

石川県内で融雪期に発生した地すべりについて

川村 國夫*1 和佐田 真悟*2 井川 風木*3

1. はじめに

毎年 2-3m 近い積雪を記録する石川県白山市白峰地内の主要地方道白山公園線の道路法面で、令和 5 年（2023 年）3 月に地すべりが発生した（図 1）。同路線は石川県白山市白峰の集落から『白山』の主要登山口別当出合につながる片側 1 車線の県道であり、『白山』側を起点とし、国道 157 号との交差点を終点とする延長約 18.7 km の路線である。石川県側からは『白山』への唯一のアクセス道路であり、被災箇所は起点から約 16 km 地点にあたる。

『白山』は“霊峰白山”として、信仰登拝も含めて数多くの人が登山されることでも有名ななか、石川県側からの年間白山登山客数が H29 年-R 元年平均 40,873 人に対して、このうち白山公園線を利用した登山客は 40,024 人と約 98%が白山公園線を利用している実態がある¹⁾。このように非積雪期の主要登山シーズンには登山客を主として観光幹線道路として利用されるだけでなく、『白山』甚之助谷周辺や、赤岩周辺では国土交通省の直轄砂防事業・地すべり対策事業の工事主要運搬経路としても利用されており、重要度の高い路線である。

本稿では融雪期に発生したこの地すべりについて、発災後から短期間での応急対応の経緯と融雪期において発生した地すべりの発生機構解析を報告する。

2. 地形・地質的背景

2. 1. 広域的地形概説

白山公園線は起点側から約 5.8km 地点まで一級河川手取川の右岸側を下り、同地点より終点までは同河川の左岸側を並走する。被災箇所は上述の通り起点側から約 16 km の南側道路法面で、平均傾斜 30° ~ 40° の北向き斜面である。図 1 には、森林管理課所管の地すべり危険地区²⁾の範囲と、地すべり地形分布図（文部科学省 防災科学技術研究所）³⁾による地すべり地形の輪郭構造と移動体の輪郭を示した。同資料から当該地は地すべり移動体斜面の末端にあたり、弱い尾根部を形成していたことがわかる。また、広い集水面積を持つ古期大規模地すべり土塊中で発生した地すべりといえる。

2. 2. 地質概説

対象地周辺の基盤岩の地質分布を示した地質図⁴⁾は図 1 に併載済である。同図より、基盤の地質は手取層群に分類される砂岩 (T₃) であり、広域的な斜面の傾斜に対して流れ盤構造で分布するものと推定され、その上位に古期大規模地すべり土塊が分布する。

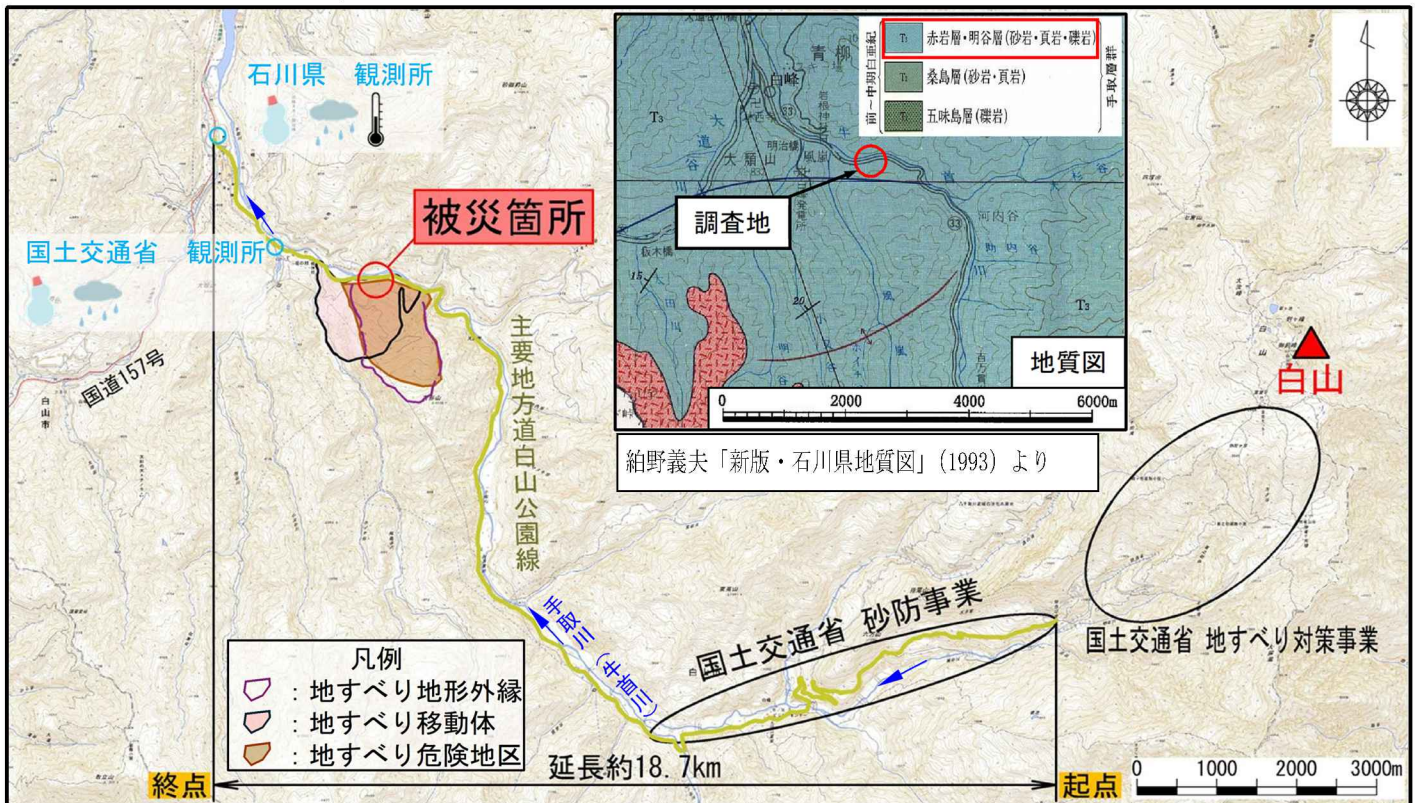


図 1 調査位置図

*1 金沢工業大学地域防災環境科学研究所 *2 石川県石川土木総合事務所 *3 株式会社ホクコク地水

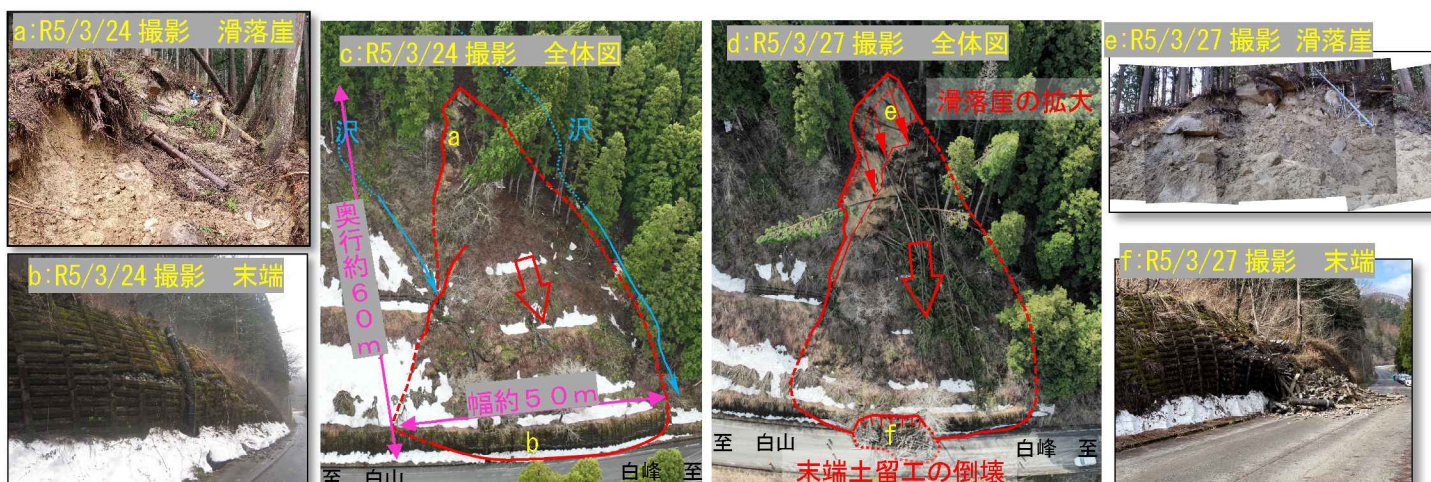


図3 発見直後の地すべり概況写真図

a: 発見当初の頭部滑落崖。b: 発見当初の末端土留工のはらみ出し。c: 発見当初の地すべり全景。d: 発見3日後に確認した地すべり全景。e: 発見3日後に確認した滑落崖。f: 発見3日後に確認した末端土留工の倒壊

3. 発見前後の地すべり状況

3. 1. 地すべり発見の経緯

冬期閉鎖される当該路線において、令和5年3月24日に地すべりを発見し、斜面上部も含めて詳細に現地確認を行ったところ幅約50m、奥行約60m、道路からの比高差約40mにわたる地すべりが発見された(図3 a, b, c)。発見直後から顕著な地すべり活動を見せており、地すべり3日後の早朝には滑落崖の拡大と末端土留工の倒壊が確認された(図3 d, e, f)。

3. 2. 発見前後の気象条件

図4に当該年を含む過去5年の積雪データ⁶⁾と降水量、気温を併記した気象グラフを示す。地すべり発見日は令和5年3月24日であるが、地すべり“発生日”については冬季閉鎖区間であり詳細不明のため当該データから推定した。図4中のR4-R5気温の図を見ると、R5.3は他年に比べて最低気温・最高気温が3月にしては高いことがわかる。加えて図4最下段の過去5年の融雪速度を比較した図を見ると、発見直前の3月8日から23日の融雪速度が6.0 cm/日となっており、過去4年と比較して速いことがわかる。当該地から北に13km程離れた東二口地区のライシメータ観測⁴⁾から融雪最盛期に比較的積雪密度が高い状況(0.25 gf/cm³以上)になり、日最低気温が0℃を超えて気温が高い条件がそろって融雪が急激に進行するとともに融雪末期に向かって積雪密度が急激に上昇することがわかっている。同研究成果から得られる積雪密度を参考に、当該地周辺での融雪末期の積雪密度を推定すると融雪の顕著な3月8日-23日にかけては0.4~0.5 gf/cm³程度と考えられる。この積雪密度から当該期間において「日降水量+融雪換算量」は534mm/15日程度であったと推計できる。降雪を融かして降水量として計測するタイプの雨量計での風嵐観測所における令和5年3月の降水量は

190mm/月であるのに対して、534mm/15日の「日降水量+融雪換算量」は量としては約2.8倍に相当し、この浸透水が地すべりの誘因となったことは間違いない。534mm/15日のうち118mmは降水量であり、大半が融雪換算量であるので、この15日間は平均して27.8mm/日の融雪水が供給され続けたと考えられる。この状況下でまとまった降雨のあった3月10日、13日、18日、23日のどこかで地すべりが発生したものと推定できる。

地すべりの発見後においては、斜面の一部に積雪が残存する中で3月25日-3月26日にかけて35mm/2日の降雨があり地すべりが顕著に滑動した(図3e)。また、地すべり地内では周辺の沢から供給される地表水のほかに、頭部滑落崖や地すべりブロック中腹~末端のいたるところから顕著に湧水が確認されており、地下水位が非常に高い状況にあった。

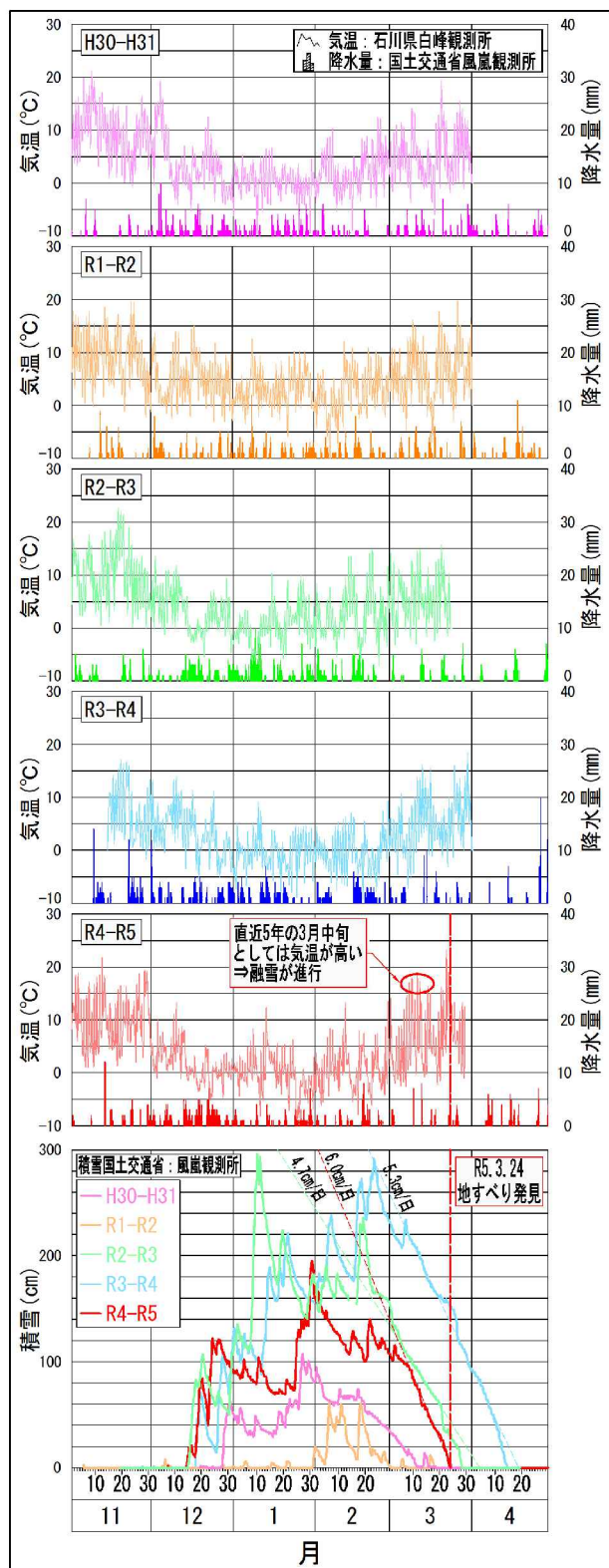
4. 地すべりへの応急対応

4. 1. 地すべり応急調査・対策検討

発見直後から顕著な地すべり滑動を見せていたことから、UAV写真測量による点群で断面図を作成して地すべり活動を一旦沈静化させる対策検討を行った。

検討にあたっては地下水位の情報が必須となるため、緊急的に地すべりブロック中腹から末端部にかけて小型動的コーン貫入試験によってGL-6m付近までの土の硬軟を確認すると同時に試験孔にVP13の塩ビパイプを挿入し簡易水位観測孔を設けた。その結果地下水位はGL-0.3~-0.6mの間にあり、地表での湧水が多数確認される結果も併せて地すべりブロック内の地下水位として検討した。応急調査・対策検討時の断面図を図5に示す。

重要度の高い主要地方道を保全対象とするため、応急対策施工後の早期供用を見据えた対策工法が求められた。令和5年災害手帳を参考に地すべり応急対策は①片側交



互通行を確保できる規模の押え盛土工、②豊富な地下水を速やかに排除できる浅層地下水排除工（横ボーリング工）を計画した。押え盛土工は道路路面末端の土留工ごとにはらみ出しているため下り車線片側約 3m で収める必要があり、耐候性大型土嚢での計画とした。横ボーリング工は押え盛土工（大型土嚢）と同時並行作業を進めるために地すべりブロックの末端部両脇から地すべりブロック内に向かって放射状に計画した。

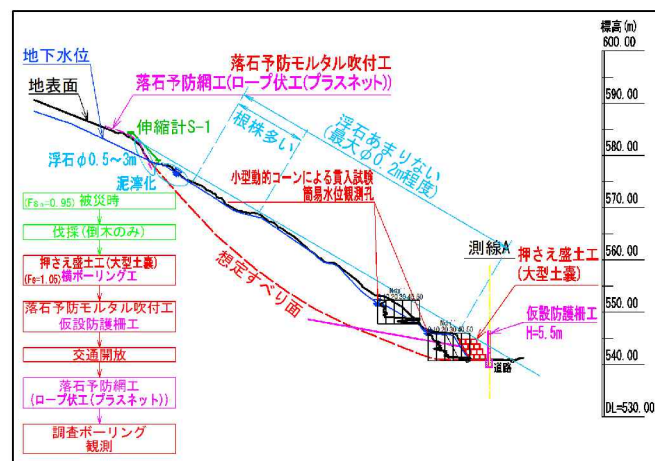


図5 応急対策検討断面図

4. 2. 交通開放に向けた落石対策検討

当該地すべりでは頭部滑落崖に露呈した巨礫混じり土砂が滑落崖からの湧水によって高含水泥濘化し斜面を流下する危険性と、砂岩起源の巨礫混じり土砂主体で構成された滑落崖から湧水・雨水等によって浮石化されるφ0.2m～最大 3m 大の巨礫が落石となる危険性があった。図 6 に地すべり発生当初に確認した滑落崖における浮石分布と後述する対策を併記した写真図を示す。

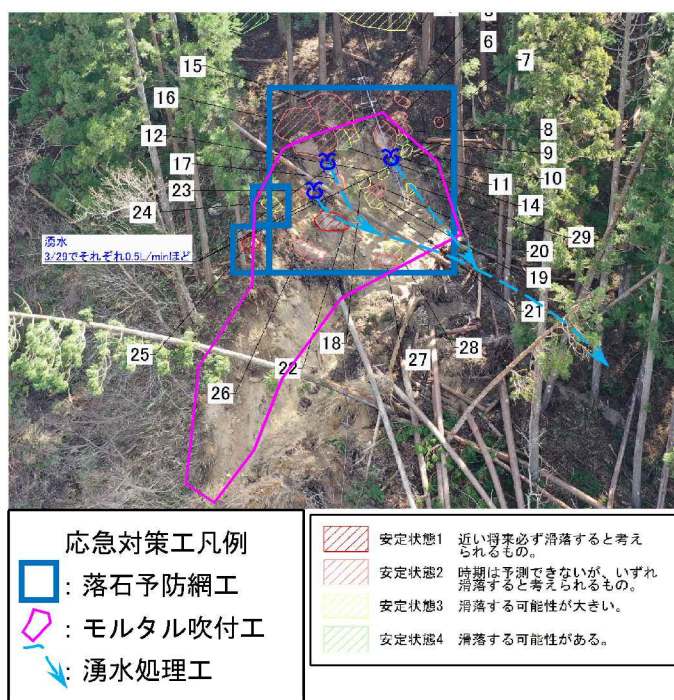


図6 滑落崖周辺の浮石分布状況と対策工

当初、地すべり応急対策として頭部排土工を計画し滑落崖の危険な浮石と泥濘化した土砂も含めて排除する案も検討した。しかし、重機のアクセスに大規模地すべり地の末端において斜面の掘削を伴う工事用道路を設ける危険性と施工期間の長さが道路供用開始時期の遅れに与える影響は大きいと判断し、代替案を検討した。まず、①道路供用を大前提とするため、滑落崖を含め作業中の

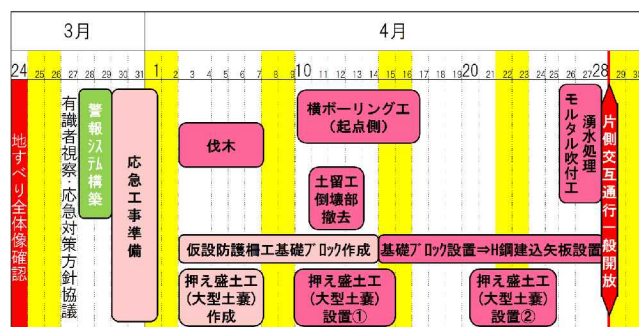
落石も考慮して地すべり範囲の浮石を把握し、「仮設防護柵工」を計画した。次に、②仮設防護柵工では防護しきれない径の大きい浮石を斜面上部にて落石予防網工にて対策する計画とした。最後に落石予防網工だけでは雨水・湧水による浮石周辺の土砂の流出は防ぎきれないので、③頭部滑落崖の巨礫の浮石化の進行を抑制するために滑落崖の湧水処理工の徹底と④土砂流出を防ぐモルタル吹付工を計画した。

4. 3. 応急対策の結果

表1に応急対策進捗表を示す。押え盛土工は仮設防護柵工との施工時の干渉を回避しながら延べ593袋の大型土嚢を設置した。横ボーリング工は施工中に最大30L/minの排水を記録し、簡易的に設けたVP13の水位観測孔ではその直後に約1.3mの水位低下を確認した。また、横ボーリング工が順次進むにつれて頭部滑落崖の湧水量も減少し地下水位の低下を目視で確認できた。

落石対策工のうち滑落崖の湧水処理工とモルタル吹付工は、斜面末端で施工されている仮設防護柵工や押え盛土工との上下作業を避けて施工した。

表1 応急対策進捗表



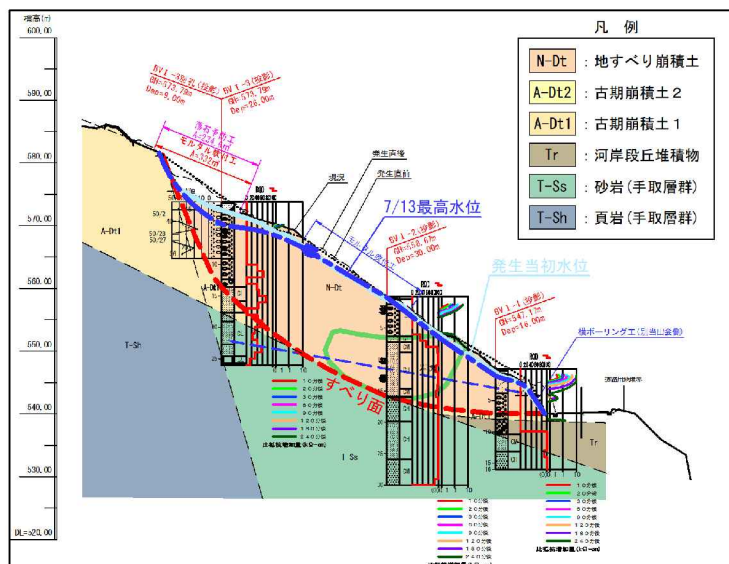
春の行楽シーズンに向けて通常 GW 前に終点側の一部区間を一般交通開放する当該路線は、地すべりの発生した令和5年度も応急対策工事の一部、落石予防網工を残し施工中ではあったが、厳しい雨量規制管理の元、令和5年4月28日の夕方から交通解放した。地すべりが発見されてから応急対策工事の約8割を完成させ開通に至るまでわずか1カ月と4日の対応であった。

5. 地すべり調査結果

図8に地すべり調査結果断面図を示す。周辺斜面では5mを超える巨大な岩塊が斜面途中でも散見されており、これを含む古期大規模地すべり土塊の末端に位置する当該地では、その古期地すべり崩積土の分布と対策工の設計のため基岩層の分布を正確に把握する必要があった。そこで、地すべりブロック内で7箇所、隣接斜面で2箇所の延べ9か所において調査ボーリング・地すべり観測を実施し、3次元的にすべり面形状を特定した。地すべ

りブロック中腹～末端付近の斜面で岩塊の頭が地表に出ている箇所があったが、その岩塊が調査ボーリングや横ボーリング工施工時に最大10m程度の大きさで地すべり土塊中に分布していることが判明した。この岩塊を含め層厚16m以上の地すべり土塊と特定した。結果的に応急対策検討時に繰り返し円弧すべり計算にて設定した推定すべり面よりも5～8m深いすべり面が明らかとなった。

図8 地すべり調査結果断面図



応急対策工事との干渉を避けて地すべり発見直後の3月末から地表伸縮計1箇所及び雨量計警報システムを設置し、応急工事中の地すべり監視を実施するとともに、最終的には地表伸縮計2箇所＋多段傾斜計3箇所の地すべり監視体制で白山の夏山登山シーズンを迎えた。交通開放した直後の令和5年5月7日～8日に交通解放前に経験していないような109.5mm/24hの大雨に見舞われた。地すべり全体での変動はなかったものの、5月8日の早朝に現地を確認すると土留擁壁が倒壊した背後にて幅8m奥行15m程度の範囲で表層の変状が確認されたため、終点側の横ボーリング工を追加実施した。その後令和5年5月28日～29日:96.5mm/24h、6月1日～2日:123mm/24h、7月12～13日:127mm/24h(石川県加賀北部地方梅雨前線豪雨)の雨を経験したが、応急対策工の効果が十分に発揮され、パイプ歪計の微小変動を除いて目立った変動は観測されなかった。

6. 融雪による地すべりメカニズムの推定

ここでは調査結果や気象データ、地すべり発見当初の顕著な地すべり活動と豊富な湧水状況等から考えられる地すべり発生のシナリオについて言及する。今回地すべりの素因・誘因概要は表1にまとめて示し、地すべり発生までの概略解説図を図9に示す。

表 1 白山公園線で発生した地すべりの素因・誘因

素因	誘因
斜面は古期地すべりの崩積土が面的に分布し、流れ盤構造	3 月 8 日頃から顕著な融雪で常時融雪水が斜面に供給され続けた
地すべり箇所周辺には沢地形が卓越し集水されやすい	融雪水だけでなく降雨があった日に多量の水が浸透し地下水位が急激に上昇した
30 年以上前に切土して拡幅されている（応力開放）	

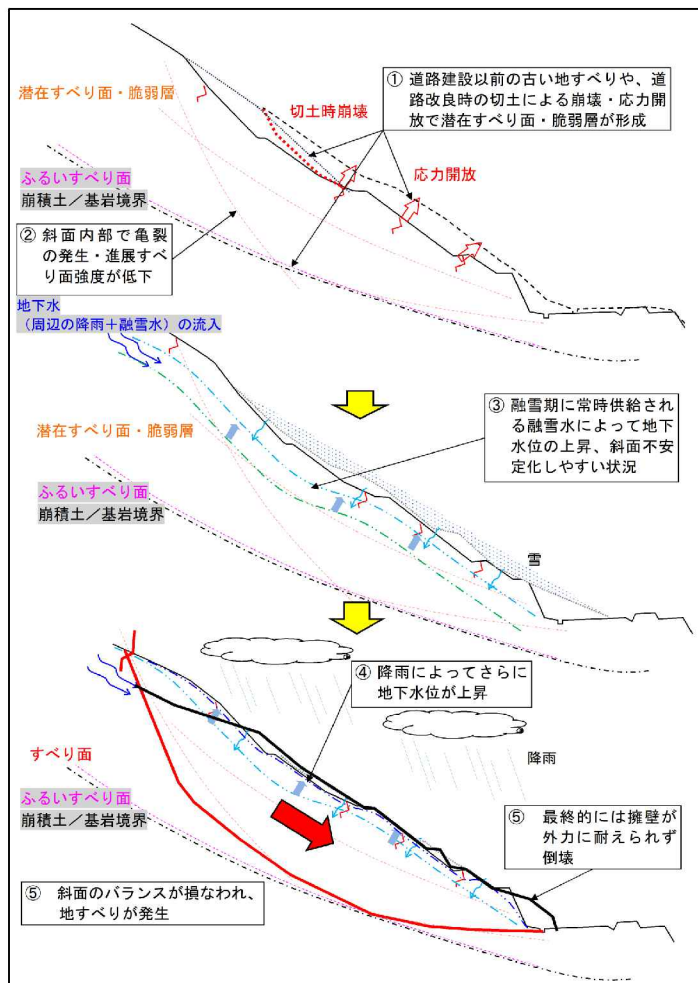


図 9 融雪による地すべり発生メカニズム

これらの条件から想定されるメカニズムは以下の通りと考えた。①表 1 に示した素因を持つ斜面でいくつもの不連続な潜在的すべり面が形成されていた。②道路建設後 30 年間で潜在的すべり面の強度低下が進行。③3 月 8 日頃から融雪水の量が多くなると、斜面には常時水が供給され地下水位が高く、すべり面に作用する間隙水圧が増加し斜面が不安定化しやすい条件がそろった。④何回かの降雨で融雪は急激に進行するとともに斜面に供給される水量もさらに多くなり、地表面付近まで地下水位は上昇（3 月 13-23 日前後と推定）。⑤すべり面強度が著

しく低下してバランスの崩れた斜面で引っ張り亀裂が生じ、引っ張りに対しての強度を持たない斜面は地すべり土塊として斜面下方へ移動。土留擁壁は設計以上の過剰外力により変形し、絶えず地すべり変動が継続したことで顕著な地盤変状が現れ 3 月 24 日に地すべりを発見。その後の降雨（3 月 25-26 日：35mm/2 日）で再び地下水位が上昇したことにより、地すべり土塊がさらに下方へ移動して土留擁壁が倒壊した（3 月 27 日）。

7. 地すべり対策工設計

7. 1. 斜面安定解析

現況安全率は災害手帳に則り「応急対策完了後の地下水位が最も高い状況において運動が沈静化している状況」と判断し、当該状況を $F_s=1.00$ と設定し、二次元断面における簡便法で地すべり最大層厚 $H=18.90\text{m}$ から粘着力 c を推定し、逆算で $\phi=35.0822^\circ$ を得ることですべり面強度を決定した。

計画安全率は主要地方道を保全対象とすることから「公共土木施設の災害申請工法ポイント 平成 27 年, p144」より $F_{sp}=1.15$ とした。

7. 2. 地すべり対策工比較検討

当該地の地形・地質から、頭部排土工は背面地山の地すべり誘発が懸念されることから不適である。応急工事の横ボーリング工以後、頭部（BV I-3）での地下水位は GL-3m 付近で抑えられている状況であったが、地すべりブロック中腹（BV I-2）では大雨時に地下水位が地表面付近まで上昇していたので、斜面中腹での追加の横ボーリング工を計画した。これにより、抑止工についても経済的かつ効果的な計画となる。抑止工の工法については、【Ⅰ案：グラウンドアンカー付杭工 案】、【Ⅱ案：杭工 案】、【Ⅲ案：グラウンドアンカー工 案】の 3 案が考えられた。

比較検討の結果、施工性・地すべりに対する安定性・経済性を踏まえてⅢ案を採用した。なお、Ⅲ案は施工ステップを検討しても、各工程で安全率 $F_s=1.00$ を下回ることではない。一方でⅠ案・Ⅱ案は施工ステップを検討すると、土留擁壁工復旧時の背面地山掘削の際に杭工打設位置よりも下方のすべりが不安定化する可能性が高く、仮設アンカー工等の追加対策が必要となることから不適である。Ⅲ案：グラウンドアンカー工詳細検討の結果、図 10 に示す対策工規模となった。

8. 地すべり崩積土の三軸試験結果と安定解析

災害査定資料としては使用しなかったが、地すべり崩積土の土質強度定数と査定設計のための安定解析に基づ

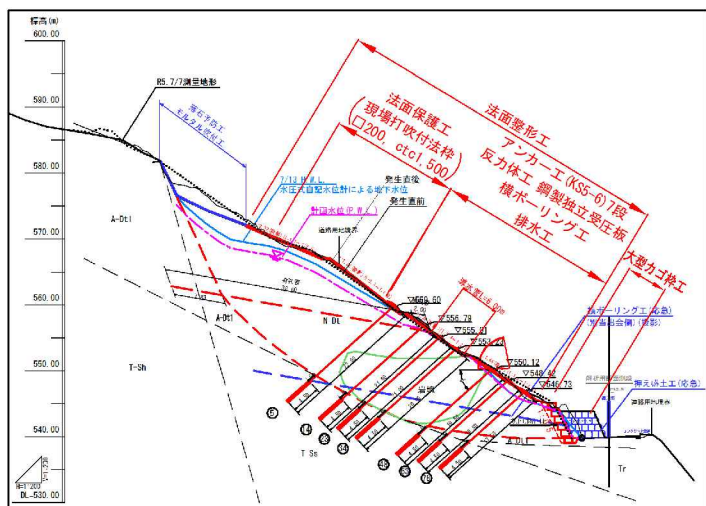


図 10 地すべり対策工標準断面図

くすべり面強度を研究目的で比較するために、地すべりブロック内の地表面付近で不攪乱試料採取を実施して圧密非排水（間隙水圧測定）条件の三軸圧縮試験（CU バー）を実施した。その結果、 $c' = 13.6 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi' = 27.8^\circ$ が得られた。この結果はあくまでも地表面付近で採取された土質サンプルの値であり、巨大岩塊を含む崩積土の条件とは異なる土質性状であることは十分に理解したうえで、地すべり発生前の地形と地表面付近まで上昇していたと推定される地下水位条件の下、繰り返し円弧すべり計算を実施した。繰り返し円弧すべり計算における諸条件及び計算結果の一覧の抜粋を表 3 に示し、計算結果の概要図を図 11 に示す。

表 3 三軸圧縮試験結果と繰り返し円弧すべり計算結果

三軸圧縮試験（CU バー）結果			
地層名	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	粘着力 c' (kN/m^2)	せん断抵抗角 ϕ' ($^\circ$)
地すべり土塊	18.91	13.6	27.8
計算手法（解析式）		円弧の描画制限	
修正 Fellenius 法 (道路土工指針準拠)		上端： 滑落崖	下端：土 留末端
繰り返し円弧すべり計算結果抜粋一覧			
すべり面名称	安全率 F_s	必要抑止力 Pr (kN/m)	すべり層厚 (m)
最小安全率	0.955	885.5	8.918
Pr 最大	0.978	1019.2	12.172
層厚最大	1.018	907.6	14.838

図 11 に示した通り、「層厚最大」のすべり面と今回地すべり調査で特定したすべり面は概ね近似形状にある。最小安全率となる円弧すべりは最大層厚=8.918m で調査

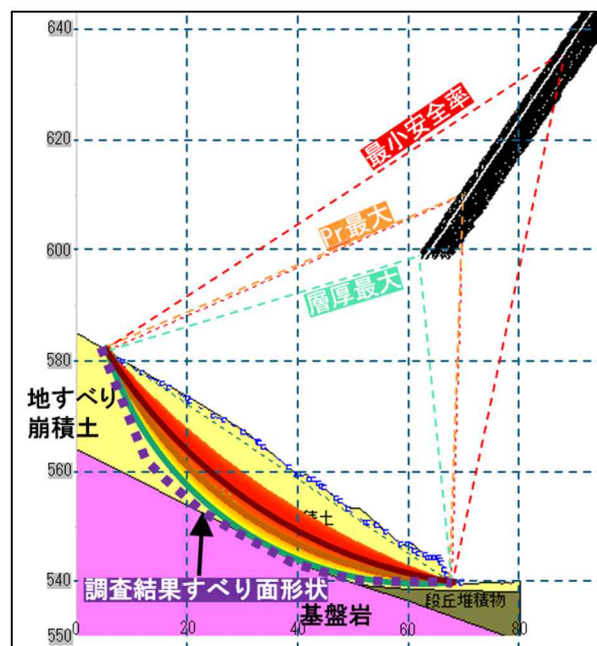


図 11 繰り返し円弧すべり計算結果

結果すべり面よりも 8~10m ほど浅いすべり面形状となった。 $F_{sp}=1.15$ に対して必要抑止力が最大となる円弧すべり形状は上記した 2 つの中間を通るすべり面形状となった。この結果から発生時に地表面付近まで地下水位が上昇していたとの推定は、大きく外れていないことを確認できた。

9. あとがき

融雪期斜面災害に対応するための道路管理方法について我々グループで調査・検討を進める中で今回の地すべり災害が発生した。融雪水が地すべりの発生の大きな誘因であることに疑いはないが、なぜ平年並み積雪量の令和 4-5 年の融雪期に発生したのか。今後は、東二口におけるライシメータ計測による融雪水の地盤浸透までの機構解析結果⁵⁾の本現場への適用検証を行い、融雪期地すべりの発生機構についてより詳細なアプローチを進めることで、今後の融雪期斜面災害に対応する道路管理方法の一助となるよう解析・検証を進めたい。

参考文献

- 1) 中部地方環境事務所：令和 5 年度白山国立公園登山者カウンター等データ分析業務，2024，3
- 2) 石川県：土砂災害情報システム SABO 74 HP，2024. 10. 23 最終閲覧
- 3) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：地すべり地形分布図（地すべり地形 GIS データ）
- 4) 鮎野義夫：石川県地質誌，石川県・北陸地質調査所，1993
- 5) 小寺基，川村國夫，野口将志：傾斜型ライシメータの開発と融雪時道路管理方法の提案に向けた取り組み，第 36 回ゆきみらい研究発表会，2025，1
- 6) 国土交通省：水文水質データベース HP よりダウンロード