

積雪が降雨・融雪時の盛土安定性に与える影響

高柳 剛* 藤原 将真* 佐藤 亮太**

Effect of Snow Cover on Embankment Stability during Rainfall and Snowmelt

Tsuyoshi TAKAYANAGI Shoma FUJIWARA Ryota SATO

In this study, the effect of snow cover on slope stability was examined to evaluate the risk of snowmelt disasters more accurately. At first, strength characteristics of snow were obtained through laboratory tests. In addition to the laboratory tests, precipitation experiments were conducted on a snow-covered embankment model to observe the moisture response and deformation of the embankment. Furthermore, slope stability analysis using finite element method were conducted on the snow-covered embankment model. As a result, it was confirmed that restriction of the surface layer of embankment could slightly improve the effect of snow cover on the slope stability.

キーワード：融雪，積雪，土砂災害，維持管理，斜面安定解析

1. はじめに

北海道や本州の日本海側などの積雪地帯の鉄道沿線の地盤斜面（ここで、盛土のり面、切土のり面、自然斜面を包括して地盤斜面と呼ぶ）では、融雪水の浸透を誘因とした土砂災害が発生し、列車の運転に影響を生じた事例^{例えは2)}が報告されている。ここでは積雪期に地震動の外力によらず融雪または降雨の作用を誘因として生じる土砂災害を「融雪災害」と定義する。融雪水は積雪の融解によって発生し、降雨と同様に地盤へ浸透して地盤の高含水化に寄与するため、積雪は基本的には長雨の様に作用する融雪の発生源として斜面安定に不利な誘因をもたらす存在となる。この様な融雪災害に列車が巻き込まれるリスクを低減する必要性から、これまで筆者らは融雪災害の警戒基準の開発を目指して、気温等の気象情報から1時間ごとに融雪量を逐次解析評価し、降雨量に融雪量を加算した指標を用いて融雪災害が発生しやすい時期を定量的に評価する新しい警戒基準を検討してきた³⁾。一方で、この様な新しい警戒基準であっても過去の融雪災害事例の発生を適切に予知することが困難な場合がある。本研究では、その原因の一つとして地盤斜面上の積雪の影響に着目した。ここで、本研究では積雪が残存する地盤斜面と積雪の総体を「積雪斜面」と呼ぶ。融雪災害が発生する場合、図1の様に斜面上に積雪が残存する場合が多い。積雪は氷の結晶から、地盤は鉱物からなる不定形な粒状の堆積物であり、それぞれが重量、透水特性、強度特性、変形特性を有する物体である以上、融雪や降雨が積雪斜面に作用する場合に、積雪の有無は



図1 積雪斜面（盛土）における崩壊事例¹⁾

透水問題や応力変形問題などに関連して地盤斜面の安定性に何らかの影響を及ぼすものと想定される。筆者らは、積雪環境で急激な融雪や季節外れの降雨が作用した場合に、積雪が水路の通水を阻害して溢水する、あるいは積雪荷重の影響が疑われる崩壊が鉄道で確認された経験を踏まえて⁴⁾、融雪災害において深い積雪は総合的に不安定要因になると見なして、融雪量を指標とした警戒基準を積雪深に応じて引き下げる補正方法⁵⁾を検討してきた。一方、より合理的に積雪深に応じた警戒基準の補正法を構築するためには、経験のみならず積雪が地盤斜面の安定性に及ぼす影響を詳細に検証できる手段が求められる。なお本論文は、文献1の一部を再構成したものである。

2. 研究目的と内容

本研究の目的は、積雪斜面に融雪や降雨が作用する状態の地盤斜面において、積雪が斜面安定性に及ぼす力学的な影響を検証することである。なお本研究では積雪下の地盤斜面として盛土を設定する。本研究では、上記の検証に必要な雪の力学特性に関する情報を収集する観点から、室内試験として雪供試体を用いた定圧一面せん断

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

** 防災技術研究部 気象防災研究室

試験を行う。さらに積雪斜面の模型に対する散水模型実験を実施して盛土の挙動を観察し、これを踏まえて斜面安定解析により積雪斜面の安定性を評価する。

3. 積雪と地盤のせん断強度の把握

本章では積雪斜面の安定性評価に必要となる雪、地盤および両者の境界部の強度定数の取得などを目的として、地盤工学分野で利用されている現場用一面せん断試験機を利用して、様々な条件の雪や地盤の供試体を対象として定圧一面せん断試験（図2、図3）を実施した結果を報告する。ここで、実験ケースの条件は表1に整理して示す。一面せん断試験の供試体の条件設定の狙いとしては「雪の含水状態」、「雪質」、「不攪乱試料と再構成試料」、「せん断速度」、「雪・地盤境界」などの条件が強度定数に与える影響を把握する点にある。

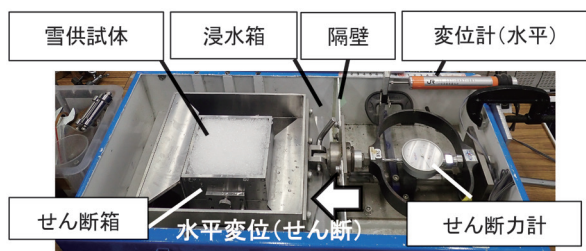


図2 定圧一面せん断試験の準備状況

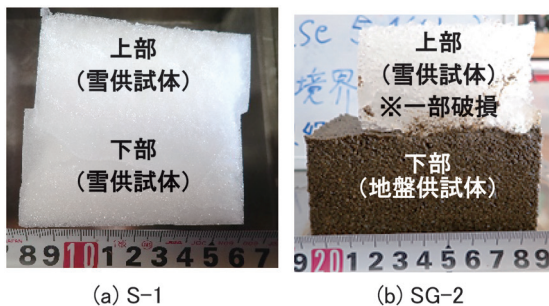


図3 定圧一面せん断試験後の供試体の例

一面せん断試験には、株式会社マルイ製の現場一面せん断試験機「LST」に、データ収録可能な水平変位計およびせん断力計を設置し（図2）、融雪を抑制する目的で低温室（室温2℃）にて試験した。同試験機は直方体状のせん断箱（断面積100mm×100mm、高さ50mm、上下2箱重ね合わせ）を備えている。

雪供試体の準備として、塩沢実験所の屋外の積雪を材料として採取している。積雪材料の採取に先んじて、積雪の断面観測を行い、積雪の10cm高さ毎にサンプリングを行い、雪質、雪の湿潤密度 ρ_{st} を確認し、さらに同じ高さの積雪断面で誘電式含水率計により雪の重量含水率 θ_m を、プッシュゲージにより硬度 $PR^{(6)}$ を計測している。「不攪乱」の雪供試体を採取する場合には、上記の積雪の断面観測の結果に基づき適切な積雪層を選定し、対象となる積雪にせん断箱（事前に雪中で冷却）を押し込んでサンプリングした上で整形している。「再構成試料」を利用する場合には、同一の積雪層から攪乱材料を収集し、せん断箱内に投入された雪試料に対して静的に締め固めて所定の密度に構築した。また「雪・地盤境界部」のせん断強度を把握する実験ケースでは、下部せん断箱に地盤を締め固め、上部せん断箱に雪の不攪乱試料を配置した。なお地盤材料には「稲城砂」を適用する。雪の含水率を変化させるケースでは、積雪試料に対して予め加水を行っている。

定圧一面せん断試験の基本的な手順としては、試験機内に雪供試体を設置し、飽和ケースの場合には浸水箱を冷却水で満たして供試体を飽和させ、供試体上部に載荷板を配置し、その上から錘により垂直応力 σ （積雪深2m程度以下の垂直応力条件を想定して0.6kPa、5.5kPa、10.4kPaの3パターンを設定）を定圧で作用させた。なお稲城砂については、地盤では積雪荷重を受ける点を考慮して垂直応力条件を一部変更した。せん断においては手動で試験機のジャッキを一定の回転速度で動作させ、せん断箱（下位）に水平変位 D を与えた。これにより、供試体をせん断破壊させ、水平変位 D とせん断応力 τ の関係を把握した。試験後の供試体の状況の例を図3に示

表1 定圧一面せん断試験の条件および試験結果

実験ケース	雪供試体							地盤供試体			試験条件		試験結果		図5との対応関係		
	初期湿潤密度 ρ_{st} (g/cm ³)	初期乾燥密度 ρ_{sd} (g/cm ³)	初期重量含水率 θ_m (%)	飽和後重量含水率 θ_{msat} (%)	最大載荷沈下量 δ_{max} (mm)	試料構成	雪質	粒径 (mm)	硬度 PR (kPa) ※不飽和	初期湿潤密度 ρ_{st} (g/cm ³)	初期乾燥密度 ρ_{sd} (g/cm ³)	含水比 w (%)	供試体	せん断速度 vs (%/min)		内部摩擦角 ϕ_d (°)	粘着力 c_d (kPa)
S-1	0.536	0.471	12.1	-	2.8	不攪乱	しまり雪	0.2~0.5	109.4	-	-	-	雪単体	不飽和	1.7	46.7	17.8
S-2	0.463	0.394	14.9	-	8.3	不攪乱	ざらめ雪	1~2	26.2	-	-	-	雪単体	不飽和	1.7	38.5	7.5
S-3	0.563	0.394	30.0	-	8.3	不攪乱	ざらめ雪	1~2	-	-	-	-	雪単体	不飽和	1.7	37.1	7.6
S-4	0.463	0.394	14.9	59.2	15.7	不攪乱	ざらめ雪	1~2	-	-	-	-	雪単体	飽和	1.7	50.7	4.5
S-5	0.511	0.444	13.2	-	7.8	再構成	ざらめ雪	2~5	13.9	-	-	-	雪単体	不飽和	11.1	37.4	5.8
S-6	0.510	0.443	13.2	-	12.5	再構成	ざらめ雪	2~5	17.5	-	-	-	雪単体	不飽和	1.7	25.2	5.5
S-7	0.510	0.443	13.2	53.9	9.6	再構成	ざらめ雪	2~5	-	-	-	-	雪単体	飽和	11.1	47.5	6.8
S-8	0.510	0.443	13.2	53.9	12.0	再構成	ざらめ雪	2~5	-	-	-	-	雪単体	飽和	1.7	50.9	1.7
SG-1	0.463	0.394	14.9	-	5.2	不攪乱	ざらめ雪	1~2	-	1.47	1.41	3.98	雪・土境界	不飽和	1.7	41.4	1.1
SG-2	0.463	0.394	14.9	59.2	7.9	不攪乱	ざらめ雪	1~2	-	1.47	1.41	3.98	雪・土境界	飽和	1.7	47.0	1.6
G-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.51	1.41	5.30	地盤単体	不飽和	1.7	38.3	4.3

す。なお、本研究ではせん断応力 τ については、せん断力 T をせん断箱の断面積 A で除することで算出している。定圧一面せん断試験については、同一条件の供試体で異なる垂直応力 σ （3パターン）ごとに1回ずつ試験し、垂直応力 σ と最大せん断応力 τ_{max} の関係を整理し、内部摩擦角 ϕ_d および粘着力 c_d を把握した。各実験ケースの内部摩擦角 ϕ_d および粘着力 c_d の値は表1に整理して示される。

ここで、雪と地盤の特性の比較の観点で、ざらめ雪（実験ケース S-2）と稲城砂（実験ケース G-1）について、異なる垂直応力 σ （3パターン）ごとに1回ずつ試験した場合の水平変位 D とせん断応力 τ の関係を図4に示す。稲城砂（実験ケース G-1）は締固め度 D_c 84%（最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.68\text{g/cm}^3$ はJGS0711のA-c法による）として、古い年代の既設盛土を想定して現在の鉄道盛土の設計値（ D_c 90%以上、性能ランクⅢ）⁷⁾よりやや低い値としている。この稲城砂は比較的密詰めに構築された供試体であり、せん断応力は垂直応力に関わらず水平変位4mm程度（水平ひずみ4%程度）でピーク値を示し、その後は水平変位 D の増加とともにせん断応力 τ はピークアウトする。一方で、ざらめ雪（実験ケース S-2）は水平変位 D とともに緩やかにせん断応力 τ が増大し、垂直応力によらず概ね水平変位10mm（水平ひずみ10%）の比較的大変形の領域に至っても、せん断応力の明瞭なピークを判断し難い点が特徴である。これは積雪では氷粒子間の圧力が増加する場合に生じる焼結作用が原因と想定される。また高いせん断応力は比較的大変形領域で生じるため、明確なピークの判断が困難な場合にはJGS 0561-2020 定圧一面せん断試験の規格⁸⁾の試験終了の水平ひずみ12%を超える水平ひずみ15%に達した時点で最大せん断応力 τ_{max} に達したとみなした。

ここで、本研究で実施した定圧一面せん断試験のうち、代表的な最大せん断応力 τ_{max} ～垂直応力 σ 関係を図5に示す。なお図中の凡例は表1に対応する。ざらめ雪の含水状態がせん断強度に及ぼす影響の検証として、ざらめ雪で含水率の異なるS-2、S-3とS-4の3ケースを比較すると、S-4では低い垂直応力条件で最大せん断応力 τ_{max} の低下がみられるものの、その他の垂直応力条件では各ケースでほぼ同様の最大せん断応力 τ_{max} が発揮されている。これより融雪期後期の積雪で多く観測されるざらめ雪について、飽和状態かつ低拘束圧条件を除けば含水状態による強度変化は大きくないものと評価される。

次に不飽和状態のざらめ雪、稲城砂および雪・土境界で発揮されるせん断強度を比較する観点で、S-2、G-1、SG-1の事例を確認する。特徴として、ざらめ雪（S-2）は稲城砂（G-1）より高い最大せん断強度を発揮し得ることが確認される。一方で、雪・土境界（SG-1）のせん断強度が最も低い結果となっている。このため、例え

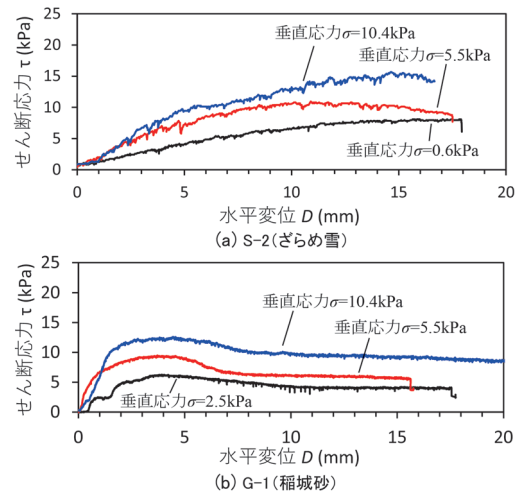


図4 せん断応力 τ ～水平変位 D 関係

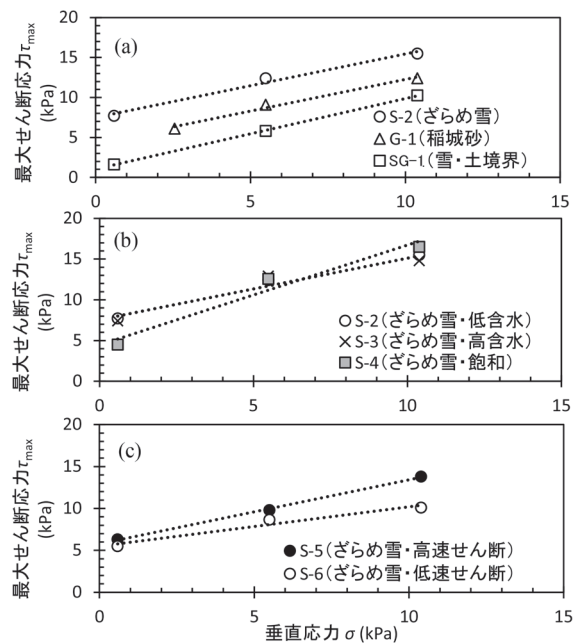


図5 最大せん断応力 τ_{max} ～垂直応力 σ 関係

ば地表面上に植生など積雪と地盤の付着を高める要素が存在しない場合には、雪・土境界が最もせん断強度に乏しい理由から雪崩の破壊モードが選択され、雪と地盤の付着が高い場合には地盤が最弱となり融雪災害のモードが選択される可能性などが想定される。

次に積雪強度のせん断速度依存性について、S-5とS-6の比較を通じて検証する。本研究の実験条件の範囲では、せん断速度が遅いケースでせん断強度が明瞭に向上する様な状況は確認されず、明確な速度依存性は確認されなかった。また表1のS-1とS-2の内部摩擦角 ϕ_d および粘着力 c_d の比較により、雪質がせん断強度に及ぼす影響を確認すると、本研究ではしまり雪の方がざらめ雪より高い強度を発揮することが確認される。このことから、雪質の変化は積雪の強度の変化の大きな要因にな

ることが確認される。

不攪乱試料と再構成試料の比較の観点から、S-2とS-6を比較すると、再構成試料(S-6)の方が、やや垂直応力に対する最大せん断応力が低くなる結果が得られている。原位置の不攪乱試料の方が、凍結等による氷粒子間の固結を生じていることが理由の一つとして想定される。これは硬度PRの観点からも確認されている(表1)。

以上、本章では定圧一面せん断試験により積雪の基本的な強度定数を取得した結果を報告した。これより、積雪はざらめ雪であっても、盛土表層に相当するような砂地盤より高い最大せん断応力 τ_{max} を発揮し得ることを確認した。

4. 積雪斜面を対象とした散水模型実験

4.1 実験概要

本章では積雪斜面の不安定化メカニズムを把握する観点から、積雪斜面(盛土)に一定の降雨が作用する状態を模擬した模型散水実験を実施した結果を報告する。主には積雪斜面の変形に着目するが、併せて散水時の盛土内水分挙動について計測結果を比較した結果も参考までに報告する。

4.2 実験方法

本散水模型実験の積雪斜面(積雪深 $H_s=0.25m$ の実験ケース)の模型の幾何学寸法およびセンサー類の配置

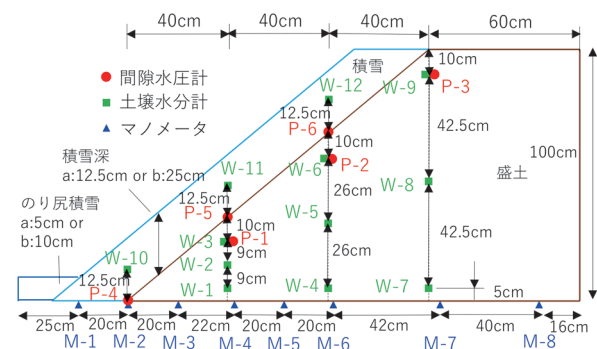


図6 散水模型実験の寸法およびセンサー位置

条件を図6に示す。実験ケースの条件(積雪条件, 地盤条件, 散水条件)を表2に整理して示す。各実験ケースの主な違いは、盛土上の積雪深($H_s=0m, 0.125m, 0.25m$)である。比較の観点から、積雪を伴わない実験条件(積雪深 $H_s=0m$)も含まれており、この場合には図6の実験条件から積雪および積雪内に配置されるセンサー類が除かれる。

今回の散水模型実験(図7)では盛土を合計2回構築している。Case1-1は主に積雪なしの盛土の散水時の土中水分挙動の観察を目的に実施し、のり尻に変状が生じた段階で散水を中断した。さらに同盛土の変状箇所を補修して再利用し、Case1-2では積雪ありの盛土の土中水分挙動と変状発生との関係を観察した。Case2-1はCase1-1と比較する目的で、積雪ありの盛土の散水時の土中水分挙動の観察を目的に実施した。さらにCase2-2で同盛土を再利用し、積雪なしの盛土の変状と土中水分挙動を観察した。またCase2-1では盛土が崩壊に至る前に散水を中断したため、Case2-3では盛土の明確な崩壊を目指して連続的に散水させたものの積雪の影響により明瞭な崩壊に至らなかったために、Case2-4としてさらに積雪を薄くした上で再度散水実験を実施した。

盛土の構築方法について説明する。盛土の地盤材料である「稲城砂」の物理特性を表3に示す(締固め試験はJGS0711のA-c法による)。この地盤材料を加水調整した上で剛土槽内に投入し、締固め度 D_r 84%程度に相当する乾燥密度を目標として均一に締固めて地盤を構築した。その後、同地盤を高さ1m, 斜面勾配1:1.2の形

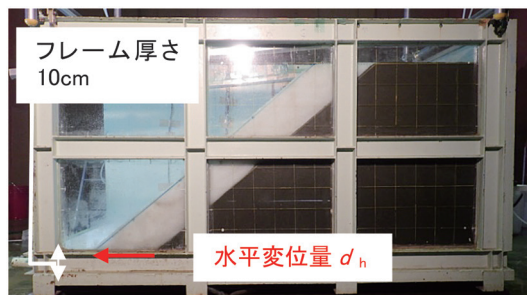


図7 模型構築状況(Case2-1・画像左右反転)

表2 散水模型実験条件

実験ケース	着目する現象	積雪条件					地盤条件					散水条件		
		積雪深 H_s (m)	初期湿潤密度 ρ_{st} (g/cm^3)	初期乾燥密度 ρ_{sd} (g/cm^3)	初期体積含水率 θ (%)	飽和透水係数 k_{sat} (m/s)	盛土準備方法	初期湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	初期乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	初期含水比 w (%)	初期体積含水率 θ (%)		初期飽和度 Sr (%)	飽和透水係数 k_{sat} (m/s)
Case1-1	水分挙動	0	—	—	—	—	新規構築	1.62	1.41	14.9	21.0	43.62	5.7×10^{-5}	27
Case1-2	変状	0.25	0.51	0.445	6.5	1.99×10^{-3}	再利用	—	—	—	—	—	5.7×10^{-5}	27
Case2-1	水分挙動	0.25	0.42	0.371	4.9	1.99×10^{-3}	新規構築	1.66	1.43	16.4	23.5	49.45	3.9×10^{-5}	27
Case2-2	変状	0	—	—	—	—	再利用	—	—	—	—	—	3.9×10^{-5}	27
Case2-3	変状	0.25	0.51	0.441	6.9	1.99×10^{-3}	再利用	—	—	—	—	—	3.9×10^{-5}	27
Case2-4	変状	0.125	0.51	0.432	7.8	1.99×10^{-3}	再利用	—	—	—	—	—	3.9×10^{-5}	27

状の盛土に整形した（奥行き1m）。なお斜面勾配は安定性が低い既設盛土を想定して、現在の鉄道盛土の設計値（1:1.5、性能ランクⅢ、高さ9m未満）⁷⁾より急勾配な条件としている。なお、この稲城砂による地盤の強度特性は三軸圧縮試験（CD試験）より内部摩擦角 $\phi_d=35.0^\circ$ 、粘着力 $c_d=6.3\text{kPa}$ が得られている。積雪の構築方法については、塩沢実験所の屋外で採取した雪試料（ざらめ雪：粒径2~5mm）を1cm網目のふるいを通して空中落下（平均落下高さ約0.5m）で盛土上に散布した後に、所定の積雪深に整形した。散水実験では、上記の各実験ケースの積雪斜面（盛土）に室内環境下（4~10℃）で融雪期の季節外れの降雨を想定して、27mm/h相当の散水を連続で与えた。なお散水については、散水の熱による積雪の融解を低減する目的で、供給水を簡易な急速冷却器を通過させることで4℃まで低下させている。散水模型実験中の主な計測項目は、土槽底部のマノメータによる圧力水頭 h_w 、間隙水圧 p_w 、土壌水分計による体積含水率 θ である。ただし間隙水圧 p_w は参考情報として取得しており本報告では測定結果は示さない。また、斜面変形を定点撮影による土槽側面写真から観測した。

4.3 実験結果

積雪斜面における浸透現象の実態として、積雪あり（積雪深 $H_s=0.25\text{m}$ ）のCase2-1における水分挙動を報告する。具体的には、Case2-1の散水開始から342minまでの散水期間のうち4段階の体積含水率 θ の空間分布（コンター図）とマノメータ水頭 h_w 分布を図8に示す。さらに比較の観点から、積雪なしのCase1-1の散水開始から342min時点の結果を図9に示す。図8(d)と図9の比較より、本実験条件では積雪の有無はマノメータ水頭には大きな影響を与えていない結果となっている。なお図9のマノメータM-3には気泡混入による計測誤差が生じた可能性があり、解釈に留意されたい。本実験条件で積雪が盛土への透水現象に与える影響が限定的であった理由として、本実験で採用した積雪の雪質が粒径の粗いざらめ雪（粒径2~5mm）であり透水性が高いこと、また積雪深も0.25mと低い点を挙げる。一方、自然界には「しまり雪」（粒径0.5mm程度）など粒径がより細かく透水性の低い雪質も存在し、このような雪質の層が介在する積雪においては、積雪表面に供給される雨水や融雪水が積雪内を浸透して地表に到達するまでに一定の時間を要する場合がある点には留意が必要である。この様な、積雪深、雪質、融雪の影響が盛土内土中水分挙動に与える総合的な影響を検証するためには、積雪斜面をモデル化した浸透流解析によるさらなる検討が望まれる。

続いて、積雪斜面の変形問題について考察する。図10に盛土のり面（表面）の高さ10cm位置の水平変位

表3 稲城砂の物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	平均粒径 D_{50} (mm)	細粒分含有率 F_c (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 w_{opt} (%)
2.72	0.17	14.90	1.68	14.6

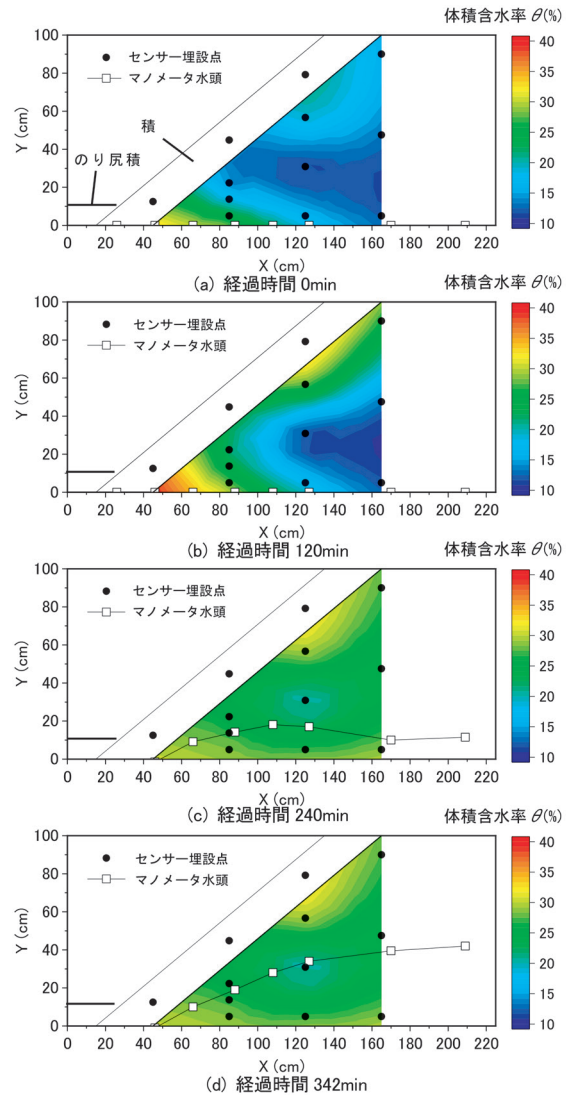


図8 体積含水率分布とマノメータ水頭分布 (Case2-1)

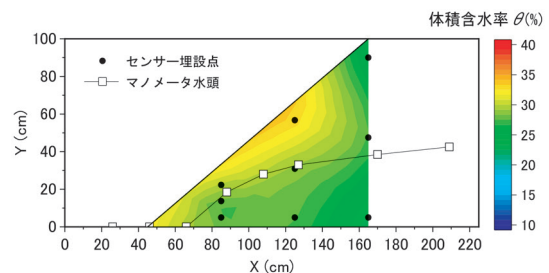


図9 体積含水率分布とマノメータ水頭分布 (Case1-1, 経過時間 342min)

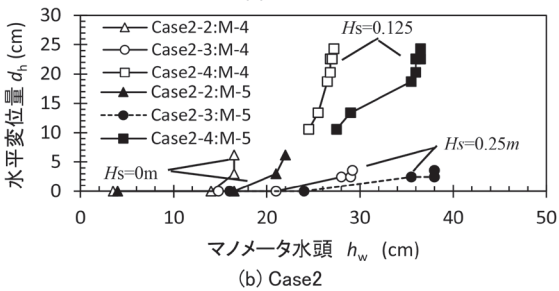
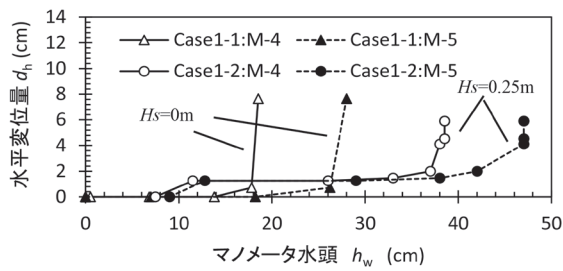
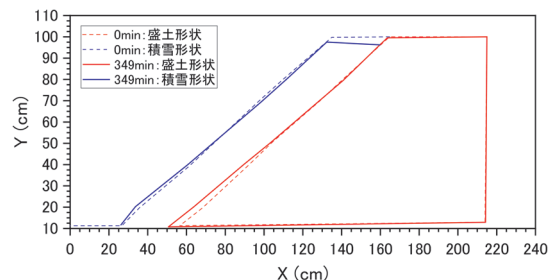


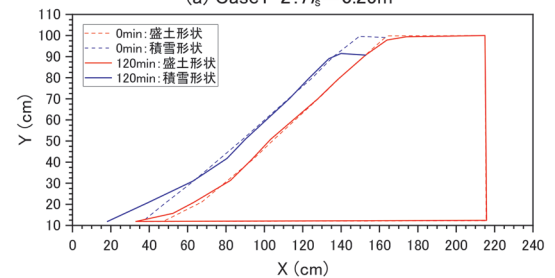
図 10 マノメータ水頭 (M4, M5) と水平変位量関係
※のり高 10cm 位置のり面の水平変位量

量 d_h (図 7) とマノメータ水頭 h_w の関係を示す。水平変位量 d_h は模型実験の側面写真を分析して取得した。なおマノメータ水頭 h_w は盛土のり尻の M-4 と M-5 を代表値として採用している。これらの結果より、積雪ありのケースは積雪なしのケースと比べて、マノメータ水頭 h_w が大きく増加した場合に生じる盛土の水平変位量 d_h の進行が積雪の影響によって抑制されていると理解できる。

積雪深さの異なる積雪斜面の変形モードの違いを把握する観点で、図 11 に Case1-2 (積雪深 $H_s=0.25m$) と Case2-4 (積雪深 $H_s=0.125m$) を対象として、散水の結果として生じる盛土模型の形状の変化を示している。積雪が厚い Case1-2 では積雪がもたれ壁に類似する拘束効果を発揮し、盛土のり尻の浅いすべりによる土圧を受けて積雪背面に圧縮の体積変化が生じているものの、積雪表面に生じる変位は小さい。一方で積雪が薄い Case2-4 では積雪のり先が大きく変形し、盛土のり尻のすべりの進行に引きずられて積雪全体が滑動した。散水を停止した後に確認された盛土の変状写真を図 12 に示し、図 10, 図 11 を踏まえて積雪が盛土変状に及ぼす影響を考察する。積雪なしの Case1-1 と Case2-2 では、共にのり尻先端からのり長 45cm の位置で水平亀裂が生じている。この亀裂は発生確認時点で進行性が確認されたもので、散水を停止しない場合には盛土のすべり破壊に至っていたと評価される。一方で、厚い積雪で盛土のり面が拘束された Case1-2 と Case2-3 では、上記の積雪なしのケースと比べてマノメータ水頭 h_w がより高い条件でも、実験中には明らかな進行性を伴う変形が目視では確認されず、明瞭なすべり破壊には至っていないものと評価さ



(a) Case1-2: $H_s=0.25m$



(b) Case2-4: $H_s=0.125m$

図 11 積雪盛土模型の形状の変化

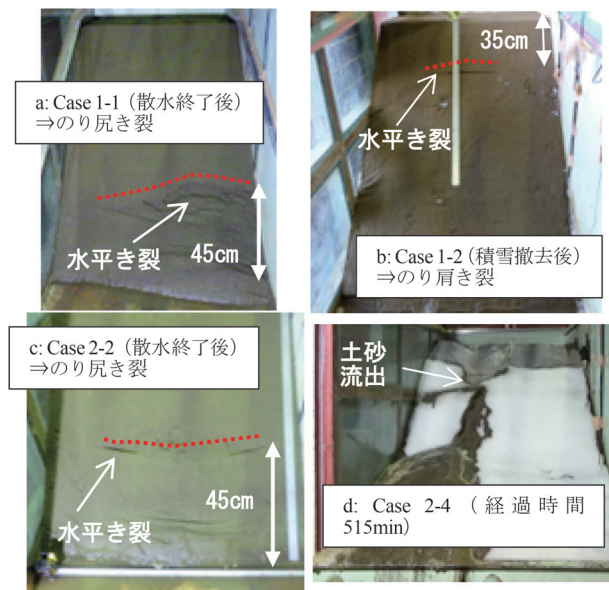


図 12 のり面の変状形態 (正面より)

れる。しかし Case1-2 で散水後に積雪を撤去すると、のり肩からのり面下方向に 35cm の位置に変状として水平亀裂が確認された。これは、Case1-2 では積雪の拘束の影響を受けるため、砂地盤で生じる浅い局所的な変形が進行せず、またざらめ雪は稲城砂と比べて高い粘着力 c を有するため、積雪斜面全体で見た目上の粘着力が上がり、より深い円弧すべりのモードが選択された可能性を考える。積雪が薄い Case2-4 ではのり尻の変状が進み、最終的に融雪の影響で積雪が極端に薄くなった箇所 (のり中腹) から侵食を受けた土砂が流出したが、図 1 の様な積雪と地盤が共に破壊する明瞭なすべり破壊は生じなかった。これらの状況から、積雪は盛土表層の小規模な

すべりや高含水化により泥濘化した土砂の流動をある程度拘束する効果が認められる。

5. 積雪斜面の斜面安定解析

本章では有限要素法解析ソフトウェア PLAXIS 2D を用いて、積雪斜面の応力変形解析およびせん断応力低減法による斜面安定解析を実施し、これにより積雪斜面の安定性を検証した結果を報告する。

解析モデルの幾何学形状、要素（メッシュ）形状、要素の材料条件および境界条件は模型実験を参考とし、図 13 に示す条件とした。さらに要素試験（保水性試験、定圧一面せん断試験、三軸圧縮試験（CD 試験）¹⁾）から求められた積雪斜面の解析パラメータを表 4 に、斜面安定解析の条件を表 5 に示す。斜面安定解析においては、基本的には散水模型実験の条件を再現しつつ、盛土材料の稲城砂の粘着力 c （内部摩擦角 ϕ をはじめその他のパラメータは固定）と盛土内水位（今回は M-4 位置の水頭 h_w を盛土内水位のベンチマークとする）を変化させた場合の、斜面変形モードおよび斜面安全率 F_s の変化を確認する。

解析手順としては、PLAXIS 2D は応力変形解析と定常解析の飽和不飽和浸透流解析であれば連成可能であるため、まず盛土地表全面に降雨が作用する定常浸透流解析について雨量条件を試行錯誤的に変化させて実施し、表 5 の M-4 水頭 h_w （4 パターン）が得られる盛土内の静水圧分布（盛土内水位）を再現する。これより得られる 4 パターンの静水圧分布の情報を応力変形解析に引き継ぎ、4 パターンの定常間隙水圧分布の条件における地盤内応力を算出する。これらの応力および静水圧分布の情報を引き継いでせん断強度低減法により斜面安全率 F_s を評価する（応力変形解析の段階で計算が収束せずに終局状態に至った場合には、せん断強度低減法による斜面安定解析は実施しない）。また雪の強度パラメータについて、今回はざらめ雪を採用する。稲城砂について、三軸圧縮試験（CD 試験）で粘着力 c は 6.3kPa が得られているものの、この粘着力 c では小型模型実験でのり尻に亀裂が生じた盛土内水位条件で斜面安全率 F_s は 1.0 を下回らず、一方で粘着力 $c=0.2\text{kPa}$ の条件で F_s は 1.0 を下回った。この誤差の原因の一つとして、稲城砂の三軸圧縮試験の拘束圧条件は 5kPa~20kPa で実施している一方、小型盛土模型表層ではより拘束圧が低く、この低拘束領域では粘着力 c はより低かった可能性を想定する。ここで稲城砂の粘着力の実態は $c=0.2\text{kPa}$ であると仮定して、図 14 に粘着力 $c=0.2\text{kPa}$ の条件における安定解析 A（積雪なし、M-4 水頭 $h_w=0.27\text{m}$ ）と安定解析 B（積雪あり、M-4 水頭 $h_w=0.27\text{m}$ ）の条件における終局状態の崩壊モードを変位増分 ΔU より示す。なお、前

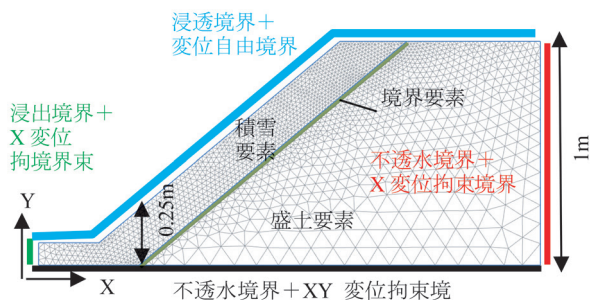


図 13 斜面安定解析の要素条件・境界条件

表 4 解析パラメータ

	材料種別	稲城砂	ざらめ雪	境界要素
基本	材料モデル	Mohr-Coulomb		
	排水モデル (or 非排水モデル)	排水モデル (過剰間隙水圧なし)		
重量	湿潤単位体積重量 γ_{unsat} kN/m ³	16.2	4.2	4.2
	飽和単位体積重量 γ_{sat} kN/m ³	18.9	9.7	9.7
変形	弾性係数 E kN/m ²	6166	400	400
	ポアソン比 ν	0.35	0.1	0.1
	せん断剛性 G kN/m ²	2284	181.8	181.8
	ダイレイタンス角 ψ °	5.0	0	0
強度	粘着力 c kN/m ²	0~6	9.1	1.6
	引張強度 c_t kN/m ²	0	0	0
	内部摩擦角 ϕ °	35.0	46.3	47.0
透水	保水性モデル	van Genuchten ⁹⁾		
	残留飽和度 S_{res}	0.062	0.049	0.049
	浸水飽和度 S_{sat}	1.0	0.9	0.9
	モデル係数: 式(1) g_n	1.38	3.99	3.99
	モデル係数: 式(1) g_a 1/m	3.83	37.6	37.6
	モデル係数: 式(1) g_c	-0.420	-0.749	-0.749
	モデル係数: 式(4) g_l	1.25	0	0
飽和透水係数 k_{sat} m/s	3.90×10^{-5}	1.99×10^{-3}	1.99×10^{-3}	

表 5 斜面安定解析条件

	積雪	盛土	M-4 水頭 (図 6)
安定解析 A	なし	稲城砂 (表 4), 粘着力 $c=0\sim 6\text{kPa}$	$h_w=0\text{m}, 0.18\text{m},$ $0.24\text{m}, 0.27\text{m}$
安定解析 B	ざらめ雪 (表 4)	稲城砂 (表 4), 粘着力 $c=0\sim 6\text{kPa}$	$h_w=0\text{m}, 0.18\text{m},$ $0.24\text{m}, 0.27\text{m}$

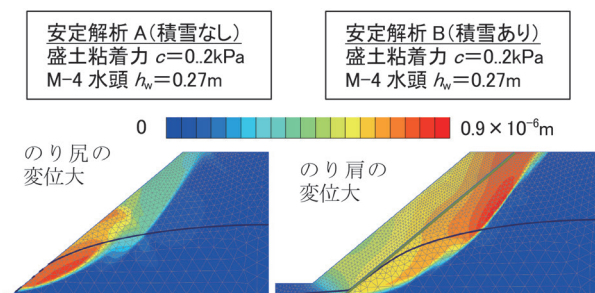


図 14 変位増分絶対値 ΔU の分布の比較 (盛土内水位あり、せん断強度低減法解析ステップ)

者は事前の応力変形解析の結果として至った終局状態、後者はせん断強度低減法の結果として終局状態に至った状態を示している。この安定解析 A（積雪なし）の変形モードは、4章の散水模型実験 Case1-1 で確認された様に（図 12）、相対的にのり尻に大きな変位が生じている。一方で、安定解析 B（積雪あり）では、のり肩周辺に相対的に大きな変位が深く発現している。この変状モードは散水模型実験 Case1-2 の実験後に積雪を排除して確認された変位の傾向と一致する（図 12）。

ここで、表 5 の条件に基づいて、斜面安全率 F_s に関するパラメータスタディを実施した結果を図 15 に整理して示す。この結果より、散水により盛土内に水位が形成されている条件（M-4 水頭 $h_w = 0.18\text{m}$, 0.24m , 0.27m ）では、安定解析 B（積雪あり）の条件の方が斜面安全率 F_s は高くなる事が確認される。これは、図 14 の変形モードの違いから分かるように、積雪が盛土のり尻の小崩壊を拘束しているために、積雪斜面の方が、斜面安全率 F_s が高まっているものと判断される。一方で、特異な事象として、盛土内水位が形成されていない条件（M-4 水頭 $h_w = 0\text{m}$ ）では、積雪斜面の方が斜面安全率 F_s は低下する結果となった。その原因を確認する目的

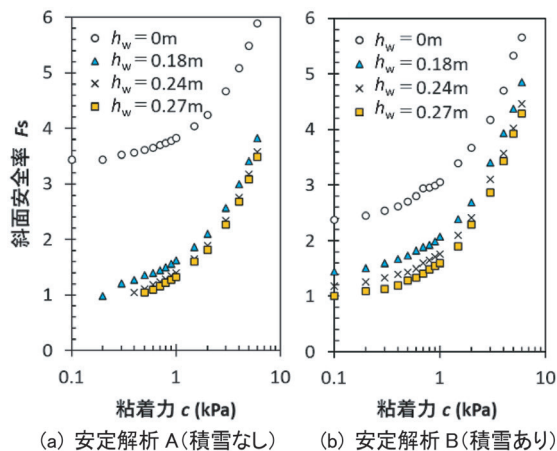


図 15 せん断強度低減法より得られる斜面安全率 F_s 、模型盛土の粘着力 c およびマノメータ M-4 位置の水頭 h_w の関係

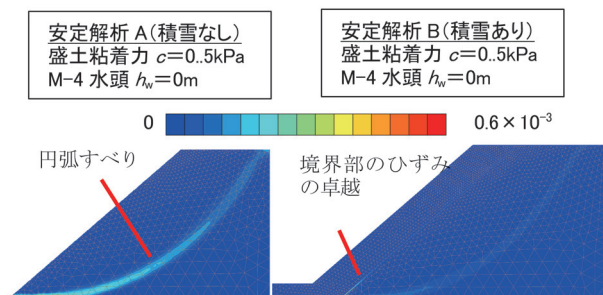


図 16 ひずみ増分 $\Delta\gamma$ の分布（盛土内水位なし）

で、図 16 に盛土内地下水位が形成されていない条件（M-4 水頭 $h_w = 0\text{m}$ の条件）における、せん断強度低減法による解析後の終局状態として、ひずみ増分 $\Delta\gamma$ の分布を示す。ここで安定解析 B（積雪あり）を確認すると、積雪と地盤の境界部に増分 $\Delta\gamma$ が卓越した領域が確認される。すなわち、安定解析 B（積雪あり）の盛土内地下水位が形成されていない条件では、積雪と地盤の境界のすべり、いわゆる全層雪崩が最弱の破壊モードとして選択された結果であると判断する。

今回は盛土を対象として斜面安定性を検証し、その結果として、積雪は融雪の影響を除けば概ね盛土安定性に良好な影響をもたらす結果が示された。しかし、自然斜面など斜面勾配や地盤表層の条件が異なる場合、のり肩に積雪が厚く堆積して積雪荷重を作用させる場合などでは、積雪が積雪斜面の斜面安定性に負の影響を及ぼす可能性も想定される。今後、様々な条件の積雪斜面の安定性を検証し、積雪が斜面安定性に有利または不利に影響する条件を整理することで、融雪量を指標とした融雪災害の警戒基準の開発において、現地条件と積雪深に応じた、より適正な警戒基準の補正方法が検討できるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では積雪地域において融雪水および雨水を誘因として発生する融雪災害の危険度を評価する観点から、斜面上の積雪が斜面安定性に及ぼす影響を検討した。具体的には、積雪の強度特性を室内試験により把握し、その上で、積雪を伴う高さ 1m の盛土模型を対象とした散水模型実験を実施し、盛土の水分応答および変位を観察した。さらに、この積雪を伴う盛土模型を対象として、有限要素法による斜面安定性解析（せん断応力低減法）を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ・本実験条件の「ざらめ雪」は締固め度 $D_r 84\%$ の「稲城砂」（砂地盤）より高いせん断強度を発揮し得ることを確認した。ただし、稲城砂では水平ひずみ 4% 程度でせん断応力のピークが得られた一方、ざらめ雪では水平ひずみ 10% 以上でピークが得られる事が多く明瞭なピークが得られない場合がある。これは積雪では氷粒子間の圧力が増加する場合に生じる焼結作用が原因と想定される。
- ・盛土上に積雪を構築した模型に対する散水実験を実施した結果、盛土上に積雪を構築したケースでは、積雪が無いケースと比較して散水によって生じる盛土のり尻の変形が抑制される傾向を確認した。
- ・本研究で得られたざらめ雪の強度特性、変形特性、物理特性を反映した斜面安定解析（せん断強度低減法）により、積雪斜面の模型の斜面安全率 F_s を解析した。そ

の結果、雨や融雪等の作用を受ける積雪斜面（盛土）では、融雪水は盛土を高含水化させるものの、積雪自体は盛土の斜面安全率 F_s をやや向上させる場合があることが分かった。

ただし、今回は小型盛土模型を対象とした評価であり、今後は本研究の成果を応用して、様々な条件の積雪斜面を対象とし、融雪の作用や積雪による斜面の拘束等の影響を受ける積雪斜面の安定性をより定量的に評価するための検討を進めていく予定である。

文 献

- 1) 高柳剛, 馬日凌, 藤原将真, 佐藤亮太, 内藤直人: 積雪が盛土安定性に及ぼす影響に関する検証, 土木学会論文集, 80巻, 4号, 2024
- 2) 運輸安全委員会: 東日本旅客鉄道株式会社 信越線 妙高高原駅～関山駅間 列車脱線事故, 鉄道事故調査報告書, 報告書番号 RA2014-3-1, 2014
- 3) 高柳剛, 佐藤亮太, 布川修: 解析融雪量と実効雨量を用いた融雪災害警戒指標の設定条件に関する諸検討, 土木学会論文集C(地圏工学), 77巻, 3号, pp.195-212, 2021
- 4) 高柳剛, 宮下優也, 湯浅友輝, 櫻健典: 鉄道における融雪期斜面災害箇所地形および土質条件に関する検証, 地盤工学ジャーナル, 14巻, 2号, pp.123-139, 2019
- 5) 高柳剛, 佐藤亮太, 布川修: 融雪量に基づく実効雨量を用いた融雪災害警戒基準の提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.4, pp.11-16, 2022
- 6) 日本雪氷学会: 積雪観測ハンドブック, 朝倉書店, pp.44-45, 2010
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 丸善出版, 2007
- 8) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解析 [第一回改訂版] -二分冊の2-, 丸善出版, pp.705-709, 2020
- 9) 地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会: 不飽和地盤の挙動の評価, 丸善出版, pp.35-45, 2004