



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 19-1

研究テーマ

凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・
災害危険度評価システムの確立

研究代表者：北海道大学教授 三浦 清一
共同研究者：北海道大学准教授 石川 達也
北海道大学助教 横浜 勝司
北海道大学助教 岩花 剛

平成 22 年 6 月

新道路技術会議

目 次

概要.....	1
第1章 はじめに.....	3
1. 1 研究背景.....	3
1. 2 研究目的.....	3
1. 3 研究内容.....	3
第2章 土の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響.....	6
2. 1 研究概要.....	6
2. 2 試験方法.....	6
2. 3 試験結果.....	8
2. 4 研究成果のまとめ.....	12
第3章 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の検討.....	14
3. 1 研究概要.....	14
3. 2 模型実験の方法と斜面崩壊の定義.....	14
3. 3 試験結果と考察.....	17
3. 4 研究成果のまとめ.....	22
第4章 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊解析モデル.....	24
4. 1 斜面の凍結融解現象.....	24
4. 2 連成解析プログラムの開発.....	25
4. 3 凍結融解斜面のシミュレーション.....	29
4. 4 研究成果のまとめ.....	32
第5章 現地計測による斜面状態監視方法の検討.....	33
5. 1 研究概要.....	33
5. 2 調査対象斜面・計測方法.....	33
5. 3 長期計測結果.....	34
5. 4 斜面の挙動予測方法の検討.....	37
5. 5 研究成果のまとめ.....	38
第6章 データベースの開発と情報活用方法の検討.....	40
6. 1 斜面崩壊に関する情報活用の現状.....	40
6. 2 データベースの開発の意義.....	40
6. 3 斜面点検記録および気象観測情報の整理法.....	40
6. 4 融雪期における斜面崩壊事例および斜面内計測情報.....	41

6. 5	研究成果のまとめ	45
第7章	今後の道路政策への提案	47
7. 1	斜面崩壊予知・災害危険度評価システム	47
7. 2	研究成果の活用方策	50

研究成果概要

平成19年度採択分

平成22年6月24日作成

研究課題名 凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・災害危険度評価システムの確立

研究代表者及び共同研究者

- ・研究代表者氏名（ふりがな） 三浦 清一（みうら せいいち）
- ・共同研究者氏名（ふりがな） 石川 達也（いしかわ たつや）
- 横浜 勝司（よこはま しょうじ）
- 岩花 剛（いわはな ごう）

所属研究機関・役職

北海道大学大学院工学研究科・教授

【研究の概要】

北方圏の道路斜面を対象とした地盤災害の精確な予知・予測法の確立とその適切な防災対策法の構築に資するため、凍結融解に伴う構成地盤材料の力学特性の変化に着目した、凍結融解・降雨複合型斜面崩壊現象の簡易災害危険度評価式を提案するとともに、寒冷地用地盤情報データベースを作成し、凍結融解作用を受ける斜面の災害危険度評価を行うシステムを開発した。また、現行の管理指標に加え地盤の凍上性と凍結深に影響する項目を新たな管理指標とする、積雪寒冷地用の斜面管理方法を新たに提案した。

【キーワード】

寒冷地、地盤防災、凍結・融解作用、斜面崩壊、室内要素試験、数値解析、現地計測

（研究開始当初の背景・動機）

北海道のような積雪寒冷地では、凍結融解作用などに起因する構成地盤材料の力学的劣化が被害を拡大させる場合がある。しかし、寒冷地域の斜面崩壊現象では、温暖地域における斜面崩壊の素因・誘因に加え、凍結融解履歴がどのような形で斜面崩壊に影響を及ぼしているかを詳細に調べた総合的な研究は立遅れている。このため、積雪寒冷地の道路斜面管理の合理化には、斜面崩壊を誘発する因子間の力学作用を解明し、現行の斜面設計方法の再整理や、災害復旧の事後対策から予防保全への転換を推進することが急務である。

（研究の目的）

本研究では、道路斜面を対象とした、北方圏特有の自然現象に起因する地盤災害の精確な予知・予測法の確立とその適切な防災対策法の構築に資するため、積雪寒冷地にある破砕性粒状層を含む帯水斜面の安定解析手法を実務設計レベルで確立するとともに、寒冷地用地盤情報データベースを作成して、凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・災害危険度評価システムを構築する。

（研究の方法）

研究は、図1の検討フローに沿って要素試験・模型試験・数値解析・斜面災害データ収集・現地計測を行い、実施した。

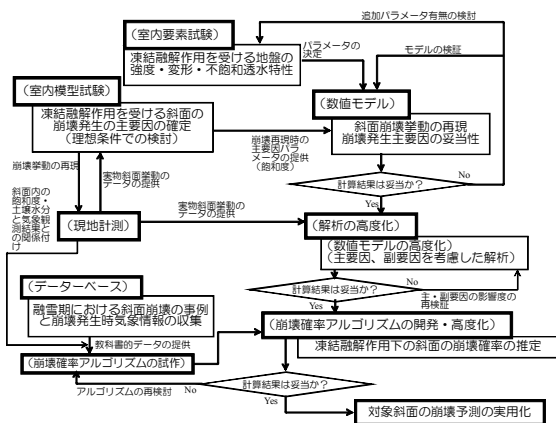


図1 研究フローチャート

(研究の主な成果)

- ① 凍結融解履歴に伴う構成地盤材料の力学特性の変化に着目した，凍結融解・降雨複合型斜面崩壊の簡易災害危険度評価式を提案した。
- ② 気象・地盤条件，地盤工学的な知見，災害事例等の異なる情報を統合した寒冷地地盤情報データベースを試作した。
- ③ データベースと簡易災害危険度評価式を利用して，積雪寒冷地斜面の災害危険度評価を行うシステムを開発した。
- ④ 土壌水分量や気象データ等モニタリング結果をもとに，凍結融解・降雨複合型表層崩壊現象の発生を予測する動態観測システムを試作した (図2)。

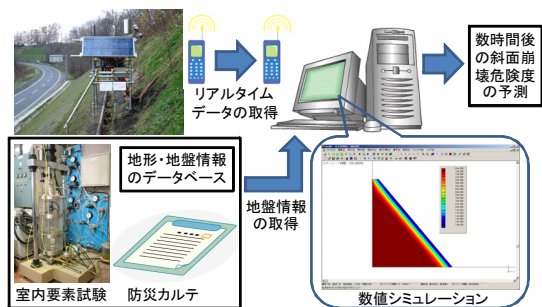


図2 寒冷地斜面用崩壊予知システム

- ⑤ 現行の斜面管理指標・管理方法に加え，地盤の凍上性と凍結深に影響する項目を管理指標とする，積雪寒冷地用の斜面管理方法を新たに提案した (図3)。

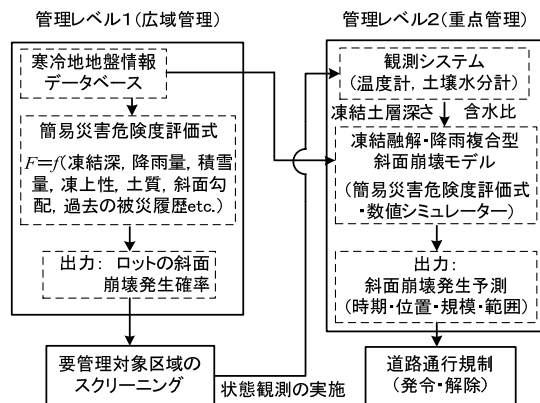


図3 積雪寒冷地の新しい斜面管理方法

(主な発表論文)

Ishikawa, T., Tokoro, T., Itou, K. and Miura, S. : Testing methods for hydro-mechanical characteristics of unsaturated soils subjected to one-dimensional freeze-thaw action, *Soils and Foundations*, Vol.50, No.3, 2010. (In press).

他，雑誌論文 12 件，学会発表 20 件

(今後の展望)

本研究は，道路管理者に，維持管理の適正化・合理化を図るための新しい管理ツール（評価式や数値解析）を提供し，凍結融解斜面の新たな設計概念を提示するとともに，積雪寒冷地における道路斜面の防災対策・点検管理の高度化を促すものである。しかし，本研究で提案する斜面管理方法の信頼性を向上させるには，実斜面における長期計測結果等をフィードバックしながら今後システムを見直していく必要がある。

(道路政策の質の向上への寄与)

現在，本研究成果の具体的な活用方法を検討するため，北海道開発局と連携して斜面計測を行い，本研究で提案する積雪寒冷地斜面管理手法を用いた道路斜面管理の具体的な方法論を検討している。

ホームページ等

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/geomech/slope-failure.html>

第1章 はじめに

1.1 研究背景

積雪寒冷地である北海道では、近年の地球温暖化現象に起因すると考えられる異常気象によって、これまで災害要注意箇所として監視されてこなかった緩斜面でも斜面崩壊等の地盤災害が頻繁に発生している。特に、近年の平均気温の上昇に伴う融雪期における急激かつ大量の融雪水の地盤への流入・浸透は、台風や集中豪雨等の被害が比較的少なかった北海道で、大規模な切土のり面や自然斜面の表層崩壊・地すべりなどの斜面崩壊を急増させている一因であると考えられている。なお、融雪期における斜面崩壊の割合を示すものとして、道路防災ドクターの出動回数について検証してみる。平成13年度から平成19年度での斜面崩壊による防災ドクター出動は、全出動回数に対して67%に及ぶ。そのうち、4月から6月での出動回数は20%に達している。つまり、北海道においては、いわゆる融雪期における斜面崩壊の危険性は極めて高いことがわかる。さらに、4月から6月に発生した斜面崩壊事例と気象観測結果を分析した結果、降雨と急激な融雪および気温昇降のパターン変化が同時に現れた際に、斜面崩壊が発生している傾向が確認された。このように、融雪期に起こる降雨と融雪がトリガーとなって斜面崩壊が生じることは、近年に多く見られる傾向であり、これに合理的に対応することが道路管理上、極めて重要となる。

また、北海道には火山性の碎屑岩や破砕性火山灰地盤が広く分布しているが、このような火山性生成物の地盤や岩盤においては、凍結融解作用などに起因する構成地盤材料の力学的経年劣化が被害を拡大させる場合がある。例えば、火山灰質粗粒土は、一般に多孔質で脆性的な粒子で構成されていることから、粒子間空隙あるいは粒子内空隙に存在する土中水の凍結融解作用により構成粒子が破砕し、静的および動的強度に影響を及ぼすことも考えられる。さらに、融雪期に多発する斜面崩壊誘因の一つとして、凍土の融解や融雪などにより斜面表層が高含水状態

となることが挙げられているが、凍結融解作用により細粒化した場合、表土の水分保持特性や透水性も変化すると考えられる。したがって、北海道のような積雪寒冷地を対象として融雪期の斜面崩壊メカニズムを解明するためには、構成地盤の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響要因とその影響度を把握する必要がある。従来、凍結融解作用が地盤材料の物理特性や力学特性に及ぼす影響については種々調べられている。特に、粘性土やシルト質土などの凍上性を有する試料を対象とした研究が盛んに行われている。しかし、北海道に広く分布し、軽量で比較的安定性に優れていることから盛土や擁壁の裏込め材として多方面に用いられている、非凍上性の火山灰質粗粒土を対象とした研究はほとんど行われていないのが現状である。

1.2 研究目的

本研究は、道路斜面を対象とした、北方圏特有の自然現象に起因する地盤災害の精確な予知・予測法の確立とその適切な防災対策法の構築に資するため、凍結融解履歴あるいは融雪や降雨等の乾湿履歴に伴う構成地盤材料の力学特性の変化に着目して、積雪寒冷地にある破砕性粒状層を含む帯水斜面の安定解析手法を実務設計レベルで確立する。加えて、自然条件、地盤条件、地盤工学的な知見、過去の災害発生事例といった異なる情報を統合した寒冷地域の地盤情報データベースを作製し、データベース内に蓄積された種々の情報を目的に応じて抽出するとともに、合理的な防災計画や維持管理体制の構築に不可欠な様々な情報を創出するために相互に関連づけを行って、凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・災害危険度評価システムを構築するものである。

1.3 研究内容

本研究開発は、図-1.1 に示す検討実施フローに従

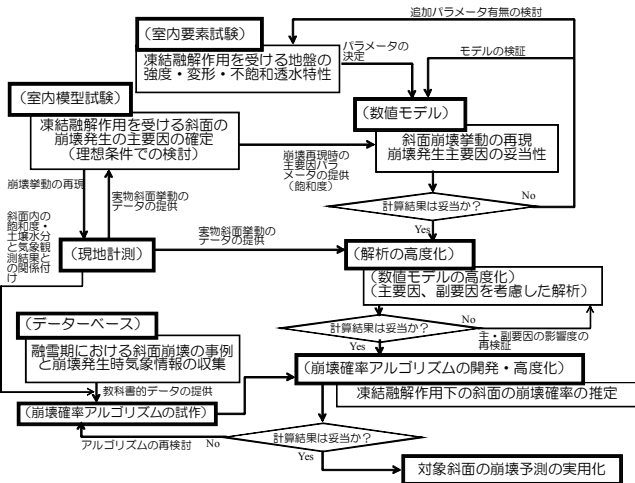


図-1.1 研究実施フローチャート

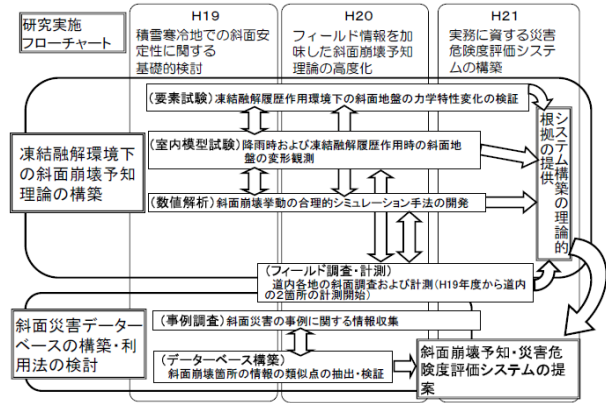


図-1.2 研究実施計画

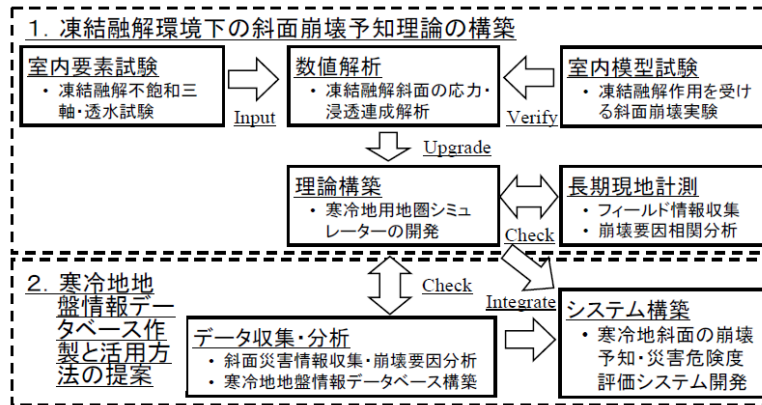


図-1.3 研究実施項目間の関連

い、平成19～21年度の3カ年に亘り実施した。各年度の研究目標は以下のとおりである。

平成19年度は、破砕性帯水地盤の凍結融解に起因する斜面崩壊メカニズムの基礎理論の構築を目的とした。このため、要素試験・室内模型試験・数値解析シミュレーションを実施するとともに、積雪寒冷地で生じた斜面災害情報の収集と斜面崩壊誘因の分析を行い、斜面崩壊現象に対する凍結融解作用の影響評価や、斜面の崩壊予知・安定性評価における凍結融解作用の地盤工学的意味の明確化を図るための研究開発を実施した。

平成20年度は、前年度に構築した破砕性帯水地盤の凍結融解に起因する斜面崩壊機構の基礎理論を、フィールド情報等を加味して高度化することを目的とした。このため、室内要素試験・室内模型試験・数値解析シミュレーションを継続実施するとともに長期現地調査・現地計測を実施して、積雪寒冷地で生じた斜面災害情報の収集と斜面崩壊誘因の分析を行い、より実現象に近い条件下で適用可能な斜面崩壊予知理論や地盤の凍結融解に起因する斜面崩壊の危険度判定・安全性評価システムの提案を図るための研究開発を実施した。

平成21年度は、前年度に提案した新しい管理指標を採用した積雪寒冷地斜面の二段階管理法を実務に供することを目的とした。このため、要素試験・模

型試験・数値解析・斜面災害データ収集・長期現地計測を継続し、気象・地形・地盤情報を用いて、凍結融解環境下における斜面崩壊の発生（箇所・時期）を予測する、積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムのプロトタイプを開発するとともに、道路管理者の利便性を考慮した管理方法の提案を図るための研究開発を実施した。

なお、図-1.2に研究全体の実施スケジュールを示す。また、具体的には、以下のような研究実施項目について検討した。各研究実施項目は、図-1.3のように相互に関連している。

(1) 土の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響

a) 凍結融解履歴型室内要素試験の実施

十分に制御された試験条件で自然地盤と同様な凍結融解履歴および荷重履歴を再現できる凍結融解履歴型不飽和三軸試験機および不飽和透水試験機を駆使し、凍結融解履歴を与えた火山灰質土試料を用いて室内要素試験を実施する。

b) 凍結融解・乾湿履歴の力学特性への影響評価

試験結果に基づいて、火山灰質土地盤の力学特性（浸透特性を含む）に及ぼす凍結融解、飽和・不飽和状態の影響を定量的に評価する。

(2) 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の検討

- a) 凍結融解・降雨による斜面崩壊実験の実施
現有する降雨履歴載荷型の二次元平面ひずみ模型土槽装置を用いて、斜面を構成する土の特性に着目して凍結融解・降雨による火山灰質土斜面の崩壊実験を実施する。
- b) 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の検討
凍結融解と降雨による複合型の斜面崩壊機構の特徴を異なる材料特性の地盤に対して把握するとともに、力学的見地から凍結融解履歴を受ける斜面表層崩壊の誘因を導くため、種々の地盤に対する凍結融解作用の影響度を定量化する。

(3) 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊解析モデル

- a) 応力変形・熱伝導・浸透連成解析方法の検討
積雪寒冷地の帯水火山灰質土斜面内で生じると想定される力学作用をシミュレートするために、上記(1)、(2)の検討結果を考慮して地盤の凍結融解現象を再現可能な応力変形・熱伝導・浸透連成解析の数値解析方法についての検討を行い、凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルを提案し、ソフトウェアを開発する。
- b) 数値解析方法の妥当性と適用性の検討
斜面の安定性に対する各種誘因（解析パラメータ）の感度分析や室内模型試験の数値シミュレーションを行い、凍結融解・降雨による斜面崩壊に対する数値解析方法の適用性を検討するとともに、本研究で提案する凍結融解・降雨に起因する斜面崩壊予知理論の妥当性や一般性を検証する。

(4) 現地計測による斜面状態監視方法の検討

- a) 実斜面における現地調査・現地計測の実施
凍結融解作用を受ける火山灰質土で構成される実斜面において、現地調査・現地計測を長期的に実施する。
- b) フィールド情報の収集と斜面崩壊要因分析
実斜面で収集した各種情報の相関分析を行い、より実現象に近い条件下で凍結融解・降雨に起因する斜面崩壊機構を検討し、管理指標や評価基準を明示するために必要な基礎データの収集を図る。
- c) 効率的な現地調査・現地計測方法の検討
現地計測データの分析結果に基づいて、現地調査・現地計測の調査・測定項目や計測手法を具体的に整理し、効率的なフィールド情報の収集方法について検討する。

(5) データベースの開発と情報活用方法の検討

- a) 斜面災害データの収集と斜面崩壊要因分析
過去に北海道内で発生した斜面災害に関するデータ（気象条件、地盤条件と凍上現象の発生地域との関係等の情報）を収集し、斜面災害の要因分析と上記(1)～(3)の検討結果に基づいて提案される斜面崩壊予知理論の検証を行う。
- b) 斜面災害データの整理・体系化方法の検討

凍結融解・降雨に起因する斜面崩壊予知や災害危険度評価を効率的に行うため、寒冷地地盤情報データベース内に蓄えられる種々の情報を整理・体系化する方法を検討する。

c) 寒冷地地盤情報データベースの作成

現行情報管理システム（テレメータ・防災カルテ等）から入手可能な自然条件、地盤条件、地盤工学的な知見、過去の災害発生事例といった異なる情報を統合し、それらの情報検索・抽出システムを具備した寒冷地用の地盤情報データベースを作成する。

(6) 斜面崩壊予知・災害危険度評価システム

- a) 積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの試作
凍結融解に伴う構成地盤材料の力学特性の変化や融解期の土壌水分量の変化に着目した、凍結融解・降雨複合型斜面崩壊の簡易災害危険度評価式を提案し、それを利用して寒冷地地盤情報データベースの種々の情報を相互に関連づけ、凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知や災害危険度評価を行うシステムを試作する。
- b) 開発システムを利用した斜面管理方法の検討
現行の道路斜面の管理指標・管理方法に加えて、地盤の凍上性と凍結深に影響する項目を新たな管理指標とした、新たな積雪寒冷地用の斜面管理方法を提案する。

以降の各章では、各研究実施項目について詳説する。

第2章 土の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響

2.1 研究概要

本研究では、低応力下においても顕著な破砕性を示す火山灰質粗粒土で構成される凍結地盤の融解時の力学挙動を検討するために、実地盤で生じる凍結融解現象とほぼ同様な凍結融解作用を、十分に制御された三軸室内で再現可能な凍結融解履歴載荷型不飽和三軸圧縮試験機・凍結融解履歴載荷型不飽和透水試験機を開発し、凍結融解履歴を与えた火山灰質粗粒土の飽和・不飽和三軸圧縮試験、不飽和透水試験、保水性試験を行い、飽和・不飽和状態の破砕性粒状体の物理特性、変形・強度特性、透水・保水性に及ぼす凍結融解履歴の影響について検討した。

2.2 試験方法

(1) 試験装置

凍結融解履歴載荷型不飽和三軸圧縮試験機の概略を図-2.1(a)に示す。本試験機は、三軸室内で供試体に凍結融解履歴を与えた後、連続して飽和・不飽和三軸圧縮試験や保水性試験を実施できる、ダイレクトドライブモータによるひずみ制御式の三軸圧縮試験機である。

本試験機では、キャップとペDESTALを別々に温度制御することができ、供試体に任意の温度勾配を与えられる。凍結融解中は、供試体外側に設置したアクリル製凍上セルにより、供試体の側方変位を拘束するとともに、その外側に設置した内セルと圧力円筒の間に温度制御した冷水を循環することにより、三軸室内を恒温・断熱している。さらに本試験機では、間隙水圧・間隙空気圧を独立に制御可能である。不飽和試験中は、間隙水圧を排水量測定用の二重管ビュレットを通じペDESTALに埋め込まれたセラミックディスク (AEV=230kPa) あるいはバーサポアフィルター (AEV=110kPa) を介して、間隙空気圧をポリフロンフィルターが取り付けられたキャップを介して、それぞれ供給している。なお、供試体の体積変化は内セルにより測定している。供試体の基本的なサイズは高さ $H=170\text{mm}$ 、直径 $D=70\text{mm}$ の円柱形である。

凍結融解履歴載荷型不飽和透水試験機の概略を図-2.1(b)に示す。本試験機は、既往の加圧型不飽和透水試験機^{1), 2), 3)}を改良したものであり、定常法の定水位透水・透気試験、保水性試験が同時に実施可能である。キャップ・ペDESTAL別々に温度制御可能な

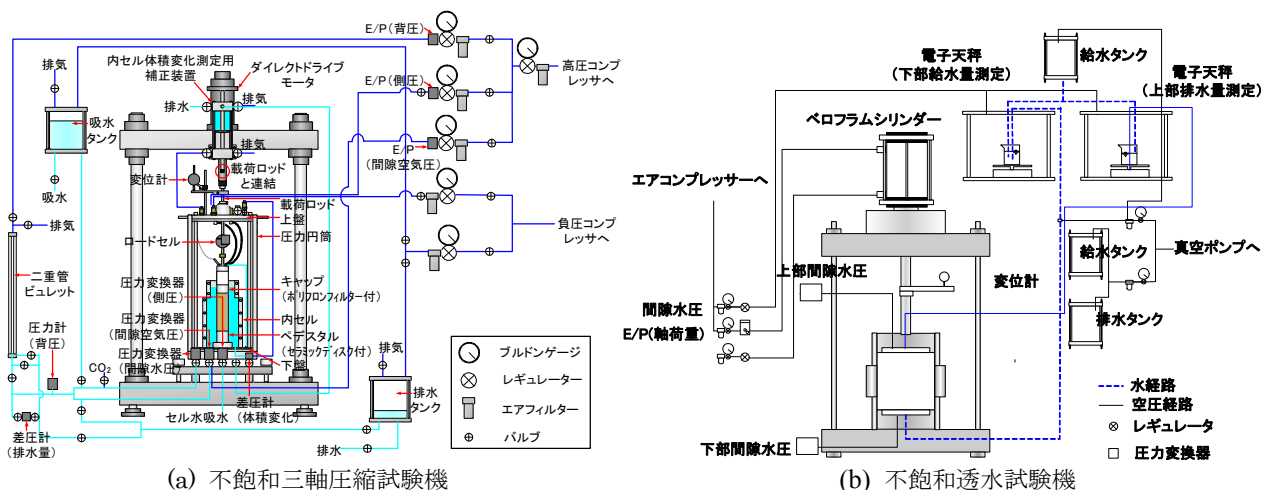


図-2.1 凍結融解履歴載荷型室内要素試験装置

点や、凍上セルの設置により供試体を一次元的に凍結融解可能な点など、凍結融解中の試験条件の制御については、前述の三軸圧縮試験機と同様な機能を有している。本試験機では、間隙水圧測定経路・給排水経路とも試験時間を短縮するためにセルロース膜を用いることとした。本研究で用いたセルロース膜は膜厚105 μm 、孔径0.8 μm 、空気侵入値(AEV)は110kPa、透水係数は $7.5 \times 10^{-10} \text{m/sec}$ である。なお、間隙空気圧制御経路には疎水性のポリフロンフィルターを用いた。また、本試験機では、マリオット管の採用により、不飽和透水試験中、配管による損失水頭はあるものの、供試体上下面の水頭差を一定に保つことができ、電子天秤上のビーカーへの流入・流出水量を計測することで定常状態を確認できる。なお、供試体の基本的なサイズは高さ $H=30\text{mm}$ 、直径 $D=70\text{mm}$ の円柱形である。

(2) 試料

試料は、北海道に分布する火山灰質粗粒土(富川, 柏原, 当幌)と豊浦砂である。富川火山灰土と柏原火山灰土は、道央の支笏カルデラを噴出源とする3.1~3.4万年前の降下軽石であり、表土より約2m下(凍結深以下)で水平で均質な堆積層から門別町富川および苫小牧市柏原でそれぞれ採取された。当幌火山灰土は、道東の摩周火山を噴出源とする1.1~1.3万年前の降下軽石であり、表土より約2m下(凍結深以下)で水平で均質な堆積層から中標津町当幌地区で採取された。既往の研究⁴⁾から、各火山灰土は、構成粒子が非常に多孔質であり多くの内部空隙を含むため、最大・最小密度は極めて低い値を示すこと、および降下堆積物であることから、自然淘汰を受けておらず、粒子の角張度は顕著であることが示されている。さらに、火山灰質粗粒土の多くは低応力下においても顕著な粒子破砕性を有し、平均有効主応力 p' ・応力比 $\eta (=q/p')$ の増加に伴い粒子破砕は増加することが確認されている⁵⁾。各試料は9.5mmふり通過分のみを用いた。なお、柏原火山灰土と当幌火山灰土については、模型斜面の凍結融解・降雨による斜面崩壊実験で用いた火山灰質土と同一の試料である。一方、豊浦砂は、本研究で行った試験の応力範囲内では粒子破砕を生じないものとして用いた。試料の物理的性質・粒度を表-2.1、図-2.2に示す。

(3) 試験方法

a) 供試体作製・凍結融解試験

供試体の設置・作製手順を以下に示す。まず、パーサポフィルターあるいはセルロース膜(以下「膜類」と称す)を脱気水の入った容器中に浸水後、三軸セル内に入れ、-90kPaの負圧を負荷した状態で約1時間放置し、飽和させた。この際、ポーラスメタルも同様に飽和させた。次に、飽和させた膜類を、空気が封入されないように脱気水で管路のフラッシングを行いながら、ポーラスメタル、膜類、押さえフランジの順にキャップ・ペダスタルに取り付け、

表-2.1 火山灰質土試料の物理特性

Sample Name	富川火山灰土	柏原火山灰土	当幌火山灰土
ρ_s (g/cm^3)	2.22	2.34	2.44
$\rho_{d \text{ max}}$ (g/cm^3)	0.522	0.623	0.680
$\rho_{d \text{ min}}$ (g/cm^3)	0.426	0.462	0.483
D_{50} (mm)	1.10	1.25	5.00
F_c ($\phi 75\mu\text{m}$) (%)	1.00	0.90	1.97

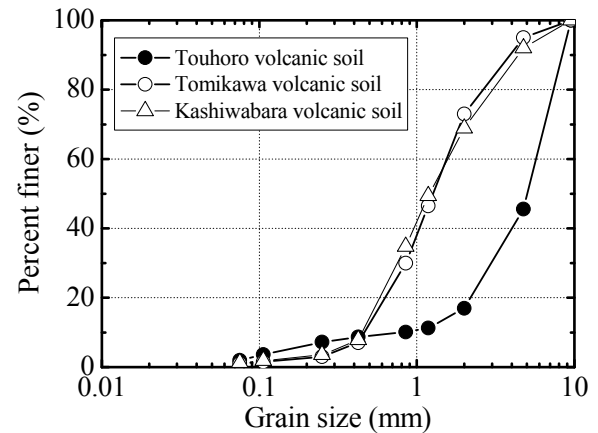


図-2.2 火山灰質土試料の粒度分布

ビスで固定した。火山灰質粗粒土供試体は、圧密後の密度 ρ_{dc} が原位置密度と等しくなるように、落下高さを調節し空中落下法(AP法)により作製した。

b) 凍結融解試験

凍上セルを外周に取り付けた供試体を三軸セル内に設置した後、大気圧下で供試体下部から通水し、供試体飽和度がほぼ一定(通水後の供試体飽和度 S_r が80%以上)になるまで含水比調整を行った。供試体の擬似飽和後、上載圧 $\sigma_a=12.2\text{kPa}$ で一次元圧密し、続いて三軸室内で凍結融解履歴を与えた。供試体の凍結は、側方変位を拘束の上、供試体下端からの給排水を許した状態で、供試体上端から実施した。この際、供試体上端と下端の温度差は 17°C で一定(温度勾配 $d\theta/dH=0.1^\circ\text{C/mm}$)としたが、上端と下端の凍結速度 $U (=dH/dt)$ については、メンブレンの耐久性等を考慮して試験時間を短縮するため、 $U=16.0\text{mm/h}$ (温度変化速度 $d\theta/dt=1.6^\circ\text{C/h}$)一定で試験を行った。なお、本研究の凍結速度 U は、土の凍上試験方法(JGS 0171-2003)の範囲を超えるものであるが、別途、凍結速度 U を変えて行った予備実験では、試験結果に明確な違いは見られなかった。次いで、軸変位と給排水量の変化が収束し、供試体全体が凍結したのを確認後、供試体の解凍を凍結時と同一温度勾配 $d\theta/dH$ ・同一温度変化速度 $d\theta/dt$ の下で供試体下端から行った。凍結融解後、凍上セルを外して内セルを設置し、以下に示す各種試験を実施した。

c) 三軸圧縮試験

不飽和三軸圧縮試験の試験手順は次の通りである。凍結融解終了後、まず、軸変位と排水量が一定になるまで所定の基底応力 $\sigma'_{\text{net}} (= \sigma_c - u_a : \sigma'_{\text{net}}=49, 98, 196\text{kPa}$ 、ここで、間隙空気圧 $u_a=200\text{kPa}$ ・間隙水圧 $u_w=200\text{kPa}$ ・拘束圧(セル圧) $\sigma_c=249, 298, 396\text{kPa}$)で供試体を等方圧密した。等方圧密終了後、間隙水圧 u_w を減少させて所定のサクシオン $s (=u_a - u_w : s=5,$

15, 35, 60kPa) を負荷した。この状態で排水量が安定したのを確認し、地盤工学会規準「不飽和土の三軸圧縮試験方法 (JGS 0527-2000)」に準拠して、基底応力 σ'_{net} ・サクシオン s を一定に制御した、排気排水条件で単調載荷三軸圧縮試験を実施した。比較のため、二重負圧法により飽和させた供試体と気乾燥状態の供試体についても、地盤工学会規準「土の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験方法 (JGS 0524-2000)」に準拠して、同様な試験条件で三軸圧縮試験を実施した。また、各試験の前後に、新たな粒子破碎が生じることの無いように十分注意の上、ふるい分析による粒度試験を行い、供試体の粒度変化を調べた。なお、本研究では、不飽和土の有効応力の定義として、式(2.1)に示される Bishop の有効応力式⁶⁾を用い、そのパラメータ χ は式(2.2)⁷⁾で求めた。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.1)$$

$$\chi = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \quad (2.2)$$

ここで、 S_{r0} : 残留飽和度

d) 保水性試験

凍結融解終了後、地盤工学会規準「土の保水性試験方法 (JGS 0151-2000)」に準拠して保水性試験を実施した。保水性試験では、基底応力 $\sigma'_{net}=49\text{kPa}$ (ここで、 $\sigma'_c=249\text{kPa}$, $u_a \cdot u_w=200\text{kPa}$) で等方圧密を行い、その後、間隙水圧を段階的に減少 (排水過程)・増加 (吸水過程) してサクシオン s を作用させた。

e) 不飽和透水試験

定常法の定水位不飽和透水試験の試験手順は次の通りである。凍結融解終了後、拘束圧 (セル圧) $\sigma'_c=99\text{kPa}$, 間隙水圧 $u_w=50\text{kPa}$ ・間隙空気圧 $u_a=50\text{kPa}$ を負荷し、基底応力 $\sigma'_{net}=49\text{kPa}$ で等方圧密を行った。等方圧密終了後、基底応力 $\sigma'_{net}=49\text{kPa}$ 一定の下で、供試体上下面に与える水頭差が10mm程度となるように管路の損失水頭を考慮して上下天秤に水頭差を与え、供試体下面から給水し上面から排水する透水試験を行った。なお、電子天秤上のビーカー水面に油を浮かせ、ビーカーからの水分蒸発を防いでいる。透水試験では、供試体下面への吸水量 ΔQ_1 と供試体上面からの排水量 ΔQ_2 を電子天秤で読み取り、両計測値が(2.3)式のように等しくなった時、定常状態に達したと判断した。なお、一連の試験は室温で実施した。

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = q \quad (2.3)$$

不飽和透水係数 k_w は、流量 q とキャップ・ペDESTAL間に設置した差圧変換器で計測される供試体の損失水頭 Δh を用いて(2.4)式により算出した。なお、本研究では、間隙空気圧については制御値を実験結果の整理に用いている。

$$k_w = qL / (A \cdot \Delta h \cdot 60 \cdot 10^2) \quad (2.4)$$

ここで、 k_w : 透水係数(m/s), q : 流量(cm^3/min), L : 供試体高さ(cm), A : 断面積(cm^2), Δh : 供試体での損失水頭(cm)

以上の試験手順を、 $\sigma'_{net}=49\text{kPa}$ 一定に制御した上で間隙水圧 u_w を段階的に下げ、異なるサクシオン $s (=u_a - u_w)$ ・異なる飽和度の供試体に対して繰返し行い、排水過程における不飽和透水係数 k_w を求めた。また、供試体の吸水量・排水量は電子天秤により計測されることから、各サクシオン段階における供試体含水量を計算し、水分特性曲線を同時に求めた。

2.3 試験結果

(1) 凍結融解試験

図-2.3は、豊浦砂と富川火山灰土の凍結融解過程における、キャップとペDESTALの温度、排水量、軸変位と経過時間の関係である。図から、各試料とも凍上性は確認できなかった。ただし、豊浦砂では、凍結融解前後で供試体高さがほとんど変化しなかったのに対し、富川火山土では、融解後に大きく沈下し密度が増加した。図-2.4は、初期乾燥密度 ρ_{d0} を一定とした富川火山灰土の凍結融解試験における、凍結融解後の乾燥密度 ρ_d , 細粒分増加量 ΔF_c ⁵⁾と凍結融解履歴回数 N_f の関係を示す。ただし、 $N_f=0$ は凍結融解履歴無しの結果である。図から、凍結融解履歴回

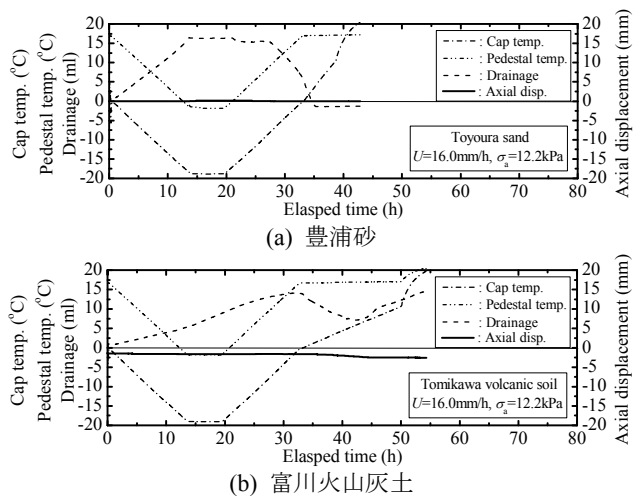


図-2.3 凍結融解試験における試料の挙動

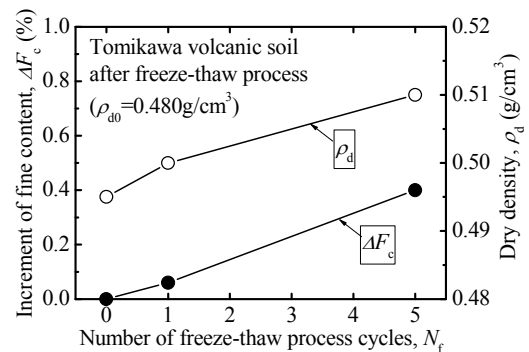
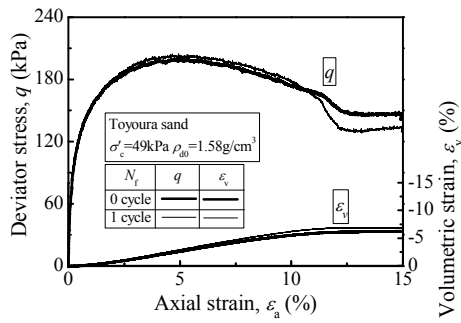
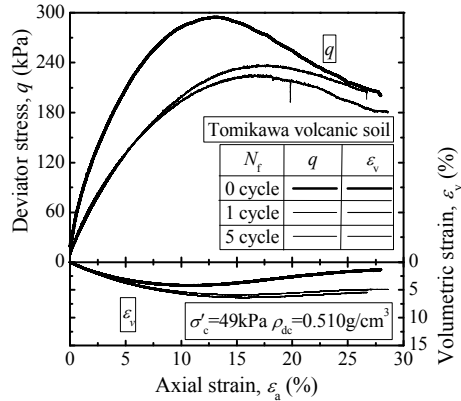


図-2.4 凍結融解後の細粒分増加量・乾燥密度～履歴回数関係



(a) 豊浦砂



(b) 富川火山灰土

図-2.5 凍結融解前後の応力～ひずみ～ダイレイタンスー

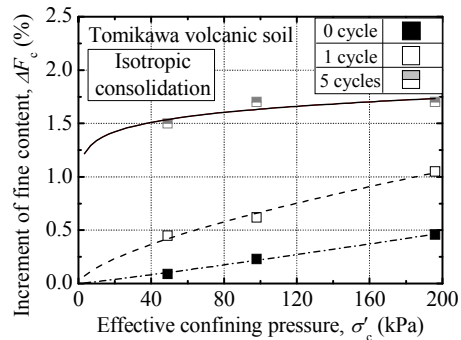


図-2.6 等方圧密後の細粒分増加率～有効拘束圧関係

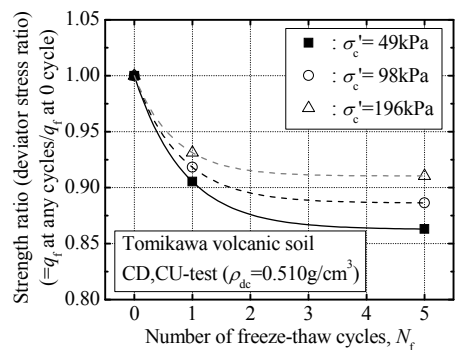
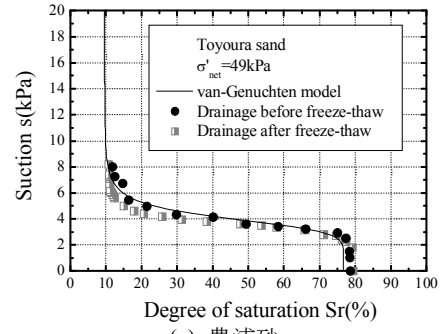
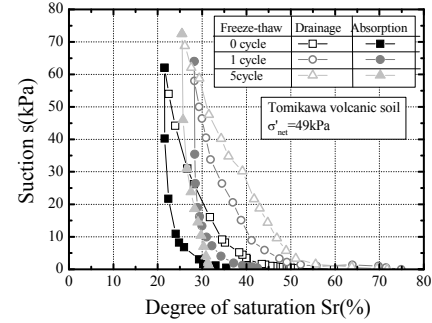


図-2.7 破壊時軸差応力～凍結融解履歴回数関係

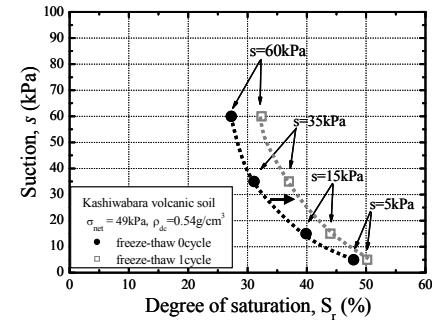
数の増加に伴い、密度・細粒分増加量ともに増加することがわかる。このことは、試験に用いた富川火山灰土は非凍上性材料であるが、凍結融解作用により粒子破碎が生じ、次第に粒子構造が密実化することを示している。



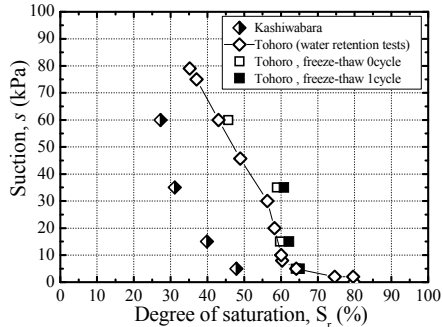
(a) 豊浦砂



(b) 富川火山灰土



(c) 柏原火山灰土



(d) 当幌火山灰土

図-2.8 水分特性曲線に及ぼす凍結融解履歴の影響

(2) 飽和三軸圧縮試験

図-2.5は、 ρ_{d0} 一定の条件下で凍結融解履歴回数 N_f を変えた場合の飽和豊浦砂と飽和富川火山灰土の応力～ひずみ関係とダイレイタンスー特性である。豊浦砂では、凍結融解による密度変化が生じなかったため圧密後も密度一定であり、応力～ひずみ関係、体積変化挙動に大きな違いが認められなかった。一方、富川火山灰土では、凍結融解履歴によって密度が増加したにも関わらず、履歴を受けていないものと比較して履歴を受けた供試体はピーク強度が低下した。図-2.6は、凍結融解飽和三軸圧縮試験より得た等方圧密終了後の細粒分増加量 ΔF_c と有効拘束圧 σ'_c の関係である。図から、凍結融解履歴回数の増加に伴い

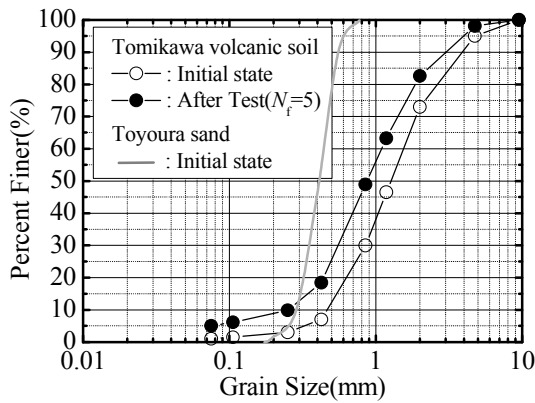


図-2.9 粒度分布に及ぼす凍結融解履歴の影響

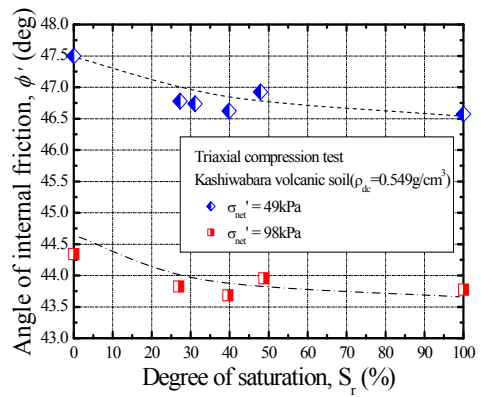


図-2.11 せん断抵抗角 ϕ' ～飽和度関係

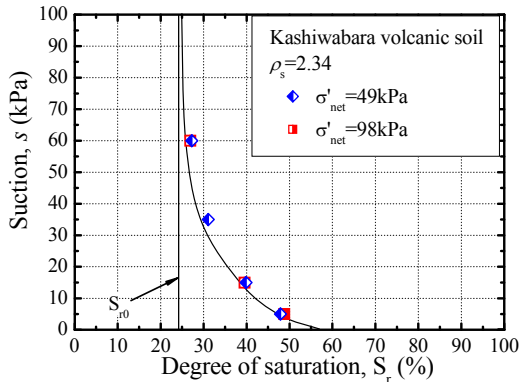


図-2.10 水分特性曲線に及ぼす基底応力の影響

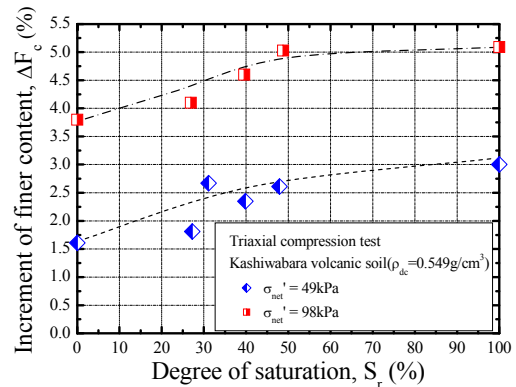


図-2.12 細粒分増加量 ΔF_c ～飽和度関係

ΔF_c が増加し、粒子破碎が顕著になることがわかる。図-2.7は、富川火山灰土の破壊時軸差応力 q_f と凍結融解履歴回数 N_f の関係を有効拘束圧 σ'_c 別に示したものである。図から、凍結融解履歴回数が増加すると破壊時軸差応力は低下することがわかる。また、強度低下は、有効拘束圧 $\sigma'_c=49\text{kPa}$ で最も大きく、有効拘束圧の増加に伴い徐々に小さくなった。以上の結果から、非凍上性の飽和火山灰質粗粒土の変形・強度特性、ダイレイタンスー特性に、凍結融解履歴の違いにより変化が見られたのは、凍結融解作用に起因する構成粒子の粒子破碎量の増大と関係があると考えられる。

(3) 保水性試験

図-2.8は、豊浦砂と各種火山灰質粗粒土の保水性試験から得た水分特性曲線（排水過程、ただし富川火山灰土のみ排水・吸水過程）を、凍結融解履歴を与えた試験結果と凍結融解過程を省いた試験結果と比較したものである。豊浦砂では、水分保持特性に及ぼす凍結融解履歴の影響はほとんど認められなかった。一方、各火山灰土では、凍結融解履歴を受けたものは受けていないものと比較して、水分特性曲線の形状にほとんど変化は見られなかったが、同一サクシオンを与えた時の飽和度は高くなった。また、凍結融解保水性試験前後の富川火山灰土の粒度を比較すると（図-2.9）、凍結融解作用により粒子破碎が生じ、粒径が若干小さくなることがわかる。以上の結果より、凍結融解作用により粒子破碎が生じ、粒径の減少や細粒分の増加が発生する破碎性火山灰質

粗粒土では、凍結融解作用により粒度が変化する結果、その水分保持能力が高まったと考えられる。ただし、凍結融解作用が火山灰質粗粒土の水分保持特性に及ぼす影響は、各試料によって異なり、試験前のその粒度分布あるいは細粒分含有率と相関があると考えられる。例えば、粒度組成が近い富川火山灰土と柏原火山灰土の凍結融解作用の影響度は同程度であるが、中砂以下の細粒な粒子の多い当幌火山灰土では、凍結融解作用が保水性に及ぼす影響度は相対的に低い。

(4) 不飽和三軸圧縮試験

a) 含水状態の影響評価

図-2.10に、柏原火山灰土の三軸圧縮試験における等方圧密後のサクシオン s と飽和度 S_f の関係を示す。図から、基底応力 σ'_{net} が異なっても本試験の範囲では水分特性曲線はほぼ同一であった。このため、 σ'_{net} によらず残留飽和度の値を $S_{r0}=24.5\%$ と仮定した。図-2.11および図-2.12に、式(2.5)により求めたせん断抵抗角 ϕ' および細粒分増加量 ΔF_c ($=F'_c - F_{c\text{initial}}$ 、ここで、 F'_c : 試験後の細粒分含有率、 $F_{c\text{initial}}$: 試験前の細粒分含有率)と飽和度 S_f の関係を示す。各基底応力 σ'_{net} の試験結果とも、飽和度 S_f の上昇に伴いせん断抵抗角 ϕ' は減少し、細粒分増加量 ΔF_c は増加した。

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{\max} \quad (2.5)$$

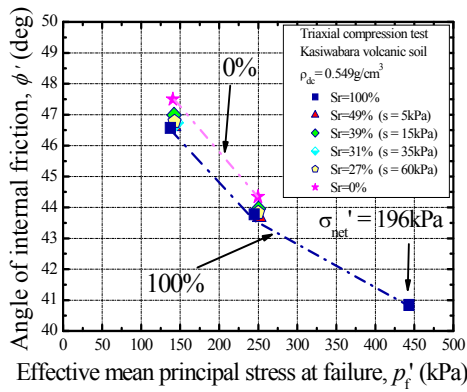


図-2.13 せん断抵抗角 $\sim p_f'$ 関係

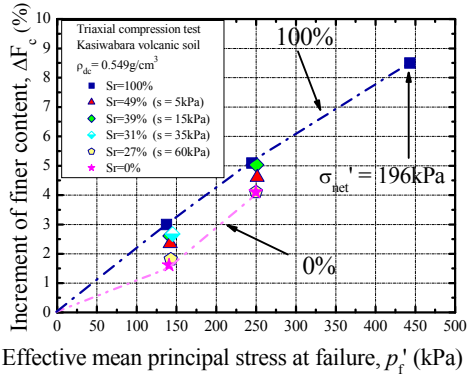


図-2.14 細粒分増加量 $\sim p_f'$ 関係

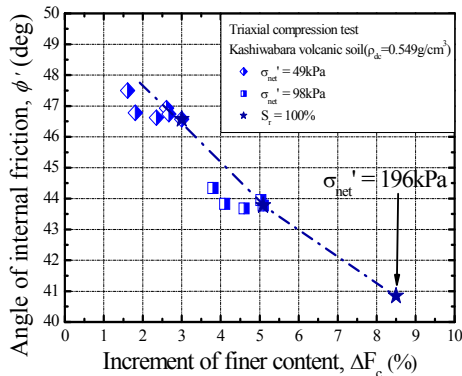
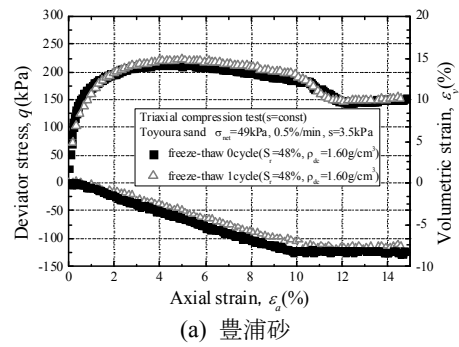


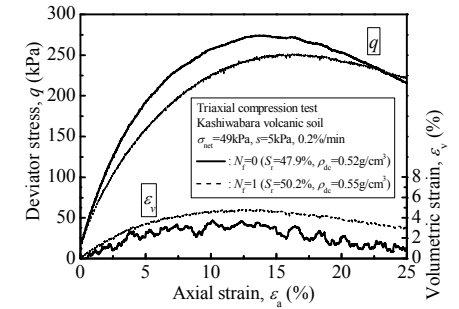
図-2.15 せん断抵抗角 \sim 細粒分増加量関係

図-2.13 および図-2.14 に、せん断抵抗角 ϕ' および細粒分増加量 ΔF_c と破壊時の平均有効主応力 p_f' ($=(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$)の関係を示す。不飽和状態でのせん断抵抗角 ϕ' は、飽和状態の ϕ' よりも高く乾燥状態の ϕ' よりも低い値を示し、細粒分増加量 ΔF_c は、飽和状態の ΔF_c よりも低く乾燥状態の ΔF_c よりも高い値を示した。このことから、飽和度の上昇に伴い、粒子破碎は生じ易くなり強度は低下する傾向にある。

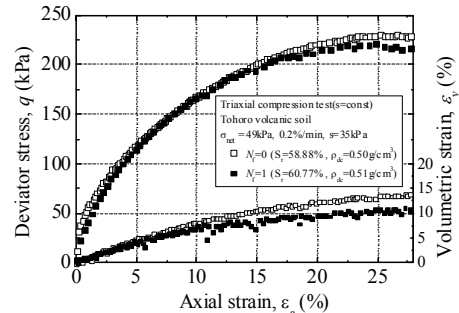
図-2.15は、異なる含水状態の全試験結果から得られたせん断抵抗角 ϕ' と細粒分増加量 ΔF_c の関係である。図中の点線は飽和土の三軸圧縮試験結果から得られた $\phi' \sim \Delta F_c$ 関係である。図から、ばらつきは若干見られるものの、供試体の飽和状態(飽和度 S_r)や応力状態(基底応力 σ_{net}')に拘わらず細粒分増加量 ΔF_c が増加するとせん断抵抗角 ϕ' が減少するという関係が確認できる。



(a) 豊浦砂



(b) 柏原火山灰土



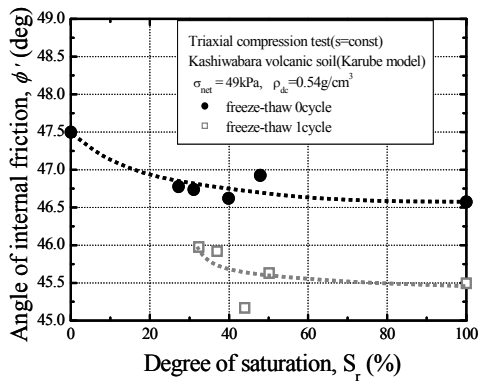
(c) 当幌火山灰土

図-2.16 応力 \sim ひずみ関係に及ぼす凍結融解履歴の影響

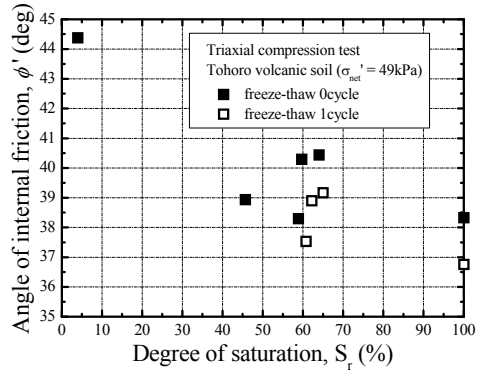
以上の結果より、破碎性火山灰質粗粒土についても、既往の研究⁶⁾により提案されている有効応力式が適用できると考えられる。また、含水状態が粒子破碎特性に影響を与え、その結果強度特性も含水状態に応じて変化すると指摘できる。なお、その主たる原因は、せん断中の粒子破碎量の増加であると考えられる。

b) 凍結融解履歴の影響評価

図-2.16は、凍結融解履歴を与えた不飽和状態の豊浦砂と柏原・当幌両火山灰土の応力 \sim ひずみ関係とダイレイタンス特性を、凍結融解過程を省いた試験結果と比較したものである。豊浦砂では、凍結融解による密度変化が生じなかったため圧密後も密度一定であり、凍結融解履歴の有無により応力 \sim ひずみ関係、体積変化挙動に大きな違いが認められなかった。一方、試験に用いた両火山灰土とも非凍上性材料であるが、凍結融解作用により粒子破碎が生じ、次第に粒子構造が密実化した。また、密度が増加したにも関わらず、履歴を受けていないものと比較して履歴を受けた供試体はピーク強度が低下した。図-2.17は、異なる凍結融解履歴・含水状態にある柏原火山灰土と当幌火山灰土の試験結果から得られた、せん断抵抗角 ϕ' \sim 飽和度 S_r 関係である。含水状態の影



(a) 柏原火山灰土



(b) 当幌火山灰土

図-2.17 φ' ~ Sr 関係に及ぼす凍結融解・含水状態の影響

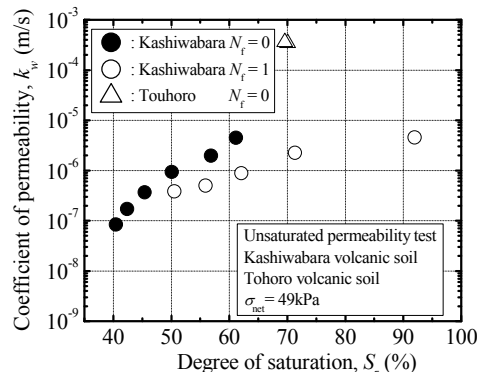
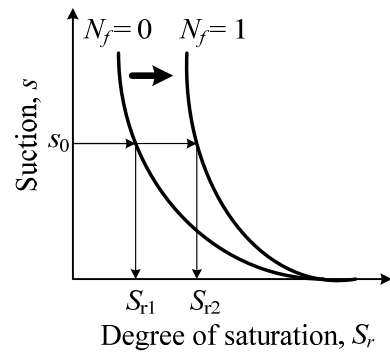


図-2.18 不飽和透水係数に及ぼす凍結融解履歴の影響

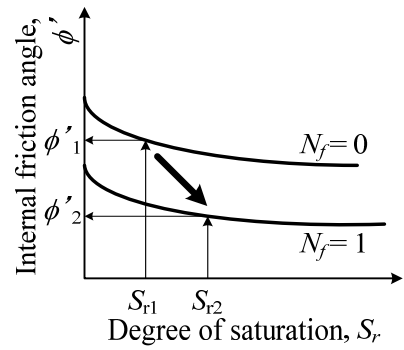
響については、ばらつきは若干見られるものの、凍結融解履歴の有無に拘わらず、不飽和状態でのせん断抵抗角 ϕ' は、飽和状態の ϕ' よりも高く乾燥状態の ϕ' よりも低い値を示し、飽和度 S_r の上昇に伴いせん断抵抗角 ϕ' は減少する傾向にある。一方、凍結融解履歴の影響については、凍結融解履歴を受けたものは受けていないものと比較して、同一飽和度におけるせん断抵抗角 ϕ' が低下した。また、凍結融解履歴の影響による低下割合の方が、含水状態の影響よりも大きい。以上の結果より、破砕性火山灰質土では、凍結融解作用が粒子破砕特性に影響を与える結果、強度特性も凍結融解履歴に応じて変化すると考えられる。

(5) 不飽和透水試験

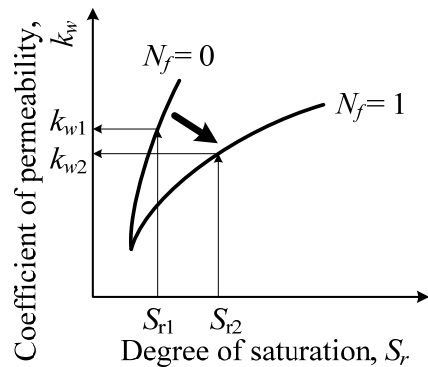
図-2.18 は、凍結融解履歴を与えた柏原火山灰土の



(a) 水分保持特性



(b) 不飽和強度特性



(c) 不飽和浸透特性

図-2.19 凍結融解作用による破砕性火山灰質土の力学特性の変化

不飽和透水試験から得た不飽和透水係数 k_w ~ 飽和度 S_r 関係 (排水過程) を、凍結融解過程を省いた試験結果と比較したものである。豊浦砂では、不飽和浸透特性に及ぼす凍結融解履歴の影響はほとんど認められなかった。一方、柏原火山灰土では、同一飽和度で不飽和透水係数を比較した場合、凍結融解作用を受けた供試体の不飽和透水係数は、凍結融解過程を省いた試験結果に比べて低下した。以上の結果より、凍結融解作用により粒子破砕が生じ、粒径の減少や細粒分の増加が発生する破砕性火山灰質粗粒土では、凍結融解作用により粒度が変化する結果、破砕性粒体の水分保持能力が高まり、不飽和浸透特性が低下したと考えられる。

2.4 研究成果のまとめ

火山灰質粗粒土の凍結融解不飽和三軸圧縮試験・

凍結融解保水性試験・凍結融解不飽和透水試験を実施し、凍結火山灰質土斜面の融解時の力学挙動を検討する地盤材料の試験法を提案するとともに、火山灰質粗粒土の凍結融解現象を把握し、不飽和土の静的力学特性（浸透特性を含む）に及ぼす凍結融解履歴（温度履歴）・含水状態の影響を評価した。検討の結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 非凍上性の火山灰質粗粒土でも破砕性を有する場合には、凍結融解作用によりその構成粒子の破砕性は顕著となり、凍結時に粒子破砕が生じ融解時に体積収縮する結果、密度が増加するにも関わらず、不飽和土の剛性や強度は低下し、保水性は高まり、透水性は低下した。
- 2) 凍結融解履歴が粒子破砕性に及ぼす影響は、低圧密レベルで顕著となり、ある圧力以上でその影響は消失する。このことは地盤凍結が生じる斜面の表層部において地盤材料の力学的劣化が引き起こされ易い傾向にあることを示している。
- 3) 融雪期に急速な気温上昇や降雨が発生した場合、破砕性火山灰質土斜面では、凍結融解作用によって保水性が高まり透水性が低下する結果、表層地盤内の水分移動が妨げられ、土塊自重の増加・間隙水圧の上昇・せん断強度の低下が複合して発生し、斜面崩壊が発生し易くなる（図-2.19）。

以上の結果から、融雪期における積雪寒冷地の破砕性火山灰質土斜面の崩壊機構を解明し、当該地盤の凍結融解に起因する斜面崩壊の危険度判定・安全性評価を実施するには、凍結融解（温度変化）による当該地盤材料の物理・力学特性（密度・粒度・強度変形特性・凍上性・破砕性・保水性・透水性 etc.）の変化と地盤内の土壌水分量分布の変化を評価する必要のあることが明らかになった。

参考文献

- 1) 宇野尚雄, 佐藤健, 杉井俊夫, 柘植浩史: 空気圧制御による不飽和砂質土の透水試験方法, 土木学会論文集, No.418/III-13, pp.115-124, 1990.
- 2) 阿部廣史: 不飽和土の力学特性の評価手法に関する実験的研究, 東京大学博士論文, pp275-285, 1994.
- 3) 中野裕二郎, 北村良介: 試作不飽和透水試験装置による保水・透水試験, 第40回地盤工学研究発表会講演集, pp.1327-1328, 2005.
- 4) 中田 隆文, 三浦 清一: 火山灰質粗粒土の粒子破砕による間隙構造の変化と定量化に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 1, pp.224-236, 2007.
- 5) 三浦清一, 八木一善: 火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破砕とその評価, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.257-269, 1997.
- 6) Bishop, A. W.: The principal of effective stress, Teknisk Ukeblad, Vol.39, pp.859-863, 1959.
- 7) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.83-92, 1996.

第3章 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の検討

3.1 研究概要

現在、北海道にある多くの斜面の表層崩壊は、春季では凍結層が不透水層として作用することによって誘発されること、また夏季では凍結層が融解することに起因する斜面構造の劣化によって誘発されることが報告されており¹⁾(図-3.1)、それゆえ、凍結融解作用が斜面の力学挙動に及ぼす影響を定量的に評価した総合的な検討が必要である。

ここでは、北海道に広く分布している火山灰質土が基岩上に堆積した斜面およびその土質材料によって構成された切土・盛土形状の斜面構造を想定し、まず降雨時の斜面崩壊に及ぼす諸要因の影響を調べ、より詳細な力学的視点から表層崩壊の誘因を議論している。次いで、春季、夏季に起こる斜面崩壊現象を解明するために、一連の凍結融解履歴を与えた降雨模型実験を実施し、履歴の有無が降雨時の斜面力学挙動に及ぼす影響を調べている。得られた結果より、降雨による斜面崩壊と斜面内の保水特性の変化ならびに体積変化(ダイレイタンス特性)にもとづいて崩壊機構が説明され、簡易危険度評価法に関わる基礎データが収集されている。

3.2 模型実験の方法と斜面崩壊の定義

(1) 試験装置と模型実験の方法

本研究で用いた試験装置の全体図を図-3.2に示す。模型土槽の内寸法は幅 2000mm、高さ 700mm、奥行き 600mm である。前面には厚さ 20mm の強化ガラスが設置され、人工降雨付与に伴う斜面の変形挙動が観察できるようになっている。なお、本研究ではグリース塗布などによる土槽側面の摩擦除去は

行っていない。

本研究で使用した試料は火山性粗粒土に分類される支笏カルデラを噴出源(支笏第一テフラ(Spfa-1))とする柏原火山灰土($\rho_s=2.34\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=0.553\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=0.352\text{g/cm}^3$, $\rho_{din-situ}=0.530\text{g/cm}^3$, $D_{50}=1.25\text{mm}$, $U_c=3.1$, $F_c=1.3\%$)と摩周カルデラを噴出源とする当幌火山灰土($\rho_s=2.59\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=0.85\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=0.52\text{g/cm}^3$, $\rho_{din-situ}=0.44\text{g/cm}^3$, $D_{50}=7.60\text{mm}$, $U_c=7.0$, $F_c=1.3\%$)である。なお、各火山灰土の物理・力学特性は既往の研究^{例えぼ²⁾}に詳しい。

本研究では、所定の含水比に調整した試料を、柏原火山灰土では $\rho_d=0.45\text{g/cm}^3$ (緩詰め)と $\rho_d=0.48\text{g/cm}^3$ (密詰め)、当幌火山灰土では $\rho_d=0.44\text{g/cm}^3$ (原位置密度)になるように模型斜面を作製している。なお、密度のバラツキは、それぞれの目標密度の5%以内である。

以下に作製手順を示す。

- 1)緩詰めの場合：所定の模型斜面になるようにアルミサッシを設置し、試料を空中より落下させて堆積させる。
- 2)密詰めおよび原位置密度の場合：1)と同様に試料を堆積させた後、粒子破砕が起こらないように、ローラーで1層当たり(厚さ10cm)1回の締固めを行う。
- 3)所定の高さまで試料を堆積させ、その後、アルミサッシの上に鋭利な刃先を有する鉄板を滑らせながら、余分な試料を取り除く。

凍結融解履歴を与えた場合では、上記と同様の方法で斜面を作製した後、その表面を斜面と同形状の鉄板で覆い、その上にドライアイスを設置し、8時間強制的に凍結させている。一例として、写真-3.1と図-3.3は、凍結後の柏原火山灰土斜面の状況とその凍結融解中の斜面内の温度変化を、後述する位

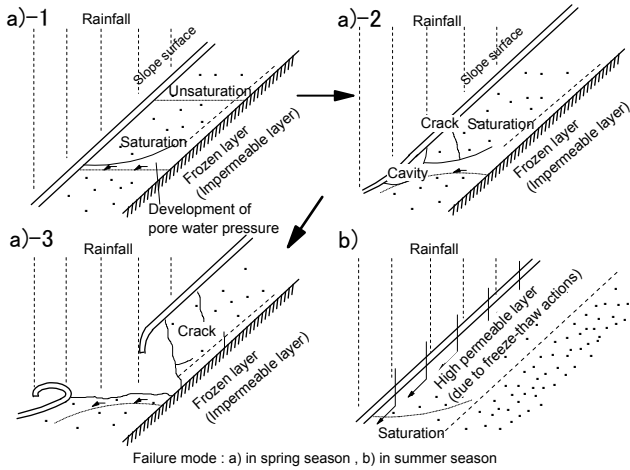


図-3.1 積雪寒冷地にある切土斜面の崩壊モード¹⁾；
(a)春季型災害，(b)夏季型災害

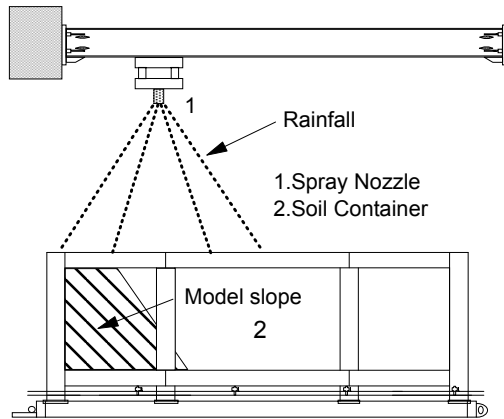


図-3.2 本試験で用いた模型実験装置

置に設置した熱電対センサー (T1~T9) によって計測したものである。図示のように、深さ 50mm までマイナス温度になっているが、目視ではおよそ 80mm まで凍結が確認されている³⁾。一方、当幌火山灰土では 30mm までの凍結が確認されている⁴⁾。また、融解は基本的に室温 20℃で与えている。融解過程における斜面内からの水分供給(移動)は初期含水比の状態下における保水分によって与えており、地下水面を設定するといった操作は行っていない。本試験で称する融解履歴とはこのような履歴を指す。

本研究では、斜面崩壊機構を把握するためのパラメータとして、間隙水圧、飽和度、Particle Image Velocimetry (PIV) 解析⁵⁾によって算出される斜面内のせん断ひずみを用いている。間隙水圧および飽和度は、間隙水圧計 (pw1~pw6) と土壌水分計 (sm1~sm6) によって計測されている。得られた間隙水圧挙動では、ほとんどのケースにおいてサクシオンに伴う負の間隙水圧は生じなかった。そのため、サ

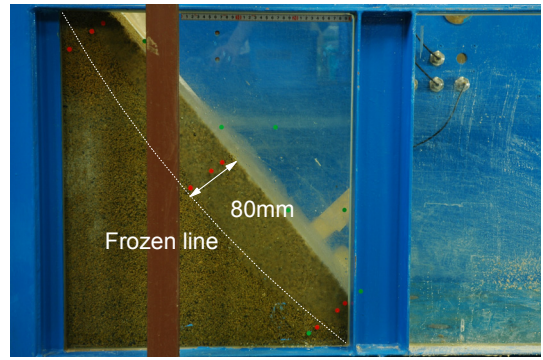


写真-3.1 凍結後の斜面の状況

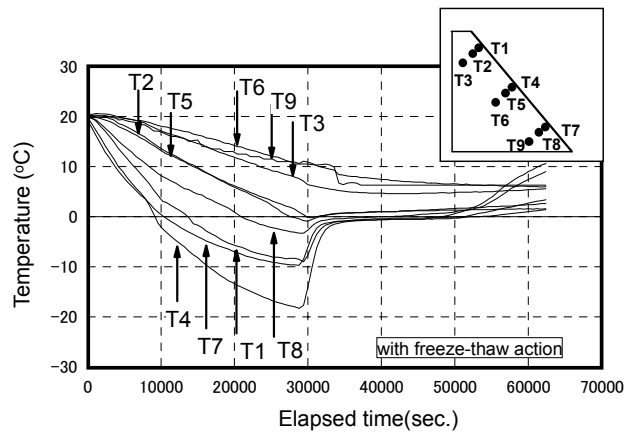


図-3.3 凍結融解時の斜面内の温度変化
(柏原火山灰質土斜面)

クシオンの崩壊に対する寄与はかなり低いと考えられる。このことは、サクシオンの低下によるせん断強度の低下を調べた要素試験結果からも明らかにされている⁶⁾。これらの事実から、本試験の対象となるところは浸透現象にともなう間隙水圧(正圧)変動になる。一方、土壌水分計は斜面の密度を種々変化させた状態でキャリブレーションを行い、初期模型斜面密度に対応できるようにしているが、すべりに伴う体積変化の影響に関しては現象把握の困難さから考慮していない。以下の議論では、飽和度の具体値ではなく、その傾向の把握を第一の目的にした。模型斜面の代表的な形状と計測機器の設置位置を図-3.4に示す。

実施した降雨実験は、柏原火山灰土では①不透水層が斜面内に存在するケース、②斜面内に凍結層が存在するケース、③斜面の初期含水比を変化させたケースと④凍結融解履歴を与えたケースであり(表-3.1)、当幌火山灰土では③斜面の初期含水比および斜面角を変化させたケースと④凍結融解履歴を与えたケースである(表-3.2)。

①不透水層が存在するケース (Case1~Case5) で

表-3.1 試験条件と試験ケース（柏原火山灰質土斜面）

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10	
Slope condition	Without freeze-thaw action					With freeze action			With freeze-thaw action		Without freeze-thaw action
Freeze-thaw action cycles						1			1, 2		
Slope angle α (°)	45	50	55	65	50	50	55		65		65
Initial moisture content w_0 (%)	70								20,40,55,60,70		20,40,55,60,70
Length of base B (mm)	696	636	572	442	603, 636, 669, 702, 767	767	702	552	442		442
Rainfall intensity R (mm/h)	100, 60			100	100				100		
Thickness of layer t (mm)	100				75, 100, 125, 150, 200	100	50	100			
Density ρ_d (g/cm ³)	0.45, 0.48			0.45, 0.48	0.45				0.45, 0.48		
Friction μ	0.33, 2.81			4.31	0.33	4.31					
Thaw time(hr.)									9,12,40		

表-3.2 試験条件と試験ケース（当幌火山灰質土斜面）

	Case11	Case12	Case13	Case14	Case15	Case16	Case17	Case18	Case19	Case20	
Slope condition	without freeze-thaw action					with freeze-thaw action					
Slope angle (°)	50	55	60			65			50		
Initial moisture content(%)	65					100	45	100	65	45	65
Rainfall intensity R (mm/h)						100					
Dry density ρ_d (g/cm ³)						0.44					
Thaw time(hr.)						12					

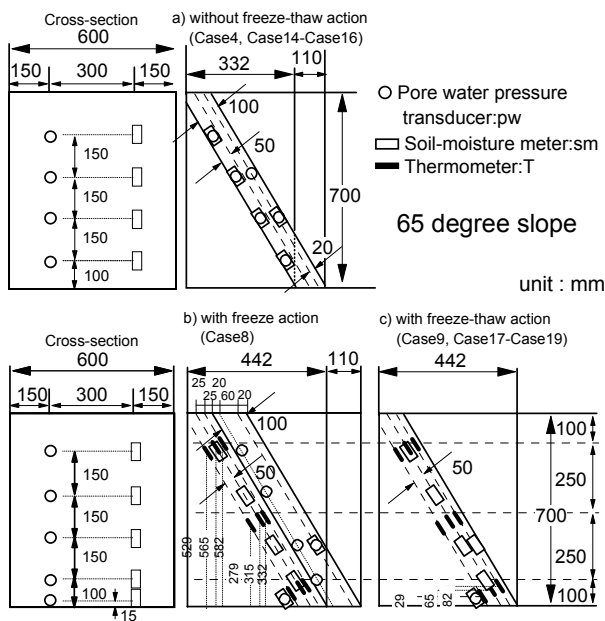


図-3.4 代表的な斜面形状と計器配置図

は、不透水層がある層厚の下で斜面表面と平行して存在していると仮定し、強度が十分にある不透水性の材料を用いることによって、簡易的に再現した。試験では斜面角、降雨強度、斜面密度、不透水層境界部の摩擦係数³⁾、斜面層厚の違いによる力学挙動の変化を調べている。

②斜面内に凍結層が存在するケース（Case6～Case8）では、3種類の斜面角について①と同様の試験を実施し、凍結層が不透水層として働くのか否かを検討している。

③斜面の初期含水比 w_0 を変化させたケースでは、初期含水比の違いが崩壊機構に及ぼす影響を調べている（Case10, Case14～Case16）。なお、初期含水比の違いが崩壊挙動に及ぼす影響を極力小さくするために、すべての模型実験は斜面作製後 30 分から開

始し、併せて初期飽和度のバラツキは約 5%以内のものを採用した³⁾。なお、当幌火山灰質土斜面については、盛土形状に対する斜面角の違いに対する力学挙動の変化も併せて調べている（Case11～Case13）。詳細は既報に詳しい⁴⁾。

④凍結融解履歴を与えたケース（Case9, Case17～Case20）では、融解速度の違いによる力学挙動の変化を併せて調べている（Case9）。

試験手順を以下に示す。

- 1) GL.+2.4 m に設置したスプレーノズルの種類、位置、水圧を変化させて、所定の降雨強度 R (=100, 60 mm/h) になるように調節する。
- 2) 模型斜面作製後、図-3.2 に示すスプレーノズルから水を噴霧すると同時に、土壌水分量、間隙水圧の測定を開始する。凍結融解履歴を与えるケースでは、凍結開始と同時に土壌水分量および熱電対センサーにより斜面内温度の測定を開始する。融解後、降雨試験を行う際はスプレーノズルから水を噴霧すると同時に、間隙水圧の測定を開始する。
- 3) 降雨を開始してから斜面形状に明瞭な変形（崩壊）が現れるまで、または 1 時間の降雨履歴を与えるまで、実験を続けている。

なお、降雨によって浸透した水は、底部に設置したポンプから強制的に排水されている。また、斜面以外に降った雨については、全土槽エリアをシートで覆い、雨樋を通じて集水されている。本研究では、この降雨量（スプレーノズルから噴霧したすべての水量）とポンプから排水した水量及び雨樋より集水した水量の差を斜面内保水量 V_w と定義している。

(2) 斜面崩壊の定義

過去の研究³⁾では、すべり線上に位置する土壌水

分計の飽和度がピークに達した 5~10 秒後に斜面崩壊が生じている。試料や後述する斜面角, 降雨強度, 密度, 摩擦係数の違いにかかわらず, すべて満足されていたことから, この時点をも塑性平衡状態と判断している。一方, 間隙水圧挙動では, 斜面変状が見られた時点の間隙水圧の変化は, 飽和度の変化と比べて敏感ではなかった³⁾。よって, 一連の研究では, 飽和度ピーク時に斜面内のせん断ひずみが 4~6% になった時点をも斜面崩壊と定義し, 以降の議論に用いている。

3.3 試験結果と考察

(1) 斜面表層崩壊を引起す各影響因子の力学的相互関係

一連の模型実験結果から, 特に斜面崩壊は不透水層境界部の摩擦や斜面角の違いに影響されていることが明らかにされた。ここでは得られたデータ³⁾にもとづいて, その崩壊を引起す影響因子の関係を以下のように整理する。

図-3.5(a), (b) と(c)は柏原火山灰土で得られた斜面角と崩壊までの総雨量との関係を示したものである。ばらつきはあるものの, 斜面角が高くなるにつれて総雨量が減少する傾向が各パラメータとの関係において認められる。回帰直線の勾配に着目すると, 降雨強度と摩擦係数の影響が大きいようである。特に, 65° 斜面では降雨強度, 摩擦係数の影響が明確に現れ, 力学的安定を議論する上では重要な極値ポイントになっている³⁾。また, 当幌火山灰土斜面においても同様の結果が得られている⁴⁾。このような斜面角と総雨量の関係は実フィールドにおいても指摘されており, 本試験結果は, 一般的に言われている降雨時の崩壊現象を定性的に表現しているものと言える。それらの関係を示すと以下ようになる。

$$\alpha = a_i R_i + b_i \quad (3.1)$$

α は斜面角, R_i は総雨量, a_i と b_i はそれぞれ密度, 降雨強度, 摩擦係数との関係から決定される係数である。このような関係を得ることができれば, 対象とする斜面の降雨による崩壊を簡易に判断することができることになる。

次に, 崩壊時の斜面角と不透水層境界部の摩擦係数の関係を図-3.6に示す。図は, 物理的意味が同等な条件になるように, 斜面角 ($\tan \alpha$) と不透水層境界部の摩擦係数 μ により整理している。図中には

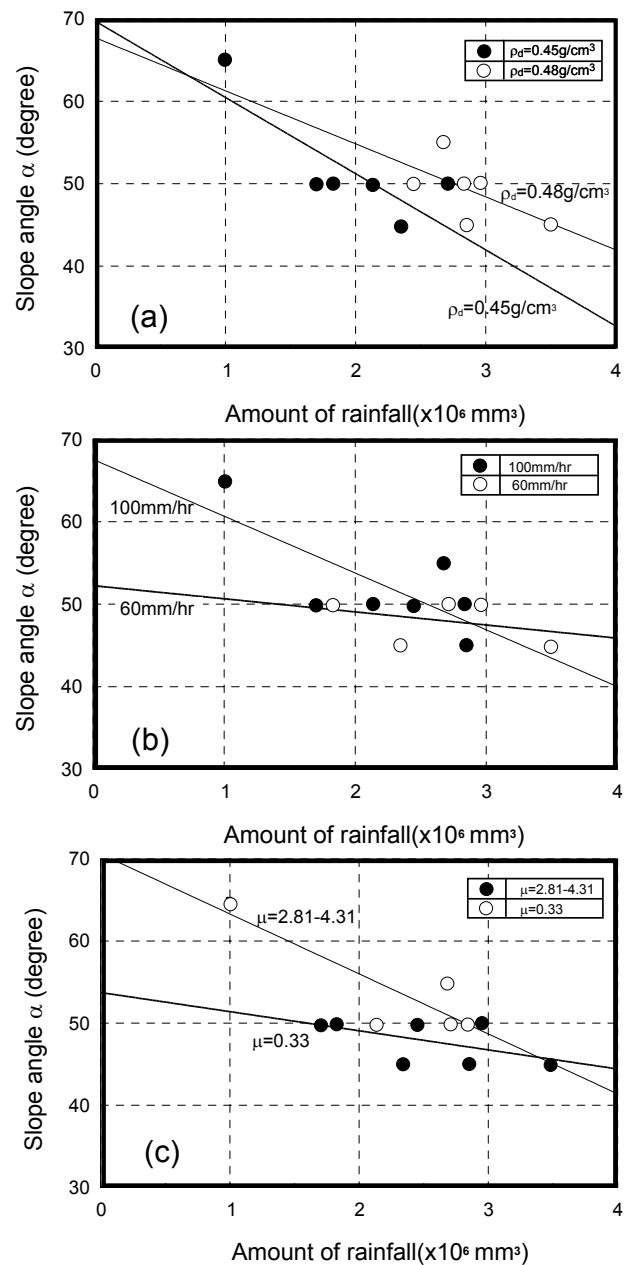


図-3.5 斜面角と崩壊までの総雨量との関係 ; (a)密度, (b)降雨強度, (c)摩擦係数

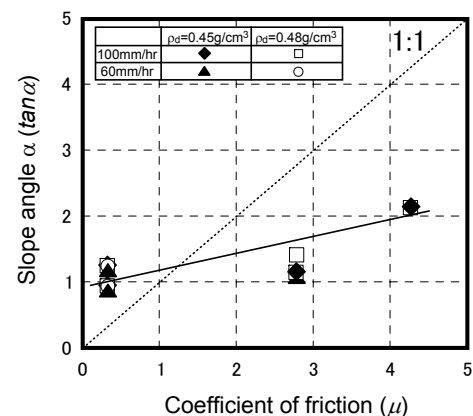


図-3.6 崩壊時の斜面角と摩擦係数の関係

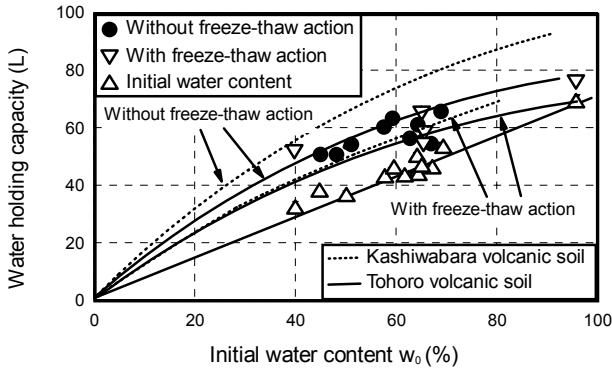


図-3.7 崩壊時の斜面角と摩擦係数の関係

1 : 1 の対応線も併記している。図からわかるように、降雨強度・密度の違いにかかわらず、崩壊時の斜面角と摩擦度の間には右上がりの一義的な関係が存在している。摩擦係数 μ がおおよそ 1.2 以下では崩壊に対する摩擦係数の影響が大きく、1.2 以上では摩擦係数よりも斜面角の方が斜面崩壊に寄与していることがわかる。式(3.1)と同様に、その関係を整理すると、以下のように表わされる。

$$\alpha = \tan^{-1}(c_i \tan \phi + d_i) \quad (3.2)$$

ここで ϕ は内部摩擦角、 c_i と d_i はそれぞれ図より得られる係数となる。このように、斜面角の大きさを把握することは不透水層の摩擦の崩壊に対する相互関係を明らかにすることができることを示しており、このことはさらに力学的に、合理的な崩壊の評価をすることが可能であることを示唆している。

(2) 斜面内不飽和力学挙動からみた表層崩壊機構

ここでは、斜面崩壊に及ぼす素因、すなわち火山灰質土斜面内の保水能力と崩壊機構との関係を定量的に議論している。

図-3.7は試験開始からピークまたは定常になるまでの斜面内保水量 V_w と初期含水比 w_0 との関係を示してみた。図中には、柏原のデータ³⁾に当幌のデータを加筆し、後述する凍結融解履歴有の場合もプロットしている。なお、△印は初期含水比の増加に伴う保水量の増加を示す。図より、例えば柏原火山灰土では $w_0=40\%$ 以上になれば、崩壊に至る保水量の増加量はほぼ一定になっている。また、両者ともに全保水量と初期含水比の間にユニークな関係が存在している。このように、初期含水比 w_0 によって崩壊保水量が一義的に決定されていることは興味深い。

以上のことを総合すると、本試験の範囲では、斜面表層崩壊は不透水層等の基部からの水位上昇では

なく、飽和度の発達仕方(保水量の変化)に強く影響されていることが明白であると言えよう。また、図示は省略するが、初期含水比の違いによってすべり線の発生位置に影響を及ぼすことが定量的に示されている³⁾。特に、この保水能力は初期含水比に依存し、飽和度の上昇にともなってその増加割合は一定になっている。Ishikawaら⁷⁾は柏原火山灰土試料の不飽和力学挙動を要素試験より調べ、その結果、飽和度が60%以上(初期含水比40%以上)になればサクションが消失することを示している。この事実は、初期含水比が低い場合では、不飽和透水係数が小さくなるため斜面内に保持される水量は小さくなることを示唆するものであり、前述の本模型実験を良く表現したものであろう。いずれにしても、このことからサクションの変化や飽和度の変化を把握することは斜面表層崩壊予知ならびに崩壊機構を把握する上で重要であることが明らかにされたと言える。

(3) 凍結層の存在が斜面表層崩壊に及ぼす影響

次に、斜面内に凍結層を設けた場合について、同様の降雨試験を行った(Case6~Case8)。この試験では、8時間凍結させた斜面の上に層厚 $t=50\text{mm}$ または 100mm の試料を30分以内に堆積させて降雨試験を行っている。

写真-3.2と図-3.8は、柏原火山灰土斜における凍結斜面の摩擦係数と基本的に同じ摩擦係数($\mu=4.31$)として考えられる不透水層のケース(Case4)と、凍結面上に試料を堆積させたCase8の斜面形状及び飽和度ピーク時の斜面内のせん断ひずみ分布を示したものである。試験条件は斜面角 $\alpha=65^\circ$ 、降雨強度 $R=100\text{mm/h}$ 、斜面密度 $\rho_a=0.45\text{g/cm}^3$ である。なお、PIV解析は写真の四角形で囲まれた範囲(白線内)が対象である。図からわかるように、両ケースにおいても飽和度ピーク時における斜面内のせん断ひずみ分布に顕著な差異は認められない。図示は省略したが、崩壊後の両者の斜面形状(すべり土塊の堆積角)も同様の变形パターンであった。これらのことから、凍結層を不透水層とする場合と摩擦係数 $\mu=4.31$ の不透水層を設置した場合³⁾とでは变形挙動に違いがないようである。

一方、飽和度挙動について着目すると(図-3.9)、凍結過程では凍結の影響がある表層付近(sm1~sm5)の飽和度は徐々に減少している。この減少は、凍結による水分移動ならびに間隙自由水が凍結することによる誘電率の低下の両者が影響しているが、主たる要因は水分移動によることが予備実験において確認されている。

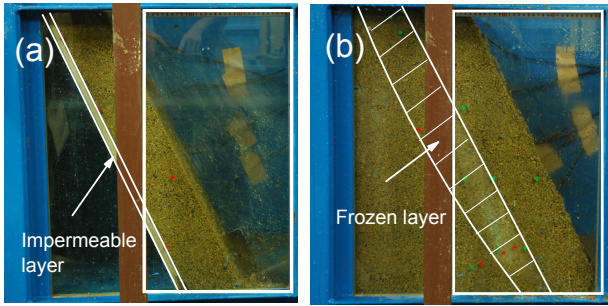


写真-3.2 試験前の斜面の状況；(a)不透水層，
(b)凍結層

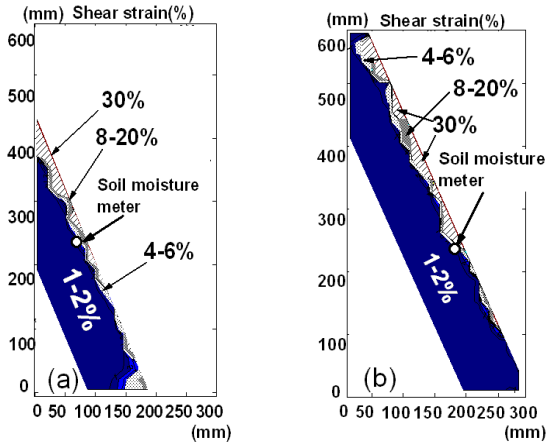


図-3.8 飽和度ピーク時のせん断ひずみ分布；
(a)不透水層(Case4)，(b)凍結層(Case8)

降雨開始から崩壊までの挙動では、前述の不透水層と同様、すべり線発生位置付近の飽和度 (sm4) は徐々に上昇し、ピークに到達した後、急激に減少していることが確認される (図-3.10)。それゆえ、このことは、春季に起こりうる斜面表層崩壊では凍結層が不透水層として働くことが崩壊誘因の1つになる可能性があることを示したものであろう。

(4) 斜面表層崩壊に及ぼす凍結融解履歴の影響

北海道のような積雪寒冷地では、冬季間に地盤が凍結し、春季の気温上昇によって融解するといった現象が繰返されている。ここでは、凍結融解履歴を与えた模型斜面の崩壊モードの変化を明らかにした (Case9, Case-17~Case20)。

前述の図-3.3 に、凍結融解過程における柏原火山灰質土斜面の温度変化を示す。斜面は $\alpha=65^\circ$ 、ドライアイスで8時間凍結させた後、室温30℃、湿度60%の下、9時間で融解させたものである。図より、柏原火山灰土では、Case6 から Case8 と同様、凍結開始から8時間 (28,800秒)後に斜面表層から50mmの深さまで凍結していることがわかる。また融解開始から7時間 (凍結融解過程で54,000秒)後

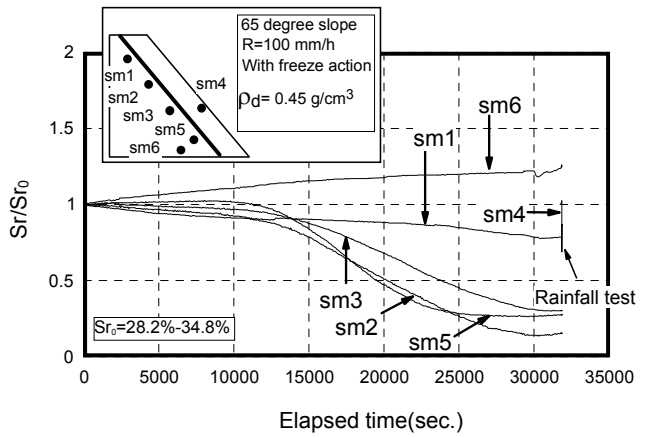


図-3.9 凍結時の飽和度の変化

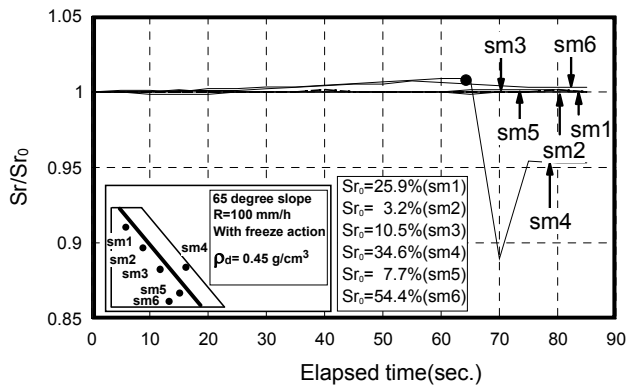


図-3.10 降雨実験中の飽和度挙動

に温度センサーの値は、 0°C 以上になっている。一方、当幌火山灰土では凍結開始から8時間 (28800秒)後に、斜面表層から25mmの深さ (T4, T7)まで 0°C 以下に達し、約30mm以深は凍結しなかった⁴⁾。両火山灰土における予備実験では温度計の値が 0°C 以上になっても、センサー周辺には凍結層が存在していたことから、凍結層が完全に融解するその2時間後、すなわち融解から9時間以降に降雨試験を行った。

図-3.11 に、柏原火山灰質土斜面の凍結履歴直後のせん断ひずみ分布を示す。図より、凍結履歴を受けたエリアでは、せん断ひずみが1~2%発生していることがわかる。また、斜面内に設置した密度変化計測用のモールドでは凍結過程によって斜面内に構造変化 (クラックの発生および密度変化) が現れていた (写真参照)。実際、斜面天端部においても凍結層の境界において目視できるクラックを確認している。このことは当幌火山灰質土斜面においても確認されている⁴⁾。

次に、降雨時の凍結融解履歴の有無による飽和度の変化を示す (図-3.12)。図より、履歴を与えた場合では、105秒で崩壊に至り (b)図)、凍結融解履

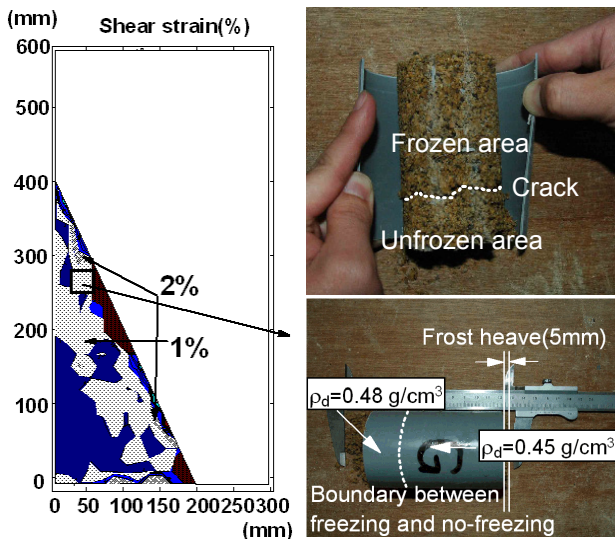


図-3.11 凍結後のせん断ひずみ分布と斜面内に設置した密度変化用モールドの状況

歴を与えない場合では 876 秒で崩壊に至った ((a) 図). この時の斜面内の代表的な飽和度 (sm4) の値は, 履歴有の場合では $S_r=26.6\%$, 履歴無の場合では $S_r=42.2\%$ に収束していた. この収束値の違いは, 前述の凍結融解履歴を受けた斜面の構造変化 (クラックの発生および密度変化) が生じたことに起因しているようである.

当幌火山灰土の凍結融解履歴有無における飽和度挙動を示す (図-3.13). 凍結融解履歴の有無による飽和度挙動を比較すると, 先ほどと同様, 履歴の有無にかかわらず, 飽和度は両者に差はあるものの, 崩壊直前に上昇していることがわかる. また, 崩壊時間で比較すると, 履歴有の場合は崩壊時間 364 秒であり, 履歴無の場合は崩壊時間 557 秒であった. このことから, 柏原と同様に, 履歴を受けることによって崩壊時間は確実に早くなり, またそれに起因して斜面の構造劣化が生じている可能性があると言える.

次に, 凍結融解履歴の回数の影響を示す. 積雪寒冷地では凍結融解履歴を経年受けていることから, 自然斜面や法面の安定性に及ぼす凍結融解履歴回数の影響を定量的に評価する必要がある. ここでは, 柏原火山灰質土斜面における凍結融解履歴回数の違いが変形特性に及ぼす影響を検討した.

山木ら⁸⁾は, 2007年12月8日~2008年4月1日の札幌市内の観測データにおいて冬期間の凍結融解履歴回数は6回であること, また一連の要素試験から凍結融解履歴回数の増加にともなう初期せん断剛性の変化は履歴1~2回程度で収束することを示している. この事実にもとづいて, ここでは履歴回数を2

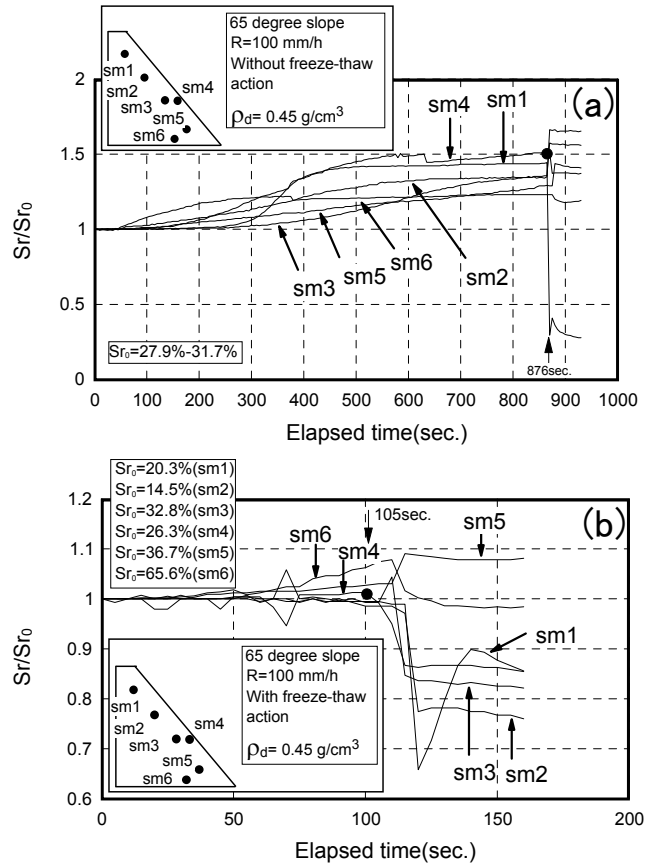


図-3.12 柏原火山灰土斜面の凍結融解履歴有無による降雨時の飽和度変化; (a)履歴無, (b)履歴有

回とした.

図-3.14 は, PIV 解析より算出した斜面内任意要素の変位ベクトル連結図である. 図中の $\Delta \varepsilon_{vi}$ と $\Delta \varepsilon'_{vi}$ は, それぞれ凍結開始から凍結後と凍結後から融解後の鉛直ひずみの増分を示し, i は履歴回数を意味する. 前述のとおり, 履歴1回目では, 変位は凍結過程において斜面表面に対して垂直方向に進み, 融解過程において重力方向 (y 方向) へ進行している. 履歴2回目の変位方向は履歴1回目の影響による斜面内構造の変化によって1回目よりもさらに重力方向へ進行し, そのひずみ量は小さくなっている. この現象は, 従来, 指摘されている事実^(例えば)と同様である. なお, 実測による凍結深さは, 1回目および2回目ともに約 80mm であり, 相違は認められなかった.

このことから, 山木らの研究結果⁸⁾と同様, 凍結融解履歴は変形特性に影響を及ぼし, その回数の影響は1回目が支配的であるこの凍結融解履歴によるダイレイタンス挙動は, 図-3.7 に示す保水量の変化からも明らかであり, 凍結融解履歴を与えることによって骨格構造に変化が生じていることを示唆するものであろう.

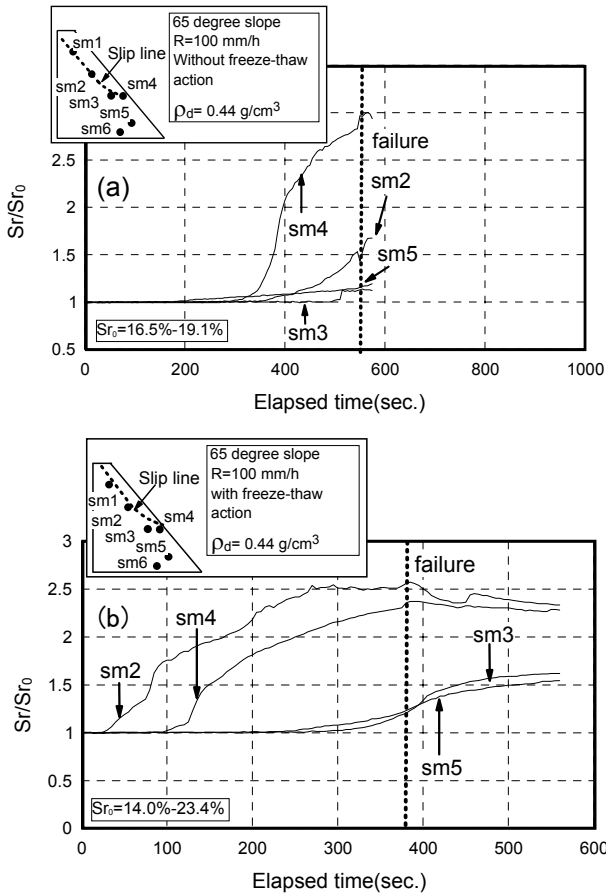


図-3.13 当幌火山灰土斜面の凍結融解履歴有無による降雨時の飽和度変化；(a)履歴無，(b)履歴有

図-3.15 と図-3.16 は PIV 解析から求めた凍結融解時の体積ひずみの変化を示したものである。それぞれ柏原火山灰土，当幌火山灰土のものを示す。柏原火山灰土では，斜面表層部において凍結初期に収縮傾向になり（(a)図），その後膨張傾向に転じるようである（(b)図）。本試料は凍上性の低い材料ではあるが，斜面内では，はじめに凍縮¹⁰⁾が起これ，その後局所的に霜柱が成長し，体積膨張に転じていると推測できる。このことは，図-3.11 中の写真の状況からも確認できる。融解終了後（(c)図）および2回目の凍結融解終了後（(d)と(e)図）では，その挙動はほぼ一定値に落ち着いており，表層部の体積ひずみゼロ領域の変化はほとんど見られない。なお，この領域の深さはすべり線の深さとほぼ一致している。

一方，当幌火山灰土では，表層部では凍結開始から凍結終了後まで膨張傾向を示し，凍結終了後までその影響領域は徐々に深部方向に拡大している。凍結終了後から融解終了後まではその変化はほとんど認められず，その影響領域は凍結深ならびにすべり線の深さとほぼ一致していた。

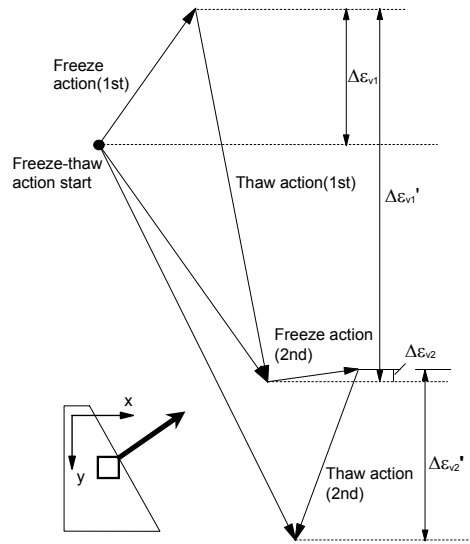


図-3.14 凍結融解履歴2回時のひずみベクトルの変化

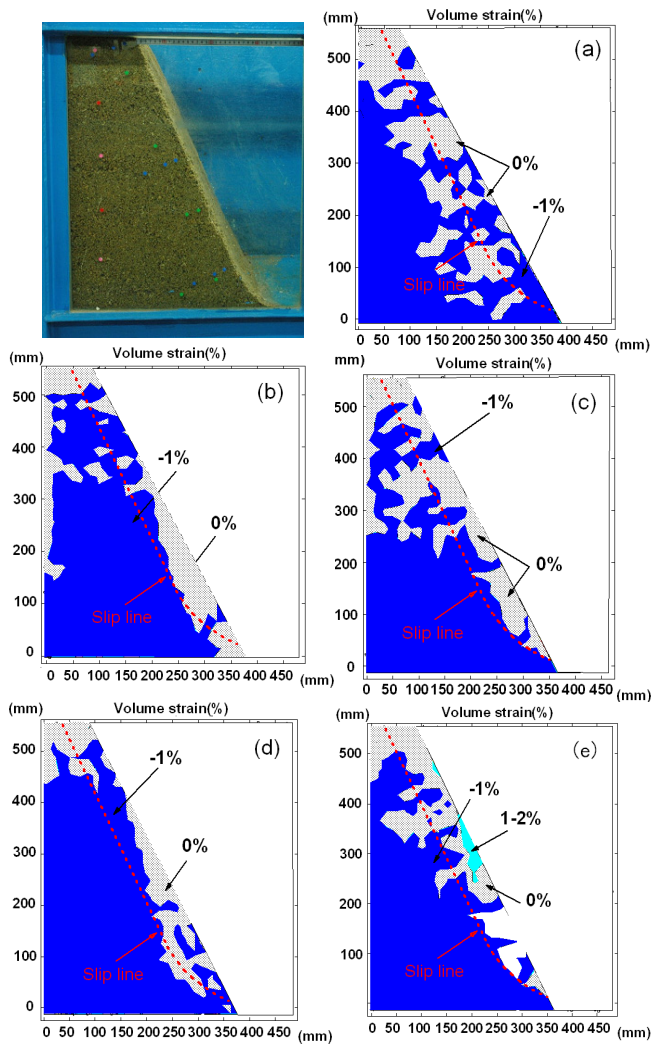


図-3.15 凍結融解中の体積ひずみの変化；(a)凍結後2時間，(b)凍結終了後(1回目)，(c)融解後(1回目)，(d)凍結後(2回目)，(e)融解後(2回目)，写真：凍結開始時点

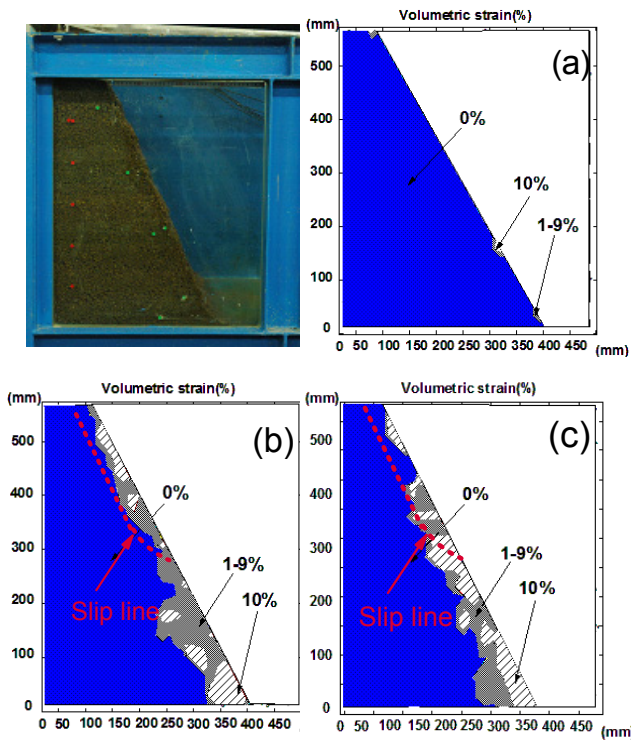


図-3.16 凍結融解中の体積ひずみの変化；
 (a)凍結後1時間、(b)凍結終了後(1回)
 (c)融解後(1回)、写真：凍結開始時点

図-3.17 は、Case9, Case17-Case20 における崩壊深さ(すべり線の深さ)と凍結深さの比較を示したものである。図より、初期含水比の違いによらず、両者に明確な相違は認められない。このことは、凍結深さからすべり線の発生位置を簡易に推定できることを示しており、興味深い事実である。

以上のことから、土質材料の違いに関わらず、凍結融解部は塑性平衡状態になっていると指摘できる。さらに、凍結融解履歴によって生じる体積変化特性(ダイレイタンスー特性)を把握することによってその影響度を一律に評価することが可能であると言えそうである。

次に、斜面崩壊機構に及ぼす凍結融解履歴・降雨履歴の影響を斜面内の細粒分に着目し、その増加量 ΔF_c (例えば 2) による更なる考察を行った。図-3.18 に凍結融解履歴有無における初期含水比の違いによる細粒分含有率の変化を示す。図より、本実験で用いた破碎性の強い試料(当幌火山灰土)は履歴無の場合では降雨によって粒子破碎が生じ、履歴有の場合では降雨による要因に加えて凍結融解履歴によって粒子破碎が生じていることが明らかである。また、その影響は凍結融解履歴による影響の方が大である。一方、柏原火山灰土においても同傾向は認められるものの、その影響はかなり小さい。よって、粒子破

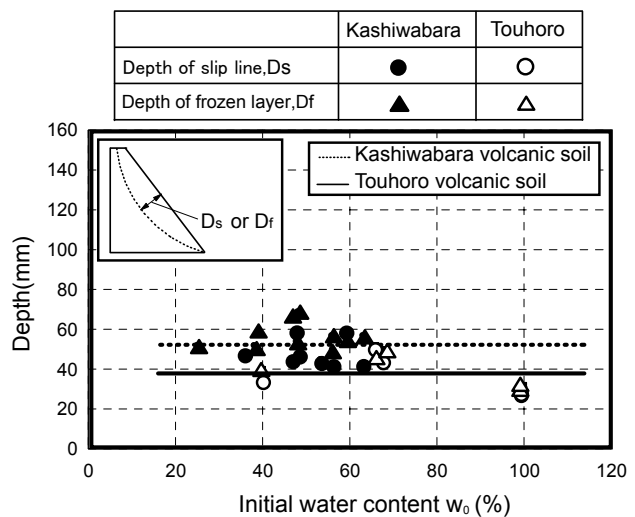


図-3.17 実測すべり線と凍結層の深さの関係
 (Case9, Case17-Case20)

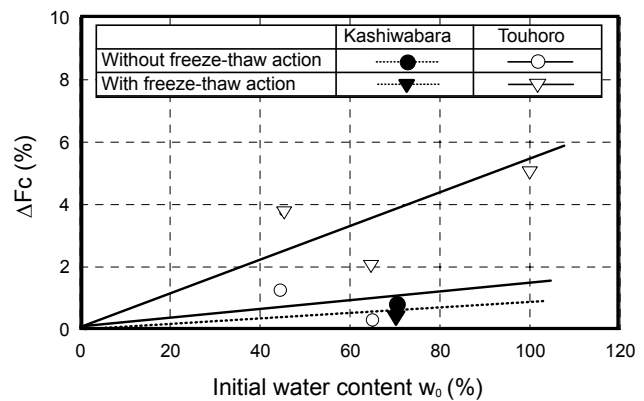


図-3.18 凍結融解履歴有無による細粒分含有率の変化

碎がもたらす圧縮変形や体積収縮は、確実に密実化や細粒化を引き起こしていると言える。結果として、斜面強度・剛性の低下が導かれていると推測される。

以上のことから、凍結融解履歴による影響は、凍上による斜面骨格構造の変化のみならず破碎性に影響を及ぼすことが本模型実験から明らかにされた。

3.4 研究成果のまとめ

火山灰質土試料を用いた一連の模型実験より、限定された条件ではあるが、次のような結果を得た。

- 1) 火山灰質土斜面の表層崩壊は不透水層の斜面角、底部摩擦、降雨強度に影響されるが、斜面密度の影響は小さい。
- 2) 凍結・融解のような温度変化を受けた斜面は、その過程において、凍結層と非凍結層との境界の構造の変化によって崩壊が誘発される。

- 3) 凍結融解履歴の影響部は、塑性平衡状態に導かれるようであり、その評価は凍結・融解によるダイレイタンスー特性の変化を適切に把握することにより可能である。
- 4) 土質材料の違いならびに凍結融解履歴の有無にかかわらず、斜面崩壊時の保水量と初期の含水比の間には一義的な関係が存在する。このことから、凍結深さから崩壊深さを推定し、その深さに設置した土壤水分計から保水量を把握することにより、降水・融雪水による斜面崩壊の危険度を予測することが可能となる。

参考文献

- 1) 実務者のための火山灰土，北海道火山灰土の性質と利用に関する研究委員会，地盤工学会北海道支部，pp.65-75，2004.
- 2) 八木一善，三浦清一：破砕性火山灰地盤の力学特性の評価，土木学会論文集，No.757/III-66，pp.221-234，2004.
- 3) 川村志麻，三浦清一，石川達也，横浜勝司：寒冷地にある不飽和火山灰質土斜面の降雨模型実験による崩壊現象とその評価，土木学会論文集，No.3/C-66，2010.
- 4) 川村志麻，奥田健太，中野博貴，三浦清一，横浜勝司：破砕性火山灰質土斜面の降雨時力学挙動に及ぼす諸要因の影響，地盤工学会北海道支部技術報告集，第50号，pp.127-136，2010.
- 5) White, D. J., Take, W. A. and Bolton, M. D. : Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique*, Vol.53, No.7, pp.619-631, 2003.
- 6) Ishikawa, T., Miura, S. and Ito, K. : Influence of freeze-thaw action on mechanical behavior of unsaturated crushable volcanic soil, *Proc. of the 5th International conference on Unsaturated Soils*, 2010. (Accepted)
- 7) Ishikawa, T., Miura, S. and Tokoro, T. : Effect evaluation of freeze-thaw action on hydro-mechanical behavior of unsaturated granular materials, *Proc. of the 17th International conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE*, No.1, pp.833-836, 2009.
- 8) 山木正彦，三浦清一，横浜勝司：破砕性火山灰土の変形特性に及ぼす凍結融解履歴の影響，土木学会論文集，No.1/C-65，pp.321-333，2009.
- 9) 上野邦行，芮大虎，鈴木輝之，山下聡：芝生保護法面の凍結・融解過程における挙動観測(その2)，第43回地盤工学会研究会発表集，pp.989-990，2007.
- 10) 河野文弘：地盤の凍結と凍上，土と基礎，土質工学会，Vol.27，No.7，pp.11-15，1977.

第4章 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊解析モデル

4.1 斜面の凍結融解現象

(1) 凍結融解斜面の表層崩壊発生機構

北海道のような積雪寒冷地では、冬期の平均気温の下降に伴って地盤表層部が地表面から凍結し、春期の平均気温の上昇に伴って地表面から凍土が融解する。場合によっては、地盤内に凍土層が形成されることもある(図-4.1)。このような凍結融解作用を受ける地盤では、しばしば地盤深部から水を吸い寄せて脈状の氷の層(アイスレンズ)を形成する凍上現象が冬期に観測され、春期にはアイスレンズの融解により、難透水性の凍土層以浅の融解土層で含水比が増加するとともに、レンズ状の氷跡が空洞化することで、せん断強度の低下や土の単位体積重量の増加を誘起することが知られている。特に、凍上性地盤材料で構成される斜面では、上記に加えて、水平地盤でないという点が以下に示すような斜面の安定性に大きく影響する新たな現象を地盤の凍結融解中に引き起こすため、融解期・融雪期に斜面の表層崩壊が発生し易いと考えられている。

- 斜面では、凍上は斜面垂直方向に生じるが、凍上した地盤は、融解に伴い、主に重力によって鉛直方向に沈下する。この結果、凍上・融解が繰り返される表層地盤では、経年的に成長・発

達する緩み層が形成される。

- 地表面から凍土層が融解すると、斜面と平行・平坦な凍土層が斜面表層深部に形成される。この結果、滑り易く硬い凍土層の上に、例えば液性限界を超えるほど高含水状態で流動性の高い融解土が積層することになり、両層の境界部に強度・剛性が不連続な弱面(潜在的なすべり面)が形成される。
- 表層部の融解土層と、その下部の難透水性凍土層の2層構造地盤に融雪・降雨等により浸透水が流入すると、緩み層が発達した地盤では、土の間隙が多くなり透水係数が高くなるため、その部分に流線が集中して浸透圧が増大する結果、有効応力の低下が助長される。

図-4.2は、積雪寒冷地において凍上融解する未対策斜面の表層崩壊発生機構を模式化したものである。斜面崩壊メカニズムは、大別すると、融雪時崩壊(融雪期を想定)と豪雨時崩壊(主に夏期の豪雨時を想定)の2種類に分類され、前者は浅層流動型と内部侵食型の2種類にさらに細分される。一般に、温暖地域における降雨時の斜面の安定性に大きく影響するのは、間隙水圧の発生、せん断強度の低下、自重の増加であるとされている¹⁾。これに対して、前述のように、

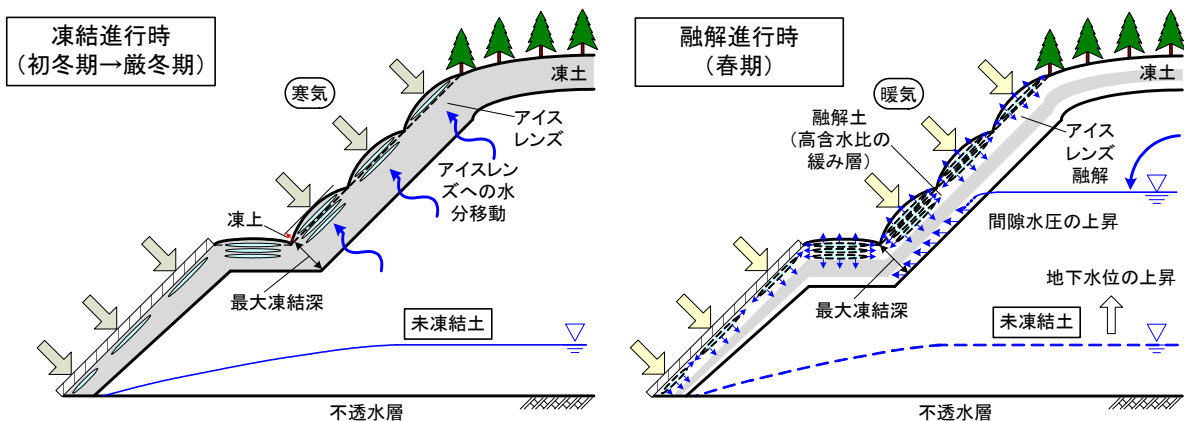


図-4.1 斜面内の凍土層の形成と融解

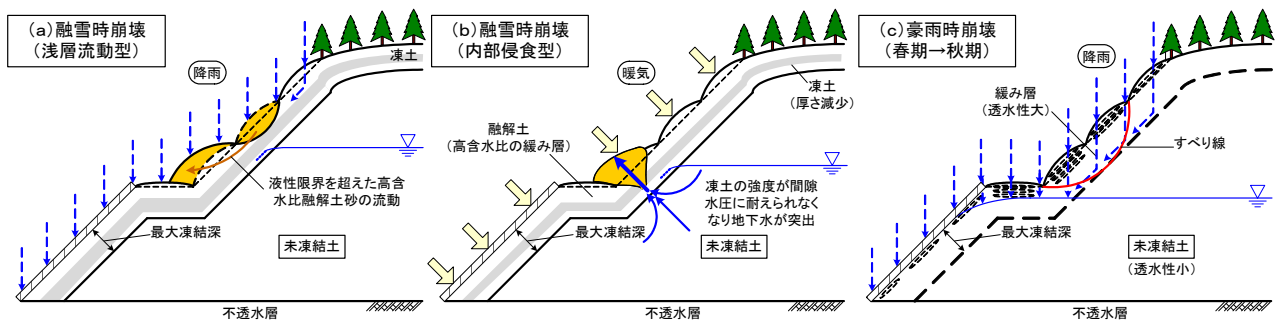


図-4.2 凍結・凍上融解による斜面の崩壊機構

積雪寒冷地域における斜面崩壊機構の特徴的な主要因は、土質（凍上性）、気温変化（凍結融解、融雪）の2条件であり、これらに起因する、地盤の凍結・凍上現象や融雪・降雨浸透に伴う表層地盤内の水分移動の違い、土の力学特性の変化により、機構の異なる斜面崩壊が発生する。なお、以上のような斜面崩壊機構は、切土法面と盛土法面でほぼ同様であるとされており²⁾、凍上性の大小に係わらず凍結融解作用を受ける斜面で生じる可能性がある。

(2) 凍結融解斜面の数理モデル化方法

北海道では、地盤の凍上・凍結融解が誘因と考えられる斜面崩壊が融雪期に数多く発生するが、これは、前述のように斜面表層の凍土の融解や融雪などにより斜面表層が高含水状態となることや、斜面表層近くに形成される不透水性の凍結土層の存在が、斜面崩壊を生じ易くさせるためであるとされてきた。このため、積雪寒冷地において凍上・凍結融解による斜面変状を予測するには、冬期に斜面表層のどの部分がどのように凍上・凍結し、その結果、融雪期にどのような含水比分布になり、土の変形・強度特性や透水性が地盤内でどのように分布・変化するかを把握する必要がある。特に、融雪期の急激な気温上昇は、地盤への急激かつ大量の融雪水の流入・浸透を引き起こし、斜面崩壊の誘因となる土塊重量増加や過剰間隙水圧の増加あるいは不飽和土の強度低下をもたらす。したがって、北海道のような積雪寒冷地を対象として融雪期の斜面崩壊メカニズムを解明するには、温暖地域における斜面崩壊の重要因子に加え、融雪・降雨、凍上・凍結融解、土質（凍上性）といった積雪寒冷地特有の条件を考慮して、実現象を次のような観点から数理モデル化する必要がある。

① 凍結融解過程における地盤要素の材料特性（物理、浸透、力学、熱）の変化

- アイスレンズの生成・融解に伴う水分移動による地盤要素の飽和度変化
- 凍結・融解中の温度・飽和度変化に伴う地盤要素の浸透特性（サクシオン、透水係数等）の変化
- 凍結・融解中の温度・飽和度変化に伴う地盤要素の力学特性（強度定数 C , ϕ 、剛性 E , ν 等）の変化
- 凍結・融解中の温度・飽和度変化に伴う

地盤要素の熱物性（熱伝導率、比熱、潜熱、熱膨張率等）の変化

- 繰返し凍上・凍結融解作用を受ける際の地盤要素の物理特性（密度、粒度、凍上量等）の変化
- ② 凍結融解過程における不透水性凍土層の形成に伴う斜面崩壊機構の変化
- 凍上・凍結融解に伴う凍結・非凍結層境界部における潜在すべり面の形成
 - 凍結・融解中の水理境界条件の変化とその位置変動に伴う地下水面や浸透流の変化
 - 雨水・融雪水等の流入に伴う地下水面や浸透流の変化と間隙水圧の上昇

本研究では、積雪寒冷地の帯水斜面の安定解析手法を実務設計レベルで開発するために、上記研究課題を考慮して、積雪寒冷地の帯水火山灰質土斜面内で生じると想定される力学作用をシミュレート可能な凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルを提案する。このため、室内要素試験・室内模型試験の検討結果を考慮して、地盤の凍結・凍上融解現象を再現可能な応力変形・熱伝導・浸透連成解析方法を開発するとともに、室内模型試験のシミュレーションを実施して、試験結果と解析結果の比較により、凍結融解・降雨に起因する斜面崩壊現象に対する数値解析方法の妥当性と適用性について検討した。

4.2 連成解析プログラムの開発

(1) ソフトウェアの開発方針

本研究では、気象情報や地形・地盤情報から積雪寒冷地における斜面崩壊の発生（時期・位置・規模等）を予測する凍結融解・降雨複合型斜面崩壊予知システム（寒冷地用地圏シミュレーター）を実務設計レベルで構築するために、前述の数理モデル化上の研究課題を考慮して、地盤の凍結・凍上融解現象を考慮可能な応力変形・熱伝導・浸透連成数値解析ソフトウェアを開発した。開発の基本方針として、実務設計に適用可能な下記の要件を満たす数値解析プログラムのプロトタイプの開発を目標とした。

- 地盤の応力変形、地盤の熱伝導、土中水の飽和・不飽和浸透を連成させて、所定の境界条件のもとで数値解析が実施可能である。

- 地盤の凍結・凍上融解（相変化）に伴う膨張・収縮挙動、強度・剛性変化、熱伝導率・比熱の変化、保水性・透水性の変化等を、できる限り実現象に即した簡略なモデルで考慮可能である。
- 数値解析の結果、地温分布から融雪量（水分流入量）・凍結深（不透水境界）を、土壌水分量・浸透圧分布から間隙水圧（不飽和力学特性）を、応力分布から有効応力（せん断ひずみ）などをそれぞれ推定可能である。
- 斜面崩壊の指標となる地盤の安定性が、地盤要素の応力状態と破壊条件から定まる局所安全率などにより評価可能である。
- パソコンレベルのコンピュータで動作可能であり、解析モデルの作成や解析結果の可視化が可能である。

連成解析プログラムの開発は、凍結・融解時の熱移動や間隙水の移動ならびに地盤の応力変形挙動を表現する以下に示す支配方程式を、2章の室内要素試験結果などから構築し、3章の室内模型試験結果と解析結果の比較検証により実現象との差異を明らかにして、検討結果を支配方程式の修正へフィードバックしながら実施した。作成した解析プログラムのフローチャートを図-4.3に示す。

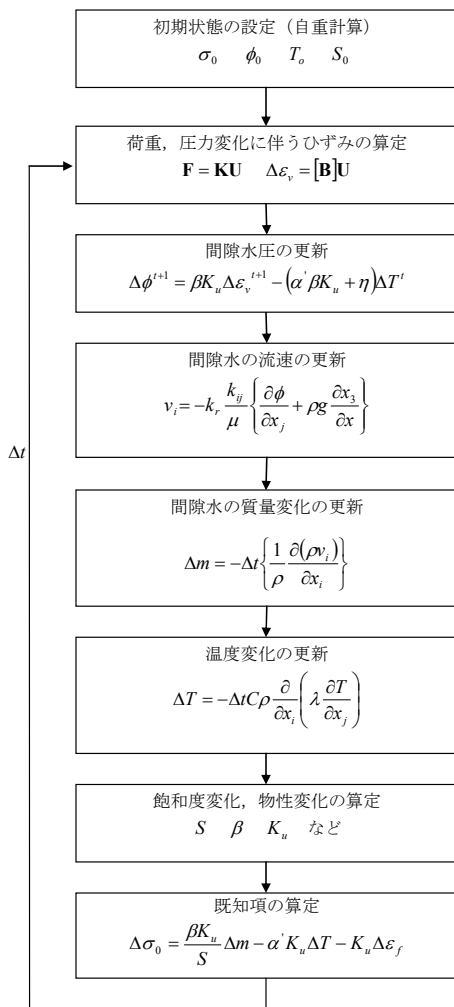


図-4.3 解析プログラムのフローチャート

(2) 間隙水の質量保存則（連続式）

間隙水が移動する場合、水の質量保存則を満足する必要がある。不飽和地盤では、式(4.1)のように表わされる。なお、特に断らない限り以下の記述では、圧縮を負とした。したがって、サクシオンは正で表される。

$$\frac{\partial(\rho_w v_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial(n\rho_w S_w)}{\partial t} \quad (4.1)$$

ここに、 ρ_w ：間隙水の密度、 S_w ：間隙水の飽和度、 n ：地盤の空隙率である。また、 v_i は間隙水の平均流速であり、ある断面より単位時間に流出（入）した間隙水の体積をその断面積で除したものである。式(1)の左辺は単位時間に単位体積中で生じた間隙水の流入出質量の差を表しており、右辺はこの流入出量の差が地盤の空隙率の変化と間隙水の密度変化、及び飽和度の変化によって補われることを示している。以下の各項を仮定すると、

- 間隙水は質量一定のため、 ρ_w が間隙水の温度 T と間隙水圧 ϕ の線形関数で表されると仮定すると、 ρ_w, ϕ, T は式(4.2)を満足する。ここに、 K_w ：間隙水の体積弾性定数、 ξ ：間隙水の熱（体積）膨張係数である。

$$d\rho_w = -\rho_w \left(\frac{1}{K_w} d\phi + \xi dT \right) \quad (4.2)$$

- 凍結膨張ひずみ ϵ_f は間隙水の質量保存に影響を及ぼさない。
- 土粒子の体積弾性定数は極めて大きいため、空隙率の変化は土要素の体積ひずみ変化 ϵ_v と等価である。
- 間隙水の密度変化が小さいと考え、式(4.3)の右辺第2項は無視する。

$$\frac{\partial(\rho_w v_i)}{\partial x_i} = \rho_w \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + v_i \frac{\partial \rho_w}{\partial x_i} \quad (4.3)$$

最終的に、式(4.1)は次式のようなになる。

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{1}{K_b} \frac{\partial \phi}{\partial t} + n S_w \xi \frac{\partial T}{\partial t} - S_w \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (4.4)$$

ただし、 $\frac{1}{K_b} = \frac{n S_w}{K_w} - n \frac{\partial S_w}{\partial \phi}$

ここに、 $\partial S_w / \partial \phi$ は比水分容量である。式(4.4)の右辺第1項の係数 $1/K_b$ は、不飽和土における間隙水の体積弾性定数の逆数である。また、右辺第1項は圧力変化によるもの、第2項は温度変化によるもの、第3項は体積（応力）変化によるものをそれぞれ表している。

他方、間隙水の平均流速 v_i は、ダルシーの法則により動水勾配に比例すると仮定すれば、式(4.5)のようなになる。

$$v_i = -K_{ij} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right\} \quad \text{ただし, } K_{ij} = k_r \frac{k_{ij}}{\mu} \quad (4.5)$$

ここに、 K_{ij} : 間隙水の透水係数、 k_r : 相対透過率、 k_{ij} : 絶対透過率テンソル、 μ : 間隙水の粘性係数である。式(4.5)の左辺は単位時間当たりの体積変化であり、これを次式のように記述すれば、

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial (\rho_w v_i)}{\partial x_i} \quad (4.6)$$

連続式は式(7)のように表わされる。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{1}{K_b} \frac{\partial \phi}{\partial t} + n S_w \xi \frac{\partial T}{\partial t} - S_w \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (4.7)$$

(3) 地盤の凍結・融解現象

a) 熱伝導の支配方程式

熱移動に関するエネルギー保存則は次式で与えられる。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + C_w \rho_w \frac{\partial (v_i T)}{\partial x_i} \quad (4.8)$$

ここに、 C : 水を含む地盤の比熱、 ρ : 地盤の密度 ($\rho = \rho_d + S_w \rho_w$)、 k_i : 水を含む地盤の熱伝導率、 C_w : 間隙水の比熱である。このとき、式(4.8)の右辺は、単位時間内に外部より微小地盤要素に流入する熱量変化 Δq を表わす。なお、ここでいう「地盤」とは、土粒子の構造骨格と間隙水の混合体を指すものとする。また、不飽和状態での地盤の熱容量は、次式でモデル化することとした。

$$C\rho = C_d \rho_d + S_w C_w \rho_w \quad (4.9)$$

ここに、 C_d : 乾燥時の地盤の比熱、 ρ_d : 乾燥時の地

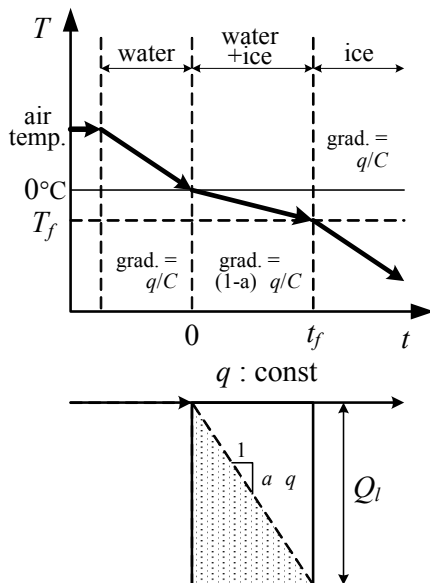


図-4.4 凍結過程における潜熱のモデル化

盤の密度である。

b) 相変化の数理モデル

常温から温度を降下させて行くと、水は 0°C 付近で凍結する。それに伴って地盤の材料特性には様々な変化が生ずると考えられるが、潜熱の影響については、次のように考える。まず、図-4.4 に示すように、冷却によって単位時間あたり Δq の熱量が奪われていく場合について考える。この際、流入出熱量 Δq の割合 a が地盤の凍結潜熱量 Q_l に消費され、残りが温度変化に供されると仮定する。これは、土の構造骨格と間隙水の伝熱性の違いなどによる温度分布の不均質性や、不凍水の存在などをモデル化したものである。この変化が t 時間継続し凍結終了温度 T_f まで温度が低下すると、その後潜熱の影響は無くなると本研究では考える。 T_f は次式で表される。

$$T_f = \Delta q \times (1-a)t / C\rho \quad (4.10)$$

さらに、潜熱分が全て消費される時間は次のとおりである。

$$t = Q_l / \Delta q a \quad (4.11)$$

これらの式より、潜熱によって消費される割合 a は次のように求められる。

$$a = \frac{Q_l}{T_f C\rho + Q_l} \quad (4.12)$$

したがって、実験等により凍結終了温度 T_f を求めることができれば、割合 a を定めることができる。なお、不飽和状態での地盤の潜熱は、次式で与えられる。

$$Q_l = S_w Q_{ls} \quad (4.13)$$

ここに、 Q_{ls} : 飽和地盤における単位体積あたりの潜熱である。

c) 凍結膨張・融解沈下のモデル化

土要素の凍上・凍結に伴って生じる凍結膨張ひずみ ε_f は、その最大値 ε_{f0} に対して潜熱に消費された熱量と潜熱 Q_l の割合で生じると仮定する。また、繰返し凍結融解作用を受けた土の凍上量は次第に減少するという既往の研究成果^{3), 4)}を考慮して、最大凍結膨張ひずみ ε_{f0} は凍結融解履歴回数とともに変化すると仮定し、凍結膨張ひずみ ε_f を次式のように表すこととした。

$$\varepsilon_f = \zeta_n \varepsilon_{f0} \Delta q \times at / Q_l \quad (4.14)$$

ここに、 ζ_n (≤ 1.0) は n 回目の凍結時のひずみの低下割合を表す。また、最大凍結膨張ひずみ ε_{f0} は間隙水による飽和度 S_w と線形関係にあると仮定した。

$$\varepsilon_{f0} = \varepsilon_{fmax} S_w \quad (4.15)$$

なお、凍結膨張ひずみは間隙水の質量保存に影響を及ぼさないと仮定した。この仮定に基づけば、凍結膨張が発生した場合には、そのひずみに見合う正の間隙水圧 φ が発生し、凍結領域で吸水が生じることとなる。仮に、体積ひずみがすべて凍結膨張ひずみ ε_f (正のひずみ) によって発生し、このとき間隙水の出入りが禁止されており、温度変化も無視できるとすれば、式(4.4)の左辺、ならびに右辺第 2 項を 0 として生じる間隙水圧 φ の大きさは次式で表される。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = S_w K_b \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial t} \quad (4.16)$$

ただし、実際に生じる正の間隙水圧の大きさは、透水性に依存する。例えば、透水性が高い場合は、凍結膨張が発生しても間隙水が速やかに供給されるために、正の間隙水圧の発生は抑制される。

一方、凍結膨張した土要素が融解する場合には、最大凍結膨張ひずみ ε_{f0} に対してある割合 ζ_n (≤ 1.0) で融解収縮ひずみ ε_f^i が発生すると仮定した。また、この割合は凍結融解履歴回数とともに変化すると仮定し、融解収縮ひずみ ε_f^i を次式のように表すこととした。

$$\varepsilon_f^i = \zeta_n \varepsilon_{f0} \Delta q \times at / Q_i \quad (4.17)$$

ここに、 ζ_n (≤ 1.0) は n 回目の凍結融解時のひずみの低下割合を表す。以上のように、本研究で提案する凍結膨張・融解沈下モデルを用いた場合には、降温過程では、地盤の凍結膨張に伴い凍結領域への吸水が生じ、凍結後の昇温過程では、地盤には残留ひずみが蓄積されることになる。このような傾向は、土の凍結融解現象における経験的な事実と調和的であり、本研究の数理モデル化上の仮定の妥当性を示すものであると考えられる。

(4) 凍結・融解地盤の構成方程式

a) 弾性モデル

地盤の変形が有効応力の原理に従うと考えると、全応力表示の構成方程式は式(4.18)のようになる。

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_m'}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = K_d \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (4.18)$$

ここに、 σ_m : 平均全応力、 σ_m' : 平均有効応力、 K_d : 排水条件で計測された地盤の体積弾性定数、 ε_v : 体積ひずみである。ここで、式(4.18)を ε_v について整理し、さらにひずみ成分として熱膨張ひずみと凍結膨張ひずみ ε_f を考慮すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{1}{K_d} \frac{\partial \sigma_m'}{\partial t} - \frac{1}{K_d} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \alpha \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial t} \quad (4.19)$$

ここに、 α : 排水条件で計測された地盤の熱膨張係数である。再度、全応力について式(4.19)を書き換え、連続式(式(4.7))を用いて間隙水圧の項を消去する

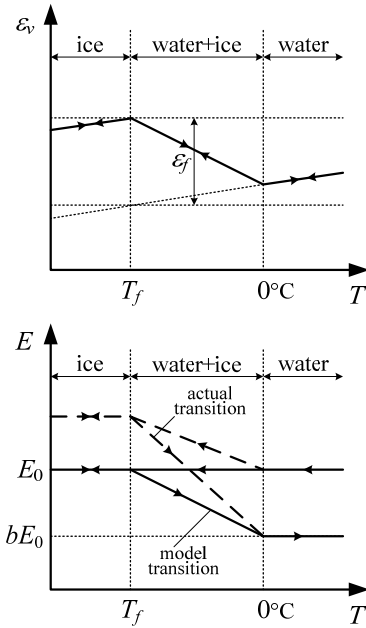


図-4.5 凍結過程における潜熱のモデル化

と、最終的に次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_m}{\partial t} &= K \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} \quad \text{ただし、} K = K_d + S_w K_b, \\ \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} &= K_b \frac{\partial m}{\partial t} - (n S_w \xi K_b + \alpha K_d) \frac{\partial T}{\partial t} - K_d \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.20)$$

せん断成分も含めた構成方程式は、式(4.21)のようになる。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = 2G \frac{\partial \varepsilon_{ij}'}{\partial t} + \left(K - \frac{2G}{3} \right) \frac{\partial \varepsilon_{aa}}{\partial t} \delta_{ij} + \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} \delta_{ij} \quad (4.21)$$

ここに、 G : せん断弾性定数、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタである。

加えて、図-4.5のように、地盤の変形係数 E は、凍結融解作用を 1 サイクル経験する毎に凍結後の昇温過程で割合 b だけ低下すると仮定する。これは、凍結融解作用によって土要素の構造が弱体化することをモデル化したものである。例えば、加熱によって単位時間あたり Δq の熱量が供給される場合、融解時の地盤の変形係数 E は、融解開始時(凍結時)の変形係数 E_0 を用いて式(4.22)のように表される。

$$E = E_0 (1 - b \Delta q at / Q_i) \quad (4.22)$$

この際、低下割合 b は、凍結融解履歴回数毎に変更可能とした。なお、降温過程では地盤の凍結に伴う土要素の剛性増加などが考えられるが、この変化は可逆的なものであり、凍結融解時の斜面の安定性に及ぼす影響は昇温過程における剛性減少に比べ小さいと考え、本研究ではモデル化していない。

b) 塑性モデル

本研究では、地盤をモールクーロン型破壊基準(式(4.23))に従う完全弾塑性体でモデル化した。

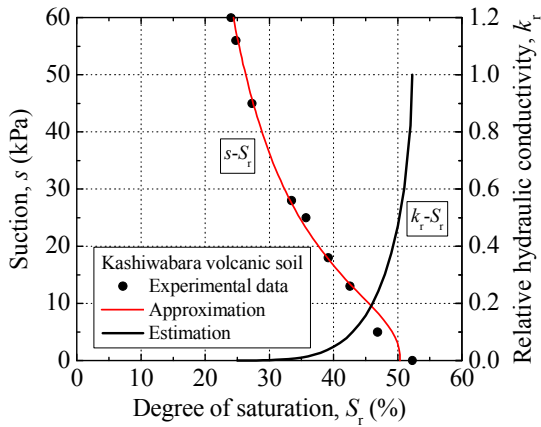


図-4.6 不飽和浸透特性のモデル化

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi_s - C_s \cos \phi_s = 0 \quad (4.23)$$

ここで、強度定数（粘着力 C_s あるいは内部摩擦角 ϕ_s ）は、凍結融解作用を1サイクル経験する毎に低下すると仮定した。例えば、 $i+1$ 回目の融解時の内部摩擦角 ϕ_s^{i+1} は、その低下割合を b とした場合、 i 回目の融解時の内部摩擦角 ϕ_s^i を用いて式(4.24)のように表される。粘着力 C_s についても同様である。

$$\phi_s^{i+1} = \phi_s^i (1 - b \Delta qat / Q_i) \quad (4.24)$$

ここに、 Q_i ：潜熱、 ε_v ：体積ひずみである。上式は、凍結融解の繰返し作用によって土要素の構造が弱体化することをモデル化したものである。なお、斜面表層部のような低い拘束圧下では、ダイレイタンシー挙動が一般に確認されるため、ダイレイタンシーに伴う間隙水圧の変化や、ダイレイタンシーが凍結膨張ひずみに及ぼす影響、熱伝導率に及ぼす影響などをモデル化する必要がある。しかし、本研究では、解析の簡略化のため、ダイレイタンシーは生じないと近似し、体積成分は弾性を保持すると仮定した。ダイレイタンシーの影響については、今後さらに検討していく必要がある。

(5) 凍結・融解地盤の飽和・不飽和浸透特性

a) 不飽和浸透特性のモデル化

非凍結土の不飽和浸透特性（水分特性曲線やサクシオン ϕ_c と水の相対透過率 k_{rw} の関係等）に関しては、以下に示す van Genuchten モデル⁵⁾（図-4.6）を採用した。

$$\phi_c = \frac{1}{a} \left\{ (S_e)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} - 1 \right\}^{\frac{1}{\lambda}} \quad (4.25)$$

$$k_{rw} = (S_e)^{1/2} \cdot \left[1 - \left\{ 1 - (S_e)^{\frac{\lambda}{\lambda-1}} \right\}^{\frac{\lambda-1}{\lambda}} \right]^2 \quad (4.26)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{n S_r - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.27)$$

ここに、 λ 、 a は実験定数であり、 S_r ：相対飽和度、

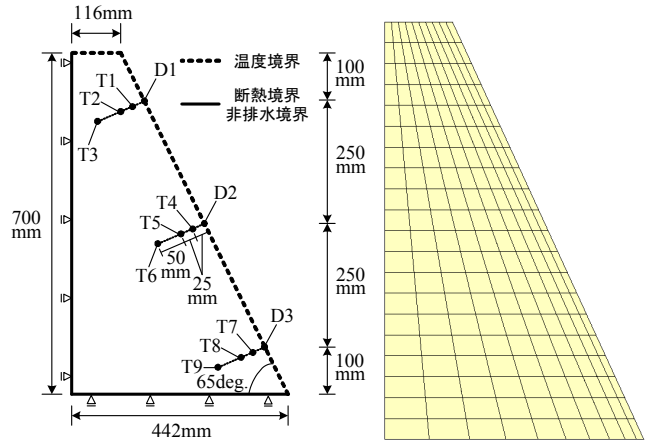


図-4.7 2次元FEM解析モデルの概略

S_e ：有効飽和度、 θ_r ：残留体積含水率、 θ_s ：飽和体積含水率である。また、間隙水圧と飽和度の関係および比水分容量は次式となる。

$$S_e = (1 + a \phi_c^\lambda)^{\frac{1-\lambda}{\lambda}} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial S_e}{\partial \phi_c} = -a(\lambda-1) S_e^{\frac{\lambda}{\lambda-1}} \left\{ 1 - S_e^{\frac{\lambda}{\lambda-1}} \right\}^{\frac{\lambda-1}{\lambda}} \quad (4.29)$$

なお、有効飽和度 S_e は実質的に移動可能な間隙水の飽和度を表しており、間隙水の移動による地盤の応力、変形は有効飽和度によって規定される。したがって、本研究では有効飽和度と水飽和度が等価であると仮定する。

$$S_w \cong S_e \quad (4.30)$$

b) 凍結時の透水係数のモデル化

凍土は不透水層であると考え、凍結時の土の透水係数 K_f は次式のように表されると仮定した。

$$K_f = K_0 (1 - \Delta qat / Q_i) \quad (4.31)$$

ここに、 K_0 ：凍結直前の地盤の透水係数である。ただし、計算上は凍結直前の透水係数の 1/100 となった時点で、それ以上の低下しないものとした。これは、間隙水流れの連続性を確保しておくための処理である。

4.3 凍結融解斜面のシミュレーション

前節の定式化に基づき開発した応力変形・熱伝導・浸透連成 FEM 解析プログラムを用いて、前章で実施した模型斜面の凍結融解・降雨による斜面崩壊実験と類似の条件で応力変形・熱伝導・飽和／不飽和浸透連成数値解析を行い、地盤の凍結・凍上現象、凍結・融解時の不凍水性凍結土層の斜面内の発生や凍上・凍結融解時の融解土層のせん断挙動に焦点を当てた試験結果との比較検証により、積雪寒冷地の帯水斜面で生じる凍結融解・降雨複合型表層崩壊現

表-4.1 解析に用いた物性値一覧表

記号	物性	値	取得方法
E	排水条件でのヤング率	0.3MPa	排水三軸圧縮試験
ν	排水条件ポアソン比	0.3	
n	空隙率	0.5	
K	透水係数	$1.0 \times 10^{-3} \text{m/h}$	透水試験
α	非排水条件での熱体積膨張率	5×10^{-6}	非排水熱膨張試験
β_0	非排水条件での間隙水圧変化	0.8	非排水三軸圧縮試験
k_r	熱伝導率	100J/mh°C	伝熱試験
T_f	凍結終了温度	-10°C	凍結試験
ϵ_{fmax}	最大凍結ひずみ	0.06	凍結試験
ϵ_{fmax}^r	最大融解ひずみ	0.03	凍結融解繰り返し試験
C_{10}	粘着力	$2.0 \times 10^{-3} \text{MPa}$	排水、非排水三軸圧縮試験
ϕ_0	摩擦角	30°	
C_{10}^2	2回目の凍結以降の粘着力	$2.0 \times 10^{-4} \text{MPa}$	凍結融解繰り返し試験
λ	VGモデルの定数	5.0	不飽和透水試験
a	VGモデルの定数	200	
ρ_d	乾燥時の密度	440kg/m ³	
$\rho_d C_d$	乾燥時の熱容量	$1.09 \times 10^6 \text{J/m}^3 \text{C}$	
Q_b	飽和状態での潜熱	$2.5 \times 10^7 \text{J/m}$	

象に対する開発プログラムの性能を精査するとともに、今後の開発プログラムの解析精度の向上に向けた研究課題・改良方針の明確化と要検討項目の抽出を実施した。

(1) 解析モデルと解析条件

2次元 FEM 解析モデルの概略を図-4.7 に示す。解析モデルの斜面は、模型実験と同様、火山灰質粗粒土で構成されているものとし、寸法も模型実験と同一とした。本解析モデルは2次元平面ひずみ解析モデルであり、要素には有効応力と間隙水圧が要素内で一定とする定ひずみ4節点要素を用いた。境界条件としては、解析モデルの側辺水平固定・底辺鉛直固定とし、斜面表面に温度境界と間隙水圧境界を、解析モデルの側辺および底辺に断熱境界と非排水境界を、それぞれ設けた。解析は、繰返し凍結融解が斜面の変形挙動に及ぼす影響を確認する解析（繰返し凍結融解解析）と、凍結層融解途中の降雨が斜面の変形挙動に及ぼす影響を確認する解析（凍結融解時降雨解析）の2種類を実施した。このうち、繰返し凍結融解解析では、①模型斜面全域の温度を20°Cに設定し自重 ($g=9.80\text{m/s}^2$) による変形を求める解析（初期応力解析）、②斜面表面部の温度を-30°Cに8時間保ち地盤の凍結に伴う変形を求める解析（凍結時解析）、③斜面表面部の温度を10°Cに12時間保ち凍結地盤の融解に伴う変形を求める解析（融解時解析）、④凍結時解析、⑤融解時解析の順に実施した。また、凍結融解時降雨解析では、前述の繰返し凍結融解解析を30時間まで実施した後に、⑥温度変化を止めた状態で地表面に降雨を与え変形を求める解析（降雨時解析）を実施した。解析に用いた物性値を表-4.1 に示す。本論文では、凍結融解時の地盤の定性的な変形傾向の検討を目的としていることから、表中に示す解析パラメーターの値については、模型

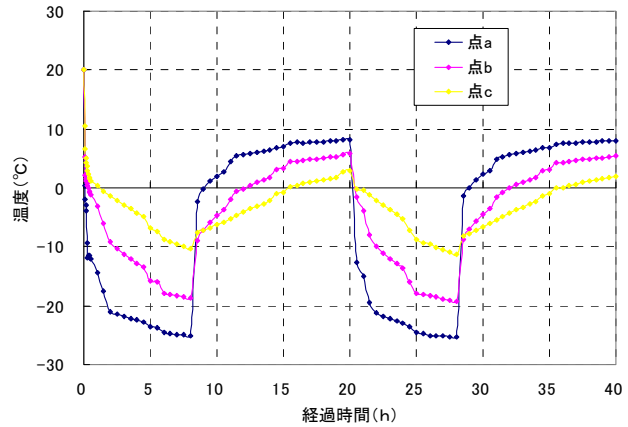


図-4.8 解析モデル斜面各部の温度変化

実験で用いた火山灰質粗粒土試料の各種室内要素試験を実施して得るのではなく、既往の研究で示されている物性値等を参考に、不合理の無い範囲で設定したものである。今後、より正確な数値シミュレーションを実施する場合には、室内要素試験などによって値を取得する必要がある。

(2) 解析結果と考察

繰返し凍結融解解析の結果得られた解析モデル斜面各部の温度変化を図-4.8 に示す。地表面からの冷却によって斜面内部の温度が低下し、表層部は凍結している。8時間後に冷却を終了した後は融解が生じるが、潜熱の影響を受け温度変化は緩やかとなる。また、本研究では、2回凍結融解を繰り返しているが、ほぼ同じ温度変化が繰り返されている。同解析の結果得られた温度分布・変位分布・主応力分布・ひずみ分布・間隙水圧分布・流速分布の一例を、図-4.9～図-4.14 にそれぞれ示す。温度分布図では、等温度線が斜面と平行に現れており、斜面表層から地表面と垂直方向に徐々に温度低下が生じている。この結果、地表面付近では、凍結による膨張変形が生じ、圧縮応力が発生している。また、背後地盤では膨張変形に引きずられ引張応力が発生している。その後、温度の上昇により主に地表面から凍土が融解するに伴い、融解土で剛性や強度の低下あるいは融解による収縮変形が生じ、これにより、表層地盤が斜面法尻方向に流動するような形態の変形が融解後に残留している。当該部分では大きな残留せん断ひずみの発生や、凍結融解の繰り返しにより残留変形が蓄積される傾向も確認できる。さらに、間隙水圧分布では、斜面表層部の凍結によって表面部の凍結によって間隙水圧が減少するとともに、当該部の凍結膨張ひずみに見合う正の間隙水圧が発生し、この周囲で動水勾配が大きくなるために、凍結領域に向かう間隙水の流れが発生することが確認できる。

一方、凍結融解時降雨解析の結果得られた変位分布・主応力分布・ひずみ分布・間隙水圧分布・流速分布の一例を、図-4.15～図-4.19 にそれぞれ示す。降雨に伴って間隙水が地表面から流入した場合、降雨開始直後の飽和度が低い斜面上部では特に流速が大きくなる。これは、飽和度が低いことにより、サ

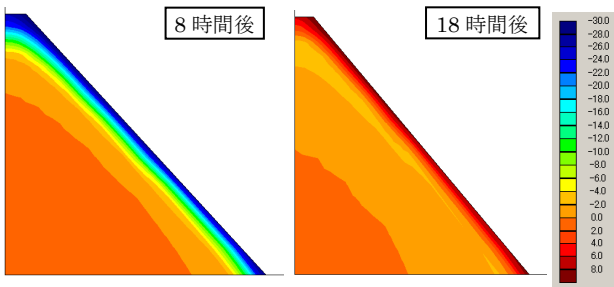


図-4.9 凍結・融解時の温度分布例

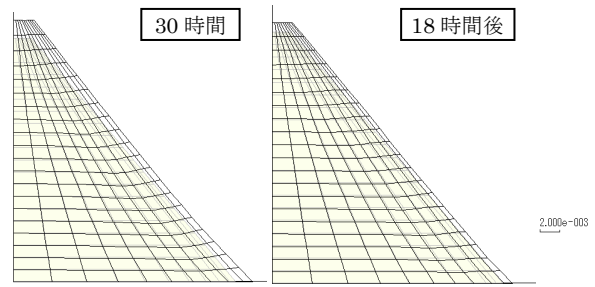


図-4.10 凍結・融解時の変形例

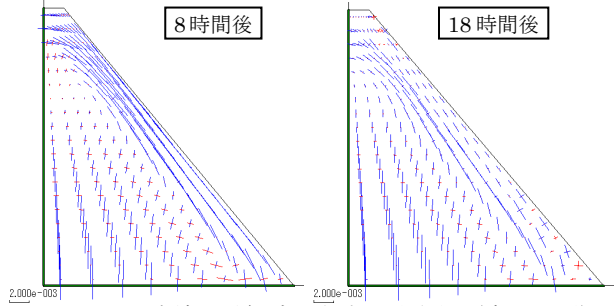


図-4.11 凍結・融解時の主応力分布例 (赤：引張)

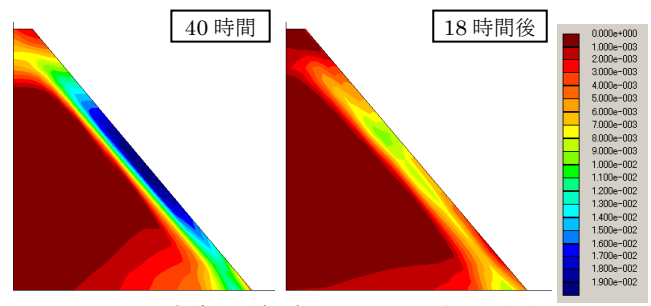


図-4.12 凍結・融解時のせん断ひずみ分布例

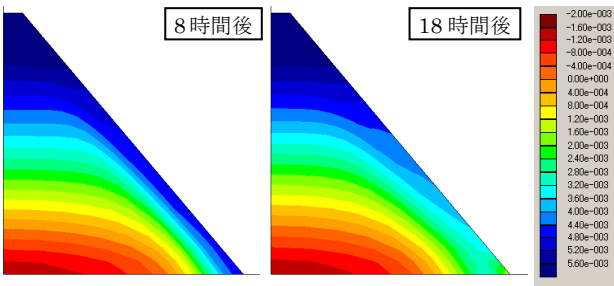


図-4.13 凍結・融解時の間隙水圧分布

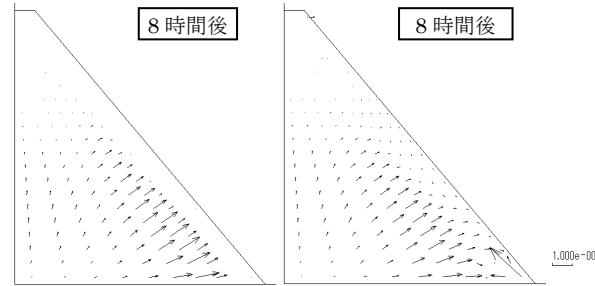


図-4.14 凍結・融解時の流速ベクトル分布例

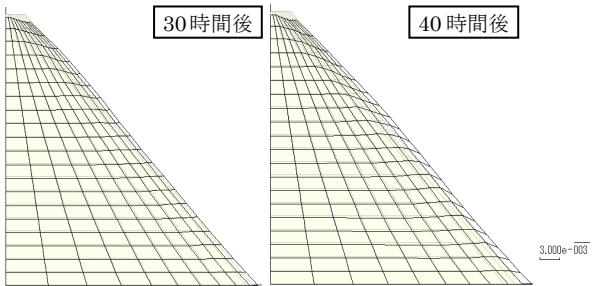


図-4.15 凍結融解降雨時の変形例

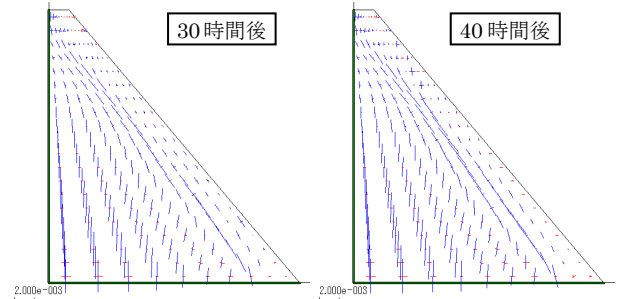


図-4.16 凍結融解降雨時の主応力分布例 (赤：引張)

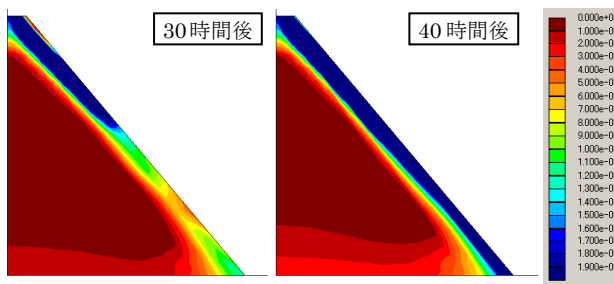


図-4.17 凍結融解降雨時のせん断ひずみ分布

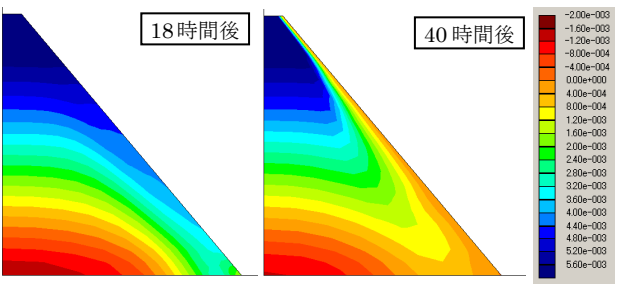


図-4.18 凍結融解降雨時の間隙水圧分布例

クションが大きくなるためであるが、透水係数も小さいため、奥部への間隙水の浸透には時間が必要となる。時間の経過に伴い、地盤内の飽和度は上昇すると、透水性も高くなることから、雨水は地表面か

ら次第に奥部に浸透する。これに伴い、間隙水圧が増加し有効応力が減少するとともに、土の単位体積重量が増加し斜面はすべり破壊を生じ易くなる。ただし、斜面内部に凍土層が残存している場合、凍土

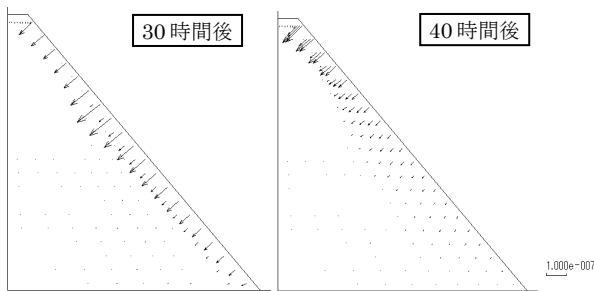


図-4.19 凍結融解降雨時の流速ベクトル分布例

層は透水性が低いいため雨水の浸透が表層部に限定され、斜面内の飽和度は凍結領域で分断された形となる。この結果、凍土層から地表面にかけての領域で自重と間隙水圧が増加して、当該領域で比較的大きなせん断ひずみ（塑性変形）が生じる。

以上のような解析結果が得られたことは、本研究で開発した応力変形・熱伝導・浸透連成解析が、積雪寒冷地の帯水斜面で生じる凍上凍結融解・降雨複合型表層崩壊現象の数値シミュレーションに対して、充分機能していることを示すものであると考えられる。

4.4 研究成果のまとめ

凍結融解環境下における斜面崩壊現象を実現象に即して再現可能な数値シミュレーション法を構築するため、地盤の凍結・凍上融解現象を考慮可能な、応力変形・熱伝導・飽和／不飽和浸透連成解析方法を提案した。また、提案した連成解析方法に基づくソフトウェアを開発して、凍結融解作用を受ける模型斜面の斜面崩壊実験の試解析を行い、開発したプログラムの性能を検証した。検討の結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 凍上の影響を考慮した凍結・融解時の地盤物性値の設定方法の導入、および凍結・融解時の間隙水の移動を考慮した飽和／不飽和浸透流に関する基礎方程式の離散化と解析プログラムへの組み込みを行い、積雪寒冷地斜面で発生する凍結・凍上融解現象を簡略モデル化した、応力変形・熱伝導・飽和／不飽和浸透連成数値解析プログラムを開発した。

- 2) 開発した応力変形・熱伝導・浸透連成FEM解析プログラムを用いて、繰返し凍結融解作用を受ける斜面の変形挙動解析や凍結融解作用を受ける斜面の降雨による表層崩壊解析を実施し、地盤の凍結・凍上現象や降雨浸透に伴う水分移動、降温・降温時の凍結土層の斜面内の発生・融解、凍上・凍結融解時の融解土層のせん断挙動、飽和／不飽和浸透時の融解土層のせん断挙動等が模型試験結果と定性的にほぼ一致することを示した。

今後、開発したソフトウェアを実務設計に供するには、解析結果の解析精度の向上を図るため、現地計測結果や室内模型試験と数値シミュレーションのヒストリーマッチングによる開発プログラムの妥当性・適用性の検証や、凍結融解作用が地盤の応力変形挙動や浸透流に及ぼす影響などのパラメータスタディを実施して、2章の室内要素試験結果を反映した凍結・融解時の材料特性の非線形モデル化、現行の支配方程式の一般化と開発プログラムの高機能化が必要である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度評価，2006，p.45.
- 2) 北海道火山灰土の性質と利用に関する研究委員会：実務者のための火山灰土，地盤工学会北海道支部，2004，p.66.
- 3) Eigenrod, K.D. : Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils, Canadian Geotechnical Journal, 33, pp.529-537, 1996.
- 4) Hui, B., Ping, H. : Frost heave and dry density changes during cyclic freeze-thaw of silty clay, Permafrost and periglacial process, 20, pp.65-70, 2009.
- 5) van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898, 1980.

第5章 現地計測による斜面状態監視方法の検討

5.1 研究概要

凍結融解作用を受ける斜面の挙動把握や崩壊メカニズムの解明を目的とした、実斜面における長期計測の重要性は認識されているものの、これまで国内外を合わせても具体的な実施例は少ない^{1), 2), 3), 4)}。特に、凍結融解中の地盤内の温度・土壌水分分布などの状態量変化と斜面の凍上量や傾斜変位量などの変形状態の変化を併せて記録した、系統的で包括的な長期計測実績は極めて少なく、凍結融解中の斜面の挙動は未だに十分解明されていない状況にある。このような状況を踏まえ、本研究では、室内要素試験・室内模型試験・数値解析シミュレーションなどから構築される凍結融解環境下の斜面崩壊予知理論の精度向上をより実現象に近い条件下で図るために、火山灰質土で構成される北海道内の実斜面に計測器を埋設し、実地盤での現地調査・現地計測を長期的に行った。そして、計測結果をもとに、積雪寒冷地にある帯水斜面の地盤調査・現地計測を効率的に行うために必要な測定項目や計測方法（計測器の効果的な配置・設置方法）について検討するとともに、積雪寒冷地において凍結融解作用を受ける斜面の管理指標や評価基準を明示するために必要な基礎データを収集し、得られた計測結果のデータ分析手法の提案を試みた。

5.2 調査対象斜面・計測方法

(1) 調査対象斜面

調査対象斜面は、道路近傍で災害履歴のある火山灰質の斜面という条件から選定し、北海道上川郡清水町字美蔓の切土のり面（上段・下段）、伊達市南黄金町の切土のり面、北海道千歳市支笏湖畔の自然斜面とした。なお、今回設置した計測器配置は、4箇所の調査対象斜面ともほぼ同一であることから、本節では、清水町美蔓の切土のり面（上段・下段）の測定について概説・考察を加えることとした。当該箇

所近くの斜面では、2006年4月20日に斜面崩壊が報告されているが、崩壊時には、降雨と融雪が確認されており、それらによる飽和度の上昇が斜面崩壊に大きく関係していると考えられている。

現地計測箇所周辺は、広い平坦面を持った台地状地形を呈し、高い面から美蔓面、上佐幌面、下佐幌面、屈足面に分けられる。これらの台地は、第四紀更新世の段丘面で、設置位置は美蔓面のはずれにあたり一部は下佐幌面に接している。この美蔓面は十勝川と然別川に挟まれた最高位の台地で、北から南に広い平坦面を形成している。また、これらの平坦面の下位には更新世～鮮新世の溶結凝灰岩、シルトおよび砂礫相を主な構成物とする熊牛層が分布している。計測器設置場所は熊牛層の砂礫相とシルト相の境界部付近に位置しており、本研究の計測器は中位砂礫層（上段部）と下位火山灰質粘性土層（下段部）の2箇所に設置した（図-5.1）。下段斜面では、

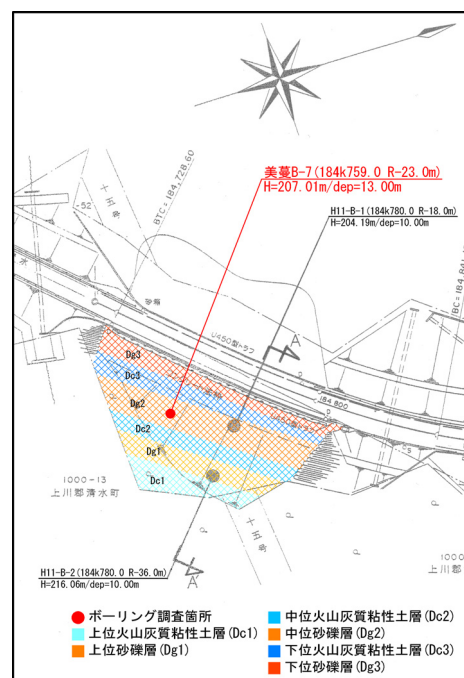


図-5.1 計測箇所近傍地質平面図(s=1:1,000)

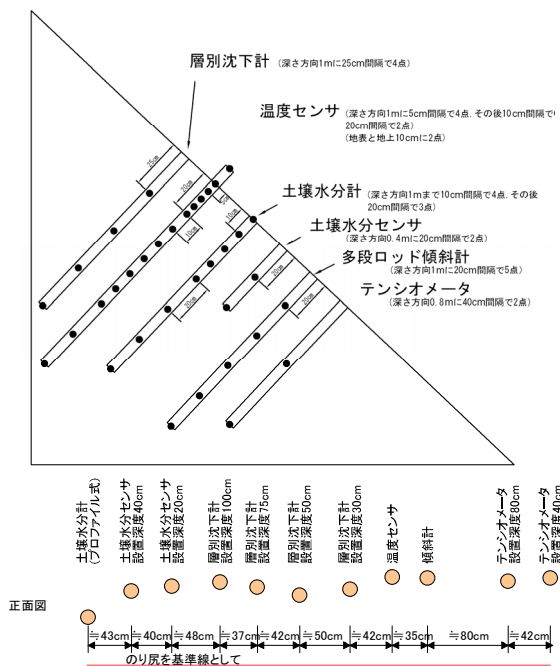


図-5.2 計測箇所近傍地質平面図(s=1:1,000)

シンウォールサンプラーを用いて不攪乱試料を採取し、各種物理試験を実施した。細粒火山灰土に対する既往の分類法⁵⁾によれば、下段斜面に堆積する火山灰質粘性土層は、流動性・不安定性ともに低いLL領域に分類される。また、当該試料に対して岩渕らが行った凍上試験結果⁶⁾によると、凍結膨張率40%弱の高い凍上性を有する土であることがわかる。なお、砂礫層が堆積する上段斜面では、機材設置の問題から不攪乱試料のサンプリングは実施していない。

(2) 計測方法

設置した計測器は、①凍結融解中の斜面内の状態量を計測するもの（温度センサー、土壌水分センサー、テンシオメータ）、②凍結融解中の斜面内の変形状態を計測するもの（層別沈下計、多段傾斜計）、③周辺の気象情報等を計測するもの（気温計、日射計、雨量計、積雪深計）に分類される。特に、本研究では、凍結融解中の斜面内の変形挙動を把握するために、凍上量計測用の層別沈下計および斜面平行方向の変位計測用の多段傾斜計を斜面と垂直に埋設した。このうち層別沈下計は、所定の層厚の地盤要素の凍上量を計測できるように改良したひずみゲージ式高感度変位計である。他方、多段傾斜計は4つの節を持つ全長1mの棒状の計測器であり、節部分にひずみゲージが貼付されていることから剛なロッド間の相対傾斜角を計測できる。同様な多段傾斜計は各種提案されている^{7), 8)}が、計測対象領域の深度が浅いことおよび計測データの解釈の容易さから、本研究では新規開発した当該計測器を用いた。

図-5.2は、各種計測器の設置例（清水町美蔓下段）である。各種計測器は、地下水位等の計測地盤環境が一定になるように、また相互干渉しないように、設置する斜面高さを揃えた上、間隔を取って一列に配置した。また、気象庁日別平年値（2002-2006年）

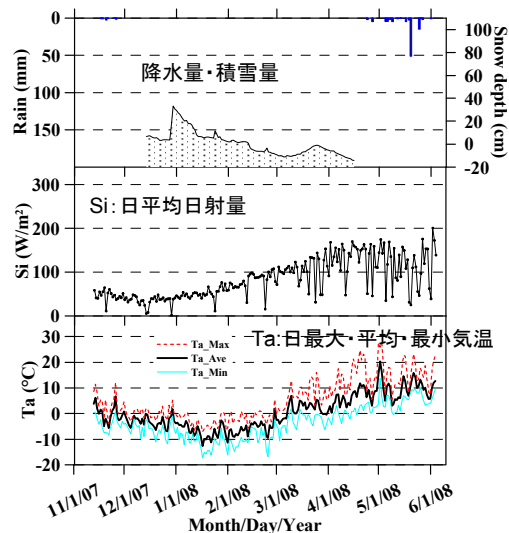


図-5.3 気象状況（日射量、気温、降水・積雪量）

によると、現地計測箇所に近いAMeDAS観測点（新得）での2月の平均気温は -6.0°C 、平均凍結指数は $494.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 、平均最大積雪深は 0.86m である。この場合、最大凍結深さは、修正Berggren式⁹⁾による計算では 1.0m 程度、積雪の影響を考慮した土谷の方法¹⁰⁾では 0.3m 程度とそれぞれ推定される。このため、当該地域の最大凍結深さまで、計測器は等間隔に設置した。なお、各項目の計測は10分毎に行い、携帯電話を用いたテレメータシステムによりデータ回収・遠隔計測を行っている。ただし、本研究では、扱うデータ数が膨大なことから、データ処理の効率を重視して計測データを1時間当たりの平均値に変換の上、分析を実施した。

5.3 長期計測結果

計測は2007年11月12日から継続しているが、本研究では、2009年11月13日までの2冬期間の測定結果をもとに、実斜面で収集した気象情報や地形・地盤情報の分析を行った。

(1) 気象条件・地温・積雪深

2007年11月12日から2009年9月30日までの気象状況（日平均日射量、日最大・平均・最小気温、降水・積雪量）を図-5.3に示す。また、観測期間（2007/11/12～2009/11/13）中の気温と地温の経時変化を図-5.4に示す。ただし、深度は、地表面から計測点までの斜面垂直方向の距離とする。同図を見ると、地表面に近い地温計では気温同様に日変動しているが、深くなるにつれて日変動が平滑化されるとともに、降温時の地温の低下幅が減少している。また、積雪がある場合には、地表面近くに設置した地温計は、気温より緩やかな温度変化を示す傾向にあり、温度の低下幅も少ない。このため、同様な傾向を示す場合には、法面は雪に覆われていると推定される。

図-5.5は、各深度の地温の経時変化をもとに作成した斜面内の地温分布の等値線図である。図中に示す太線は、 0°C 線を示しており、その内側は地盤が凍

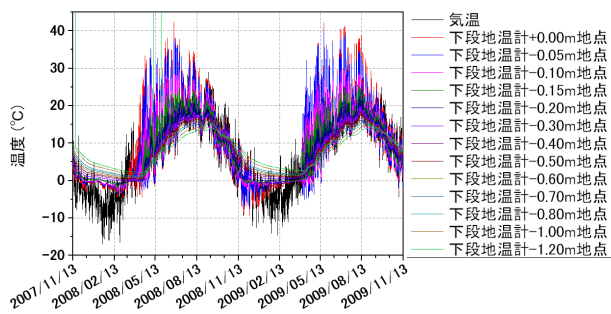


図-5.4 地温と気温の経時変化（下段）

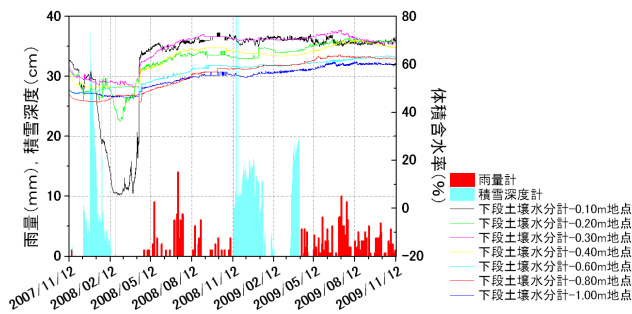


図-5.6 降雨・積雪と体積含水率の経時変化（下段）

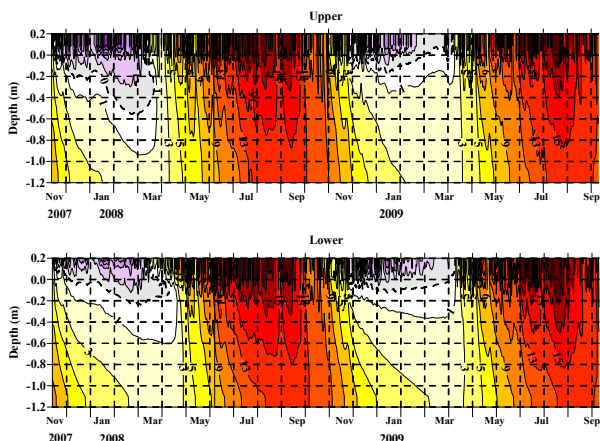


図-5.5 地温プロファイルの季節変化

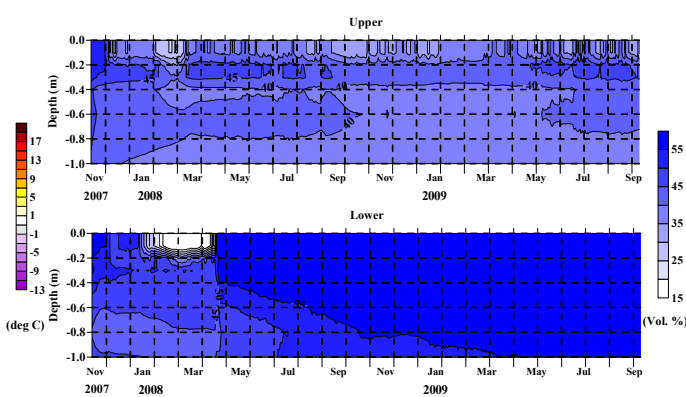


図-5.7 土壌体積含水率プロファイルの季節変化

結状態にあることを示している。図から、下段斜面において2007年度は深度0.20m付近まで、2008年度は深度0.10m付近まで、また上段斜面において2007年度は深度0.50m付近まで、2008年度は深度0.20m付近まで、それぞれ斜面が凍結したと推察される。両年度の凍結深さの違いは、2007年度の平均気温が低かったことによると考えられる。また、地盤の凍結は地表面から始まるが、2007年度は日平均気温が 0°C を連続して上回る3月中旬頃に 0°C 線が2本存在しており、昇温時に地表面と未凍結の地盤内部の双方から凍土層の融解が生じたことを示している。これに対し、2008年度は地盤内部からの融解のみであった。このことから、最大凍結深さがある程度深くなると、融解期に地表付近よりも温度の低い層が地中に残存すること、すなわち融雪期に滑りやすい凍土層が地盤内部にある一定の期間存在することがわかる。

(2) 土壌水分量・サクシオン

観測期間中の土壌水分量（体積含水率）の経時変化を積雪量（灰色）・降雨量（黒色）の変化と併せて図-5.6に示す。また、図-5.7は、各深度の体積含水率の経時変化をもとに作成した上段・下段斜面内の土壌水分量分布の等値線図である。図-5.6から、12～3月の凍結期を除くと、降雨時に地表面に最も近い深度-0.10m地点で体積含水率の上昇が見られる他、降水がほとんど観測されない場合でも積雪量が減少する際には変動していることがわかる。また、降雨時は最も浅い深度-0.10m地点の体積含水率が最も大きい、通常は凍結深さに近い深度-0.20～-0.30m地点が最も大きい。さらに、2007年度の凍結期前後の体

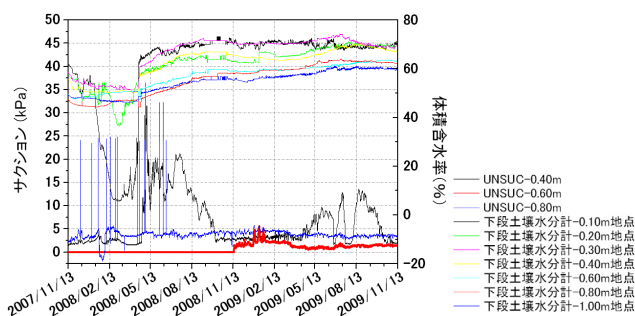


図-5.8 サクシオンと体積含水率の経時変化（下段）

積含水率の変化に着目すれば、表層付近の体積含水率は凍結前に比べ融解後に上昇すること、すなわち凍結融解により凍結深さより浅い土の水分量が若干上昇することがわかる。このように凍結融解斜面内の含水状態の変動は、融雪や降雨による斜面内浸透だけでなく、地盤の凍上に伴うアイスレンズの生成・融解、地盤内凍土層の形成など凍結融解地盤の特殊性が影響しているものと考えられる。なお、図-5.7において、下段斜面の体積含水率が上段斜面に比べて全体的に高い理由は、斜面を構成する土の保水性の違いに起因すると推定される。

一方、凍結期にも、特に、2007年度は、地表面に近い深度-0.10m、-0.20mおよび-0.30mの体積含水率が、通常の変動範囲を超えて冬期に急激に低下し、春期に前の状態に回復する傾向が見られる。ただし、それ以深では同時期に体積含水率の変化は観測されていない。図-5.5と図-5.7を比較すると、体積含水率が急激に低下する領域は地温が氷点下に達した領域と一致しており、体積含水率の変化は地盤凍結の影響と推定される。既往の研究^{4), 11)}でも、TDRセンサーによる測定では、地盤が凍結した状態になると、間

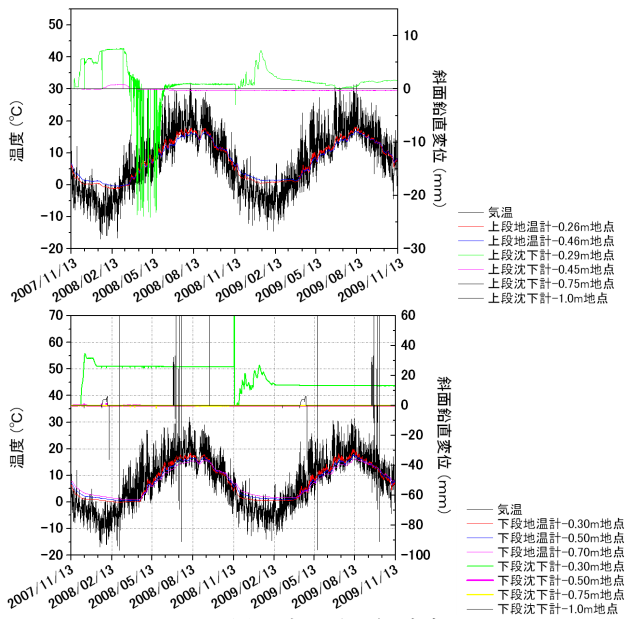


図-5.9 層別沈下計の経時変化

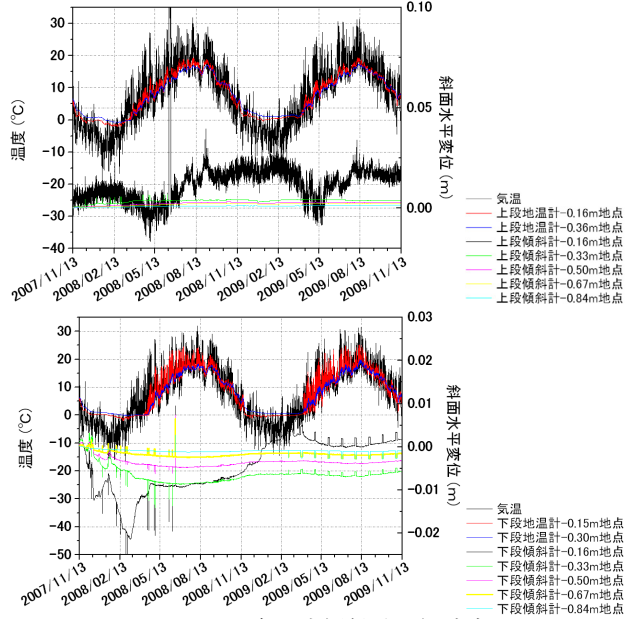


図-5.10 多段式傾斜計の経時変化

隙水が凍結し土の誘電率が減少するために、土の体積含水率が急激に低下する傾向を示すことが報告されており、観測値は、土粒子と間隙水で構成される固体部の空隙に存在する真の水分量を示す値ではなく、見掛けの値であることが指摘されている。なお、凍結期の体積含水率の分布と温度分布に強い相関性が認められることから、地温分布だけでなく、土壌水分量分布からも最大凍結深さや融解期の凍土層の深度を推定できると考えられる。

図-5.8は、観測期間中のサクシオン（テンシオメータの計測値）の経時変化を体積含水率・地温の変化と併せて示したものである。斜面の凍結深度に近い深度-0.40mのサクシオンは、降雨時・降雨後に低下するとともに、凍結時に低下し融解期に増加する傾向が見られ、その増減傾向は、同じ深度の体積含水率と連動している。しかし、深度-0.60m以深のサクシオンは、体積含水率と同様に表層地盤の凍結や降雨浸透の影響をほとんど受けていない。これらのことから、斜面の安定性と関連のある土の保水性やせん断強度は、凍結融解作用の影響を受けるものの、その影響は凍結深さ近くまでの表層地盤に限定されることがわかる。

(3) 凍上量・傾斜変位

層別沈下計で測定される観測期間中の斜面垂直方向変位量（凍上量）の経時変化を気温・地温の変化と併せて図-5.9に示す。なお、y軸の符号の正値は層別沈下計の伸張方向つまり地盤が斜面垂直上向きに変位したことを示すものであり、凍上量を表している。図から、各年度・各斜面とも斜面垂直上向きの変位が観測され、2007年度は下段斜面において35mm程度、上段斜面において8mm程度の変位量が、また2008年度は下段斜面において30mm程度、上段斜面において7mm程度の変位量が、それぞれ最も浅い深度-0.30mに設置した層別沈下計に認められる。しかも、この斜面垂直上向きの変位量は、融解後も凍結前の

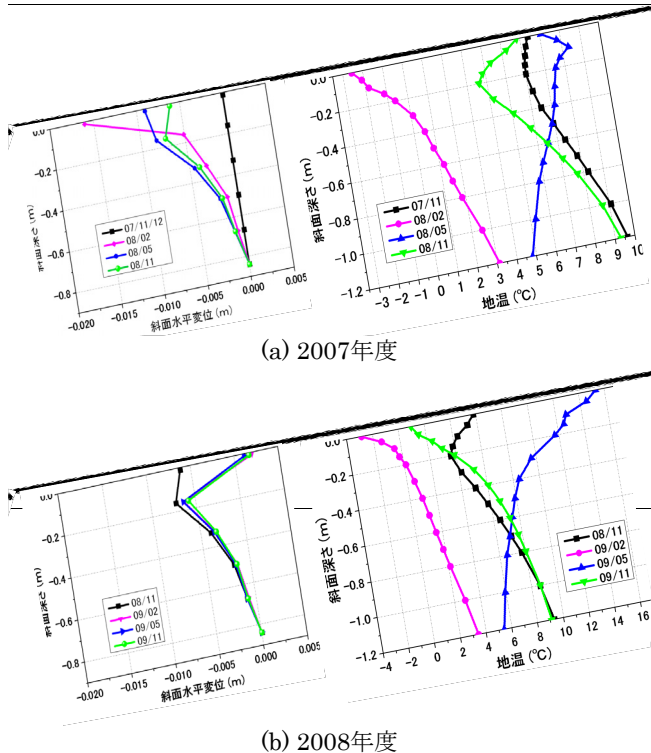


図-5.11 多段傾斜計変位量分布の季節変化

状態に戻っていない。なお、それ以深の層別沈下計では、同時期に顕著な変化は観測されていない。以上のことは、前述した凍結深さの傾向や深度-0.30m以浅における地温の経時変化傾向と調和的であり、地盤の凍上現象に起因している可能性が高い。

図-5.10は、多段傾斜計で測定される観測期間中の斜面平行方向変位量（傾斜量）の経時変化を気温・地温の変化と併せて示したものである。また、図-5.11は、各深度の傾斜量の経時変化をもとに作成した斜面内の傾斜変位プロファイルの季節変化である。ただし、図-5.10ではy軸負方向が斜面平行方向の上向き変位を、図-5.11ではx軸正方向が斜面平行方向

の下向き変位を示している。図から、2007年度の下段斜面では、凍結・融解期に斜面と平行方向の変位が最大20mm超も生じており、融解後も変位が残留していること、および全深度で傾斜変位の累積が認められるが、特に深度-0.16mに設置した傾斜計の変位が大きいことがわかる。また、下段斜面では2007年度と2008年度に凍結期の変位方向が逆であるが、上段斜面では、各年度とも同じような挙動を示した。さらに、気温・地温の経時変化や含水状態の経時変化の図と図-5.10を比較してみると、上段斜面の傾斜計は、気温や体積含水率の変動と相関性をもって変位しているが、下段斜面の傾斜計は上段と比べ降雨の影響が小さいことがわかる。以上のことから、上段斜面は斜面平行方向の変位が下段斜面と比較して若干大きく、その変位は体積含水率の変化による影響が強いが、下段斜面は斜面垂直方向への変位が大きく、その変位は地盤の凍上・融解沈下に起因するということがわかる。

一方、凍上は一般的に斜面に対し垂直方向に生じる。これを前提とすると凍上時に傾斜計が斜面に対し垂直に設置されていれば傾斜計は変形しないはずである。これに反し、2007年度の下段斜面のように、凍結時に斜面上向きの変位が観測される理由は、設置時に多段傾斜計が斜面垂直方向から斜面下向きに傾いて設置されていたこと、あるいは地盤が深さ方向に不均一に変位したことによると考えられる。ここで、前者の理由が支配的であるとすると、1冬期の斜面平行方向変位を求めるには、凍上中の変位を差し引いて算出しなければならない。例えば、深度-0.16mの傾斜計の計測値を読み取ると、最も凍上が起こっていたと予想できるのはy軸最小の点であり、この点からy軸最大値までが融解時の斜面平行方向変位と判断される。このように、斜面表層付近では凍上および結氷の影響が傾斜変位の一つの要因であると考えられるが、斜面深部において傾斜変位が累積する原因は現在のところ不明である。

5.4 斜面の挙動予測方法の検討

(1) 凍結深さ・凍上量の予測方法の提案

赤川らは過去の実験データや比較的簡易に得られる各種物性値などを利用した、凍上量簡易予測方法を提案している¹²⁾。ここでは、斜面における凍上量予測に対する赤川らの方法の適用について検討する。凍上量の予測は一般に式(5.1)の高志の式¹³⁾が通用されており、赤川らの方法でも利用されている。

$$\xi = \xi_0 + \sigma_0 / \sigma (1 + \sqrt{U_0 / U}) \quad (5.1)$$

$$U = (d_2 - d_1) / 24 \quad (5.2)$$

ここに、 ξ ：凍上率(%), σ ：載荷応力(kPa), U ：凍結速度(mm/h), ξ_0, σ_0, U_0 ：実験定数, $d_2 \cdot d_1$ ：当日と前日の凍結深さ

式(5.1)を用いるには凍結深さと単位体積質量を用

いて載荷応力と凍結速度を算出する必要がある。この際、現時点では、地盤の凍結・凍上が起こる際の体積含水率の推定は難しいため、湿潤密度の代わりに乾燥密度を用いて載荷応力を求める。また、凍結深さに関しては、図-5.5により算出した0°C線を利用する方法と、積算寒度から予測する方法の2通りの方法で算出する。後者の方法には、修正Berggren式⁹⁾(式(5.3))と積雪の影響を考慮した土谷の方法¹⁰⁾(式(5.4))がある。

$$Z = c\sqrt{F} \quad (5.3)$$

$$D_{\max} = c\sqrt{F_{20}} \quad (5.4)$$

ここに、 Z ：予測凍結深さ(cm), F ：積算寒度(°C・day), c ：定数, D_{\max} ：最大凍結深さ(cm), F_{20} ：積雪20cmに達した時点での積算寒度、ただし、土谷の方法で利用する積雪深については、積雪深計の観測データあるいは対象箇所近傍のAMeDAS観測点における最大積雪深のデータを利用する。

一方、実験定数 ξ_0, σ_0, U_0 は、一般に凍上試験により求められるものであるが、過去の凍上試験データを参考にして、対象箇所の諸物性値に近い試料の実験定数から推定することもできる。以上のように求めた凍結深さ、載荷応力と実験定数を高志の式に代入して凍上率を算出し、凍結深さ(層厚)を乗じて凍上量を求める。

(2) せん断変形量の予測

冬期に斜面と垂直方向に凍上した凍結深さより浅い地盤では、春期に地表面から融解していく過程で重力によって鉛直方向に沈下するため、融解後も地表面近傍に斜面平行下向きの変位が残留すると推定される。このことは、凍上する斜面では、1回の凍結融解履歴によって凍結深さより浅い地盤がせん断されることを示唆している(図-5.12)。また、3章の室内模型試験結果では、せん断ひずみが4~6%発生した時点を斜面崩壊と定義している。凍結融解により生じたせん断ひずみが融解後も残留することを考慮すると、凍結融解を繰返し受けるような環境下では、斜面内にせん断ひずみが次第に蓄積され、斜面の安定性が損なわれることも想定される。したがって、

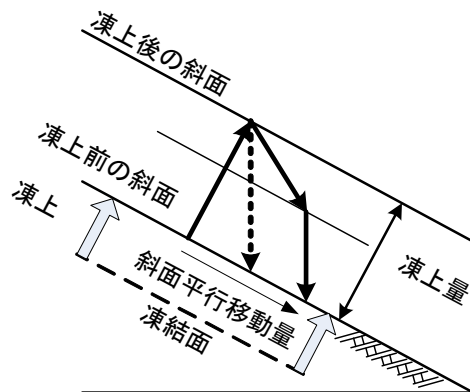


図-5.12 層別沈下計の経時変化

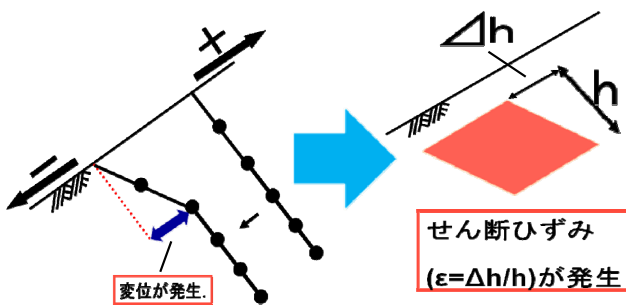
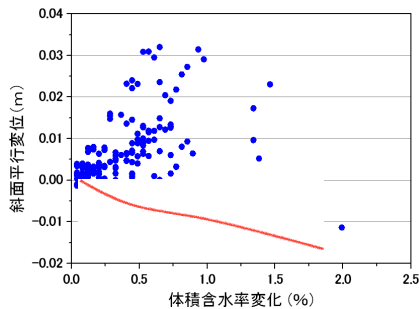
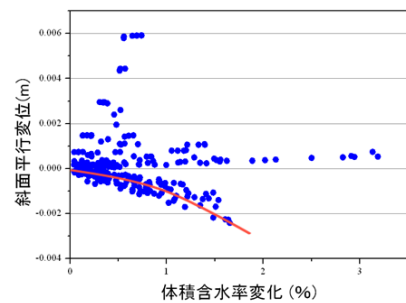


図-5.13 多段傾斜計による斜面崩壊の動態観測



(a) 清水町美蔓上段斜面



(b) 清水町美蔓下段斜面

図-5.14 体積含水率変化と斜面平行変位の関係

斜面表層崩壊に及ぼす凍結融解履歴の影響は極めて大きいと結論できる。

そこで、せん断に伴う斜面崩壊現象の簡易予測方法を検討するため、斜面平行方向への変位がどのような地盤条件において起こるのかを検討する。この場合、前章で明かにしたように、土質材料の違いならびに凍結融解履歴の有無にかかわらず、斜面崩壊時の含水比と初期の含水比の間には一義的な関係が存在する。そこで、融解期の体積含水率の変化と図-5.13に示すようにせん断ひずみの発生と関係の深い斜面平行変位の関係性について検討した。図-5.14は、斜面平行変位量と体積含水率変化量の関係を示したものである。図を見ると、等しい体積含水率変化量でも傾斜計の動きは上下に分かれた。上下に分かれる要因としてデータ分析から解ったことは、上段斜面では斜面上向きの変位は降雨時と融解沈下が終了した後に体積含水率が上昇した場合に見られ、斜面下向きの変位は気温が0°C以下の時に地盤内で体積含水率が大きくなった場合と、融解沈下が起こる前に体積含水率が大きくなった場合に観測された。なお、下段斜面については特定の要因を見つけるまでには至らなかった。しかし、上段斜面も下段斜面も斜面平行変位量は体積含水率変化量と相関がある

ように見える。このような傾向は、含水状態が斜面崩壊に深く影響を及ぼすとする前章の室内模型試験結果と符合するものである。このため、斜面平行下向きに変位する場合について、体積含水率の変化量と傾斜計変位量の関係を定量的に求めた(図-5.14中の近似線)。ここで、仮に、凍結融解作用を受ける地盤が崩壊に至る危険性のあるせん断ひずみを5%とし、多段傾斜計の一番浅い節の位置-16cmがすべり線の発生位置(崩壊深さ)であるとした場合、斜面崩壊に至る斜面平行変位は8mmとなる。このせん断ひずみ5%に相当する体積含水率変化量を下段斜面について推定すると7.0%(含水比換算で4.2%)となった。この数値の妥当性については、今後検討していく必要があるものの、前章で提案した斜面崩壊時保水量(含水比)と初期含水比の関係を土質などの地盤条件の違いを考慮して比較すると、定量的にも極端な違いはないと判断される。したがって、斜面崩壊深さに設置した土壤水分計から含水比(体積含水率)の変化を把握することにより、降水・融雪水による凍結融解作用を受ける斜面崩壊の危険度を予測することが可能であると結論される。

5.5 研究成果のまとめ

火山灰質土で構成される北海道内の実斜面において現地調査・現地計測を長期的に実施し、第7章で提案する二段階管理方法の管理レベル2を想定した、危険法面の動態観測システムとしての斜面モニタリング法について検討するとともに、凍結融解環境下の斜面崩壊予知理論の高度化に有用なフィールド情報の収集とその分析を行った。検討の結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 温度変化・土壤水分変化と凍結融解時の実斜面の変形挙動とが密接に関係しており、凍結融解時の斜面の力学挙動の推定や凍結融解斜面の滑り崩落等の前兆捕捉をする上で、両者が重要な管理指標・評価基準となることが明確に示せた。
- 2) 今回設置した計測器の測定結果で凍結融解時の斜面内挙動を充分説明できることから、凍結融解斜面の挙動観測に必要な測定項目や計測手法として、層別沈下計・多段傾斜計による斜面内の移動量推定法や凍上判定法、および地温計・土壤水分計による凍結深推定法・凍土層確認方法を具体的に提示することができた。

参考文献

- 1) Sato, T., Kurashige, Y. and Hirakawa, K.: Slow mass movement in the Taisetsu Mountains, Hokkaido, Japan, Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 8, pp. 347-357, 1997.
- 2) Harris, C. and Lewkowitz, A. G.: An analysis of the stability of thawing slopes, Ellesmere Island, Nunavut, Canada, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, No.2, pp. 449-462,

- 2000.
- 3) Matsuoka, N.: Solifluction rates, processes and landforms: a global review, *Earth-Science Reviews*, Vol. 55, pp. 107-134, 2001.
 - 4) 杉山友康, 河島克久, 飯倉茂弘, 布川修, 斎藤善樹: 凍結地盤の融解過程における水分と強度の変化, *鉄道総研報告*, Vol.16, No.8, pp.41-46, 2002.
 - 5) 火山灰地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会: 火山灰地盤の工学的性質の評価法に関するシンポジウム発表論文集, *地盤工学会北海道支部*, pp. 58-61, 2002.
 - 6) 岩渕祐一, 川口貴之, 片岡沙都紀: 凍結融解履歴を与えることが可能な繰返し一面せん断試験装置の開発, *地盤工学会北海道支部技術報告集第 50 号*, pp. 229-232, 2010.
 - 7) Yamada, S., Matsumoto, H. and Hirakawa, K.: Seasonal variation in creep and temperature in a solifluction lobe: continuous monitoring in the Taisetsu Mountains, Northern Japan, *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 11, pp. 125-135, 2000.
 - 8) 高濱利光, 坂田進, 廣田雅彦, 横谷篤至, 黒澤宏: FBG(Fiber Bragg rating)を使用した多段式傾斜計の開発—基本性能の検証と現場実証試験の結果報告—, *地盤工学ジャーナル*, Vol.1, No.3, pp.95-103, 2006.
 - 9) Aldrich, H. D. J.: Frost penetration below high way and airfield pavement, *Highway Research Board, Bulletin*, 135, pp.124-149, 1956.
 - 10) 土谷富士夫: 冬季の寒冷気候を利用した土壌凍結層の長期保存とその熱的解析, 昭和 61 年度～昭和 63 年度科学研究補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書, pp.1-83, 1989.
 - 11) 山中勤, 開發一朗: 寒冷乾燥地域における土壌水分の TDR 測定: 温度依存性と凍結・融解の影響, *電子モノグラフ*, No. 1, 筑波大学陸域環境研究センター, pp.1-7, 2003.
 - 12) 佐藤佳誉, 赤川敏: 凍上簡易予測方法の提案, *土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集第 III 部門*, pp.707-708, 2006.
 - 13) 高志勤, 益田稔, 山本英夫: 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究, *雪氷*, No.36, pp.1-10, 1974.

第6章 データベースの開発と情報活用方法の検討

6.1 斜面崩壊に関する情報活用の現状

近年、斜面災害が多発しており、斜面崩壊が“いつ”・“どのような原因”で発生するのかを予測することが重要となっている。現在では、土壌雨量指数¹⁾の適用により降雨による斜面災害発生危険性を発信するシステムが実用化されている。また、道内の国道・道道では斜面災害発生に対しても所定の降雨発生による通行規制が実施されている。これらの取組みのように、様々な形式で斜面崩壊に関する危険度は一般ユーザーに発信されている。

現状では、異常気象発生時における通行規制情報および雨量情報（時間雨量、連続雨量）は、例えば、北海道では「北の道ナビ」²⁾等によりインターネットで随時掲載されユーザーに示されている。しかし、北海道のような積雪寒冷地地域では、凍結・凍上による斜面崩壊の影響、地盤の凍結深さの影響、融雪水の発生による斜面崩壊の予測に関しては、情報活用がシステム化されておらず、道路点検者の技術的判断に委ねられることが多いと考えられる。

6.2 データベースの開発の意義

そこで、近年の気象状況の変化に対応し、防災効果を高めるためには、これらの情報発信に関しても、地盤工学的な根拠に基づいた合理的な斜面崩壊予測が必要となる。特に斜面内の力学変化と、気象観測情報に基づいた斜面災害予測が必要とされる。この目的を達するためには、斜面崩壊発生時の個別の状況分析のみならず、日常の降雨や融雪に対する斜面内の変化を見極め、広範囲での斜面災害発生予測を瞬時に行う仕組みが重要となる。

ここでは、斜面管理を効果的に進めるために必要とされる種々のデータを収集し整理を試みた。さらに、それらのデータを活用することで、気象観測結果と斜面内の水分量変化挙動との関連性について検討を行っている。特に、雨量および積雪量変化と斜

面内の含水状態の変化挙動に着目して調べている。これらの分析結果は、積雪寒冷地域に見られる融雪時期の斜面崩壊を予測するための工学的情報として有効なものになると考えられる。

6.3 斜面点検記録および気象観測情報の整理法

ここでは、収集された情報の整理法について述べる。まず、道路斜面点検記録については、点検されている斜面の位置情報および地形情報を視覚的に把握できるように、電子国土webシステムを活用した形式での整理を試みた。

図-6.1は、道路斜面の点検記録が実施されている箇所について地図上にプロットされている状況を示している。点検記録から読取られる情報はxml形式で整理されており、汎用性の高い情報の整理を実施している。斜面の点検位置とその内容の概略が分かるような形式でデータを整理することを目的として、パソコンの画面で表示される地図上にはマーカーを示し、そのマーカーにマウスを移動させることで斜面情報の概略が閲覧できるようになっている。

また、道路斜面点検記録に関しては、表-6.1に示されるように、一覧表の形式としても整理されている。ここでは特に、地盤工学的に重要である斜面勾配、土質の項目を新たに整理項目に挙げ一覧表中にも掲載している。さらに、電子ファイル(pdf)として保存されている点検記録情報へのリンクも掲載されていて、蓄積された情報の詳細な閲覧も可能となっている。この一覧表では、斜面勾配や土質などの条件を設定することで、類似する斜面情報を抽出することが可能である。以上のように整理された斜面点検記録情報から、斜面勾配や土質が類似している斜面を抽出し、斜面崩壊の可能性の高い箇所を判別することができるようにと考えられる。

一方、気象観測情報に関しては、表-6.2のような一覧表形式による整理を試みた。10分ごとに観測されている雨量（時間雨量、累計雨量）、気温、積雪量

が一年毎に掲載されている。さらに、気象変化の特徴を把握するための項目として、10分間隔での変化量および所定の期間内の最大の変化量に関する計算結果も掲載されている。これらの一覧表を用いると、膨大な量の情報から設定した条件に当てはまるデータのみを抽出して分析をすることが可能となる。例えば、ある時間Δt内で含水比が連続して増加しているデータを探し出し、その挙動に対応する雨量の変化量および積雪変化量を容易に実行することが可能となる。本研究では、これらの整理された各種の情報と後述する斜面内の計測結果を活用することで、気象変化と斜面内の含水状態の関係性について考察を進める。具体的には、斜面の非崩壊時における、降雨および積雪減少に伴う斜面の含水比増加量の関係を見出すことを試みる。

変化との関係を調べ、その結果をデータベースに掲載することも有効になると考えられる。ここでは、その基礎情報を見出すために、融雪期に斜面崩壊が発生した箇所の状況分析、崩壊発生箇所付近で実施されている斜面内水分モニタリング結果と気象情



図-6.1 斜面点検実施箇所の掲載状況

6.4 融雪期における斜面崩壊事例および斜面内の計測情報

(1) 融雪期に発生した斜面崩壊事例

寒冷地地盤情報データベースとしての利用度を高めるためには、融雪期での気象変化と斜面内水分量

表-6.1 斜面点検記録の一覧表の例

xml 入力 番号	位置情報	起点KP	終点KP	対象項目	判定	対策の有無	対策完了年度	緯度	経度	斜面勾配	土質	URL	備考:
1	札幌 千歳	31830	31953	盛土	I	有	H10	42 51 23	141 36 24	1:1.5			
2	札幌 千歳	31680	31830	崩壊	I	有	H12	42 49 25	141 17 57	54°、35°	有機質シルト、シルト岩		
3	札幌 千歳	34000	34070	崩壊	I	有	H11	42 48 45	141 17 30	42°	有機質シルト、礫質有機シルト		
4	札幌 千歳	40490	40631	崩壊	I	有	H10	42 48 5	141 20 14	30~40°	浮石質凝灰岩		
5	札幌 千歳	43575	43607	崩壊	I	有	H11	42 47 31	141 22 12	30°			
6	札幌 千歳	43876	44218	崩壊	I	有	H11	42 47 20	141 22 31	40°			
7	札幌 千歳	45236	45290	崩壊	I	有	H11	42 46 57	141 23 9	45°			
8	札幌 千歳	46380	46500	崩壊	I	有	H11	42 46 34	141 23 49	50~60°、40°			
9	札幌 千歳	46570	46830	崩壊	I	有	H10	42 46 28	141 23 59				
48	室蘭			落石・崩壊	IV			42 23 22	140 54 27	45°	室蘭岳火山噴出物、安山岩岩塊、黄泥土流堆積物		崩壊後、特に新たな対策は必要としない。崩壊時、斜面時には表層部や湧水による裏面のゆるみが生じている可能性があるため、対策が必要である。
18	室蘭 日高	139206	139294	崩壊	I	有		42 56 44	142 36 20	35°	粘板岩～砂岩		
19	室蘭 日高	139305	139429	崩壊	I	有		42 56 45	142 36 21	40°、70°~80°			
20	室蘭 日高	139429	139470	崩壊	I	有		42 56 47	142 36 25				
21	室蘭 日高	139923	139993	崩壊	I	有		42 57 0	143 36 37				
22	室蘭 日高	140058	140110	崩壊	I	有		42 57 0	142 36 41				
23	室蘭 日高	140110	140173	崩壊	I	有		42 57 0	142 36 45				
24	室蘭 日高	140278	140374	崩壊	I	有		42 57 1	142 36 53	70°、45°	粘板岩		
25	室蘭 富川	58181	58231	盛土	I	無		42 24 42	142 14 28				
26	室蘭 富川	61096	61126	崩壊	I	無		42 23 28	142 15 58	40°	海岸段丘堆積物		

表-6.2 斜面点検記録の一覧表の例

2008年1月1日から12月31日			中瓜幕	時間雨量の微分係数のような計算(10分間隔値の変化)											
年月日時分	時間雨量 mm/h	気温 Co	現在積雪 cm	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (現在値 -10分 前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (10分前 値-20 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (20分前 値-30 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (30分前 値-40 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (40分前 値-50 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (50分前 値-60 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (60分前 値-70 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (70分前 値-80 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (80分前 値-90 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (90分前 値-100 分前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (100分 前値- 110分 前値)	時間雨量 変化 (mm/h) * 10分 間隔 (110分 前値- 120分 前値)
2008/1/27 6:40	0	-10.6	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 6:50	0	-10.4	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 7:00	0	-10.3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 7:10	0	-10.3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 7:20	0	-10.1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 7:30	0	-9.9	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 7:40	0	-9.8	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008/1/27 7:50	0	-9.6	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

報との関係性を検証する。

まず、道内で見られた斜面崩壊の事例³⁾を示す。B地点では、平成18年4月20日23:30頃に斜面表層すべりが発生した。斜面は道路沿いの西南西向きである。図-6.2は斜面崩壊時の崩壊土砂堆積状況が示された図である。これは、災害発生後の斜面点検時に作成されたスケッチに基づいている。これによると、のり高15m、崩壊前の勾配1:1.5であった斜面上部において、2m程度の崩壊深さで斜面が崩壊し、道路まで崩壊土砂が堆積していた状況を読み取ることができる。なお、崩壊土砂は延長10mに渡り路面上に堆積しており、崩壊土量は 40m^3 であったとされている。

図-6.3は、崩壊箇所近傍で実施されたボーリング結果に基づいて推測された斜面地盤の断面図を示している。この図では、対策工実施後の断面形状および斜面勾配が示されている。これより、崩壊箇所の地盤は火山灰質粘性土層と砂礫層との互層であることが分かる。さらに、斜面上部箇所ですべりが発生していることから、上位火山灰質粘性土層および上位砂礫層の内部にすべり線が発生していたことも予想される。

次に、平成18年5月28日18時40分頃に斜面崩壊が生じたS地点での崩壊事例を示す。道路沿いの斜面表層が崩壊し、崩壊土砂が道路まで達した被害をもたらした。図-6.4は、崩壊時の崩壊状況を記述したスケッチを示す。この箇所では延長25mに渡って崩壊土砂が堆積しており、路面上には約 125m^3 の土砂が堆積していた。なお、S地点周辺では過去に斜面崩壊して堆積した崖錘堆積物の上に火山灰が堆積しており表層の火山灰層が崩壊したこと、4万年前に形成された地形で、もともと崩壊しやすかったことも指摘されている。

崩壊発生箇所の斜面の詳細情報が得られなかったため崩壊した斜面の情報を明示できないが、崩壊箇所から5.8km離れた箇所においては、斜面下部で $35\sim 40^\circ$ 、斜面上部では $60\sim 65^\circ$ の勾配を有する斜面であることが分かった。つまり、S地点も含めてこの地域では、斜面の勾配は全体的に急であることが伺える。

(2) 斜面内含水比変化と気象状況との関係

次に、融雪期に斜面崩壊が生じたB地点およびS地点付近での斜面内含水比変化と気象状況との関係について調べる。

図-6.5は斜面内の計測器の設置状況の模式図を示している。各深さで得られた計測データを深さ方向に積分し、その結果に基づき単位深さ当りの平均値を算出して斜面内の挙動を調べている。ここでは、得られた体積含水率かを含水比に変換して以降の分析を行っている。

次に、図-6.6は斜面内で計測された含水比、降雨および積雪情報の読み取り手法を示している。まず、含水比が所定時間 Δt （ここでは3時間とする）の間に増加し続けた日時を選出する。その際、 Δt 時間での含水比増加量を Δw とする。次に、選出された日時か

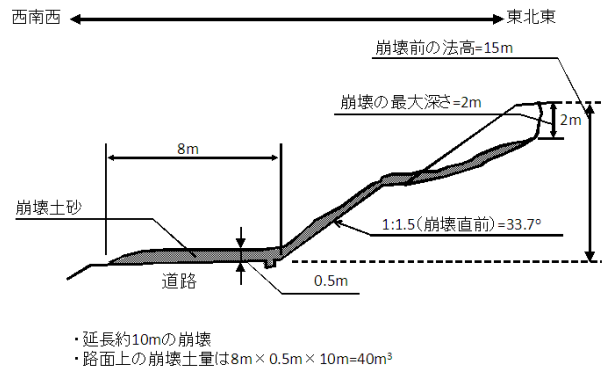


図-6.2 斜面崩壊状況 (B地点, 平成18年4月20日)

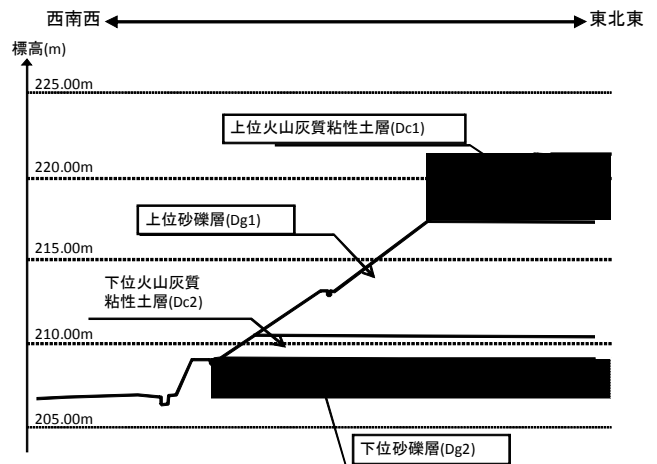


図-6.3 斜面崩壊付近の土質状況 (B地点)

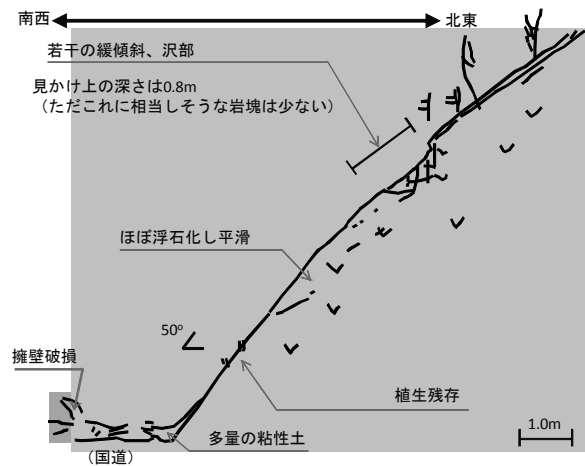


図-6.4 斜面崩壊状況 (S地点, 平成18年5月28日)

ら過去に遡って、その直前に発生した降雨情報により累計雨量の最大値を調べる。これらを用いて、含水比増加挙動に及ぼす降雨の影響が検討されている。

次に、積雪量変化に関しても降雨情報と同様に、 Δt 時間での含水比増加量を Δw とその直前に見られた積雪減少量(RSと称する)を読み取った。ここで

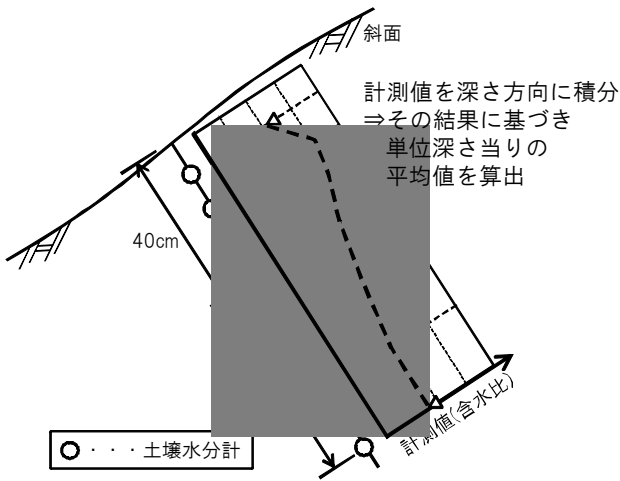


図-6.5 斜面内計測のイメージ図

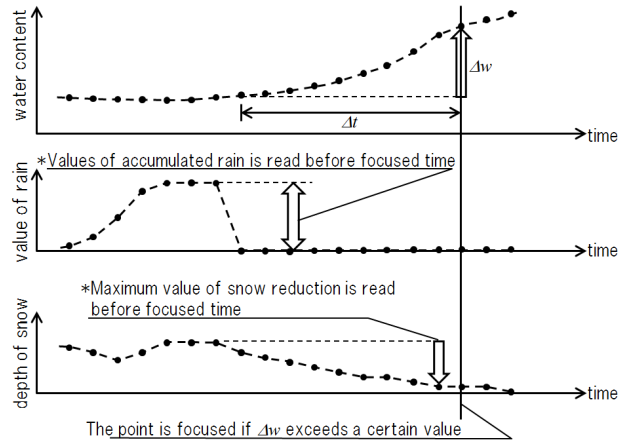


図-6.6 含水比, 降雨, 融雪の読取方法

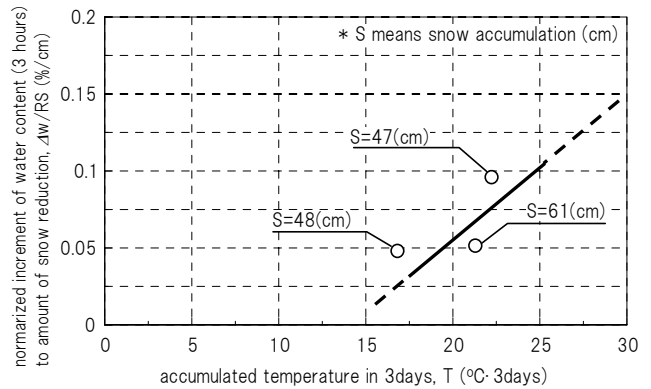
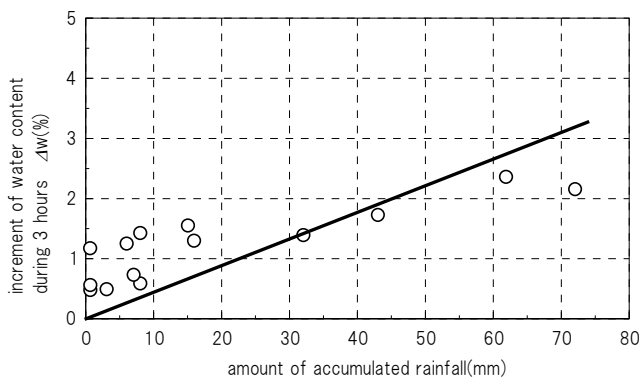


図-6.7 S地点での計測値分析：(a) 含水比増加量と累計雨量，(b) 含水比増加町(融雪1cm当り)と気温累計値

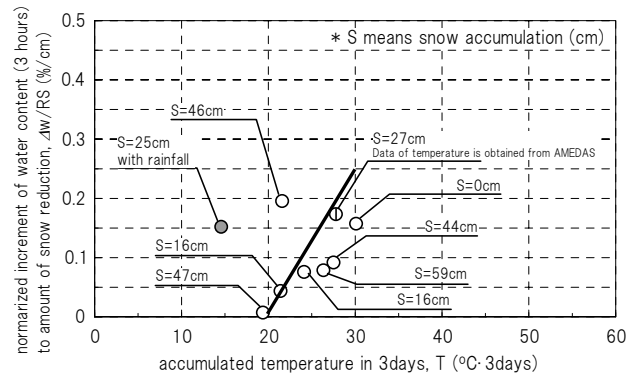
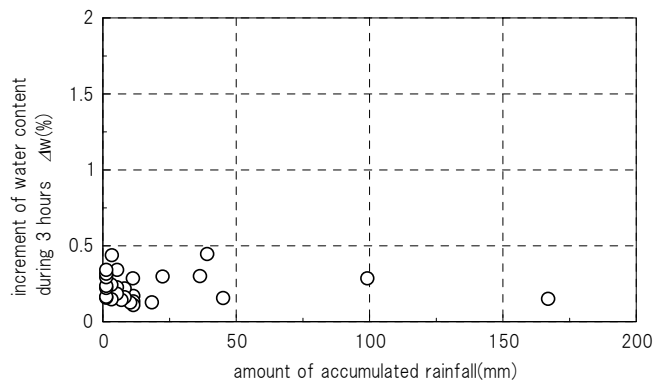


図-6.8 B地点での計測値分析：(a) 含水比増加量と累計雨量，(b) 含水比増加町(融雪1cm当り)と気温累計値

は、積雪量が3日連続で減少している場合のみを分析の対象とした。なお、含水比は斜面表面から40cmまでの範囲での値を用いた。

図-6.7 (a), (b)はS地点での計測値の分析結果を示している。(a)図は累計雨量と含水比増加量の関係を示している。これより、累計雨量と含水比増加量の間には一義的な関係が存在すると考えられる。一方、(b)図は積雪減少量1cm当りの含水比増加量 $\Delta w/RS$ と気温累計値Tの関係を示す。ここで、気温累計値Tは積雪量が減少している期間での「最高気温と最低

気温の差の3日分の累計値T(単位を $^{\circ}C \cdot 3days$ としている)」として定義されている数値である。図より、データ数が限られているが気温累計値Tの増加に伴って縦軸の $\Delta w/RS$ 値も増加する傾向が見られている。

次に、B地点における計測結果を図-6.8 (a), (b)に示す。(a)図は累計雨量と含水比増加量の関係を示している。S地点での傾向(図-6.7 (a))とは異なり、両者に明確な関係性を見出すことは難しいと判断される。この分析結果より、降雨による含水比増加挙動が斜面を構成する土質に影響を受けることが示唆

されている。次に積雪変化の影響を見るために、(b) 図には積雪減少量1cm当りの含水比増加量 $\Delta w/RS$ と気温累計値Tの関係を示している。これより、気温累計値Tの増加に伴う $\Delta w/RS$ 値の増加傾向が見られた。なお、図中には積雪減少と同じ時期に降雨が見られたデータも併記されている。このデータを見ると、降雨と融雪が同時に発生する場合は、他のケースに比べて斜面内含水比が顕著に増加していることも分かる。

以上の2地点の分析により、斜面内含水比増加量と、雨量または融雪量、気温との関係には次のような関係があることが考えられる⁴⁾。

[降雨に関して]

$$\Delta w = C_1 \cdot [\text{雨量(時間雨量または累計雨量)}] \quad (6.1a)$$

[融雪、気温変動に関して]

$$\Delta w = C_2 \cdot [\text{融雪量}] \cdot [\text{気温の情報}] \quad (6.1b)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は各斜面に対応する係数である。この分析で得られた関係に基づく結果(C_1 、 C_2 のような係数)をデータベースに掲載すれば、降雨だけでなく、融雪の影響を考慮できる情報活用が可能になると考えられる。

(3) 北海道開発局による斜面計測実施と計測結果分析

道路斜面管理をさらに合理的に進める手法を見出すことを目的に、北海道開発局による斜面計測が実施されてきている。ここでは、その斜面計測地点の紹介とともに、現在までに得られた計測結果と気象情報との関係について分析を試みる。

北海道開発局による斜面計測実施までの流れは、以下の通りである。

2009年6月25日：

計測実施に向けた打合せ（本研究内容に関する確認作業も含む）

2009年8月4日：

計測候補地視察（檜山管内檜山郡上ノ国町字汐吹、一般国道228号斜面、函館市から西に54.8km）

2009年8月24日：

計測候補地視察（上川管内上川郡上川町字上越、一般国道333号斜面、旭川市から東北東に50.7km）

2009年11月下旬から：

上記2地点での計測開始（土壌水分計、温度計）。北海道大学地盤環境解析学研究室が計測データを随時受信している状況。

なお、図-6.9は、計測を行っている大まかな位置を示している。

まず、一般国道228号斜面（上ノ国町字汐吹）の計測箇所および当該箇所が発生した斜面崩壊（平成20年8月3日）の状況を記載した断面図および平面図を図-6.10、図-6.11、図-6.12、写真-6.1に示す。これらの図中には、計測器設置個所の位置が併記されて



図-6.9 北海道開発局による斜面計測箇所



図-6.10 上ノ国町(汐吹)の斜面計測箇所



写真-6.1 設置箇所の状況(2010年3月1日)

いる。ここでは深さ1.5m、2.0m、2.5mで土壌水分および斜面内の気温が計測されている。また、図より計測は斜面崩壊が見られた範囲の内、礫、砂、シル

データ分析例 上ノ国町汐吹地区（国道228号）

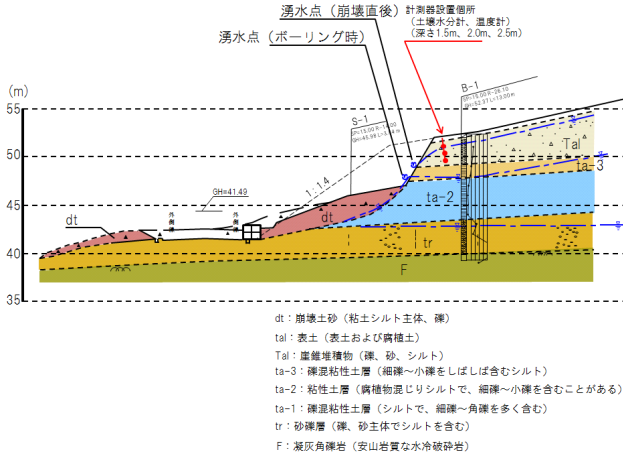


図-6.11 断面図と土壤水分計・温度計設置箇所

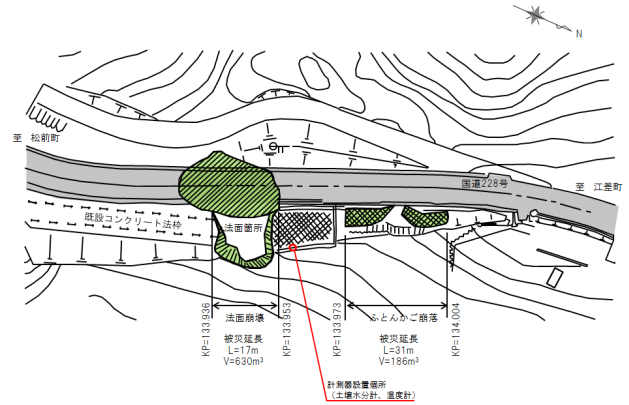


図-6.12 平面図と土壤水分計・温度計設置箇所

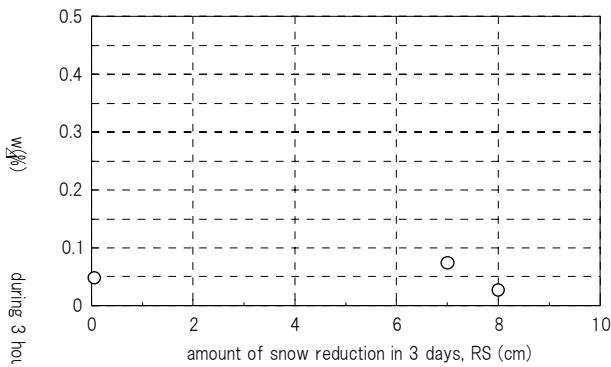


図-6.13 含水比増加量と融雪量の関係

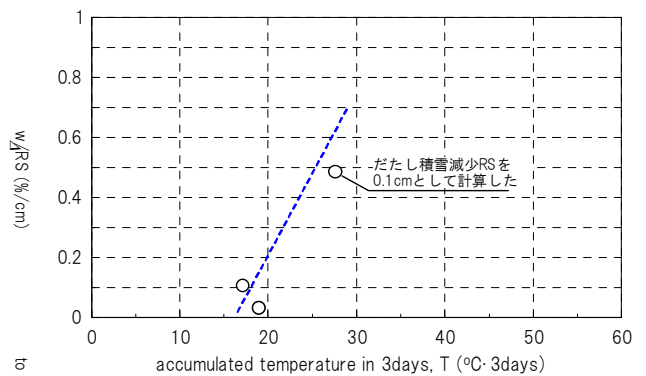


図-6.14 融雪1cm当りの含水比増加と気温累計値の関係

トが主体である崖錐堆積物の層で実施されていることが分かる。

図-6.13, 図-6.14は、それぞれ平成22年1月からの計測結果を、含水比増加量（3時間分）と融雪量（3日分）の関係、および融雪1cm当りの含水比増加と気温累計値の関係として示している。平成22年1月からの計測結果のため、本分析条件に該当するデータ数が少ないが、図-6.13のような含水比増加量と融雪量の関係よりは、融雪1cm当りの含水比増加と気温累計値との方が、より明確な関係が見られるようである。

次に、一般国道333号斜面（上川町字上越）の計測箇所および当該箇所が発生した斜面崩壊（平成20年5月3日）の状況を記載した断面図および平面図を図-6.15, 写真-6.2, 図-6.16, 図-6.17に示す。なお、本計測箇所では、斜面崩壊が発生した箇所の上部近傍にある崖錐堆積物の層の深さ1.0m, 1.5m, 2.0mにて、土壤水分および斜面内温度が計測されている。

この箇所での融雪期における斜面内水分変化を含水比変化挙動として調べるために、図-6.18, 図-6.19は、それぞれ平成21年12月からの計測結果を、含水比増加量（3時間分）と融雪量（3日分）の関係、および融雪1cm当りの含水比増加と気温累計値の関係として示している。

まず、図-6.18より融雪量の増加に伴い含水比増加

量(3時間分)が上昇する傾向が見られる。また、図-6.19においても気温累計値と融雪1cm当りの含水比増加量には一義的な関係があることもわかる。このような関係は、上ノ国町汐吹地区でも同様に見られている。したがって、融雪の影響を斜面崩壊に役立てる際には、斜面内含水比増加挙動を、融雪量および気温の両方の情報を活用して推測することが有効であるといえる。

6.5 研究成果のまとめ

寒冷地地盤情報データベースの開発と情報活用方法の検討としての一連の成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 斜面点検情報および気象観測結果を閲覧する仕組みが構築された。これらの情報より、地盤工学上、有効となる斜面勾配および地質についても整理されている。
- 2) データベースに掲載する情報について検討するために、気象観測結果と、斜面内計測結果との関係を検討した。これより、含水比増加量と降雨または、融雪と気温との間に一義的な関係が見いだせた。これらの関係は融雪期における道路斜面管理の際の情報活用手段として有効

第7章 今後の道路政策への提案

7.1 斜面崩壊予知・災害危険度評価システム

一連の研究では、凍結融解履歴に伴う構成地盤材料の力学特性の変化に着目した凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構を実験的アプローチから明らかにし、そのデータにもとづいた解析では、実問題への適用性を最優先した高度な解析手法の構築を行った。併せて、気象・地盤条件、地盤工学的な知見、災害事例等の異なる情報を統合した寒冷地地盤情報データベースの試作、現地動態観測手法の確立など、積雪寒冷地斜面の災害危険度評価の基礎データが収集されている。ここでは、斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの構築のための具体的な検討を行う。

(1) 簡易災害危険度評価式の提案

はじめに、境界条件が明確である模型実験結果にもとづいて、本研究で基本となる災害危険度評価式の提案を行う。

斜面表層崩壊を考えた場合、その影響因子は、
素因：斜面角、不透水層の存在、斜面内の摩擦角などの幾何学的因子

誘因：降雨強度、総雨量などの降雨履歴、凍結融解履歴の外的因子

に分類される。実際では、これらの2つの因子が複雑に絡み合うため、個々の寄与度を別々に議論することができないが、簡易的に2つの因子に分けた形で危険度評価式を構築した。

a) 斜面の幾何学的要因にもとづいた危険度評価

斜面表層崩壊の危険度評価をするに当たっては、まず、はじめに素因から斜面崩壊のポテンシャルを計ることが妥当である。そこで、図-3.6の実験結果にもとづいて、以下、議論を進めることにする。

前述した図-3.6は、不透水層の摩擦係数と斜面角との関係を示したものである。本試験の範囲内では、降雨によって不透水層から地下水位が上昇して崩壊に至るケースがなかったことから、純粋に力学的塑性平衡状態を考慮して式の提案をおこなった。すなわ

ち、式(3.2)にもとづけば、斜面の素因による崩壊基準は、

$$\alpha > \tan^{-1}(c_i \tan \phi + d_i) \quad (7.1)$$

のように表わされる。ここで α は斜面角、 ϕ は内部摩擦角、 c_i と d_i は土質特性に依存する係数であり、右辺が斜面角より大きくなれば崩壊することになる。このように、斜面を構成する土質材料の指標特性から、式(7.1)を満たす条件を抽出することによって、力学的に、合理的な崩壊の評価をすることが可能となる。

次に、誘因にもとづいた危険度評価式を検討した。前述の図-3.5に示す通り、斜面角と崩壊時の総雨量は線形関係が得られていることから、基本となる崩壊基準を式(3.1)にもとづいて、以下のように設定する。

$$\alpha > a_1 R_t + b_1 \quad (7.2)$$

$$\alpha > a_2 R_t + b_2 \quad (7.3)$$

$$\alpha > a_3 R_t + b_3 \quad (7.4)$$

ここで、 α は斜面角、 R_t は総雨量、 a_1 と b_1 、 a_2 と b_2 、 a_3 と b_3 それぞれ1. 斜面密度、2. 降雨強度、3. 摩擦係数（例えば、図-3.5の勾配とy切片）にもとづいた関係から得られる係数である。すなわち、総雨量と各係数との関係（右辺）が斜面角よりも大きい場合、崩壊が起る可能性が高いことになる。ここで、1.から3.の変動パラメータは互いに独立しているので、危険度評価においては3式のうち、1つでも基準を満たすものがあれば、危険と判断すべきである。

以上のような式を取り入れることによって、より簡便に危険度評価が行えることになる。

b) 保水特性にもとづいた危険度評価

一方、凍結融解履歴の有無によって崩壊のメカニズムが変わることが第3章において示された。次に、

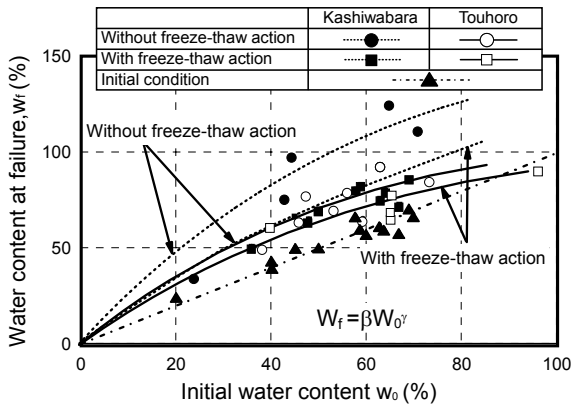


図-7.1 初期含水比の違いによる崩壊時含水比の変化

表-7.1 式(7.5)における係数 β と γ

	Kashiwabara		Touhoro	
	β	γ	β	γ
without freeze-thaw action	2.4	0.9	4.3	0.7
with freeze-thaw action	2.8	0.8	2.4	0.8

図-3.7 に示した保水量から算出した含水比の経時変化にもとづいた崩壊予知法の提案を試みた。

図-7.1 は、本研究で用いた火山灰土（柏原火山灰土及び当幌火山灰土）の崩壊時の斜面内の含水比 w_f と初期含水比 w_0 の関係を凍結融解履歴有無によって示したものである。なお、図中には初期状態の含水比 w_0 も併せてプロットしている。図より、初期含水比と崩壊時の含水比の間には、図-3.7 と同様、ユニークな関係があることがわかる。また、凍結融解履歴を与えることによって、両試料ともにその関係は低下している。特に、柏原火山灰土においてはその傾向が強い。このことは土質材料の破砕性・保水性に依存していると考えられる。これらの関係を示すと以下のようなになる。

$$w_f > \beta w_0^\gamma \quad (7.5)$$

ここで β と γ は土質材料によって変化する係数であり、右辺が左辺より大きくなれば、崩壊の危険性が高い。なお、その係数の具体値は表-7.1 に示されている。

以上のことを総合すると、凍結深さからすべり線の発生位置を推定し、さらに土壌水分計等の計器を設置し崩壊に至らしめる保水量（含水比）をモニターできれば、上記のような関係式を用いることによって、降水による斜面崩壊の危険度を予測することが可能になる。

また、斜面内含水比の増加量に関しては、第6章で示された式(6.1a)、式(6.1b)により推定可能であることから、斜面内の初期含水比 w_0 および崩壊時含水比 w_f との大小関係を調べることができれば、保水特性の経時変化にもとづいた危険度評価が可能となる。具体的には、

$$w_f (= \beta w_0^\gamma) > w_0 + \Delta w \rightarrow (\text{安全, 非崩壊})$$

$$w_f (= \beta w_0^\gamma) \leq w_0 + \Delta w \rightarrow (\text{危険, 崩壊発生})$$

ここで、

$$\Delta w = C_1 \cdot [\text{降雨量}] + C_2 \cdot [\text{融雪量}] \cdot [\text{気温の情報}] \quad (7.6)$$

C_1 , C_2 は斜面の土質、勾配、周辺状況に依存する係数である。

(2) 斜面崩壊予知・災害危険度評価のフロー

本研究では、積雪寒冷地における斜面崩壊現象の簡易な予知・災害危険度評価方法を構築するために、気象・地形・地盤情報を用いて凍結融解環境下における斜面崩壊の発生（箇所・時期）を予測する、積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの開発を検討した。具体的には、前章までの斜面災害の要因分析結果をもとにして、前述の簡易災害危険度評価式を提案し、それを利用して寒冷地地盤情報データベースの種々の情報を相互に関連づけ、凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知や災害危険度評価を行うシステムを開発した。開発したシステムのフローチャートを図-7.2 に示す。両図は、後述する管理レベル1（広域危険度評価）と管理レベル2（斜面崩壊危険度評価）のフローチャートをそれぞれ示している。

管理レベル1のフローチャートでは、過去に行われた降雨時の斜面力学挙動にもとづいて、広域危険度評価のスクリーニングを提示している。その具体的なフローを以下に示す。

- ① 道路防災カルテなどの情報から、斜面の構成土質、斜面勾配を確定する。構成する土質材料から、強度定数を推定する。なお、原位置試験等において、それらの強度定数が既知の場合はその値を用いる（e.g. ϕ をN値から推定）。
- ② フローチャートの第1次判定基準である勾配と斜面内摩擦度の簡易災害危険度評価式（図-3.6）に基づいて、斜面がもつ崩壊ポテンシャル（素因）から危険度を判定する。
- ③ 防災カルテ等の情報から過去に同地区で斜面災害履歴がある場合には、再度危険度を判定する必要があるため、斜面崩壊誘因を考慮した総合的な再評価が必要である。
- ④ 過去の気象データを用いて、誘因である対象斜面付近の降雨強度、総雨量を代表とする累積雨量の最大値を抽出する。なお、融雪量に関しては、式(6.1a)、式(6.1b)を活用して雨量に換算することが可能である。このため、融雪量の影響も考慮可能となる。具体的には、次のように換算可能である。

$$[\text{換算雨量}] = (C_2/C_1) \cdot [\text{融雪量}] \cdot [\text{気温の情報}]$$

$$(7.7)$$

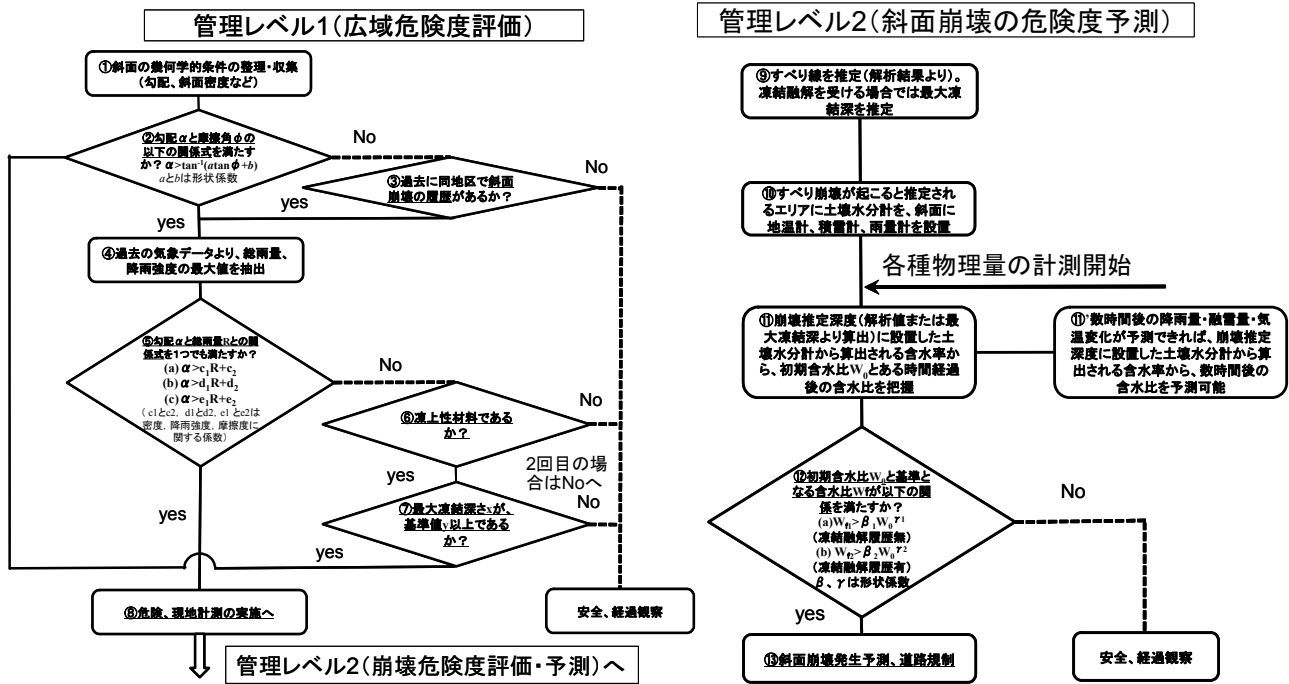


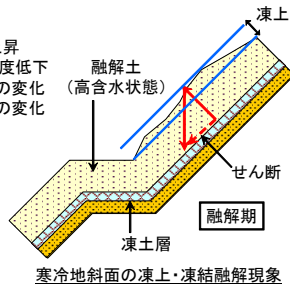
図-7.2 評価システムの管理レベル別危険度判定フロー

- ⑤ フローチャートの第2次判定基準である勾配と総雨量の三つの簡易災害危険度評価式(図-3.5)に基づいて、各誘因因子に対する危険度判定を行う。
- ⑥ 寒冷地特有の現象である凍上・凍結融解履歴が斜面崩壊に及ぼす寄与度を評価するため、凍上性土質材料か否かを、室内要素試験(凍上試験)等で判定する。
- ⑦ 斜面崩壊規模(層厚)を表す指標として基準値 y の導入・設定し、当該箇所すべり線の発生位置 D_f との比較により、管理対象箇所かどうかの判定を行う。ただし、対象斜面の土質が凍上性材料の場合、すべり線の発生位置 D_f は、積算寒度と修正Berggren式を用いて推定される斜面の最大凍結深さ D_s に等しいと仮定する(図-3.17)。なお、この判定により、危険があると判断された場合には、既に凍結融解履歴を受けている可能性があることから、フローチャートの第1次判定に戻り、凍結融解履歴を考慮した勾配と斜面内摩擦係数の関係式に基づいて、斜面がもつ崩壊ポテンシャル(素因)から危険度を再判定する。
- ⑧ 管理レベル2に移行する。
- 次に、管理レベル2(斜面崩壊危険度評価)のフローチャートを示す。管理レベル2では具体的に斜面崩壊の危険度予測法を検討している。同様に、その流れを説明する。
- ⑨ 凍結融解履歴を受けた場合では、前述のとお

- り、すべり線発生位置は凍結深さになると推定されるため、その凍結深さを原位置試験または室内試験より予測する。また、凍結融解履歴を受けていない(その影響が小さい)斜面については、解析手法等を用いて、そのすべり線の深さを予測する。
- ⑩ ⑦の結果に基づいて、すべり線近傍に土壌水分計を、斜面表層部に地温計を、地表に雨量計、積雪計、気温計をそれぞれ設置して、気象変化に伴う各種物理量の変化をモニタリングする。
- ⑪ 初期含水比 W_0 とある時間経過後の含水比の変化を最大凍結深に設置した土壌水分計によって推定する。なお、数時間後の降雨量・融雪量・気温変化が別途予測できれば、凍結融解・降雨複合型斜面崩壊解析モデルを用いて、数時間後の含水比を予測することも可能となる。さらに、対象斜面の土質等に応じた含水比増加の特徴(具体的には式(6.1a)、式(6.1b)中の係数 C_1 、 C_2)が判明していれば、式(6.1a)、式(6.1b)を活用することでも対応可能である。
- ⑫ フローチャートの第3次判定基準である現在の含水比 W_f と初期含水比 W_0 の簡易災害危険度評価式(図-7.1)に基づいて、斜面表層崩壊に対する危険度判定を行う。
- ⑬ 判定基準に基づいて、斜面崩壊の周知並びに道路規制を行う。
- 上記のような広域危険度判定ならびに斜面崩壊危険度予測に対する簡易危険度評価手法では、最大凍

寒冷地斜面崩壊機構の特徴

- 凍結融解により土の初期含水比の上昇？ 自重・間隙水圧増加とせん断強度低下
- 凍結融解により土の物理・力学特性の変化？ 粒度・強度変形特性・浸透特性の変化
- 凍上融解により表層に緩い層が形成？ 土の密度低下(不連続化)
- 凍上融解により地盤がせん断？ 累積繰返しせん断
- 滑りやすい凍土層が地盤内に存在？ 潜在すべり面の形成
- 融雪による流入量の増加？ 土の飽和度



寒冷地斜面崩壊の重要因子

- ① 斜面深さ方向の土壌水分量分布の推定
- ② 最大凍結深・融解期の凍土深さの推定
- ③ 凍上性判定・凍上量・融解移動量の推定
- ④ 凍結融解作用による土の物性変化判定
- ⑤ 融雪による換算雨量の算定

図-7.3 本研究から推定される積雪寒冷地斜面崩壊の特徴

表-7.2 本研究から推定される積雪寒冷地斜面崩壊の因子

種類	因子名	温暖地域	積雪寒冷地域	備考
素因	① 急な斜面勾配			
	② 構成地盤材料の低い強度			
	③ 地盤の風化速度と安定性	○	○	
	④ すべり面の存在、形成			顕在・潜在すべり面に大別
	⑤ 集水地形と地下水位			
	⑥ 積雪寒冷な気候条件		◎	凍結融解作用を受ける地域
	⑦ 構成地盤材料の凍上性			
誘因	① 斜面形状の変化			侵食・掘削・盛土等による
	② 地震力作用	○	○	
	③ 土の単位体積重量増加			飽和度の上昇に伴う変化
	④ 土の強度低下	○	◎	飽和度の上昇に伴う変化
	⑤ 間隙水圧の上昇	主に降雨による	主に凍上融解・融雪による	地下水面や浸透流の変化
	⑥ 地盤内の緩み層の形成			
	⑦ 土の物理特性の変化			
	⑧ 土の力学特性の変化		◎	物理特性の変化による
	⑨ 凍土層の形成			不透水層・潜在すべり面の形成
	⑩ 凍上による			

※ ◎は温暖地域と異なる積雪寒冷地特有の因子

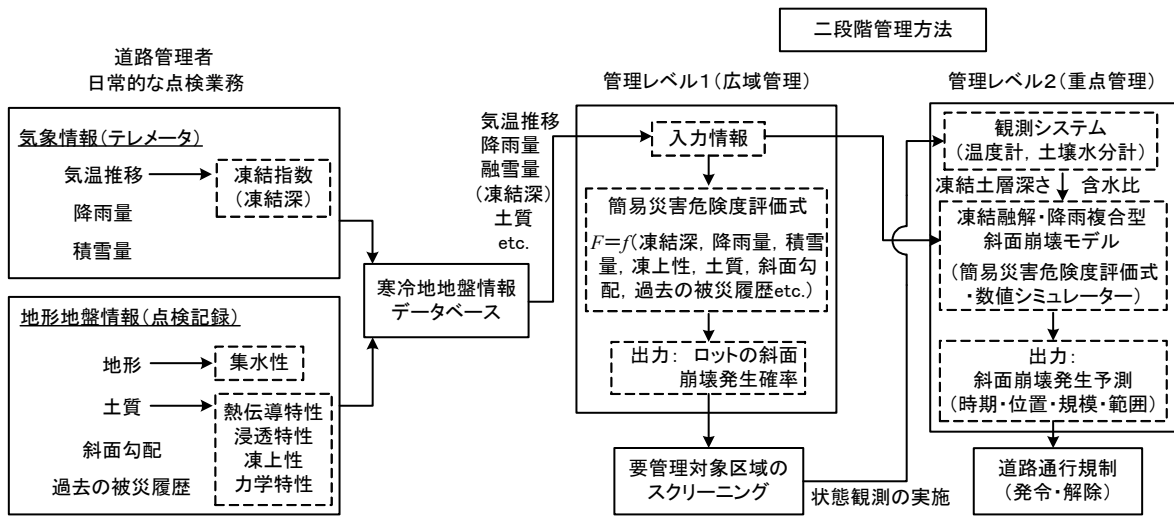


図-7.4 積雪寒冷地斜面管理の再構築方法の概略

結深さからすべり線の発生位置(崩壊深さ)を推定し、その崩壊深さに設置した土壌水分計から崩壊に必要な保水量を把握するだけで、降雨・融雪水による斜面崩壊の危険度が簡易的に評価できる。

7.2 研究成果の活用方策

(1) 開発システムを利用した斜面管理方法

積雪寒冷地における斜面崩壊予知の深化や予防防災などの道路斜面の防災対策・点検管理の高度化を考える場合には、融雪水の浸透や凍結土の融解による飽和度上昇、および凍結・非凍結層境界部において弱面形成が見込まれることから、従来用いられてきた降雨量に加えて、地表の積雪量・温度変化、降雨や地下水位変化などに伴う土壌水分量変化や凍結深に影響する項目を新たな管理指標と考え、個別あるいは重み付けを行った総合的な管理を新たに検討する必要がある。このため、本研究では、研究成果をもとに、積雪寒冷地の斜面崩壊に重要な影響があると考えられる新しい因子の存在を示し(図-7.3)、温暖地域における斜面崩壊機構との違いを表-7.2のように明確にした。この結果、積雪寒冷地における斜面崩壊発生の検討フローはほぼ確立できたと考え

られる。また、新たな因子を素因・誘因として考慮可能な凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルや、新しく提案する管理指標を採用した管理方法に適した新しい管理ツール(簡易災害危険度評価式・数値シミュレーション)を本研究で開発したことで、それらを利用して積雪寒冷地の道路斜面管理方法を合理化するための素地はできたと判断される。したがって、本研究から得られる研究成果の具体的な活用方策として、以下のような「積雪寒冷地斜面管理の再構築(図-7.4)」を提案する。

【積雪寒冷地斜面管理の再構築】

1. 二段階管理方法の試行

寒冷地における道路斜面管理の合理化を志向して、利用可能な情報量あるいは監視体制の違いにより、以下のように2段階の管理レベルで積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価を運用する。

① 管理レベル1(広域管理)

気象情報(テレメータ)や地形地盤情報(点検記録)といった広域データ(ベース)を用いて斜面崩壊の災害発生危険度を評価し、要管理対象区域のスクリーニングとその更新を実施する。

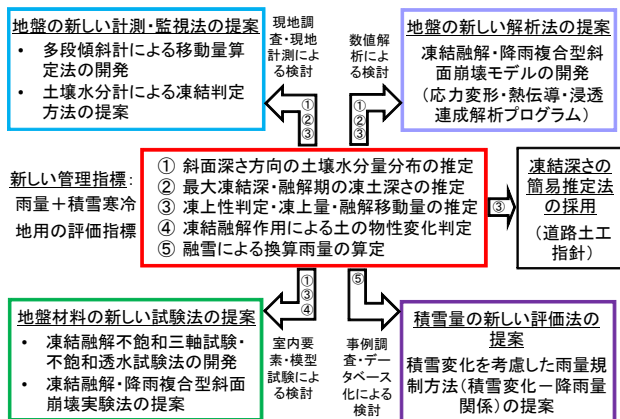


図-7.5 本研究から提案される新しい斜面管理方法

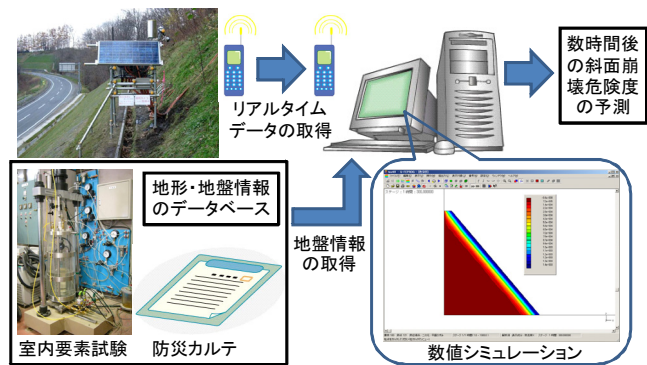


図-7.6 本研究で提案する寒冷地斜面用崩壊予知システム

②管理レベル2（重点管理）

要管理対象区域に選別された特定箇所を対象として設置する，温度計・土壌水分計等のモニタリングシステムから得られる観測データを用いて，より細かな斜面崩壊発生予測（時期・位置・規模・被災範囲等）を行い，道路通行規制の発令・解除を時々刻々具申する斜面安定性のリアルタイム評価を行う。

2. 新しい管理指標・評価基準の提案

寒冷地における道路斜面管理の高精度化を志向して，凍結融解・降雨複合型斜面崩壊の簡易災害危険度評価式を用い，現行の道路斜面の管理指標である降雨量+積雪量（土壌水分量変化）や斜面勾配等の地形条件に加え，地盤の凍上性と凍結深（凍結土層位置）に影響する項目（地表面温度等）を新たな管理指標とした，積雪寒冷地用の斜面管理方法を採用する（図-7.5）。また，斜面の安定性のリアルタイム評価に必要な情報を収集するため，状態監視方法・体制などを高度化する（図-7.6）。

3. 新しい管理ツールの採用

寒冷地における道路斜面管理の高度化を志向して，前述の2段階の管理レベルに対応して，凍結融解環境下の斜面崩壊予知理論を応用した，以下のような2種類の積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価ツールを採用した道路斜面の維持管理体制の構築を提案する。

①簡易災害危険度評価式（管理レベル1，2用）

凍結融解・降雨複合型斜面崩壊の災害危険度評価式とは，室内模型試験と現地計測結果から凍結融解・降雨複合型斜面崩壊に特に影響があると考えられる影響因子を管理指標として抽出し，安全率を加味して評価基準を設定したものである。

②凍結融解・降雨複合型斜面崩壊解析モデル（管理レベル2用）

凍結融解・降雨複合型斜面崩壊解析モデルとは，寒冷地地盤情報データベースに蓄積された気象情報や地形・地盤情報などをもとに，凍結

融解環境下における斜面崩壊の数値シミュレーションを実施可能な応力変形・熱伝導・浸透連成解析（寒冷地用地図シミュレーター）を指す。

(2) 実務における研究成果の適用性

本研究は，日常的な管理業務として斜面防災に関する点検記録や気象情報・地形地盤情報を収集している道路管理者に，維持管理の適正化・合理化を図るためのブラックボックス化された新しい管理ツール（評価式や数値解析）を提供し，凍結融解斜面の新たな設計概念を提示するとともに，積雪寒冷地における道路斜面の防災対策・点検管理の高度化を促すものである。本研究で新たに開発した積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムを実務における道路斜面管理に適用する場合，「システム運用のために必要となるデータ・情報」と「システム運用で得られるデータ・情報」はそれぞれ以下のようなものである。

- システム運用のために必要なデータ・情報
 - 斜面の幾何学的条件（勾配 α ，斜面密度など）
 - 強度定数（内部摩擦角 ϕ ，ただしN値等で換算可能）
 - 過去の災害履歴（防災カルテ）
 - 過去の気象データ（テレメータやアメダス等による雨量，気温，積雪量）
 - 凍上性判定データ（凍上性試験結果，強熱減量試験結果，粒度など）
 - 斜面崩壊深さ基準値 y （斜面崩壊土量の定義）
- システム運用で得られるデータ・情報
 - 斜面表層崩壊の発生判断
 - 融雪期における斜面表層崩壊の発生
 - 非凍結期（夏～秋期等）における斜面崩壊の発生
 - 最大凍結深さ

上記のように，システムの運用に必要なデータ・

情報の多くは、現行の斜面管理体制においても防災カルテやテレメータ等により取得可能なものである。したがって、本研究で提案する積雪寒冷地斜面管理方法は、実務に充分適用可能なレベルにある。この結果、道路管理者が、寒冷地地盤情報データベースの維持管理に必要な防災カルテ、気象情報、地形・地盤情報、過去の斜面災害発生履歴など各種情報を随時更新すれば、本研究で提案する積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムが、寒冷地地盤情報データベース内に蓄積される各種情報をもとに、地盤の凍結融解に起因する斜面崩壊の危険度判定・安全性評価を提供することも可能である。実務で供用可能な積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムのプロトタイプ開発という意味において、現段階で、本研究の所期の研究目的・目標はほぼ達成されたと考えている。さらに、本研究では、道路管理上重要視されている降雨情報に加えて、地表の積雪量・温度変化、斜面内の土壌水分量変化、凍結深に影響する項目を新たな管理指標と考え、これらを含めた形式での「斜面崩壊予知・災害危険度評価システム」の基本的枠組みを構築することができた。本研究で提案した斜面管理方法は、降雨量のみでは対応が困難とされている融雪期における斜面崩壊予測に関する合理的な解釈を与えるものであることから、我が国の道路政策・道路管理の質の向上へ貢献できるものと考えられる。

しかし、本研究で提案する積雪寒冷地斜面管理方法を実用に供するには、以下のような課題の解決を継続して図っていく必要がある。

【実用化上の課題】

1. 積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの信頼性向上

本研究成果は、前述のように、積雪寒冷地斜面で融解期に観測される斜面表層崩壊現象を定性的には十分再現していると考えられるが、時間的・費用的制約から限られた試験条件の下で得られたものであるため、様々な気象・地形・地盤条件が想定される実地盤においては、斜面崩壊予知理論構築のベースとなる室内模型試験・室内要素試験・室内模型試験・数値解析シミュレーションの適用性や一般性は、必ずしも十分保証されたものではないと考えられる。また、凍結融解・降雨による斜面崩壊実験は、縮小模型斜面に対してのみ実施されており、2年半に亘る実斜面における長期現地計測では、斜面表層崩壊の兆候は現在のところ観測されていない。このため、本研究では、室内模型試験結果をもとに斜面内のせん断ひずみが4~6%になった時点を斜面崩壊と定義して、これを斜面崩壊予知や災害危険度評価の定量的な基準として採用しているが、実斜面に対する模型斜面の寸法効果が試験結果に影響を及ぼす可能性を考慮すると、本研究成果を利用した斜面崩壊予知や危険度評価の精度には疑念を抱かざるを得ない。このような状況を考慮すると、主に室内要素試験結果・室内模型試験結果をもとに構築された、本研究

の積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムは、凍結融解・降雨複合型斜面崩壊を現象論的に挙動把握する上ではその定性的な正当性を評価できるものの、斜面崩壊現象の予測精度には難があり、積雪寒冷地斜面管理の実務での利用に際しては、その定量的な信頼性の向上を今後継続して図る必要がある。

2. 提案手法を用いた道路斜面管理の具体的な方法論の提示

現行の道路斜面の管理指標・管理方法に加えて、地盤の凍上性と凍結深に影響する項目を新たな管理指標とした、新しい積雪寒冷地用斜面管理方法の実務への導入を図るには、過去に積雪寒冷地で発生した斜面災害に関するデータ（気象条件、地盤条件と凍上現象の発生地域との関係等の情報）や現地計測データをより多くの異なる条件の下で収集して、本研究で提案する斜面崩壊予知理論や積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの適用性や一般性を検証・改善するとともに、現行の道路斜面の管理水準との関連性を明確にした上で、新たに導入した管理指標などの基準値を異なる土質の地盤について具体的に示す必要がある。また、本研究で提案する斜面管理方法を用いた場合の斜面崩壊予知と災害危険度評価の精度を定量化し、現行の斜面管理方法に対する、積雪寒冷地用斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの導入効果を精査することも重要である。さらに、開発システムの実用性の向上に向けて、実際の道路斜面管理に対する当該システムの試行を短期間実施し、新たな積雪寒冷地用斜面管理体制の導入上の課題や改善事項を抽出・フィードバックしながら、開発システムの操作性やその運用方法を見直したり、管理者が維持管理し易い体制を構築したりすることが、開発システムの実用化には必要不可欠である。

以上のような課題を解決していくため、本研究では、北海道開発局と連携して斜面計測を現在継続して行い、本手法を用いた道路斜面管理の具体的な方法論を検討している。なお、国内外を通じて、凍結融解履歴を受けた斜面の降雨時挙動に関する研究は未だ限られており、本研究の知見は積雪寒冷地における斜面管理の合理化のみならず、維持管理用計測器の効果的な配置・設置方法の提案など効率化の面でも有用な情報を与えるものである。