

平成22年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19201035  
 研究課題名（和文） 積雪寒冷地にある破砕性帯水斜面の崩壊予知・災害危険度評価システム  
 確立に関する研究  
 研究課題名（英文） Establishment of the system for the risk evaluation of geohazards  
 at volcanic soil slope in cold regions  
 研究代表者  
 三浦 清一（MIURA SEIICHI）  
 北海道大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00091504

研究成果の概要（和文）：積雪寒冷地で斜面崩壊を誘発する因子間の力学作用を解明し、凍結融解や融雪・降雨等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、気象・地盤・過去の災害事例等の異種情報を統合した地盤情報データベースを作製し、蓄積された情報と簡易災害危険度評価式を利用して凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知や災害危険度の評価を行うシステムを開発した。

研究成果の概要（英文）：We elucidated the interaction between various factors which caused subsurface failure of volcanic soil ground subjected to freeze-thaw action in cold regions in terms of soil mechanics, and we proposed a new simple prediction method for the rain-induced slope failure in snow-melting seasons in consideration of the degradation of deformation-strength characteristics of geomaterials due to freeze-thawing. We also developed a geo-information database which integrated the various different kinds of information such as weather reports, geotechnical information, and records for past geohazards. Based on these achievements, finally, we developed the system which could evaluate a risk of rain-induced slope failure at subsurface layers suffered from freeze-thaw by using both above-mentioned prediction method and geo-information database.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2008年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
2009年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	28,600,000	8,580,000	37,180,000

研究分野：地盤工学・地盤防災

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：寒冷地，火山灰質土，凍結・融解作用，斜面崩壊，粒子破砕，地盤防災，室内要素試験，数値解析

1. 研究開始当初の背景

北海道には火山性の砕屑岩や破砕性火山

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。また、台風や集中豪雨の被害が比較的少なかった北海道でも、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の急激な地下水位の上昇は、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。しかしながら、北海道のように積雪寒冷気候による凍結融解履歴や地震による振動履歴を受けるような厳しい自然環境下では、多数の影響因子が複雑に絡み合うため、災害の原因を特定することは極めて難しく、凍結融解、降雨や地震などの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極めて立遅れている。

## 2. 研究の目的

本研究は、積雪寒冷地における破碎性粒状層を含む帯水斜面の表層崩壊を誘発する因子の力学的相互作用を解明し、北方圏特有の自然現象に起因する地盤災害の精緻な予知・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、破碎性帯水斜面の安定解析手法を確立する。加えて、自然・地盤条件、地盤工学的な知見、過去の災害事例といった異なる情報を統合した地盤情報データベースを作製し、蓄積された情報から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目的に応じて創出可能な斜面崩壊予知・災害危険度評価システムを構築するものである。

## 3. 研究の方法

本研究では、要素試験・模型試験・数値解析・斜面災害データ収集・現地計測を実施し、図1に示す検討フローに沿って以下の研究項目について検討した。

- (1) 凍結融解履歴型不飽和三軸試験及び不飽和透水試験による凍結融解・含水状態が異なる地盤材料の力学特性に及ぼす影響の検討
- (2) 縮小模型斜面の凍結融解・降雨による斜面崩壊実験による土質が凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構に及ぼす影響の検討
- (3) 凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデル（応力変形・熱伝導・浸透連成解析）の開発と数値シミュレーションによる凍結融解・降雨複合型斜面崩壊要因の検討

- (4) 実斜面における長期現地調査・現地計測によるフィールド情報の収集と斜面崩壊要因の分析および合理的な斜面状態モニタリング管理方法の提案
- (5) 寒冷地地盤情報データベースの汎用化と収録情報の整理・体系化方法など情報活用方法の検討
- (6) 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と当該システムを利用した斜面管理方法の提案

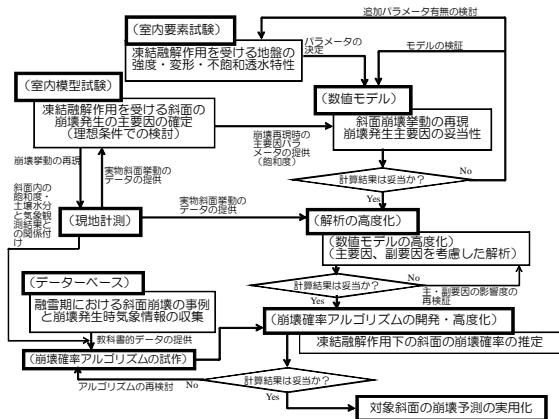


図1 研究フローチャート

## 4. 研究成果

- (1) 室内要素試験による地盤材料の力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響評価
 

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荷重履歴を再現できる凍結融解不飽和三軸試験機及び凍結融解不飽和透水試験機（図2参照）を開発し、火山灰質土試料を用いて室内要素試験を実施した。その結果、得られた知見を以下に示す。



図2 凍結融解不飽和透水試験機

- ① 非凍上性の火山灰質粗粒土でも破碎性

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碎性は顕著となり、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（図3参照）。

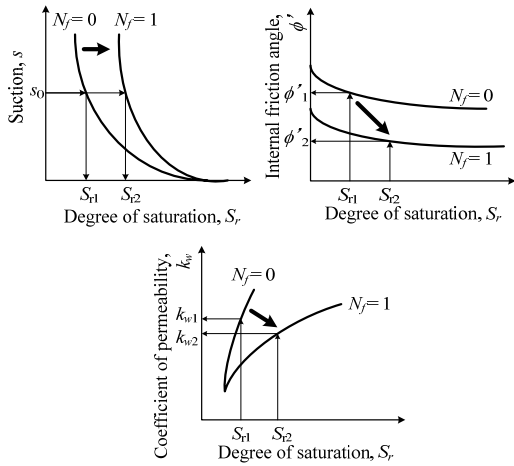


図3 凍結融解作用による力学特性の変化

- ② 融雪期に急速な気温上昇や降雨が発生した場合、破碎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。
- ③ 融雪期における積雪寒冷地の破碎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・破碎性・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。

(2) 室内模型試験による凍結融解・降雨複合型斜面崩壊機構の検討

降雨履歴荷型の二次元平面ひずみ模型土槽装置を用いて、様々な試験条件あるいは条件の組み合わせを変えながら、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、得られた知見を以下に示す。

- ① 凍結融解履歴を受けた破碎性斜面は融解過程で崩壊するなど確実に構造の劣化を引き起こし、その影響は大である。また、凍結融解履歴により粒子破碎が起き、その影響は高含水比ほど大きくなる。
- ② 凍結融解履歴によって生じるすべりの影響範囲は、凍結深として簡易的に考えることができ、また斜面内で生じる凍結融解履歴による体積変化特性（ダイレイタンシー特性）を把握することにより、

寒冷地にある斜面崩壊を一律に評価することが可能である。

- ③ 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（図4参照）。このことから、凍結深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ことが可能である。

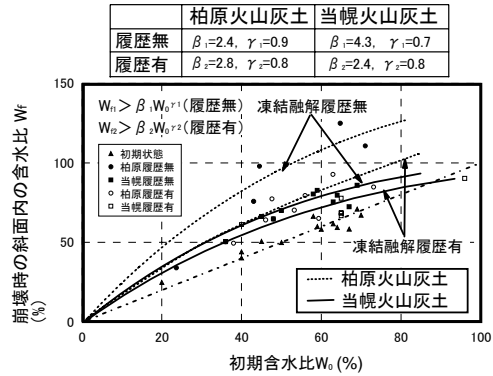


図4 崩壊時保水量と初期含水比の関係

(3) 数値解析手法による凍結融解・降雨複合型斜面崩壊モデルの検討

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・浸透連成解析方法を開発し、室内模型試験結果や現地計測等と数値シミュレーション結果との比較検討を行い、提案する数値解析手法の適用性を検討した。その結果、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及び凍結・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解析プログラムを開発した（図5参照）。

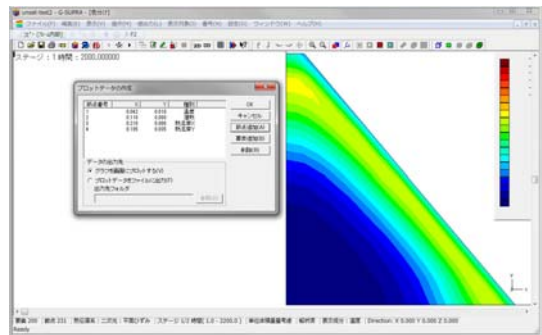


図5 応力変形熱伝導浸透連成プログラム



- ② 開発した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及び、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有用性を示した。

(4) 現地調査・現地計測によるフィールド情報の収集と分析

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、得られた知見を以下に示す。

- ① 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明確に示した(図6参照)。

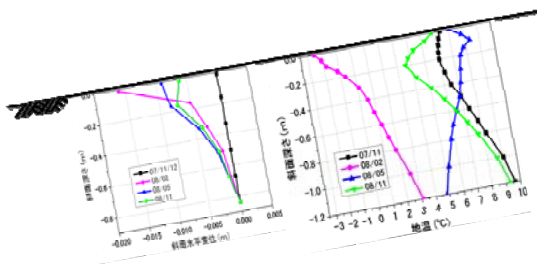


図6 地盤内変位分布の季節変化

- 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、及び地温計・土壌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検討

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、得られた知見を以下に示す。

- ① 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製した。
- ② 融雪期における斜面崩壊挙動を気象観測情報に基づいて合理的に推測するために、融雪量、気温および斜面内含水比変化量の関係を調べた。その結果、斜面内含水比増加量と融雪量、気温との間に一義的な関係があることが確認された(図7参照)。

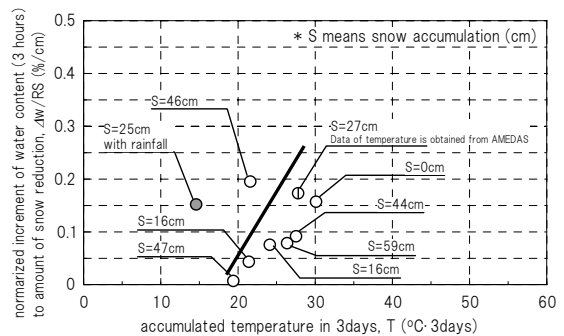


図7 斜面内含水比と融雪量、気温の関係

(6) 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

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。

- ① 上記(1)～(3)の検討結果に基づき、斜面の安定性に対する解析パラメーターの感度分析を行い、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。
- ② 上記(5)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、情報検索・抽出システムにより目的に応じて抽出し、上述の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(図8参照)を試作した。
- ③ 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（図9参照）。

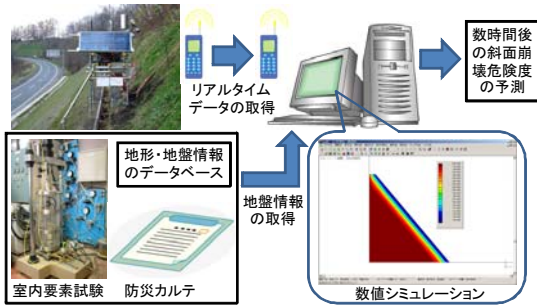


図8 寒冷地斜面用崩壊予知システム

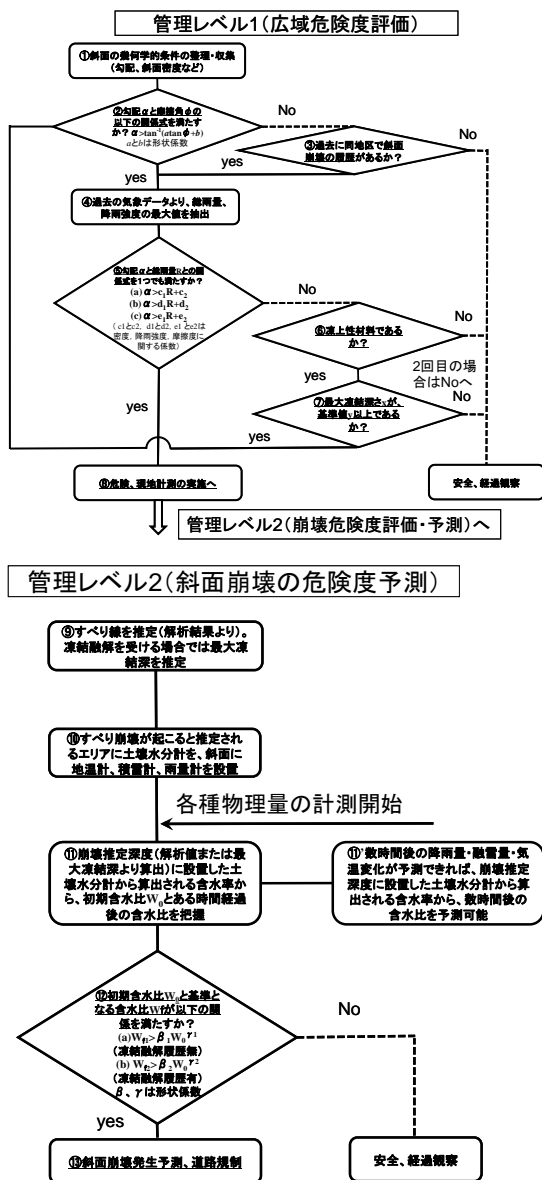


図9 評価システムの検討フローチャート

以上の研究成果をもとに、本研究では、現行の積雪寒冷地における斜面管理方法の合理化・高精度化・高度化を指向して、図のような「積雪寒冷地斜面管理の再構築」を提案した。当該斜面管理方法は、運用のために必要なデータ・情報の多くが現行の日常的な点検業務から取得可能なものであるため、実務に充分適用可能な可能なレベルにある。ただし、土質特性を個々に考慮した各種パラメータの設定方法に関しては今後さらに多くのデータの蓄積が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計12件)

- ① Ishikawa, T., Miura, S. and Itou, K. : Influence of freeze-thaw action on mechanical behavior of unsaturated crushable volcanic soil, Proc. of the 5th International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, 2010. (Accepted). (査読無)
- ② 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, CD-ROM, 2010. (In press) (査読無)
- ③ 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). (査読有)
- ④ 川村志麻, 三浦清一, 奥田健太, 中野博貴, 石川達也 : 凍結・融解履歴が火山灰質土斜面の降雨時力学挙動に及ぼす影響, 降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp. 231-236, 2009. (査読無)
- ⑤ Ishikawa, T., Ito, K., and Miura, S. : Influence of freeze-thaw action on soil water characteristics of crushable volcanic coarse-grained soil, Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Newcastle, pp.159-164, 2009. (査読無)
- ⑥ Tokoro, T., Ishikawa, T. and Miura, S. : Development of triaxial apparatus for permeability test of unsaturated soil using pressure membrane method, Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Newcastle, pp.179-184, 2009. (査読無)

- ⑦ Ishikawa, T., Miura, S. and Tokoro, T. : Effect evaluation of freeze-thaw action on mechanical behavior of unsaturated crushable coarse granular materials, Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Vol. 1, pp.833-836, 2009. (査読有)
- ⑧ Kawamura, S., Miura, S., Ishikawa, T. and Ino, H. : Failure mechanism of volcanic slope due to rainfall and freeze-thaw action, Proc. of IS Kyoto09, Kyoto, pp.25-31, 2009. (査読無)
- ⑨ Ishikawa, T., Sato, M., Miura, S. Akagawa, S. and Kawamura, S. :Application of coupled thermo-mechanical analysis to slope behavior during freezing and thawing in cold regions, Proceedings of IS Kyoto09,Kyoto, pp.409-415, 2009. (査読無)
- ⑩ 山木正彦, 三浦清一, 横浜勝司 : 破碎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 C Vol. 65, No. 1, pp. 321-333, 2009. (査読有)
- ⑪ 石川達也, 里優, 三浦清一, 赤川敏, 川村志麻 : 寒冷地斜面の凍結融解現象を対象とした連成解析方法の検討, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 35-36, 2008. (査読無)
- ⑫ 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. (査読有)

[学会発表] (計20件)

- ① 川村志麻 : 破碎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, 2010年2月2日, 学術交流会館(札幌).
- ② 石川達也 : 凍結融解作用を受ける火山灰土斜面の熱伝導/応力変形連成解析, 土木学会, 2009年9月2日, 福岡大学(福岡).
- ③ 石川達也 : 柏原火山灰土の不飽和力学特性に及ぼす凍結融解作用の影響, 地盤工学会, 2009年8月18日, 関東学院大学(横浜).
- ④ 川村志麻 : 凍結・融解履歴を受けた不飽和火山灰質土斜面の降雨時力学挙動, 地盤工学会, 2009年8月18日, 関東学院大学(横浜).
- ⑤ 横浜勝司 : 粗粒火山灰土の飽和透水係数に及ぼす間隙比および細粒分の影響, 地盤工学会, 2009年8月18日, 関東学院大学(横浜).
- ⑥ 川村志麻 : 凍結・融解履歴を受ける不飽

和火山灰質土斜面の降雨時力学挙動, 地盤工学会北海道支部, 2009年1月30日, 北見工業大学(北見).

- ⑦ 石川達也 : 凍結融解作用を受ける火山灰土斜面の応力/浸透連成解析, 土木学会, 2008年9月10日, 東北大学(仙台).
- ⑧ 川村志麻 : 不透水層を有する火山灰質土斜面の降雨時力学挙動, 土木学会, 2008年9月11日, 東北大学(仙台).
- ⑨ 川村志麻 : 凍結・融解履歴を受けた火山灰質土斜面の降雨時力学挙動, 地盤工学会, 2008年7月11日, 国際会議場(広島).
- ⑩ 横浜勝司 : 粗粒火山灰土の飽和透水係数に関する粒径の影響, 地盤工学会, 2008年7月11日, 国際会議場(広島).

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三浦 清一 (MIURA SEIICHI)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00091504

### (2) 研究分担者

赤川 敏 (AKAGAWA SATOSHI)  
北海道大学・大学院工学研究科・特任教授  
研究者番号：90360932  
(H19～H20の間, 研究分担者)

石川 達也 (ISHIKAWA TATSUYA)  
北海道大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60359479

横浜 勝司 (YOKOHAMA SHOJI)  
北海道大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：50299731

川村 志麻 (KAWAMURA SHIMA)  
室蘭工業大学・工学部・講師  
研究者番号：90258707

岩花 剛 (IWAHANA GO)  
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・特任助教  
研究者番号：06101010

(H20～H21の間, 研究分担者)

伊東 佳彦 (ITOU YOSHIHIKO)  
土木研究所・寒地土木研究所・上席研究員  
研究者番号：70431327

(H20から連携研究者)

西本 聡 (NISHIMOTO SATOSHI)  
土木研究所・寒地土木研究所・上席研究員  
研究者番号：40373211

(H20から連携研究者)