

表層傾斜計で捉えた被災盛土の崩壊挙動と新たな観測システムの提案

Collapse Behavior of Affected Embankments with Surface Incliner,
and Proposals of New Observation system川波 敏博¹⁾, 平井 健太²⁾, 田下 哲也³⁾, 根本 雅夫⁴⁾, 宮崎 良⁵⁾,
太田 遥子⁶⁾, 中田 幸男⁷⁾

- 1) Toshihiro KAWANAMI, 西日本高速道路エンジニアリング中国(株), t-kawanami@w-e-chugoku.co.jp
 2) Kenta HIRAI, 西日本高速道路エンジニアリング中国(株), k-hirai@w-e-chugoku.co.jp
 3) Tetsuya TASHITA, 西日本高速道路エンジニアリング中国(株), t-tashita@w-e-chugoku.co.jp
 4) Masao NEMOTO, 応用地質(株), nemoto-masao@oyonet.oyo.co.jp
 5) Ryo MIYAZAKI, 応用地質(株), miyazaki-ryo@oyonet.oyo.co.jp
 6) Yoko OHTA, 助教, 山口大学大学院創成科学研究科, y_ohta@yucivil.onmicrosoft.com
 7) Yukio NAKATA, 教授, 山口大学大学院創成科学研究科, nakata@yucivil.onmicrosoft.com

本稿は、表層傾斜計で観測した被災盛土の発災直後から復旧完了までのデータを基に、斜面崩壊に繋がる挙動をまとめた。豪雨によって崩壊した盛土法面は、その後も降雨に関連した滑動を続け、二次崩壊時には土塊とともに傾斜計1基が崩落した。この一連の観測データについて、滑動時の傾斜速度を主眼に分析を行った。その上で、 $0.01^{\circ}/h$ 以上の傾斜速度が観測されると崩壊に対する危険度が高くなり、 $0.01^{\circ}/h$ 未満でも傾斜の累積傾向が認められれば崩壊の前兆であることが示唆される結果を得た。また、この知見を踏まえて、 $0.001^{\circ}/h$ レベルの面的な斜面監視システムを開発し、低コストでの監視を提案した。

キーワード：表層傾斜計，傾斜速度，斜面監視

(IGC : C-07, E-06, H-09)

1. はじめに

最近のニュースでは、「急激に積乱雲が発達し記録的な豪雨となった」「1時間に100mm以上の猛烈な雨が降り冠水して人や車が立ち往生した」「この時期にこんな雨降ったことがない」など、異常気象に関する話題はきりがなく耳にする。近年の地球温暖化等による海水温の上昇や海流の変化が原因と言われているが、特に気温や降雨の形態が急激に変化していることは誰もが身をもって感じており、これに伴う災害も各地で数多く発生している。

斜面災害に関しては、連続雨量だけではなく降雨強度が大きく変化していることが着目点として挙げられる。これまで警戒されていた梅雨前線や台風シーズンの豪雨はもちろん、年中、降雨に注意していなければならない時代に突入し始めている。このような中で、斜面の挙動には目視によって地表面で確認できるものとできないものが存在し、特に後者は豪雨や巨大地震を引き金として顕在化すると思われ被害をもたらす恐れもあり注意が必要となる。防災・減災が目標とされる現在において人命やインフラを守っていくには、斜面崩壊の前兆を的確に捉え、予防保全という観点で斜面の安定性を維持していくことが重要となっている。

そこで、本稿では、これからの斜面防災の一役を担う

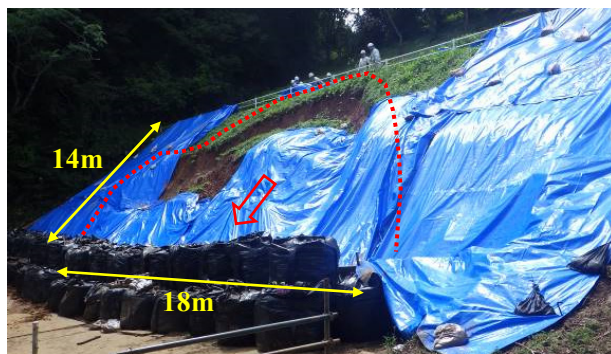


写真-1 崩壊全景

と期待されている表層傾斜計を用いて観測した、写真-1に示す被災盛土の発災直後から復旧完了までのデータを基に、斜面崩壊に繋がる挙動をまとめた。また、斜面の面的監視とランニングコストに着目して取り組んだ新たな観測システムの提案についても最後に紹介する。

2. 表層傾斜計の特徴

表層傾斜計とは、一般に2軸または3軸の傾斜センサ(加速度計)を地表面に設置し、センサの傾きを計測す

ること斜面変位を捉えるものである。センサの分解能は 0.001~0.01° と僅かな動きが計測できることもあり、常時観測を行うことで崩壊に至る前段階が把握できると期待されている。また、2022 年度には一般社団法人全国地質調査業協会連合会支援のもと、傾斜センサによる斜面監視モニタリングのマーケット開拓コンソーシアムも設立されている。

本観測で用いた表層傾斜計は、地中 GL-1.0m にセンサを設置するタイプで、地上に据え付ける機器と比較すると設置作業の容易さでは不利だが、取得データとしては気温変化や外力（人や動物の接触）等の影響が小さく、安定したデータが取得できるメリットを持っている。また、前述の傾斜センサによる斜面監視モニタリングにも参画し、高い評価を得ている。機器の仕様と観測原理を図-1 に示す。観測は 1 時間ピッチで行い、観測値は 2 軸センサで計測した加速度値から換算する。傾斜方向は、真上から平面的に見て上-下流方向（斜面方向）を X 軸、これに直交する方向（斜面と直交方向）を Y 軸とする。一方、傾斜角度は鉛直に設置した時を 0°、水平に倒れた時を 90° として得られる。この傾斜角を二乗和平方根により合成角を算出し、斜面の崩壊挙動を把握する。

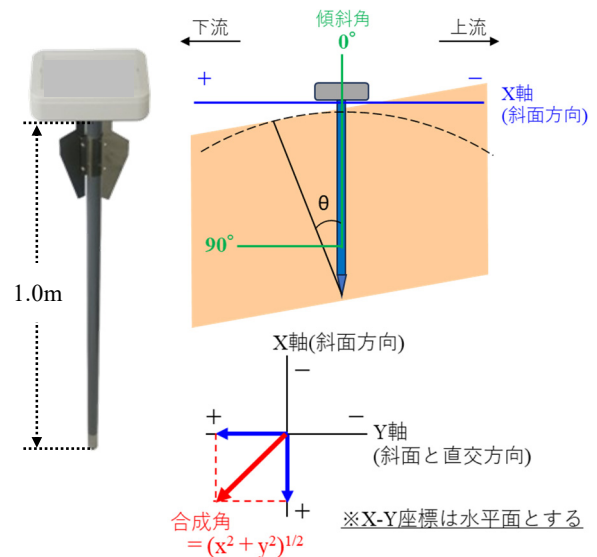


図-1 表層傾斜計と観測原理

3. 被災盛土の概要と得られた崩壊挙動

当被災斜面は延長 L=50m、盛土高さ最大 20m、法面段数 2 段からなる谷埋め盛土で、2023 年 7 月の豪雨により、法尻付近が崩壊した。被災全景を写真-1 に示す。崩壊幅 18m、長さ 14m、深さ約 4m で、小段より約 2.5m 下側に滑落崖を持つ馬蹄形状であった。この復旧作業での二次災害を防止する安全対策として、図-2 に示す 5 箇所を表層傾斜計を設置し観測を行った。写真-2 のように C-1、C-2、C-3 は 7.0m 間隔で頭部滑落崖周辺の変状進行の把握を、C-4、C-5 は 7.0m 間隔で上部法面への影響把握を目的とした。観測期間は復旧工事が完了するまでの約 4 か月間と比較的短い、この間に得られた挙動を図-2 中の傾斜方向図と図-3 に示す。

観測を始めて 3 日後の豪雨（7 月 7~9 日の連続雨量：239mm）によって、図-2 の赤線のような二次崩壊が発生し、C-1 は土塊とともに崩落したが、C-2~C-5 は復旧作業が完了するまで観測した。写真-3 のように、滑落崖の位置は一次崩壊では小段より約 2.5m 下側にあったが、二次崩壊により小段にあるガードパイプの基礎コンクリートが一部区間で露出するまでに上部へ波及した。

次に、各観測点で得られた変動状況を簡単にまとめる。

C-1 は、二次崩壊とともに崩落した。設置後、最初の降雨に連動するように傾き始め、小さい累積変動が約 13 時間続き、総変動量は 0.611° /日に達した。その後、急



写真-2 崩壊全景

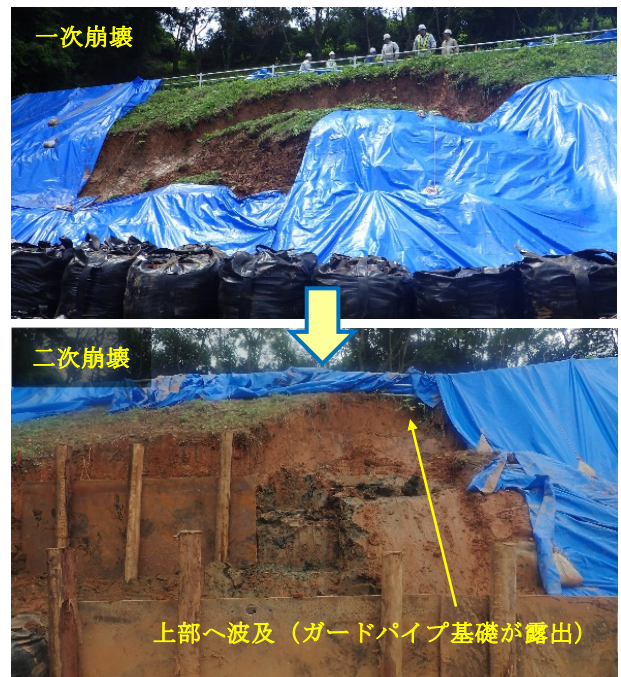


写真-3 C-1 が巻き込まれた頭部滑落の進行比較

表層傾斜計で捉えた被災盛土の崩壊挙動と新たな観測システムの提案

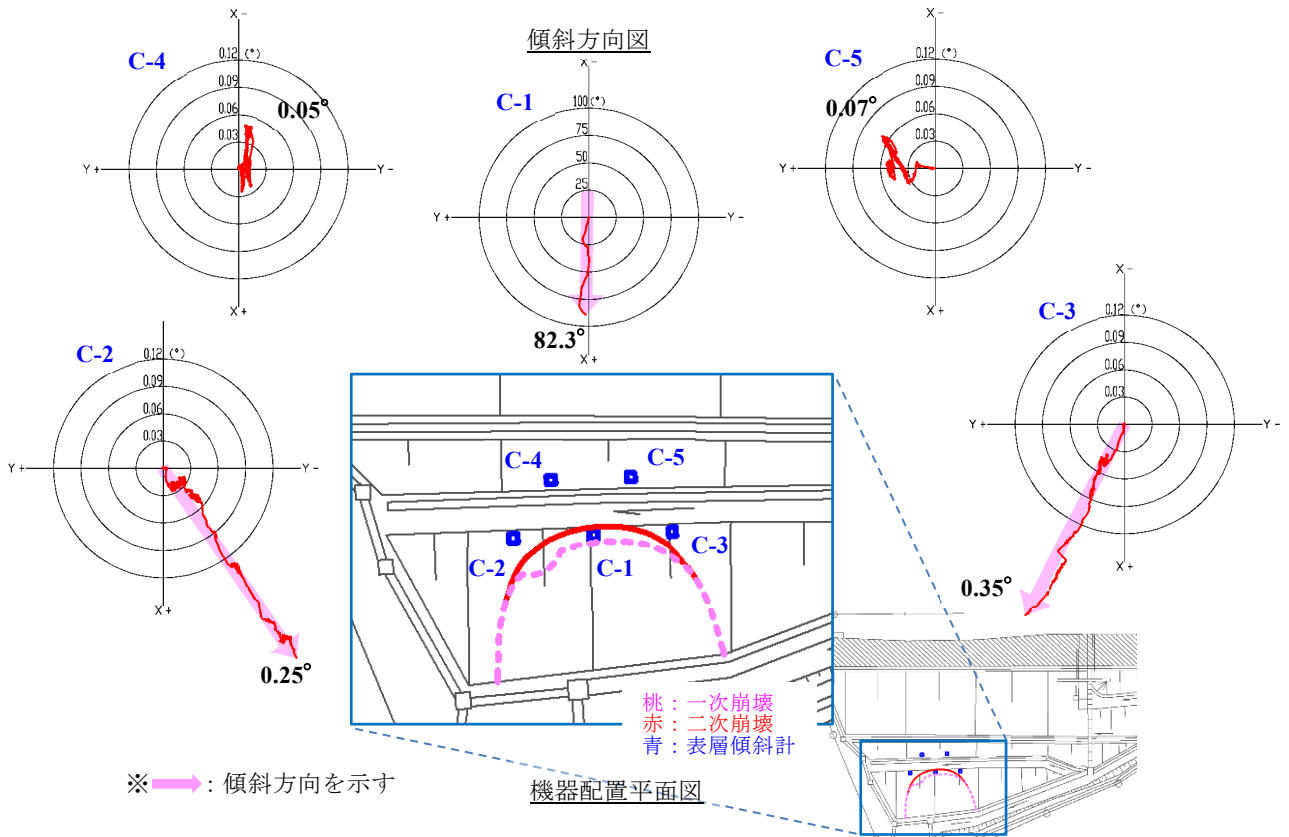


図-2 表層傾斜計の配置と傾斜方向

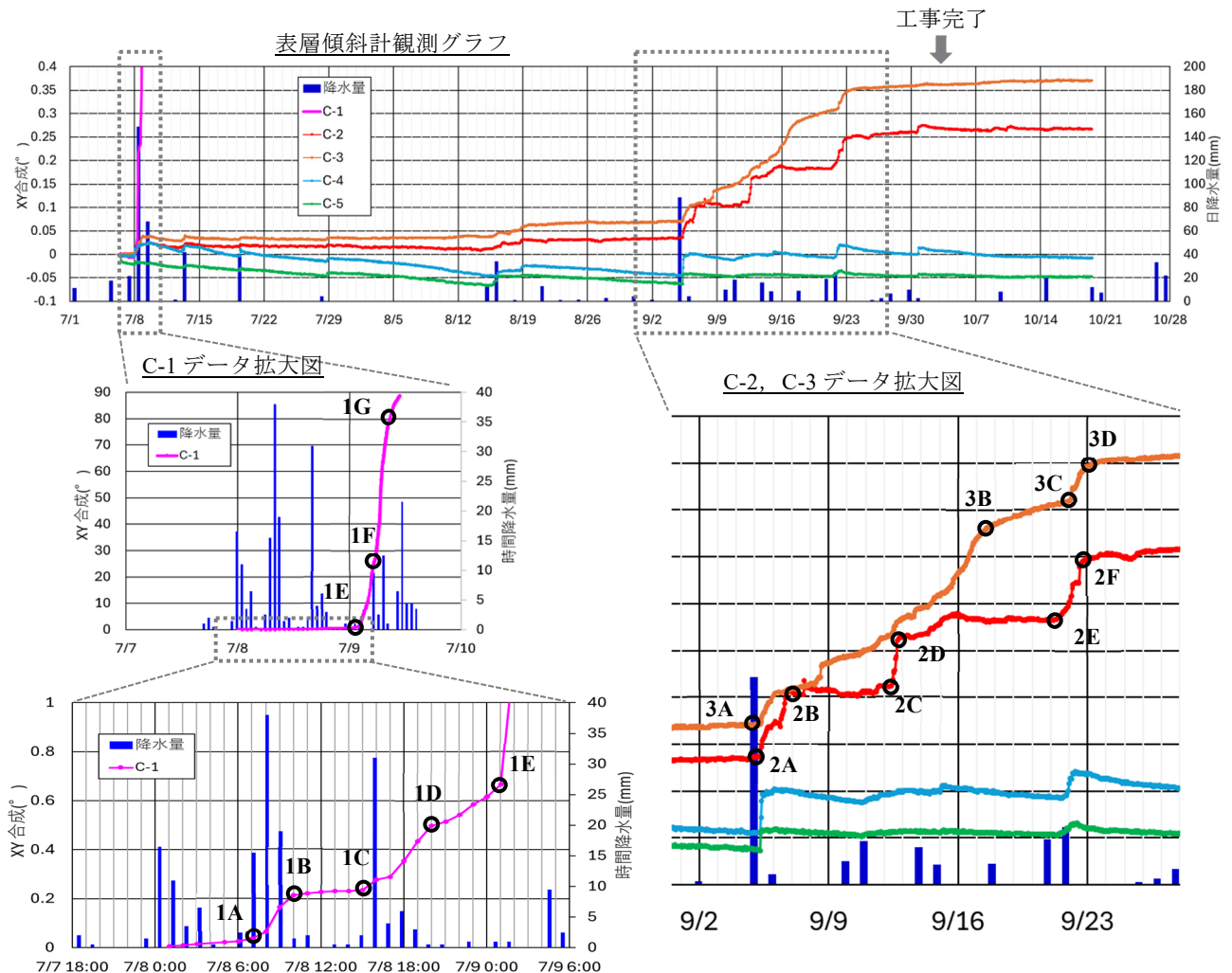


図-3 表層傾斜計の観測グラフ

激に変位が進み、約 10 時間後には 90° 近くになっている。これは、図-4 のようなイメージで崩壊土砂とともに崩落し真横（水平）に向いたものと想定され、傾き始めてからの変位ベクトルは、崩壊と同じ方向（主測線方向）であった。

C-2 及び C-3 は、二次崩壊でも大きく変動することなく、その後の約 2 ヶ月間は、降雨に対して極めて僅かな傾きを示すにとどまった。しかし、9 月 5 日の 88.5mm/日の降雨をきっかけとして施工完了までの期間、降雨に連動した微小な累積変動が続いた。この間は、C-2 は雨が止むと傾きが停止し、次の雨でまた傾くといった動きを続けた。一方、C-3 は雨が止んでも僅かずつではあるが累積を続けた。両者の変動は傾斜計の傾きで見ると 0.03~0.28° で、設置からの変動ベクトルはそれぞれ崩壊中央部（主測線方向）に向かっていた。

C-4 と C-5 は、降雨に反応するように一時的に 0.01~0.04° の傾きは示すものの、時間とともに元に戻るといった動きを繰り返し、累積傾向はなかった。

このような変動を示した C-2~C-5 の 4 基だが、復旧工事が完了した 10 月上旬以降は、それまでと同等の降雨に対しても、ほとんど傾斜が見られていない。以上のような被災盛土における各イベントと、それに対応する傾斜計の主な傾き状況を表-1 にまとめる。

ちなみに、復旧対策は図-5 に示すように、崩壊部分を段切り掘削で取り除いてから排水性の良い砕石に置き換えたことに加え、法尻からの水抜ボーリング工による盛土内水位の低下を図っている。写真-4 はその全景となる。

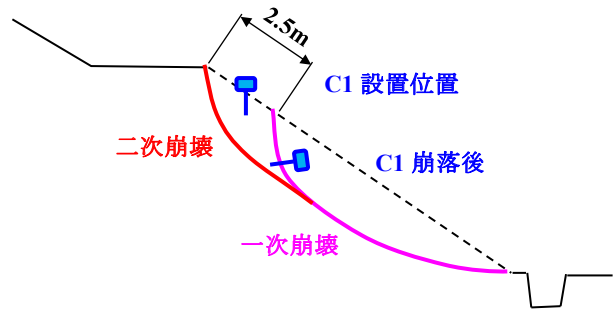


図-4 C-1 の崩落イメージ

表-1 被災イベントと表層傾斜計の主な動き

被災盛土のイベント	表層傾斜計の主な動き
一次崩壊発生	安全管理で表層傾斜計を5箇所に設置
↓	
二次崩壊発生 (連続雨量 239mm)	C-1が土塊とともに崩落
↓	
日雨量88.5mm	C-2, C-3が傾き始める
↓	
復旧工事中	C-2, C-3は降雨時のみ断続的に傾く
↓	
復旧工事了	すべての表層傾斜計の傾きが停止

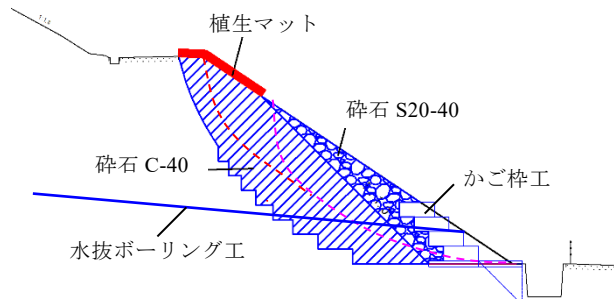


図-5 復旧対策工横断面図

4. 崩壊挙動の評価

ここでは、図-3 内で拡大した範囲の累積変動について、センサが傾斜した速さ（傾斜速度）と観測ピッチの観点から考察を行う。表-2 に、拡大グラフ内に示した各時点での傾斜角を示す。また、傾斜の増加量をその間の時間で除して求めた傾斜速度について表-3 にまとめる。これらを見ると、5 基の表層傾斜計から得られた挙動は、大きく 3 つのパターンに大別することができる。

一つ目は、設置直後から傾斜が累積した C-1 のパターンで、0.03~0.06°/h の区間傾斜速度で累積し、その後の降雨に相関して急激に増加したものである。この間の最大傾斜速度は 0.10°/h であった。復旧工事中の作業員によると、新たな亀裂が確認できたのは 1A~1E 付近の時間帯に当たり、この間の最大傾斜速度は単純平均で 0.08°/h となる。この結果を見ると、設置時には目視可能な地表面の変状は確認できなかったが、既に斜面が緩んでいた範囲に設置していたものと考えられる。また、崩壊が始まったと推定される 1E~1G の区間では、最大傾斜速度は単純平均でも 35.1°/h と大きい。

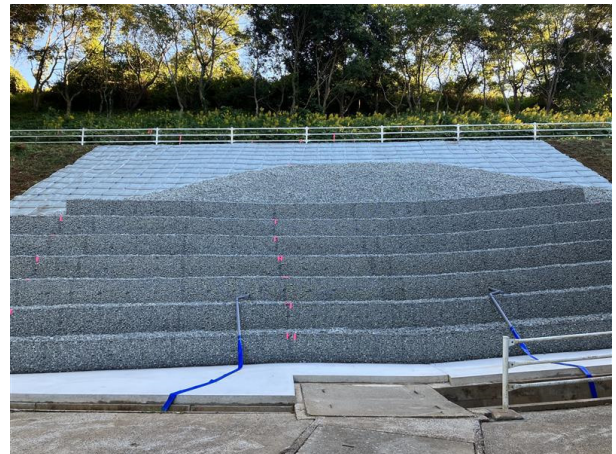


写真-4 復旧工事了後の全景

二つ目は、設置して約 2 か月後から累積変動を始めた C-2 及び C-3 のパターンである。C-2 は、降雨と相関するように傾き、動き始めから概ね収束するまでの区間傾斜速度は 0.002~0.006°/h であり、この間の最大傾斜速度は 0.017°/h であった。一方、C-3 は、動き始めてからは降雨にあまり相関することなく傾斜し、3A~3D で見

表-2 表層傾斜計の観測値

観測点	観測日時	傾斜角(°)
1A	7/8 7:00	0.038
1B	7/8 10:00	0.216
1C	7/8 15:00	0.235
1D	7/8 20:00	0.498
1E	7/9 1:00	0.668
1F	7/9 5:40	27.149
1G	7/9 9:01	82.355
2A	9/5 7:00	0.037
2B	9/6 19:00	0.106
2C	9/12 9:00	0.111
2D	9/12 17:00	0.161
2E	9/21 9:00	0.183
2F	9/22 23:00	0.249
3A	9/5 7:00	0.071
3B	9/17 19:00	0.283
3C	9/21 18:00	0.309
3D	9/22 22:00	0.346

表-3 傾斜速度算出表

観測点間	時間差 (h)	傾斜の増加量 (°)	区間傾斜速度 (°/h)	最大傾斜速度 (°/h)	最大傾斜速度の単純平均(°/h)
1A→1B	3	0.178	0.059	0.100	0.077
1C→1D	5	0.263	0.053	0.080	
1D→1E	5	0.17	0.034	0.051	
1E→1F	4.7	26.481	5.634	14.992	35.153
1F→1G	3.3	55.206	16.729	55.314	
2A→2B	36	0.069	0.002	0.009	0.014
2C→2D	8	0.05	0.006	0.017	
2E→2F	38	0.066	0.002	0.016	
3A→3B	300	0.212	0.001	0.004	0.0033
3B→3C	95	0.026	0.0003	0.002	
3C→3D	28	0.037	0.0013	0.003	
3A→3D	423	0.275	0.0007	0.004	

と区間傾斜速度は $0.001^{\circ}/h$ 未満ではあるが累積を続け、この間の最大傾斜速度は $0.002\sim 0.004^{\circ}/h$ であった。なお、地表面変状はどちらの地点においても確認されていない。このように C-2, C-3 両者の累積期間の傾斜速度は、C-1 で崩壊に至る直前 (1A~1E) の最大傾斜速度 $0.05\sim 0.10^{\circ}/h$ と比べると小さいが、確実に崩壊に向かっていくと判断でき、C-1 のように連続 100mm を超えるような降雨に乗じて崩壊リスクが急速に高まると推定する。

三つ目は、C-4, C-5 のように、降雨に対して一時的には僅かに傾くが元に戻り、累積傾向を示さないパターンである。これと類似する動きは、他現場の斜面に設置した表層傾斜計でもよく観測されるもので、地表面変状は何れの現場でも見られない。表層傾斜計の分解能が 0.001° と敏感なことや、GL-1.0m のセンサ深度には草木の根が密集していることを踏まえると、累積傾向がない場合は斜面として健全な状態を維持していると言える。

これら3つのパターンから、傾斜速度が $0.01^{\circ}/h$ 以上であれば既に斜面崩壊が始まっている可能性が高く、傾斜速度が $0.01^{\circ}/h$ 未満であっても累積傾向を示す場合は崩壊の前兆を捉えているものと考えられる。

次に、C-1~C-5 の結果を踏まえて、観測ピッチについての評価を行う。当現場では、常時の計測間隔を1時間ピッチとし、傾斜速度が $0.01^{\circ}/h$ 以上になると注意レベルとして10分ピッチに移行し、さらに $0.02^{\circ}/h$ 以上になると警戒レベルとして予め設置していた端末にメールが発報されるという閾値設定で監視した。この閾値は、これまでの表層傾斜計による観測の中で傾斜速度が $0.02^{\circ}/h$ 以上になると、現地の地表面に何らかの変状が確認されることが多いという経験値から決定した。今回、注意レベルを超えたのは C-1 のみで、目視でも亀裂が確認された 1A~1G の期間であった。このことから、傾斜速度 $0.01^{\circ}/h$ を閾値とすることは妥当と判断できる。ま

表-4 観測された傾斜速度の評価 (文献2) より引用)

Summary of the tilting rate and duration observed on slope surface.

Site	Sensor unit	Tilting rate, R (°/h)	Duration before failure/ stabilization, T	Failed or stabilized
Artificial rainfall test	K50	0.15	6.75	Failed
		3.81	1.75	
		0.096	1.5	
		45	0.5	
	T50-1	0.02	6.66	Failed
		0.4	2.66	
		195	0.16	
	T50-2	-	-	(Blocked by stone)
		K150	0.016	
	0.094		3.177	
	0.46		1.847	
	0.79		0.68	
T200	0.016	7.5	Stabilized	
	T300	0		-
Site A		Unit2	0.16	1
	Site B		Unit2	0.01
Site C		K-3		0.006
	0.013		130	
	0.079		6	
Site D	K-1	0.00017	456	Stabilized by countermeasures
		0.0014	96	
		0.006	24	

た、崩壊の前兆を示す期間は傾斜速度が極めて小さく緩慢な変動であるため、観測ピッチが1時間であっても十分に把握できることがわかった。ただし、 $0.01^{\circ}/h$ 以上となった時点で直ちに現地確認を行う必要があると言える。

ここで、既往の研究成果において、Uchimura, et al. ²⁾ は、人工斜面及び自然斜面に対して行った人工降雨による実験から、表-4 のように傾斜速度が $0.1^{\circ}/h$ を超えると崩壊に至る結果となるため警告すべきであり、 $0.01^{\circ}/h$ を超える状況では事前注意を与える状況であると提案している。また、Rasel, et al. ³⁾ は、切土斜面に対する自然の降雨による崩壊事例の分析から、表-5 や表-6 のように、

表-5 傾斜速度と変位量による滑動タイプの分類（文献3）より引用）

Classification of movement types according to tilt rates and displacement rates.

Type of movement	Tilt rate (deg/h)	Displacement rate (mm/h)	*TRB classification (mm/h)	**Classification by Dixon and Spriggs (mm/h)
Very slow	<0.004	<0.4	<0.204	<0.6
Slow	0.004-0.04	0.4-4.0	0.204-2.04	0.6-6
Moderate	0.04-0.4	4.0-40	2.04-62.4	6-60
Rapid	>0.4	>40	>62.4	>60

*Transport Research Board (1978) landslide classification based on movement rates (Cruden and Varnes, 1996; Dixon and Spriggs, 2007).

** Dixon and Spriggs (2007) classified slope displacement rates using quantified Acoustic Emission (AE) generated by the active waveguide.

表-6 傾斜速度による警報レベルの判断基準（文献3）より引用）

Summary of control/criteria point of warning signal.

Tilt rate (deg/h)	Displacement rate (mm/h)	GWT change rate (m/h)	Warning level
0.004	0.4	0.04	Warning
>0.04	>4.0	>0.4	Evacuation

傾斜速度が $0.04^\circ/h$ を超えると崩壊に至るような変形を示すため避難すべき状況であり、 $0.004^\circ/h$ 以下で弾性的な変形が見られることから、 $0.004^\circ/h$ を超えると注意喚起の状況であることを示している。これら既往資料の概要を表-7にまとめる。

これと同様に今回の観測結果に基づいた危険度評価を行うと、表-8に示すように、 $0.05^\circ/h$ 以上で斜面変状が発生している応急対応レベル、 $0.01^\circ/h$ 以上で斜面崩壊が始まっており変状のある可能性が高い現地確認レベル、 $0.01^\circ/h$ 未満で累積傾向があれば崩壊の前兆と判断できる予防保全レベル、同じ $0.01^\circ/h$ 未満でも累積傾向がなければ崩壊の懸念がなく健全レベルとまとめることができる。なお、今回のデータは一次崩壊後の緩んだ斜面に設置した条件のもので、健全な斜面を正しく評価する閾値とは言い難い。そこで、参考文献2)、3)と比較した上で、危険度評価(案)として提案した。そのため、健全な斜面でのデータが今後得られた時点で、見直しを行う必要があると考えている。

5. 傾斜観測に基づく新たな観測システムの提案

ここでは、前述した被災盛土における表層傾斜計での傾斜観測でわかったことについて、(1)~(3)にまとめる。また、今回の観測結果を踏まえた、新たな観測システムの提案を示す。

- (1) 降雨に相関して $0.05^\circ/h$ 程度の累積した傾斜速度が得られる場合は、既に斜面が緩んでいる（崩壊が始まっている）と考えることができ、この時点では地表面でも何らかの変状が確認できるものと推定する。つまり $0.05^\circ/h$ 以上になると崩壊発生の可能性が高い。
- (2) 傾斜速度が $0.01^\circ/h$ 以上になると斜面崩壊は既に始まっており、 $0.01^\circ/h$ 未満であっても累積傾向があれば崩壊の前兆で、累積傾向になれば健全斜面と判断できる。しかし、この時点を目視で確認することは不可能であり、予防保全としては表層傾斜計

表-7 既往資料の概要一覧表

文献名	傾斜速度（閾値）	危険度評価
参考文献2)	$0.1^\circ/h$ を超える	警告
	$0.01^\circ/h$ を超える	事前注意
参考文献3)	$0.04^\circ/h$ を超える	避難
	$0.004^\circ/h$ を超える	注意喚起

表-8 観測結果による傾斜速度の危険度評価（案）

傾斜速度	危険度評価	レベル	
$0.05^\circ/h$ 以上	斜面に変状が確認できる	応急対応	
$0.01^\circ/h$ 以上	斜面崩壊が始まっている 変状がある可能性が高い	現地確認	
$0.01^\circ/h$ 未満	累積あり	斜面崩壊の前兆	予防保全
	累積なし	斜面崩壊の懸念なし	健全

等による観測が必須となる。

- (3) 斜面崩壊の前兆現象は極めて小さく緩慢な変動であるため、 $0.001^\circ/h$ レベルでの観測が可能なシステムが必要となる。また、前兆を把握する観点では、計測間隔が1時間ピッチであっても十分な効果が得られる。

この観測結果を受けて、新たに開発した表層傾斜計の観測システムについて提案したい。開発を始めたきっかけは、現在では各メーカーから10機種前後が市販されており、それぞれに特徴はあるものの、共通して言えることは製品自体の価格と観測費、つまりイニシャルコストとランニングコストの両者が高価ということである。表層傾斜計が、斜面崩壊の前兆を捉えることが理解されていても、コスト高では導入できない。仮に導入できたとしても台数が制限されるため、予防保全という観点ではなく、崩壊が発生した後の二次崩壊の監視に用いられることが現状である。

そこで、「予防保全の確立を目的に、広く、安く、簡単に斜面を監視する」という概念で開発を進めた。ただし、一から新しい表層傾斜計を作製するには多大な労力と時間、費用が発生してしまうため、現行品の廉価版を開発

することとし、大きく二つの改良に焦点を当てて取り組んだ。一つ目は、利用目的を予防保全に絞って、観測ピッチを1時間のみとした。これは、斜面崩壊の前兆現象が極めて小さく、緩やかな変動期における傾斜の累積性の観測を主眼とすることで、1時間ピッチでも十分に把握できると判断したためである。二つ目は、現場内で図-6に示すように親機と子機という考え方を採用し、子機20台分のデータをBluetooth®通信で親機に集約し、親機からクラウドには1台分のLTE Cat.M1 (LTE-M) 電話回線で送信する観測システムを構築した。これにより、観測期間中のランニングコストを大幅に削減できたのみでなく、多点配置することで面的に斜面挙動を捉えることを可能とした。このメリットとしては、図-7に示すように、周辺と異なる挙動を示す範囲を把握することで、斜面内の不安定範囲や崩壊範囲を特定できることにある。

このような考えで作製した開発品の概要を、現行品との比較表として表-9に示す。なお、価格帯としては、開発品のセンサが20点で1セットのため、現行品も20台導入した場合で比較すると、イニシャルコスト面で半分以下、ランニングコスト面では年間で1/4にまで抑えることができた。これは、面的な斜面挙動の把握と異常豪雨に備える予防保全の推進を目指す開発品が、より安価で導入され易いように、細部の材料変更や通信費の見直し等、トータルのコスト削減を行った結果であると言える。

6. おわりに

盛土の崩壊事例に対して、表面傾斜計で得られた観測データについて分析を行った。設置した5基の表層傾斜計から、3つのパターンの結果が得られた。一つは、大きく崩落した箇所に設置したもので崩落する直前までの最大傾斜速度は $0.10^{\circ}/h$ であった。二つ目は、設置期間中に累積を続け、確実に崩壊に向かっていくと判断できる箇所で見測されたものである。このパターンでは、最大傾斜速度が $0.017^{\circ}/h$ であった。三つ目は、降雨に対して一時的には僅かに傾くが元に戻り、累積傾向を示さないものである。

この結果と、過去の研究成果を踏まえ、 $0.01^{\circ}/h$ 以上の傾斜速度が観測されると崩壊に対する危険度が高くなり、 $0.01^{\circ}/h$ 未満でも傾斜の累積傾向が認められれば崩壊の前兆であることが示唆される。この知見を踏まえ、 $0.001^{\circ}/h$ レベルの面的な斜面監視システムを開発し、低コストでの監視を提案した。

最後に、予防保全の観点として崩壊の前兆を捉えるためには観測機器の設置が必須で、しかも崩壊範囲が特定されていない場合には、ある程度の広い範囲を監視することが求められる。今後は、面的な斜面監視が安価にできる新たに開発した観測システムの活躍に期待したい。

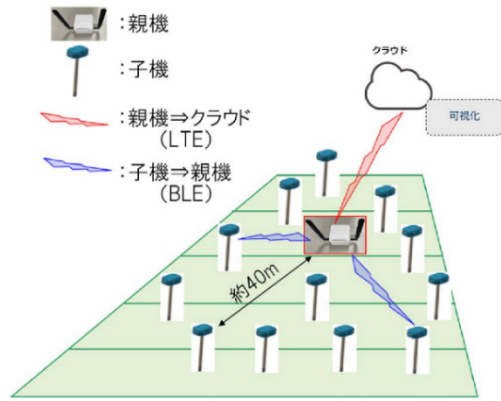


図-6 開発品の観測イメージ図

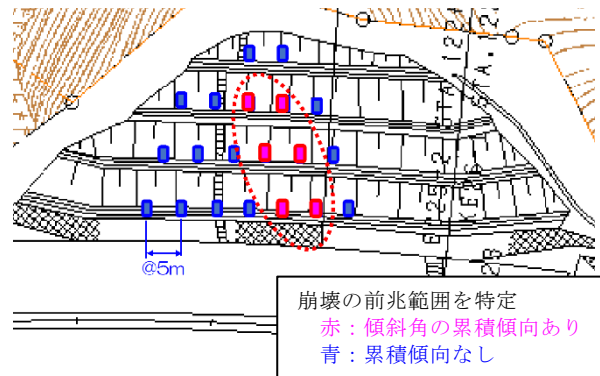


図-7 崩壊の前兆を観測したイメージ図

表-9 現行品と開発品との比較

	現行品	開発品
分解能	0.001°	0.001°
通信方式	LTE-M(1台ごと)	親→クラウド：LTE-M (20台まとめて) 子→親：BLE-5
配信間隔	常時：1時間ピッチ 変動時：10分ピッチ	1時間ピッチのみ
電源(寿命)	リチウム電池(5年)	親：ソーラーパネル 子：リチウム電池(5年)

参考文献

- 傾斜センサによる斜面監視モニタリングのマーケット開拓コンソーシアム、一般法人全国地質調査業協会連合会：全地連技術フォーラム 2023 横浜、<https://tiltsensorcon.com>, (参照 2024.6.19)。
- Uchimura, T., Towhata, I., Wang, L., Nishie, S., Yamaguchi, H., Seko, I., and Qiao, J.: Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors. *Soils and Foundations*, Vol.55, pp.1086–1099, 2015.
- Rasel, Md. S., Nakata, Y., Shitano, M., and Kaneko, M.: Rainfall-induced unstable slope monitoring and early warning through tilt sensors, *Soils and Foundations*, Vol.61, No.4, pp.1033-1053, 2021.

(2024年6月24日 受付)