

## 積雪が融雪期の斜面安定性に及ぼす影響の解析的検討

鉄道総合技術研究所 正会員 ○高柳 剛 正会員 藤原 将真 非会員 佐藤 亮太

## 1. 目的

積雪地域の鉄道では融雪期に融雪水や季節外れの降雨によって土砂災害（以下、融雪災害とする）が発生する可能性がある（写真1，写真2）。このような融雪災害の発生予測を困難にさせる要因として積雪の影響が挙げられる。積雪は荷重として作用するなど斜面安定性に影響すると想定されるが、十分に検証されていない。そこで本研究では、鉄道で発生した融雪災害事例を対象とした斜面安定解析を実施し、積雪が融雪期の斜面安定性に及ぼす影響を解析的に検討する。

## 2. 被災事例の概要

鉄道の融雪災害の事例として、降雨と融雪の作用により、高さ  $H_s$  3.3m の腹付け盛土に円弧すべりが生じた事例（事例1、写真1）、および斜面勾配  $\beta 40^\circ$  の自然斜面の表層崩壊を起因として土砂と雪の混合物が線路内に流入した事例（事例2、写真2）を挙げる。災害当時の気象情報として、

近傍のアメダスより取得される積雪深  $H_s$  と実効融雪量  $R_{c24}$ （気象データより解析される融雪量を半減期 24 時間の実効雨量に反映した値）を示す。両災害の特徴として、積雪が残る状態の斜面が融雪や降雨を受けて被災に至っている。なお事例2では表層崩壊の発生源（鉄道より標高+200m）周辺での実際の積雪深は 1.1m であった。災害発生時の両事例の積雪断面の雪質は共に「ざらめ雪」に分類され、雪の湿潤単位体積重量  $\gamma_{ts}$  は約  $0.4\text{kN/m}^3$  であった。

現地の崩壊箇所周辺の斜面の土質調査結果（事例1では再構成試料にて三軸圧縮試験[CUbar]を実施）を表1に、簡易動的コーン貫入試験の結果を図3に示す。事例1の盛土では貫入試験をのり肩で実施しており、深さ2m程度まで  $N_d$  の低い表層が分布している。事例2の自然斜面では表層土が厚さ1m前後分布している。この土質は細粒分含有率  $F_c$  の高い粘性土質礫質砂 (SCsG) であり、内部摩擦角  $\phi'$  は  $25.2^\circ$  と現地の斜面勾配  $\beta 40^\circ$  より低い値となっている。このため現地斜面では、粘着力  $c$  が表層の安定性に大きく寄与していると想定される。

## 3. 解析による検証

## 3.1 事例1（盛土）による検証

キーワード 積雪, 防災, 斜面安定, 融雪, 鉄道, 維持管理

連絡先 〒185-5840 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総研 防災技術研究部 地盤防災 TEL042-573-7263



写真1 鉄道盛土にける融雪災害事例 (事例1)

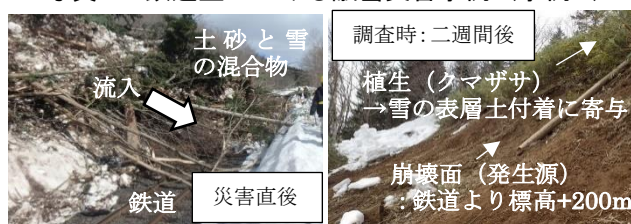


写真2 自然斜面にける融雪災害事例 (事例2)

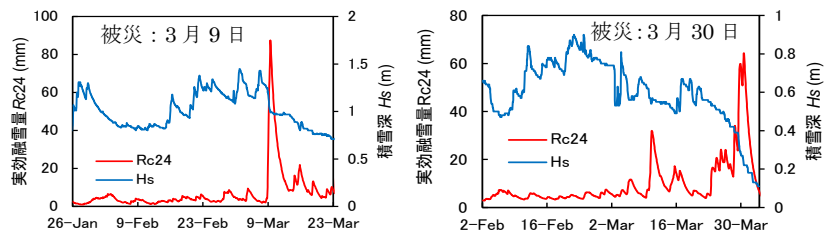
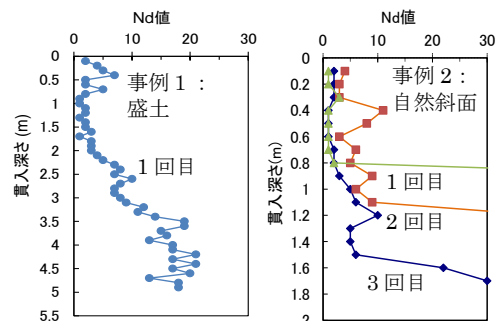


図2 災害発生時の実効融雪量と積雪深 (左: 事例1, 右: 事例2)

表1 災害事例の現地土質調査結果

	事例1: 盛土	事例2: 斜面
湿潤単位体積重量 $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.8	14.7
内部摩擦角 $\phi' [\phi] (^{\circ})$	不明	25.2 [11.6]
粘着力 $c [c] (\text{kN/m}^2)$	不明	4.8 [6.5]
平均 $N_d$ ※1m 深度	2.0	2.1
間隙比 $e$	1.42	1.33
土粒子密度 $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	2.56	2.55
平均粒径 $D_{50} (\text{mm})$	0.411	0.238
細粒分含有率 $F_c (\%)$	36.5	41.1
均等係数 $U_c$	159	134
地盤材料分類	SCsG	SCsG

図3 災害事例の  $N_d$  値の深度分布

事例1の盛土および積雪をモデル化した斜面安定解析により、積雪が盛土安定性に及ぼす影響について試算する。斜面安定解析におけるすべり面の形状には「円弧」、安定性評価には「修正フェレニウス法」を採用する。盛土形状の概要を図4に示す。同形状は事例1の現地条件を反映したものであり、解析に要するパラメータは表2の通りである。ただし同盛土のせん断強度は不明のため、今回は現地の地盤材料分類に基づき、鉄道的设计標準に記述される「土質4」の地盤条件を設定している。地下水面は現地のり面の湧水位置に基づいて設定した。また、積雪に透水性の高いざらめ雪を対象とするため、積雪内には水位を設定しない。ざらめ雪のパラメータは雪供試体による一面せん断試験結果より設定した。

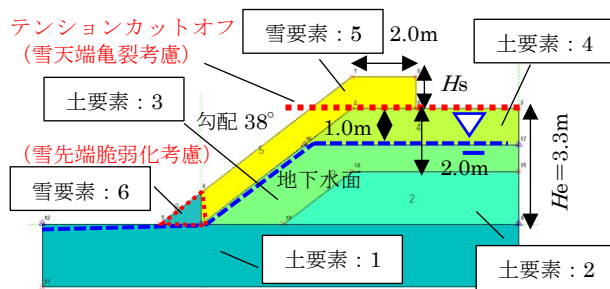


図4 盛土(事例1)の斜面安定解析モデル

表2 盛土(事例1)の斜面安定解析パラメータ

要素番号	土質区分 (要素1~4は鉄道设计標準準拠)	飽和単位 体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	湿潤単位 体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部 摩擦角 (°)
1	土質1(深部)(Sr=100)	20.0	20.0	0.00	45.0
2	土質4(深部)(Sr=100)	16.0	16.0	10.00	25.0
3	土質4(表層部)(Sr=100)	16.0	16.0	5.00	20.0
4	土質4(表層部)(80≤Sr<100)	16.0	15.0	5.00	20.0
5	雪(ざらめ雪)	10.0	4.0	5.20	26.8
6	雪(ざらめ雪・融解)	10.0	4.0	0.00	26.8

上記のモデルで主に積雪深 $H_s$ などの積雪に関する条件を変化させて複数ケースの解析を行った。特に積雪はのり先が湧水等により融解して脆弱化する、また積雪に亀裂が生じて脆弱化する場合は想定されたため、脆弱条件(粘着力ゼロ)を反映した解析を併せて実施した。図5に解析結果を示す。同結果より、盛土上の積雪は荷重要因となるものの、積雪自体が一定のせん断強度を発揮するため、積雪深 $H_s$ が高いほど盛土の安全率 $F_s$ は増加する事が分かる。一方で、上記の積雪の脆弱条件が反映される場合には、積雪を伴う盛土の安全率 $F_s$ は著しく低下する。

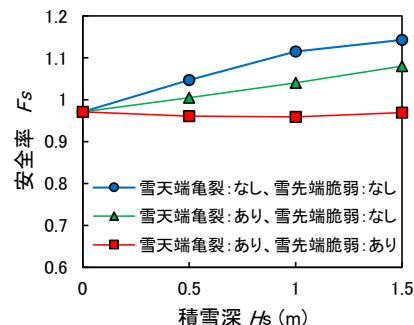


図5 盛土(事例1)における積雪深と安全率の関係

### 3. 2 事例2(自然斜面)による検証

事例2の自然斜面を対象とした解析では、表層崩壊の全長が26mと長大なため、無限長地盤の斜面安定解析(図6)により積雪の影響を検証する。同解析には表1の事例2のパラメータを採用している。被災当時の地下水面の位置 $H_w$ は不明であるため、今回は仮に表層土の厚さ $D$ の1/2まで上昇していたと設定する。ざらめ雪の重量は事例1と同様である。図7に、現地の表層土の厚さを踏まえて表層厚 $D=0.5m, 1.0m$ と設定した場合の、積雪深 $H_s$ ・斜面勾配 $\beta$ ・安全率 $F_s$ の関係性を示す。図7より、事例2の条件では、積雪深 $H_s$ が高いほど斜面の安全率 $F_s$ は低下する関係が確認され同災害に積雪荷重が関係していたと判断される。本解析より、粘性土質で急勾配の表層の薄い自然斜面では、積雪が表層に付着する場合、斜面安定性に不利に影響する可能性が想定される。

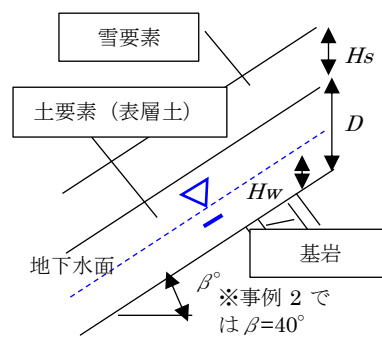


図6 事前斜面(事例2)の斜面安定解析モデル

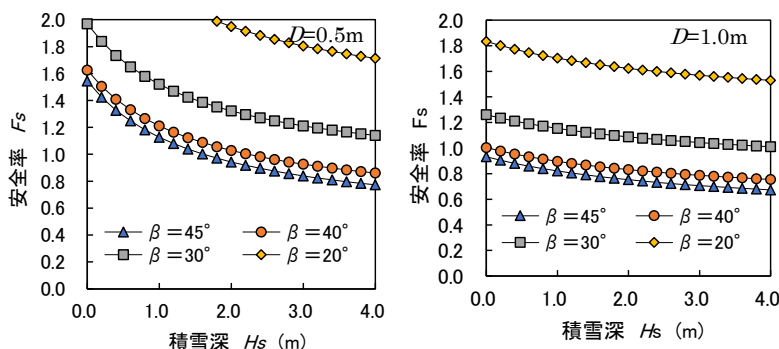


図7 自然斜面(事例2)における積雪深と安全率の関係

### 4. 結論

積雪は特定の条件により斜面安定性に不利に影響する場合があるため、防災の実務の観点からは、積雪条件では運転規制の閾値を引き下げるなどの安全側の措置を検討する事が望ましい判断される。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等背系標準・同解説(土構造物)，丸善株式会社，p.386，2012