

斜面型ライシメータの開発とそれに基づく道路法面崩壊の融雪特性 —平成26年4月石川県国道157号線東二口地区法面崩壊の発生メカニズムの解明—

宮本 義浩*1 川村 國夫*2 野口 将志*3

1. まえがき

代替路を持たない石川県白山麓国道157号線白山市（旧尾口村）東二口地区法面に、斜面型ライシメータや地下水位計および各種気象観測機器を設置した（図1, 図3）。これは、平成26年4月の融雪期に発生した同地区法面崩壊を検証し、融雪水が及ぼす法面の安全性評価や道路管理のあり方を提案するためである。特に、これまでほとんど発表されていない斜面型ライシメータの計測精度を明らかにして、融雪水がどれほど法面浸透するか、どれほど積雪底面流で流出するかなど、地下水位への影響と法面崩壊メカニズムについて解明する。



写真1 平成26年4月東二口道路法面崩壊



図1 調査位置図

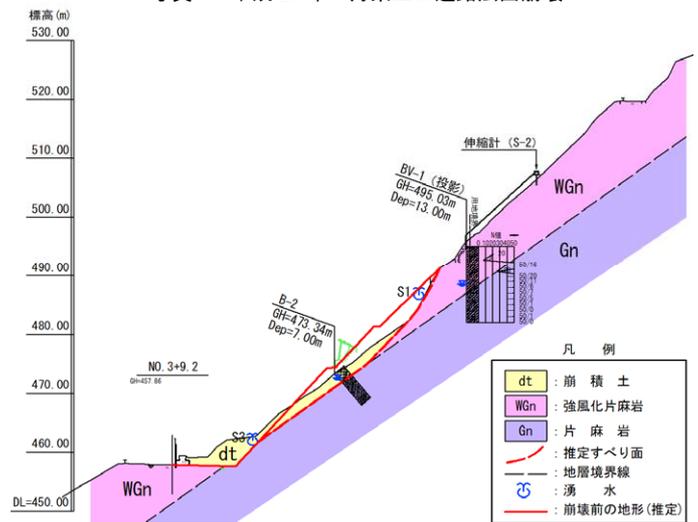


図2 崩壊直後の推定地層断面図

2. 一般国道157号線沿いで発生した法面崩壊

写真1に平成26年4月の融雪期に発生した法面崩壊状況を示し、図2に崩壊直後の断面図を示す。本現場では、図4に示すように、平成26年4月5日崩壊発生直前、3月30

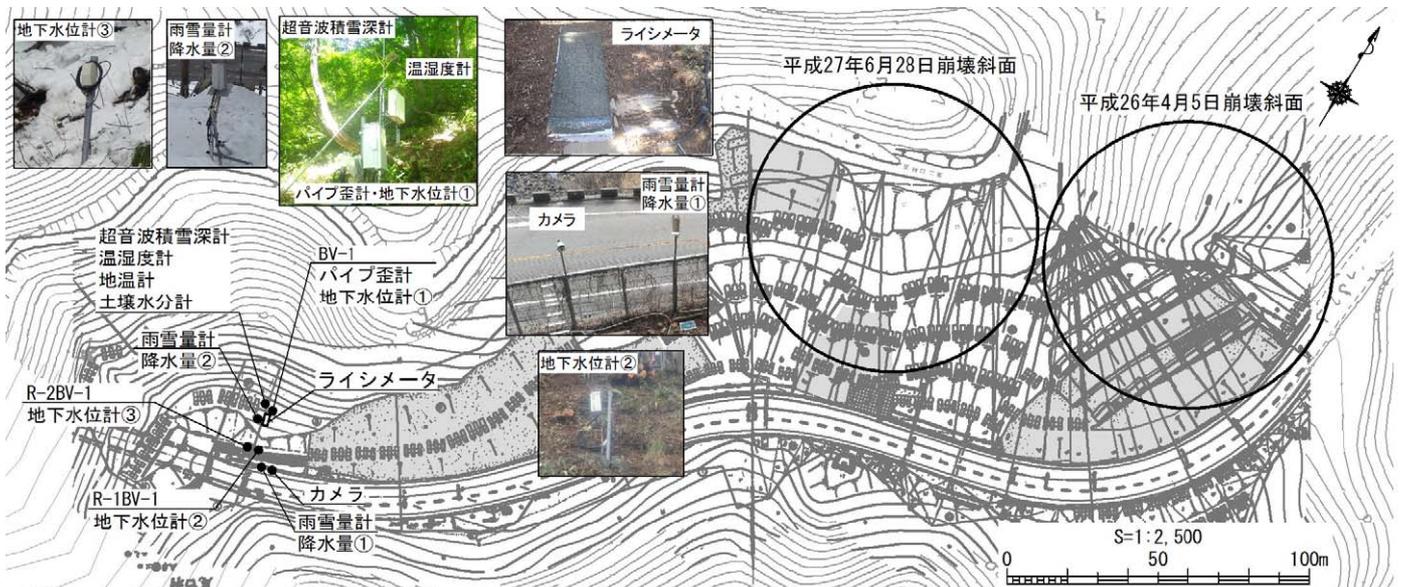


図3 斜面型ライシメータ、地下水位計および気象観測機器の現場設置

日～3月31日に降雨量123mmと、この降雨と気温15℃の上昇によって融雪深15cm/24hrを記録している。この融雪期の異常降雨量と融雪水量による積雪底面流が、道路切土法面の上部斜面から施工後33年経過したモルタル吹付工の裏面へ浸水した。さらに、法面への浸透も加わり、法面は大きく変状したのであろう。その後、崩壊前日4月4日1:00で積雪深ゼロになった直後、48mm/24hrの降雨量によって全面的な法面崩壊に到った。

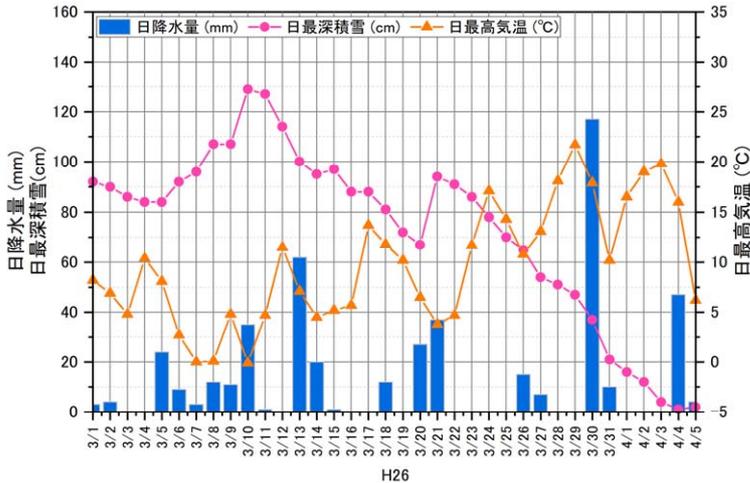


図4 崩壊箇所付近の気象データ (R3.3.1~R3.4.5)

なお、翌年平成27年6月28日にも本現場隣地の法面が再び大崩壊した(図3)。この大崩壊の誘因は平成26年3月31日変状により、法面が脆弱になったところへ、平成26年崩壊の緩みなどの影響から、発生したと考えられる。

3. 融雪計測機器と気象観測機器の設置

融雪期の道路法面崩壊の要因となる融雪水や地下水位と、それらが影響を受ける積雪深や気温、降水量などが同時に計測できる斜面型ライシメータや各種気象計器を、図3に示すような現場法面に設置した。設置は、石川県白山市東二口地区国道157号線沿の勾配1:1.5法面で、平成26年4月と平成27年7月とに崩壊した法面の隣接位置となる。

3.1. 斜面型ライシメータの開発と計測

ライシメータ計測の法面は、国道157号線沿いの南向自然斜面であり、幅100m、奥行120mの集水地形を呈する。地層は、図5の表層5mが礫混じり粘土からなる崖錐堆積物(Dt)、その下位には、岩塊混りの礫質粘土と礫質砂状の強風化片麻岩(WGn)、そして、新鮮な片麻岩(Gn)で構成される。地下水位は、GL-3m~4m付近にあり、WGn層を相対的な難透水層として、その上位のDt層中に位置している。上記の水理地質の特徴を踏まえると、融雪期間に想定される法面崩壊は、①気温の上昇や降雨によって融雪が発生、②融雪水が地盤に浸透、③地盤内の地下水位が上昇、④地盤の間隙水圧が上昇し斜面が不安定化、といった進行で生じるものと想定される。

以上の法面崩壊メカニズム解明には、融雪水の積雪底面流量や地盤内への浸透量を定量的に把握し、それらと地下水位変動との関連性を評価する必要がある。この目的から、融雪水、積雪底面流、地盤浸透水を定量的に計測できる斜面型ライシメータを開発した。このライシメータ(傾斜面2,500mm長×1,000mm幅)は、図6に示すように、斜面上流部地表面からの流入水量「A」、法面への浸透水量「C」および下流部地表面への流出水量「D」が計測でき、雨雪量計による降水量「B(降雨量Br+降雪量Bm)」から構成する。図6の様式図中の赤枠で示した積雪層内の水収支は、 $A+B(Br+Bm)=C+D$ の水収支式が成立する。なお、積雪期～融雪期の降水については、日最低気温1.2℃以上を降雨、1.2℃未満を降雪と見なした。

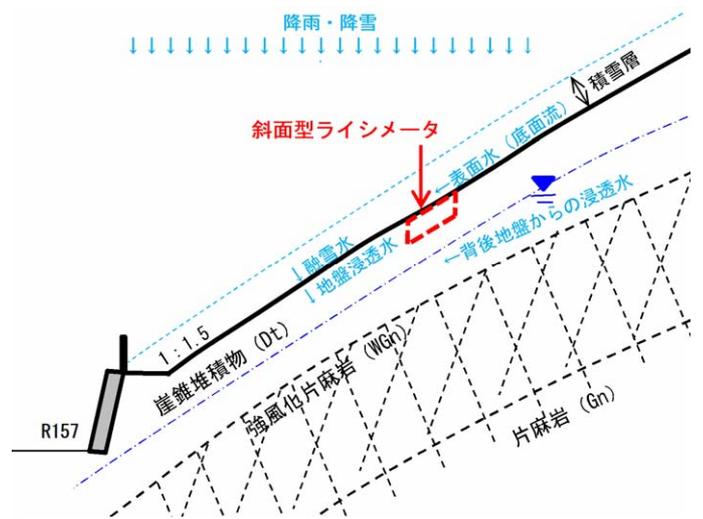


図5 現場法面の地盤図

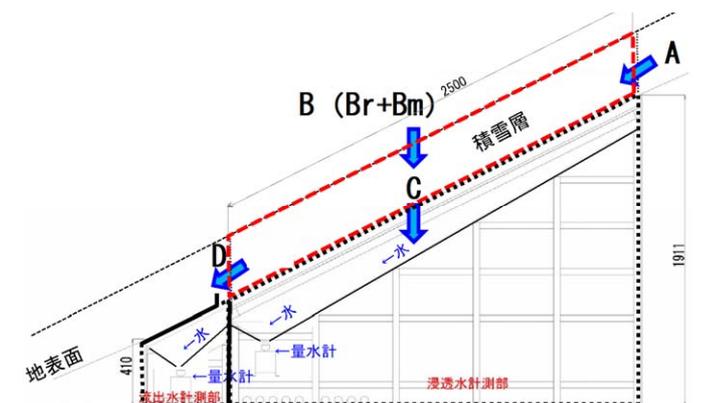


図6 斜面型ライシメータ様式図

3.2. 現場計測結果および斜面型ライシメータの妥当性

図7には、令和2年6月1日～令和3年4月25日の観測期間の計測結果(気温、孔内水位、浸透水流量、流出水流量、流入水流量、降水量、積雪量)を示す。観測期間の前半で、ライシメータの調整作業が入り、その計測値に限っては令和2年11月9日以降のデータを採用したい。観測期間を通じてそれぞれの計測値は関連性を見せながら表示できている。

図8は、令和2年度積雪期間（令和2年12月14日～令和3年3月6日）で計測したライシメータへの日流入量（A+B）を図上半部に、また、日流出量（C+D）を図下半部にそれぞれ表示した。図7と図8より、積雪期初期から降雪による降水量（濃青色）が積雪深ピーク（令和3年1月10日）頃まで続き、その後、積雪期末期では浸透量（濃緑色）が多くなり、その連続性も顕著となる。積雪期間を通じて、ライシメータ平面内で計測した水収支は、累積流入量936.8mm、累積流出量822.8mm、その差が114mmで累積流入量に対して12%となり、この程度の精度が確保できた。なお、この差12%の原因は、ライシメータ平面外からの流入や流出があり、また、蒸発などもあると考えられる。したがって、今後は積雪層内からの流出量や流入量の計測が開発ライシメータの改良ポイントとなる。

また、法面の安全性に重要となる地下水位と降水量の関連を図7から見てみる。非融雪期では、6月14日に最大時間雨量37.5mm/h（156mm/日）と8月11日～12日に最大時間雨量37.5（102mm/日）の強い降雨を記録している。この降雨に伴う地下水位上昇は、6月14日が約1.8m、8月12日が約0.9mであった。一方、積雪期では、積雪深減少（融雪）に伴う1m以上の地下水位上昇は、1月末に1回、2月に3回認められ、その上昇は約1.1～1.2mであった。この時期を詳細に見ると、地下水位上昇の2～3日前から累積融雪水量が降雨換算で70～100mmとなった。したがって、融雪期の融雪量による地下水位上昇特性は、非融雪期の降雨量による地下水位上昇特性と概ね一致することが分かる。特に、融雪期の地下水変化についてはライシメータの計測値と浸透解析から後述していく。

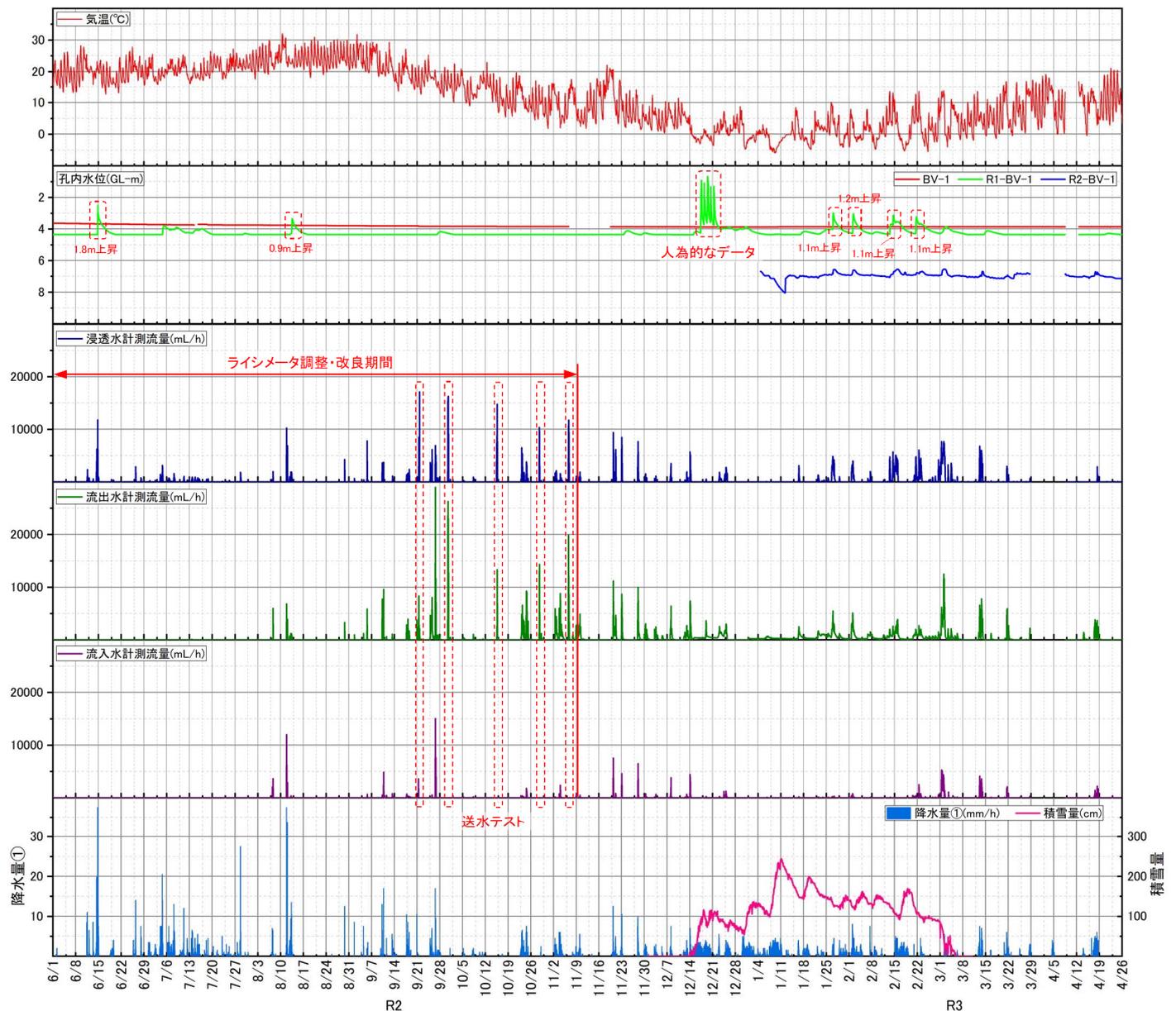


図7 観測期間中の計測結果（気温、孔内水位、浸透水計測流量、流出水計測流量、流入水計測流量、降水量、積雪量）

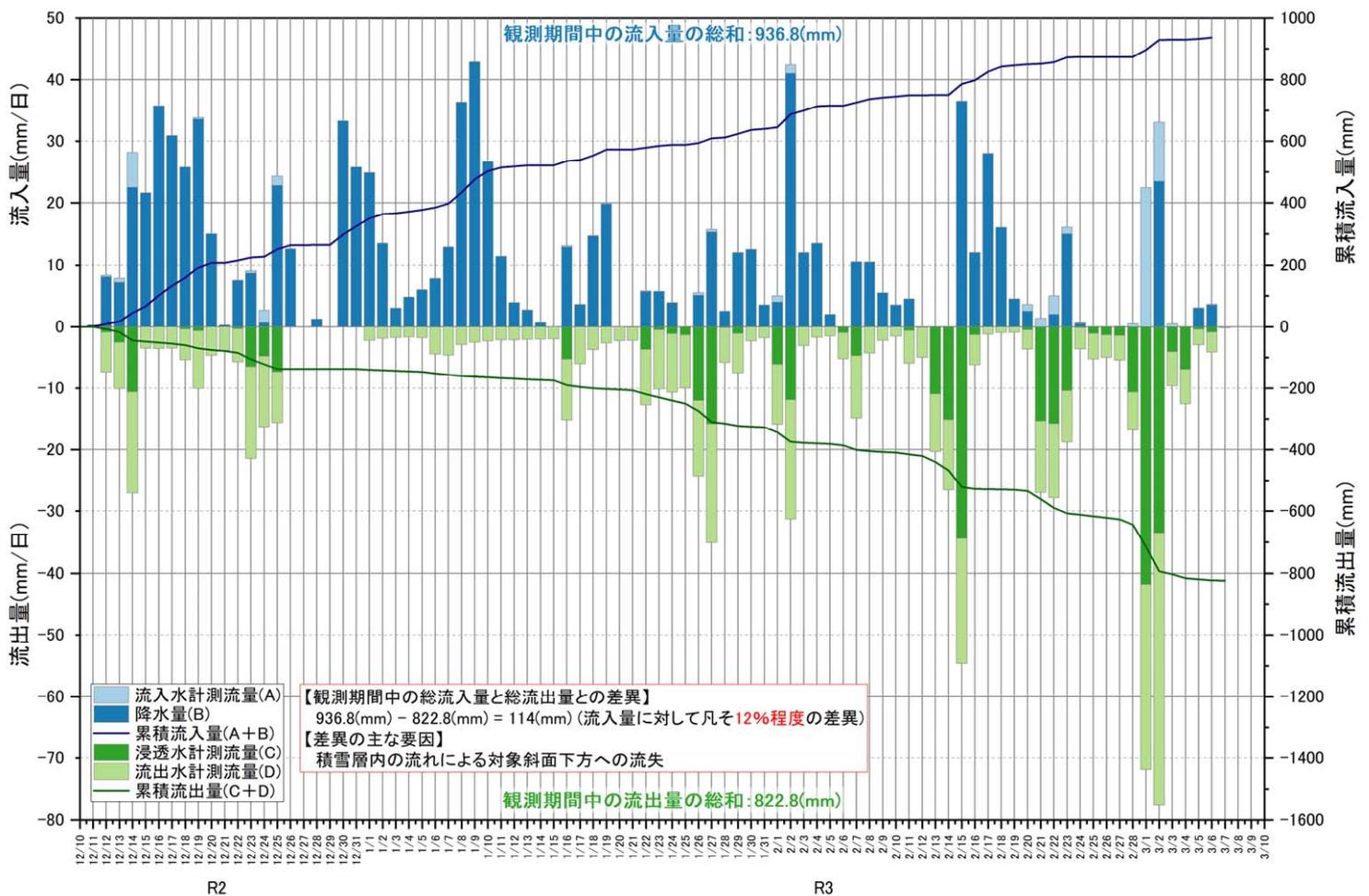


図8 斜面型ライシメータの水収支

3.3. 雪密度の推定

積雪期間を通じて、観測降水量とライシメータ流入量および流出量から積雪層の重量が水換算値で求められる。それに対する積雪深計測による積雪層体積から、雪密度が算定できる。その結果を図9に示す。図9より、積雪初期から積雪深ピーク時までの雪密度は、ほぼ $0.2\text{gf}/\text{cm}^3$ ま

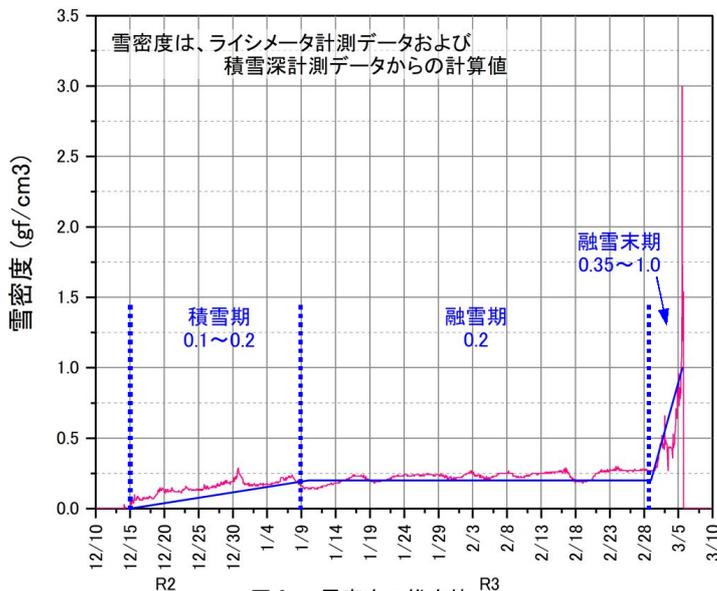


図9 雪密度の推定値

で上昇、その後、積雪期末期まで $0.2\text{gf}/\text{cm}^3$ の一定値を保ち、積雪ゼロになる直前から急増して、計測可能日までは平均値が $0.35\text{gf}/\text{cm}^3$ 程度となることがわかる。当然ながら、雪密度は $1.0\text{gf}/\text{cm}^3$ へ収束していく。降雨の無い融雪日は、この $0.2\text{gf}/\text{cm}^3$ を概ね示し、他方、降雨のある融雪末期日は、降雨が積雪層に一旦貯留されて、雪密度を増加させながら融解に到っていく。

3.4. 融雪時・降雨時の地盤浸透特性

気象観測機器からの融雪量や降雨量に対するライシメータ計測からの地盤浸透量との関係を以下にまとめる。

① ここで、融雪期のライシメータが計測した浸透量Cと積雪底面流量（流出量D-流入量A）との合計値を日融雪水量と設定したとき、図10が示すように、日融雪水量は気象観測値の $\{ (\text{日融雪深} \times 0.2 + \text{日降雨量}) \times (0.9 \sim 1.2) \}$ で近似できた。また、同図から日最低気温がプラス日の融雪日や融雪が急激に進んだ日では、法面への日浸透量は日融雪水量の約50%を記録した。

② 一方で、図11は非融雪期のライシメータ計測値を示す。その結果、観測降雨値は、ライシメータ排水量としての計測浸透量Cと表面流 (D-A) との合計値にほぼ一致する。そして、そのうちの地盤浸透量はライシメータ排水量の50%で近似できた。

つまり、融雪期と非融雪期の浸透特性が同様の傾向を示したことは興味深い計測結果を示した。

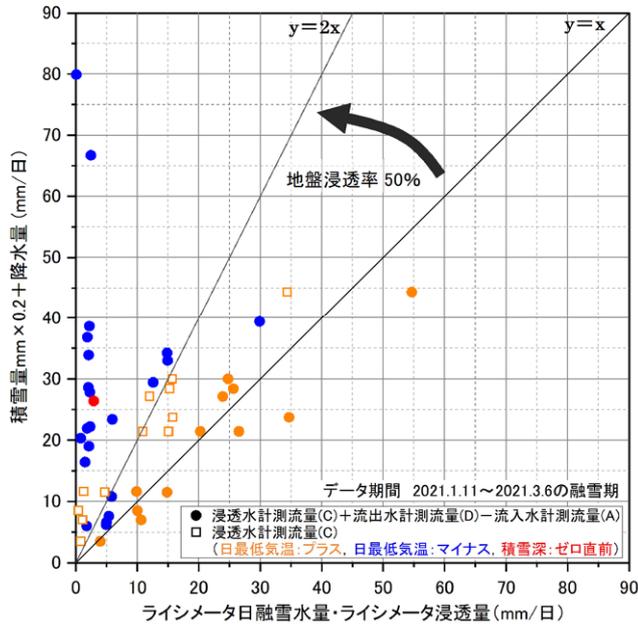


図10 ライシメータ日融雪水量・ライシメータ浸透量

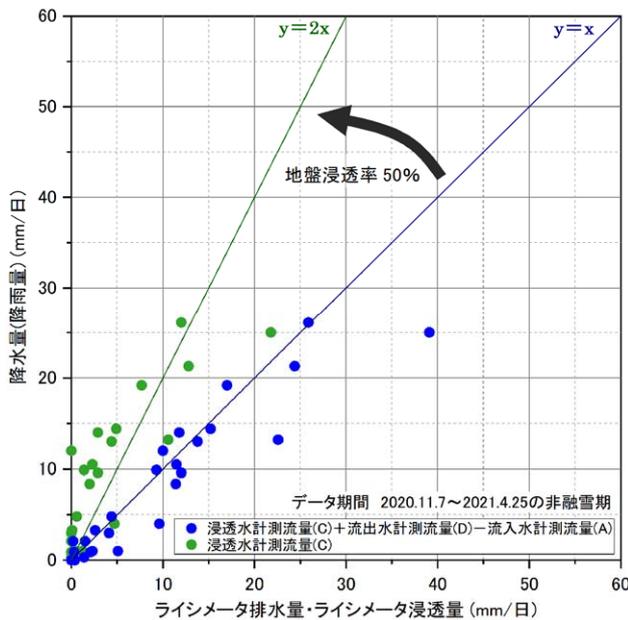


図11 ライシメータ排水量・ライシメータ浸透量

3.5. 実測地下水位からの計測浸透量の妥当性

積雪期後期や末期の融雪特性は、法面への浸透量が融雪水量の50%程度となり、さらに非融雪期の降雨量に対する浸透量割合もほぼ同値を示した。この流入量全体に対して約半分が浸透量で流出することの妥当性を、地下水位に及ぼす影響の解析から検討した。検討手順は、

- ① 非融雪期の計測浸透量を入力して、実測地下水位に最も近似できる各地盤層の透水係数を繰返し計算から同定する。
- ② 同定できた透水係数から、融雪期の計測浸透量による地下水位上昇を解析して、実測水位と比較する。

図12、図13に非融雪期（令和3年3月10日～令和3年4月

10日）と融雪期（令和3年1月1日～令和3年1月31日）の実測地下水位と解析地下水位の比較を示す。同図に示すように、非融雪期および融雪期での、地盤浸透水の作用に伴う地下水位上昇が、概ね実測値と解析値で近似できた。本現場では、流入量の約50%が浸透量となることが実証できた。

なお、本地下水解析で同定した地盤透水係数は、WGnが $k = 8.0 \times 10^{-6}$ (cm/sec)、Gnが $k = 5.0 \times 10^{-8}$ (cm/sec) を得た。

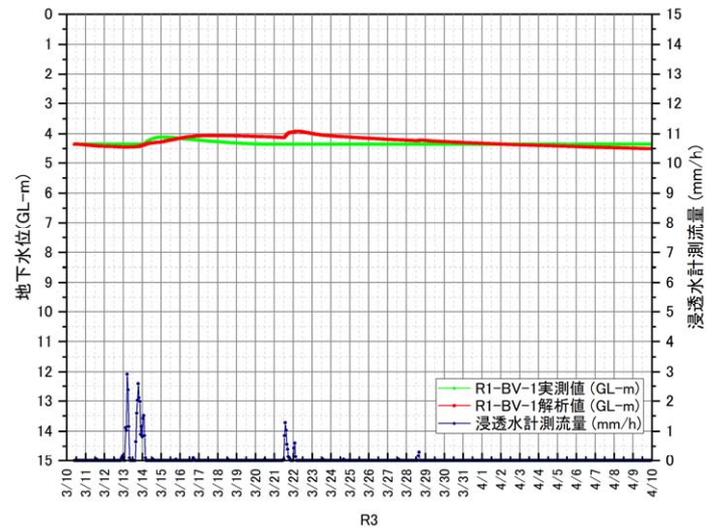


図12 非融雪期の実測地下水位と解析地下水位

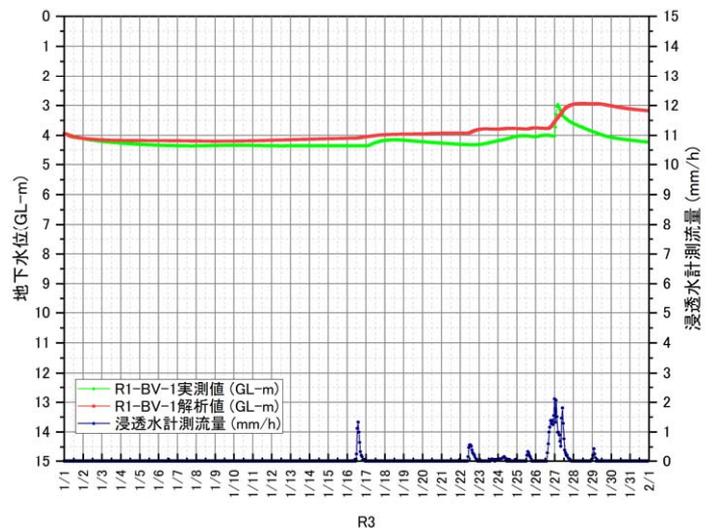


図13 融雪期の実測地下水位と解析地下水位

4. 法面崩壊メカニズムの考察

平成26年4月5日、東二口地区一般国道159号線沿い法面で発生した崩壊に対して、崩壊発生直前の気象観測と今回設置したライシメータから得られた融雪特性を踏まえて、法面の崩壊メカニズムを考察した。

4.1. 法面崩壊現場

崩壊現場は、延長約40m、被災高約50m、法面長さ約60mの規模の崩壊土砂が国道157号に崩落、上下線と登坂車線の一部を塞ぎ、1週間の通行止めの後、片側交互通行規制となった。その法高は約30m、法面勾配が約1:

1.0の切土法面であり、強風化片麻岩帯（WGn）が新鮮部（Gn）の上位にクサビ状で成して、法面下方へ抜け出やすい状態で分布する。

4.2. 融雪浸透および法面の安定シミュレーション

前掲図4の崩壊前の気象データや地質調査データを用いて、ライシメータ計測で得られた融雪・浸透特性を組み入れた条件から浸透および法面安定のシミュレーションを行った。解析期間は、2.で述べた法面不安定化に強く影響した崩壊6日前の3月30日～31日の降雨量（117mm/日）を取込み、この3月30日から崩壊4月5日までの7日間とした。解析シミュレーションの地盤モデルや地盤強度定数、地下水などの条件は、崩壊断面位置の既往調査や解析業務で記された既知データ¹⁾から設定した。また、透水係数は、前掲3.5で示した値を採用し、他の諸定数は、一般値とした（表1参照）。

表1 解析用地盤パラメータ

地層名	透水係数 k (cm/sec)	比貯留係数 Ss (1/cm)	有効間隙率 ne	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)	単位体積重量 γ (kN/m ³)
積雪層	1.0×10 ⁻²	5.0×10 ⁻⁶	0.3	-	-	-
モルタル吹付	1.0×10 ⁻¹⁵	5.0×10 ⁻⁶	0.3	-	-	-
強風化片麻岩	8.0×10 ⁻⁶	5.0×10 ⁻⁷	0.3	8.5	36	20.0
片麻岩	5.0×10 ⁻⁸	3.0×10 ⁻⁸	0.3	100.0	45	25.0

降水量と積雪量は、前掲図4の気象データを用いた。解析に用いる降水量は、前述の実測積雪深の減少（融雪深）に雪密度（0.20）を乗じた融雪量に降雨量を加え、さらに、3.4で示した法面への浸透率50%を入力した。境界条件は、下流境界を「浸出面、初期水位固定」、上流境界を「流出入なし、初期水位固定」、地表面を「降水（降雨+融雪の合算降水量）流入」、底面境界を「流出入なし」とした。

図14に浸透解析結果を、図15に法面の安定シミュレーション結果を示す。3月30日～3月31日の融雪水と降雨量は、法面末端付近のモルタル吹付裏の地盤へ浸水したり、法面に浸透して、地下水位が初期より約1m上昇した。このため、法面安定度が低下する。3月31日3:00までの法面安全率Fsは解析期間前に対して約20%減ずる結果となった。さらに、3月31日3:00から4月3日6:00までは融雪水から地下水位がさらに約1m上昇し、Fsが約16%減じた。そして、これ以降の4月3日6:00から崩壊4月5日6:00までは、地下水位が約0.3m上昇し、同期間でFsは約3%減ずる結果となった。

以上から、崩壊に至った4月5日以前の異常降雨と融雪水によって、東二口法面の安定性は著しく低下した。その結果、4月4日～4月5日の降雨量47mm/日によって全面的な法面崩壊が発生したと判断した。

融雪期での異常降雨と融雪水が法面へ浸透し、加えて積雪底面流のモルタル吹付裏に侵入して、法面の安全性が大きな影響を与えたと考えられる。

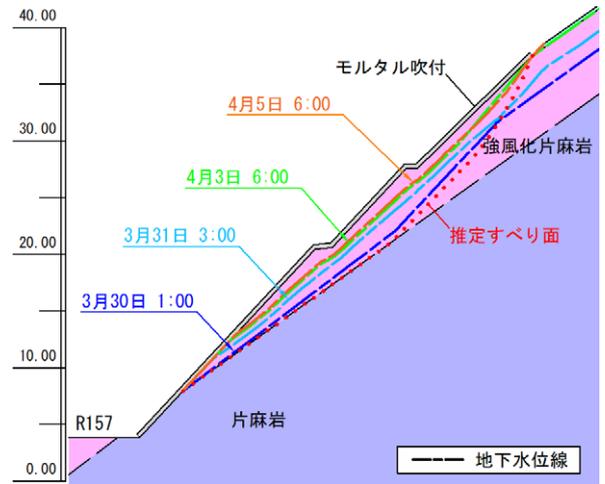


図14 浸透解析結果

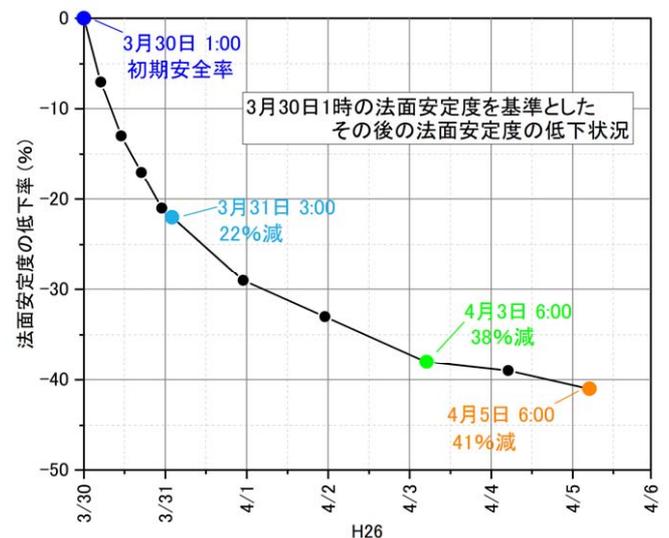


図15 法面安定のシミュレーション結果

5. あとがき

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- ① 斜面型ライシメータを開発した。ライシメータと各種気象観測機器による計測結果に基づき、ライシメータ内の水収支を検討した。その結果、ライシメータの計測がほぼ妥当であることを確認できた。今後は積雪層内からの流出や流入の計測が改良ポイントとなる。
- ② ライシメータ計測に基づき、融雪水量や地盤浸透水量および積雪底面流量が記録でき、特に、本現場では融雪期の融雪水量や非融雪期の降雨量に対して、法面への浸透量は約50%を記録したことが分かった。
- ③ 地盤への浸透水量を用いた地下水への浸透解析や法面の安定性シミュレーションから、法面崩壊のメカニズムが説明できた。

6. 参考文献

- 1) 石川県土木部：一般国道157号道路災害防除工事（調査）業務委託、平成26年、ホクコク地水