

融雪期の斜面災害に対する管理手法

高柳 剛* 湯浅 友輝* 樺 健典*

Maintenance Method for Slope Failure Disaster in Snow Melt Season

Tsuyoshi TAKAYANAGI Tomoki YUASA Takenori KEYAKI

Slope failure which is caused by snowmelt occurs sometimes in Japanese railways during the snow melt season. In this study, we suggested a method of evaluating the amount of snowmelt by calculating it based on the weather data getting from the AMeDAS and also developed a method of evaluating quantitatively a snowmelt disaster risk. For the development of the method, we monitored the change of the ground water levels at several slopes in snowfall areas. As a result of the monitoring, it has been clarified that at time when slopes are suffering snowmelt water for long time, they could be in most unstable condition of the year due to the raising of groundwater. With reference to above situation, we developed a risk evaluation method based on the effective snowmelt index correlated with ground water behavior.

キーワード：融雪，盛土，切土，現地観測，維持管理

1. はじめに

積雪地域の斜面では融雪水を誘因として斜面崩壊が引き起こされることがある。このような斜面崩壊に対して、積雪地域を営業圏とする鉄道事業者では融雪期における巡回点検を強化するなどの措置が講じられてきた。しかし近年、鉄道では北海道や本州日本海側などの豪雪地域において、腹付盛土部における盛土崩壊（図1）、河岸段丘崖末端の切土のり面における表層崩壊、河川沿いの片切片盛の盛土部における盛土崩壊など、様々な融雪災害が発生しており、より定量的な融雪期の斜面安定性評価手法の構築が必要となってきた。

一般に地表面からの水の浸透による地盤内の間隙水圧の上昇が斜面崩壊の主な原因とされる。このため降雨を主な誘因とする斜面崩壊（以下、降雨災害と呼ぶ）に対しては、鉄道雨量計が過大な降水量を観測した場合に運転規制を発令するソフト対策によって列車の安全を確保することが出来る。一方で融雪を主な誘因とする斜面崩壊（以下、融雪災害と呼ぶ）の場合は、降雨災害と同様



図1 融雪期における盛土崩壊の例

に融雪の浸透による地盤内の間隙水圧の上昇によって引き起こされると考えられるが、現状では鉄道沿線の融雪量を把握する手法や仕組みが整備されていない。また何らかの手段により線路沿線の融雪量を把握することが出来たととしても、融雪量に応じた定量的な斜面の安定性評価手法が定められていない。

そこで今回はこれらの課題を解決し、融雪期の適切な斜面管理手法を確立することを目的とした研究を実施したため、その内容について報告する。

2. 融雪量評価モデル

融雪災害では融雪水の浸透が主たる斜面崩壊の誘因となるため、融雪量を適切に評価することが融雪期の斜面管理において非常に重要となる。融雪量を把握する一般的な手法としては、計測機器を用いて直接的に観測する方法と、気象データを用いて間接的に評価する方法が挙げられる。

計測機器を用いて計測する場合、例えば「ライシメータ」という専用の観測機器を用いる必要がある。ライシメータは主に縦横の幅が数メートルの受け皿と、受け皿の底面に設置された転倒ますから構成される計測機器である。融雪水の地盤への供給は、積雪表面の融解により生じた水が（以下、同水量を「表面融解融雪量」と呼ぶ）、積雪中を浸透して積雪の底面から流出することによって生じる（以下、同水量を「底面流出融雪量」と呼ぶ）。ライシメータはこの底面流出融雪量を計測することが出来る。しかしながら、鉄道事業者が融雪期の斜面安定性評価を目的として、このような大型の専用観測機器を新たに複数箇所を設置することは、コスト面や維持管理の困難さの面から現実的では無いと考えられる。

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

特集：防災技術

そこで本研究では、地域の融雪量を把握する手法として、気象データから間接的に評価する方法を採用することとした。具体的には、鉄道総研がこれまでに開発してきた「熱収支法」に基づく評価手法を採用した¹⁾。本手法では気象庁のアメダスから得られる気象データの内、「気温・降水量・風速・日照時間」を用いて時間分解能1時間あたりの融解熱量を評価し、同熱量に基づいて表面融解融雪量を算出する。ここで熱収支法における積雪表面の融解熱量 Q_M の評価式を式(1)に概念図を図2に示す。

$$Q_M = Q_R + Q_H + Q_L + Q_P + Q_C \quad (1)$$

Q_M ：融解熱量【表面融解】

Q_R ：正味放射量（全天日射量，反射量，大気放射量，地球放射量の熱量）

Q_H ：顕熱（温度の高い所から低い所に輸送される熱量）

Q_L ：潜熱（相変化に伴う熱量）

Q_P ：降雨熱（雨滴によってもたらされる熱量）

Q_C ：雪中伝達熱（積雪層内の温度勾配によってもたらされる熱量）

この融解熱量 Q_M ($J/s/m^2$) を $0^\circ C$ の氷の融解熱量 (= $0.334 \times 10^6 J/kg$) で除することにより、表面融解融雪量 M_s (mm) を算出する。なお、気温が $1^\circ C$ 以上の条件で降水量が観測された場合、本モデルでは降水量を表面融解融雪量に加算している。一方で気温が $1^\circ C$ 以下の場合、降雨ではなく降雪と判定して表面融解融雪量に加算しない。さらに本手法では表面融解融雪量が地表面に到達するまでの時間をダルシー則と積雪深の関係に基づいて考慮することで、より適切に1時間あたりの分解能で底面流出融雪量を評価している。このため、降水量も底面流出融雪量として反映されるまでに時間差が生じる。これらの一連の底面流出融雪量の評価に関するアルゴリズムの詳細については、参考文献1)を参照されたい。

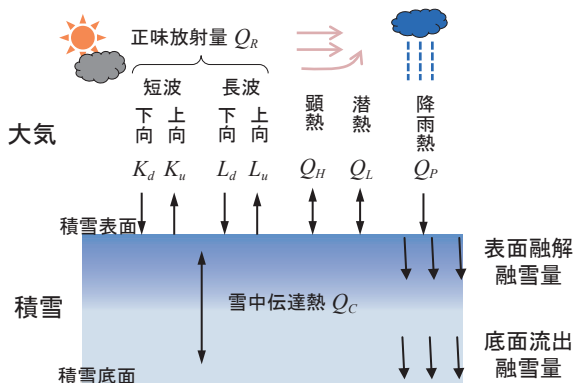


図2 積雪表面の熱収支の概念図

3. 積雪斜面における土中水分挙動の観測

3.1 融雪災害と降雨災害の違い

鉄道の降雨時運転規制では、雨量指標が一定の閾値を超過した場合には斜面の安定性が低下することで降雨災害の危険性が高まったと判断して、列車の運行を制限する。ここで、底面流出融雪量を既存の降雨時運転規制における降水量として見なすことで、融雪期の斜面の安定性評価が可能になることが期待される。しかし、これには幾つかの問題点が上げられる。

在来線の降雨時運転規制には時間雨量（1時間に作用した降水量）と連続雨量（降雨発生時からの降水量の累積値であり、12時間の降雨の中断によってゼロクリアされる）の指標の組み合わせによって運用されることが多い。ここで、過去の融雪災害事例（図1の盛土崩壊事例）における、発災前後の気象条件を図3に示す。なお前述の通り、底面流出融雪量には降水量が反映されている。同災害の発生は4/27の7:00頃であったと推定されているが、当時の降水量は $0mm/h$ であり、底面流出融雪量についても $2.2mm/h$ と低い値であった。このように融雪災害の際に観測される1時間あたりの底面流出融雪量は、鉄道で定められる一般的な降雨時運転規制の時間雨量の閾値と比べると小さい値になることが多い。なお鉄道では降雨時運転規制の時間雨量の閾値として数 $10mm/h$ 程度に設定されることが一般的である。このような事から、既往の降雨時運転規制にそのまま底面流出融雪量を反映させたとしても、時間雨量の閾値に基づいて評価することは困難であると考えられる。

ここで融雪現象の特徴として、1時間あたりの底面流出融雪量は小さいが、数カ月もの長期間に渡って連続して融雪水が地盤に供給され続ける点が挙げられる。融雪災害のメカニズムとして、このような長期的な融雪水の作用に着目した場合、連続雨量のような累積的な雨量指標が融雪期の斜面の安定性評価において重要になる。しかし、融雪水は降雨と異なり継続時間が著しく長いので、積雪地域において連続雨量に融雪量をそのまま反映させた場合、連続雨量が数 $1000mm$ に達することがあるなど、

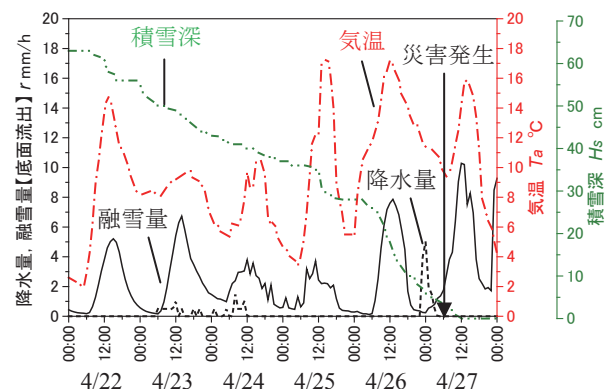


図3 融雪災害発生時の気象条件の例

一般的な降雨時運転規制の連続雨量の閾値と比べて極めて大きい値となる。なお、鉄道では降雨時運転規制の連続雨量の閾値は数 100mm/h 程度に設定されることが一般的である。このため、連続雨量に融雪量を単純に反映させた場合、積雪地域の多くの場所では連続雨量が降雨時運転規制の閾値を長期に渡って超過し続ける事態が生じる。その場合、同指標に基づいて融雪期の中で特に警戒が必要な時期を判別することが実質的に困難となる。

このように、既存の降雨時運転規制に対して融雪量を単純に反映させるだけでは適切に融雪期の斜面の安定性を評価することは出来ない。このような融雪期の斜面の安定性を評価する上では、長期に渡り融雪水の供給を受ける盛土や切土斜面の不安定化メカニズムについて理解を深めた上で、同メカニズムを考慮した新たな評価手法の提案が必要となる。そこで、長期に渡って融雪水の供給を受ける盛土や切土斜面の状態変化の把握を目的として、積雪地域における鉄道沿線の盛土・切土斜面における土中水分挙動の長期現地観測^{2) 3)}を行った。

3.2 現地観測の内容

3.2.1 盛土（北海道）の観測

本研究では土中水分挙動の観測対象として、鉄道沿線の盛土と切土を1箇所ずつ選定した。盛土については、北海道空知地方に位置する平地上に構築された高さ 6.7m 程度の盛土を選定した（図4）。基礎地盤は主に堆積岩からなり、地表面には広く泥炭に覆われ、盛土の周囲の平地はやや湿潤な状態であった。なお当該箇所は平地上の盛土であるため、周辺地形から表面水が流入する条件にはない。当該盛土中腹の GL-0.5m, GL-1.5m から攪乱試料を採取した所、盛土の土質は礫まじり砂質粘性土であった。また同盛土の中腹で実施したボーリング試料を利用して簡易透水試験を実施した所、透水係数 k については、GL-0.3m の位置では $k = 1.32 \times 10^{-5}$ (m/s)、GL-1.0m の位置では $k = 5.52 \times 10^{-6}$ (m/s) であり、全体的に透水係数がやや低い土質であった。

当該箇所における計測機器の設置状況を図4の平面図および断面図に示す。観測機器は線路右側（南向き斜面）ののり面において、地下水位計（大気開放型）を1箇所、誘電率土壌水分計（SMS・温度計測機能付き）を10箇所、ひずみゲージ式間隙水圧計（PPM）を2箇所に設置した。図4に示すA点、B点、C点における観測機器の設置深さを表1に整理して示す。なお地下水位計の設置に際しては、当該盛土で所定の深さまでボーリング削孔した上で有孔管をボーリング孔内に設置し、有孔管の底部に地下水位計を設置した。なお有孔管とボーリング孔の境界部の処置についてはGL-5.9m からGL-3.0m の範囲には透水層となる珪砂6号を投入し、GL-3.0m から地表面まではベントナイトを投入して止水処置を施した。土

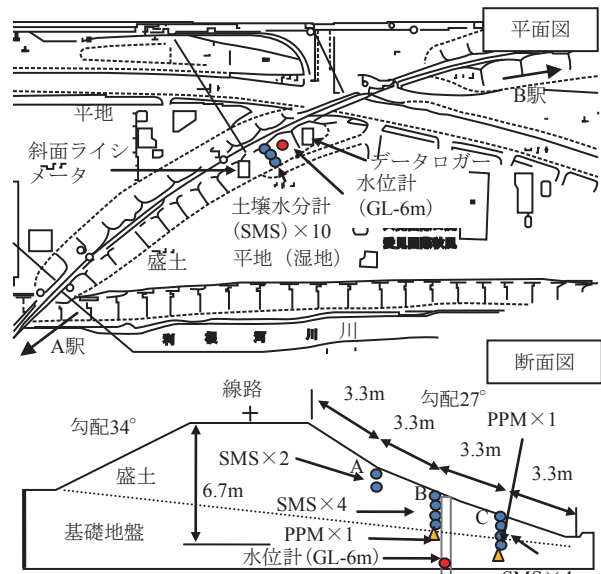


図4 盛土（北海道）の計測機器設置状況

表1 盛土（北海道）におけるセンサーの埋設深さ

観測機器	設置深さ		
	A点	B点	C点
地下水位計		GL-5.90m	
土壌水分計	GL-0.25m	GL-0.25m	GL-0.25m
	GL-0.50m	GL-0.50m	GL-0.50m
		GL-0.75m	GL-0.75m
		GL-1.00m	GL-1.00m
間隙水圧計		GL-2.80m	GL-1.50m

壤水分計および間隙水圧計については、ハンドオーガーにより所定の位置まで掘削して地盤内にセンサー部を埋設した。掘削部の埋め戻しに際しては、地表部周辺にベントナイトを用いて埋め戻すことで止水処置を施した。

3.2.2 切土（新潟県）の観測

切土のり面の観測対象として、新潟県上越地方の河岸段丘の末端に位置する高さ 10m 程度の切土のり面を選定した（図5）。なお当該箇所では融雪期に地山からの湧水に起因する斜面崩壊（崩壊深さ 0.5m 程度の表層崩壊）が過去に発生している。その後、災害箇所では格子枠工等による対策工が実施されている。ボーリング調査および簡易貫入試験の結果、当該のり面の地質は主に3層からなり、のり面上部（地山①）は粘性土質砂質礫、のり面下部（地山②）は粘性土混じり砂質礫からなり、表土の黒ぼくはのり肩に 1.1m 程度の厚さで分布していることが分かった。ボーリング孔を利用した現場透水試験（ピエゾメータ法）から、砂質土の飽和透水係数は $k=1.28 \times 10^{-6}$ m/sec、礫質土は $k = 3.66 \times 10^{-6}$ m/sec と推定された。表土については不攪乱試料を用いた簡易透水試験より $k=1.8 \times 10^{-4}$ m/sec が得られた。計測機器の設置状況を図5の平面図と断面図に示す。旧崩壊箇所付近ののり肩のボーリング孔内部に地下水位計（非大気圧開放型・温度計測機能付き）を1箇所、水位の大気圧変動を補正するために大気圧計をボーリング孔内部に1箇

特集：防災技術

所設置した。また格子砕工が施工されていない切土のり面の表土に誘電率土壌水分計 (SMS・温度計測機能付き) を合計3箇所に設置した。土壌水分計は同一箇所において深さ0.25m, 0.5m, 0.7mの3点で設置した。土壌水分計の設置については、ハンドオーガーにより所定の位置まで掘削した上で地盤内にセンサー部を埋設した。掘削部の埋め戻しに際しては、地表部周辺にベントナイトを用いて埋め戻して止水処置を施した。

3.3 現地観測の結果

盛土 (北海道) における, 2013年12月から2015年6月までの現地における気温 (周辺アメダスより取得), 積雪深 (周辺アメダスより取得), 浸透水量 (地盤に浸透する水量), 体積含水率 (全センサーの平均値), 地中温度 (のり肩深さ0.25m), 地下水位の経時変化を図6に示す。さらに切土 (新潟県) における同期間における現地観測結果を図7に示す。なお「浸透水量」とは、融雪期では2章のモデルに基づき周辺アメダスデータを用いて評価した底面流出融雪量を意味する。前述したように、この底面流出融雪量には降水量が反映されている。

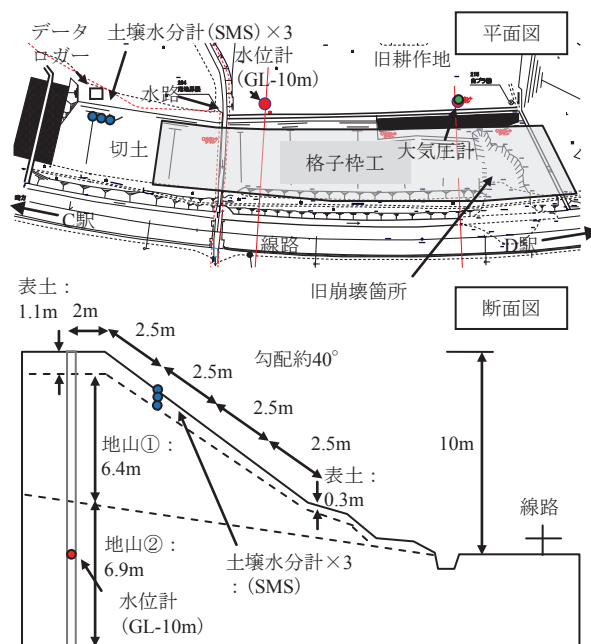


図5 切土 (新潟県) の計測機器設置状況

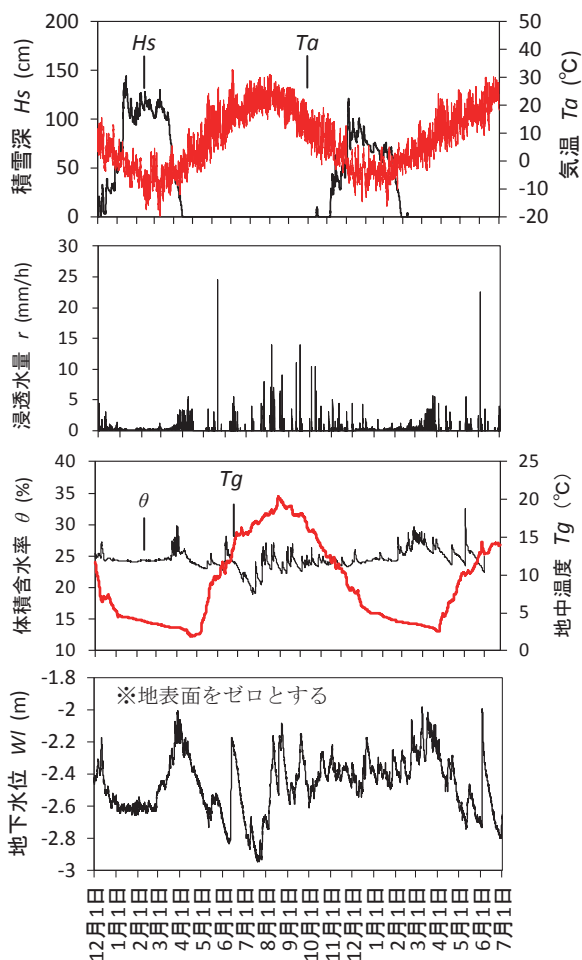


図6 盛土における現地観測結果

(積雪深, 気温, 融雪量, 体積含水率, 地中温度, 地下水位)

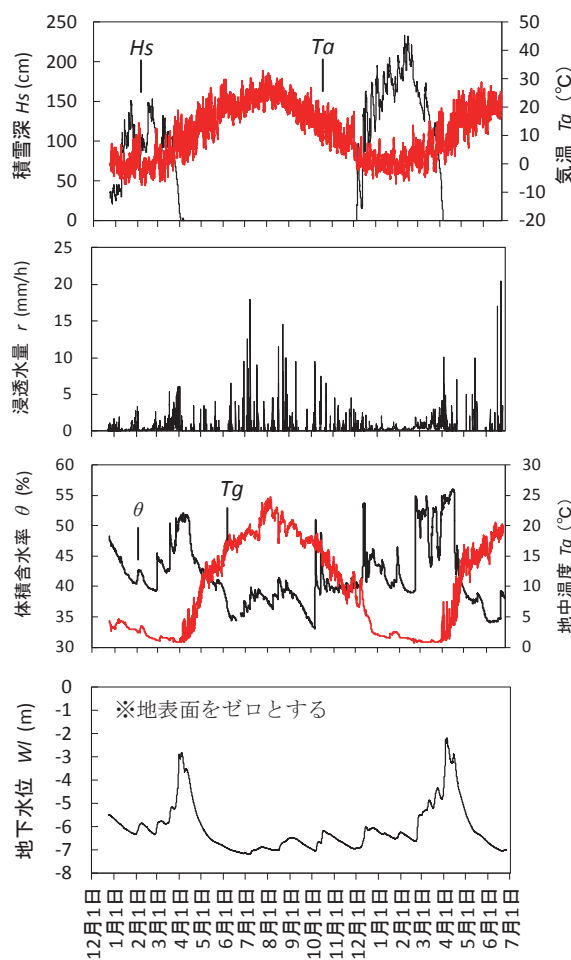


図7 切土における現地観測結果

(積雪深, 気温, 融雪量, 体積含水率, 地中温度, 地下水位)

また融雪期以外では、降水量のみを意味する。

盛土（北海道）においては計測期間の冬季において最大 100cm から 150cm 程度の積雪が観測され、切土においては最大 150cm から 200cm 程度の積雪が観測された。両観測箇所で地中温度は冬季でも 0 度を下回ることにはなかったため、凍上現象は生じていないことが分かる。

それぞれの観測地点では春先の気温上昇に伴い積雪深の低下が進んだが、その際の体積含水率および地下水位の挙動に着目すると、盛土および切土の両観測地点において体積含水率の増加および地下水位の上昇が確認される。これらの土中水分挙動のピークは消雪日の前後に一致しており、土中水分挙動と融雪現象の高い関連性が示唆される。特に切土（新潟）においては、地下水位が 1 年間を通じて融雪期末期に最も上昇しており、斜面が最も不安定化している時期と言える。この時期の浸透水量に着目すると、1 時間あたりの値としては小さいものの連続した浸透水量が地盤に対して作用していることが分かる。

これらのことから、融雪災害の発生メカニズムとして、地盤からの水分の排出可能量を上回る融雪水が継続的に供給されることで、地盤全体で保持する水分量が著しく増加し、斜面が不安定化するものと考えられる。このため、融雪期の斜面の安定性を評価するためには、融雪水の作用に対する土中水分挙動を適切に評価できる手法を開発することが重要になると言える。

4. 実効融雪量による評価手法の検討

4.1 実効融雪量の概要

現地観測結果に基づく検討により、融雪期の斜面の安定性を評価する上では、融雪水の浸透によって地盤内に貯留される水分の状態を適切に評価する手法が必要であることが明らかとなった。そこで本研究では、実効雨量指数⁴⁾（土中水分挙動を簡易なタンクモデルで表現する雨量指標の一種）を応用した斜面不安定性評価手法の開発に取り組んだ。具体的には、融雪期の斜面不安定性を評価する指標として、気象データに基づいて算出した底面流出融雪量を反映させた実効雨量（以下、実効融雪量と呼ぶ）を逐次算出し、同指標があらかじめ定められた閾値を超過した場合に、線区全体の斜面の安定性が低下していると判断する手法の有効性について検討した。実効融雪量の評価式を式 (2) に示す。

$$R_c = R_0 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} + r \quad (2)$$

T ：半減期 (h)

t ：経過時間 (h)

r ：底面流出融雪量 (mm/h)

R_c ： t 時間後の実効融雪量 (mm)

R_0 ：実効融雪量の初期値 (mm)

ここで、実効融雪量に関連する指標の一つである半減期を 24 時間とした場合の切土（新潟県）における実効融雪量の試算結果と現地の地下水位挙動を図 8 に示す。半減期とは地盤内からの水分の排出されやすさの程度を示す指標であり、値が小さいほど排出されやすい条件を意味する。図 8 の両者の関係に着目すると、実効融雪量が上昇する時期と地下水位が上昇する時期がほぼ一致していることが分かる。このように実効融雪量と地下水位の挙動は比較的高い相関性を示すことが分かる。

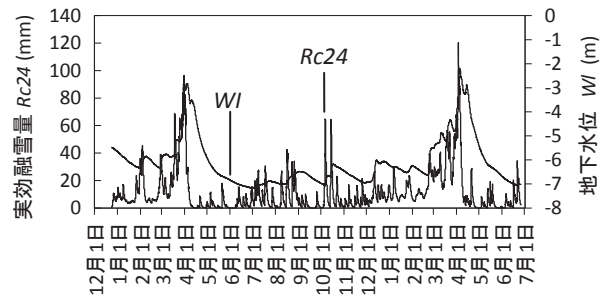


図 8 実効融雪量と地下水位挙動（切土の事例）

4.2 実効融雪量の半減期

実効融雪量による融雪期の斜面の安定性評価手法を多くの線区に適用できるように一般化する上では、実効融雪量に関連する重要な指標の一つである半減期をどのように設定するかが問題になる。そこで本研究では盛土・切土における融雪期の地下水位挙動の現地観測結果（3 章）に基づいて、本手法に採用する実効融雪量の半減期の検討を行った。具体的には「実効融雪量の半減期」と「実効融雪量と地下水位の相関係数」との関係把握するパラメータスタディを盛土（北海道）および切土（新潟県）を対象として実施し、地下水位挙動と相関性が高い半減期を採用することとした。検証結果を図 9 に整理して示す。検証の結果から、実効融雪量に用いる半減期は短期であるほど、地下水位挙動との相関性が低下する傾向が見られた。一方、盛土（北海道）では、半減期を 24 時間よりも長期に設定した場合、半減期 24 時間のケースと比較して相関係数が向上していない状況も確認された。

一連の観測結果から、盛土および切土の両方において一定の相関性（相関係数が概ね 0.5 以上）を確保するためには、実効融雪量の半減期は 24 時間程度を目安に設定するのが適切であることが分かった。

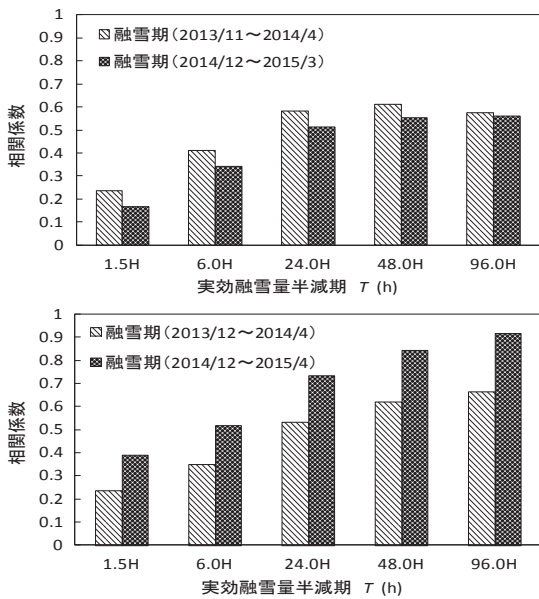


図9 実効融雪量の半減期と相関係数の関係
(上：盛土，下：切土)

4.3 実効融雪量の警戒閾値

本節では融雪期における斜面の安定性低下を判断する実効融雪量の警戒閾値の設定手法について検討した。斜面の安定性の低下は地下水位の上昇と密接な関係があるため、実効融雪量の高まりは斜面の安定性の低下を意味する。すなわち、実効融雪量が例年より高まった状況では斜面崩壊に対する警戒が必要と考えられる。そこで過去の実効融雪量の経験値を基準にした警戒閾値の設定方法を検討した。

今回は当該地域が経験した過去十年間の実効融雪量の最大値を警戒閾値として定め、近年発生した融雪災害事例(3事例)を対象として、災害発生時の実効融雪量と警戒閾値との関係を検証した。事例1は高さ9mの腹付盛土、事例2は高さ10mの河岸段丘崖末端の切土のり面、事例3は河川沿いの片切片盛の盛土部で融雪災害が発生した事例である。また実効融雪量の半減期には24時間を採用した。対象箇所の災害発生年の実効融雪量と警戒閾値の関係を図10に示す。なお、アメダスで観測している積雪深がゼロになったとしても、鉄道沿線にはまだ積雪がやや残っている場合がある。そこで安全側の判断とするため、災害発生年の実効融雪量についてはアメダスの積雪深がゼロになってから2週間後まで実効融雪量を求めた。ただし警戒閾値を定めるための過去の実効融雪量の分析については、この積雪深ゼロの後の2週間は考慮していない。

検証の結果、事例1および事例3では、実効融雪量が警戒閾値を超過していた状況で災害が発生していたことが明らかとなった。一方、事例2では閾値の直前で災害が発生していた。

このように、本手法による融雪災害の補足可能性は高いと言えるものの、実用の段階では、警戒閾値は過去の実効融雪量の最大値を基準としつつ、現場の実態に合わせて閾値をやや引き下げるなど柔軟な調整が必要である。

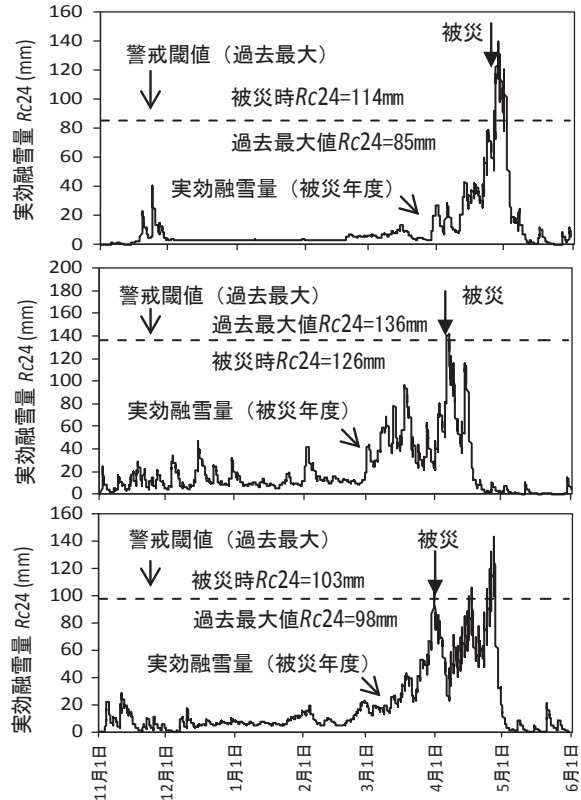


図10 融雪災害の発災日時と閾値の関係
(上：事例1，中：事例2，下：事例3)

5. まとめ

本研究では積雪地域の融雪期におけるより適切な斜面管理手法の確立を目的として、融雪量に応じた定量的な斜面の安定性評価手法の開発を行い、同手法を用いることで過去の融雪災害を補足できる可能性が高いことを示した。今後も融雪評価モデルの改良などを通じて、斜面の安定性評価手法の高精度化を図る予定である。

文献

- 1) 栗原靖, 飯倉茂弘 他; 融雪底面流出量の推定手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, 2013
- 2) 宮下優也, 高柳剛, 太田直之 他; 融雪期における盛土内水位等の挙動, 第50回地盤工学研究発表会, 2015
- 3) 高柳剛, 宮下優也, 太田直之 他; 積雪地域の切土のり面における地下水位挙動, 土木学会年次学術講演会, 2015
- 4) 島村誠; 雨, 風, 地震に対する列車運転規制方法の改良, 東京大学博士論文, 2008