

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651204

研究課題名(和文) 積雪寒冷地の相変化依存型土砂災害発生機構の現象論的数理モデル化手法の開発

研究課題名(英文) Development of analytical procedure using phenomenistic mathematical model for phase change-dependent geotechnical hazards in snowy cold regions

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、積雪寒冷地で発生する可能性のある相変化依存型土砂災害を想定して、凍結融解作用を受ける地盤の浸透侵食挙動の評価を対象とした模型試験法を確立するとともに、凍結融解地盤の浸透侵食特性に及ぼす影響因子として、流水条件、凍結融解条件、地盤材料の凍上性や浸透・保水性が強く影響することを示した。また、凍結融解現象を含む幅広い土砂・流体連成問題に適用可能な解析手法を開発し、当該解析手法を用いて浸透流のある凍結融解地盤で生じる可能性のある相変化依存型土砂災害発生機構を検討可能であることを検証した。

研究成果の概要(英文)：This research develops an analytical procedure using a phenomenistic mathematical model for the phase change-dependent geotechnical hazards in snowy cold regions by performing experimental and analytical studies. First, we established a new testing method for model tests on soil grounds subjected to freeze-thaw actions and seepage flow, and revealed that seepage pressure and frost-susceptibility and water retention-permeability characteristics of geomaterials seriously influenced the seepage erosion behavior of freeze-thawed soil ground. Next, we developed a numerical model to simulate this seepage erosion phenomenon with the framework of hydraulic erosion and overhanging failure by a triple-grid approach. Since the numerical results showed a good agreement with the experimental results, we concluded that the newly proposed analytical procedure is applicable to a freeze-thaw and seepage-erosion complex geotechnical hazards, which may occur in the snowy cold regions.

研究分野：地盤工学

キーワード：土砂災害 地盤工学 水工水理学 防災 積雪寒冷地

1. 研究開始当初の背景

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、春期のアイスレンズの融解に伴ってレンズ状の氷跡が空洞化すると、地盤は凍結前に比べ緩んだ状態（密度低下）になる。緩み層が発達した地盤では土の透水係数が周辺部に比べ高くなるため、当該部分に流線が集中して浸透圧が増大する結果、地盤の内部侵食が進行し、斜面崩壊や地盤陥没を引き起こすことになる。例えば、H21年4月に北海道内のゴルフ場で発生した陥没事故なども長年の浸透侵食に起因するとされている。また、台風や集中豪雨等の被害が比較的少なかった北海道でも、近年、地球温暖化の影響により集中豪雨がしばしば観測されている。例えば、H22年8月には、統計開始以来過去最高の記録的豪雨により石狩北部で崩壊・陥没・土砂流出等の土砂災害が道路や斜面で多数発生した。積雪寒冷地においても集中豪雨が頻繁に観測される現状を鑑みると、これまで高圧の浸透流が発生する機会が少なかったことから防災対策上問題視されて来なかった地盤の凍結融解・浸透侵食複合型崩壊現象が今後積雪寒冷地の土砂災害の一形態として顕在化する可能性は高い。このような状況を踏まえ、研究代表者は、凍結融解に伴う土の相変化に依存する土砂災害発生機構を解明する意義は高いと考え、気候変動に伴う新たな地盤災害形態に対する防災工学の観点から、本研究課題を着想した。

2. 研究の目的

積雪寒冷地においても地球温暖化の影響により台風の進路変化や気候の亜熱帯化の進行で集中豪雨の発生や融解期の急速な融雪が近年しばしば報告されている。本研究の目的は、積雪寒冷地の地盤を対象として、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高圧の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土砂災害を予測可能な数値解析モデルを開発することである。このため、本研究では、凍上・凍結融解土の浸透侵食現象の発生メカニズムを実験的観点から明らかにするとともに、同現象の数値モデル化方法を検討し、凍上融解する地盤のような不規則な氷跡空洞を内部に有する多相体が、高圧の浸透流を受け侵食され崩壊する過程を再現可能な数値解析手法を、不連続体解析手法を応用して新たに提案する。

本研究の具体的な研究目標は、以下のとおりである。

- (1) 凍結融解作用を受ける地盤の浸透侵食・崩壊特性評価に適した試験方法の確立
- (2) 積雪寒冷地地盤の凍結融解・浸透侵食複合型崩壊現象の数値モデル化方法の提案
- (3) 熱伝導/浸透/応力変形連成不連続体解析法の開発と相変化依存型土砂災害発生機構

の解明

3. 研究の方法

本研究は、実験的検討（模型・要素試験）と解析的検討（モデル化）を密接な連携を保持して実施する。実験的検討では、検討に必要な凍結融解地盤の浸透侵食型崩壊現象の実験方法を初年度に確立し、次年度以降、凍上性地盤材料で製作した模型地盤を用いて浸透流による水平・鉛直方向の浸透侵食実験を凍結融解前後で実施して、凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象を実験的に把握する。また、同一試料に対して凍結融解型の各種要素試験を実施し、材料特性に及ぼす凍結融解作用や浸透流の影響を評価する。解析的検討では、まず対象が多相体の複合現象であることを考慮して、複合現象の個別現象への分割化、個別現象の単純化という2つの観点から実現象を分割整理し、個々の現象に関して現象論的に数値モデル化方法を検討する。次に個別開発した各モデルを統合し、凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象を再現可能な数値解析手法を新規提案する。

具体的には、以下に示す研究項目について検討を行った。

- (1) 凍結融解模型地盤の浸透侵食型崩壊実験方法の確立
- (2) 凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象の数値モデル化方針の検討と地盤表面侵食モデルの構築
- (3) 凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象の影響因子の検討
- (4) 地盤表面侵食モデルの確立と地盤内浸透侵食モデルの構築
- (5) 凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象の影響因子の検討
- (6) 相変化依存型土砂災害発生機構の数値解析手法の確立
- (7) 研究の総括

4. 研究成果

- (1) 凍結融解模型地盤の浸透侵食型崩壊実験方法の確立

温度・サクシオン制御機能・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改良し、模型地盤の凍結融解機構に加え、鉛直方向（凍上方向）と水平方向から模型地盤に浸透流を与える機構を具備した凍結融解型二次元浸透侵食模型実験装置を製作した。

開発した試験装置を用いて、砂及び砂・粘土の混合土の流水浸透侵食実験を実施し、同一試料の室内透水試験から得られた透水係数との比較により、試験装置の有用性及試験結果の妥当性・信頼性を確認した。

凍結融解地盤の浸透侵食挙動に及ぼす水流の影響を評価するために、アイスレンズ融解後の氷晶空洞の形状

を模擬した人工的な凹みのある模型地盤を作製し、種々の試験条件（凹みの有無、土質、流水圧等）で浸透侵食実験を実施した。その結果、凹みの有無は模型地盤の透水性に影響するため、凹みを有した模型地盤では浸透流速が高まり浸透侵食が強まる傾向にあることを確認した。以上の検討結果から、模型実験装置の性能評価を行うとともに、凍結融解型浸透侵食実験方法を確立した。

(2) 凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象の数理モデル化方針の検討と地盤表面侵食モデルの構築

凍結融解・浸透侵食複合型崩壊現象を説明可能な数理モデルを新規開発するため、既往の文献調査を広く行い、現象の全体像の把握と多相体の複合現象から単相体の挙動を主体とした個別現象への分割、及び個別現象の単純化に関して検討した。凍結融解地盤の特性を再現するため、個別要素法 (DEM) 及び粒子法 (SPH、MPS) に基づくモデル化を実施し、モデルの予測精度、計算機負荷を検証した。まず、粒子法については、流体现象（水柱崩壊、ダムブレイク）と斜面上の土砂の運動について、両手法を比較した。この結果、SPH は設定パラメータが複数存在することがネックではあるが、MPS に比べて安定に動作しかつ計算機負荷が小さいことが確認された。ただし、土/水相互作用の良好な再現には至らなかった。一方、DEM については、ラグランジュ・オイラーカップリングのコンセプトにより、土と流体との相互作用項を考慮してモデル化し、土砂と水との界面の現象を適切に再現できるモデルを構築した。種々の検討の結果、このモデルは、粒子法に比べて計算機負荷が大きいものの、凍結融解現象を含む幅広い土砂・流体連成問題に適用可能であることを確認した。

(3) 凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象の影響因子の検討

上記項目(1)で開発した凍結融解型二次元浸透侵食模型実験装置に模型地盤内の一部を凍結融解する機構（凍結管）を加え、アイスレンズが局所的に存在したあるいは存在する模型地盤に浸透流を与えることができるように改良した（図1）。改良した試験装置を用いて、砂質土模型地盤の凍結融解流水浸透侵食実験を実施し、室内試験から得られた透水係数との比較により、試験装置

の有用性や試験結果の妥当性・信頼性を確認した。凍結融解地盤の浸透侵食挙動に及ぼす水流の影響を評価するために、浸透流がある場合とない場合について、凍結前・凍結時・融解時に流水圧を変えながら流水浸透侵食実験を実施した。その結果、凍結中に流水がある場合は、地盤の凍結が流水のない場合に比べ遅延するとともに、未凍結部の浸透流速が地盤の凍結により増大する傾向にあることを確認した（図2、図3）。

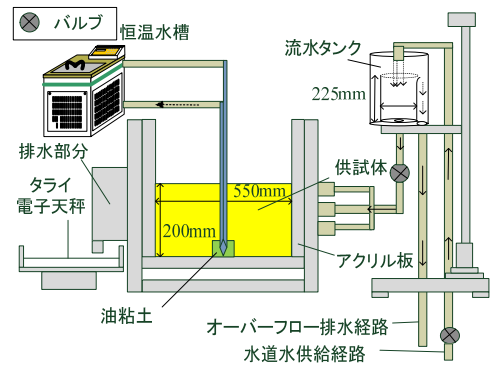


図1 凍結融解二次元浸透侵食模型実験装置

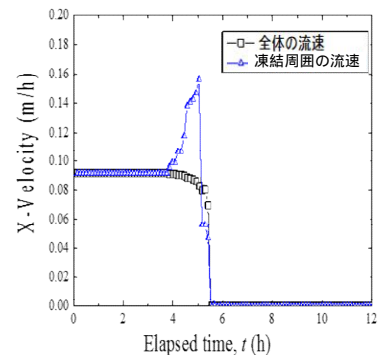


図2 地盤凍結に伴う流速変化

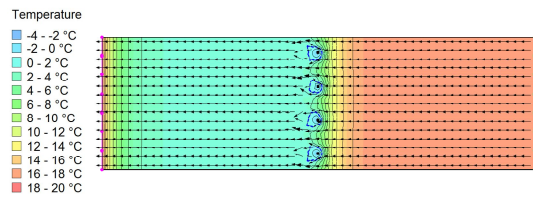


図3 凍結地盤内の流速ベクトル分布

(4) 地盤表面侵食モデルの確立と地盤内浸透侵食モデルの構築

土砂と流体の相互作用について検討するため、シルトと砂の混合割合を3通りに変化させた場合について模型実験を行い、その基本的特性の支配パラメータについて検討した。その結果、水流により盛土下部が洗掘され、これが進むと空洞が形成されること、さらに、地盤の片持ち部のモーメントの働きにより引っ張りクラックが生じ、ついにはモーメントの働きにより曲げ破壊が生じ、オー

バーハング部分が崩落するというプロセスが明らかになった(図4)。

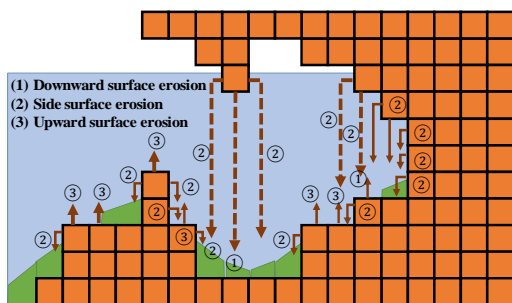


図4 水流による地盤の侵食崩壊モデル

上記項目(2)で開発した粒子法(SPH、MPS)に基づくモデル化法を用いて既往の粒状体動態を対象とした実験の数値解析を行い、SPH法とMPS法について計算機負荷と計算精度の比較を実施した。その結果、SPH法はオリジナルのMPS法に比べて計算機負荷が小さく精度も良好であるが、チューニングパラメータが多く、これらの適切な同定が不可欠であることを示した。また、実験結果が開発したモデル化法を用いた簡易な横断方向一次元土砂・水理モデルにより概ね再現可能であることを示した。

(5) 凍結融解地盤の浸透侵食・崩壊現象の影響因子の検討

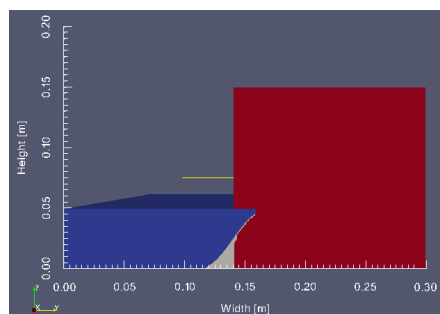
凍上性を有する砂・粘土の混合土模型地盤の凍結融解流水浸透侵食実験を実施し、室内要素試験結果との比較により、試験装置の有用性や試験結果の妥当性・信頼性を確認した。凍結融解地盤の浸透侵食挙動に及ぼす水流の影響を評価するために、アイスレンズが局所的に存在したあるいは存在する模型地盤に対して凍結前・凍結時・融解時に流水圧を変えながら流水浸透侵食実験を実施した。その結果、凍上性を示さない砂質土では、凍結融解前後で透水係数は変化しないが、凍上性を示す混合土では、凍結融解時の密度・土粒子配列の変化により透水係数が変化することを確認した。

(6) 相変化依存型土砂災害発生機構の数値解析手法の確立

凍結融解地盤の浸透流予測に対する熱伝導・浸透連成FEM解析の有用性を模型試験結果との比較検討により検証した。その結果、透水係数の異方性と凍結融解作用が透水性に及ぼす影響を評価すれば、熱伝導・浸透連成FEM解析で凍結融解地盤内の浸透流を精度良く予測できることを示した。

地盤の凍結融解・浸透侵食複合型崩壊現象を再現可能な解析手法として、熱伝導・浸透連成FEM解析により凍結融解地盤内の浸透流を予測し、その後粒子法(SPH、MPS)を用いて凍結融解地盤内の浸透流による土砂の流出過程を再現するモデル化法を提案した。

上記項目(4)で示した土と水流との相互作用による地盤の侵食崩壊挙動を検討するため、3重格子法による新規性の高い手法により、数値解析モデルの構築を行った。この3重格子法では、地盤を三次元格子、崩落した砂部分を細かい二次元格子、水流部を粗い二次元格子で表現するものである。本数値解析モデルにより、本研究で実施した地盤の水流による洗掘過程や崩落過程を適切に再現できることが確認した(図5)。



(a) 流水浸食



(b) モーメント破壊

図5 水流による地盤の侵食崩壊解析結果

(7) 研究の総括

本研究の成果をもとに、凍結融解作用を受ける地盤の浸透侵食挙動の評価を対象とした模型試験法を確立するとともに、凍結融解地盤の浸透侵食特性に及ぼす影響因子として、流水条件、凍結融解条件、地盤材料の凍上性や浸透・保水性が強く影響することを示した。また、凍結融解現象を含む幅広い土砂・流体連成問題に適用可能な解析手法を開発し、当該解析手法を用いて浸透流のある凍結融解地盤で生じる可能性のある相変化依存型土砂災害発生機構を検討可能であることを検証した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

Supapap PATSINGHASANEE, Ichiro KIMURA, Yasuyuki SHIMIZU、Experimental and numerical study on overhanging failure of river bank、土木学会論文集 B1(水工学) 査読有、71(4)、2015、I_127 ~ I_132
Ahmed M. ABDELRAZEK, Ichiro KIMURA, Yasuyuki SHIMIZU、Comparison between SPH and MPS methods for numerical simulations of free surface flow problems、水工学論文集、査読有、58、2014、67 ~ 72

堀内孝輔、木村一郎、大村健祐、山口里実、清水康行、Two-Way 型 DEM-URANS カップリングによる河床変動計算における相互作用項の効果、土木学会論文集 B1(水工学) 査読有、70(4)、2014、I_1057 ~ I_1062

〔学会発表〕(計 8件)

石川達也、Influence of freeze-thaw action on air-permeability of unsaturated soil ground、6th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT2014)、2014年7月3日、Sydney (Australia)
石川達也、Influence of freeze-thaw action on air-permeability of unsaturated soil ground、3rd International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment、2013年11月15日、名鉄ニューグランドホテル(愛知県・名古屋市)

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

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