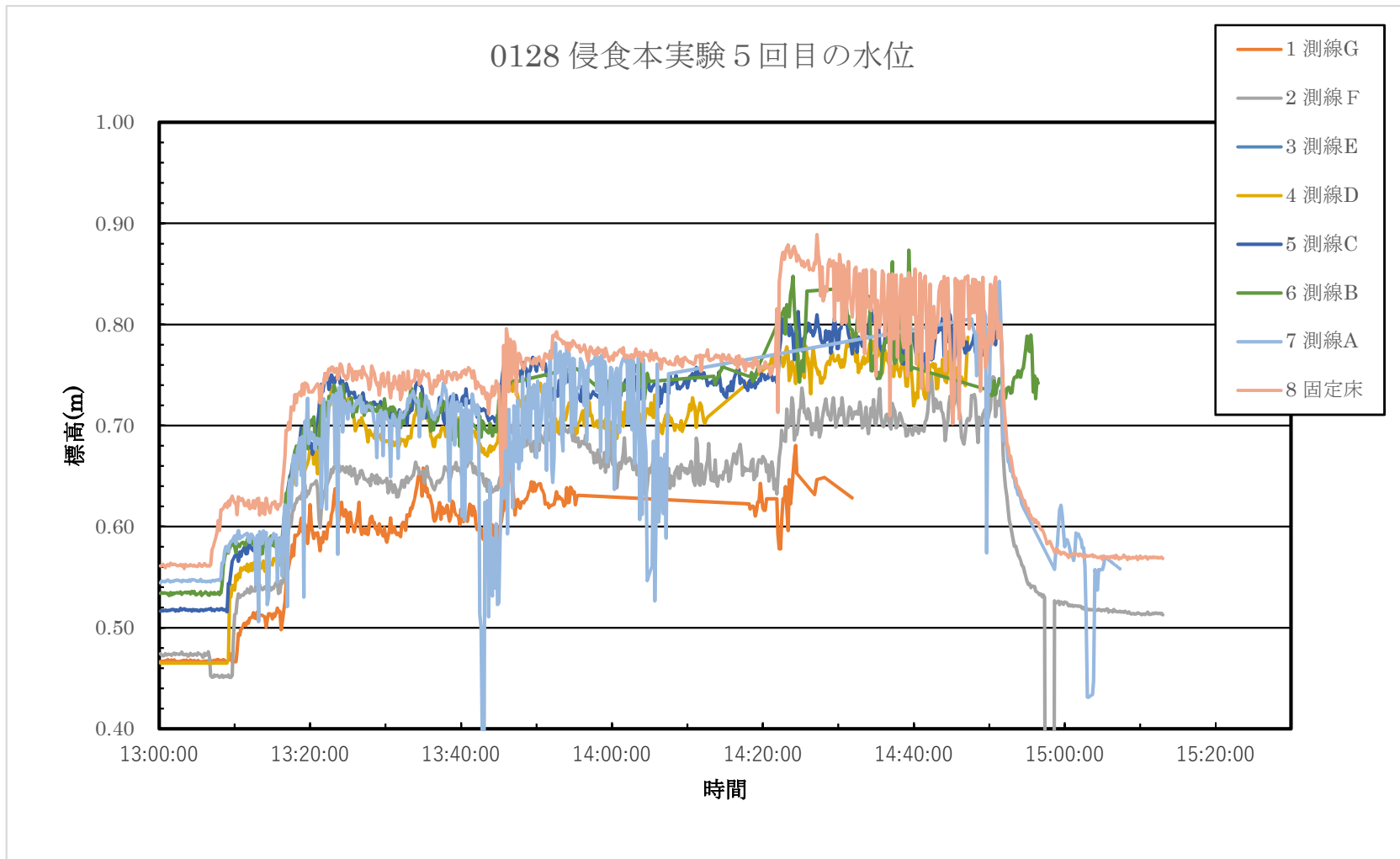


図 51 河岸侵食試験水位データ (標高) 国総研計測

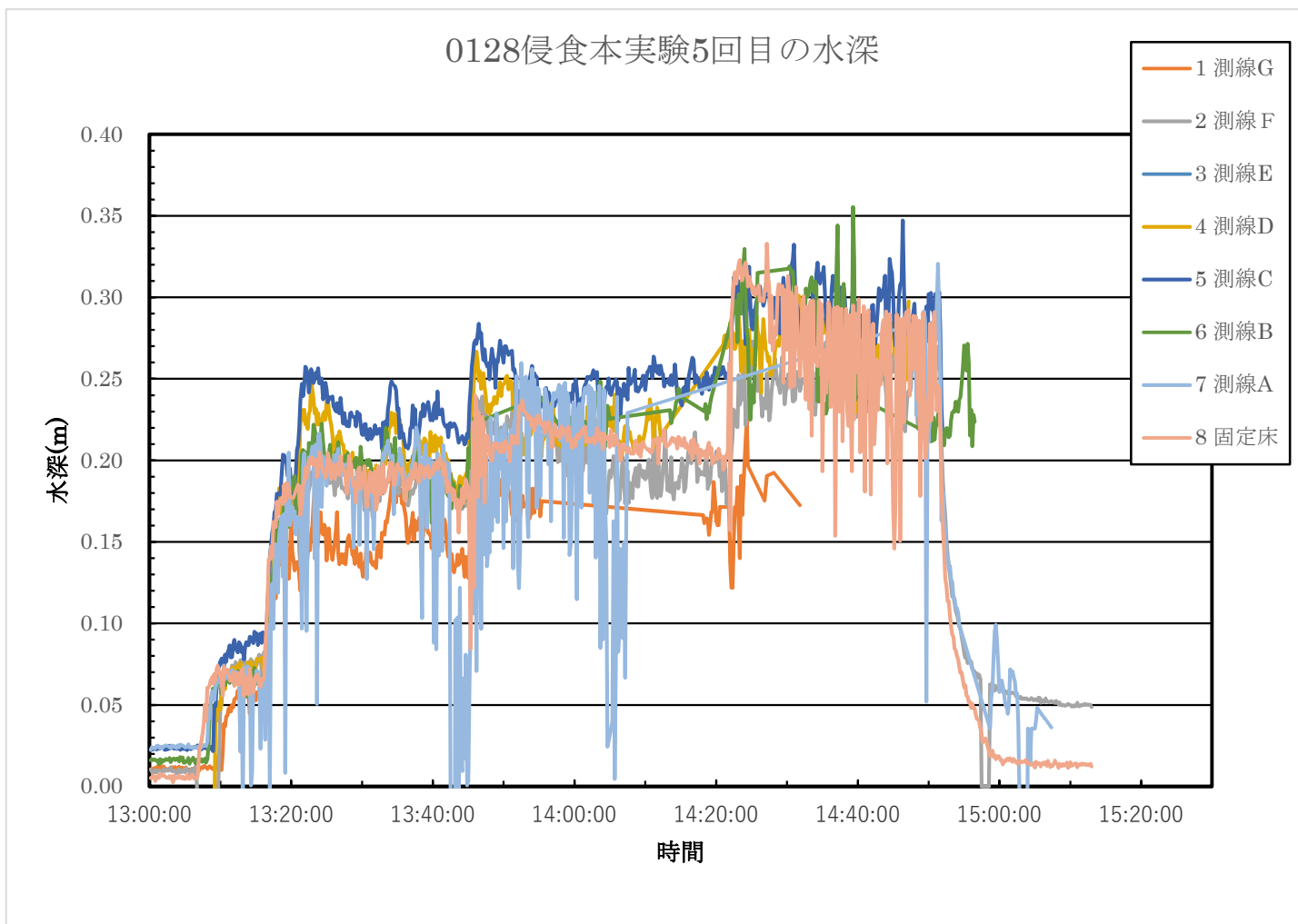


図 52 河岸侵食試験水位データ (水深) 国総研計測

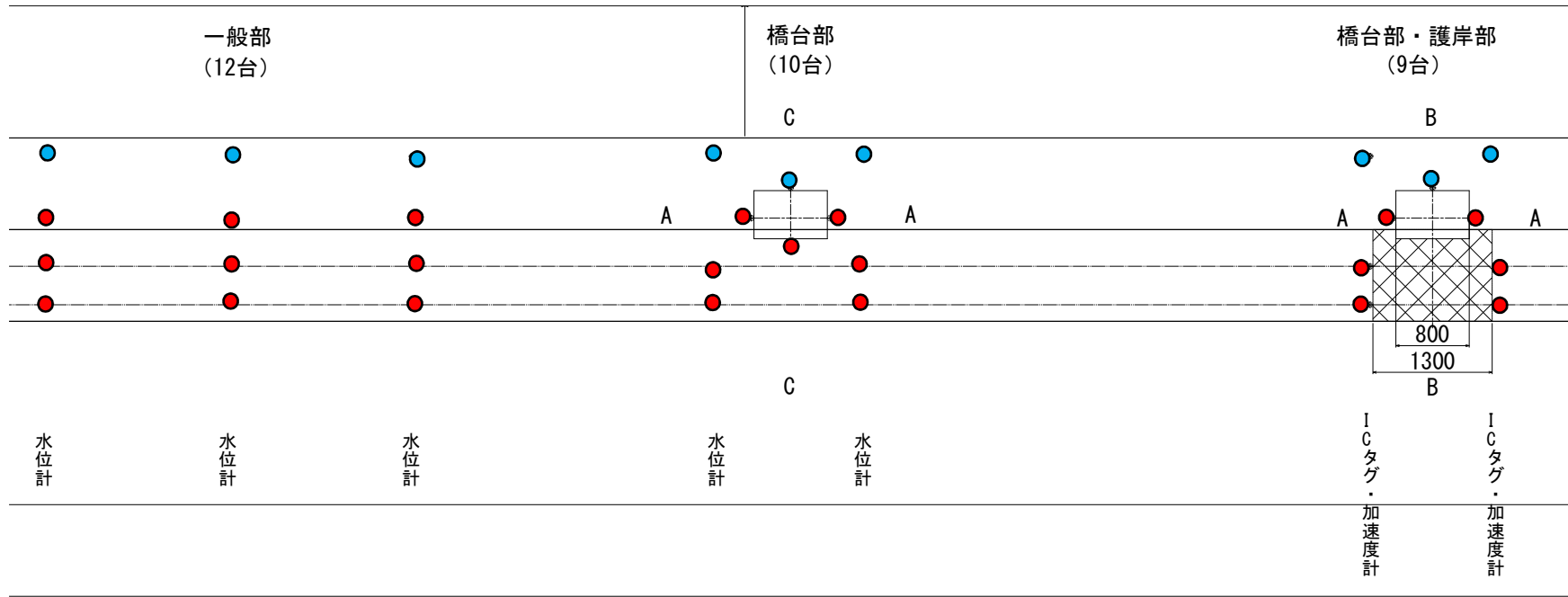


図 53 検知位置図 (最終) (● 検知 ● 試験終了のため非検知)



図 54 河岸侵食試験検知写真 (1)



図 55 河岸侵食試験検知写真 (2)



図 56 河岸侵食試験検知写真 (3)



図 57 河岸侵食試験検知写真 (4)



図 58 河岸侵食試験検知写真 (5)

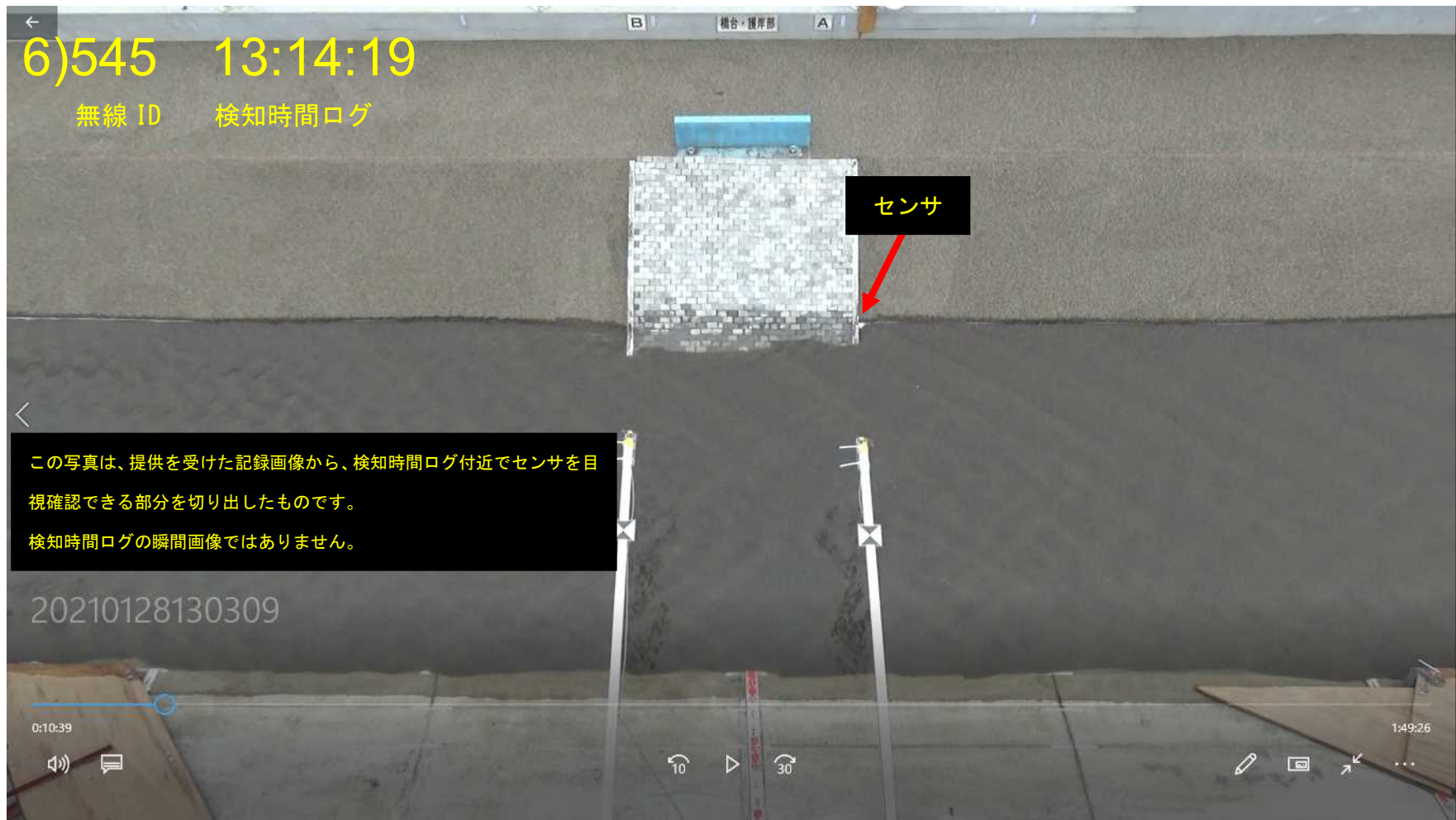


図 59 河岸侵食試験検知写真 (6)



図 60 河岸侵食試験検知写真 (7)



図 61 河岸侵食試験検知写真 (8)



図 62 河岸侵食試験検知写真 (9)

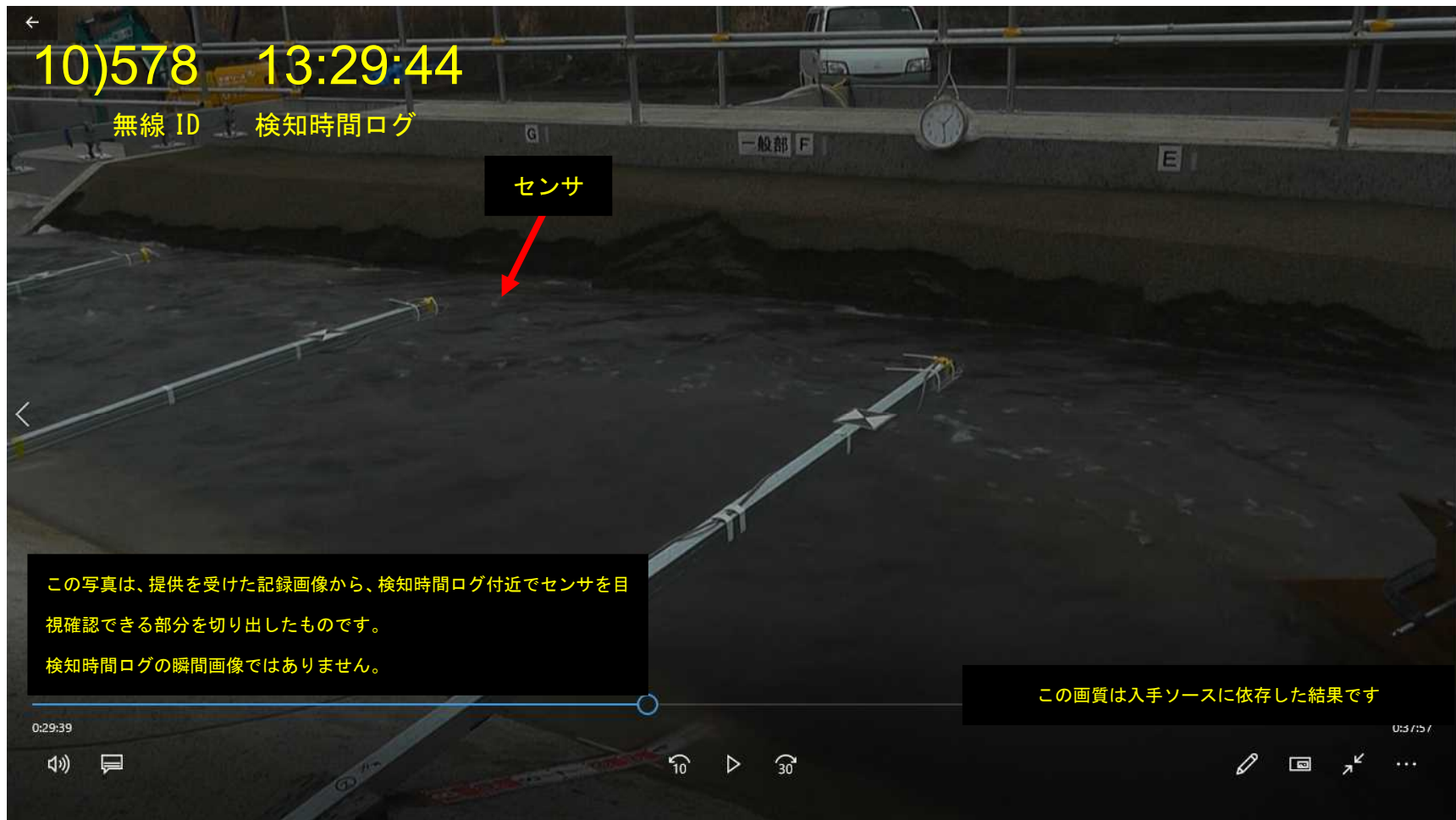


図 63 河岸侵食試験検知写真 (10)



図 64 河岸侵食試験検知写真 (11)

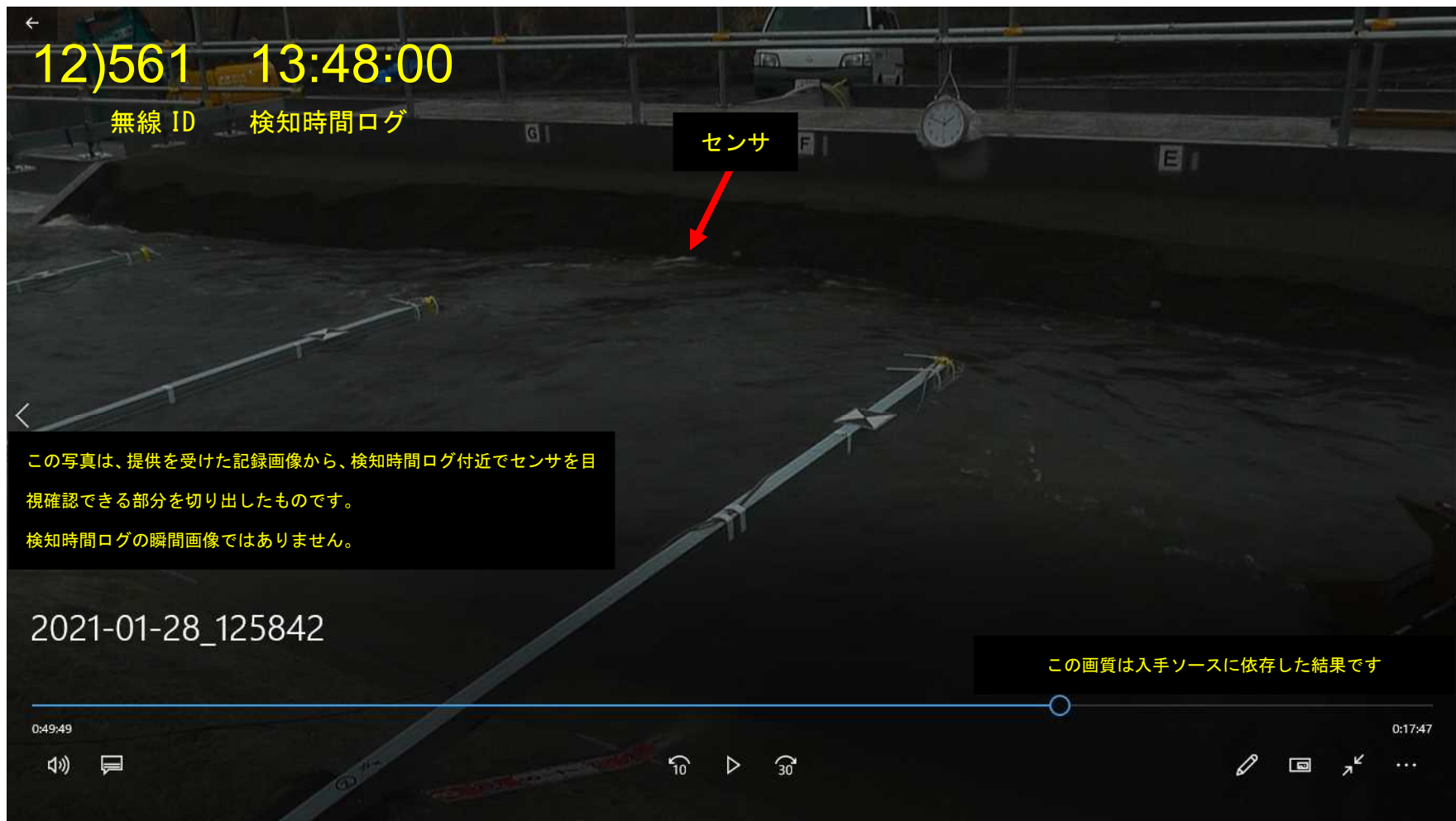


図 65 河岸侵食試験検知写真 (12)

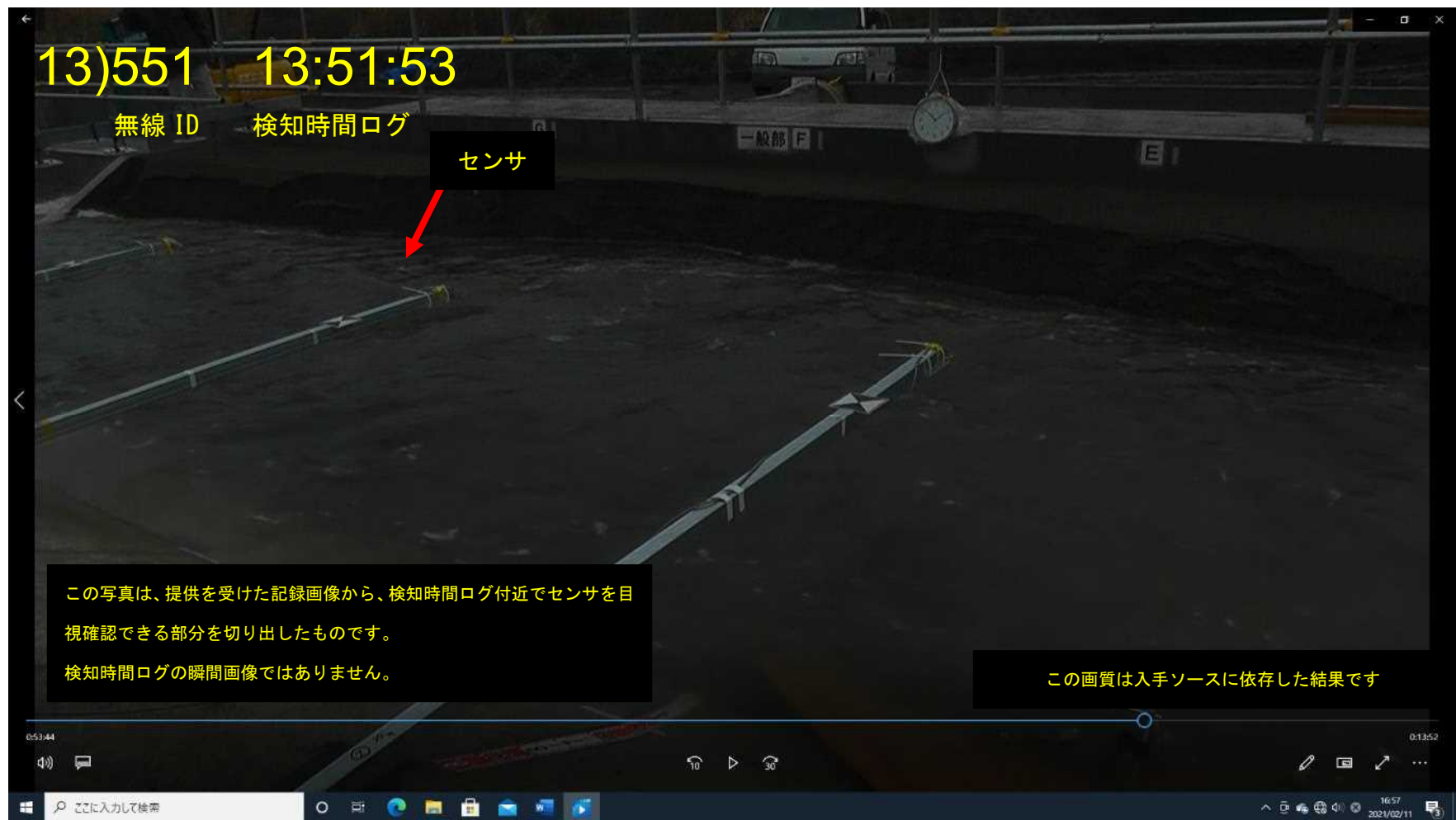


図 66 河岸侵食試験検知写真 (13)



図 67 河岸侵食試験検知写真 (14)

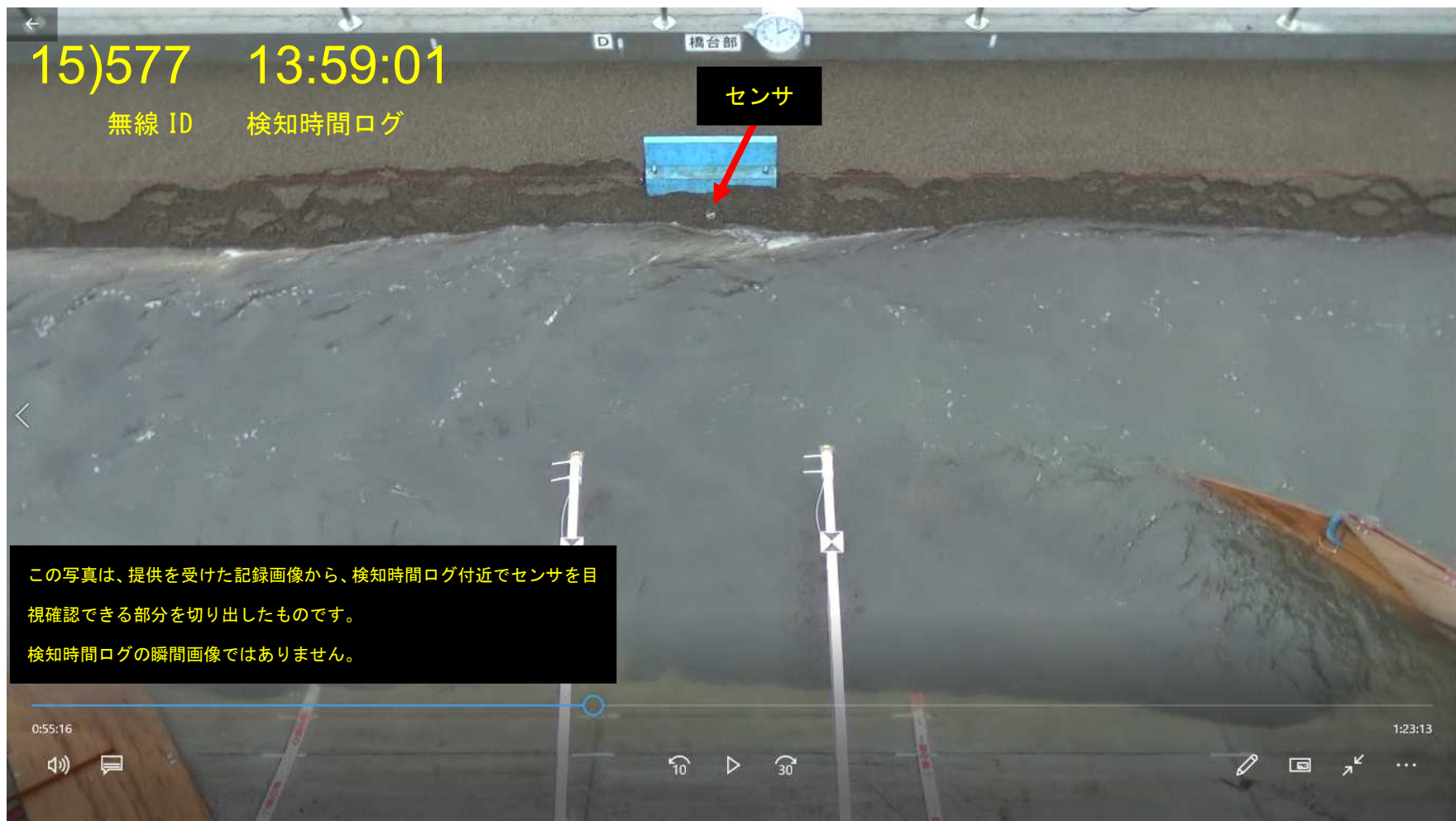


図 68 河岸侵食試験検知写真 (15)



図 69 河岸侵食試験検知写真 (16)

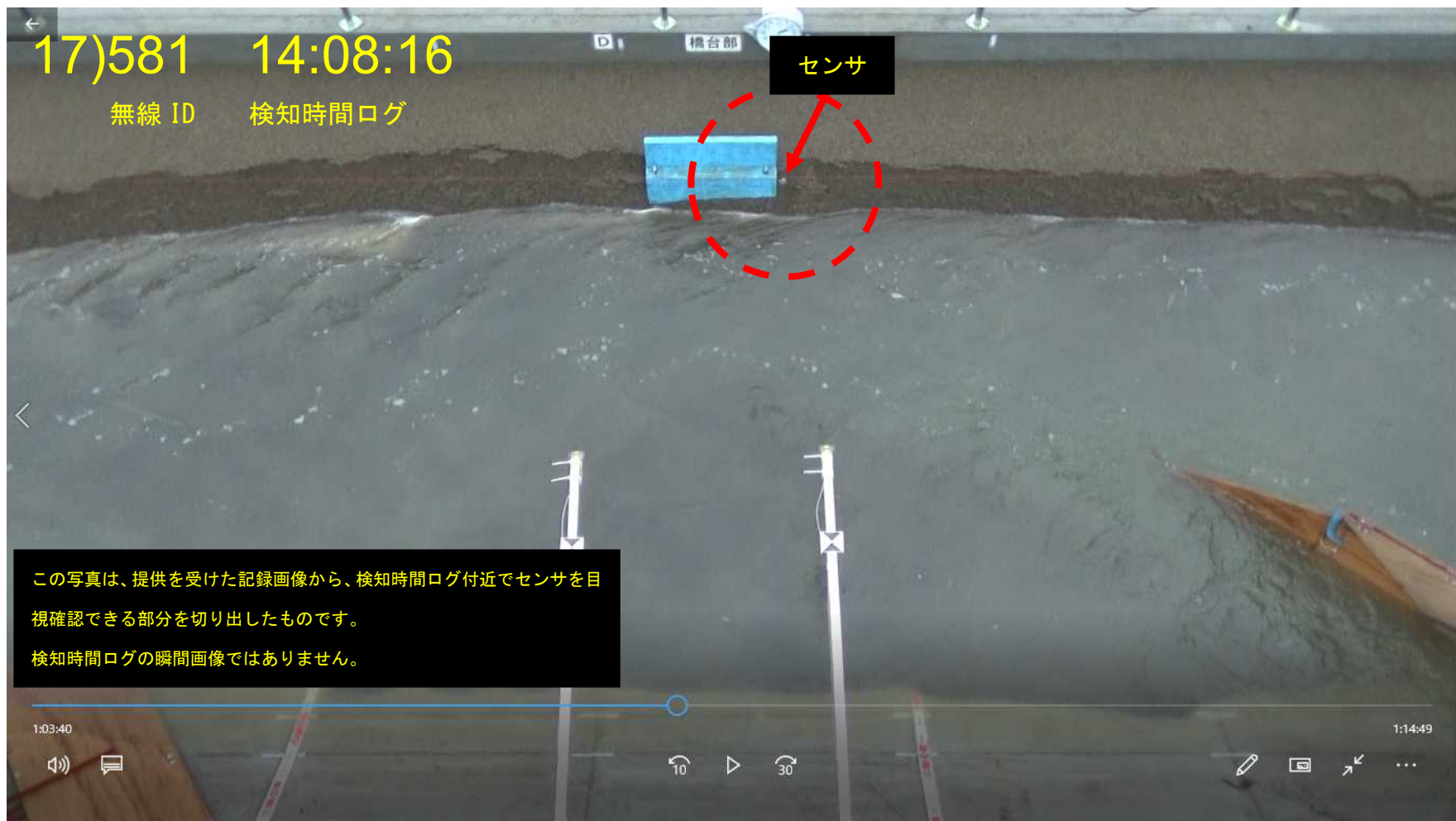


図 70 河岸侵食試験検知写真 (17)



図 71 河岸侵食試験検知写真 (18)



図 72 河岸侵食試験検知写真 (19)

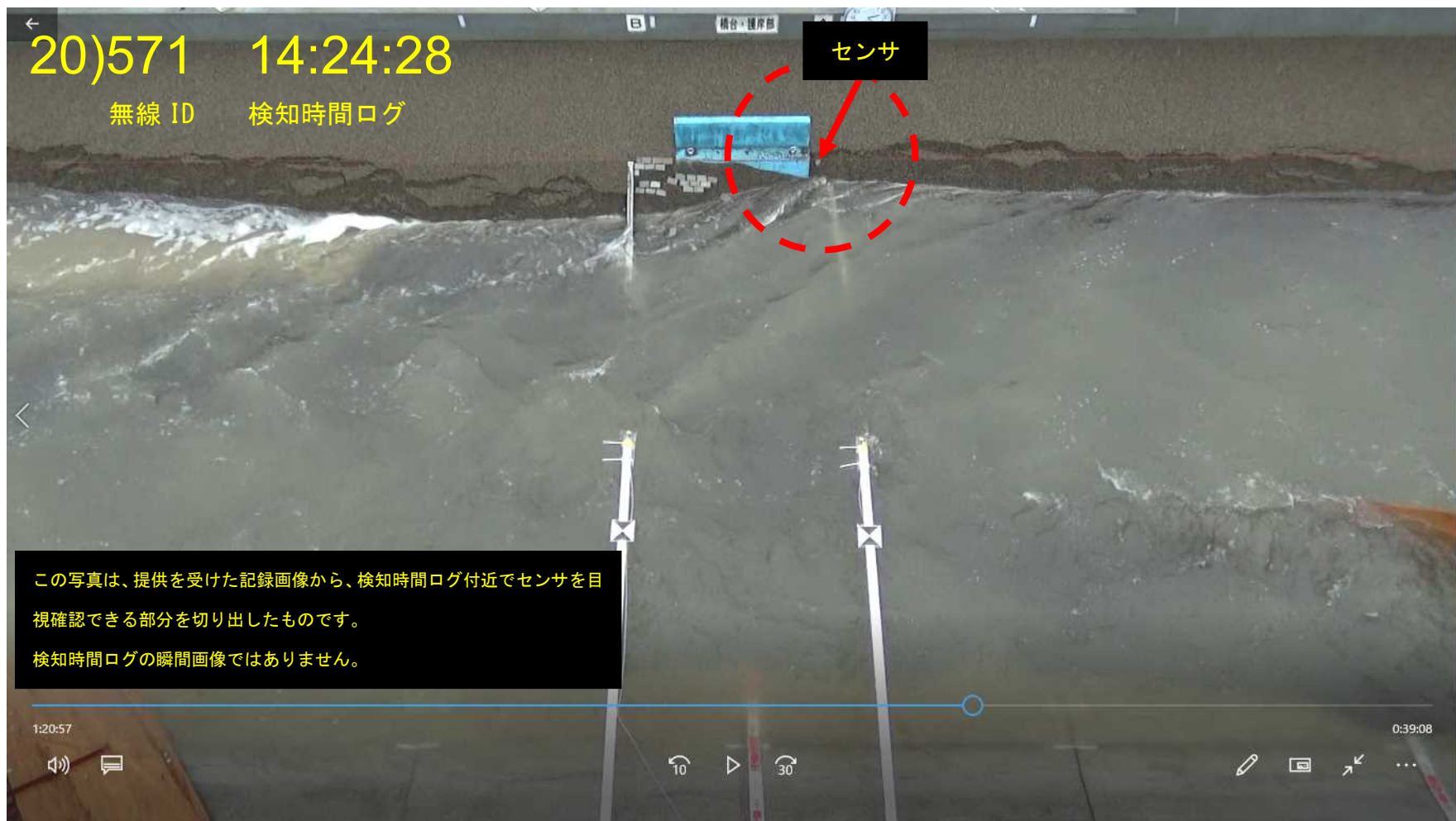


図 73 河岸侵食試験検知写真 (20)

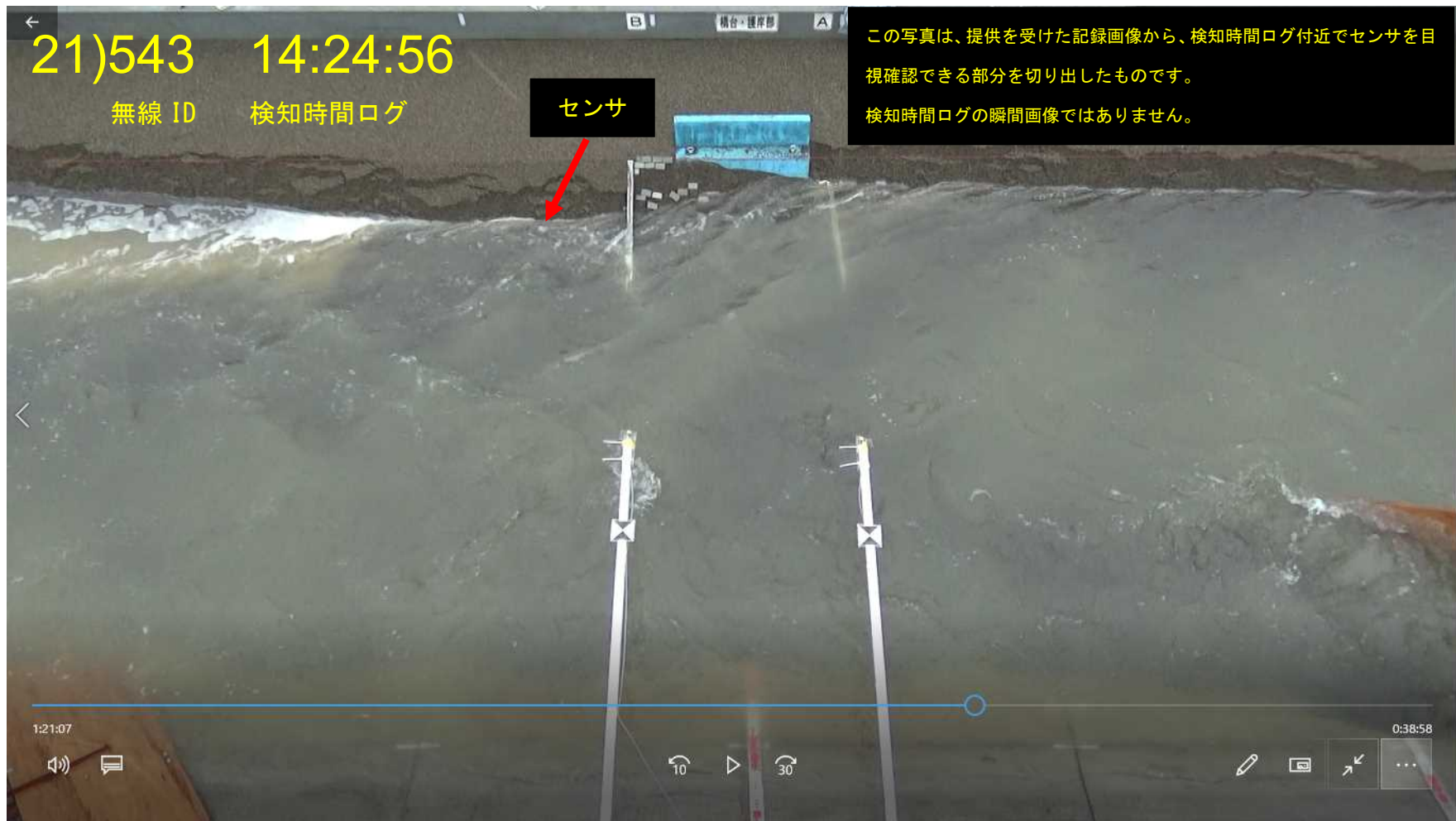


図 74 河岸侵食試験検知写真 (21)

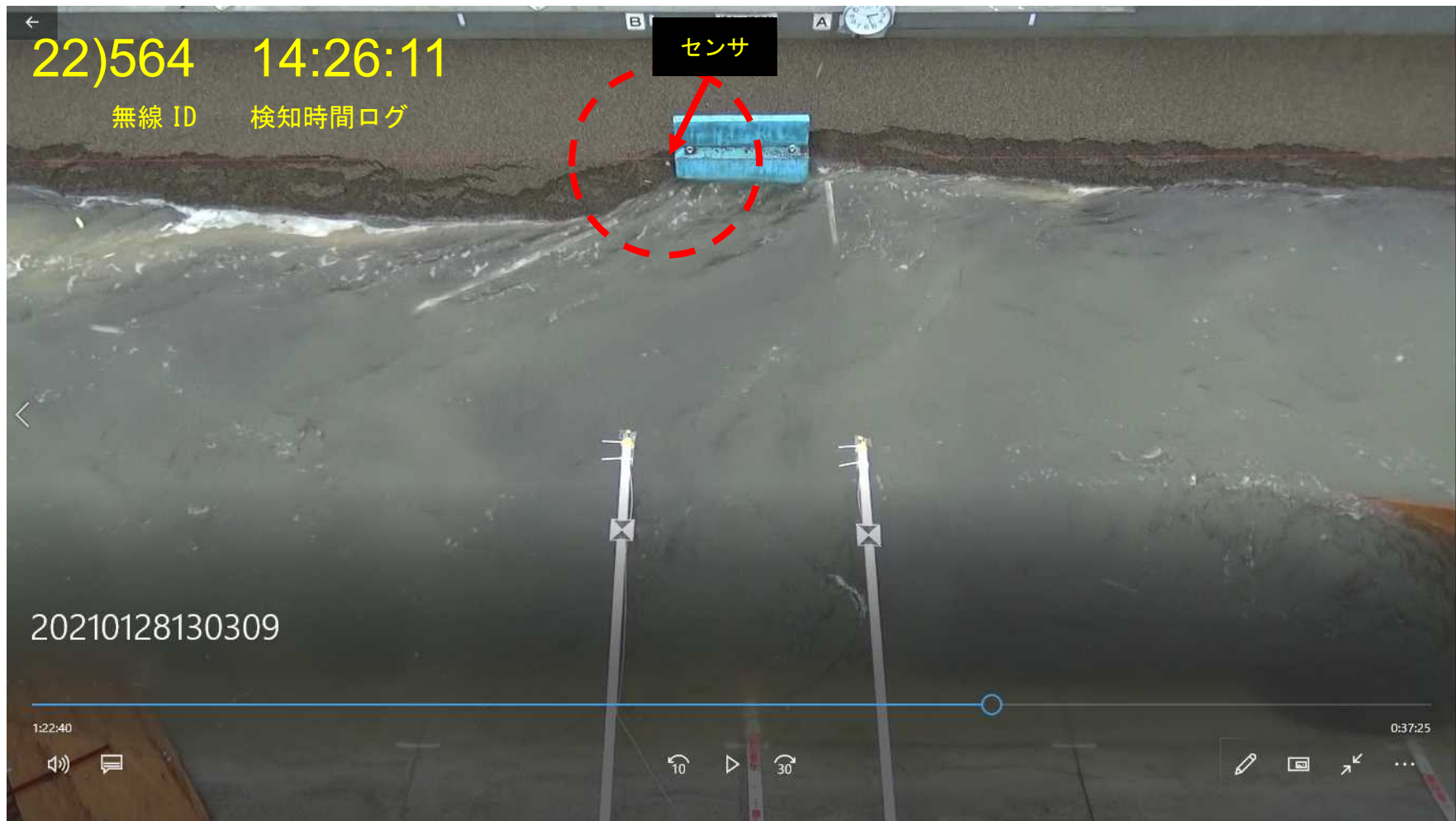


図 75 河岸侵食試験検知写真 (22)

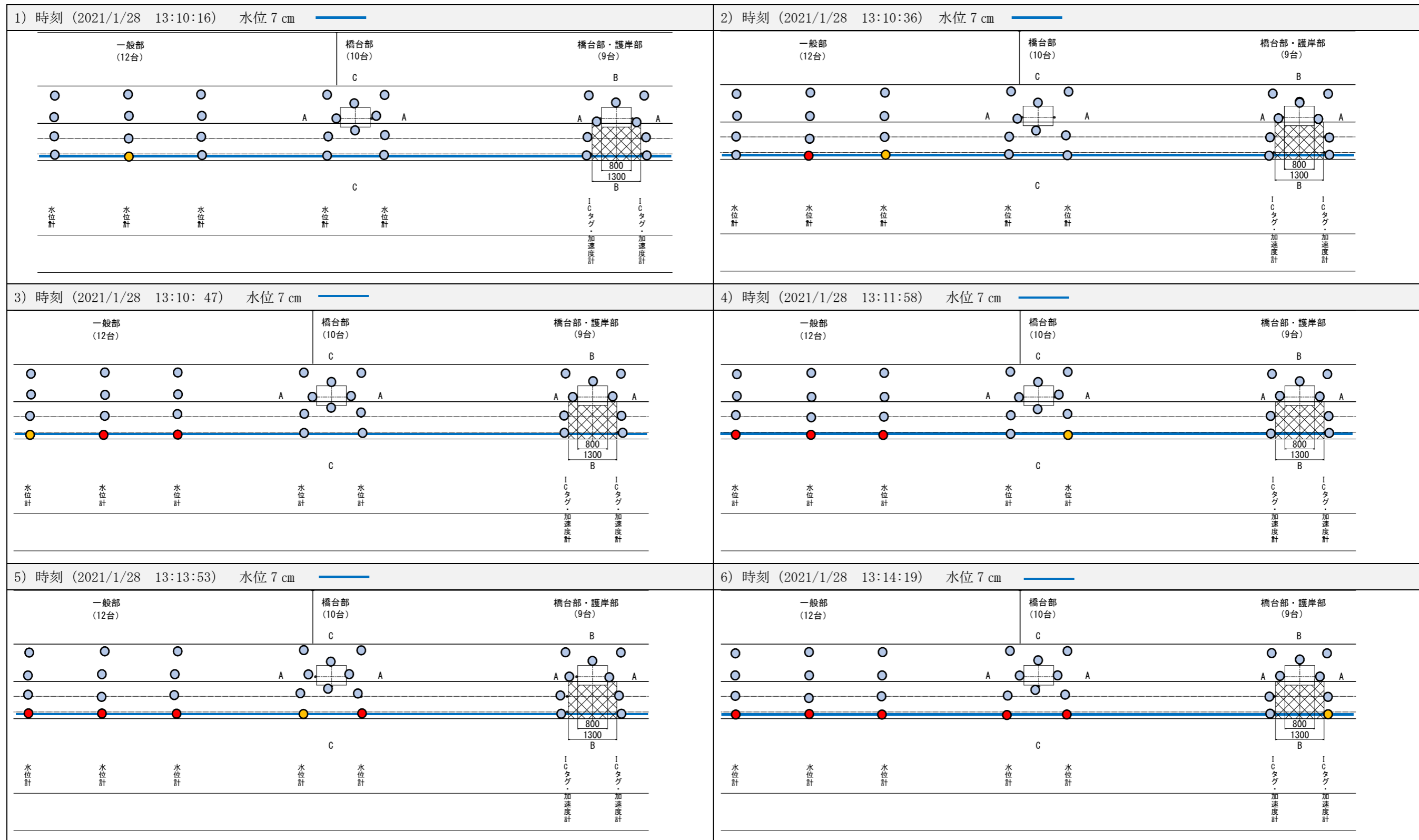


図 76 河岸侵食試験の検知時系列表示 (●: 検知 ●: 既検知 ○: 未検知) 1/4

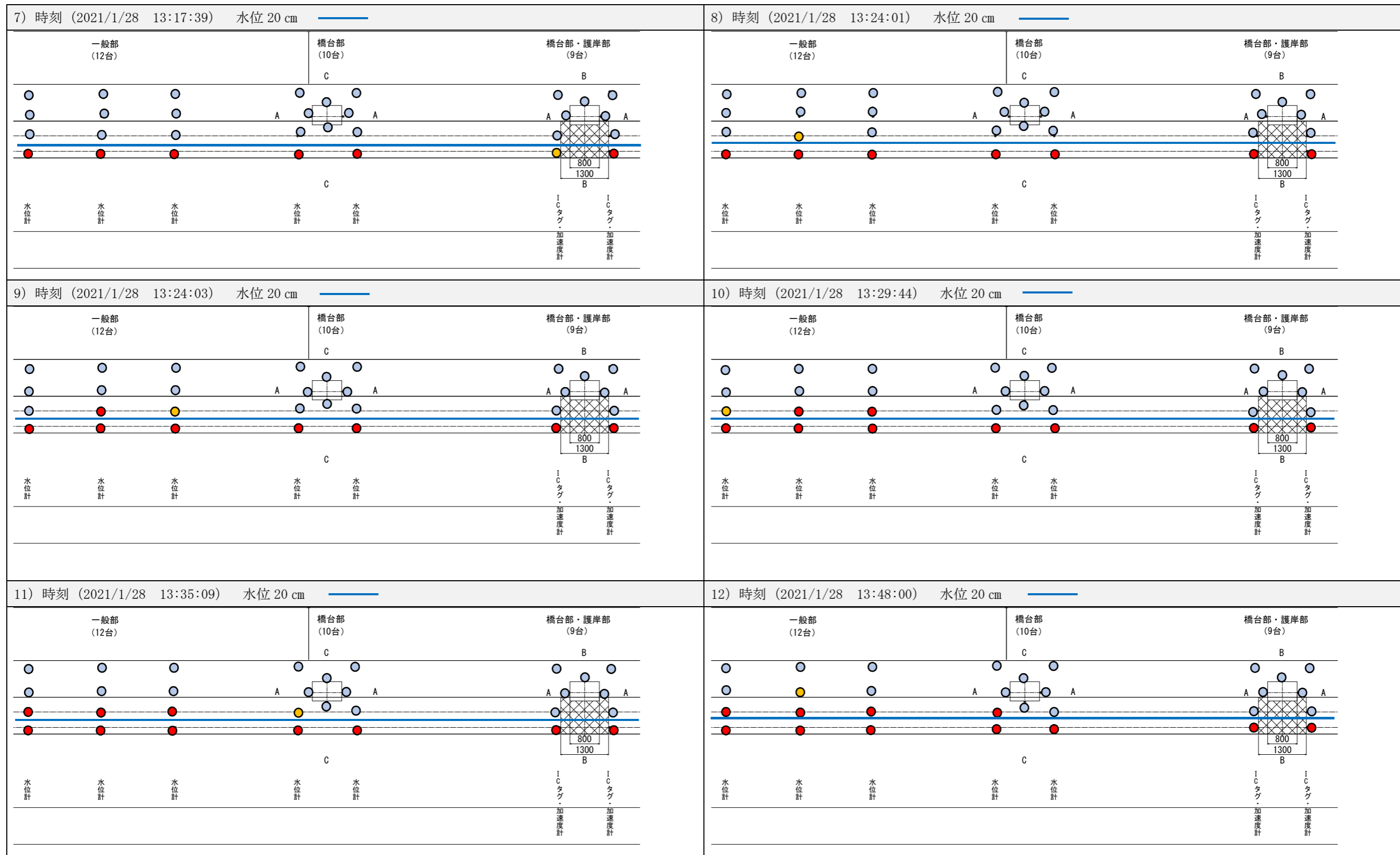


図 77 河岸侵食試験の検知時系列表示 (●: 検知 ●: 既検知 ○: 未検知) 2/4

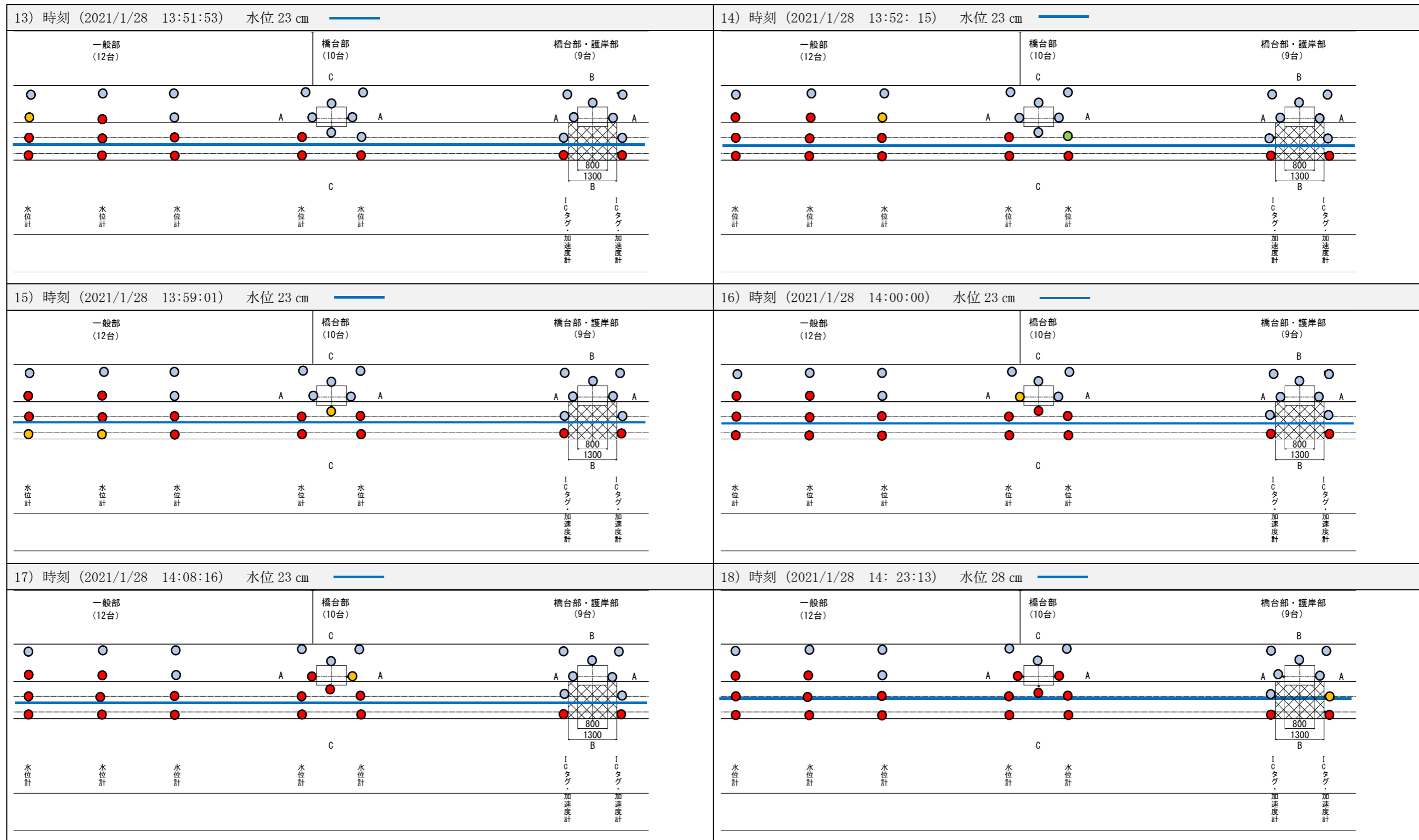


図 78 河岸侵食試験の検知時系列表示 (●: 検知 ●: 既検知 ○: 未検知) 3/4

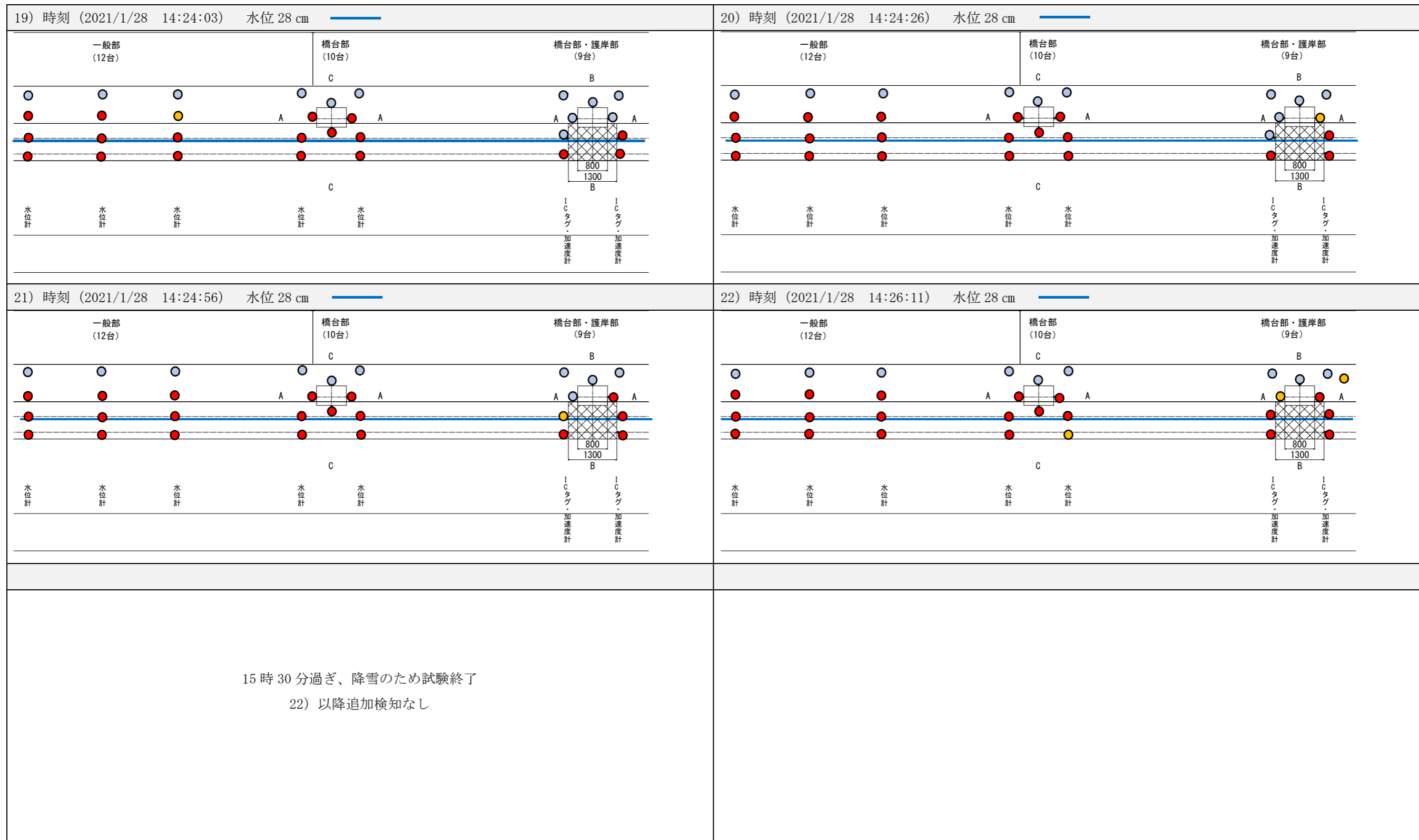


図 79 河岸侵食試験の検知時系列表示 (●: 検知 ●: 既検知 ○: 未検知) 4/4

(7)まとめ

1) 公募要件

今回の公募において与えられた要件は、下記のとおりであったが、カプセルセンサは全項目を満足したと判断する。

- ① 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、その個所を即時に特定できること。
- ② 実験での性能を確認できること。
- ③ 昼夜・天候を問わず、変状を検知可能なこと。
- ④ 計測装置およびシステムに耐候性と耐久性があること。
- ⑤ 天端高の低下の過程または天端幅の欠損の過程を連続的に検知できること。
- ⑥ 機器の設置、電源供給、通信方法等。

2) センサ機能の確認

下記のように、堤防変状検知の有効性と情報伝達の実現性を確認した。

(アンダーライン部が、今回公募における要件)

- ① センサ流出後、数秒程度で検知（無線を受信）し、検知の即時性を確認した。
- ② 無線 ID*は7桁で、同一エリア内の様々な監視対象にセンサが設置できる。
*無線機個別識別番号
- ③ センサの電池は、周辺の土砂移動で稼働を開始する。長期間埋設して使用できることを確認した。
- ④ センサの材料は、耐候性、耐久性を考慮し、ポリカーボネートを採用した。
- ⑤ 護岸、構造物周囲の動きもセンサで検知し、堤防本体の他、河川構造物周囲の変状検知も可能であることを確認した。
- ⑥ 6 cmの球体埋設で設置が容易である。また増設も容易に行え、施工が簡単であり、ローコスト性を確認した。
- ⑦ 無線のため夜間・降雨に関わらず検知する。24時間連続した施設監視が可能である。
- ⑧ 埋設で地表に露出物が無く、河川利用者や河川維持管理に支障を与えないことを確認した。
- ⑨ 河川以外に、砂防や海岸などの土砂移動検知にも適用が可能である。
- ⑩ 機器の設置、電源供給、通信方法は、本報告書に示すとおりで即実用に供せるものである。

(8)現場実装へ向けた考察

現場実装へ向けた考察として、以下の整理を行った。

1) カプセル構造

- ・カプセルの材料は、内部にセンサ用途、回収先・方法の表示のため、透明なポリカーボネートを使用している。そのため、河川水へ流出時の目視確認が困難であることが判った。これは、越水試験での粘性土が混濁した水とその泡立ちの中で顕著であった。流出中のセンサを図 80 に示した。
- ・対応方法として、カプセルへの薄いカラー着色や内部に LED 表示灯の実装がある。LED を実装すれば、夜間の監視、カメラの監視も可能となり、有効な手段と考える。発光色は、海上の表示灯色や第三者への影響を考慮し青色が適当と考える。



図 80 流出中のセンサ (円中央)

2) 埋設深さと間隔

- ・河川センサとしては埋設という前例のないシステムのため基準は無いが、破堤する堤防延長が数十 m 程度とすれば、1m 間隔の設置が推奨される。
- ・深さは土被り 4~6 cm 程度とし試験を行った。維持管理を踏まえた上で、決定が必要である。

3) 施工記録

- ・確実な埋設記録作成が重要である。エクセルで簡単に作成・記録ができるソフトの開発を行い、提供の予定である。また、そのデータをデータベースにそのまま入力できるシステムが望ましい。

4) 施工工具

- ・カプセルセンサは約 10 cm 程度の深さの掘削孔で天端等に埋設する。掘削を効率良く行うには、市販のハンディーオーガ等の利用がある。この機械に一定直径と深さを決定するアダプタを組み合わせ効率良く、確実な工法とする必要がある。

5) 埋設表示

- ・維持管理時などにおいて、センサが埋設されていることが判るよう、埋設杭や埋設ピンの標準化が必要である。

6) 通信方式

- ・今回使用した無線機は特定小電力の製品である。この無線機は任意に監視エリア設定ができるため、河川の上下流のどのエリアでもシステム構築ができる。
- ・LPWA* (Low Power Wide Area) 無線には、クラウドを利用し、更にローコストで提供されている製品もある。既にガス検針など幅広く実用化されており更なるローコストでシステム構築ができる可能性を持っている。セキュリティ面も踏まえ検討を行う予定である。

* LPWAとは「Low Power Wide Area」の略で、「低消費電力で長距離の通信」ができる無線通信技術の総称のことで、最大伝送速度は100bps*程度、伝送距離は最大50 km程度です。

*bps (ビット毎秒) は、データ転送レート (JISの情報処理用語としてはビット速度、bit rate¹⁾) の単位である。1秒間にデータ転送路上の仮想の、または物理的な地点を通過した (すなわち転送された) ビット数と定義される。

7) センサの回収

- ・流出したセンサの確実な回収方法の検討と実行が必要である。そのために、センサ内にセンサ目的と回収先・方法を表記し、また、設置する流域の自治体、消防団や漁協への事前周知を行う必要がある。

8) コスト縮減

以上からコスト縮減への課題は以下のとおりとなる。

- ・掘削機械の改良の検討で施工費の縮減を図る。
- ・コスト比重が高い無線機に低価格のLPWA方式無線機を採用する。
- ・標準的な表示方式を決め、表示ソフト費用の軽減を図る。
- ・データ処理、表示の一元管理を行い、管理者にはWEB配信、メール配信で行い、収集処理表機器費・ソフト費の縮減を図る。