

河川堤防の変状検知システム実験結果 (GNSS による検知)

令和3年3月
清水建設株式会社

清水建設株式会社

・GNSS 測位システムの概要

GNSS (Global Navigation Satellite System) 測位とは、測位衛星を4機用いて、位置情報 (X,Y,Z)を取得することを言う。観測したい場所と測位衛星4機との距離をそれぞれ計算し、その4つの距離が交わる点を数学的に割り出すことで観測点のおよその位置がわかる。

測位衛星と観測したい場所までの距離 = 電波の速度 × 電波伝搬時間

- ・ 電波速度 = 299,792,458m/秒
- ・ 電波伝搬時間 = 測位衛星から出た電波が観測点に設置した受信機に届くまでの時間

測位衛星から送信された電波には送信時刻の情報が入っており、送信時刻と観測点に設置した受信機に電波が到着した時刻との差から電波伝搬時間がわかる。計算上は3つの距離情報があれば観測点の位置を特定できるが、受信機側の時刻には誤差が含まれることがあるので、3機だけの衛星では位置情報にズレが生じることがある。そのわずかな誤差補正のため1機の測位衛星の情報を使う。

・GNSS 測位システムの原理

【解析方法】

測位衛星を用いた位置解析は単独測位、相対測位等様々あるが、今回は変位結果の迅速な出力が要求されるため、RTK(Real-Time-Kinematic)測位を用いた(図1)。RTK 測位とは既知点の基準局と未知点の観測局に設置したアンテナで同時に測位衛星からの信号を受信し、基準局で取得した補正信号を、無線装置等を用いて観測局に転送し、観測局側で即時に解析し位置を決定する。精度の向上のため、今回は疑似距離ではなく搬送波位相値を採用した。搬送波位相値を用いると静止測位で最大、波長約19cmの100分の1の精度で観測可能となる。RTK 測位の場合は平面、高さともに誤差1cm程度で位置決定が可能とされている。

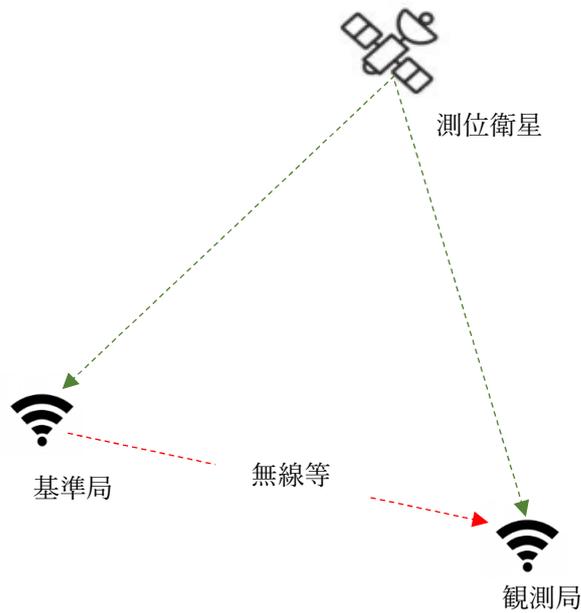


図1 RTK 測位

【GNSS 観測システムの機器構成】

基準局、観測局ともに今回の実験に用いた機器構成は以下の通りである。

- アンテナ : ANN-MB-002 周波数対応 GPS アンテナ (ublox 社製)
- 受信機 : F9P (ublox 社製)
- 機器収納 Box : GR-Box (図 2)
- 消費電力 : 最大 10W、定常時 4 ~ 8 W

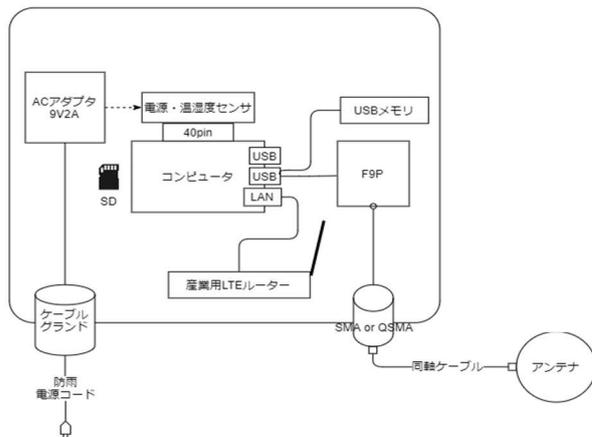


図2 GR-Box

【解析結果の出力及び通信方法】

基準局、観測局が取得した 1Hz データは LTE にて AWS (アマゾン・Web・サービス) のクラウドに送信し、クラウド内で RTK 解析し、解析結果をブラウザで表示 (図 3) する。1Hz データをリアルタイムに AWS に送信し解析・出力した場合、通信遮断によるデータ欠損が懸念される。そのため今回の実験では取得データの堅牢保存を優先し、6 分間毎に取得したデータを圧縮して AWS に送信、保存、解凍、解析する方法を採用した。

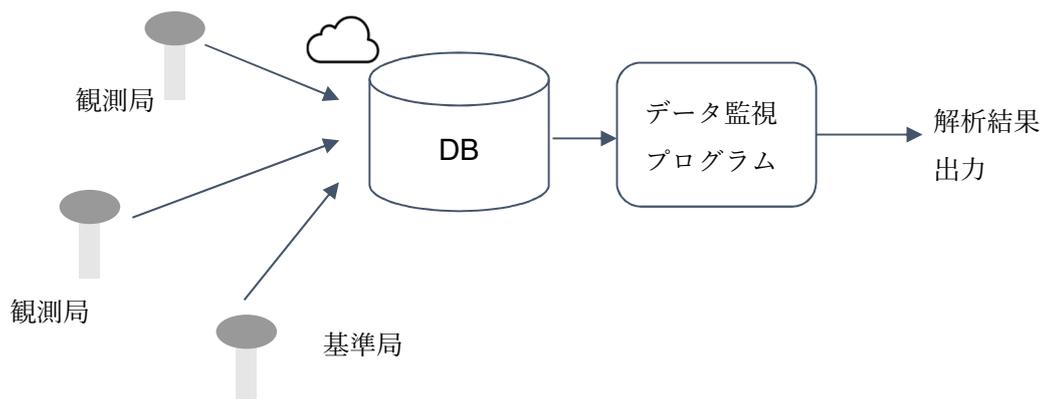
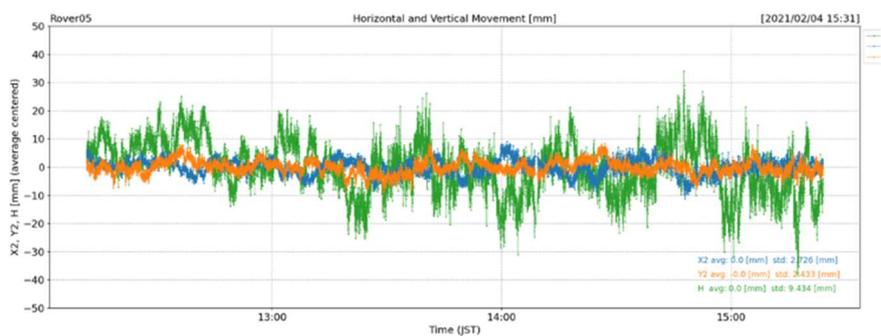


図 3 観測データの取得から出力までの流れ

図 4 は今回の実験用に仮設した解析結果の出力ブラウザ、図 5 はその出力例となっている。6 分毎に過去の出力結果に新たな解析結果が反映されグラフ表示される。1Hz データ毎の時刻は GPS 時計で管理、出力される。



図 4 仮設した解析結果の出力ブラウザ画面



[縦軸；変位量 (mm)、横軸；経過時間 (日本時間)]

	A	B	C	D	E
1	観測日時 (GPS時間)	経過秒数	X2[m]	Y2[m]	H(標高)[m]
2	2021/02/03-11:54:00.000000	2861640	-134.3869221	-89.10503563	29.327
3	2021/02/03-11:54:01.000000	2861641	-134.3884663	-89.10359850	29.3265
4	2021/02/03-11:54:02.000000	2861642	-134.3867951	-89.10240811	29.3318
5	2021/02/03-11:54:03.000000	2861643	-134.3874557	-89.10064071	29.3316
6	2021/02/03-11:54:04.000000	2861644	-134.3878694	-89.10116876	29.3294
7	2021/02/03-11:54:05.000000	2861645	-134.3858552	-89.10280367	29.3331
8	2021/02/03-11:54:06.000000	2861646	-134.3890071	-89.10124318	29.3302
9	2021/02/03-11:54:07.000000	2861647	-134.388588	-89.09918543	29.3360
10	2021/02/03-11:54:08.000000	2861648	-134.3867371	-89.10262404	29.3297
11	2021/02/03-11:54:09.000000	2861649	-134.3860475	-89.10174395	29.3303
12	2021/02/03-11:54:10.000000	2861650	-134.3869494	-89.10166231	29.3256

図5 解析結果の出力例

(観測場所に適した設定での解析を行う前の時系列グラフ及び CSV ファイル等)

【使用電源】

本システムは AC100-240V の電源で稼働する。今回は国土技術政策総合研究所に準備いただいた電工ドラム (図6) の AC100 電源を利用した。



図6 電工ドラム (黄色の丸)

【技術の特徴】

・当社独自のアルゴリズムを用いた GNSS 測位システムの採用

一般に GNSS を用いた測位は、仰角 15° 以上で上空 360° が見渡せるオープンスカイ環境でのみ利用される。弊社が新たに開発した GNSS 観測機器は、小型・低コスト・高精度な機器構成であり、解析アルゴリズムは、構造物（例えばビル）の壁面に取り付けても計測可能な新技術である。既に様々な土木現場の急峻な法面監視、土留め監視にも採用実績があることから、急峻な法面を持つ河川堤防の監視にも活用可能と考えられる。

・基準局について

観測には基準点と観測局が必要となる。基準局を堤防近傍に設置し、浸水した場合は観測が困難となるため、国土技術政策総合研究所の管轄する機関や河川管理事務所等の屋上に設置することで観測を安定させる。基準局 1 点につき、半径 10km 以内にある全ての観測局の RTK 測位（観測）が昼夜を問わず可能となる。また、本システムは、IP55 の防水性能を満たしており、豪雨でも問題は生じない（既に現場で実証済み）。台風通過時の、測位衛星の電波遅延の影響も受けない。

・モニタリング

GNSS 測位は変位の検出のみならず位置を特定する機能も有しており、崩壊した堤防の位置の特定が容易となる。基準点設置時の初期座標をセミダイナミック補正し、測地座標に変換することで、国土地理院地図等への反映も可能である。今回実験に参加した企業、技術においてもその観測システムの設置場所の特定にも本 GNSS 機器は活用可能である。

・異常検知について

今回の実験において、GNSS 測位（RTK）は傾斜や堤防の崩壊（機器設置個所）を同時に検知することができた。GPS 時計で時刻も管理しており、秒単位での異常検知も出力可能となる。

・水中での利用について

GNSS 測位は水中を電波が透過しないため、水中での測位は困難である。観測機器が平常稼働している場合はリアルタイムの FIX 解が得られるが、水位が上がり、観測局に水をかぶる状況になると FIX 解の他に Float 解が混在し、水位の上昇とともに Float 解は増え、最終的に水をかぶった段階で解が得られなくなる。一方、この特徴を生かすことで、越水状況を知るための水位計として活用することも可能だが、LTE 等による通信は困難となる可能性がある。尚、システム配置にもよるが、耐水性のバッテリーの追加搭載が必要と考える。

・出力画面について

既に様々な現場で本システムを採用し、出力画面として、図 7 のような時系列グラフや、アンテナ中心位置が設置当初からどちらにどの程度変位しているかを表示させることができ、一般の方でも異常を客観的に理解できる。図 7 は実際の現場の法面や土留めの動態観測で使用している出力例である。また、閾値を設定し傾斜等が発生した場合にメールや、監視システム等にアラートを送信することも可能である。

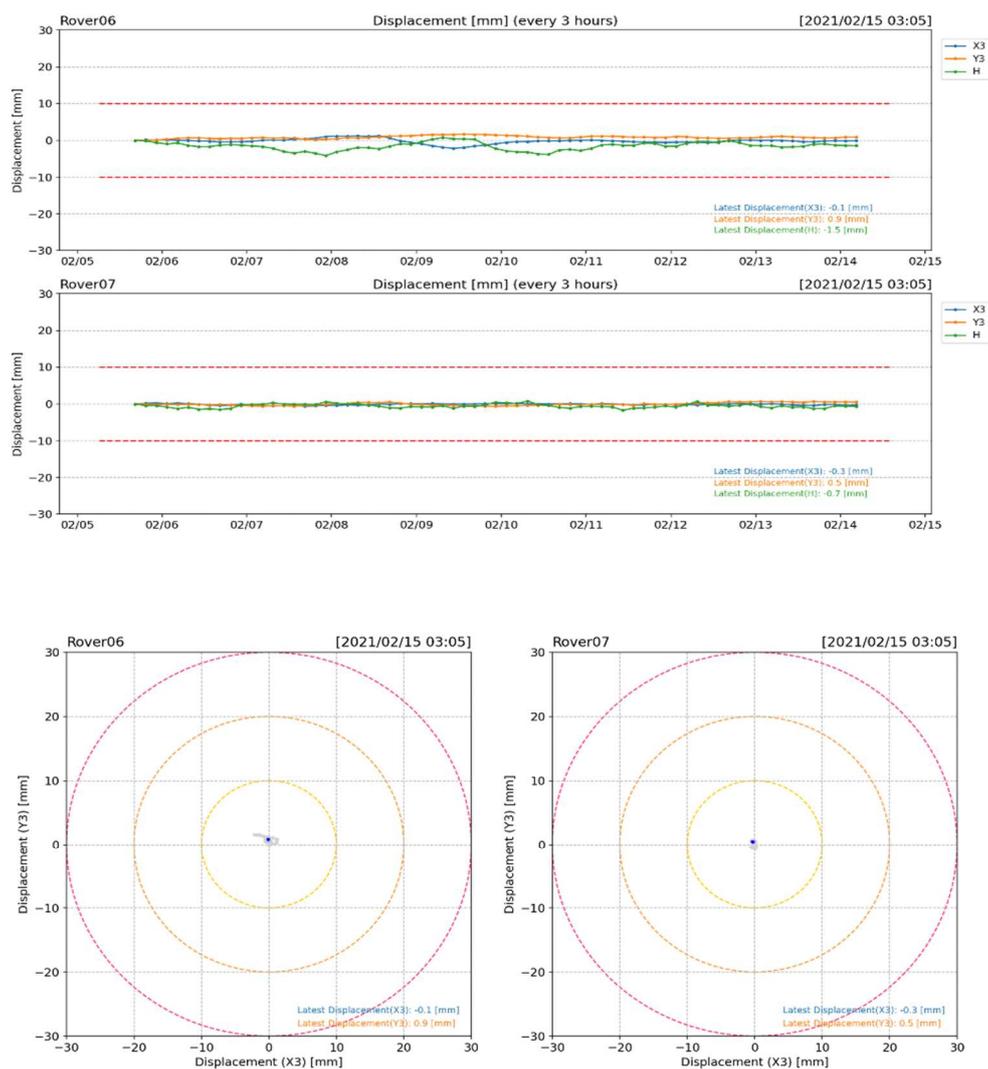


図 7 時系列グラフ、XY 平面グラフ
 (法面測位等で用いている出力例)

【現場実装で想定する配置方法】

・導入条件

導入コストは以下の条件で想定し、条件から外れる場合は別途協議・決定するものとする。

- ・電源 100V～240V の供給が可能
- ・観測点は、5 箇所/100m
- ・モニタリング方法は、既存の手法を用いる（参考：図 7）
- ・維持管理については、盗難、破損等を考慮しない
- ・基準局は別途設置
- ・通信料は別途（データ量による）
- ・交通費、宿泊費は別途

・設置導入コスト

100mあたりの設置導入コストの想定

材工費用：約 290 万円

・維持管理コスト

1 システムの維持管理コストの想定

A P I システム使用料：24 万円/年間（1 システム）

保守契約サービス：12 万円/年間（100mを想定）

※保守契約サービス：システムに故障等があった場合に対応するサービス

【観測システムの管理、維持管理方法】

観測局のヘルスチェックは、遠隔で観測できる。また、温湿度・気圧センサーを搭載し、台風が近接した際の急激な気圧低下や湿度上昇も検知することが可能である。維持管理方法は、設置後、データをモニタリングし、データの喪失や異常値などがあった場合の点検、及び故障時の部品交換程度を想定しているが、歩行者等の第 3 者が機器を横転させた、盗難にあった際には個別の対応が必要となる。機器が横転した場合は、電源が供給されていればアンテナの傾斜等からその状態を推察することが可能である。

【実験の計画】

・実験の目的

今回の実験の目的は「堤防自体の構造的な変状の検知」である。そのためプラスチック杭や単管上部に取付けた観測局を堤防天端から深さ 20cm に埋込み、水流に伴う天端の侵食が深さ 20cm 前後に到達した段階、もしくは 20cm を超える深い部分で変状が発生した場合に傾斜や転倒等のような挙動を示すか、その変状を正しく捉えられるかの確認を行う。

・実験日時、場所

実験日時

- ・越水実験 2021 年 2 月 3 日 13 時～
- ・侵食実験 2021 年 2 月 4 日 13 時～

実験場所

- ・国土技術政策総合研究所、実験水路

・システムの配置

基準局は実験者用仮設小屋の屋根上に設置した。基準局及び観測局の全体配置場所を図 8 に示す。

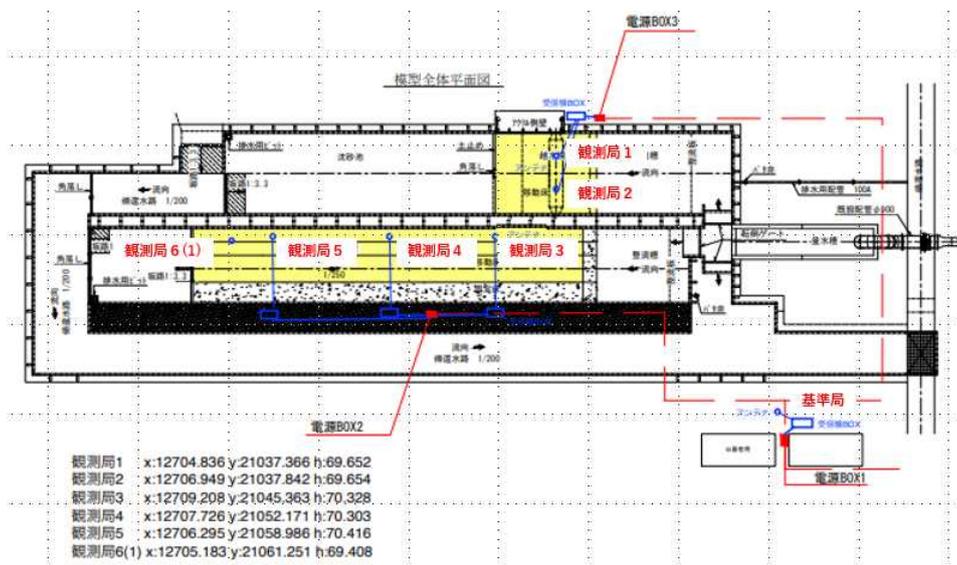


図 8 基準局、観測局の配置場所

・越水実験における観測局の配置場所

越水実験時の観測局の配置場所を図9に示す（図面では赤丸位置）。プラスチック杭の上部に観測局1、2を取付け、堤防法面天端（平坦部）の中央部に均等距離に設置した。プラスチック杭の埋込み長は天端から20cmである。観測局は転落時に流されないよう、紐で縛り手すりに固定した。

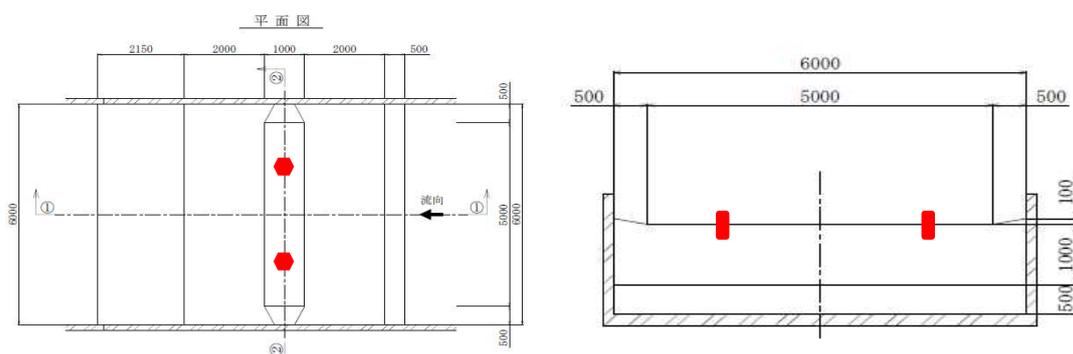


図9 観測局の配置場所



図9 観測局の配置場所

・侵食実験における観測局の配置場所

(1) 一般部

侵食実験（一般部）の観測局5の設置場所を図10に示す（写真、図面の赤丸）。単管の中心部は法肩から15cm手すり寄りとした。

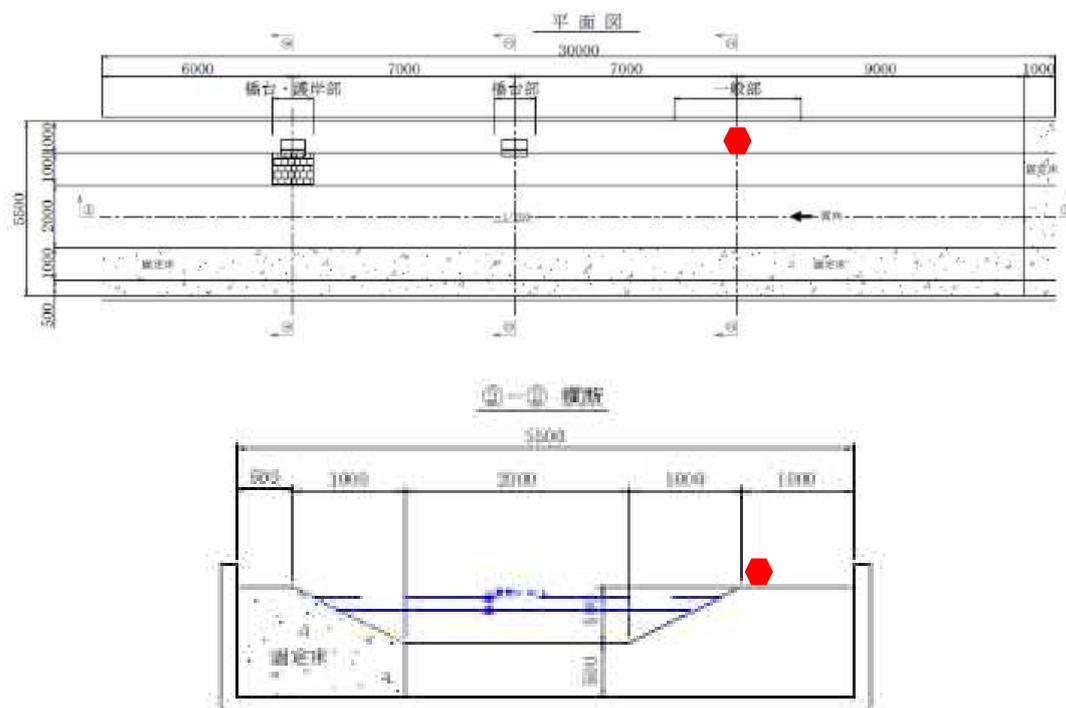


図10 観測局5

(2) 一般部・追加実験

上記(1)で観測局の傾斜や横転が観測されなかったため、当初設置を予定していたプラスチック杭に観測局6①を取り付け、残された法面天端に急遽設置した(図11)。設置場所は手すりから20cm流水側、埋込み長は20cmである。

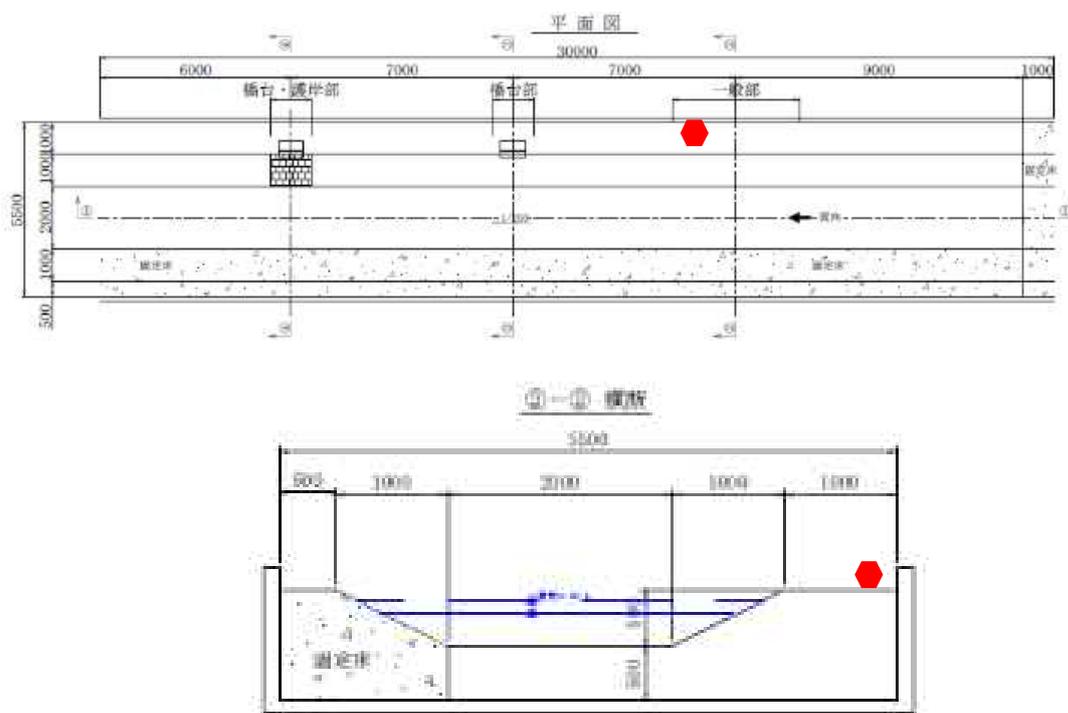


図11 観測局6①

(3) 橋台部

侵食実験（橋台部）の観測局4の設置場所を図12に示す（写真、図面の赤丸）。コンクリート製橋台への単管・観測局は図12の治具を使用した。

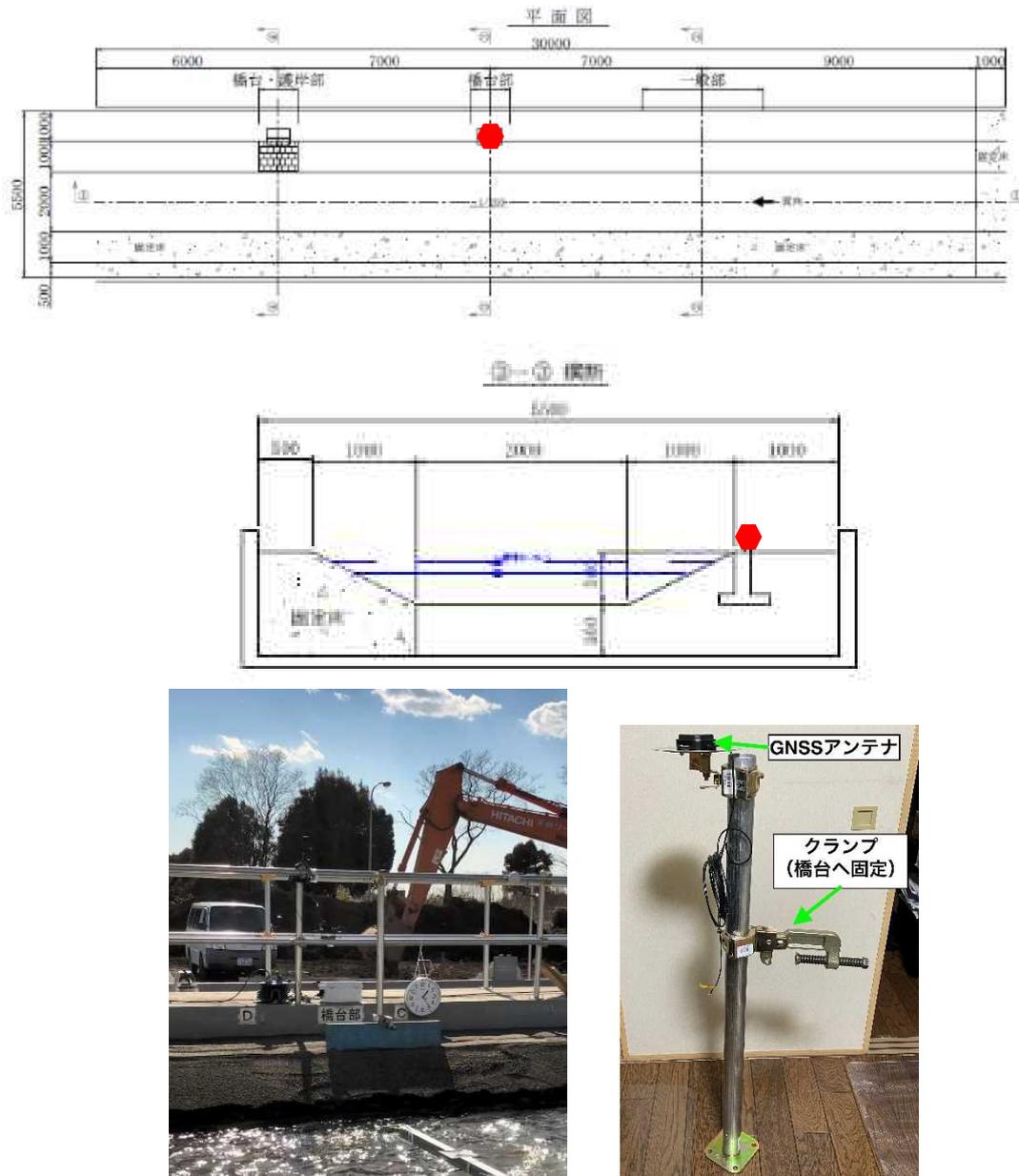


図12 観測局4及び橋台への取付け治具

(4) 橋台／護岸部

侵食実験（橋台／護岸部）の観測局3の写真を図13に示す（写真、図面の赤丸）。コンクリート製橋台への単管・観測局は橋台部と同様の治具を使用した。

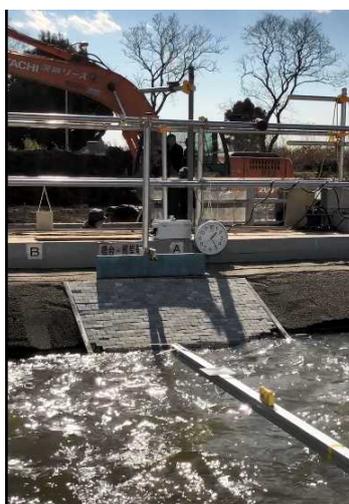
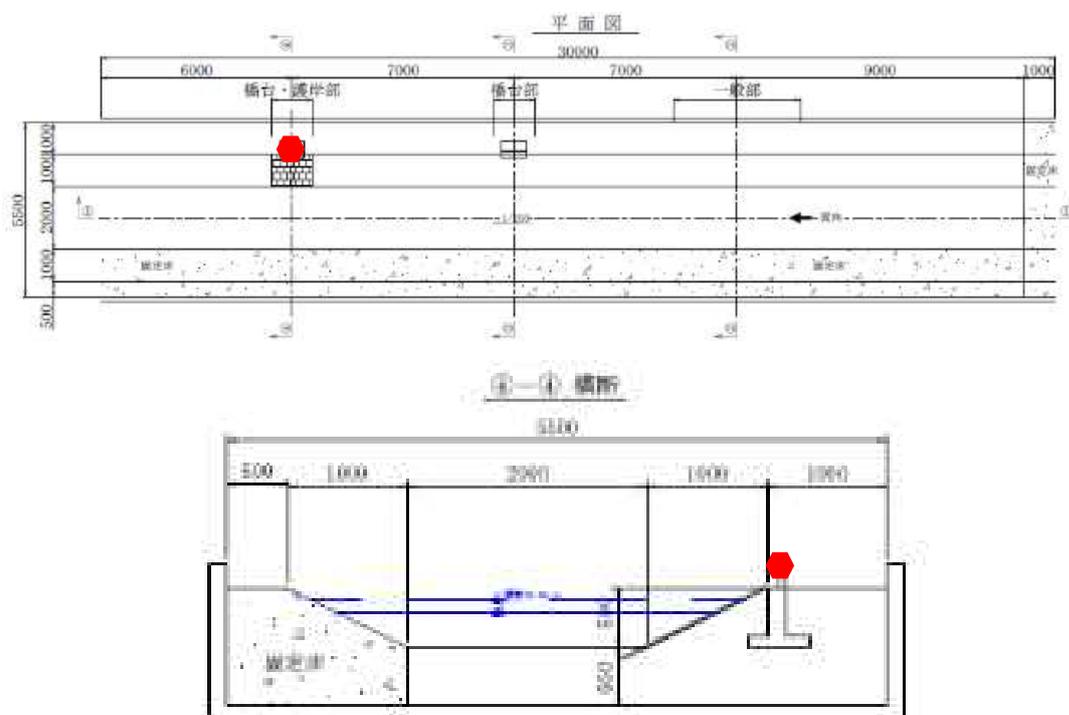


図13 観測局3及び橋台への取付け治具

【実験結果】

・用語の説明

○時系列変位グラフで示す東西・南北・高さ方向の定義

測位で得られる位置データは緯度・経度・楕円体高で出力されるため、現地における方角を定義する。図 14 は国の定める測地座標系（平面図直角座標系）である。真北が X、真東が Y である。つくば地域は 9 系に属する。



図 14 平面図直角座標系

図 15 は実験前に入手した水路 P1、P2 の平面図直角座標系の座標である。この水路の長手方向(図 15 の P1、P2)を実際の平面図直角座標系にプロットすると、図 16 に示すように 11.513deg の傾きがあることがわかる。そこで観測局の傾斜や横転方向を視覚的にも解釈できるよう、本実験施設用のローカル平面図直角座標系として、P1 と P2 を結ぶ線と方向を X2（南北）、それに直行する方向を Y2（東西）と定義する。X2 のプラスが北、マイナスが南、Y2 のプラスが東、マイナスが西となる。また、観測点の時系列変位グラフは縦軸が変位置、横軸が経過時間であるが、観測点の初期設置座標を変位置 0 と定義する。

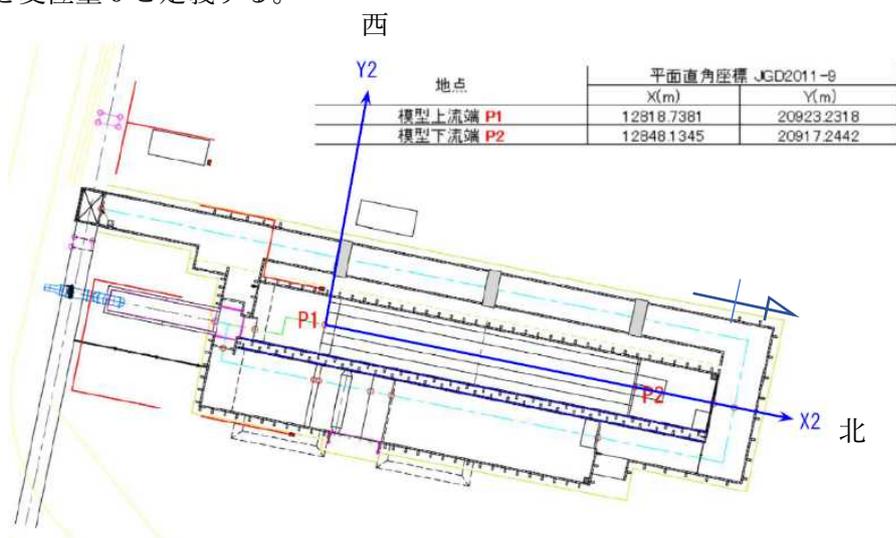


図 15 水路の方向

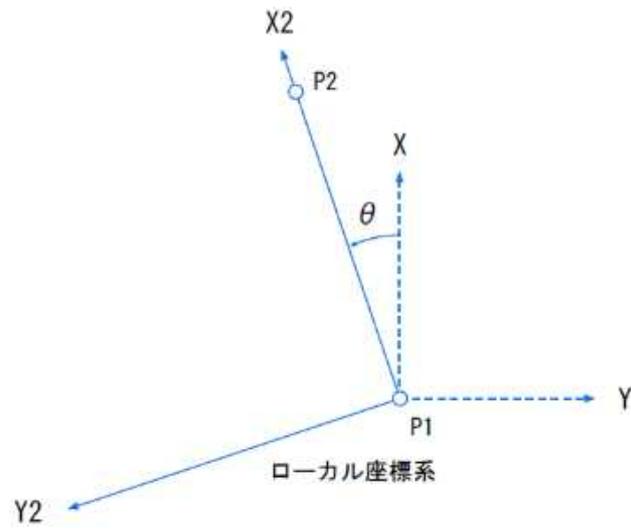


図 16 平面直角座標系における水路の傾き ($\theta = 11.513\text{deg}$)

・実験結果

(1) 越水実験（観測局 1）

観測局 1 は図 17（右）のように、越水に伴う堤内地側の侵食が進み天端部の一部の崩壊（図 17 の赤丸）とともに堤内地側に転落、水没した。図 18 のように、観測局 1 は転落と同時に堤内地側に流されないよう紐を引き上げ、手すりに固定したが、アンテナは水没した状態にあった。

図 19a～c は観測局 1 の時系列変位グラフである。堤内地側、侵食実験施設側への沈下が確認されている。その時間は、図 20 の CSV ファイルより 14 時 1 分 41 秒である。写真内の時計は 14 時 1 分 22 秒を示している。その時間以降はアンテナが水没したため、図 21 の通り測位解はフロート解に変化している。図 21 では FIX 解が 1、フロート解が 2 で表示される。電波は水中を透過しないため、アンテナの水没がフロート解となった原因である。



図 17 観測局 1 の挙動
(左；転落前、右；転落時)



図 18 観測局 1（転落後、引き上げ固定）

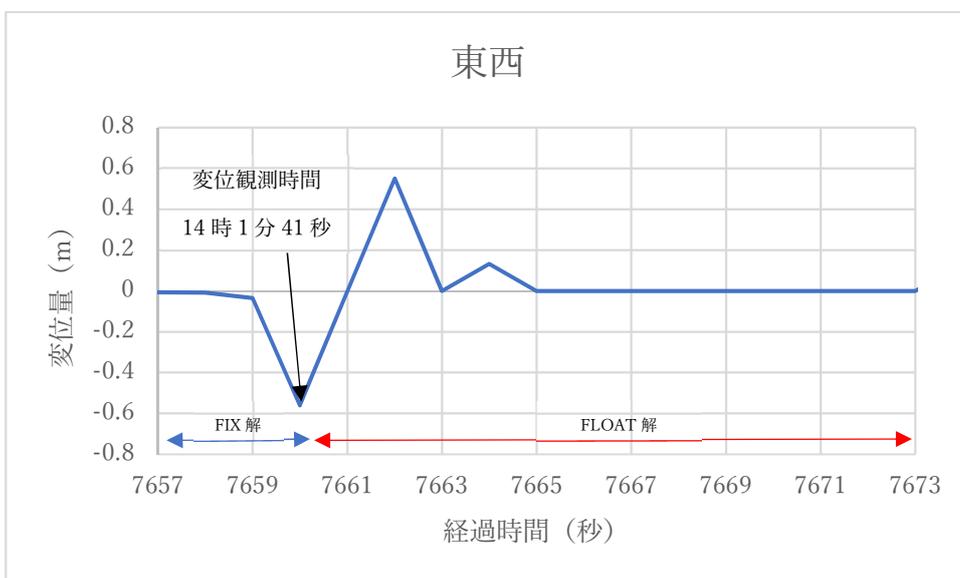
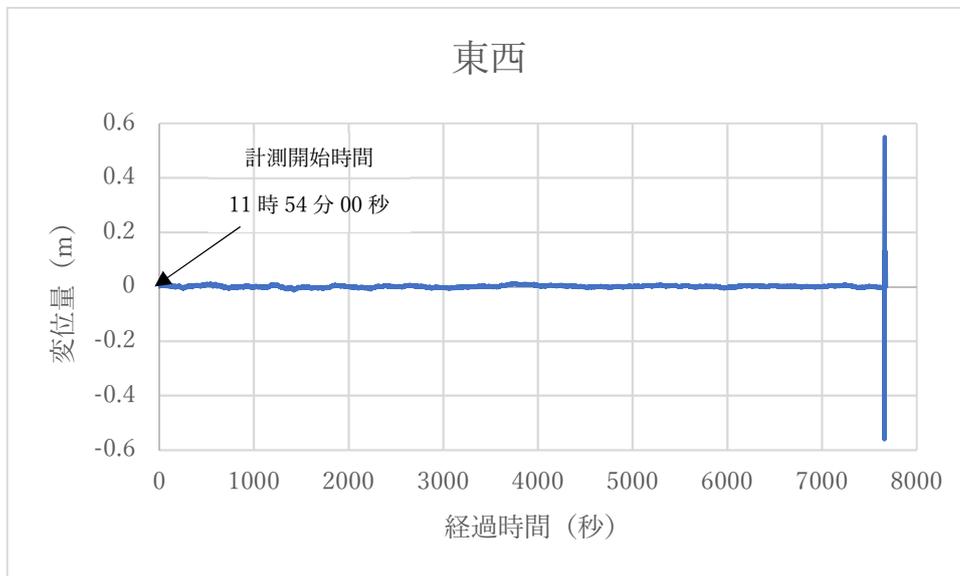


図 19a 観測局 1 の東西方向時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；変位観測時の拡大グラフ)

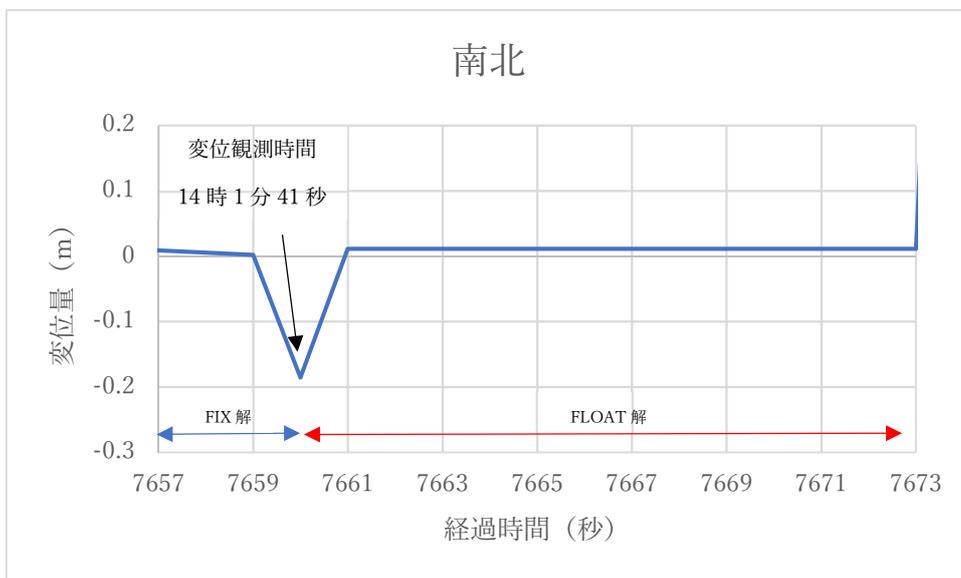
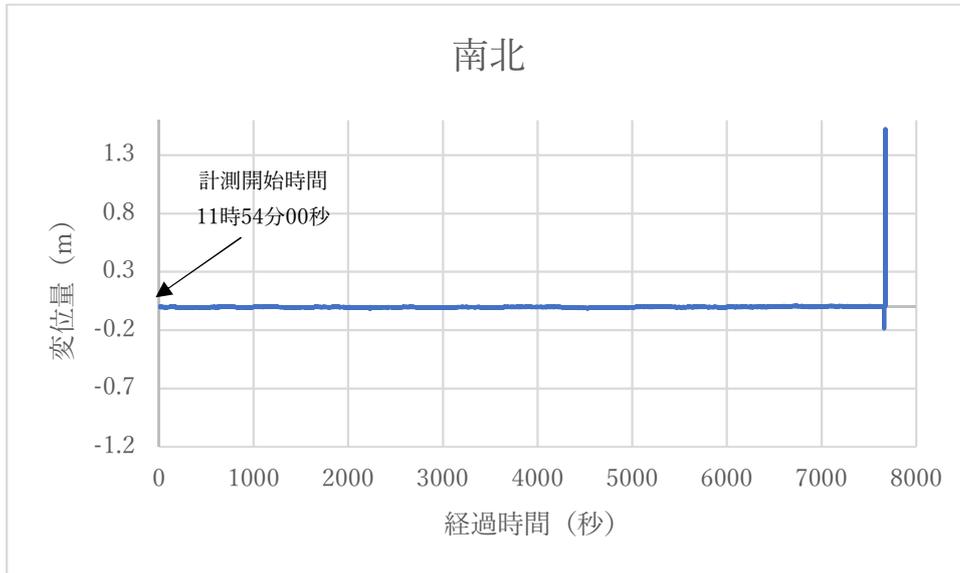


図 19b 観測局 1 の南北方向時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；変位観測時の拡大グラフ)

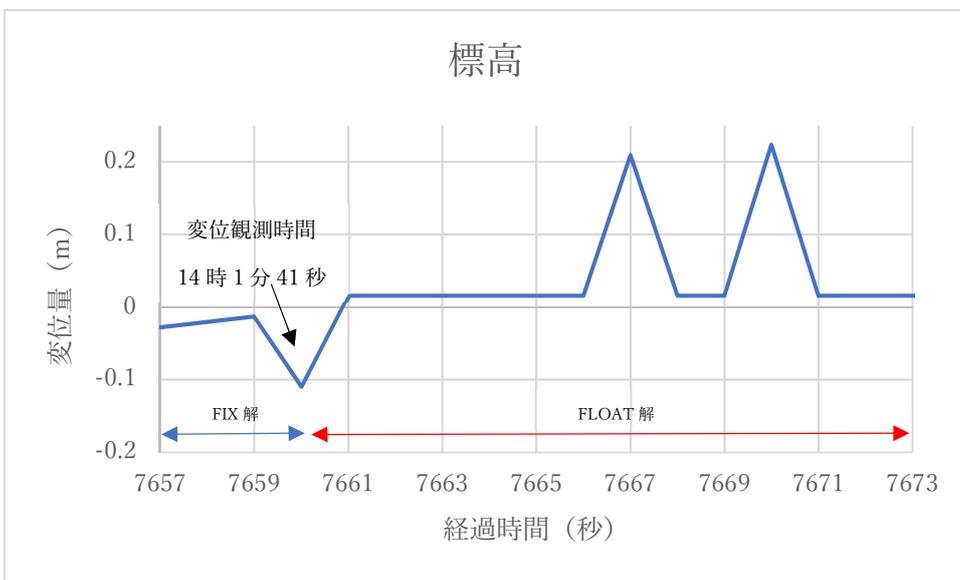
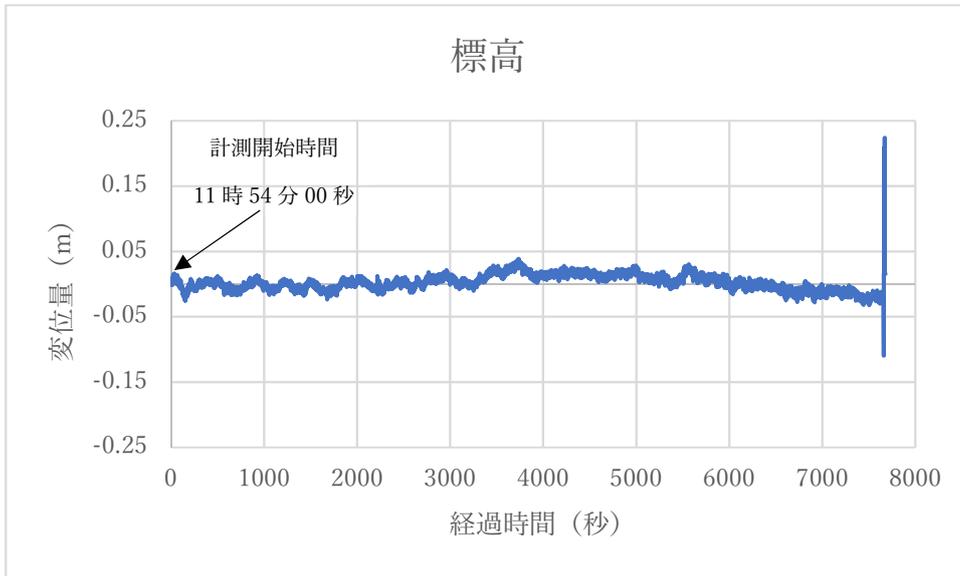


図 19c 観測局 1 の標高時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；変位観測時の拡大グラフ)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
7649	2021/02/03-14:01:31.000000	7650	0.00381431	-0.00281798	-0.0168				
7650	2021/02/03-14:01:32.000000	7651	0.00472157	-0.00136993	-0.0222				
7651	2021/02/03-14:01:33.000000	7652	0.00336609	-0.00201231	-0.0141				
7652	2021/02/03-14:01:34.000000	7653	0.00456371	-0.00164393	-0.0191				
7653	2021/02/03-14:01:35.000000	7654	0.00416815	-0.00258389	-0.0191				
7654	2021/02/03-14:01:36.000000	7655	0.00508815	-0.00307744	-0.0171				
7655	2021/02/03-14:01:37.000000	7656	0.00524421	-0.00331334	-0.0205				
7656	2021/02/03-14:01:38.000000	7657	0.00903856	-0.00622931	-0.0278				
7657	2021/02/03-14:01:39.000000	7658	0.00540217	-0.00855203	-0.0205				
7658	2021/02/03-14:01:40.000000	7659	0.00211100	-0.03523015	-0.0130				
7659	2021/02/03-14:01:41.000000	7660	-0.18588511	-0.56088471	-0.1098				
7660	2021/02/03-14:05:12.000000	7871	0.01118533	3.7720E-05	0.0156				
7661	2021/02/03-14:05:18.000000	7877	0.01118533	0.55095493	0.0156				
7662	2021/02/03-14:07:17.000000	7996	0.01118533	3.7720E-05	0.0156				
7663	2021/02/03-14:07:42.000000	8021	0.01118533	1.3183E-01	0.0156				
7664	2021/02/03-14:16:04.000000	8523	0.01118533	3.7720E-05	0.0156				
7665	2021/02/03-14:19:04.000000	8703	0.01118533	3.7720E-05	0.0156				

図 20 CSV ファイルより抽出した変位観測時間

elapsed(sec)	latitude(deg)	longitude(deg)	height(m)	ns	sdn(m)	sde(m)	sdu(m)	sds(m)	sdu(m)	sdu(m)	age(s)		
2021-02-03104-54:00:00.00	2868840.000	36.114282786	140.067018183	69.6148	1	0.0051	0.0039	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:01:00.00	2868841.000	36.114282798	140.067018188	69.6129	1	0.0051	0.0039	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:02:00.00	2868842.000	36.114282807	140.067018187	69.6067	1	0.0051	0.0039	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:03:00.00	2868843.000	36.114282797	140.067018194	69.6142	1	0.0051	0.0039	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:04:00.00	2868844.000	36.114282798	140.067018185	69.6140	1	0.0051	0.0039	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:05:00.00	2868845.000	36.114282802	140.067018190	69.6130	1	0.0051	0.0039	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:06:00.00	2868846.000	36.114282790	140.067018191	69.6151	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:07:00.00	2868847.000	36.114282820	140.067018179	69.6103	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:08:00.00	2868848.000	36.114282799	140.067018183	69.6084	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:09:00.00	2868849.000	36.114282808	140.067018175	69.6099	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:10:00.00	2868850.000	36.114282806	140.067018177	69.6122	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:11:00.00	2868851.000	36.114282789	140.067018178	69.6189	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:12:00.00	2868852.000	36.114282811	140.067018194	69.6098	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:13:00.00	2868853.000	36.114282794	140.067018195	69.6149	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:14:00.00	2868854.000	36.114282814	140.067018186	69.6035	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:15:00.00	2868855.000	36.114282797	140.067018191	69.6167	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:16:00.00	2868856.000	36.114282806	140.067018193	69.6096	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:17:00.00	2868857.000	36.114282791	140.067018184	69.6127	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:18:00.00	2868858.000	36.114282795	140.067018197	69.6127	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:19:00.00	2868859.000	36.114282775	140.067018194	69.6170	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:20:00.00	2868860.000	36.114282776	140.067018178	69.6177	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:21:00.00	2868861.000	36.114282802	140.067018187	69.6106	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:22:00.00	2868862.000	36.114282802	140.067018188	69.6129	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03104-54:23:00.00	2868863.000	36.114282805	140.067018185	69.6200	1	0.0051	0.0040	0.0158	-0.0027	0.0045	-0.0076	-0.00	
2021-02-03105-01:33:00.00	2869293.000	36.114282788	140.067018262	69.6125	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:34:00.00	2869294.000	36.114282798	140.067018255	69.6075	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:35:00.00	2869295.000	36.114282796	140.067018266	69.6075	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:36:00.00	2869296.000	36.114282805	140.067018270	69.6095	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:37:00.00	2869297.000	36.114282807	140.067018272	69.6061	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:38:00.00	2869298.000	36.114282845	140.067018295	69.5988	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:39:00.00	2869299.000	36.114282817	140.067018329	69.6061	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.00	
2021-02-03105-01:40:00.00	2869300.000	36.114282836	140.067018626	69.6136	1	0.0056	0.0041	0.0157	-0.0031	0.0049	-0.0079	-0.01	
2021-02-03105-01:41:00.00	2869301.000	36.114282109	140.067024762	69.5168	1	0.0057	0.0049	0.0162	-0.0032	0.0055	-0.0080	-0.01	
2021-02-03105-02:40:00.00	2869360.000	36.114316360	140.067009569	70.8997	2	0.7191	1.1919	2.2020	2.9862	0.7823	-1.0889	-1.7561	-0.01
2021-02-03105-02:41:00.00	2869361.000	36.114301539	140.067031522	72.4673	2	0.6175	0.4578	1.9658	-0.2215	0.4104	-0.9438	-0.01	
2021-02-03105-02:42:00.00	2869362.000	36.114306161	140.067023853	72.8475	2	0.6570	0.5346	2.0072	-0.0851	0.3214	-0.9743	-0.01	
2021-02-03105-02:43:00.00	2869363.000	36.114380433	140.067017951	33.1323	2	5.3650	1.0904	21.5380	-2.1380	4.2871	-10.6504	-0.01	
2021-02-03105-02:44:00.00	2869364.000	36.114318144	140.067012264	73.0026	2	0.6592	0.4381	1.6323	-0.3553	0.5105	-0.7599	-0.01	
2021-02-03105-02:47:00.00	2869367.000	36.114270543	140.067045421	90.9611	2	1.3729	1.2796	7.2717	-0.5585	-2.5242	-2.0230	-0.01	
2021-02-03105-02:48:00.00	2869368.000	36.114267631	140.067057745	80.1886	2	0.2820	0.7064	3.4038	-0.7033	0.6917	-1.7633	-0.01	
2021-02-03105-02:49:00.00	2869369.000	36.114296348	140.067005074	91.3427	2	0.12191	0.7701	3.7983	-0.4505	0.3823	-2.0314	-0.01	
2021-02-03105-02:50:00.00	2869370.000	36.114297544	140.066998373	91.2394	2	0.1839	0.6672	3.7715	-0.3010	-0.1739	-1.9985	-0.01	
2021-02-03105-02:51:00.00	2869371.000	36.114292675	140.067007409	89.7371	2	1.1569	0.5827	3.7260	-0.0926	-0.2446	-1.9943	-0.01	
2021-02-03105-02:52:00.00	2869372.000	36.114287031	140.067005241	92.2170	2	1.1739	0.6381	3.7501	-0.2448	0.2225	-2.0155	-0.01	
2021-02-03105-02:53:00.00	2869380.000	36.114344552	140.067014317	70.5401	2	0.7599	0.5438	2.3585	-0.2173	-0.1342	-1.2020	-0.01	
2021-02-03105-02:54:00.00	2869374.000	36.114288398	140.067017548	94.1555	2	1.1829	0.5248	3.7735	-0.2467	-0.2151	-1.9996	-0.01	
2021-02-03105-02:56:00.00	2869376.000	36.114283346	140.067020858	92.4870	2	1.1742	0.5074	3.7505	-0.2031	0.1044	-2.0160	-0.01	
2021-02-03105-02:57:00.00	2869377.000	36.114288611	140.067017142	90.9216	2	1.1962	0.5456	3.7822	-0.2946	0.3296	-2.0436	-0.01	
2021-02-03105-02:58:00.00	2869378.000	36.114291765	140.067005326	90.3425	2	1.2029	0.7198	3.7916	-0.3806	0.4804	-2.0519	-0.01	
2021-02-03105-02:59:00.00	2869379.000	36.114342064	140.067020405	71.3204	2	0.7519	0.5070	2.3559	-0.1599	-0.1996	-1.9968	-0.01	
2021-02-03105-03:00:00.00	2869380.000	36.114344552	140.067014317	70.5401	2	0.7599	0.5438	2.3585	-0.2173	-0.1342	-1.2020	-0.01	
2021-02-03105-03:01:00.00	2869381.000	36.114344677	140.067019485	70.0437	2	0.7521	0.5070	2.3559	-0.1602	-0.1991	-1.9771	-0.01	
2021-02-03105-03:02:00.00	2869382.000	36.114299560	140.067001868	87.2410	2	1.1769	0.6381	3.7539	-0.2458	0.2235	-2.0195	-0.01	
2021-02-03105-03:03:00.00	2869383.000	36.114340255	140.067030287	71.7658	2	0.9451	0.4508	3.0115	-0.3363	0.5322	-1.5855	-0.01	

図 21 14 時 01 分 22 秒以降の測位解の変化 (UTC 時間)
(変位発生後、FIX 解表示の 1 がフロート解表示の 2 に変化)

(2) 越水実験（観測局 2）

観測局 2 の挙動を図 22 に示す。

- a. 観測局 1 が設置されていた天端部の一部が崩壊後、上下流の越流水が集中し、天端部の崩壊が加速され、決壊口が拡大。



- b. 上下流の越流水がさらに増え、天端部の侵食・崩壊が加速された後、観測局 2 周辺の天端部は割れ、堤内地側に傾斜し沈下。



- c. 観測局 2 を設置した天端部の崩壊とともに、観測局 2 は瞬時（1 秒未満）に堤内地側に転落・水没



図 22 観測局 2 の挙動

図 23a～c は観測局 2 の時系列変位グラフである。図 22「観測局 2 の挙動の b 項」で説明した堤内地側への傾斜・沈下（変状）が確認されている。一方、図 22「観測局 2 の挙動の c 項」で説明した観測局 2 は転落前の西側への小さな変位は確認されたものの、転落・水没は 1 秒未満であったため、水没時の測位解が出せず、転落の変位（高さ）をグラフに表現することはできなかった。

今回 1 Hz でデータを取得したが、1 秒以内での転落・水没等の状況把握には、プラスチック杭の長さを伸ばして水没までの時間を稼ぎその挙動を把握する、もしくは 1 Hz 以上でのデータ取得が必要であることがわかった。

変位が観測された時間は、図 24 の CSV ファイルから、「図 22、観測局 2 の挙動の b 項」が 14 時 43 分 5 秒、「図 22、観測局 2 の挙動の c 項」が 14 時 50 分 52 秒である。写真内の時計は「図 22、観測局 2 の挙動の c 項」の挙動が現れた時間、14 時 50 分 33 秒を示している。

図 25 は「図 22、観測局 2 の挙動の c 項」の発生した時間前後の測位解が示されている。観測局 2 の水没とともに測位解はフロート解に変化している。

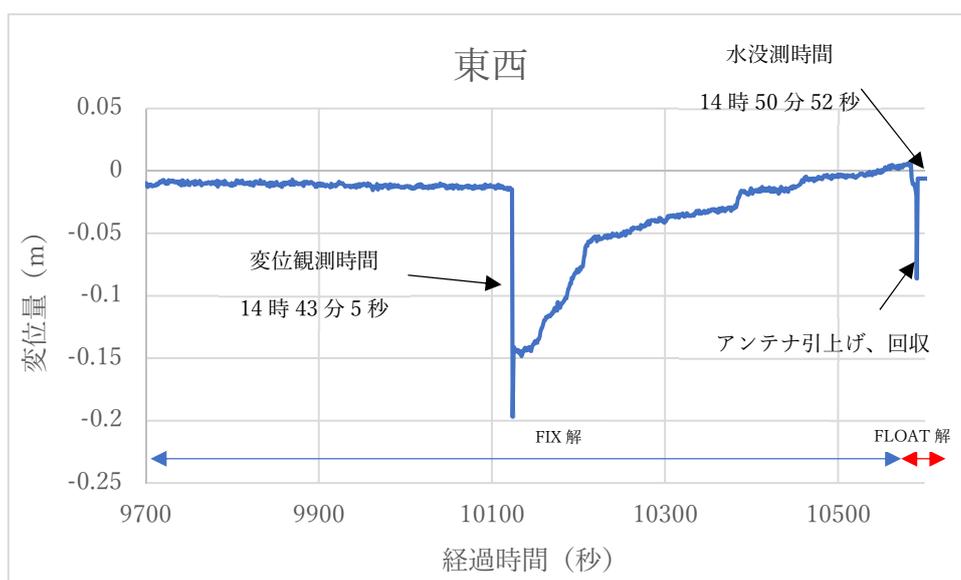
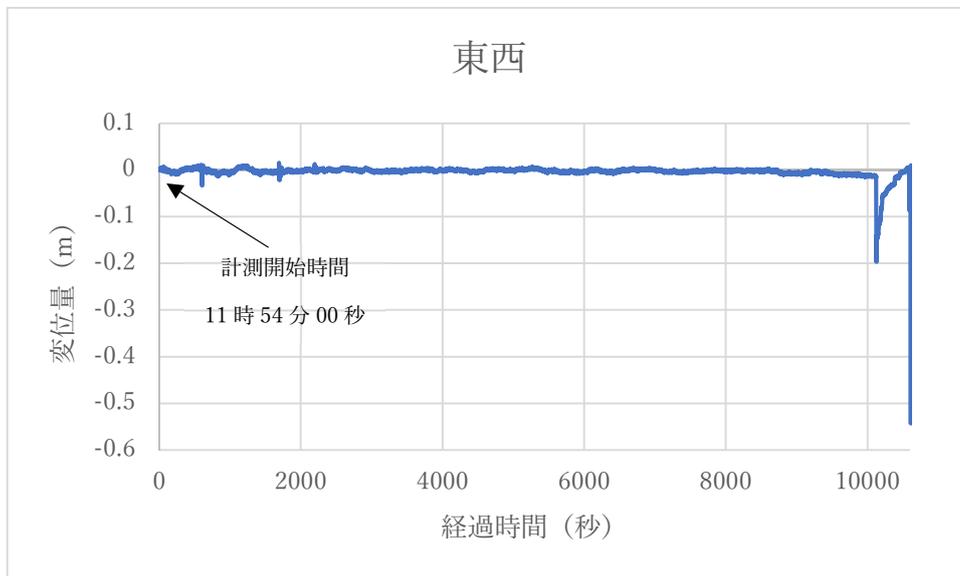


図 23a 観測局 2 の東西方向時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；変位観測時の拡大グラフ)

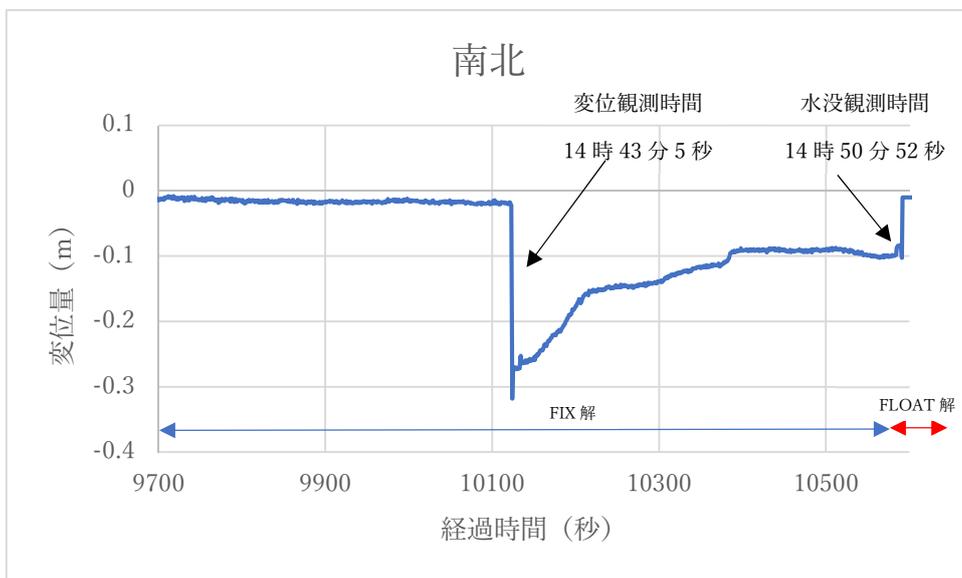
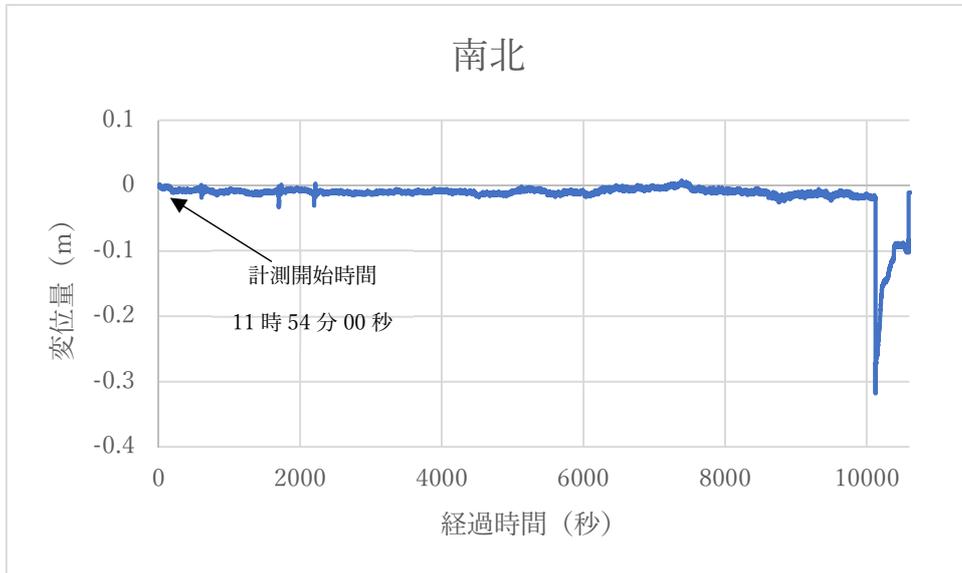


図 23b 観測局 2 の南北方向時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；変位観測時の拡大グラフ)

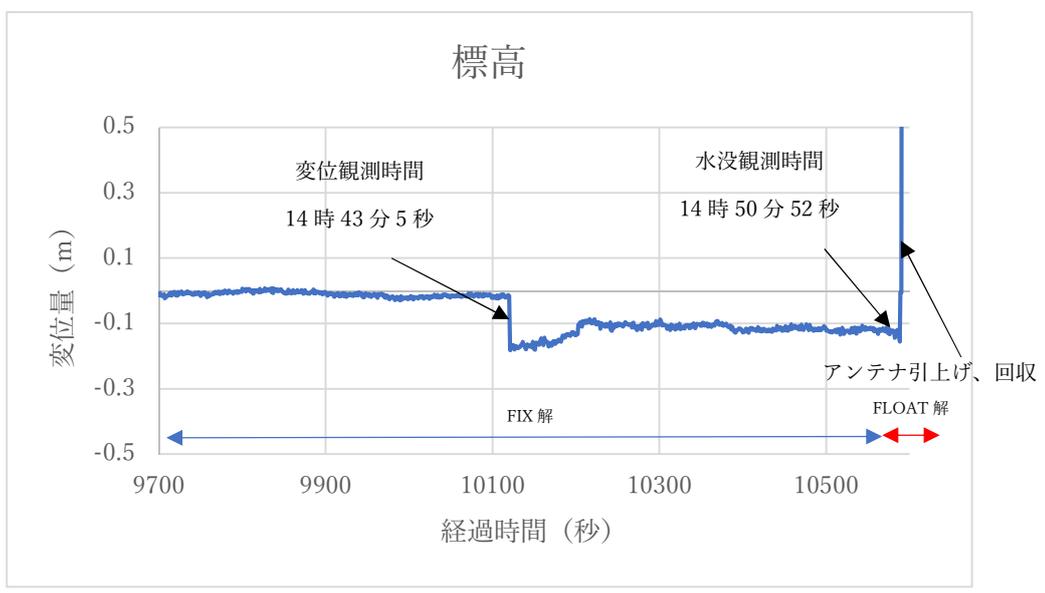
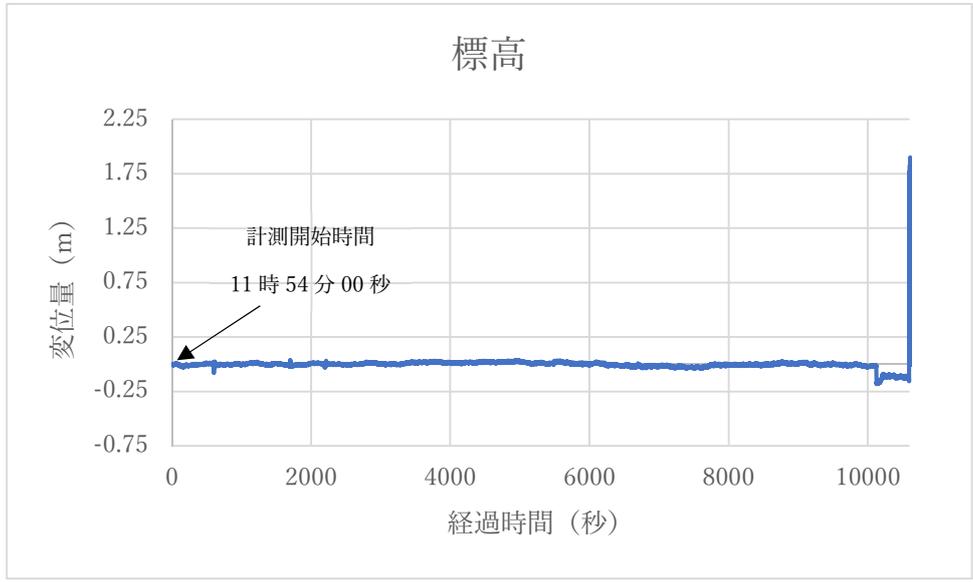


図 23c 観測局 2 の標高時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；変位観測時の拡大グラフ)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
10116	2021/02/03-14:42:57.000000	10137	-0.01852305	-0.01378030	-0.0103				
10117	2021/02/03-14:42:58.000000	10138	-0.01876074	-0.01444626	-0.0165				
10118	2021/02/03-14:42:59.000000	10139	-0.01836518	-0.01350630	-0.0201				
10119	2021/02/03-14:43:00.000000	10140	-0.02062613	-0.01508684	-0.0174				
10120	2021/02/03-14:43:01.000000	10141	-0.02062432	-0.01457694	-0.0195				
10121	2021/02/03-14:43:02.000000	10142	-0.01736534	-0.01360789	-0.0132				
10122	2021/02/03-14:43:03.000000	10143	-0.02084206	-0.01514491	-0.0127				
10123	2021/02/03-14:43:04.000000	10144	-0.02260585	-0.01478566	-0.0163				
10124	2021/02/03-14:43:05.000000	10145	-0.31801536	-0.19699180	-0.1817				
10125	2021/02/03-14:43:06.000000	10146	-0.27484737	-0.14087857	-0.1648				
10126	2021/02/03-14:43:07.000000	10147	-0.26977556	-0.14303421	-0.1734				
10127	2021/02/03-14:43:08.000000	10148	-0.27048686	-0.14452218	-0.1684				
10128	2021/02/03-14:43:09.000000	10149	-0.27326683	-0.14313952	-0.1658				
10129	2021/02/03-14:43:10.000000	10150	-0.27060480	-0.14460021	-0.1794				
10130	2021/02/03-14:43:11.000000	10151	-0.27230690	-0.14343709	-0.1696				
10131	2021/02/03-14:43:12.000000	10152	-0.27237220	-0.14526075	-0.1690				
10132	2021/02/03-14:43:13.000000	10153	-0.27070821	-0.14610995	-0.1718				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
10584	2021/02/03-14:50:45.000000	10605	-0.09796234	0.00505366	-0.1222				
10585	2021/02/03-14:50:46.000000	10606	-0.08703653	-0.00543808	-0.1430				
10586	2021/02/03-14:50:47.000000	10607	-0.08377925	-0.01048983	-0.1343				
10587	2021/02/03-14:50:48.000000	10608	-0.08497507	-0.01034831	-0.1305				
10588	2021/02/03-14:50:49.000000	10609	-0.08507486	-0.01083825	-0.1199				
10589	2021/02/03-14:50:50.000000	10610	-0.08394795	-0.01382322	-0.1286				
10590	2021/02/03-14:50:51.000000	10611	-0.08261413	-0.01929962	-0.1370				
10591	2021/02/03-14:50:52.000000	10612	-0.10226670	-0.08622373	-0.1553				
10592	2021/02/03-14:51:07.000000	10627	-0.01037353	-0.00610202	-0.0045				
10593	2021/02/03-14:52:04.000000	10684	-0.01037353	-0.00610202	-0.0045				
10594	2021/02/03-14:52:33.000000	10713	-0.01037353	-0.00610202	1.7664				
10595	2021/02/03-14:52:34.000000	10714	-0.01037353	-0.00610202	1.7215				
10596	2021/02/03-14:52:35.000000	10715	-0.01037353	-0.00610202	1.7024				
10597	2021/02/03-14:52:36.000000	10716	-0.01037353	-0.00610202	1.688				
10598	2021/02/03-14:52:37.000000	10717	-0.01037353	-0.00610202	1.6599				
10599	2021/02/03-14:52:38.000000	10718	-0.01037353	-0.00610202	1.6687				
10600	2021/02/03-14:52:39.000000	10719	-0.01037353	-0.00610202	1.7003				

図 24 CSV ファイルより抽出した変位及び水没観測時間

%	elapsed (sec)	latitude (deg)	longitude (deg)	height (m)	ns	sdn (m)	sde (m)	sdu (m)	sdne (m)	sdeu (m)	sdun (m)	age (s)
2021-02-03T05:42:00+00:00	2871720.000	36.114301728	140.067023756	69.6104	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:01+00:00	2871721.000	36.114301731	140.067023768	69.6118	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:02+00:00	2871722.000	36.114301736	140.067023789	69.6075	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:03+00:00	2871723.000	36.114301724	140.067023771	69.6109	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:04+00:00	2871724.000	36.114301726	140.067023776	69.6117	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:05+00:00	2871725.000	36.114301732	140.067023772	69.6108	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:06+00:00	2871726.000	36.114301741	140.067023785	69.6063	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:07+00:00	2871727.000	36.114301725	140.067023776	69.6070	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:08+00:00	2871728.000	36.114301720	140.067023781	69.6119	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:09+00:00	2871729.000	36.114301709	140.067023784	69.6076	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:10+00:00	2871730.000	36.114301721	140.067023771	69.6109	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:11+00:00	2871731.000	36.114301723	140.067023766	69.6086	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:12+00:00	2871732.000	36.114301725	140.067023768	69.6078	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:13+00:00	2871733.000	36.114301719	140.067023782	69.6068	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:14+00:00	2871734.000	36.114301708	140.067023769	69.6093	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:15+00:00	2871735.000	36.114301716	140.067023771	69.6162	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:16+00:00	2871736.000	36.114301711	140.067023776	69.6083	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:17+00:00	2871737.000	36.114301711	140.067023787	69.6092	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:18+00:00	2871738.000	36.114301706	140.067023780	69.6171	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:19+00:00	2871739.000	36.114301703	140.067023798	69.6137	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:20+00:00	2871740.000	36.114301697	140.067023785	69.6091	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01
2021-02-03T05:42:21+00:00	2871741.000	36.114301696	140.067023771	69.6068	1	0.0046	0.0038	0.0123	-0.0013	-0.0013	-0.0041	-0.01

(中略)

2021-02-03T05:50:39+00:00	2872239.000	36.114300957	140.067023768	69.5070	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:40+00:00	2872240.000	36.114300979	140.067023757	69.4912	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:41+00:00	2872241.000	36.114300967	140.067023752	69.5043	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:42+00:00	2872242.000	36.114300965	140.067023753	69.5031	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:43+00:00	2872243.000	36.114300969	140.067023770	69.5009	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:44+00:00	2872244.000	36.114300975	140.067023770	69.4993	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:45+00:00	2872245.000	36.114300981	140.067023759	69.5022	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:46+00:00	2872246.000	36.114301096	140.067023849	69.4914	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:47+00:00	2872247.000	36.114301134	140.067023897	69.4901	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:48+00:00	2872248.000	36.114301123	140.067023898	69.4939	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:49+00:00	2872249.000	36.114301123	140.067023903	69.5044	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:50+00:00	2872250.000	36.114301138	140.067023934	69.4958	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:51+00:00	2872251.000	36.114301160	140.067023990	69.4873	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:50:52+00:00	2872252.000	36.114301105	140.067024762	69.4890	1	0.0054	0.0044	0.0191	0.0023	-0.0057	-0.0077	-0.01	
2021-02-03T05:51:02+00:00	2872262.000	36.114338647	140.067015007	65.4679	2	1	2.6842	2.2825	8.2343	2.0428	-4.1259	-3.5792	-0.01
2021-02-03T05:51:03+00:00	2872263.000	36.114317008	140.067018525	59.8105	2	1	0.8068	0.5831	4.8163	0.3915	1.0022	-1.1144	-0.01
2021-02-03T05:51:04+00:00	2872264.000	36.114325379	140.067017536	74.4349	2	1	0.5674	0.4779	2.2778	0.2218	-0.4135	-0.6119	-0.01
2021-02-03T05:51:05+00:00	2872265.000	36.114323516	140.067028669	66.4735	2	1	0.6635	0.5597	2.2340	0.1988	-0.1199	-0.9126	-0.01
2021-02-03T05:51:06+00:00	2872266.000	36.114319438	140.067016663	61.9221	2	1	5.1165	3.4870	29.4080	3.9904	9.9958	11.8770	-0.01
2021-02-03T05:51:07+00:00	2872267.000	36.114297140	140.067031566	63.7079	1	1	20.5422	3.1303	21.6384	-8.0189	-8.2301	21.0832	-0.01
2021-02-03T05:51:08+00:00	2872268.000	36.114323035	140.067030592	66.6685	2	1	0.7439	0.6516	2.3806	-0.1751	-0.0959	-0.9966	-0.01
2021-02-03T05:51:09+00:00	2872269.000	36.114321741	140.067075093	46.2391	2	1	1.8081	2.5021	29.6373	1.8353	-7.7731	-6.7790	-0.01
2021-02-03T05:51:10+00:00	2872270.000	36.114330909	140.067049740	72.6900	2	1	0.8404	0.5565	2.9252	0.2137	-0.7149	-1.3363	-0.01
2021-02-03T05:51:11+00:00	2872271.000	36.114310464	140.067056038	62.1708	2	1	0.8833	0.5840	2.9951	0.3227	-0.6431	-1.2928	-0.01
2021-02-03T05:51:12+00:00	2872272.000	36.114309809	140.067044237	65.9223	2	1	0.6814	0.5214	2.2298	-0.2332	-0.4264	-0.8810	-0.01
2021-02-03T05:51:13+00:00	2872273.000	36.114327994	140.067031069	56.3078	2	1	0.6882	0.4842	2.0321	0.1744	-0.5703	-0.7270	-0.01
2021-02-03T05:51:14+00:00	2872274.000	36.114321987	140.067047880	67.7437	2	1	0.6620	0.5106	2.2651	0.1571	-0.3947	-0.7785	-0.01
2021-02-03T05:51:15+00:00	2872275.000	36.114322044	140.067047577	69.1500	2	1	0.6620	0.5106	2.2652	0.1570	-0.3945	-0.7783	-0.01
2021-02-03T05:51:16+00:00	2872276.000	36.114323744	140.067047715	68.2534	2	1	0.6619	0.5106	2.2653	0.1570	-0.3943	-0.7782	-0.01

図 25 14 時 50 分 50 秒前後の測位解の変化 (UTC 時間)
(水没と同時に FIX 解である 1 がフロート解 2 に変化)

(3) 侵食実験、橋台／護岸部（観測局3）

観測局3の挙動を図26に示す。侵食の進行とともに、南東側へゆっくりと傾斜を開始し、しばらくその動きを継続した後に停止した。図27a～cは観測局3の時系列変位グラフである。傾斜を開始した時間は図28のCSVファイルより15時07分39秒、傾斜を停止したのは図29のCSVファイルにおいて、標高に変化が無くなった時間と定義し15時11分3秒とした。写真内の時計は15時11分台を示している。観測局のアンテナの水没はなかったため、測位解は全てFIXしている。

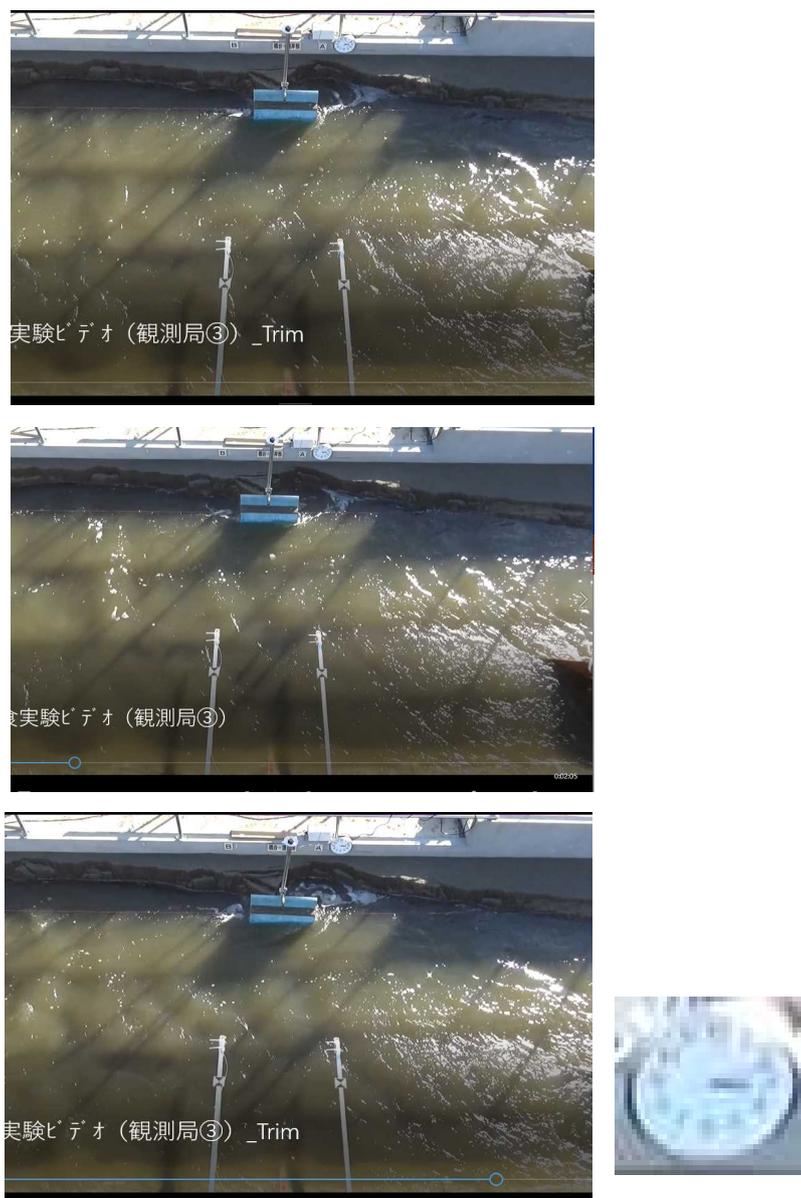


図26 観測局3の挙動

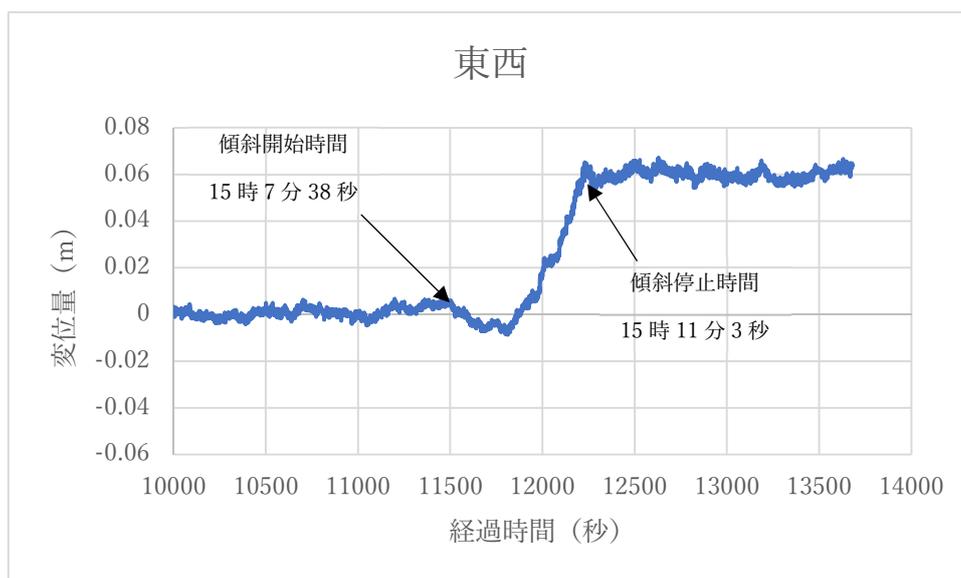
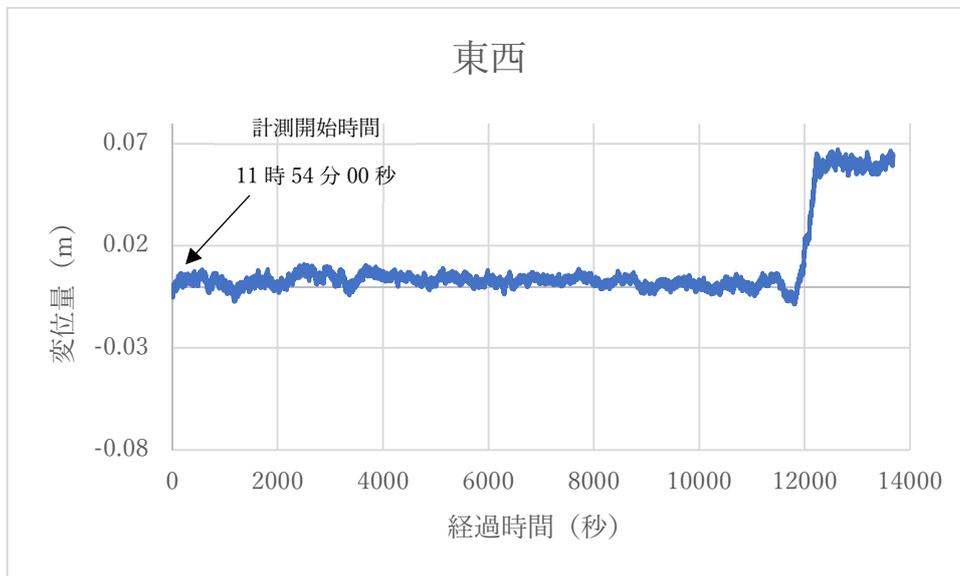


図 27a 観測局 3 の東西方向時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；傾斜観測時の拡大グラフ)

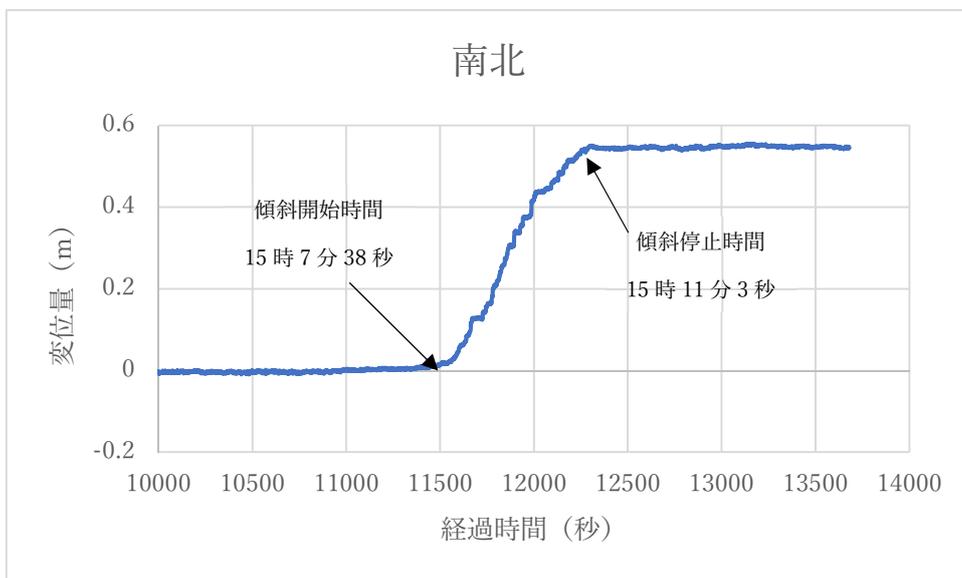
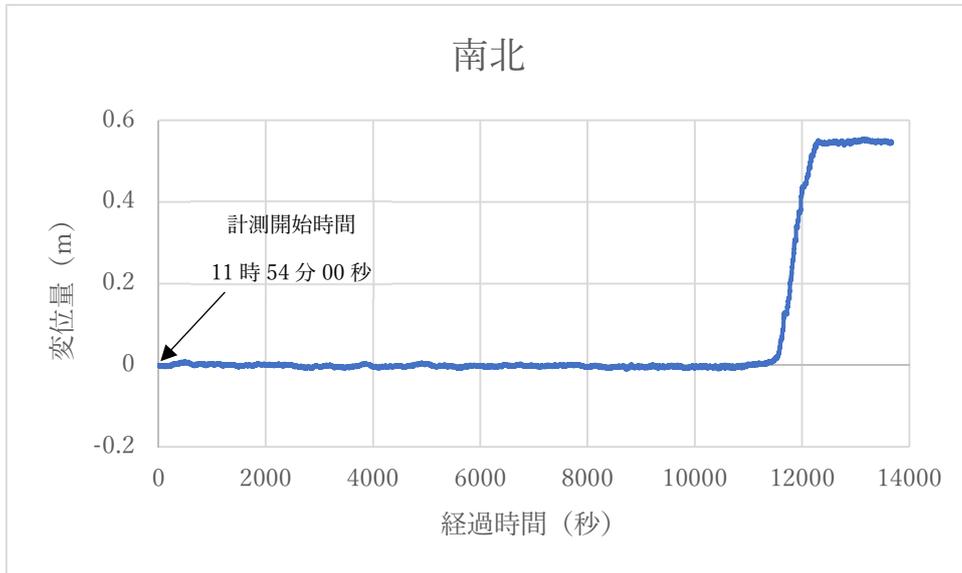


図 27b 観測局 3 の南北方向時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；傾斜観測時の拡大グラフ)

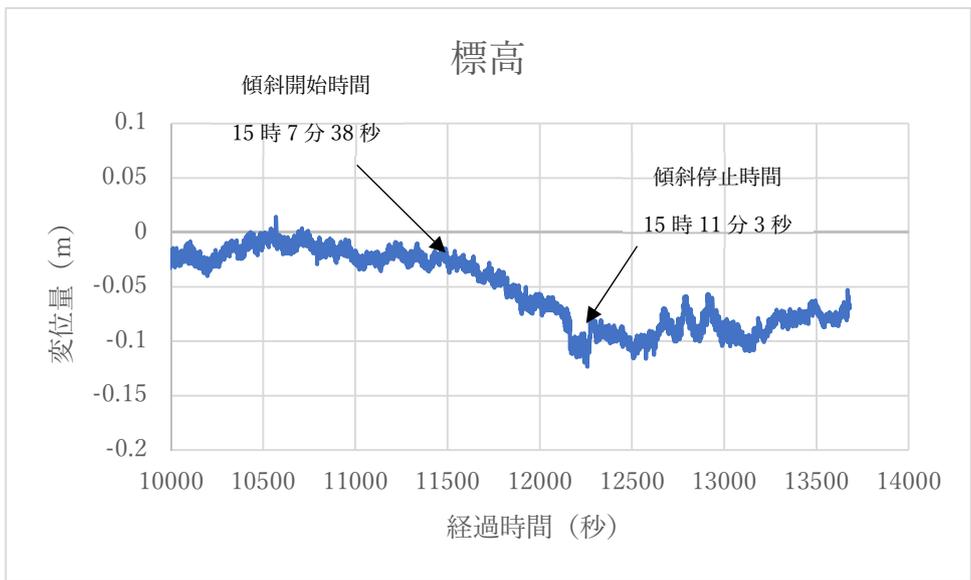
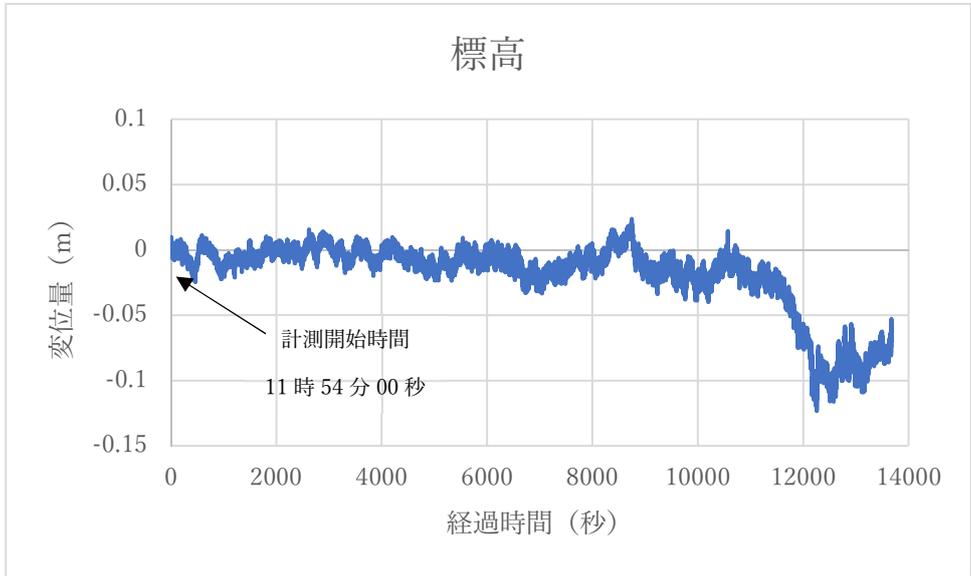


図 27c 観測局 3 の標高時系列変位グラフ
(上；全観測時間の結果、下；傾斜観測時の拡大グラフ)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
11612	2021/02/04-15:07:31.000000	11611	0.06213333	-0.0045934	-0.0307				
11613	2021/02/04-15:07:32.000000	11612	0.05989776	-0.00454626	-0.0314				
11614	2021/02/04-15:07:33.000000	11613	0.06055098	-0.00284236	-0.0303				
11615	2021/02/04-15:07:34.000000	11614	0.06070162	-0.00460794	-0.0285				
11616	2021/02/04-15:07:35.000000	11615	0.06303879	-0.00365524	-0.0278				
11617	2021/02/04-15:07:36.000000	11616	0.06410212	-0.00244308	-0.0278				
11618	2021/02/04-15:07:37.000000	11617	0.06276478	-0.00349738	-0.0309				
11619	2021/02/04-15:07:38.000000	11618	0.06408216	-0.00254107	-0.0294				
11620	2021/02/04-15:07:39.000000	11619	0.06422006	-0.00236505	-0.0355				
11621	2021/02/04-15:07:40.000000	11620	0.06309325	-0.00489098	-0.0307				
11622	2021/02/04-15:07:41.000000	11621	0.06425817	-0.00267898	-0.0289				
11623	2021/02/04-15:07:42.000000	11622	0.0619210	-0.00363168	-0.0293				
11624	2021/02/04-15:07:43.000000	11623	0.06480799	-0.00248480	-0.0278				
11625	2021/02/04-15:07:44.000000	11624	0.06437251	-0.00362074	-0.0330				
11626	2021/02/04-15:07:45.000000	11625	0.06504027	-0.00334854	-0.0303				
11627	2021/02/04-15:07:46.000000	11626	0.06527436	-0.00370238	-0.0268				
11628	2021/02/04-15:07:47.000000	11627	0.06542861	-0.00444818	-0.0274				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
11816	2021/02/04-15:10:55.000000	11815	0.23014587	-0.00493331	-0.0193333				
11817	2021/02/04-15:10:56.000000	11816	0.23422326	-0.00545765	-0.0193333				
11818	2021/02/04-15:10:57.000000	11817	0.23427411	-0.00771318	-0.0460000				
11819	2021/02/04-15:10:58.000000	11818	0.23554975	-0.00746275	-0.0193333				
11820	2021/02/04-15:10:59.000000	11819	0.24222197	-0.00627044	-0.0193333				
11821	2021/02/04-15:11:00.000000	11820	0.24116225	-0.00646281	-0.0459000				
11822	2021/02/04-15:11:01.000000	11821	0.24349762	-0.00602001	-0.0193333				
11823	2021/02/04-15:11:02.000000	11822	0.24130196	-0.00577689	-0.0416000				
11824	2021/02/04-15:11:03.000000	11823	0.24013884	-0.00747899	-0.0193333				
11825	2021/02/04-15:11:04.000000	11824	0.24251774	-0.00582042	-0.0193333				
11826	2021/02/04-15:11:05.000000	11825	0.24872177	-0.00392043	-0.0193333				
11827	2021/02/04-15:11:06.000000	11826	0.25338708	-0.00456453	-0.0193333				
11828	2021/02/04-15:11:07.000000	11827	0.25438873	-0.00415623	-0.0193333				
11829	2021/02/04-15:11:08.000000	11828	0.25334897	-0.00425060	-0.0193333				
11830	2021/02/04-15:11:09.000000	11829	0.25258503	-0.00399295	-0.0193333				
11831	2021/02/04-15:11:10.000000	11830	0.25650996	-0.00326160	-0.0193333				
11832	2021/02/04-15:11:11.000000	11831	0.25554463	-0.00449372	-0.0193333				

図 28 CSV ファイルより抽出した傾斜停止時間

(4) 侵食実験、橋台（観測局 4）

観測局 3 の挙動を図 29 に示す。侵食は進行したものの、橋台部に変位は現れなかった。図 30 の観測局 4 の時系列変位グラフ、図 31 の CSV ファイルデータにおいても変化は観測されていない。



図 29 観測局 4 の挙動
(上；実験開始時、下；実験終了時)

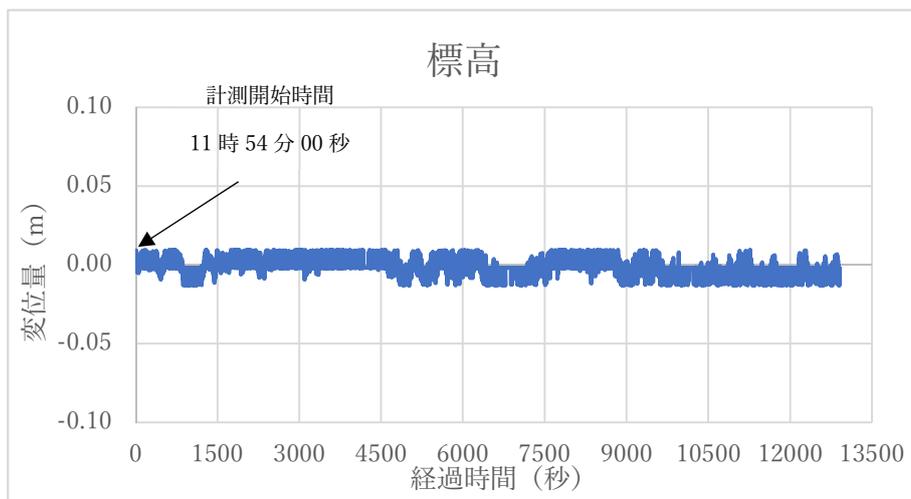
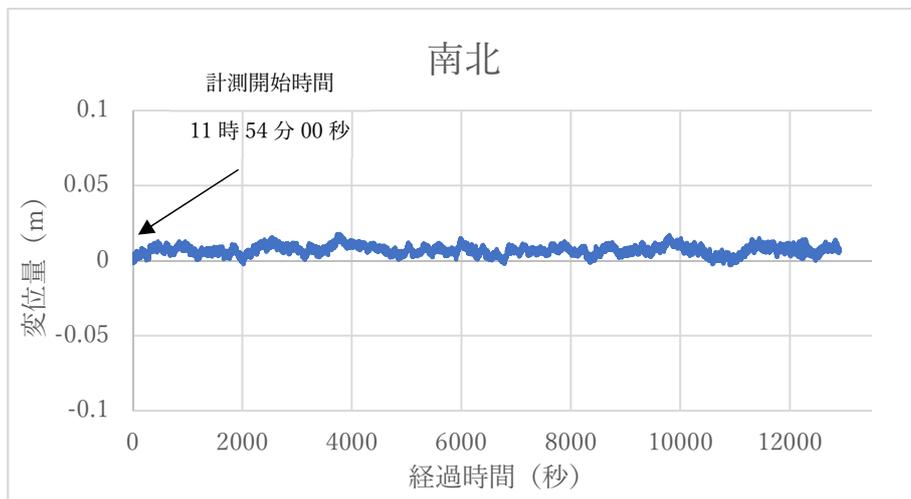
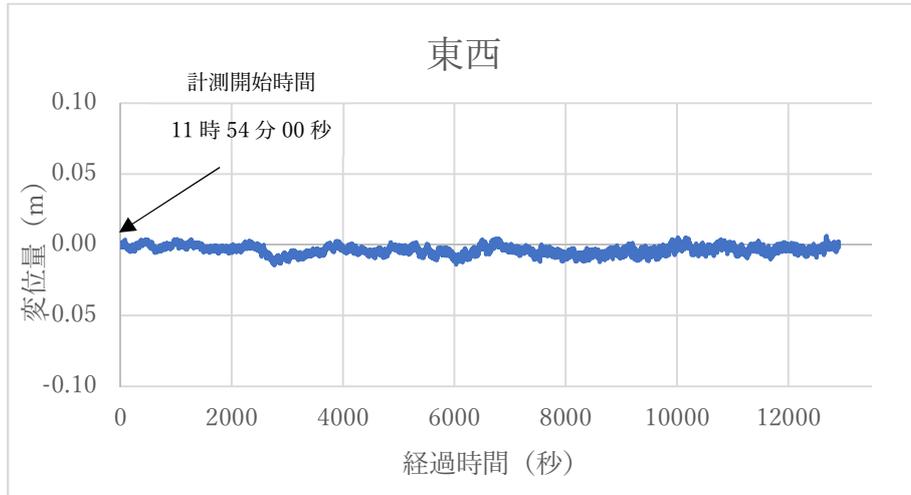


図 30 観測局 4 の時系列変位グラフ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	2021/02/04-11:54:00.000000	0	0	0	0				
2	2021/02/04-11:54:01.000000	1	0.0004536	0.00072403	-0.0006				
3	2021/02/04-11:54:02.000000	2	0.0002613	0.00178374	0.0002				
4	2021/02/04-11:54:03.000000	3	0.0005008	0.00295960	0.0049				
5	2021/02/04-11:54:04.000000	4	0.0010180	-0.00051351	0.0048				
6	2021/02/04-11:54:05.000000	5	-0.0003285	0.00139359	0.0077				
7	2021/02/04-11:54:06.000000	6	0.0014479	0.00460363	0.0091				
8	2021/02/04-11:54:07.000000	7	0.0000236	0.00111778	0.0046				
9	2021/02/04-11:54:08.000000	8	-0.0009164	0.00151335	0.0022				
10	2021/02/04-11:54:09.000000	9	-0.0005843	0.00113955	0.0082				
11	2021/02/04-11:54:10.000000	10	0.0009363	-0.00141536	0.0066				
12	2021/02/04-11:54:11.000000	11	-0.0001307	0.00186358	0.0088				
13	2021/02/04-11:54:12.000000	12	-0.0000980	1.9960E-05	0.0066				
14	2021/02/04-11:54:13.000000	13	-0.0005861	0.00062965	-0.0018				
15	2021/02/04-11:54:14.000000	14	-0.0017420	0.00096714	0.0067				
16	2021/02/04-11:54:15.000000	15	0.0012429	0.00209405	0.0072				
17	2021/02/04-11:54:16.000000	16	0.0009182	-0.00100345	0.0021				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
12894	2021/02/04-15:29:47.000000	12947	0.0013953	0.00634926	-0.0084				
12895	2021/02/04-15:29:48.000000	12948	-0.0002324	0.00637464	-0.0018				
12896	2021/02/04-15:29:49.000000	12949	0.0017927	0.00779912	-0.0061				
12897	2021/02/04-15:29:50.000000	12950	-0.0007060	0.00555262	-0.0085				
12898	2021/02/04-15:29:51.000000	12951	0.0011213	0.00650713	-0.0128				
12899	2021/02/04-15:29:52.000000	12952	0.0013245	0.00850680	-0.0018				
12900	2021/02/04-15:29:53.000000	12953	0.0023062	0.00881711	-0.0018				
12901	2021/02/04-15:29:54.000000	12954	-0.0017421	0.00647804	-0.0083				
12902	2021/02/04-15:29:55.000000	12955	0.0003392	0.00717669	-0.0129				
12903	2021/02/04-15:29:56.000000	12956	0.0011794	0.00629119	-0.0018				
12904	2021/02/04-15:29:57.000000	12957	-0.0010889	0.00818195	-0.0076				
12905	2021/02/04-15:29:58.000000	12958	0.0012574	0.00617324	-0.0018				
12906	2021/02/04-15:29:59.000000	12959	-0.0002705	0.00668856	-0.0061				
12907									
12908									
12909									
12910									

図 31 CSV ファイル（上；実験開始時、下；実験終了時）

(5) 侵食実験、一般部（観測局 5）

観測局 5 の挙動を図 32 に示す。観測局 5 を設置した単管位置より上部の法面まで侵食は進行したものの、観測局 5 に変位は現れなかった。図 33 の観測局 5 の時系列変位グラフ、図 34 の CSV ファイルデータにおいても変化は観測されていない。

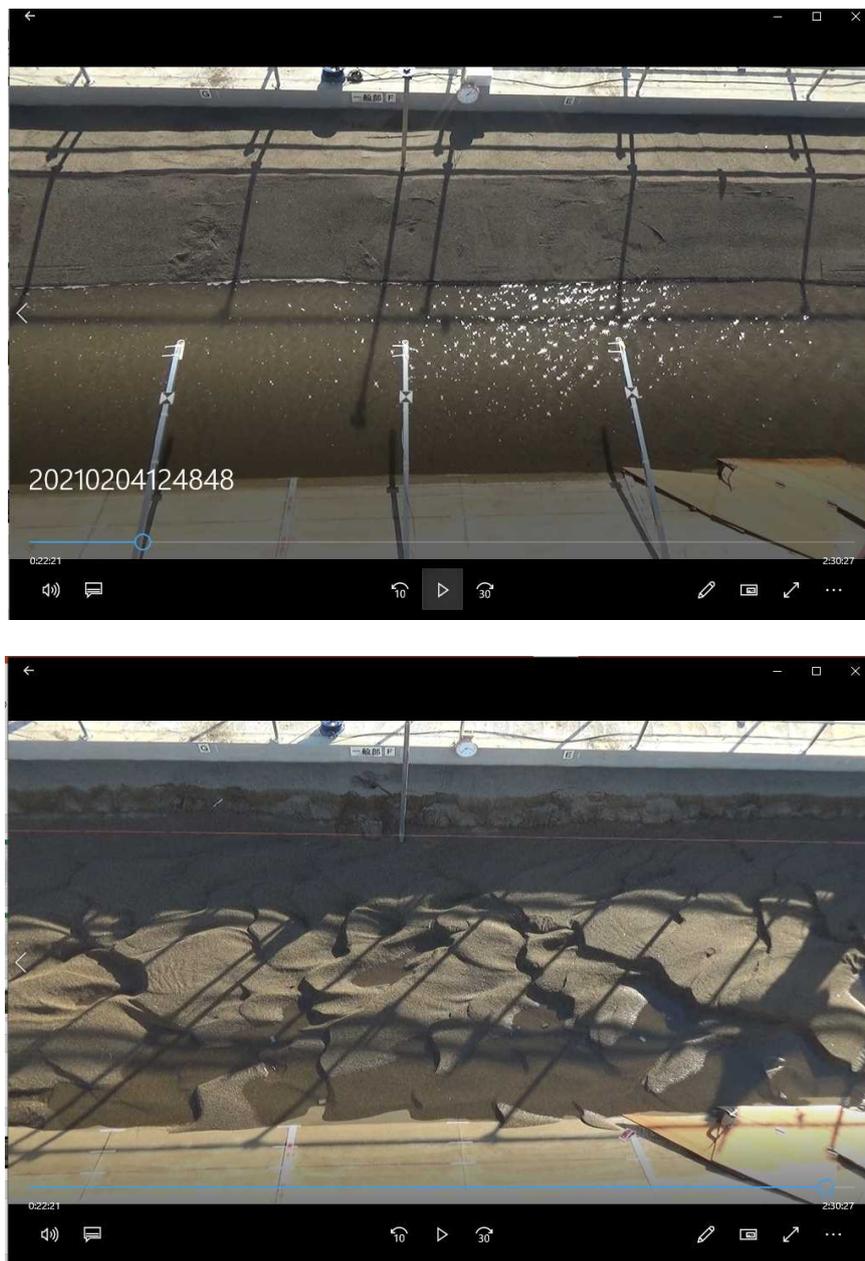


図 32 観測局 5 の挙動
(上；実験開始時、下；実験終了時)

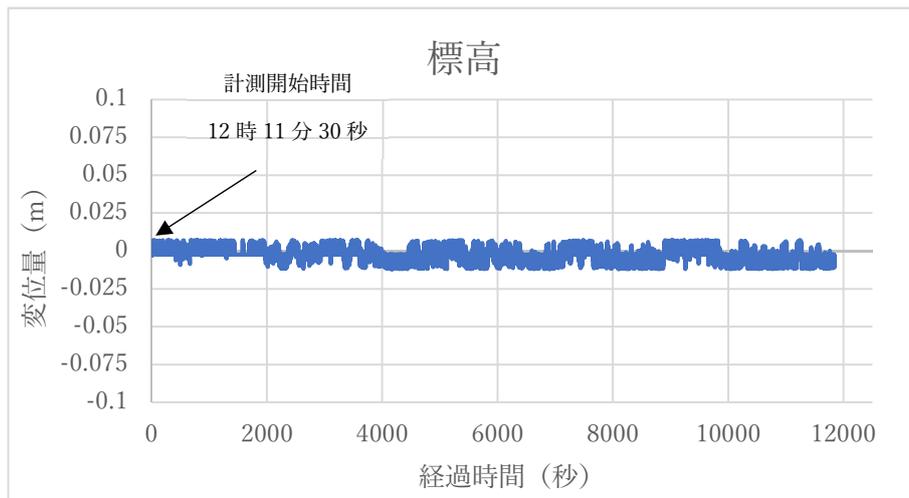
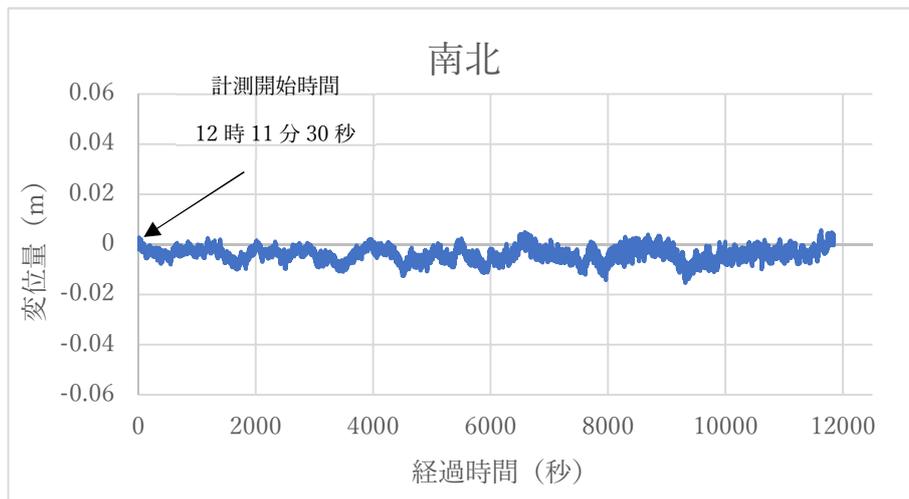
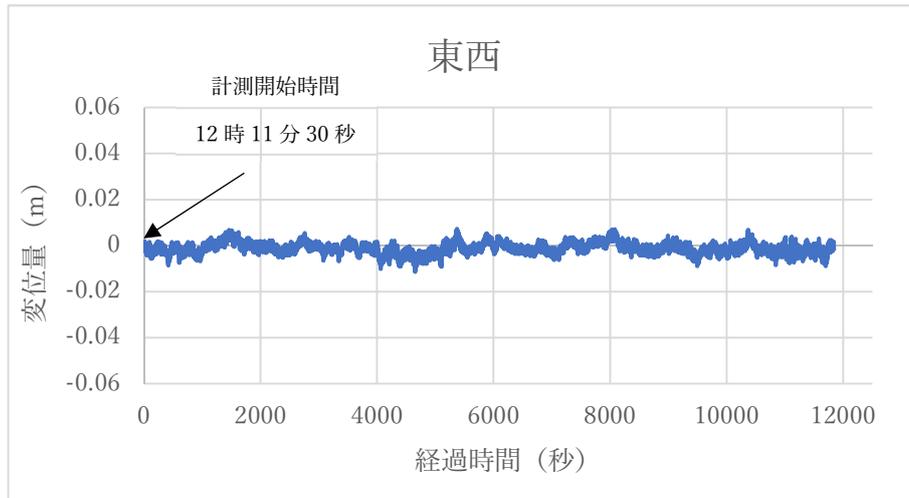


図 33 観測局 5 の時系列変位グラフ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	2021/02/04-12:11:30.000000	0	0	0	0				
2	2021/02/04-12:11:31.000000	1	0.00104156	0.00060427	-0.0003				
3	2021/02/04-12:11:32.000000	2	0.00144445	-0.00192707	0.004				
4	2021/02/04-12:11:33.000000	3	0.00097447	-0.00172929	0.0013				
5	2021/02/04-12:11:38.000000	8	-0.00092542	-0.00103615	0.0056				
6	2021/02/04-12:11:39.000000	9	-0.00043548	-0.00113594	0.0052				
7	2021/02/04-12:11:40.000000	10	-0.00198874	-0.00224831	0.0016				
8	2021/02/04-12:11:41.000000	11	0.00080026	-0.00108148	0.0067				
9	2021/02/04-12:11:42.000000	12	-0.00118127	-0.0012902	0.0068				
10	2021/02/04-12:11:43.000000	13	-0.00019958	-0.00097988	0.0059				
11	2021/02/04-12:11:44.000000	14	0.00021233	-0.00096173	0.0039				
12	2021/02/04-12:11:45.000000	15	0.00014152	0.00119581	-0.0031				
13	2021/02/04-12:11:46.000000	16	0.00068411	-0.00064961	0.0043				
14	2021/02/04-12:11:47.000000	17	-0.00022867	0.00188353	-0.0023798				
15	2021/02/04-12:11:48.000000	18	0.000646	-0.00033569	0.003				
16	2021/02/04-12:11:49.000000	19	0.00266925	0.0005789	0.0067				
17	2021/02/04-12:11:50.000000	20	5.807E-05	-0.00021594	0.0015				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1826	2021/02/04-15:29:44.000000	11894	0.00277997	-0.00138267	-0.0023798				
1827	2021/02/04-15:29:45.000000	11895	0.00205234	-0.00194883	-0.0023798				
1828	2021/02/04-15:29:46.000000	11896	0.00178014	-0.00128107	-0.0023798				
1829	2021/02/04-15:29:47.000000	11897	0.00433505	0.00023960	-0.0023798				
1830	2021/02/04-15:29:48.000000	11898	0.00201964	-0.00010521	-0.0023798				
1831	2021/02/04-15:29:49.000000	11899	0.00199788	-0.00071310	-0.0023798				
1832	2021/02/04-15:29:50.000000	11900	0.00164404	-0.00094719	-0.0023798				
1833	2021/02/04-15:29:51.000000	11901	0.00349127	0.00010531	-0.0023798				
1834	2021/02/04-15:29:52.000000	11902	0.00403567	-0.00123022	-0.0023798				
1835	2021/02/04-15:29:53.000000	11903	0.00387780	-0.00150423	-0.0023798				
1836	2021/02/04-15:29:54.000000	11904	0.00177101	0.00168033	-0.0023798				
1837	2021/02/04-15:29:55.000000	11905	0.00178555	0.00024863	-0.0023798				
1838	2021/02/04-15:29:56.000000	11906	0.00137003	-0.00078932	-0.0023798				
1839	2021/02/04-15:29:57.000000	11907	0.00184543	0.00054259	-0.0108000				
1840	2021/02/04-15:29:58.000000	11908	0.00056797	-0.00021774	-0.0023798				
1841	2021/02/04-15:29:59.000000	11909	-0.00037741	-0.00135188	-0.0063000				

図 34 CSV ファイル (上; 実験開始時、下; 実験終了時)

(補足) 観測局 5 に傾斜や横転が観測されなかった理由について

当初、プラスチック杭の観測局 5 を取付けて観測を予定していたが、プラスチック杭は短く、観測局は周りの櫓や手すりより低い位置に配置されることとなる。観測局が廻りの櫓や手すりより低い位置に配置された場合、観測時に櫓や手すりを介した衛星電波のマルチパスが発生し、測位精度の劣化が想定される。そのため観測局を手すりの上部に配置されるよう、実験開始直前に 2 m の単管を準備いただき観測局 6 ①を取付け、法面への埋込みを行った。しかし法面地盤が柔らかく、天端から 20cm の埋込みでは、単管が直立姿勢を保てず、結果埋込み長が天端から 75cm、法面下地盤の下 25cm (図 35) まで到達した。この理由により観測局 5 の傾斜や転倒は観測されなかった。

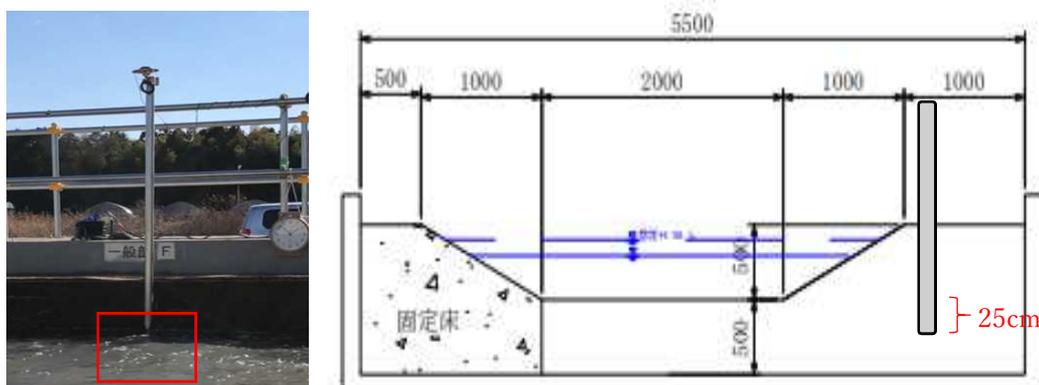


図 35 2 m 単管の埋込み長

(6) 侵食実験、一般部（観測局 6 ①）：追加実験

一般部に残された法面に観測局 6 ①を設置した。設置場所は手すりから 20cm 流水側で、埋込み長は 20cm である。観測局 6 ①の挙動を図 36 に示す。14 時 59 分 59 秒に観測を開始し、侵食が観測局 6 ①まで進行した段階で観測局は傾斜した。傾斜が観測された時間は図 37 の CSV ファイルより 15 時 06 分 10 秒である。図 38 は観測局 6 ①の時系列変位グラフである。写真内の時計は 15 時 06 分台を示している。



図 36 観測局 6 ①の挙動
(左；実験開始時、右；傾斜時)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
355	2021/02/04-15:06:02.000000	369	0.039674	-0.0619036	0						
356	2021/02/04-15:06:03.000000	370	0.0425809	-0.0606588	0						
357	2021/02/04-15:06:04.000000	371	0.039674	-0.0619036	0						
358	2021/02/04-15:06:05.000000	372	0.0388102	-0.0621359	0						
359	2021/02/04-15:06:06.000000	373	0.0374965	-0.0620724	0						
360	2021/02/04-15:06:07.000000	374	0.040153	-0.0595519	0						
361	2021/02/04-15:06:08.000000	375	0.0394562	-0.0624716	0						
362	2021/02/04-15:06:09.000000	376	0.0239033	-0.0571606	0						
363	2021/02/04-15:06:10.000000	377	-0.0261479	0.014266	0						
364	2021/02/04-15:06:11.000000	378	-0.0254765	0.015558	0						
365	2021/02/04-15:06:12.000000	379	-0.0259084	0.0154419	0						
366	2021/02/04-15:06:13.000000	380	-0.0264382	0.0153457	0						
367	2021/02/04-15:06:14.000000	381	-0.0284451	0.0135093	0						
368	2021/02/04-15:06:15.000000	382	-0.0261044	0.0154818	0						
369	2021/02/04-15:06:16.000000	383	-0.0274544	0.0163691	0						
370	2021/02/04-15:06:17.000000	384	-0.0253586	0.0156361	0						
371	2021/02/04-15:06:18.000000	385	-0.0270670	0.0147566	0						

図 37 CSV ファイル

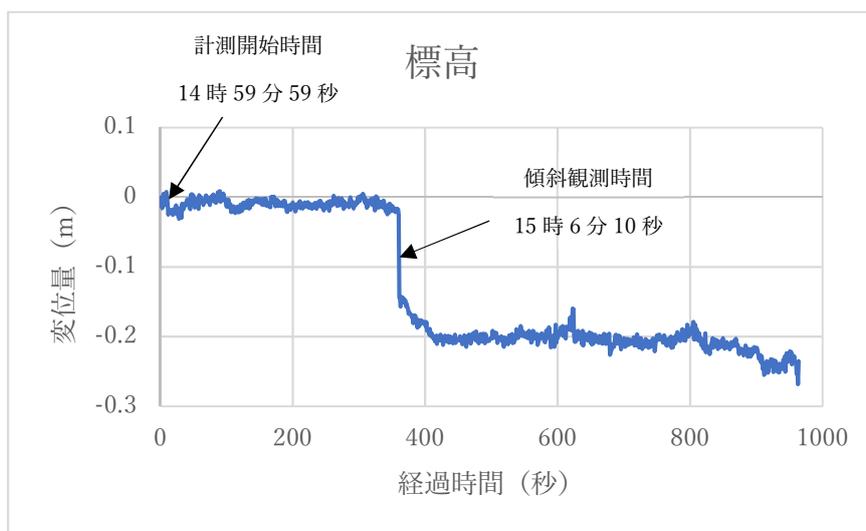
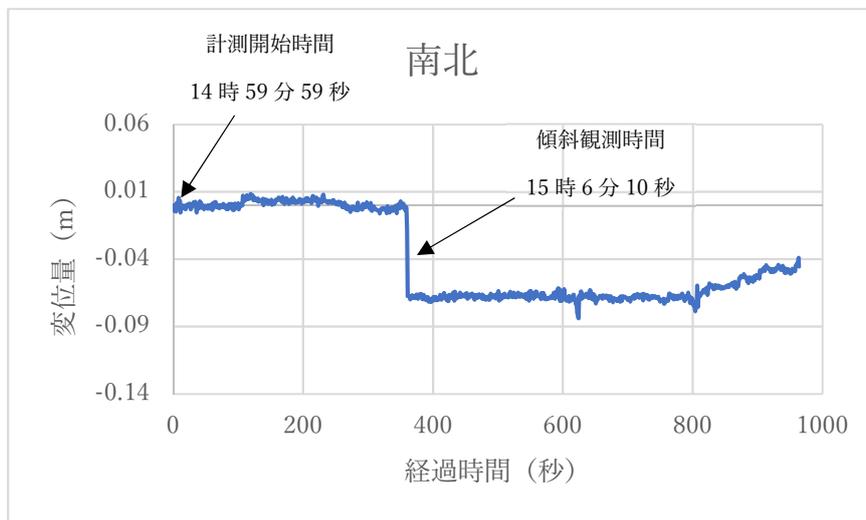
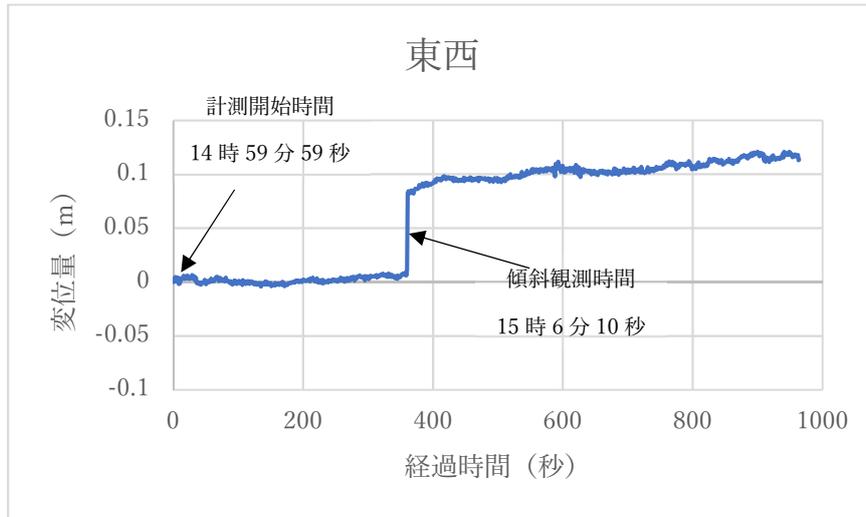


図 38 観測局 6①の時系列変位グラフ

【観測局の挙動と水位・水深との関連】

(1) 越水実験

観測局 1 は、14 時 1 分 41 秒に越水に伴う堤内地側の侵食が進み天端部の一部の崩壊とともに堤内地側に転落、水没した (図 39)。

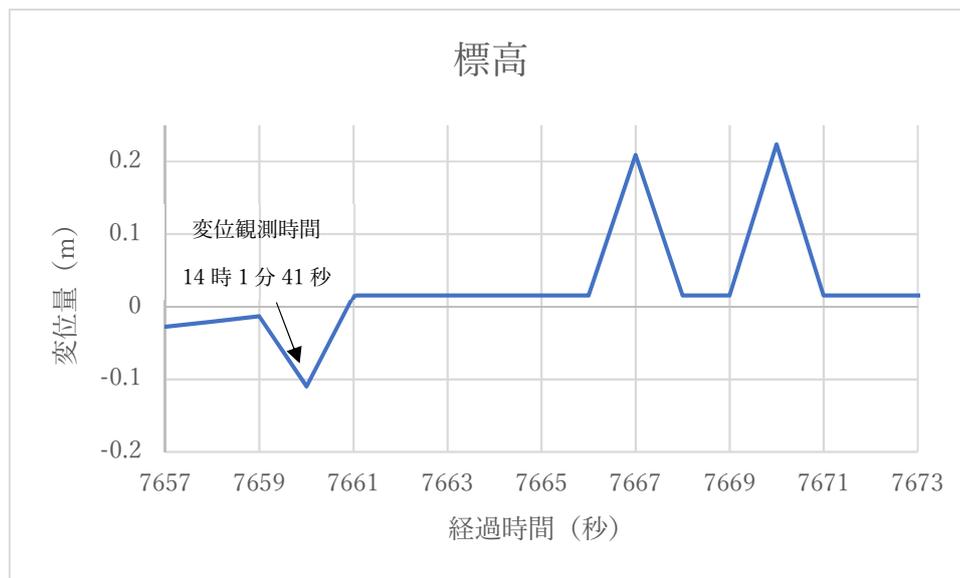


図39 観測局 1 の時系列変位グラフ (標高)

観測局 2 は、14時43分5秒に傾斜・沈下が確認された後、14時50分52秒に堤内地側に転落・水没した (図40)。

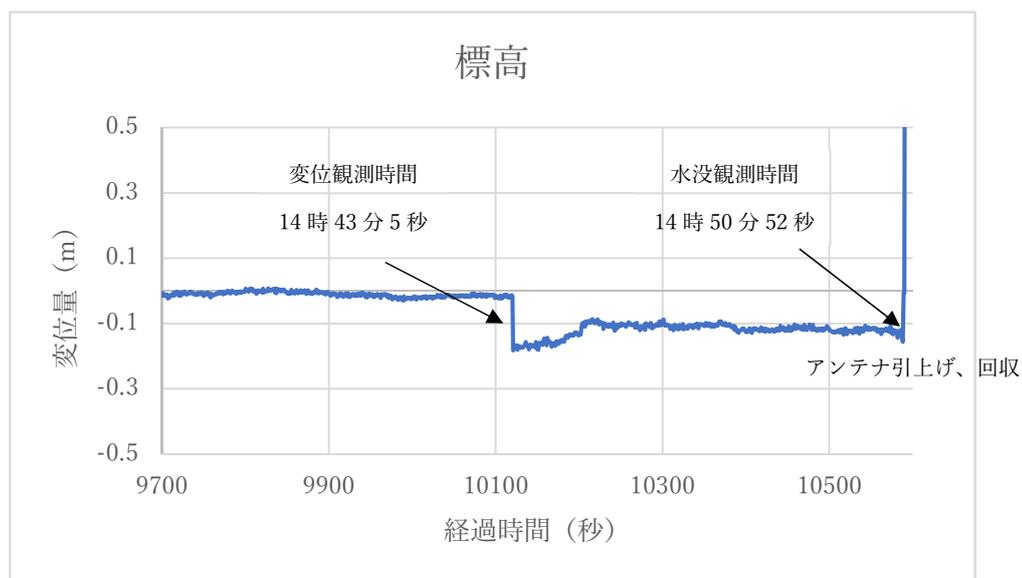


図40 観測局 2 の時系列変位グラフ (標高)

図41は越水実験時の水位変化、図42は越水実験時の水深変化である。14時1分41秒に越水に伴う堤内地側の侵食が進み天端部の一部が崩壊し観測局1は堤内地側に転落、水没したが、収録ビデオでもそれほど水流速度に変化は見られなかった（図中の紫線）。堤防天端の侵食が発生しても流量を増やし越流水深を維持する操作を行っていたため、堤内地側、堤外地側ともに水位、水深もそれほど大きな変化は見られなかった。

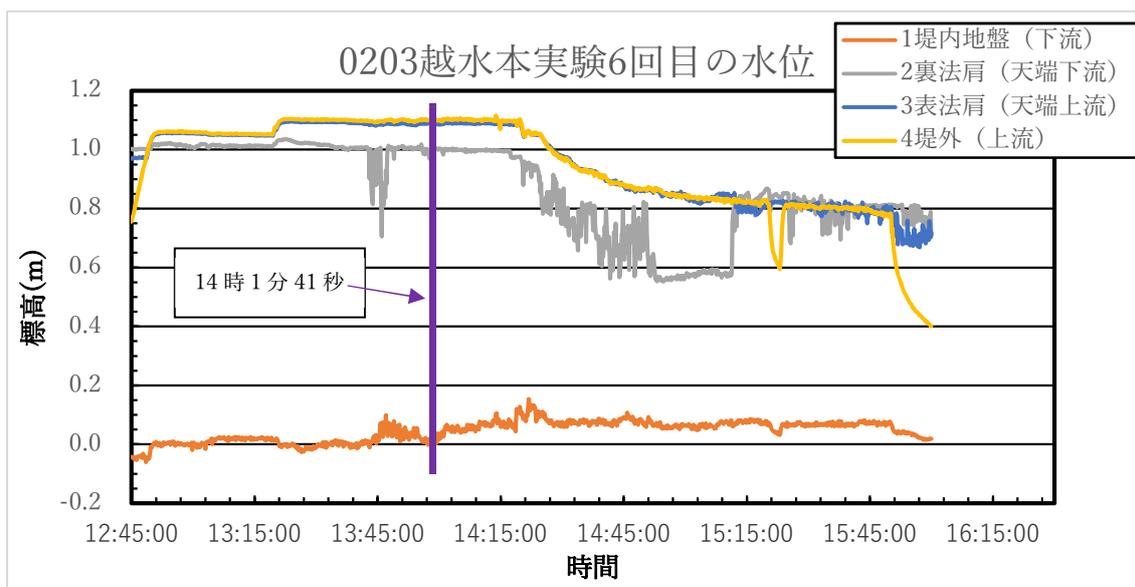


図41 越水実験時の水位変化

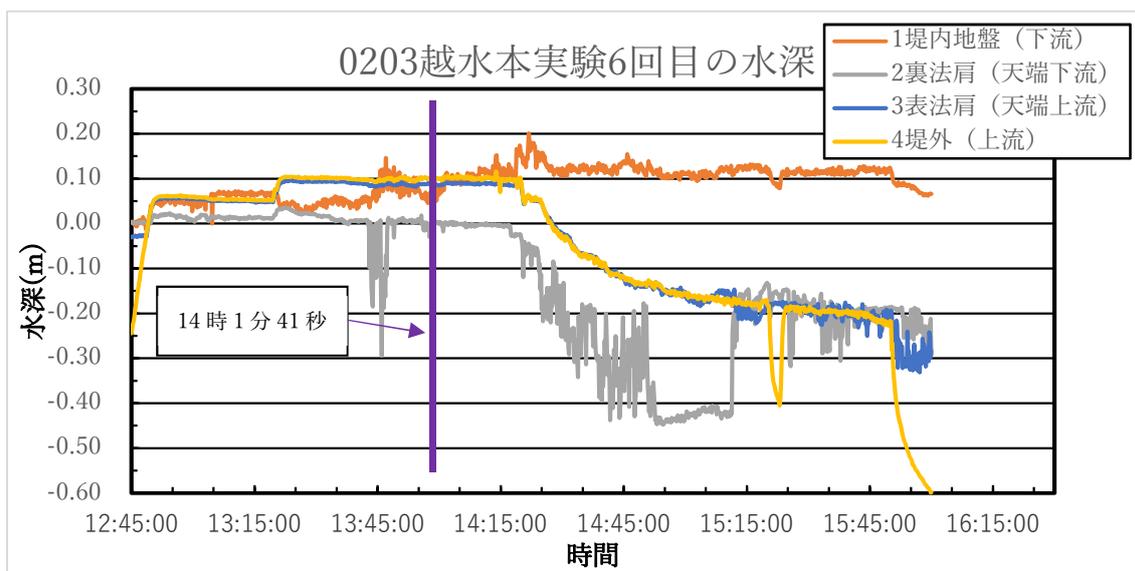


図42 越水実験時の水深変化

図 43 は越水実験時の水位変化、図 44 は越水実験時の水深変化である。14 時 20 分頃（図中の緑線）、天端部の崩壊した箇所にも上下流の越流水が集中し、天端部の崩壊が加速され、堤外地側の水位、水深ともに下がっていく。堤内地側の水位、水深を維持する操作を行ったため、天端部の侵食、決壊口は徐々に拡大を開始。14 時 50 分 52 秒に観測局 2 が辛うじて観測を継続していた天端部の崩壊（図中の青線）とともに、上下流量が一気に増え堤外地側の水位、水深ともに下降を開始した。

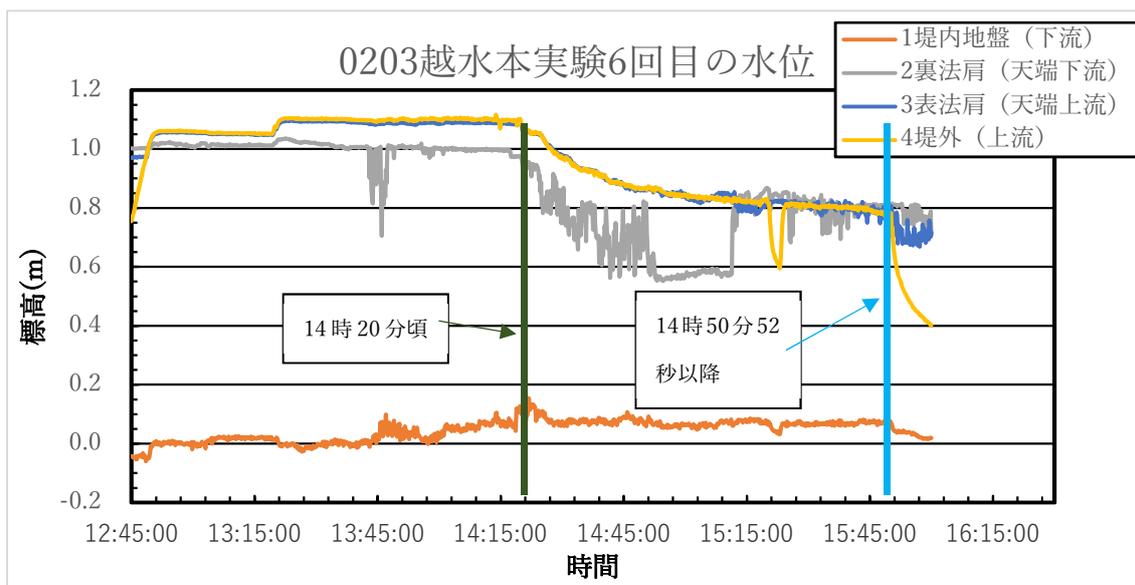


図 43 越水実験時の水位変化

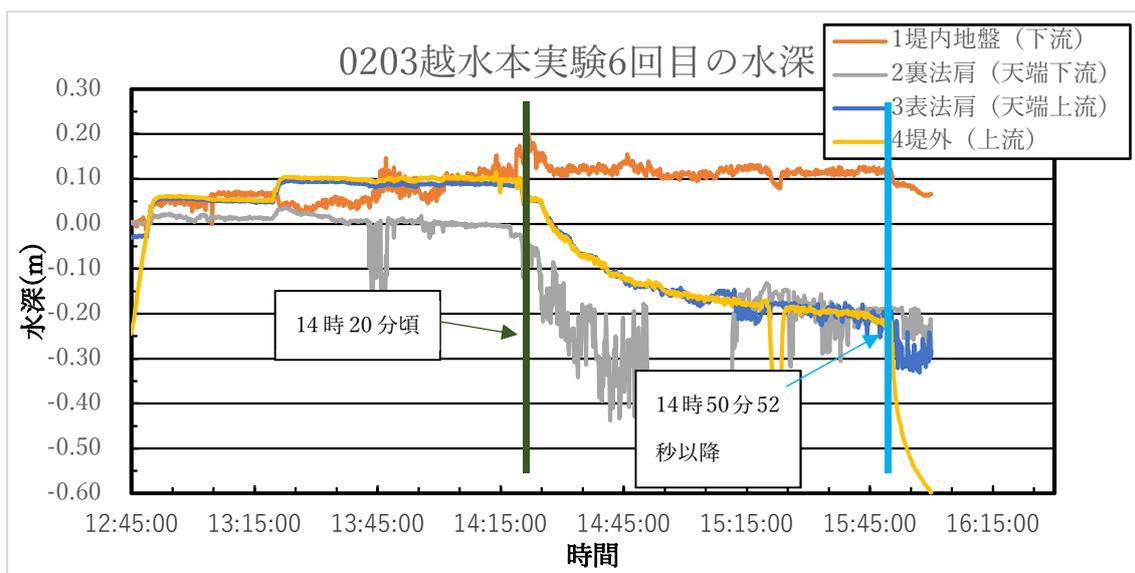


図 44 越水実験時の水深変化

(2) 侵食実験

侵食実験で再実験等を行わずに顕著な変位を確認したのは観測局3である。観測局3は侵食の進行とともに、南東側へゆっくりと傾斜を開始し、しばらくその動きを継続した後、停止した。図45は観測局3の時系列変位グラフである。傾斜の開始時間は15時07分39秒、傾斜が停止した時間は15時11分3秒である。

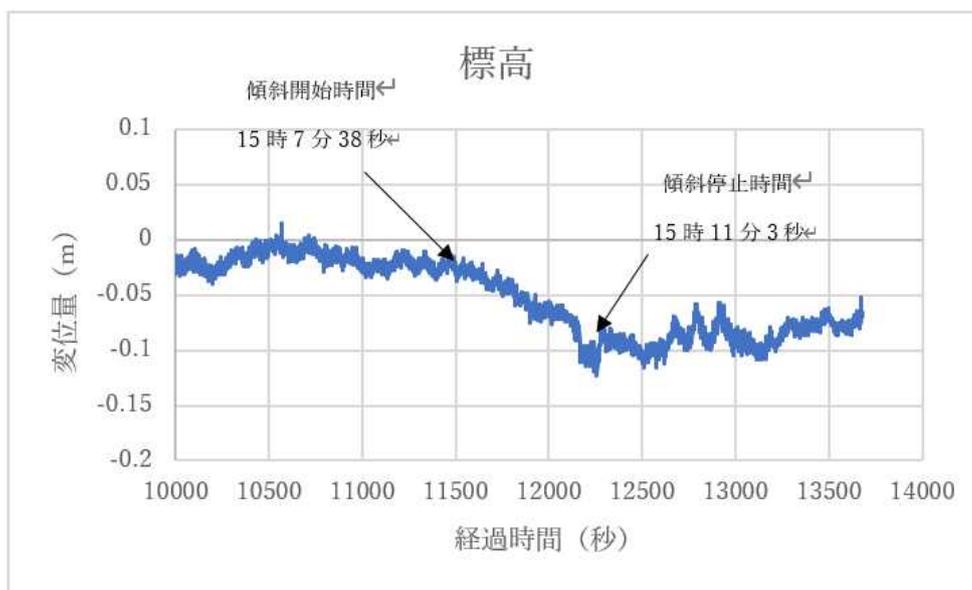


図45 観測局3の時系列変位グラフ (標高)

図 46 は侵食実験時の水位変化、図 47 は侵食実験時の水深変化である。観測局 3 は 14 時 20 分頃の水位の上昇後に侵食が進み、15 時 07 分 39 秒（図中の青線）に南東側への傾斜を開始した。観測局 3 を設置した橋台／護岸部と観測局 4 を設置した橋台部の水位・水深ともに同じ条件であったにもかかわらず、橋台／護岸部のみ傾斜が確認された。両者の法面の締固めの不均一性、護岸として設置した白いタイルが侵食を加速させた等は考えられるが、その理由は不明である。

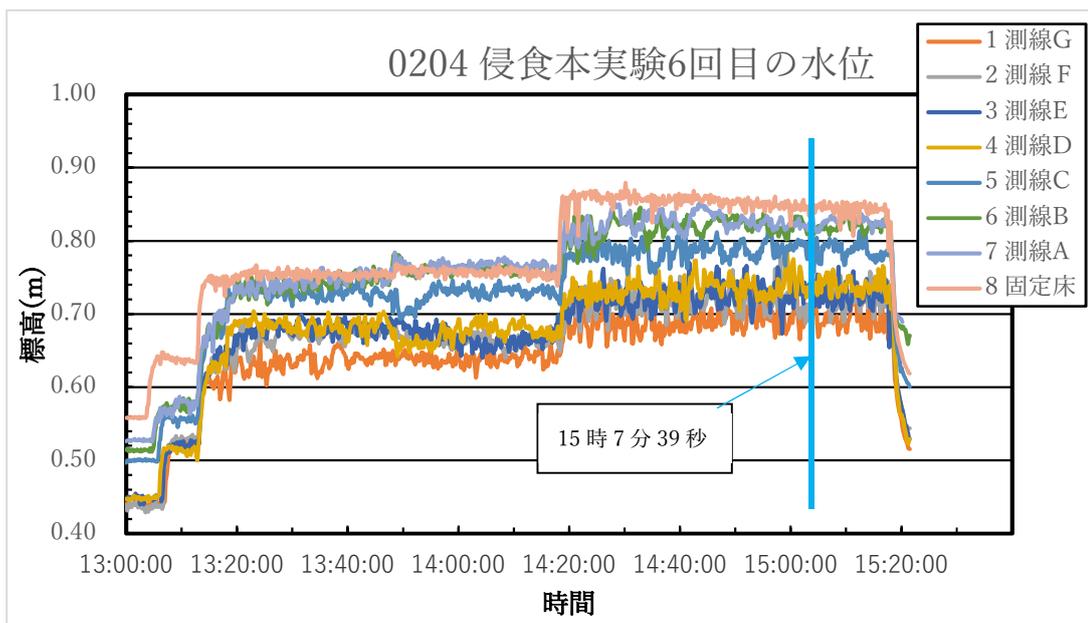


図 46 越水実験時の水位変化

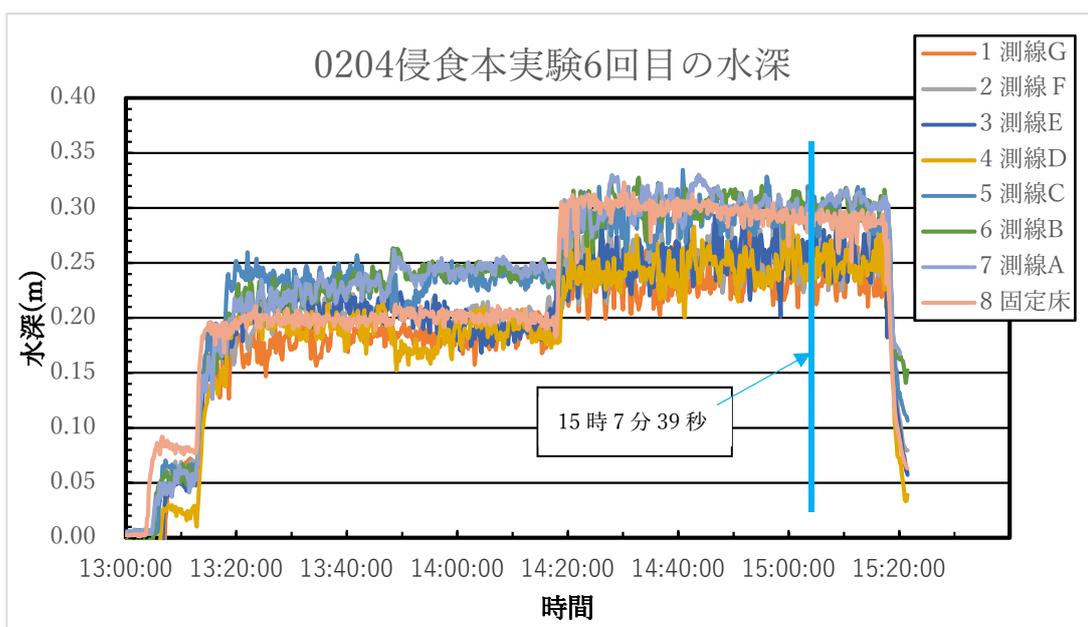


図 47 侵食実験時の水深変化

【まとめ】

・GNSS測位システムについて

今回使用した、小型低コスト GNSS 測位システムでの測位情報は、点の情報（座標）として出力され、測定精度は、約±1 cmであることが証明できた。これらの測位情報を時系列でリアルタイムに観測し、観測局の挙動を精度高く捉えることができた。

・計測範囲、観測手法について

設置手法が、GNSS アンテナを取り付けた簡易なプラスチック杭または単管などを打ち込み、システムを稼働させるだけとなり、容易に設置が可能であることがわかった。堤防の崩壊場所の予想は困難であり広範囲の観測が必要となるため、設置手法も簡単な方が望ましく、本技術は有効である。また、GIS（地理情報システム）などと連携することで、広範囲な観測、各測位情報の連携により、面的に構造的な変状を捉えられる。

・検出する崩壊に対する設置手法について

越水実験の観測局 1、2 共に、侵食の進行後に天端部の崩壊とともに堤内地側に転落、水没した。観測局 1 の挙動（図19a~c）は、天端部と観測局 1 が一緒に数秒かけて堤内地側に滑り落ちた。一方、観測局 2 は侵食で残された小さな天端部の堤内地側の端に留まり、変位を伴いながら観測を行っていた（図23a~c）。

天端部の侵食状況により、近距離にある観測局においても、約2分程度の変位観測時間の差が見られた。今後、実装にあたっては、どのような侵食状況または、崩壊状況を堤防の構造的な崩壊と定義して検知をしていくかによって、観測局の設置手法も検討する必要があると考えられる。例えば、観測局 2 のような挙動を測位で把握するためには、2 Hz以上でのデータ取得、もしくは杭の埋込み長を長くし転落、水没までの時間を稼ぐ等の工夫が考えられる。データの取得頻度は遠隔でも容易に設定変更は可能なため、必要に応じて変更することで、効率的なデータの取得も可能である。

【現場実装へ向けた考察】

・盗難について

GNSS 観測機器は設置が簡単という反面、盗難もされやすいという課題がある。普段はコンクリートの基礎杭のみが敷設されており、杭の中央部に開けられた穴に必要な時に観測局を差し込む等の運用上の対策も考えられる。

・自立型電源について

自立型のソーラーシステム等を採用することは可能だが、コストアップや観測局数に制限が発生する。ソーラーシステムの仕様、出力や観測局側に準備したバッテリーなどの電源補完システムなどを組み込む必要があり、別途協議が必要となる。

以上