

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360201

研究課題名(和文) 気候変動に伴う積雪寒冷地の新しい地盤災害形態の体系化とその危険性評価に関する研究

研究課題名(英文) A study on systematization of new geotechnical hazards in snowy cold regions caused by climate change and its hazard assessment

研究代表者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60359479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、集中豪雨など短時間で多量の雨水浸透や融雪水の流入がある際に、積雪寒冷地で発生する可能性のある凍結融解・流水侵食複合型地盤災害を想定して、凍結融解作用・流水侵食作用を受ける地盤・土構造物の力学挙動を対象とした室内要素試験方法・模型試験方法・数値解析方法を確立してその力学的劣化機構を解明するとともに、過去の気象データから今後道内で起こりえる気候変動を予測した上で、それにより積雪寒冷地で発生する可能性のある新しい地盤災害形態を推測し、その危険性を評価する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This research mainly studies the systematization of new geotechnical hazards in snowy cold regions caused by climate change and its long-term hazard assessment by performing laboratory element tests, model tests, numerical simulations, and data analysis. As the results, this research clarified a failure mechanism of freeze-thawed slope subjected to a large amount of infiltration in a short time due to torrential rainfall and rapid snow melting, and its influential factors by establishing new laboratory element tests and model tests on unsaturated geomaterials subjected to freeze-thaw actions and seepage erosion, and developing a new analytical procedure using coupled thermo-hydro-mechanical FE analysis. Furthermore, we proposed an assessment method for a new type of freeze-thaw and seepage-erosion complex geotechnical hazards, which may occur in the snowy cold regions, by predicting climate change in the near future based on data analysis of temperature data for past some decades.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 土砂災害 気候変動 防災 積雪寒冷地

1. 研究開始当初の背景

一般に、北海道のような積雪寒冷地では、地盤の凍上・凍結融解が誘因と考えられる地盤災害(舗装面のわだち掘れ・ひび割れ、斜面表層崩壊等)が融雪期の道路や斜面で数多く発生する。これは、地盤表層の凍土の融解や融雪などにより融解土層が高含水状態となり支持力や強度が低下することや、地表面に平行に生成される脈状の氷の層の融解で氷跡が空洞化し地盤が異方化・不均質化することが一因であると考えられている。特に、地球温暖化に起因すると考えられる融雪期の急速な気温上昇は、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、過剰間隙水圧の増加や土の強度低下をもたらすとともに、内部侵食や表面侵食を促進して地盤の安定性を低下させ、自然斜面や切土法面の表層崩壊や土砂流出、及び土砂流出による舗装面の陥没を増加させている。また、近年の異常気象により、台風や集中豪雨等の被害が比較的少なかった北海道においても、集中豪雨が再三観測されている。例えば、H22年8月に石狩北部で観測された1時間雨量53.5mmは、1977年の統計開始以来過去最高の記録的豪雨であり、この集中豪雨により崩壊・陥没・土砂流出等の地盤災害が道路や斜面で多数発生している。このような集中豪雨や融雪水の大量流入に対して積雪寒冷地の地盤防災を考える場合には、前述のような地盤の凍上・凍結融解に伴う初期変状を考慮して、積雪寒冷地特有の要因を組み合わせた温暖地域と異なる発生メカニズムの地盤災害形態を検討すべきである。研究代表者らはこれまで、積雪寒冷地で発生する様々な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、凍結融解に伴う地盤材料の工学的性質の変化に着目した、積雪寒冷地地盤の力学特性の解明と挙動予測手法の構築を目的とした研究開発を継続してきた。その結果、現在までに、凍結融解作用を受ける地盤材料の凍上性や力学特性を評価する種々の要素試験法・模型試験法を開発し、凍結融解履歴により地盤材料の力学特性が劣化する可能性のあることを明らかにしている。加えて、要素試験結果を考慮して地盤の凍上・凍結融解現象を検討可能な応力変形・熱伝導・飽和/不飽和浸透連成解析方法を開発し、地盤の力学挙動に及ぼす凍結融解作用の影響評価方法を提案している。ただし、既往の研究は過去に被災履歴のある地盤災害に限定されており、被災履歴の少ない潜在的な地盤災害の危険性を評価したものではない。しかし、近年の異常気象を考慮すると、今後の気候変動に伴い近い将来発生する可能性のある、新しい地盤災害の危険性を様々な情報から事前に評価しこれを予防保全することは、社会資本整備費が削減される昨今、合理的な防災計画の立案や維持管理体制の効率化を図る上で非常に意義がある。本研究では、このような状況を踏まえ、これま

で実施した研究を発展的に再構成し、気候変動に伴い変質する地盤災害の潜在的な被災危険度を予測するとともに、それに対応した寒冷地地盤防災工学の構築を提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、台風や集中豪雨等の被害が比較的少なかった北海道のような積雪寒冷地を対象として、短時間で多量の雨水浸透や融雪水の流入がある場合、あるいはそれにより地表流・浸透流が生じ地盤が侵食を受けた場合に発生する可能性のある凍結融解・流水侵食複合型崩壊の発生機構を、凍結融解を受けた地盤が呈する力学特性・水理特性の異方性を考慮して解明するとともに、今後予測される気候変動に伴う積雪寒冷地特有の新しい地盤災害形態を体系化し、その危険性を明示することである。

具体的な研究目標は次のとおりである。

(1) 凍結融解・水流を受ける地盤材料の材料特性評価に適した要素試験・模型試験方法の確立

(2) 凍結融解・水流を受ける地盤・土構造物の侵食挙動・力学的劣化機構の解明、及び凍結融解・流水侵食の影響を考慮した積雪寒冷地の土構造物の機能健全度評価方法の提案

(3) 凍結融解・水流を受ける土の力学的劣化機構の数値モデル化と地盤の凍結融解・流水侵食複合型崩壊現象を解析可能な応力変形・熱伝導・浸透連成解析手法の開発

(4) 土の材料特性変化に及ぼす凍結融解・水流の影響評価指標の提案、及び凍結融解・流水侵食作用を受ける地盤材料の品質評価方法と材料要求性能の提示

(5) 確率分布モデルによる積雪寒冷地の気候変動予測手法の開発、及び積雪寒冷地の地盤・土構造物を対象とした、気象条件変化時の挙動予測・性能評価手法の開発

(6) 気候変動予測に伴う積雪寒冷地の新しい地盤災害形態の体系化、及びデータベースを用いた気候変動に伴う積雪寒冷地の新しい地盤災害の危険性評価方法の提案

3. 研究の方法

本研究では、前述の研究目標を達成するために、要素試験、模型実験、現地調査・データ分析ならびに数値解析の各アプローチを密接な連携を保持して、以下に示す研究項目について検討を行った。

(1) 平成23年度～平成24年度

凍結融解二軸透水試験機の製作と性能確認試験の実施

熱特性測定機能付凍上試験機の製作と性能確認試験の実施

凍結融解・流水試験用二次元模型土槽装置の製作と性能確認試験の実施

応力変形・熱伝導・浸透連成解析の適用性の検討

気候変動予測手法と地盤情報活用方法の検討

- (2) 平成 25 年度～平成 26 年度
 材料特性変化に及ぼす凍結融解・水流の影響評価
 力学挙動変化に及ぼす凍結融解・水流の影響評価
 土構造物の凍結融解・流水侵食複合型崩壊モデルの提案
 地盤の凍結融解・流水侵食複合型崩壊機構の検討
 気候変動予測手法と地盤情報活用方法の検討

4. 研究成果

- (1) 凍結融解二軸透水試験機の製作と性能確認試験の実施

自然地盤とほぼ同様な凍結融解履歴を与え、鉛直方向に一次元凍結融解させた地盤材料の鉛直及び水平方向の透水性を検討するために、室内要素試験機を新規開発した。また、種々の試験条件（上載圧、給排水条件 etc.）で凍結融解作用を与えた地盤材料の透水試験を実施し、開発した試験機の性能評価を行うとともに、試験方法を確立した。

様々な密度で作製した凍上性の高い供試体に対して凍上・融解試験を実施し、凍結・融解前後における間隙比と透水係数の変化を詳細に調べた結果、締固められた細粒土において、凍結前の間隙比が大きいほど凍上速度や凍結膨張率は小さくなり、凍結・融解履歴によって一定の値に収束する傾向を確認した。

凍結融解履歴によって透水係数の異方向性が大きく変化することはないものの、透水係数自体は凍上融解により増加することを明らかにした。また、凍結融解履歴の有無によらず透水係数が間隙比の増減に従うことから、凍結融解履歴に伴う透水係数の上昇は主に密度（間隙比）変化によることを確認した。

- (2) 熱特性測定機能付凍上試験機の製作と性能確認試験の実施

一次元凍結融解作用を受ける地盤材料の熱特性（熱伝導率・熱容量）を、凍結時あるいは融解時の任意の供試体温度で測定するために、室内要素試験機を新規開発した。また、種々の試験条件で凍結融解作用を与えた地盤材料の熱特性試験を実施し、開発した試験機の性能評価を行うとともに、試験方法を確立した。熱伝導試験結果から、地盤材料の熱伝導率が、不飽和土内の水分の存在状態と対応しており、残留飽和度以上では熱伝導率とサクションに一義的な関係が見られるものの、凍土、未凍土の熱伝導率は体積含水率と一義的ではなく、変曲点を有することを明らかにした（図 1）。熱伝導率の水分依存性を詳細に検討するため、間隙水の連続性を評価する電気

抵抗試験を実施し、比抵抗と熱伝導率の水分依存性を比較した。その結果、熱伝導率と比抵抗の変曲点がほぼ一致することから（図 1）、熱伝導率の水分依存性は、熱媒体となる間隙水の連続性によるものであることを明らかにした。

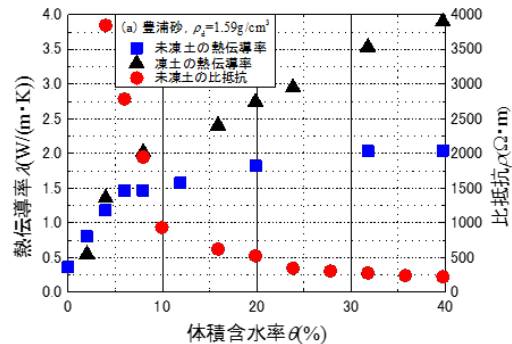


図 1 熱伝導率・比抵抗～体積含水率関係
 火山灰質土のような多孔質体では熱伝導率の水分依存性が一般土とは異なるものの、凍上性・非凍上性地盤材料の熱伝導率が水分特性曲線で説明される土中水の存在形態に依存することを明らかにした。また、道内に分布する火山灰質土に対し、高精度の水分依存型熱伝導率推定式を提案した。

- (3) 凍結融解・流水試験用二次元模型土槽装置の製作と性能確認試験の実施

凍結融解地盤の力学挙動に及ぼす水流の影響を評価するために、温度制御機能・流水機能を具備した 1g 場用二次元平面ひずみ模型土槽装置を新規開発した。また、種々の試験条件で凍結融解履歴を与えた砂質土地盤に対し流水試験を実施し、試験方法を確立するとともに、当該試験装置の有用性を確認した。

凍上融解後の氷晶空洞を模擬した孔を有した砂質土・粘性土模型地盤の流水浸透侵食実験を実施し、空洞の有無が模型地盤の浸透特性に影響を及ぼす結果、空洞有りの模型地盤ではその侵食が強まることを明らかにした。また、模型試験の傾向が室内要素試験結果と整合することを確認した。

- (4) 材料特性変化に及ぼす凍結融解・水流の影響評価

土の材料特性の影響因子を明確にするため、凍結融解条件、含水状態、粒度・密度等を変えた一連の要素試験を実施して、a) 強度・変形特性、b) 透水・保水性、c) 粒子破碎・侵食性、d) 凍上性・熱特性に及ぼす凍結融解、乾湿、水流による物理特性の変化などの影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

凍上性地盤材料の一面せん断試験結果から、凍結融解により生じる強度定数の低下は主として浸水作用によるものであるが、凍結融解によるダイレイタンス

一特性の変化が剛性の低下や強度定数の変化を招くことを明らかにした。また、アイスレンズのつき方がせん断強度やダイレイタンス特性の変化に大きく関与することを示した。(図2)

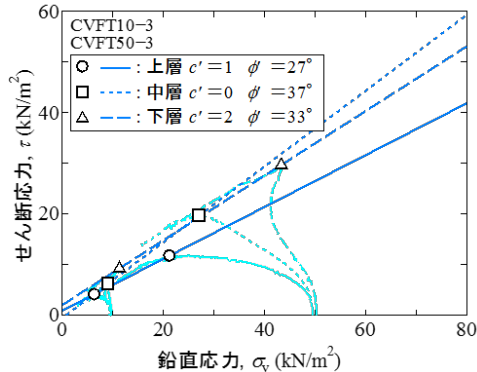


図2 凍結融解による強度定数の変化

非凍上性地盤材料の凍結融解不飽和三軸圧縮試験結果から、凍結融解作用とそれに伴う含水比変化が土のせん断強度やダイレイタンス特性に強く影響すること、及び集中豪雨等により高压の浸透流が生じる状況を想定した流水侵食履歴型不飽和三軸圧縮試験結果から、細粒分の流出により火山灰質粗粒土のせん断強度が大きく低下することを明らかにした(図3)。

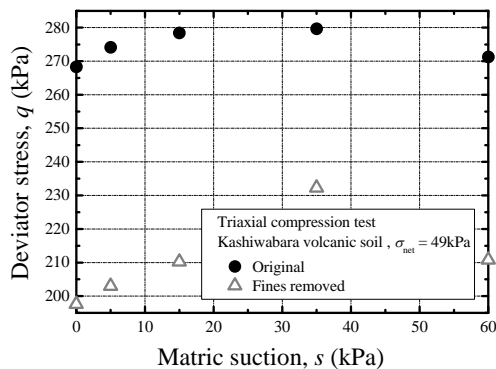


図3 細粒分流出によるせん断強さの変化
試験条件を変えた一連の凍上試験結果から、有効上載圧や凍結速度が小さくなると凍上性が増加するなど、凍結膨張率は、初期飽和度、有効上載圧、凍上速度、凍結速度、吸水量に強く依存することを明らかにした。また、保水性試験を合わせて実施し、有効応力を土被り圧とサクシジョンの和で表した修正高志の式を提案し、表層地盤のような低土被り圧領域では、提案式の予測精度が従来式よりも向上することを示した。

土の凍上試験結果に基づいて、凍結中の吸水量、サクシジョンを含む有効上載圧及び初期飽和度を加味して不飽和土の凍上量を推定する土要素の簡易凍上モデルを提案し、その有用性を凍上量の土被り圧依存性、給排水条件依存性、含水状態依存性の観点から検証した。

(5) 力学挙動変化に及ぼす凍結融解・水流の影響評価

地盤の力学挙動の影響因子を明確にするため、凍結融解条件、流水条件等を変えた一連の模型試験を実施し、a)支持力・安定性・変形性、b)浸透・保水性、c)土砂侵食性・流出性、d)凍上性・熱特性に及ぼす凍結融解、流量や浸透圧などの影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

砂質土模型地盤の流水浸透侵食実験を実施し、凍結融解作用により地盤内に凍土が形成された後に流水した場合、凍土により地盤の透水性は低下するが、凍結融解中に流水がある場合には、凍土の形成が遅くなるとともに未凍結部の浸透流速が上昇することを明らかにした。

(6) 土構造物の凍結融解・流水侵食複合型崩壊モデルの提案

豪雨時に積雪寒冷地の地盤内で生じる力学挙動を再現する数値解析手法を開発するため、現有する連成解析プログラムを用いて室内要素試験の数値シミュレーションを行った。試験結果と解析結果の比較により、解析アルゴリズム及び解析パラメーターの設定などについて検討し、当該プログラムを本研究に適した仕様に改良するとともに、応力変形・熱伝導・浸透連成解析方法を確立した。改良した連成解析プログラムにより土の凍上試験の試験解析を種々の解析条件下で実施し、凍結融解作用を受ける土の特徴的な挙動を表現できることを示した。また、解析結果に基づき、導入した数理モデルの妥当性を確認するとともに、当該解析法が土の凍結・凍上融解現象の数値実験に対して高い適用性を有することを明らかにした。

積雪寒冷地で観測される地盤の凍結・凍上融解に起因する種々の地盤災害現象を対象にした数値シミュレーションを実施し、実問題と同様に地下水水位が凍上量に影響を与えることなどを確認して、当該解析法を用いた凍結融解・流水侵食複合型崩壊モデルを提案した。

(7) 地盤の凍結融解・流水侵食複合型崩壊機構の検討

凍結融解による強度定数の変化が斜面の安定性にどのように寄与するかを把握するため、浸水供試体と凍結融解供試体から得られた強度定数を用いて、浸透流のない無限長斜面の安全率を比較した。その結果、凍結範囲となる斜面表層では内部摩擦角に比べ粘着力の方が安全率に大きく影響し、凍結融解による粘着力の低下が斜面の不安定化に強く関与することを明らかにした(図4)。

前項の研究成果を考慮して凍結融解斜面の降雨浸透シミュレーションを応力

変形・熱伝導・浸透連成解析を用いて実施し、地盤の凍結融解・流水侵食複合型崩壊機構の支配要因について検討した。その結果、凍結融解や融解期の飽和化に伴う強度定数（特に粘着力）の低下、凍結に伴う地盤の遮水性の発現や透水係数の異方性・不等質性が、斜面の不安定化に大きく関与していることが明らかとなった（図5）。

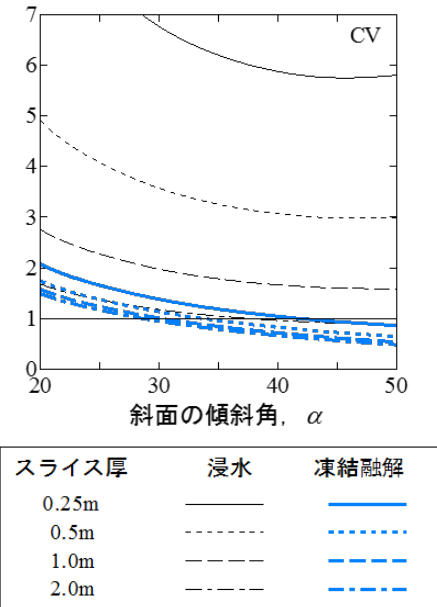


図4 無限長斜面における安全率

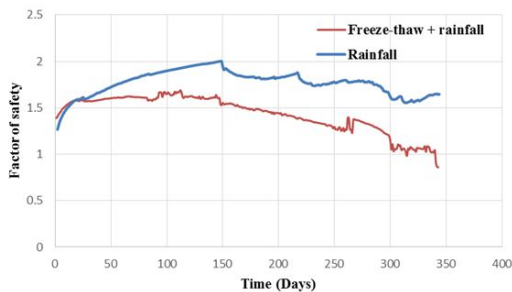


図5 降雨と凍結融解を受ける斜面の安全率

(8) 気候変動予測手法と地盤情報活用方法の検討

全国の寒冷地域 281 地点の気温データから過去 25 年分以上の凍結指数を求め、寒冬の確率年数を地域ごとに整理した。この結果、寒冬の規模は南北の位置関係で規則性がみられ、北海道では軽度な寒冬になる機会は少ないものの、一旦寒冬になるとその規模が 20 年確率以上であることを明らかにした。
n 年確率凍結指数を推定するための最適適合分布は、本州では極値 I 型分布、北海道では対数正規分布となることを示し、凍結指数の発生確率に地域性があることを明らかにした。また、距離を重みとし複数の測点による面内挿法により凍結指数を推定した場合、高い精度で標高補正を実施できることを確認した。

道内 400 点近くの過去 40 年程度の気象データをもとに、気温変化や土壌雨量指数変化について検討し、近年の気候変動の傾向を明らかにした（図6）。また、近年の気候の変質性を評価し、確率分布モデルによる積雪寒冷地の気候変動予測手法を提案した。

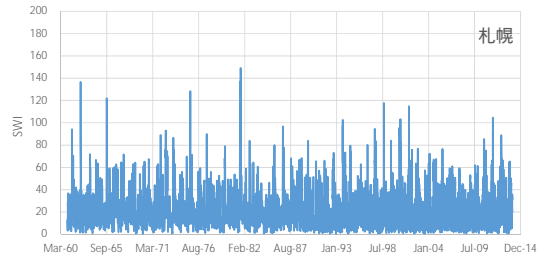


図6 土壌雨量指数 SWI の経年変化傾向

本研究内容と合致した学会の研究委員会を設立し、委員会活動と連携して、凍結融解・流水に起因する地盤災害データの収集・被災要因分析を行い、地盤災害と気象・地形・地盤条件との相関性を明らかにするとともに、現有する種々のデータベースを利用した情報活用方法について検討した。

(9) 研究の総括

本研究の研究成果を総合的に判断して、凍結融解作用・流水侵食作用を受ける地盤・土構造物の力学挙動を対象とした試験法・解析法を確立してその力学的劣化機構を解明するとともに、過去の気象データから今後道内で起こりえる気候変動を予測した上で、それにより積雪寒冷地で発生する可能性のある新しい地盤災害形態を推測し、その危険性を評価する手法を開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計19件)

- 石川達也、木次谷一平、所哲也、赤川敏、低土被り圧下の不飽和路床土の凍上量の推定方法の提案、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、70(3)、2014、I_65~I_70
- 川口貴之、中村大、川尻峻三、山下聡、小林歩、佐々木貴、林豪人、安達謙二、雨宮盛児、原田道幸、寒冷地に構築した補強土壁の凍結融解挙動、ジオシンセティックス論文集、査読有、29、2014、147~154
- 川端伸一郎、石川達也、亀山修一、凍結融解履歴が粒状路盤材の支持力特性に与える影響とその評価、地盤工学ジャーナル、査読有、9(1)、2014、1~13
- 石川達也、張媛、川端伸一郎、亀山修一、所哲也、不飽和粒状路盤材のレジリエントモデュラスに及ぼす凍結融解作用の影響評価、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、69(3)、2013、I_207~I_214
- 川端伸一郎、石川達也、豊田邦男、山内智、

亀山修一、土の凍上性評価に与える凍結方法および供試体寸法の影響、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、69(3)、2013、I_191~I_198

川口貴之、中村大、山下聡、林豪人、安達謙二、雨宮盛児、原田道幸、山崎新太郎、小林歩、玉井啓博、ジオセルとジオグリッドを併用した補強土壁の耐凍上性評価、ジオシンセティックス論文集、査読有、28、2013、345~352

石川達也、張媛、所哲也、粒状路盤材の力学特性評価に対する不飽和三軸試験機の適用、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、68(3)、2012、I_105~I_113

川端伸一郎、石川達也、村山巧、亀山修一、粒状路盤材の支持力特性に及ぼす凍結融解履歴の影響、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、68(3)、2012、I_115~I_122

石川達也、三浦清一、Influence of freeze-thaw action on deformation-strength characteristics and particle crushability of volcanic coarse-grained soils、Soils and Foundations、査読有、51(5)、2011、785~799

石川達也、川端伸一郎、亀山修一、安倍隆二、小野丘、舗装構造の疲労寿命に及ぼす粒状路盤の凍結融解の影響とその評価、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、査読有、67(3)、2011、I_109~I_116

[学会発表](計45件)

石川達也、Numerical experiments on freeze-thaw of soils with coupled thermo-hydro-mechanical FE analysis、14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics、2014年9月23日、京都国際会議場(京都府・京都市)

石川達也、Particle breakage of volcanic coarse-grained soils due to wet-dry cycles and freeze-thaw actions、International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro (IS-Cambridge 2014)、2014年9月2日、Cambridge (UK)

所哲也、Effect of moisture content on thermal conductivity of soils、6th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT2014)、2014年7月2日、Sydney (Australia)

石川達也、Effect evaluation of freeze-thaw on deformation-strength properties of granular base course material in pavement、18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、2013年9月5日、Paris(France)

川口貴之、Effects of freeze-thaw history on deformation-strength properties and permeability of fine-grained

soil、18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、2013年9月4日、Paris(France)

石川達也、Effects of freeze-thawing on mechanical behavior of granular base in cold regions、2nd International Conference on Transportation Geotechnics、2013年9月10日、北海道大学学術交流会館(北海道・札幌)

石川達也、Influence of freeze-thaw action on hydro-mechanical behavior of unsaturated crushable volcanic soils、International Workshop on Advances in Multiphysical Testing of Soils and Shales、2012年9月3日、Lausanne (Switzerland)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号： 60359479

(2) 研究分担者

三浦 清一 (MIURA, Seiichi)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号： 60359479

山下 聡 (YAMASHITA, Satoshi)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号： 00174673

川端 伸一郎 (KAWABATA, Shinichiro)
北海道科学大学・工学部・教授
研究者番号： 10224833

川口 貴之 (KAWAGUCHI, Takayuki)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号： 20310964

所 哲也 (TOKORO, Tetsuya)
苫小牧工業高等専門学校・環境都市工学科・助教
研究者番号： 40610457

(3) 連携研究者

北村 良介 (KITAMURA, Ryosuke)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号： 70111979

木村 一郎 (KIMURA, Ichiro)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号： 60225026

西本 聡 (NISHIMOTO, Satoshi)
独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所・グループ長
研究者番号： 40373211