

令和元年6月11日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06484

研究課題名(和文)凍結融解を受ける河川堤防に適した堤体材料の選定法と締固め基準の提案

研究課題名(英文) Proposal of selection methods and compaction standards of levee body material suitable for river levee in cold regions

研究代表者

中村 大 (NAKAMURA, dai)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90301978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、寒冷気候、特に凍上現象が河川堤防に与える影響を、野外調査と室内試験、模型実験で解明することに取り組んだ。

野外調査から、寒冷で少雪な地域では、河川堤防が凍上によってダメージを受けることが確認できた。また、凍上試験から、堤体材料の細粒分含有率が高くなると、堤防が凍上でダメージを受けるリスクが高まることがわかった。さらに、模型実験から、堤体の締固め度を上昇させると、破堤に至るまでの時間を長くできることがわかったが、支持地盤の透水性の違いが破堤を促進させる可能性があることも明らかとなった。最後に、せん断強度試験から、植生工が寒冷地の堤防を補強する手段として有効であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川堤防の凍結深さおよび凍上量を計測した報告例はほとんどないことから、本研究の成果は河川堤防の凍上による脆弱化に関する基礎資料として貴重である。さらに、河川堤防の設計・管理基準は温暖な地域を対象として作成されたものがほとんどであり、寒冷地の堤防に必要な強度と遮水性、さらには耐凍上性を併せ持った寒冷地仕様設計・管理基準を検討する場合には、本研究の成果は有用である。以上の成果は、寒冷地域の施工技術者からのニーズに応え、周辺地域の寒冷地河川防災に大きく貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of cold climate, especially frost heaving phenomenon, on river levees was investigated by field investigation, indoor test, and model experiment.

Field surveys confirmed that river levees were damaged by frost heaving in cold, low-snow areas. In addition, from the frost heave tests, it was found that the risk of levee damage on frost heaving increases when the fine fraction content of the levee body material increases. In addition, the model experiments revealed that increasing the degree of compaction of the levee body can increase the time until the levee breakage, but it was also clarified that the difference in water permeability of the supporting ground may accelerate the levee breakage. Finally, from the shear strength tests, it was confirmed that the vegetation works were effective as a means of reinforcing the levees in the cold regions.

研究分野：地盤工学

キーワード：河川堤防 積雪寒冷地 凍上 融解 細粒分含有率 締固め 植生工

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では気候変動によるゲリラ豪雨や台風に伴う集中豪雨で、堤防の決壊といった災害が多発する傾向にある。北海道オホーツク地方においても、2015年10月8日から9日にかけて通過した台風23号によって、網走川水系美幌川で避難判断水位を超過する豪雨が発生した。この豪雨により、女満別川堤防の一部では越水による堤防裏のり面の浸食や堤防の決壊といった甚大な被害が発生した(図1)。このような災害の発生件数は、北海道においても増加傾向にあり、近年の気候変動を鑑みると、北海道の河川堤防も本州同様に、豪雨による浸食や決壊の危険性が年々高まっていると言える。さらに、堤防に限らず北海道のような積雪寒冷地にある土構造物は、凍結融解の影響を受けることとなる。冬期に地表面付近の土が凍上すると表層にはアイスレンズが形成され、春期にはこれが融けて表層が緩んでしまう。夏期までに緩みは幾分回復すると考えられるが元には戻らないため、土構造物は脆弱化してしまう。このような状態で台風の発生し易い秋期を迎えると、河川堤防は雨水や河川水等の水流による浸食の影響を非常に受けやすい状態であると考えられる。以上のように、北海道の河川堤防は豪雨と寒冷気候の影響を複合的に受けってしまう過酷な環境下にあり、高い決壊のリスクを抱えていると言える。しかしながら、河川堤防ではどのように凍結が進行するのか、凍結融解後に脆弱化しているのか、更には凍結融解履歴を受けた土が水流でどのように浸食されるのか、といった基本的なことさえ明らかになっていない。

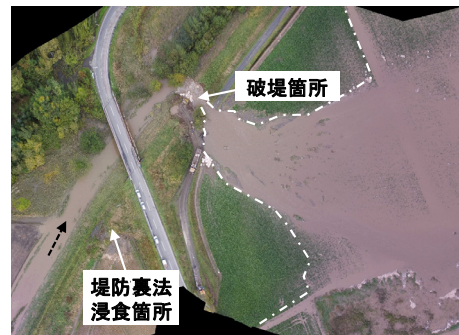


図1 決壊した堤防の様子

また、河川堤防の設計・管理基準は温暖な本州を対象として作成されたものがほとんどであり、凍上現象にまで配慮がなされた設計・管理基準は存在しないのが現状である。一般的に、堤防盛土には、十分な締固めが行われるよう粒径幅の広い土が用いられる。特に、細粒分含有率は遮水性を確保するために土質材料の15~50%とすることが望ましいとされている。ただし、ある程度の細粒分を含んだ土は凍結の影響を大きく受けることが良く知られており、細粒分を30%以上含む土で地盤工学会基準に準じて凍上試験を行うと、多くの場合、凍上性は「中位」もしくは「高い」と判定されるはずである。つまり、堤防の不透水性を確保することを目的として細粒分含有率の高い土を堤体材料として選定した場合、堤防には必ず凍上現象が発生してしまうこととなる。以上から、細粒分含有率に配慮した、寒冷地に最適な堤体材料の選定法を見出すことが急務であると言える。加えて、一般に河川堤防の品質管理には締固め度 D_c が用いられているが、一般堤防の品質下限値は道路盛土より低い締固め度80%以上と定められていることから、堤防盛土の品質管理基準についても改善の余地があると考えた。

以上を背景として、申請者は河川堤防の凍結による劣化メカニズムを明らかにした上で、寒冷地に最適な堤体材料の選定法と締固め基準について検討を行うという考えに至った。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では第1に、河川堤防の凍結深さや凍上量を正確に把握し、寒冷気候（特に凍上現象）が堤防の脆弱化にどのような影響を与えているのか明らかにすることを目的とした。このため、実際の河川堤防に温度計測装置を設置して凍結深さを計測し、冬期間を通して堤防表層地盤の変位を定期的に測量して凍上量を把握することに取り組んだ。

第2に、河川堤防に必要な強度と遮水性、更には耐凍上性を併せ持った寒冷地に最適な盛土材料の選定法について明らかにすることを目的とした。ここでは、様々な細粒分含有量で供試体を作製して凍上試験を行い、凍上しづらい細粒分含有率を明らかにすることに取り組んだ。

第3に、河川堤防の土質および締固め度が、堤防の浸食抵抗にどのような影響を与えるのか明らかにすることを目的とした。ここでは、大型土槽内に堤防を模擬した盛土を構築し、増水や越水等を想定して水を流す堤防模型実験を実施した。また、堤体や支持地盤の土質特性および締固め度を様々に変化させ、盛土の浸食状況の評価を行った。

最後に、当初計画に加え、寒冷地の河川堤防を補強する手段として植生工に着目し、その補強効果について明らかにすることを目的とした。ここでは、植生工を模擬した供試体を作製し、一面せん断試験でその補強効果を解明する実験に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 河川堤防の土中温度および凍上量の計測

図2は、河川堤防に設置した温度計測装置の概略図および配置図である。北海道開発局の協力を得て、少雪で寒冷な道東の北見市常呂町と川上郡標茶町の2地点で計測を実施した。土中温度の計測と、堤防表層地盤の鉛直変位（凍上量）の定期的な測量を行うことで、河川堤防の凍結深さと変形挙動を把握した。なお、2地点の堤防断面の形状は幾分異なるため、温度計測

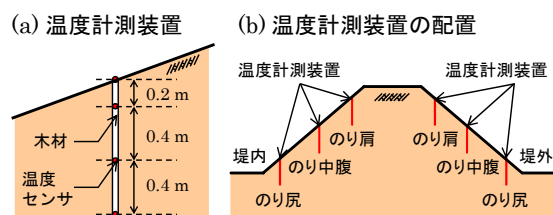


図2 温度計測装置の概略図および配置図

装置の配置や測量箇所は、計測地点によって若干異なる。

温度計測装置は堤防のり面を鉛直に 1m ボーリングして設置した。温度計測装置は木材に設置した複数の温度センサ（地表面、深さ 0.2m, 0.6m, 1.0m の 4 点）からなる。ボーリング孔は温度計測装置の設置後に、現地発生土で埋め戻した。

(2) 細粒分含有量を変化させた土試料を用いた凍上試験

図 3 は本研究で使用した凍上試験装置の概略図である。凍上試験については、地盤工学会基準「凍上性判定のための土の凍上試験方法」に準拠して実施した。

同一の土試料の細粒分含有率を変化させた場合に、凍上性がどのように変化するか明らかにするため、凍上性が低い礫質砂と凍上性が高い礫まじり細粒分質砂の 2 種類の土試料を混合して供試体を作製した。この 2 種類の土試料の配合比を様々に変えることで、細粒分含有率を変化させている。用いた礫質砂と礫まじり細粒分質砂は、実際に北海道の土工で使用される頻度が高い、火山灰由来の土試料である。

(3) 堤体や支持地盤の土質特性および締固め度を変化させた堤防模型実験

図 4 は本研究で使用した堤防模型の概略図を示したものである。堤体材料は珪砂 4 号とファインサンド（非塑性）を 8:2 の割合で混合した土を使用し、締固め度はいずれも 80~85% とした。Case1 は支持地盤に珪砂 4 号を用い、Case2 はこれより透水性が低い珪砂 7 号、Case3 では透水性が高い玉砂利を用いた。実験手順としては、支持地盤にのみ通水して飽和度を高めた後、一定の上昇速度となるように調整しながら外水位を上昇させ、越水直前に 3D レーザースキャナで堤体天端付近の三次元形状を測定した後、越水させた。

(4) 植生工を模擬した供試体を用いた一面せん断試験

図 5 は本研究に用いた植生工を模擬した供試体（根系含有土供試体）の様子と、一面せん断試験装置の概略図である。本研究では土供試体と、これに寒冷地での採用実績の多いケンタッキーブルーグラスを生育させた根系含有土供試体を作製した。実験ケースは、生育期間（1 カ月と 4 カ月）と凍結融解履歴（未凍結と凍結融解）を組み合わせ、全 5 ケースとした。せん断試験は供試体を浸水飽和させた状態で、鉛直応力を 10kN/m² で一定に制御する定圧一面せん断試験を行った。

4. 研究成果

(1) 河川堤防の土中温度及び凍上量の計測

図 6 は道東の 2 地点で計測した、堤防のり面の鉛直変位（凍上量）と凍結深さの経時変化である。なお、凍結深さについては、多点の温度センサでの計測結果を比例配分することで算出した 0°C の位置である。

図 6 (a) は北見市常呂町において 2016 年 10 月から 2017 年 3 月まで実施した計測結果である。北見市常呂町は積雪が毎年 1m を超えることもあり、積雪の断熱効果で、凍結深さは約 20cm と非常に小さな値となった。このため、凍上による鉛直変位も概ね計測されなかった。

図 6 (b) は川上郡標茶町において 2017 年 10 月から 2017 年 3 月まで実施した計測結果である。

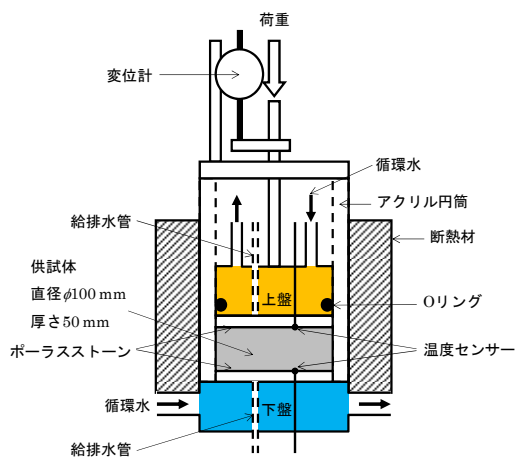


図 3 凍上試験装置

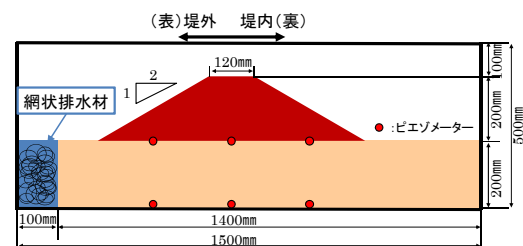


図 4 堤防模型

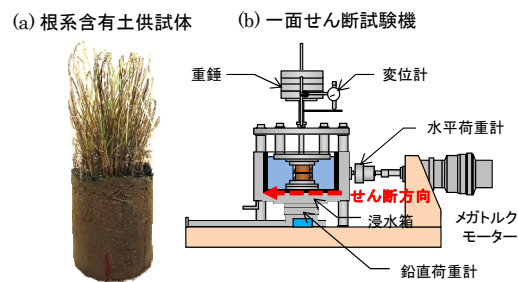


図 5 植生工を模擬した供試体と一面せん断試験装置

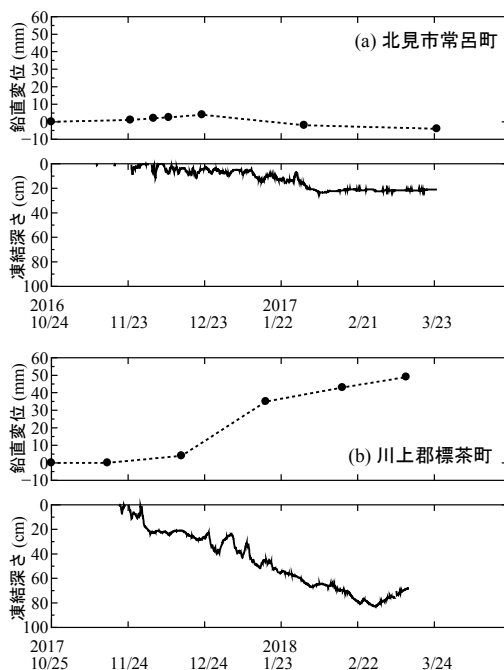


図 6 堤防のり面の鉛直変位と凍結深さ



図7 堤防天端舗装のひび割れ

川上郡標茶町は積雪が少ないこともあり、凍結深さは約80cmに達しており、非常に大きな値となった。このため、50mmに達する大きな鉛直変位（凍上量）が計測された。

図7は堤防天端の舗装路面において観察されたひび割れの様子である（北海道開発局 釧路開発建設部 提供）。ひび割れは最大で全長28m、幅3～5cm程度、段差は約4cmであった。

以上の現地計測により、寒冷で少雪な地域では凍上によって河川堤防がダメージを受けるリスクがあることが確認できた。

(2) 細粒分含有量を変化させた土試料を用いた凍上試験

図8は凍上試験結果から得られた最大凍上速度と細粒分含有率との関係を表わしたものである。図から明らかなように、細粒分含有率が増加するに従って、最大凍上速度が大きくなっていることがわかる。この細粒分含有率と最大凍上速度の関係は、指数関数で表わすことができた。図のように近似すると、凍上性の低い礫質砂であっても、風化火山灰のような凍上性の高い土の細粒分が20%程度混入すると、「凍上性が高い」と判定されてしまうほど、凍上性が大きく変化してしまうことが明らかとなった。

以上の実験により、遮水性を確保する目的で堤体材料の細粒分含有率を極端に大きくすると、凍上によって河川堤防がダメージを受けるリスクが高くなることがわかった。

(3) 堤体や支持地盤の土質特性および締固め度を変化させた堤防模型実験

図9は各実験ケースにおける堤防模型の様子であり、裏のり側を正面から撮影した写真を断片的に示したものである。

図9(a)は支持地盤に透水性の低い珪砂4号を用いた実験の様子であり、越水直前においてわずかであるが、裏のり尻に変状が見られることがわかる。また、越水後は裏のり肩が徐々に侵食されて後退し、破堤へ至っていく様子が確認できた。さらに、堤体の締固め度を5%程度上げて同様の実験を行ったところ、締固め度の上昇で侵食速度が大きく低下することも確認できた。

図9(b)は支持地盤を珪砂4号に比べて透水性が低い珪砂7号に変更して実施した実験の様子である。外水位の上昇過程で天端にはクラックが発生し、越流水がクラックに流入することで、裏のりが円弧に近い形ですべり破壊を起こし、一瞬にして破堤に至った。

図9(c)は支持地盤を珪砂4号に比べて透水性

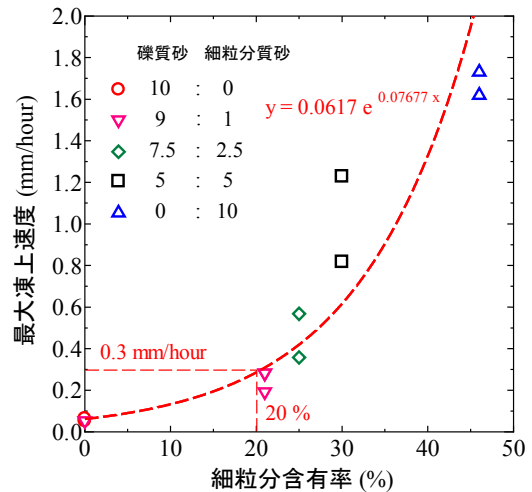
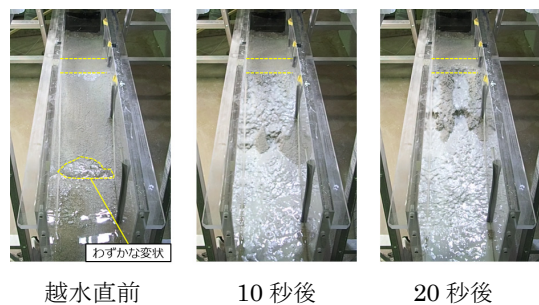
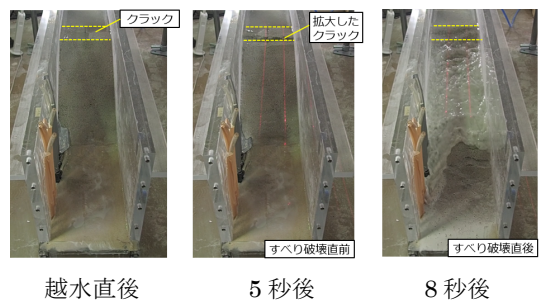


図8 最大凍上速度と細粒分含有量の関係

(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

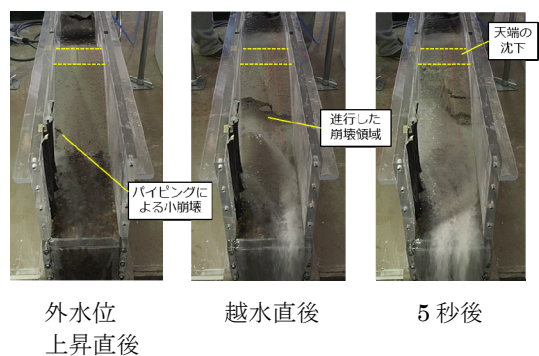


図9 各実験ケースにおける堤防模型の様子

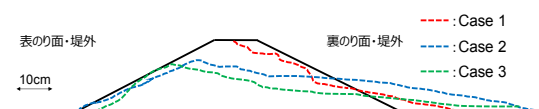


図10 越水20秒後の堤体の侵食状況

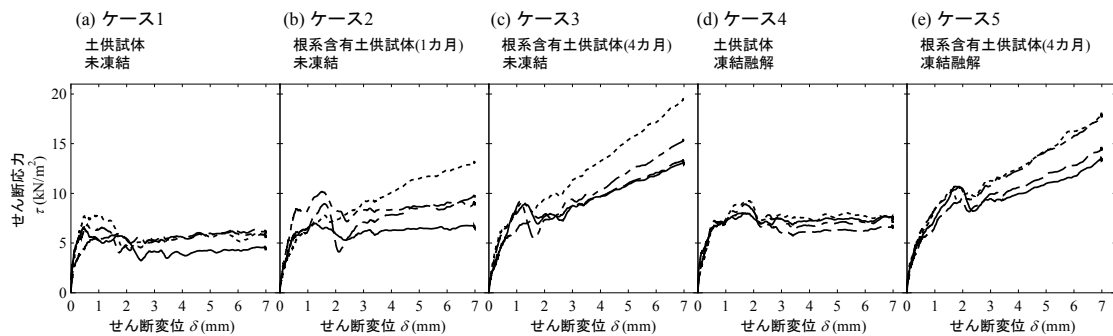


図 11 定圧一面せん断試験結果

が高い玉砂利に変更して実施した実験の様子である。外水位を上昇させた直後から裏のり尻付近で堤体材料の吸出しが発生し、これによって生じた空洞は堤外側へと発達してパイピング状態となり、空洞の発達と崩壊を繰り返す進行性崩壊が発生した。越流水が裏のり面に到達した時点では裏のりの崩壊はかなり進行しており、越水直後から 5 秒後には天端直下のパイピングによって天端は沈下し、ほとんど破堤に近い状態になった。

図 10 は撮影したビデオから読み取った越水開始 20 秒後における堤体の越水侵食の形状である。Case1 では天端の一部が侵食されずに残っているのに対し、Case2、Case3 では天端が既に消失し、崩壊していることが確認できる。

以上の実験により、堤体の締固め度を上昇させることによって、破堤に至るまでの時間を長くできることはわかった。しかしながら、それ以上に支持地盤の透水性の違いだけで、越流前に堤体に変状し、このことが破堤を劇的に促進させる可能性があることが明らかとなった。

(4) 植生工を模擬した供試体を用いた一面せん断試験

図 11 は定圧一面せん断時におけるせん断変位 δ に伴うせん断応力 τ の推移をケースごとに比較したものである。なお、再現性を確認するために実験は各ケース 4 回実施した。

凍結融解履歴を与えていない 3 ケースを比較すると (図 11 (a), (b), (c)), δ が小さな領域 (2 mm 程度まで) では根系含有土供試体と土供試体のせん断挙動にそれほど大きな違いは見られないが、それ以降では大きな違いが見られ、根系含有土供試体では δ に伴って τ が上昇していることがわかる。また、生育期間が長いケース 3 (図 11 (c)) の方がケース 2 (図 11 (b)) に比べて τ の上昇が顕著である。根系が発達することで、特に δ が大きい領域 (大変形時) でのせん断抵抗が大きくなっており、靱性を向上させていることが伺えた。

凍結融解履歴を与えた 2 ケースを比較すると (図 11 (d), (e)), 先述した凍結融解履歴を与えていない 3 ケースと同様な傾向を示しており、根系の含有によるせん断抵抗の上昇が確認できる。また、凍結融解履歴によって根系が大きく損傷したような影響は確認できなかった。

以上の実験により、植生工が寒冷地の堤防のり面を補強する手段の一つとして有効であることが確認できた。さらに、寒冷地での採用実績の多いケンタッキーブルーグラスについては、凍結融解履歴がせん断抵抗に与える影響はそれほど大きくないことも明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① 宋白楊, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 山口滉平, 山下聡, ケンタッキーブルーグラス (*Poa pratensis* L.) の根系が細粒土のせん断強度に与える影響, 日本緑化工学会誌, 査読有, Vol.43, No.1, 2018, pp.15-20, DOI: 10.7211/jjsrt.44.15
- ② 川内谷勇真, 宋白楊, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 山下聡, 凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究, 日本緑化工学会誌, 査読有, Vol.43, No.1, 2017, pp.144-149, DOI: 10.7211/jjsrt.43.144
- ③ 川尻峻三, 川口貴之, 早川博, 中村大, 渡邊康玄, 森田大詞, 田中悠暉, 河川水位上昇による空気湧出時における堤体と堤内地盤の内部構造の把握, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, Vol.73, No.2, 2017, pp.I_1261-I_1266, DOI:10.2208/jscejhe.73.I_1261

〔学会発表〕 (計 8 件)

- ① 劉爽, 御厩敷公平, 川口貴之, 川尻峻三, 早川博, 越水破堤に及ぼす堤体支持地盤の影響に関する縮尺模型実験, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス (北海道・札幌市), 2018 年
- ② 田中悠暉, 川尻峻三, 川口貴之, 小笠原明信, 古溝幸永, 表面波探査による異なる季節における河川堤防の性状把握, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム, 公益社団法人 土木学会講堂 (東京都・新宿区), 2017 年
- ③ Baiyang Song, Dai Nakamura, Takayuki Kawaguchi, Shunzo Kawajiri, Satoshi

Yamashita, Dahu Rui, Internal observation of soil in frost heave process using the X-ray CT scan, ASCE Congress on Technical Advancement (アメリカ・ミネソタ州・ダールース), 2017年

- ④ 武山温香, 佐藤厚子, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 宋白楊, 火山灰質土の凍上特性に及ぼす細粒分含有率の影響, 第57回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見工業大学(北海道・北見市), 2017年
- ⑤ 川尻峻三, 川口貴之, 田中悠暉, 橋本和明, 長倉健, 国峰紀彦, 林宏親, 岡本拓三, 古溝幸永, 高水位作用による噴砂が発生した河川堤防および周辺地盤の地盤工学的特徴, 第57回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見工業大学(北海道・北見市), 2017年2月3日
- ⑥ 田中悠暉, 川尻峻三, 橋本聖, 川口貴之, 中村大, 山下聡, 記録的降雨を受けた盛土の崩壊限界雨量の評価, 第57回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見工業大学(北海道・北見市), 2017年
- ⑦ 川内谷勇真, 宋白楊, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 山下聡, 緑化したのり面表層のせん断強度に関する実験的研究, 第57回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見工業大学(北海道・北見市), 2017年
- ⑧ 宋白楊, 川内谷勇真, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 山下聡, 草種の違いが凍結融解を受けた土のせん断挙動に与える影響, 第57回地盤工学会北海道支部技術報告会, 北見工業大学(北海道・北見市), 2017年

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：川口 貴之

ローマ字氏名：(KAWAGUCHI, takayuki)

所属研究機関名：北見工業大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：20310964

研究分担者氏名：川尻 峻三

ローマ字氏名：(KAWAJIRI, shunzo)

所属研究機関名：北見工業大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：80621680

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。