

# 最近の地すべり災害及び調査技術 若手とベテランによる調査・研究報告

2024. 5. 24

## シンポジウム論文集 目次

### 第一部 2023 年度学生・院生対象研究助成の採択者による成果報告

- 福田蒼太（群馬大学理工学部 4 年，現在：同大学大学院理工学府）  
糸魚川市来海沢地区の融雪地すべりを対象とした有限要素解析……………3
- 相場菜摘（新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程 2 年 現在：国土防災技術（株））  
新潟県糸魚川市・上越市で発生する流動型地すべりの基岩・風化土層の地質  
・土質的特徴……………6
- 清瀬莉花（新潟大学理学部 4 年，現在：同大学大学院自然科学研究科）  
福島県滝坂地すべり地の地下水に関する水文地質学的研究……………9

### 第二部 最近の地すべり災害及び調査技術 若手とベテランによる調査・研究報告

- 大塚洋之（株 興和）  
糸魚川地区で発生した地すべりの形態と地質……………13
- 沼澤輝久・竹内 均（株 日さく）  
広田地すべりにおける能登半島地震時の観測データとその考察……………15
- 寺本圭吾・古澤明里朱・福島尚志・佐志啓未・山口裕二・草谷恭行（日本工営（株））  
地すべり防止施設の維持管理におけるデジタル技術活用についての考察……………19
- 山田靖司・神田広信・新部貴理・大曾根啓介（応用地質（株））  
斜面管理における新技術の紹介～クリノポールと VIBRES®～……………21

## 2023 年度学生・院生対象研究助成 成果報告

【研究テーマ】

糸魚川市来海沢地区の融雪地すべりを対象とした有限要素解析

【要旨】

本研究では、ひずみ軟化パラメータを用いた 2 次元弾粘塑性有限要素解析を実際の地すべり発生斜面に適用し、地すべりの崩壊メカニズムを解明することを目的とする。

令和 3 年 3 月 3 日 22 時 30 分頃に、新潟県糸魚川市来海沢地区で融雪による大規模な地すべりが発生した。本地すべりは 3 段階に分けて発生したとされており、滑落崖が確認される 3 か所において、それぞれ頭部、中腹部、末端部をそれぞれブロックごとに区分されている。しかし、どのブロックが先に地すべりが発生したかについては議論が行われている。そこで本章では、地すべりのメカニズムを解明するために 2 次元弾粘塑性有限要素解析を行い、地盤工学の観点から崩壊ブロックの推測を行うことを目的とする。

【研究成果・まとめ】

先述した地すべり崩壊地において、2023 年 10 月 24 日から 25 日にかけて、現地の状態の把握及び土質試験を目的とした現地計測及び原位置試験を行った。簡易動的コーン貫入試験、ベーンコーンせん断試験、および METER 社製携帯型ミニディスクインフィルトロメータを用いた現地変水位試験を実施した。土質試験の結果から、後述する数値解析に用いるパラメータを決定した。

崩壊斜面を数値解析で使用するために作成した有限要素分割を図 2、地盤材料パラメータを表 1 に示す。せん断抵抗角、単位体積重量は現地で行ったベーンコーンせん断試験の結果から決定した。弾性係数は地盤深さによる拘束圧依存性を考慮するため、現地で行った簡易動的コーン貫入試験より計測した  $N_d$  を  $N$  値に換算し求めた。ポアソン比は砂地盤の一般的な値を用いた。

本解析対象地は地すべり発生前は変位計が設置されておらず、ひずみ速度を規定することができない。そのため、粘塑性ひずみ速度を規制するパラメータ  $\dot{\alpha}$  と  $n$  は既往の研究結果から便宜的に  $\dot{\alpha}=0.036\text{min}^{-1}$  及び  $n=10$  を用いた。

ひずみ軟化パラメータ(表 2)は、残留強度  $c_r$  は地下水位上昇により粘着力が減少することを考慮するために 0 に近い値( $c=0.1\text{kPa}$ )に設定した。また、残留強度  $c_r$  に対するひずみ軟化パラメータ(表 2)も本章では便宜的に  $A_c=5$  と設定した。残留強度  $\phi_r$  及びひずみ軟化パラメータ  $\tan A_c$  は、せん断抵抗角  $\phi$  が低減することは土質パラメータ的には砂質土から粘性土のような地盤材料へ変わ



図 1 原位置試験写真

(a)頭部 (b)中腹部 (c)末端部

っていくことを表すため、超短期的なクリープ変形を再現する本解析ケースでは設定していない。  
 解析に入力する地下水位は、変位と同様に明らかになっていない。そこで、地すべりが融雪によって引き起こされたものであることから、1000分かけてゆっくりと地下水位が地表面まで到達するように、斜面に一様に与えた(図3)。

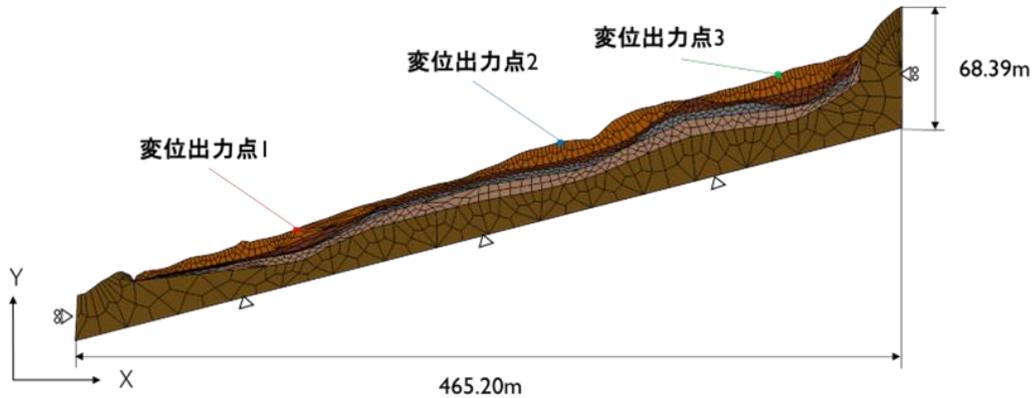


図2 有限要素分割図

表1 解析に用いた材料定数

材料番号	材料名	弾性係数 E(kPa)	ポアソン比 $\nu$ (-)	粘着力 c(kPa)	せん断抵抗角 $\phi$ (deg.)	ダイレイタンシー角 $\psi$ (deg.)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	礫混じり粘土	18200	0.3	20.8	32.0	0	18
2	強風化砂質シルト岩	40600	0.3	7.95	51.3	0	18
3	風化砂質シルト岩	71867	0.3	7.95	51.3	0	18
4	弱風化砂質シルト岩	123900	0.3	2.40	32.0	0	18
5	基岩	200000	0.3	100	40	0	18

表2 ひずみ速度とひずみ軟化のパラメータ

材料番号	ひずみ速度パラメータ		残留強度		ひずみ軟化パラメータ	
	$a$ (min <sup>-1</sup> )	$n$	粘着力 $C_r$ (kPa)	せん断抵抗角 $\phi_r$ (deg.)	$A_c$	$\tan A_\phi$
1	0.036	10	0.1	-	5	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	0.036	10	0.1	-	5	-
5	-	-	-	-	-	-

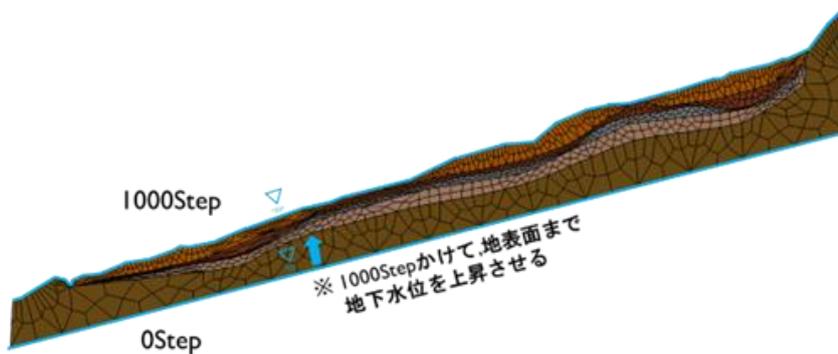


図3 地下水位の設定

解析で得られた変形図を図 4 に示す。斜面底部が上部に比べて大きく変形しており、B ブロックが C ブロックの変形に引張られる形で滑っている。解析で得られた累積変位量を図 5 に示す。まず 700min を過ぎたあたりで底部の変位が加速度的に増加した。続いて 800min を過ぎたあたりで中腹部の変位が底部と同様に加速度的に増加した。一方で頭部の最終変位は 50mm 程度と僅かであり、時刻歴における変位量も僅かに増加傾向にあるが、底部、中腹部の変位量と比べると相対的に小さい傾向にある。これは、底部、中腹部の地すべり後に頭部の地すべりが発生したと仮定することができ、頭部が底部、中腹部とは異なる崩壊メカニズムで地すべりが発生したと推測することができる。この結果から、実際の斜面の崩壊メカニズムとして底部→中腹部、時間を置いて頭部の地すべりの順で発生したと推測する。

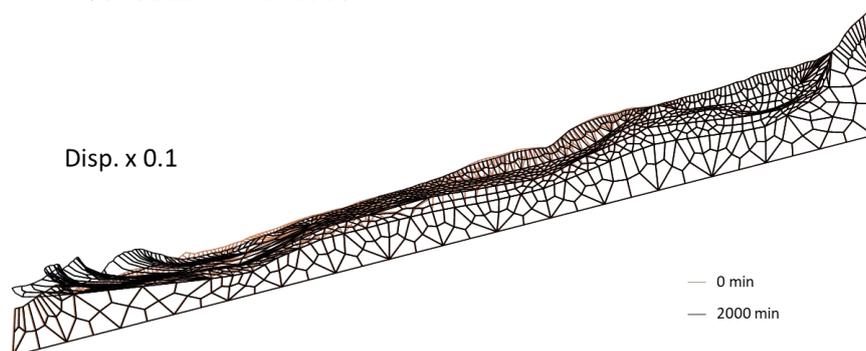


図 4 変形図

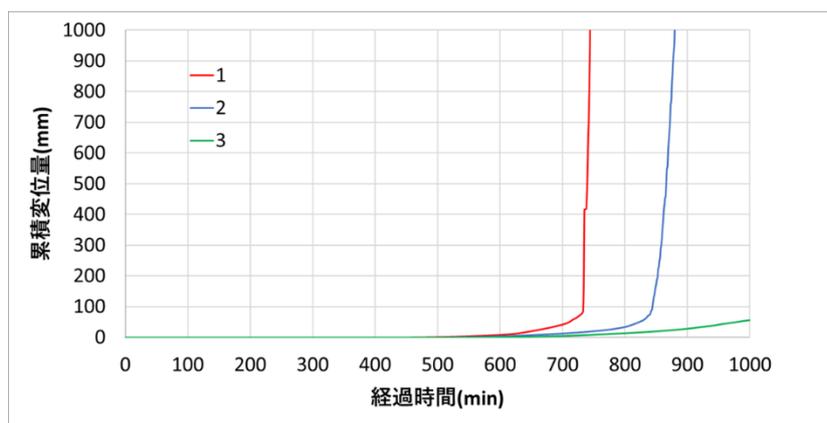


図 5 数値解析で得られた累積変位量

【参考資料・謝辞】

若井明彦，小谷健太，大澤宗一郎，Deepak Raj Bhat，相楽渉（2021）：安全率とすべり速度の経験則を粘性定式化に応用した地すべり運動の有限要素シミュレーション，日本地すべり学会誌，Vol. 58，No. 1，pp. 1-15.

新潟大学の渡部直喜教授，相場菜摘氏には糸魚川市来海沢地区の調査・研究におきまして，多くのご助言・ご協力をいただきました。新潟県糸魚川地域振興局様には，来海沢地区地すべりのデータ提供等のご協力を頂きました。国土防災技術株式会社様には，来海沢地区地すべりのデータ提供等のご協力を頂きました。国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所様には，糸魚川市来海沢地区の調査・航空レーザ測量データの提供のご協力を頂きました。

研究助成採択者 福田蒼太（群馬大学理工学部 4 年）

### 【研究テーマ】

新潟県糸魚川市・上越市で発生する流動型地すべりの基岩・風化土層の地質・土質的特徴

### 【要旨】

2021 年 3 月に糸魚川市来海沢地区で発生した地すべりは、地すべり発生域の斜面長に対して地すべり崩土の流下距離が 3 倍以上に達する流動型地すべりであった。崩土の移動距離は、土砂量、斜面勾配、流路地形、集水条件などに支配されるが、基岩地質及びその風化層に特有の流動化特性も重要な要因と考えられる。糸魚川市や上越市では来海沢地区のみならず、特定の地層(根知層上部～名立層下部の砂質シルト岩)が分布する複数の地区において、発生域の斜面長より崩土の流下距離が長い流動性地すべりが発生している。本研究では、流動性地すべりが発生する地区において、野外調査(地形・地質・土質)及び室内実験(鉱物・化学分析、土質試験)を行い、基岩地質及びその風化層に共通する物質特性を解明することを目的とする。

### 【研究成果・まとめ】

#### 方法

本調査地域において地すべり地内を中心に野外調査を実施した。現地において地すべり地内および周辺の地質露頭の観察、シルト岩の岩塊や崩積土(斜面堆積物)、流出土砂(泥流堆積物)等の試料を複数採取した。

地すべり内部の崩積土、基盤岩の液性限界(WL)、塑性限界(W<sub>p</sub>)、および塑性指数(I<sub>p</sub>)を求めるため、液性限界試験・塑性限界試験(地盤工学会基準 JGS0140-2009)を行った。粒度試験は地盤工学会基準 JGS0310-2009 に従った。透水試験は、現地で容積 100 ml のステンレス製円筒に不攪乱で採取した試料について、大起理化工業(株)製の土壤透水性測定器 4 点式 DIK-4012 を用いて変水位法で行った。各試料を 2.00 mm < 粒径 < 4.25 mm、含水比=50%に調整し、試料を封入した一辺 70 mm の角形ポリ容器をドラム回転式攪拌試験器に設置し、回転(29 rpm×60 分)させ、試験後の粒径を測定した。ベーンせん断試験は各試料を粒径 < 2.0 mm、含水比は液性限界の値に近い ω=50%に調整して実施した。十字型の羽根(15 mm×30 mm のベーン)を試料中で回転(20°/分)させ、回転抵抗力を測定し、せん断強度に換算した。リングせん断試験は、炉乾燥した試料を乳鉢で細かくし、粒径 < 2.0 mm に調整して使用した。試料を飽和させ、150 kPa の垂直応力で正規圧密した後、剪断試験を行った。まず、粘着力 c と内部摩擦角 Φ を求めるため、せん断箱を排水状態にし、0.05 mm/s のせん断速度で、異なる垂直応力下での残留強度を求めた。続いて、応力経路を求めるため、せん断箱を非排水にし、せん断応力を上昇させて、せん断実験を行った。泥流のレオロジーから、岸本(1973)の手順に従って泥流のせん断強度を見積もった。

#### 結果と考察

現地調査・傾斜量図・X 線 CT 写真、スレーキング試験などから、本地すべりは再活動型の地すべりであり、粒子が破碎され岩片化されやすいと考察した。

液性限界試験の結果から地すべり地の風化シルト岩・泥流堆積物は比較的小さい含水比で液性限界に達することが明らかとなった。粒度試験・回転試験の結果、粒子破碎による細粒化が進行し、それに伴って保水性が増大すると推測した。透水試験結果からも、風化シルト岩と泥流堆積物で透水係数に2桁の較差が確認できている。リングせん断試験結果から、せん断による粒子破碎で生じた過剰間隙水圧はせん断強度を著しく低下させ、同時に粒子破碎による細粒化は透水係数の大幅な低下をもたらした。土と水の分離を妨げたと推測した。この保水性・難透水性によって、低いせん断強度が維持され、泥流と化した土砂が長距離を流動したと考えられる。

周辺の地すべりについて、来海沢地すべりと同様に液性限界試験を行ったところ、どのシルト岩も比較的低い含水比で液性限界に到達することが明らかとなった。回転試験を実施したところ、破碎の進行度合いには違いが見られた。これを移動係数  $Tr$  ( $Tr = \text{地すべりの移動距離} / \text{地すべりの斜面長}$ ) と比較すると移動係数が高い地すべりの試料ほど破碎しやすい傾向が示唆された。

## まとめ

1. 本調査地域は地すべり多発地域であり、来海沢地すべり地すべりも古い地すべりの再活動であると推定され、シルト岩がすでに岩片化していたと推察する。
2. 地すべりの崩土は比較的小さい含水比で液性限界に達するため、流動化しやすい。さらに浸水や流動によって容易に細粒化するため、透水係数の低下によって土と水が分離せず、流動が継続したと推察される。
3. 上流から下流にかけての土砂の粒径分布から、流動にともなってさらに粒子が破碎し、細粒化が進行したと示唆される。
4. 非排水条件のリングせん断試験の応力経路から、粒子破碎による細粒化とそれに伴う過剰間隙水圧の増加及びせん断強度の低下が確認された。この結果から推定される泥流のせん断強度は、レオロジーから見積もられたせん断強度、ベーン試験によるせん断強度の結果とも矛盾しない。
5. 地すべり土塊を構成する風化シルト岩が細粒化しやすい特性を持つことに加え、地すべり運動に伴う粒子破碎と過剰間隙水圧の発生がせん断強度の著しい低下をもたらした。土砂の流動化を促進したと考えられる。
6. 周辺地すべりの地すべり土塊を構成する風化シルト岩も、液性限界や粒径分布など来海沢と同様の特徴を有している。さらに回転試験結果を移動係数と比較すると、移動係数が高い地すべりのシルト岩ほど細粒化しやすい傾向が示唆される。風化シルト岩が細粒化しやすい特性をもつことが流動化の主要因の1つと考えられる。

## 【参考資料（論文・学会発表など）】

- 土木学会（2015）：土質試験の手引き（第三版），公益社団法人土木学会・丸善出版株式会社  
地盤工学会（2020）：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），公益社団法人地盤工学会  
木村 誇・桂 真也・丸山清輝・石田孝司（2016）：長距離移動した融雪地すべりの発生域・移送堆積域の地形特性，日本地すべり学会誌，53(2)，31-42。

白杵伸浩・田中義成・水山高久（2005）：移動距離の長い地すべりの実態，砂防学会誌，57(5)，47-52.

石田孝司・金澤瑛・丸山清輝，2017，流動化した地すべり移動土塊の土質について．第66回平成29年度砂防学会研究発表会概要集，430-431.

石田孝司・金澤瑛・丸山清輝・石川茂・平松晋也，2018，糸魚川市海川流域の2箇所が発生した地すべりの特徴と移動体の土質性状．第67回平成30年度砂防学会研究発表会概要集，513-514.

【参考図】

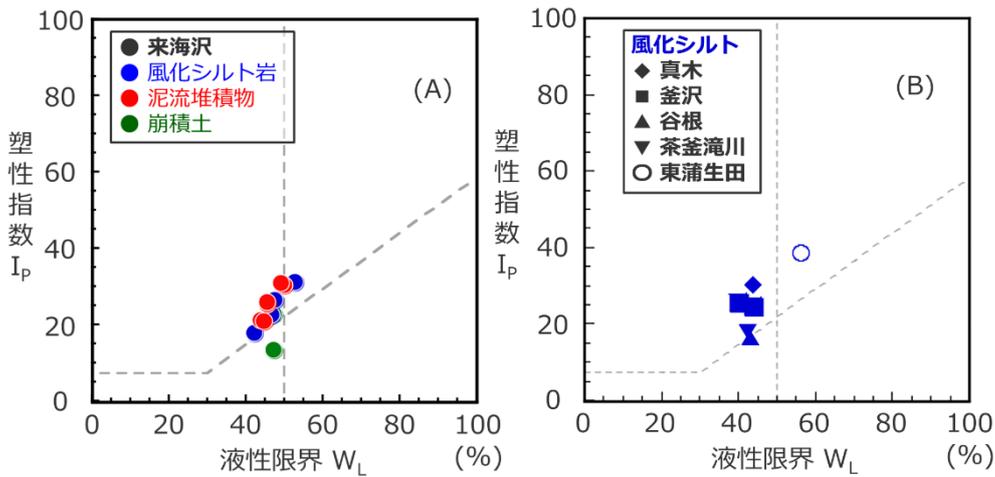


図 1. (A) 来海沢地すべり試料の塑性図 (B) 周辺地すべり試料の塑性図

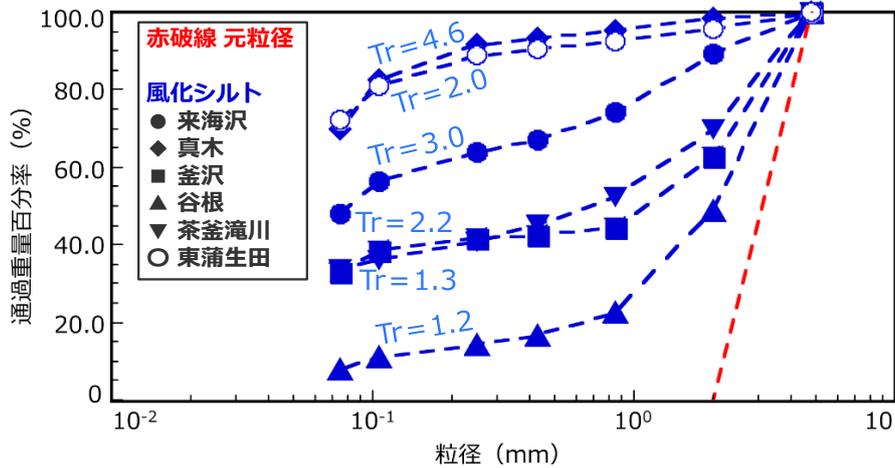


図 2. 流動試験結果と移動係数の比較

研究助成採択者 相場菜摘（新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程2年）

【研究テーマ】

福島県滝坂地すべり地の地下水に関する水文地質学的研究

【要旨】

福島県滝坂地すべりは、東北地方最大級の活動中の地すべりである。地下水排除の効果によって、近年の地すべり活動は沈静化している。大規模な地すべりの水文地質構造には未だ不明な点が多く、気候変動にともなう極端気象が地下水の動態に及ぼす影響を考察するためにも、水文地質構造の解明は喫緊の課題の1つである。本研究は、①統計解析による地下水の水質分類とそれらの特徴、②水-岩石相互作用に基づく各水質の形成機構、③地下水質の経年変化とその要因、④地下水の起源、⑤流量と水質変化の関係、を明らかにし、滝坂地すべり地における大局的な水文地質構造の解明を目的として行った。

本研究では、福島県滝坂地すべり地において、計10日間の現地調査を行い、水試料を採取した。採取した116個の水試料について、水質分析（主要イオン濃度： $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ の測定・ $\text{Fe}^{2+}$ や $\text{SiO}_2$ の濃度測定）を行った。内54個の試料について、酸素安定同位体比の測定を行った。また、5つの試料について、SF6による年代測定を行った。これらの水質データに鈴木（2003）、相楽（2005）、瀬戸（2020MS）の水質データを加えて、合計712試料について多変量解析を行った。主成分分析により、固有値が1.00以上となる第1～第3主成分を採用し、各試料についての主成分得点をもとに、非階層型クラスター分析を用いて水質をA～Hの8つのタイプに分類した。

分類した水質タイプと地質の関係から、各水質タイプについて形成過程を考察した。基岩地質によらず風化土層では水質タイプB、新鮮な花崗岩では水質タイプC、泥岩の酸化前線以深では水質タイプAと水質タイプD、凝灰岩の酸化前線付近では水質タイプAと水質タイプDに加え、水質タイプG、還元条件下の凝灰岩では水質タイプEと水質タイプFが形成されると考えられる。水質タイプEと水質タイプFは排水トンネルに特有の地下水であり、還元条件下にある地下深部の地下水である。排水トンネルの施工を機に多くの観測孔で地下水位が低下していることから、タイプEやタイプFに代表される深部地下水の排除は地すべり活動を効果的に抑制している可能性がある。

同一の観測孔もしくは排水トンネル内の同一のボーリング孔における水質の経年変化を検討した。近年（2019年もしくは2023年）と約20年前（1998年～2001年）の両方のデータが存在するボーリング孔は11地点あった。検討の結果、観測孔には水質タイプの変化は見られなかった。対して、排水トンネル内のボーリング孔では水質タイプの変化が確認された。水質形成過程を考慮すると、風化の進行、あるいは地下水流動・水理条件の変化が水質の経年変化の要因と考えられる。地下水流動・水理条件の変化には、排水トンネルによる地下水排除の効果、すなわち地下水位の低下が影響している可能性がある。

本研究で得られた酸素安定同位体比の値は、北部排水トンネルにおいて地すべり地外の比較的高所で涵養した地下水の出現を指摘した瀬戸（2020MS）のデータと比較して、大きな値を示した。このことは、今年度採取した地下水の大部分が地すべり地付近で涵養した水であることを示唆す

る。同位体比の値の変化の要因について、排水トンネルの効果による集水・流動経路の変化、もしくは調査・採取時期による同位体比の変動と推察している。

北部排水トンネルは流量の増加に伴って電気伝導度も上昇する特徴をもつことが瀬戸(2020MS)、堀(2021MS)によって報告されている。本研究では、連続降雨時の調査の際、それ以前の調査時に排水が確認できない、もしくは排水量が極端に少ない北部排水トンネル内ボーリング孔で、多量の排水が見られた。これらの電気伝導度は147.4~225 mS/mの範囲にあり、調査地内屈指の高い電気伝導度を示した。平時は排水のないこれらのボーリング孔から連続降雨時には高濃度の水が排水される現象について、メカニズムを解明するべく研究していく所存である。

#### 【研究成果・まとめ】

- (1) 多変量解析により、1998年~2023年に採取された水試料712個が8つの水質タイプに分類された。
- (2) 分類した水質タイプと地質の関係から、各水質タイプについて形成過程を考察した。基岩地質によらず風化土層では水質タイプBが、新鮮な花崗岩では水質タイプCが、泥岩の酸化前線以深では水質タイプAと水質タイプDが、凝灰岩の酸化前線付近では水質タイプAと水質タイプDに加え、水質タイプGが、還元条件下の凝灰岩では水質タイプEと水質タイプFが形成されると考えられる。水質タイプEと水質タイプFはトンネルに特有の水であり、還元条件下にある地下深部の地下水である。
- (3) 排水トンネルの施工を機に多くの観測孔で地下水位が低下していることから、タイプEやタイプFに代表される深部地下水の排除は地すべり活動を効果的に抑制している可能性がある。
- (4) 約20年前と現在における水質タイプの経年変化が一部の地点で確認された。考察した水質形成過程から、岩石の風化の進行による水質変化、もしくは、地下水流動・水理条件の変化に起因している可能性がある。
- (5) 酸素安定同位体比の値が、先行研究と比較して大きな値を示した。これは、排水トンネルの排水に伴う集水・流動経路の変化、もしくは調査・採取時期による同位体比の経年・季節変動であると推察される。今後、検証の余地がある。
- (6) 北部排水トンネルは流量の増加に伴って電気伝導度も上昇する特徴をもつ。このことについて、平時は排水のないボーリング孔から、連続降雨時には高濃度の水が排水される現象を確認した。このメカニズムの解明に向けて研究していく所存である。

#### 【参考資料(論文・学会発表など)】

- 1) 堀耕陽, 2021MS, 福島県滝坂地すべりにおける水文地質学的特徴 水収支による地下水の流出解析. 新潟大学理学部卒業論文, 1-43.
- 2) 相楽渉, 2005, 大規模地すべり地における地下水流動特性に関する研究. 新潟大学博士論文, 1-128.
- 3) 相楽渉・山邊康晴・佐藤修・大海寺勲, 2003, 大規模地すべりの地下水流動特性~福島県西会津町滝坂地すべりを例として~. 日本地すべり学会誌, 40, 34-40.

- 4) 相楽渉・丸井英明・吉松弘行, 2005, 大規模地すべり地の地下水流動特性に関する考察～東北地方の第三紀層地すべりを例として～. 日本地すべり学会誌, **42**, 51-62.
- 5) 瀬戸朝香, 2020MS, 福島県滝坂地すべりにおける地下水の水文地質学的研究. 新潟大学理学部卒業論文, 1-56.
- 6) 鈴木将之, 2003, 地すべり地における地下水挙動の地球化学-福島県滝坂地すべり地を対象として-. 新潟大学博士論文, 1-124.
- 7) 鈴木将之・佐藤修, 2002, 同位体からみた福島県滝坂地すべり地における地下水の起源. 日本地すべり学会誌, **39**, 33-39.
- 8) 鈴木将之・佐藤修, 2003, 水質からみた福島県滝坂地すべり地における排水機構. 日本地すべり学会誌, **40**, 117-123.

研究助成採択者 清瀬莉花 (新潟大学理学部4年)

**最近の地すべり災害及び調査技術  
若手とベテランによる調査・研究報告**

# 糸魚川地区で発生した地すべりの形態と地質

## Morphology and geology of landslides that occurred in the Itoigawa area

大塚 洋之 (株式会社興和)

Hiroyuki Otsuka (Co, Ltd Kowa)

キーワード: 地すべり, 地震, 融雪, すべり面形状, 断層

Keywords: Landslide, Earthquake, Melting snow, Slip surface shape, Fault

### 1. はじめに

令和6年能登半島地震に起因し発生した新潟県糸魚川市中野口地すべりと令和6年4月の融雪に起因して発生した大所地すべりの事例を紹介する。地すべり発生箇所について、中野口地すべりは糸魚川市の東側に位置する能生谷沿いの右岸斜面で発生した地すべりである。大所地すべりは糸魚川市の南側に位置する姫川支流の木地屋川左岸斜面で発生した地すべりである。

本稿では地震と融雪を起因として発生した地すべりについて、両地区の地質や発生前の気象データを踏まえて、発生形態の違いを紹介する。

### 2. 中野口地すべり

中野口地すべりは、令和6年1月1日に発生した能登半島地震の翌日となる1月2日に地すべり発生を確認する。気象データでは、地震前日まで降雨や融雪も確認されているが、地震により発生した地すべりとして災害申請をする。

#### (1)地すべりの形態

中野口地すべりは幅約80m、長さ約180mの馬蹄形を呈する地すべりブロックであり、過去に隣接斜面が被災して、地すべり対策工が施工されている。

地すべり発生後の現地踏査では、降雨や融雪による地すべりとは異なり、地すべりブロック内は泥濘化していないため発災直後に内部の確認が実施できた。現地踏査では既存施設の被災状況、地すべり変状について確認し、以下の状況を確認した。

- ・滑落崖は20m程の高さで泥岩が露岩している
- ・滑落崖直下には凹地形が形成され地表水が溜まり池ができている
- ・凹地形の先では圧縮亀裂が形成され、側部では既存施設は押しつぶされている。
- ・斜面下部にも10m程の滑落崖が形成されている
- ・斜面下部では湧水や上部斜面の凹地形に形成された池から地表水が流れ込んでいる。



図-1 中野口地すべりのドローンによる全景写真

#### (2)地震の震度と気象条件

地すべり発生箇所と能登半島地震の震央は直線距離で80km程で、能生で震度5強を観測している。

気象庁の観測所「能生」の雨量と積雪深を取りまとめる。2023年12月31日10:00より、最大時間雨量10.5mm、最大24時間雨量44.5mmの降雨が認められた。また同日は、降雨と気温が高いことで、融雪が進んでいた状況が確認され、地震発生時には高地下水状態であったことが想定される。

#### (3)中野口地すべりの地質

中野口地すべりでは、新第三紀鮮新世の堆積岩の分布域であり、能生谷層の中ノ俣泥岩部層の塊状泥岩が滑落崖にも露岩している。斜面上部では川詰層の筒石砂岩泥岩互層と瀬戸凝灰岩部層の分布が想定され、特に瀬戸凝灰岩部層は湧水が多く、降雨や融雪時の地すべり発生要因になりやすい。

また、能生谷は地層構造から概ね右岸斜面は受盤、左岸斜面は流盤となっており、右岸は急斜面、左岸は緩斜面となっている。

#### (4)中野口地すべりのすべり面形状

現地踏査結果から急峻な滑落崖、滑落崖直下の凹

地形、中腹部の圧縮亀裂や施設の押し出しから、当初のすべり面形状は、円弧すべりを想定する。

地すべり地内でのボーリング調査結果から想定した深度より浅く変形していない未風化泥岩が確認され、すべり面深度から円弧すべりではなく、船底型のすべり面形状となることを確認する。

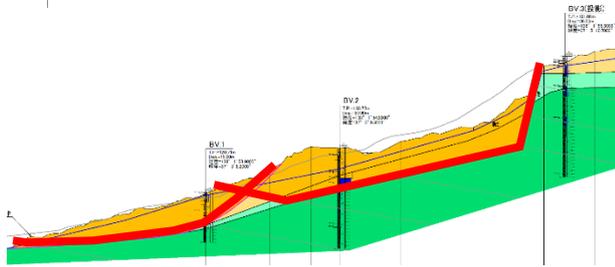


図-2 中野口地すべりの調査地質断面図

### 3. 大所地すべり

大所地すべりは、令和6年4月13日に姫川支流の木地屋川や大所川の濁りが認められ、上流を点検した際に大所地すべりの発生を確認する。現地では気温が高いものの残雪があり、融雪による地表水の流入も認められたことから、融雪による地すべりとして災害申請をする。

#### (1)地すべりの形態

大所地すべりは幅約90m、長さ約210mの馬蹄形を呈する地すべりブロックであり、初期踏査後に頭部滑落崖周辺が拡大し、何度か地すべり末端部に流れる木地屋川に土砂が流入する。

地すべり発生後の現地踏査では、地すべりブロック内は泥濘化して踏み入れない状況であり、ドローンや周辺からの踏査で既存施設の被災状況、地すべり変状について確認し、以下の状況を確認する。

- ・背後斜面には亀裂や段差が形成されており、今後拡大する可能性ある
- ・滑落崖は25m程の高さで形成され滑落崖に向かい左側は凝灰岩、右側は蛇紋岩が露岩している
- ・斜面下部では既設床固工左側部の破損が認められ、左側部は土砂が流出して、深い谷地形を形成している
- ・右側部は床固工の背後に土砂が残っており、頭部の背後斜面が不安定化した場合に一緒に土砂が流出する可能性がある
- ・末端部に流出した土砂は泥濘化して広がり、林道や県道を埋塞して、木地屋川に流出した土砂は500m以上下流まで流下する
- ・既設の水路工全体と床固工の一部が破損し、末端部の既設集水井工の蓋が破損することで内部に土砂が流入し埋塞する

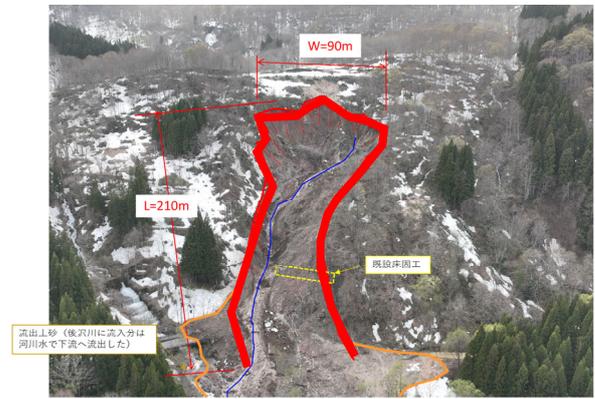


図-3 大所地すべりのドローンによる全景写真

#### (2)気象条件

気象庁の観測所「小谷」の積雪深を取りまとめる。

2024年4月4日には積雪深が0cmとなるが、大所地すべりと観測所の標高差が100～200m程あり、4月13日の時点で現地には残雪を確認する。

気象庁の観測所「糸魚川」の気温では、発生の1週間ほど前から20℃以上の気温が続いており、これにより融雪が進んだと考えられる。

#### (3)大所地すべりの地質

大所地すべりでは、第四紀更新世～完新世の地すべり堆積物の分布域であり、基盤岩は掘削しなければ確認できない。既存データでは大所地すべり近傍では蛇紋岩や頁岩が確認される。

大所地すべりの滑落崖は左側では赤色の凝灰岩、右側では淡緑色の蛇紋岩の分布が確認されたことから、地すべり頭部に断層が存在する可能性が考えられる。

### 4. まとめ

今回は地震で発生した地すべりと融雪で発生した地すべりの形態の違いを紹介した。

調査や解析はこれからであり、本発表で話をした地質的な特徴を踏まえて、考察をしていきたい。

### 5. 謝辞

本稿執筆に際し、糸魚川地域振興局地域整備部河川・砂防課地すべり担当の方々には写真の提供等多大なるご協力を頂き厚く御礼申し上げます。

#### 《引用・参考文献》

- 1) 気象庁アメダス：観測地点「能生」、「糸魚川」「平岩」、「小谷」  
<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 2) 赤羽貞幸・加藤碩一（1989）：5万分の1地質図副「高田西部」。
- 3) 長森英明・竹内 誠・古川竜太・中澤 努・中野 俊（2010）：5万分の1地質図副「小滝」。

# 広田地すべりにおける能登半島地震時の観測データとその考察

## Observation data and discussion in the event of Noto Earthquake at Hirota landslide

沼澤輝久((株)日さく)\*, 竹内均((株)日さく)\*

Teruhisa NUMAZAWA(Nissaku.CO.,LTD.), Hitoshi TAKEUCHI(Nissaku.CO.,LTD.)

キーワード：大規模地すべり，令和6年能登半島地震，深層地下水，電気伝導度

Keyword:large-scale landslide,2024 Noto earthquake,Deep groundwater,Electrical conductivity

### 1. はじめに

2023年4月1日に、糸魚川市大字北山地内において、大規模な地すべりの発生が確認された。この地すべりは、人的被害やインフラ等に重大な被害を及ぼすことはなかったものの、下流域に土砂が流出した場合には甚大な被害が見込まれることから、災害関連緊急地すべり対策事業により、現在対策が進められている最中である。

この地すべりはいわゆる「大規模地すべり」に相当するものであることに加え、顕著な非対称性を有することや、深層地下水の存在が確認されるなど、多くの点で興味深い地すべりである。

本地すべりでは、全自動観測装置を用いた地すべり観測が継続されており、冬期間もリアルタイムで観測する態勢がとられている。この観測において、2024年1月1日に発生した能登半島地震前後で、観測データに顕著な変化が認められた。本報告では地震前後の観測データに着目して、地震動が地すべりに与えた影響について考察した結果を報告する。なお、本地すべりでは深層地下水の性状や地すべりへの影響を探るため、地下水の水質モニタリングをいくつかの孔で実施している。これらの変動状況についても合わせて検討した。

### 2. 令和5年発生地すべりの概要

#### 2.1 地形・地質

早川流域の地形は、地質条件を強く反映した地形が発達している。主に分布する地質体は新第三系の堆積岩類・火山岩類で、流域全体にわたり早川の左右岸に広く分布している。このうち、稜線を中心とした高標高部には火山岩類(海川層)が分布しており、急峻で溪流発達乏しい岩盤斜面が広がっている。

一方、早川に面する低標高部には堆積岩類(根地層)が分布し、相対的に傾斜の緩やかな斜面が広がり、溪流発達や地すべり地形の発達が顕著となる。

広田地区は堆積岩類分布域に位置し、大局的には平均傾斜7°前後の緩やかな北向き斜面に相当して



図-1 広田地区位置図

いる。本地区付近では北東-南西方向の地質構造を反映したケスタが発達しており、ケスタの背面で今回の地すべりが発生した。

地すべり斜面を構成する地質は、新第三系中新統～鮮新統の根知層の砂質泥質岩が主体で、北北西走向で西に20～30°傾斜する。地すべりは大局的に走向～流れ盤構造を示す。また地すべり西側の斜面上方には、泥質岩の上位を安山岩質火砕岩(海川層)が広く覆って分布する。

#### 2.2 地すべり機構上の特徴

##### (1)すべり面形態

本地すべりは、層理面に沿って形成された平滑なすべり面を有する並進型の地すべりである。すべり面の形成には凝灰岩薄層の関与も疑われる。地すべりの移動方向は層理面傾斜方向と斜交し、地すべり横断方向のすべり面形態は、顕著な非対称性が存在する(図-3)。

##### (2)地下水地

すべり斜面上部の観測孔を中心に、著しく低い比



図-2 平面図(オルソ写真:2023/4/20撮影)

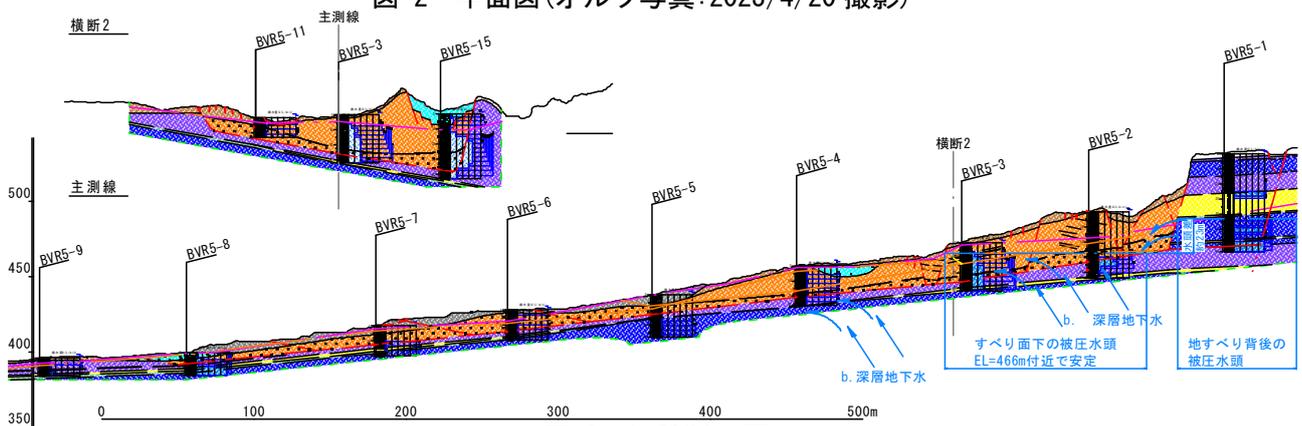


図-3 地質断面図

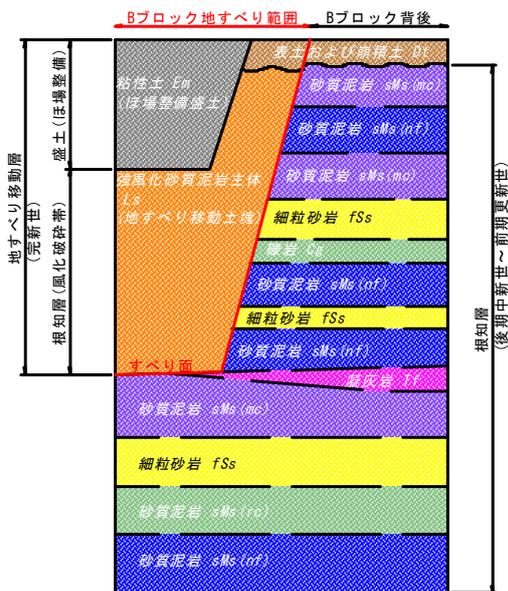


図-4 地すべり斜面付近の地質層序

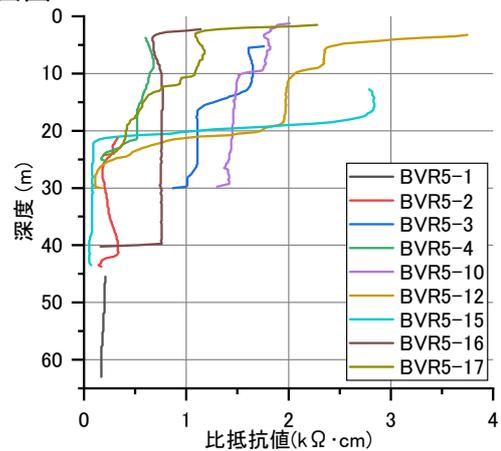


図-5 比抵抗検層図

抵抗値を示す地下水が確認された。地下水検層器を用いた比抵抗検層の最低値は  $0.05\text{k}\Omega/\text{m}$  であった(図-5)。深層地下水と考えられる地下水はすべり面以浅まで上昇しており、地すべり機構に何らかの影響を与えている可能性が推察される。

### 3. 令和6年能登半島地震の影響

令和6年1月1日16時10分ごろに発生した令和6年能登半島地震では、本地すべりの位置する糸魚川市も大きな揺れを観測した。地すべりから約10km離れた糸魚川市能生では震度5強を観測し、気象庁発表の震度推計分布図によると本地すべり地でも震度5弱程度の強い揺れであったと推定される。またK-NET糸魚川では地すべり方向の南北方向よりも東西方向に大きな加速度がかかっていた。

#### 3.1 地震による歪変動

地震直後に多くの観測孔で突発的な歪変動の発生が観測され、一部の深度では測定限界を超える歪変動を観測した。一方で累積性はみられず、地すべり方向とは異なるY方向の歪変動も同時に観測された。BVR5-5、5-8、5-11ではY方向の動きの方が大きかった。また地中伸縮計は突発的な短縮方向の動きや伸縮量1mm程度の動きをみせており、土塊全体が大きく動く地すべりは発生しなかったと考えられる。

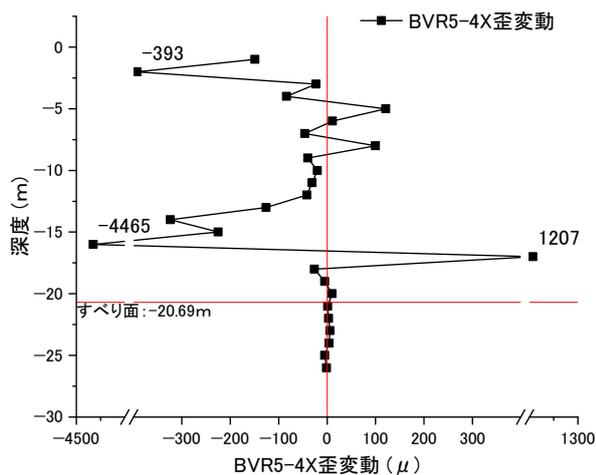


図-6 BVR5-4Xの地震前後の歪変化量

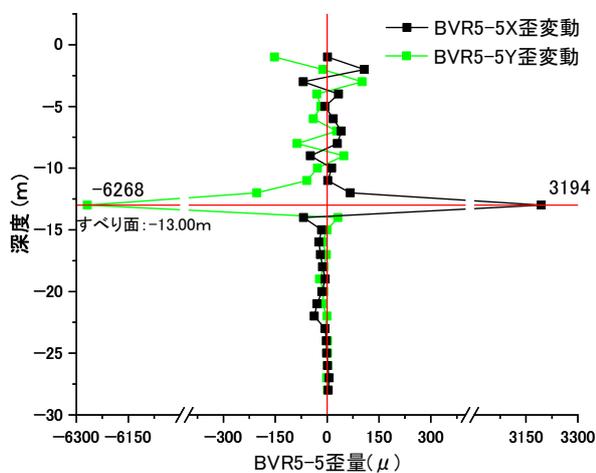


図-7 BVR5-5XYの地震前後の歪変化量

歪変動が発生した深度はすべり面より浅い深度に集中しており、地すべり土塊の内部で動きがあったことを示唆している。一方ですべり面付近に大きな動きをみせている観測孔も存在した。すべり面が弱面として利用され、土塊が揺すられたと考えられる。後述する地下水位の変動との関係性は薄かった。

#### 3.2 地震による地下水位変動

全ての観測孔で地震直後に水位の突発的な変動や増加・減少傾向の変化がとらえられた。当時の気象条件は前日から降水が続いていたが、1月1日の午前7時には降りやんでいた(新潟県河川防災システム：大平観測所)。気象庁能生観測所の積雪は12月31日の7時時点で12cmであったが1月1日の13時には0cmとなった。本地すべり地でも融雪が急速に進んでいたと考えられる。降水とそれに伴う融雪のため、BVR5-1とBVR5-2で地震直前の地下水位が上昇傾向にあった。その他の観測孔では水位の維持もしくは上昇から下降傾向に移っていた。

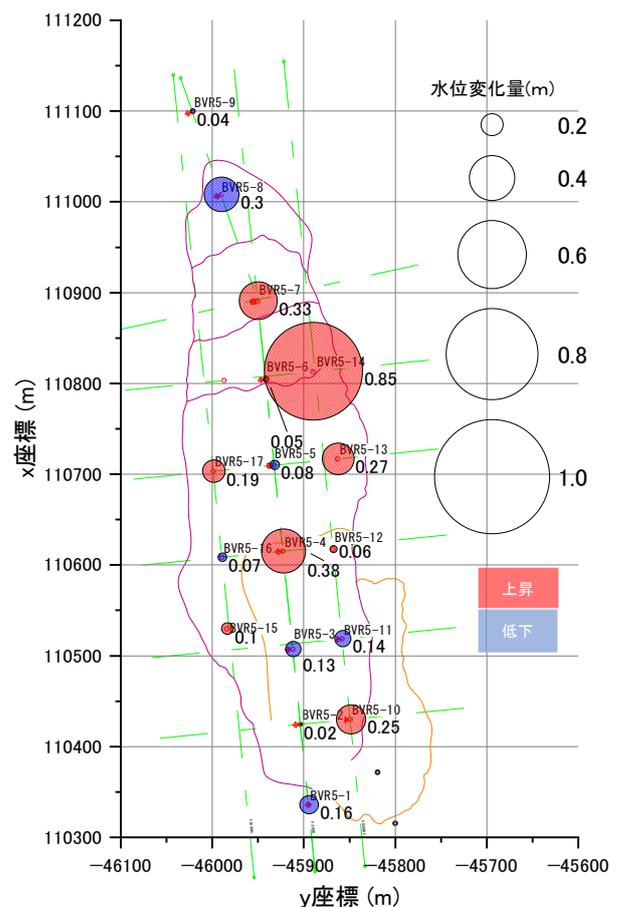


図-8 地震前後の水位変化量分布図

最も水位変化が大きかったBVR5-14では1時間で0.85mの水位上昇がみられ、一時的に地表面付近まで水位が上昇した。一方、BVR5-2やBVR5-5で

は水位変化量は小さかったが、水位の変動傾向は変化していた。

地すべりの規模に対して土塊の変動がごく小さいことから、土塊内部の局所的な変形に水位変動が左右されたと考えられる。地すべり東側では移動層が薄く、土塊内部の変形の影響を受けやすいと考えられる。そのため東側で水位変動が目立っていると考えられる。また深層地下水の影響を受けていると推定される地すべり上部西側の観測孔で変動が小さく、浅層地下水の影響の強い地すべり下部斜面で変動が大きい傾向にあることも説明できる。

### 3.3 地震による地下水の電気伝導度変化

BVR5-2 では地震による地下水の電気伝導度の変化も確認された。12月31日の降雨により地下水位の上昇が始まると、電気伝導度の躍層にあたるGL-32mとGL-27mの電気伝導度が急激に低下した。

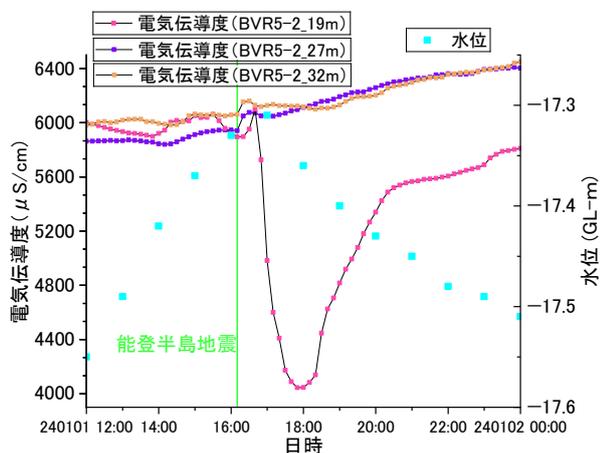


図-9 BVR5-2 地震時の電気伝導度と水位変化

GL-19mでは水位の上昇に伴い他の2深度と同程度まで電気伝導度が上昇した。降水由来である電気伝導度の小さく冷たい浅層地下水が流入することで、観測孔内に地下水の対流運動が発生し、孔内深部まで地下水が混合したと考えられる。地震直前まで電気伝導度がほぼ同程度で推移したのち、地震直後10分間にGL-27mで108.3 μS/cm、GL-32mで93.5 μS/cm、突発的に電気伝導度が上昇した。GL-19mでは地震直後10分間は変化に乏しかったが10分後～30分後の20分間で100.6 μS/cm上昇したのち、4000 μS/cm程度まで急激に電気伝導度が低下した。地震動により深層から突発的に地下水が流入した後に、遅れて浅層地下水が流入したと考えられる。

電気伝導度が大きな変動をみせたことに対し、水位は1時間で2cmのみ上昇した。これは観測孔がオールストレート仕様であるため、複数の帯水層から

地下水の流出入が起きた場合、水位に直接反映されにくいためと考えられる。

### 3.4 地震による地下水温の変化

電気伝導度を計測していたBVR5-2と多点温度センサーを設置していたBVR5-15では、地震直後に地下水温の上昇が観測された。BVR5-2では地震発生10分後に19m、27m、32m全ての深度で0.1℃の水温上昇が認められた。

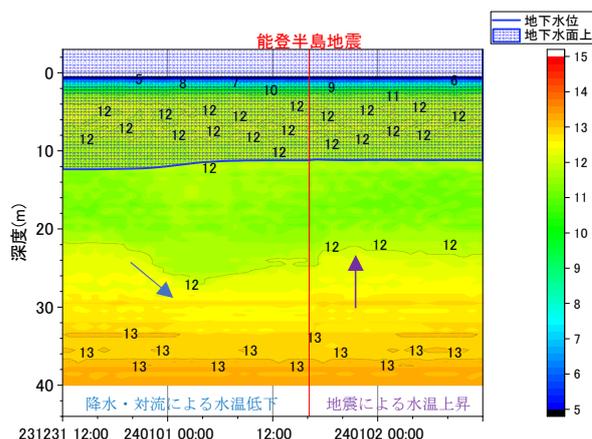


図-10 BVR5-15 地震時の水温変化

地表から40mの深度まで0.25m間隔で温度を計測していたBVR5-15では地震直後に深部でわずかに水温が上昇したことが分かった。いずれも地震発生直後に深層地下水が供給されたことを示すと考えられる。

### 4. 地震による影響のまとめ

能登半島地震で新たな地すべりは発生しなかったが、すべり面より浅層の土塊が揺すられたことで歪変動や地下水位変動が発生した。いずれも土塊内部の局所的な変形が主な原因と推定される。水位変動では浅層地下水の影響が強い観測孔で変動が大きい傾向がみられた。一方で水位変動に乏しかった観測孔でも、電気伝導度と水温から深層地下水の流入があったと推定された。地下水の電気伝導度が高く、地温勾配も高いという特殊な条件下であったがオールストレート仕様の観測孔における水位観測の問題である複数の帯水層からの地下水流入を一部区別することができた。

#### 引用文献

1) 荻田茂・相楽渉・大規模地すべりの機構解明研究委員会(2016)：我が国の大規模地すべりの形態と機構、地すべり、Vol. 53, No.5, pp. 12-25.

# 地すべり対策事業におけるデジタル技術活用についての考察

## A Study on the Utilization of Digital Technology in Landslide Countermeasures Project

日本工営株式会社 寺本圭吾, 古澤明里朱, 福島尚志, 佐志 啓未, 山口 裕二, 草谷 恭行

Keigo TERAMOTO, Arisu FURUSAWA, Naoshi FUKUSHIMA, Hiromi SASHI, Yuji YAMAGUCHI, Takayuki KUSATANI

キーワード：大規模地すべり, デジタル技術

Keywords: Large-scale Landslide, Digital Technology

### 1 はじめに

近年、国土交通省では、社会経済状況の厳しい変化や土木事業就業者数の減少に対応するために、インフラ分野におけるデジタル技術の活用により、業務そのものや、組織、プロセス、建設業や国土交通省の文化・風土や働き方を変革することを目指す取り組みが推進されている。

地すべり対策事業などの防災分野においても、激甚化・頻発化する災害に対応するためには、従来の対応のみでは限界があり、デジタル技術を活用した情報分野での取り組みが必要不可欠である。福島県西会津町豊洲の阿賀川・笹川合流点右岸に位置する滝坂地すべりでは、地すべり防止施設のCIMモデル及び地すべり機構解析のためのCIMモデルが作成され、地すべり事業に係わる維持管理の効率化や合意形成の迅速化等が検討されている。

滝坂地すべりは南北約2.1km、東西約1.3km、面積約150ha、最も深い地すべり面の深さは約140m、移動土砂量は約4,800万m<sup>3</sup>と推定される日本最大級の地すべりで、地すべり地内の変状把握、変動監視のための観測機器の保守点検、対策施設の維持管理のための検討には労力を要する。また、地すべり調査・解析・対策は昭和30年代から長期にわたって行われているため、地震や大規模変動等の位置情報に影響するイベントを複数経ており、位置情報の不整合が認められることが維持管理上の課題として挙げられる。

本稿では、滝坂地すべりCIM整備業務の履行にあたり、活用した4種類のデジタル技術の使用事例とその評価、それらを踏まえた今後の展望について紹介する。

### 2 デジタル技術の使用事例とその評価

#### 1) 全方位カメラ

滝坂地すべりのような大規模かつ対策施設数が多い地すべりでは、地すべり地内の斜面や施設の点検時に位置関係や周辺状況の把握が難しいという課題がある。

本検討では現地踏査の際に全方位カメラを用いて地すべり地内の撮影を実施した。全方位カメラを用いて撮影を行うことで、ストリートビュー形式のバーチャルツアーを作成す

ることができる。(写真2)

バーチャルツアーを活用することで、地すべり地内全体や施設の俯瞰的な現場臨場が可能となり、滝坂地すべりのような大規模かつ対策施設が多い地すべりにおいては、調査前に現地状況を把握することでより効果的に作業計画を立案することが可能となる。

現地での全方位カメラによる撮影時の留意点として、バーチャルツアーの作成延長が長くなる場合は、撮影箇所の情報を適宜図面等に記録・整理することでバーチャルツアーの効率的な作成につながる。



写真1 滝坂地すべり全景



写真2 全方位カメラ撮影により作成したストリートビュー

#### 2) 地上レーザスキャナ

滝坂地すべりでは調査、解析、対策が昭和30年代から長期にわたって行われているため、対策施設の竣工図が紙ベースで保存されている場合が多い。国土交通省ではデータ活用・共有による受発注者の生産性向上のためのBIM/CIM原則適用が義務化され、新たな対策施設はCIMモデルが作成されている。地すべり対策施設の維持管理において、施設ごとのデータ形式を揃え

て整理することが効率的であり、その際には紙ベースの図面からCIMモデルを作成する必要がある。

本検討で用いた地上レーザスキャナは持ち運び可能な3次元計測機器であり、対象施設付近に機器を設置することで、ボタン1つで点群データの取得が可能である。(写真3)

地上レーザスキャナを用いることで、特殊な施設や複雑な施設のCIMモデル化が可能である。また発災直後に気象状況、現場立地の制限によりUAVが飛ばせない状況においても点群データの取得が可能である。

現地でのデータ取得時の留意点として、延長が長い構造物は複数回に分けてデータを取得する必要があり、それらの複数データの結合に特徴点(カラーコーンなど)を作成する必要があることが挙げられる。

### 3) モバイル端末

本検討ではレーザ計測器が搭載されたモバイル端末を用いて点群データの取得を行った。

レーザ照射距離は最大5mであり機器を手持ちで操作するため、小規模な構造物の点群データ取得に適している。端末を手に持って計測することで小回りが効くため、地上レーザスキャナのレーザが届きにくい入り組んだ箇所(point cloud data)の点群データを取得することができる。そのため地上レーザスキャナのデータを補間する形で使用できる。(写真4)

現地でのデータ取得時には対象物に対して端末を平行に構え、一度の計測で同じ箇所(点 cloud data)に二度レーザを当てないようにすると歪みの少ないデータが取得できる。

### 4) RTK-GNSS

滝坂地すべりでは対策工事が開始された昭和30年代以降に大規模地震や地すべり変動等による施設位置のずれが生じている場合がある。このため、本検討ではRTK-GNSS機器を用いて位置情報の取得を行った。

RTK-GNSSは基準点と観測点を同時に観測する測位方式で、リアルタイムでcm級の測位を効率的に行う方式である。位置情報を取得したい地点に計測機器を設置するだけで、容易に高精度な位置情報を取得できる。(写真5)

現場の施設の位置を元に維持管理に使用するCIMモデルを作成する際に、素早く位置情報を取得できるというメリットがある。

地中の杭工等の目視できない施設の位置情報は取得できず、また上空の植生等の遮蔽物を回避できない場所では位置情報が取得しにくい場合がある。またCIMモデル作成に限らず、地すべり地内で新たな変状が発生した際の変状の位置情報取得や、現地で新たな対策工設置箇所を検討する際の位置情報の取得への活用が期待される。



写真3 地上レーザスキャナによる点群データの取得状況



写真4 モバイル端末による点群データの取得例



写真5 RTK-GNSSによる位置情報の取得状況

## 3 まとめ

本稿では地すべり対策事業における4種類のデジタル技術の使用事例とその評価、それらを踏まえた今後の展望について紹介した。

4種類の技術は使用上の留意点や適用範囲を踏まえて活用することで、地すべり対策事業の省力化・効率化の観点から有効であることを確認した。

今後は、個々の地すべり対策施設の維持管理手法の検討や災害対応など緊急時におけるデジタル技術の適用性を検討することで、地すべり対策事業の効率化・省力化を一層推進していくことが期待される。

# 斜面管理における新技術の紹介～クリノポールと VIBRES®～

## Introduction of New Technologies in Slope Management～ Clinopol and VIBRES®～

山田靖司, 神田広信, 新部貴理, 大曾根啓介 (応用地質株式会社)

Seiji YAMADA, Hironobu KANDA, Takamasa NIIBE, Keisuke OZONE (OYO Coporatoin)

キーワード：地すべり, 斜面, 計測, 地表面傾斜計, アンカー緊張力

Keywords: landslide, slope, measurement, ground inclinometer, anchor tension force

### 1.はじめに

近年、気象観測や予報技術の進歩により、集中豪雨の予測精度が向上している。しかし、その情報をもとにした人命優先の避難行動を促す仕組みづくりが各地で行われているにも関わらず、頻発する豪雨によって、現在も多くの人命が失われている。危険となりうる場所に、IoT モニタリングの計測機器を設置することにより、刻々と変わる災害につながる状況を把握すること、加えてモニタリング地点を増やすことで広域な災害につながる状況を捉え、人的被害を防ぐことが重要となる。

また、激甚化する自然災害から安全な生活を守るために法面の維持が重要であり、施工された対策工のうち、地すべり等による法面崩壊を防ぐグラウンドアンカーについては、定期的に機能を確認する必要がある。しかし、従来のアンカー緊張力測定手法は、設置・運搬に労力が必要でコスト負担が課題である。

本報告ではIoT モニタリング技術である斜面の傾きを測定・検知する地盤傾斜計クリノポールの測定例と、アンカー緊張力測定を簡易に行うことが可能となった新技術 VIBRES®の測定事例を紹介する。

### 2.クリノポール (地表面傾斜計) の事例

#### (1)地盤傾斜計の観測目的

地すべりや斜面変動において、その活動性を把握するため、伸縮計や孔内傾斜計、地表面傾斜計等の観測機器を活用する機会が多い。それらの観測結果を用いて地盤の安定性を評価、災害発生の予測、被災箇所の安全管理が行われている状況である。

#### (2)クリノポール (地表面傾斜計) の特徴

地表面傾斜計は斜面の表層の変形を安価で多点に設置できるメリットがあるが、地表面に設置することで気温の変化により値が変動するデメリットもある。

図-1 に示すクリノポールはそのデメリットを解消するため、センサーを地表面から1m 程度深い位置に設置することで、気温の変化をキャンセルし、地盤の変動データのみを把握することができるようになる。また、データはネットで伝達できることから、崩壊地に近い危険な箇所への常時監視を無人で行うことができる。



図-1 クリノメーター (地表面傾斜計)

#### (3)A 地区での盛土崩壊箇所での監視事例

A 地区では高速道路の盛土が崩壊した。その側部には同規模構造の形状の盛土が分布しており、それらが同様に崩壊する可能性が想定されたことから盛土の変形状況を常時監視するために設置したものである(図-2, 3 参照)。図-4 に観測結果を示す。気温の変化による日変位はほぼ示されず、一定の値を示した。



図-2 クリノポール設置状況

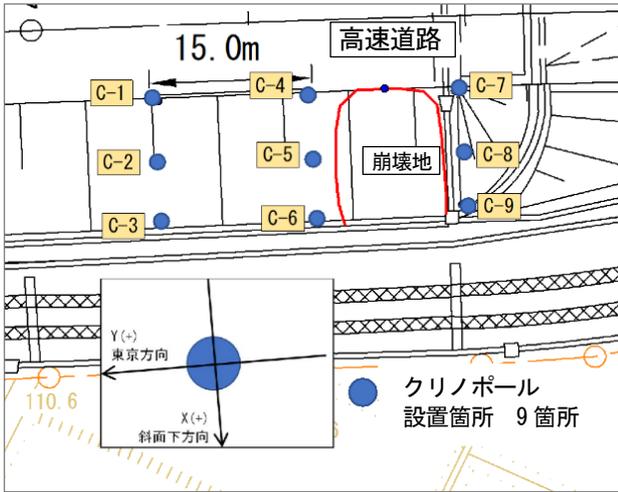


図-3 クリノポール設置位置

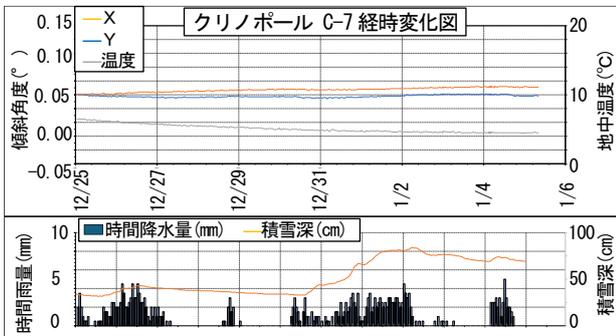


図-4 クリノポール観測事例

なお、当該地区では冬季には積雪が2 m程度となる場合があります。積雪時にも同様の斜面監視を行うことが求められた。図-5に示すようにセンサーを地中に埋め込み、通信部を高い位置に設置することで積雪による雪崩や電波遮断の影響を無くすことができた。

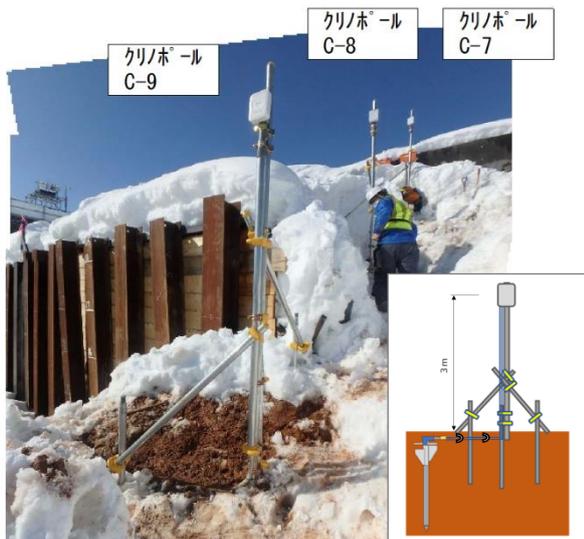


図-5 積雪時のクリノポール設置状況

(4)今後の展望と課題

今回の現場では地表面傾斜計は開発から時間を有しておらず、経験値に基づく管理基準値が不十分であるため、閾値を設定できなかった。これらの課題に対しては八木<sup>1)</sup>により、傾斜センサーが崩壊をとらえた事例から角速度と土壌雨量指数との相関性をテンプレートとした危険とのレベル区分の設置（管理基準値の設定）について提言されている。今後は地表面傾斜センサーによる崩壊事例データを増やし、危険とのレベル区分の妥当性を検証し閾値の精度を向上させる必要がある。

温度依存が無く精度が高いことや、設置観測が容易であるクリノポール（地表面傾斜計）を使用することで、斜面管理が普及し、安心・安全な社会の実現に寄与できると考えている。

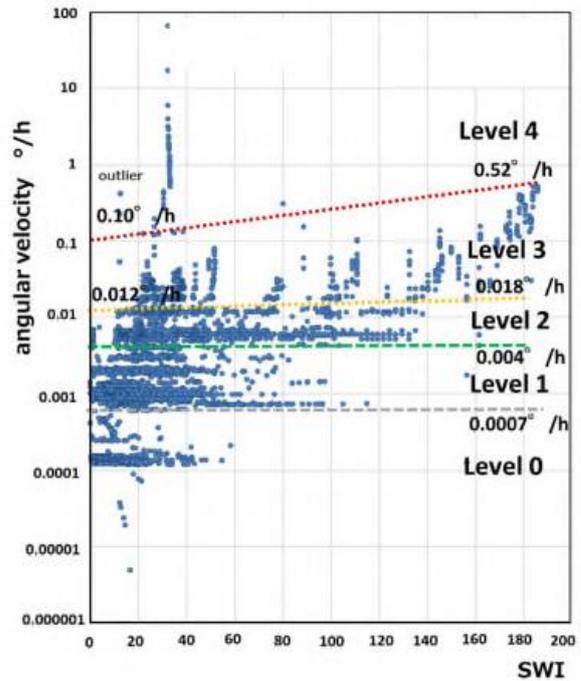


図-6 角速度と土壌雨量指数との相関図<sup>1)</sup>

参考文献

1) 八木雅: 傾斜センサー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の活動報告 (IoT 傾斜センサーが捉えた表層崩壊事例と管理基準値の設定に向けた考察), 全地連「技術フォーラム 2023」横浜, 2023.

### 3. グラウンドアンカー残存緊張力の振動式測定の実例

#### (1) 法面の安定を目的とした対策工法

グラウンドアンカー（以下、アンカー）工は、地中の安定地盤にグラウト等によって造成する定着部と地上の構造物を引張材で連結、張力を利用して斜面を安定させ、地すべり等の対策を図る工法として広く採用されている。アンカーは余長部を含む「アンカー頭部」、地中にあって緊張力のかかる「自由長部」、安定地盤との「定着部」から構成される（図-7）。

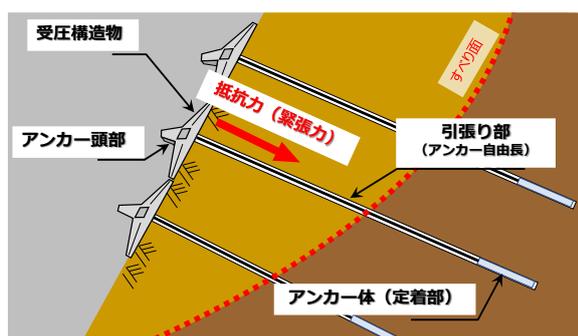


図-7 法面アンカーの模式図

#### (2) アンカーの維持管理

アンカーは製品自体の耐久性が高く、施工においても長期間に機能する設計であるが、気候変動に伴う降雨量の増加や大規模な地震等により、斜面の外力が変化することで機能は低下する可能性がある。そのため、斜面の安定を維持管理するためには、アンカー健全度の定期点検や機能を確認する緊張力測定が必要とされている。なお、アンカーは老朽化や腐食、設計荷重を超える外力が加わると破断し、飛び出しや頭部落下による通行車両等へ損傷を与える懸念があると言われている。



図-8 アンカーの変状例

#### (3) アンカー残存緊張力測定の課題

アンカーの維持管理には、点検・調査・対策からな

り、日常点検や定期点検で異常が確認された際は残存緊張力を調査することが求められる（「グラウンドアンカー維持管理マニュアル」（土木研究所、日本アンカー協会）。アンカーの残存緊張力は、リフトオフ試験と呼ばれる、油圧ジャッキによりアンカー頭部に対して引張り荷重を載荷する方法が主流である。油圧ジャッキは大型で重量もあることから、足場の設置が必要な場合も多く、労力の大きい作業となる。また、アンカーの引張り材に著しい腐食があると、載荷時において設計アンカー力へ達する前に引張り材が破断してしまうこともあり、作業者や周囲に危険リスクを伴う作業となる。

#### (4) VIBRES の特徴

2023年12月に製品化された VIBRES は振動を用いてアンカー緊張力を測定するシステムである。アンカー頭部の余長部に設置した加振器を振動させ、自由長部に伝わり、一次振動モードで揺れる。この揺れは、自由長と引張り材の線密度、緊張力によって固有の振動周波数となることから、固有振動周波数を測定することにより緊張力を算出することができる。

リフトオフ試験と比較した VIBRES の特徴は以下のとおりである。

- ・小型かつ軽量で測定作業の施工性に優れる
- ・載荷しないためアンカーが破断する恐れがなく、安全に測定できる
- ・過緊張アンカーにも適用できる
- ・自由長が既知でないと緊張力を算出できない
- ・自由長部が振動しないアンカータイプは適用できない

VIBRES の開発段階では、定着タイプ別にリフトオフ試験によるアンカー緊張力の測定と比較した。アンカー110本において測定結果を比較し、82.7%の91本で差異が±10%内にあることが示された<sup>2)</sup>。

#### (5) 現地での適用性を確認した事例

実際の現地利用を想定し、国土交通省が公募した道路土工構造物点検及び防災点検の効率化技術に応募、

性能確認をするために実証実験を行った事例を示す。

点検対象は国道B号CバイパスのD地区の切土法面に施工されたアンカーであり、実験諸元は以下のとおりである。

- ・2023年11月28日 8:20~13:15 天候晴れ
- ・交通規制なし
- ・No.1~No.8 全て SEEE F-UA 型の 8 本を測定
- ・法面下段のアンカーは側道からアクセスし、中段は法面小段からのロープアクセスにより実施
- ・測定前に頭部キャップを取り外し、測定後は仮復旧を実施
- ・測定は各アンカーに対して 3~4 回測定、1 回の測定時間は約 120 秒

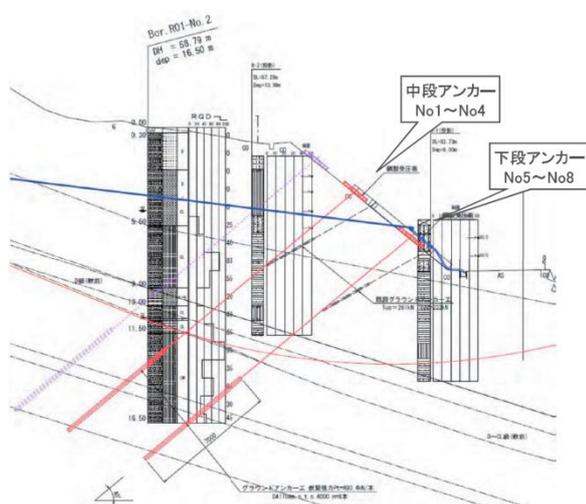


図-9 対象アンカー断面図

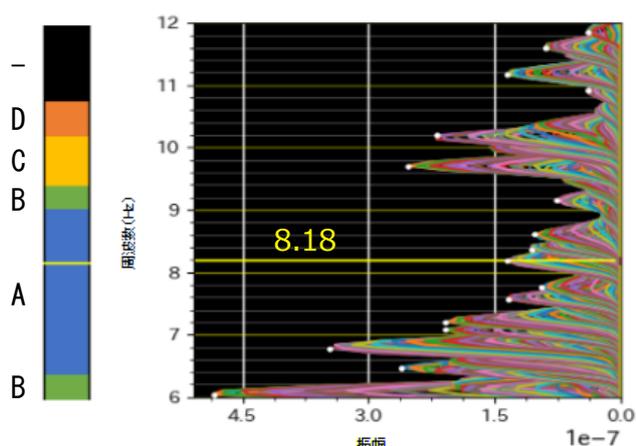


図-10 VIBRES 測定結果例 (No. 2)

8 本全てのアンカーの VIBRES による測定時間は、約 5 時間 (約 40 分/本) で行った。リフトオフ試験は 2 日間を要したので、作業時間は 50%以上短縮できた

ことを確認した。

VIBRES とリフトオフ試験の測定結果を比較すると、緊張力の健全度の目安<sup>3)</sup>は、No.2 アンカーを除く 7 本で A (健全) となり、両者は一致するものの、緊張力の値は、8 本全てにおいてリフトオフ試験で測定した緊張力よりも高い値となった。特に、No.2 は VIBRES 測定値の方が約 5 倍の緊張力となった。

VIBRES の測定結果がリフトオフ試験と乖離した原因については、測定原理が振動を用いており、アンカー自由長部が正しく振動しないと測定が困難であった可能性が考えられる。No.2 については、二次の振動周波数 (2 倍の共振周波数) を読み取って緊張力を算出した可能性が考えられる。

今回対象としたアンカータイプの SEEE F-UA 型は、鋼より線とその被覆材の隙間が狭い構造であり、また自由長が約 20m と比較的長いため、振動の動きが阻害されたと推察する。

表-1 VIBRES とリフトオフ試験の比較結果

アンカーNo.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	
位置	中段	中段	中段	中段	下段	下段	下段	下段	
引張り荷重Tus (kN)	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	
降伏点荷重Tys (kN)	952	952	952	952	952	952	952	952	
設計荷重Td (kN)	490.4	490.4	490.4	490.4	490.4	490.4	490.4	490.4	
リフトオフ試験	残存緊張力 T (kN)	480	115	459	448	457	411	425	456
	健全度評価	A	B	A	A	A	A	A	A
VIBRES	残存緊張力 T (kN)	578	543	492	581	646	557	589	522
	健全度評価	A	A	A	A	A	A	A	A

#### (6) 今後の展望と課題考察

今後は VIBRES の適用できるアンカータイプや測定条件などを明らかにするとともに、測定方法や他技術との組合せなどについても検証するとともに、測定精度の向上に取り組んでいきたい。

#### 参考文献

- 2) 山崎充, 北村崇広, 斎藤秀樹, 新部貴理, 小川直人, 八嶋厚: 振動を用いたグラウンドアンカー緊張力の測定—リフトオフ試験との比較による現場への適用性検証—, 第 58 回地盤工学研究発表会, 2023.
- 3) 土木研究所, 日本アンカー協会, 三重大学, 高速道路総合研究所: グラウンドアンカー維持管理マニュアル, pp.104-111, 2020