

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

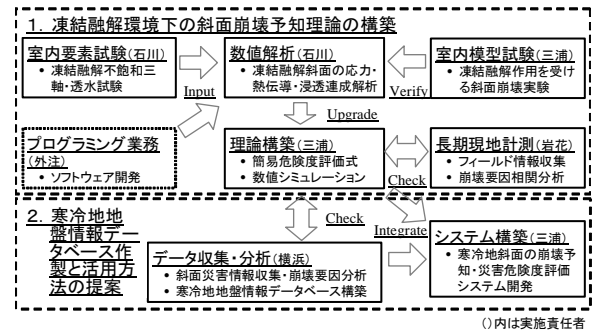
①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属	役職
	みうら せいいち 三浦 清一		北海道大学大学院 工学研究科	教授
②研究 テーマ	名称	凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・災害危険度評価システムの確立		
	政策 領域	[主領域] 【安全】 (7) 「防災・災害復旧対策」 [副領域]	公募 タイプ	タイプII
③研究経費 (単位:万円)	平成19年度	平成20年度	平成21年度	総合計
	※端数切り捨て。 800	1400	800	3000
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属・役職 (※平成22年3月31日現在)			
石川 達也	北海道大学大学院工学研究科・准教授			
横浜 勝司	北海道大学大学院工学研究科・助教			
岩花 剛	北海道大学大学院工学研究科・助教			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>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。</p>				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究では、「凍結融解環境下の斜面崩壊予知理論の構築」と「寒冷地地盤情報データベース作製と活用方策の提案」を研究目標として、図に示す研究実施体制の下、以下の各項に関する研究開発を実施した。

- (1) 土の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響評価
- (2) 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の解明
- (3) 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルの構築
- (4) 現地計測による斜面状態監視方法の提案
- (5) データベースの開発と情報活用方法の提案
- (6) 斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの開発



平成19～21年度の3カ年に亘る研究開発の結果、当

研究実施項目と各研究者の役割

初に予定した研究実施項目は、実物大斜面崩壊実験を除き、すべて実施し、前述の二つの研究目標も概ね達成した。この結果、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、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、積雪寒冷地用の道路斜面管理方法を提案した。このため、所期の研究目的・目標はほぼ達成されたと考えている。

⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

平成19年度指摘事項

1. 本技術研究開発で取り扱っている問題は熱伝導・応力・浸透の連成など複雑な事象であるため、研究期間内での到達目標を明確にし、特に優先度の高い事項について集中的に研究いただきたい。

本研究の実施には、融雪期に起こる積雪寒冷地特有の斜面崩壊の現象解明が不可欠である。このため、応力変形・熱伝導・浸透連成問題は、扱うことを避けて通れない研究課題の一つである。したがって、本研究では、研究期間内に研究目標を達成するために、数値解析手法については、併行して実施する室内要素試験結果や模型試験結果を随時組み込めるようなフレキシブルな枠組みで、アウトソーシングを効率的に利用して解析ソフトウェアを開発した。この結果、概ね当初の計画に沿った形で凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルのプロトタイプ開発を完了した。

2. 実物大実験及びシミュレーション手法の開発については、要素試験や模型実験の結果及び上記1. の到達目標を踏まえて、実施時期、方法を十分検討いただきたい。

実物大斜面崩壊実験については、H19年度中間評価会での指摘に従い、本研究では実施しないこととした。その代替として、現地計測を当初計画より補強して実施し、境界条件の明確な実物大レベルの力学情報の獲得を目指した。しかし、2年半に亘る長期現地計測では、斜面表層崩壊の兆候は観測されず、実物大斜面における崩壊時の斜面内力学情報の獲得が十分行えなかったことから、開発シス

テムの信頼性・予測精度の向上や提案手法を用いた道路斜面管理の実用化については、北海道開発局と連携して引き続き検討していきたい。なお、シミュレーション手法の開発については、上記1.の対応状況に記載したとおりである。

3. 収集されたデータや情報を整理・体系化し、メタデータとして他の研究者が活用できるよう、検討をお願いしたい。

ご指摘のとおり、他の研究者が活用できるよう、寒冷地地盤情報データベースは、電子国土webシステム（国土地理院）を活用して構築した。

平成20年度指摘事項

1. 斜面崩壊予知理論が信頼性のある予測手法となるためには、長期現地計測結果をフィードバックしながら予知理論を見直していく必要があり、そのための具体的な方法論を検討するとともに、本手法を用いた道路斜面管理の具体的な方法論を掲示してほしい。

本研究で提案した「斜面崩壊予知・災害危険度評価システム」の信頼性を向上し、実用化を図るには、様々な実斜面における各種情報のさらなる収集や、実際の道路斜面管理における当該システムの試行が必要不可欠である。そのため、本研究で設置した現地計測点2箇所と北海道開発局が本研究と連動して設置した2箇所については今後も計測を継続する。これら現地計測データの蓄積・分析を行って、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、開発システムの運用方法の見直し、道路管理者が維持管理し易い管理体制の構築に向けた具体的な方法論の検討を、北海道開発局と今後も議論していく予定である。

2. 斜面崩壊予知理論構築のベースとなる模型実験と数値解析の正当性や精度の向上を図ってほしい。

実斜面における長期現地計測データを整理するとともに、斜面を構成する土の特性に着目した凍結融解・降雨による斜面崩壊模型実験・数値実験を実施し、実験・解析の両面から本研究で提案する斜面崩壊予知理論の適用性や一般性を検証した。なお、当初の研究計画では実物大試験の実施により斜面崩壊予知理論の正当性の検証や精度向上を図る予定であったが、平成19年度中間評価における指摘事項によりこれを中止した経緯から、計画当初よりも予知精度の低下は避けられないと考えられる。

3. 道路斜面の管理水準との関連において、斜面崩壊予知と災害危険度評価の定量的精度などの目標値を示してほしい。

過去の北海道内で発生した斜面災害に関するデータや現地計測データを収集して、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を検証し、現行の管理水準に対して、本研究で提案する斜面崩壊予知と災害危険度評価の精度を定量化する予定であった。しかしながら、実物大実験の中止等により、実物大斜面における崩壊時の斜面内力学情報の獲得ができなかったため、具体的な定量評価は困難であった。この点に関しては、今後現地計測を長期的に継続していく中で、斜面崩壊が生じない際の各種管理指標データの蓄積、あるいは実斜面における斜面崩壊の兆候の把握ができれば、実斜面管理における管理水準を具体的に示すことができると考えている。このため、現在も北海道開発局と連携して、本研究で提案する斜面管理方法の実用化について検討している。

⑨研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究で得られた知見・研究成果は以下の通りである。

1. 土の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響

十分に制御された試験条件で自然地盤とほぼ同様な凍結融解履歴および载荷履歴を再現可能な凍結融解不飽和三軸試験機および凍結融解不飽和透水試験機を開発し、道内に広く分布する破砕性火山灰質土の力学特性に及ぼす凍結融解・含水状態の影響を各種室内要素試験結果から検討した。その結果、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その構成粒子の破砕性が顕著となるため、保水性は高まり透水性は低下する結果、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ことを示した。このことから、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があることを明らかにした。

2. 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の解明

凍結融解・降雨履歴载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・降雨による模型斜面の崩壊実験を実施した。その結果、土質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ことを示した。このことから、凍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含水比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、凍結融解履歴を受ける斜面の新しい安定性評価方法を模型実験レベルで明らかにした。

3. 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルの構築

上記の試験結果を考慮して、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、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FEM解析ソフトウェアを開発した。また、開発した解析手法を用いて、繰返し凍結融解作用を受ける斜面の変形挙動解析および、凍結層融解中の降雨による斜面の変形挙動解析を実施して、地盤の凍結・凍上現象や降雨浸透に伴う水分移動、降温・昇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・定量的にほぼ一致することを確認し、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象に対する提案した解析手法と開発した解析プログラムの工学的有用性を示した。

4. 現地計測による斜面状態監視方法の提案

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、道内3箇所では現地調査・現地計測を長期的に実施し、斜面崩壊要因の分析と効率的な地盤調査・現地計測方法について検討した。その結果、温度変化・土壌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を示した。また、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・土壌水分計

⑨研究成果（つづき）

による凍結深推定法・凍土層確認方法を具体的に提示した。

5. 寒冷地地盤情報データベースの開発と情報活用方法の提案

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）を収集し、斜面災害の要因分析を実施するとともに、現行の管理体制から入手可能な各種情報の収録・体系化方法を検討した。その結果、斜面点検記録（防災カルテ）および気象観測結果（気象テレメータ）といった異なる情報を統合し、それらの情報を効果的に整理・閲覧するための仕組み（寒冷地地盤情報データベース）を、電子国土webシステム（国土地理院）を活用して構築した。また、上記で収集された情報と現地計測結果を連携させた分析を行い、含水比増加量が融雪量と気温上昇量の積に比例する傾向を見出すなど、融雪期における斜面崩壊挙動をデータベース内に蓄積された情報に基づいて合理的に推測するための情報活用方法を提案した。

6. 斜面崩壊予知・災害危険度評価システムの開発

上記1.～4.の検討結果に基づく凍結融解に起因する斜面崩壊予知理論を考慮して、上記5.の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の開発を検討した。その結果、凍結融解履歴を受ける斜面表層崩壊の各種誘因の影響を定量化するとともに、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。また、上記の寒冷地地盤情報データベースに蓄積された種々の情報を目的に応じて抽出し、簡易災害危険度評価式を利用して相互に関連づけを行って、凍結融解作用を受ける斜面の災害危険度を評価するシステムや、設置した計測器を用いて土壌水分量や気象データ等の経時変化をモニタリングして凍結融解・降雨複合型表層崩壊現象の発生を予測する危険法面の動態観測システムを試作した。さらに、斜面崩壊予知・災害危険度評価システムを利用して、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崩壊発生の検討フローを新たに提案した。

以上のような研究成果をもとに、本研究では、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、温暖地域における斜面崩壊機構との違いを明確にした。このため、本研究は、降雨量のみでは従来対応が困難とされてきた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。したがって、地盤工学の知見を活用した積雪寒冷地における斜面崩壊予測法を本研究でほぼ確立できたと考える。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仕組みや素地はできたと判断される。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。ただし、本研究で提案した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の実務における運用に際しては、土質特性を個々に考慮した各種管理値・基準値・解析パラメーターの設定方法が必要となるため、凍結融解環境下における斜面崩壊発生予測精度向上のために、今後さらに多くのデータの蓄積が必要である。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限りません。)

1. 学術論文(査読付) : 計6編(以下に代表的な学術論文を示す)

- Ishikawa, T., Tokoro, T., Itou, K. & 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, pp.433-442, 2010.
- S. Kawamura, S. Miura and T. Ishikawa : Mechanical behavior of unsaturated volcanic slope due to rainfall and freeze-thaw actions, GeoShanghai, ASCE, Geotechnical Special Publications, pp.152-158, 2010.
- 石川達也, 尾崎悠太, 三浦清一 : 凍結融解作用を受ける火山灰質粗粒土の力学特性の評価試験方法の検討, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.712-717, 2008.
- 川村志麻, 三浦清一, 石川達也, 横浜勝司 : 凍結融解履歴を有する不飽和火山灰質土斜面の降雨による崩壊現象とその評価, 土木学会論文集 C, 2010. (掲載決定)

2. 国際会議発表論文 : 計6件(含む、平成22年発表決定分)

3. 国内学会発表論文 : 計22件(含む、平成22年発表分)

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

1. 公開イベントによる研究成果の情報発信

関係省庁および技術者を対象とした研究成果報告として、以下の報告会を開催した。

- 報告会名 :
「道路政策の質の向上に資する技術開発ー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ー」に関する研究成果報告会
- 日時/会場 : 2010年5月17日, 14:30-17:00 / 北海道大学工学部 (B11室)
- 主催 : 北海道大学大学院 地盤環境解析学研究室、共催 : 地盤工学会北海道支部
- 参加者 : 計81名
参加者の所属内訳 :

北海道開発局	14名
寒地土木研究所	9名
大学関係者	23名
民間企業	35名

2. ウェブによる研究成果の情報発信

一般への研究成果公表として、下記のウェブサイトを経営している。

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

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究で提案する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図る必要がある。

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、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、斜面崩壊予知理論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。また、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、模型斜面の実験結果をもとに構築され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。このため、積雪寒冷地斜面管理の実務での利用に際しては、その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

本研究で提案する新しい積雪寒冷地用斜面管理方法を実務に導入するには、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、新たに導入した管理指標などの基準値を異なる条件の斜面について具体的に示す必要がある。また、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、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。

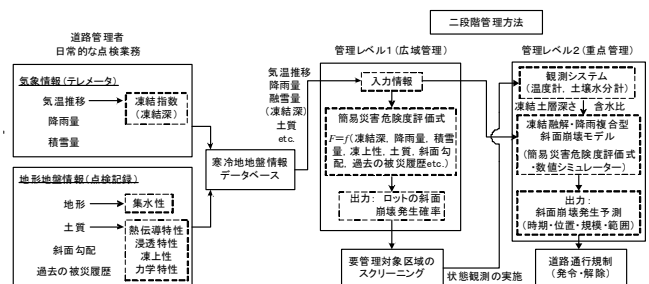
以上のような課題を解決していくため、本研究では、北海道開発局と連携して斜面計測を現在継続して行い、本手法を用いた道路斜面管理の具体的な方法論を検討するなど、研究の更なる発展や道路政策の質の向上に今後も貢献する予定である。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究成果の具体的な活用方策として、下図のように管理対象斜面のスクリーニングを実施する「広域管理」と、特定斜面を対象としてその状態を監視する「重点管理」の、二段階の管理レベルで運用する新しい積雪寒冷地斜面の管理方法を提案した。なお、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

際の道路斜面管理に適用する場合、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や安全性評価を合理的に実施することが可能である。



積雪寒冷地斜面管理の再構築方法

積雪寒冷地斜面管理の再構築方法

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

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。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、これらを含めた形での総合的な斜面崩壊予知・災害危険度評価を行う斜面管理の基本的枠組みを構築することができた。実用性の高い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・目標は概ね達成されたと考える。また、本研究で提案した斜面管理方法は、我が国の道路政策・道路管理の質の向上に貢献できると考えられる。この理由として、これまで明らかにされていなかった凍結融解履歴および含水状態の変化が斜面崩壊挙動に及ぼす影響を明示できたこと、さらに、実務道路斜面管理への研究成果の具体的な活用法について基本的な枠組みを提言できたことがあげられる。なお、実物大試験の中止や、現地計測箇所では斜面の大変形挙動が観測されなかったことから、実物大斜面の崩壊時の斜面内力学情報を得るまでには至らなかった。このため、研究成果として提案した「斜面崩壊予知・災害危険度評価システム」の精度検証は困難であったと考える。