

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360206

研究課題名（和文）凍結融解履歴を受ける寒冷地用路盤構造の長期性能評価手法の高度化に関する研究

研究課題名（英文）Sophistication of evaluation method for the long-term performance of granular base course subjected to freeze-thaw history in cold regions

研究代表者

石川 達也（ISHIKAWA TATSUYA）

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60359479

研究成果の概要（和文）：本研究では、凍結融解作用を受ける粒状路盤の力学特性の試験方法を提案するとともに、凍結時及び凍結融解後の粒状路盤の力学挙動を把握し、舗装構造の理論的設計方法を用いて、凍結融解に伴う粒状路盤の性能変化が道路舗装の疲労寿命に及ぼす影響を検討した。この結果、粒状路盤が凍結融解作用を受けた場合、支持力特性のような力学的な性能が変化し、疲労寿命のような走行路構造の長期性能に強く影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed new testing methods for the evaluation of the deformation-strength characteristics of base course materials subjected to freeze-thaw action, and examined the mechanical behavior of granular base before and after freeze-thawing and under freezing. We also evaluated the influences of the change in the performance of granular base due to freeze-thawing on the fatigue breaking of pavements in cold regions by applying the theoretical design method for asphalt pavement. As the result, it was revealed that the freeze-thawing of granular base has a strong influence on the fatigue life of pavement structure in cold regions because it varies the deformation-strength characteristics of base course materials.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤工学、舗装工学、交通荷重、凍結融解、礫質土、路盤、主応力軸回転、繰返しせん断

1. 研究開始当初の背景

道路・線路・空港といった交通荷重を受ける運輸基盤施設では、一般に移動体の繰返し通過に伴って本来保持すべき機能を次第に損なうことから、その補修・更新に莫大なコストと資源が費やされている。特に、北海道のような積雪寒冷地では、厳冬期に0℃線が舗装深部にまで侵入し路床等が凍上して、路

盤や舗装面に隆起が生じたり、アスファルト混合層（以下「As層」と称す）にクラックが発生する。また、融解期には、融雪水の流入やアイスレンズの融解により含水比が上昇し路床や路盤の強度が一時的に低下する。このような寒冷地域特有の現象が、走行路機能の劣化・喪失（走行路面変状）を早めている。一方、以上のような寒冷地域特有の機能低下

現象を考慮可能な設計手法として、国内における各種運輸基盤施設の設計では、限界状態設計法のような性能規定型のより合理的な設計法の導入が始まっている。例えば、道路舗装の構造設計では、従来の経験的設計法である TA 法から理論的設計方法への移行・確立に向けた検討が行われている。しかし、積雪寒冷地で冬期に発生する地盤の凍上現象や、融雪期の路床・路盤の一時的な支持力低下現象は、従来から指摘されてはいるものの、その力学挙動の解明やモデル化には未だ至っていない。今後、積雪寒冷地に存する各種運輸基盤施設の疲労破壊に対する最適設計を行い、供用性の確保とライフサイクルコスト低減を図るには、凍結期および融解期における路床・路盤の支持力や変形特性を把握し、力学的応答を理論的に解析する必要がある。

2. 研究の目的

研究全体の目標は、積雪寒冷地の運輸基盤施設で路盤材として用いられている種々の粒状地盤材料が飽和・不飽和状態で凍結融解作用を受ける際に、凍結融解に起因する路盤構造の支持力特性の変化とそれに伴う舗装構造の機能低下を評価して、積雪寒冷地の運輸基盤施設の長期性能評価手法を提案するとともに、北方圏の運輸基盤施設に適した寒冷地用路盤構造の要求性能を提示することである。このため、本研究では、凍結融解履歴を受ける路盤構造の長期的な性能劣化機構や路盤材の品質低下機構を解明して、積雪寒冷地の気象条件と調和した各種運輸基盤施設の理論的設計方法の確立に資することを研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、室内要素試験、室内模型実験、現地計測ならびに数値解析を連携して実施し、以下のような研究項目について検討した。

(1) 路盤材の力学特性に対する凍結融解履歴の影響評価 (室内要素試験)

粒状路盤材の凍上性・力学特性に影響を与える因子(石質、飽和度、凍結融解履歴、載荷荷重等)を明確にするため、試験条件を変えた一連の室内要素試験(凍上、CBR、多重リングせん断)を実施し、各因子が粒状路盤材の力学挙動に及ぼす影響を検討した。

(2) 粒状路盤の力学特性に対する凍結融解履歴の影響評価 (室内模型試験)

粒状路盤材で構成された路盤構造の力学特性に影響を与える因子(石質、飽和度、凍結融解履歴、載荷荷重等)を明確にするため、凍結融解履歴載荷型移動載荷試験装置を用いて、試験条件を変えた一連の室内模型試験を実施し、各因子が路盤構造の力学挙動に及

ぼす影響を検討した。

(3) 凍結融解作用を受ける舗装構造の変形傾向の把握 (現地計測)

凍結融解過程における舗装構造の変形傾向を把握するため、屋外に造成した試験舗装各層の各種状態量(温度、層別沈下量、土壌水分量)の長期計測および凍結期・融解期における輪荷重載荷試験と FWD 試験を行い、舗装構造の凍結・融解状況と各層の変形挙動との関係を分析した。

(4) 走行路構造の長期性能に及ぼす凍結融解作用の影響評価 (数値解析)

粒状路盤の凍結・融解が走行路構造の長期性能に及ぼす影響を評価するため、道路舗装の理論的設計方法を用い、凍結融解とそれに伴う含水状態の変動を考慮し路盤剛性を季節変動させた疲労破壊寿命解析を実施した。

4. 研究成果

(1) 路盤材の力学特性に対する凍結融解履歴の影響評価 (室内要素試験)

① 凍結融解多重リングせん断試験

凍結融解履歴を載荷可能な多重リングせん断試験機を開発し、気乾・浸水状態の天然

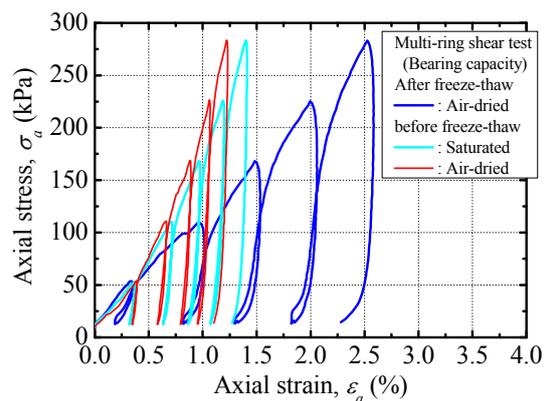


図1 支持力試験の比較 (要素試験)

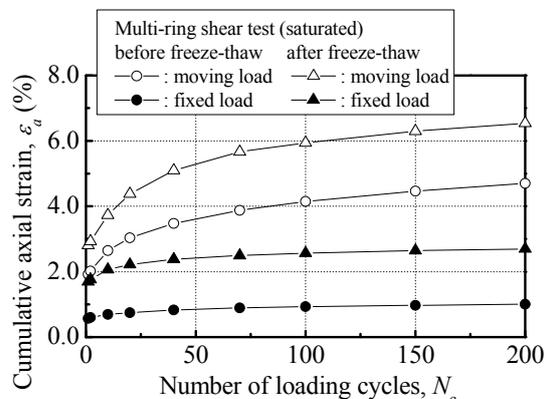


図2 繰返し載荷試験の比較 (要素試験)

砕石について各種荷方式（移動荷、定点荷、支持力、単調せん断）による多重リングせん断試験を実施して、凍結融解履歴が路盤材の変形特性に与える影響について検討した。その結果、浸水状態の場合、荷重荷時の鉛直ひずみは凍結前に比べて凍結時に減少し凍結融解後に増加することが、試験方法・荷方式の違いに依らず確認された。特に、主応力軸回転を伴う移動荷重荷方式の試験でその影響が顕著に表れた（図1、図2）。また、路盤材の繰返し荷時の残留変位は含水比の影響を強く受けることが示された。

② 凍結融解 CBR 試験

凍結融解履歴を荷可能な CBR 試験機（図3）を開発し、気乾・湿潤・浸水状態の天然砕石（C-40）・再生砕石（RC-40）について異なる凍結融解履歴で凍上試験・CBR 試験を実施して、凍結融解や含水状態が路盤材の凍上性・支持力特性に及ぼす影響について検討した。その結果、非凍上性の路盤材において、凍結融解による粒子破碎に起因した支持力の低下が確認された。また、路盤材の支持力は石質に係わらず含水比の影響を強く受けることが示された（図4、図5）。

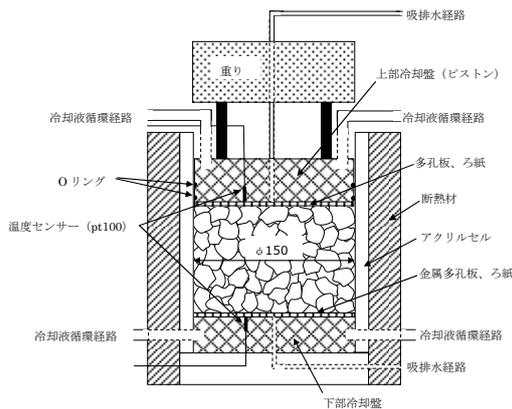


図3 凍結融解 CBR 試験装置

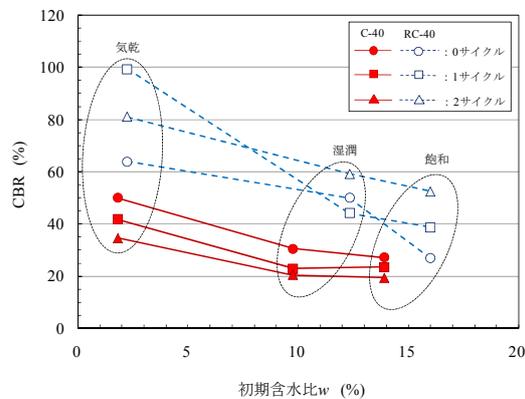


図4 初期含水比による CBR の変化

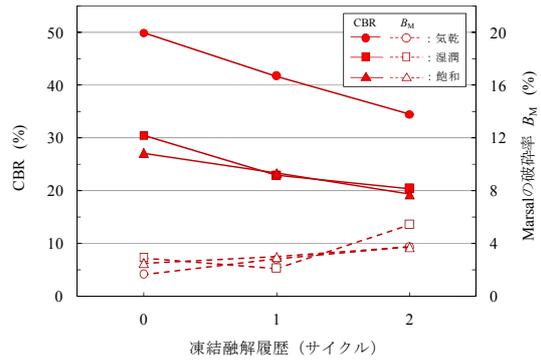


図5 凍結融解履歴が CBR と破砕率に与える影響（天然砕石）

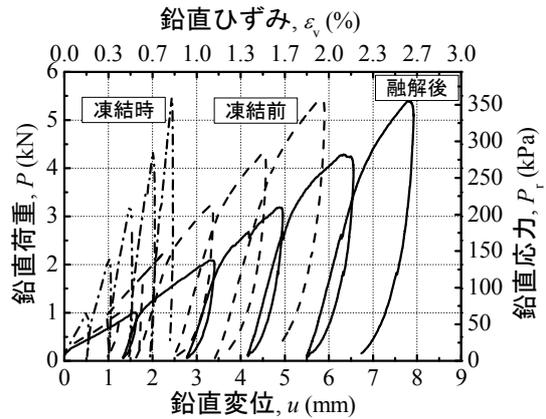


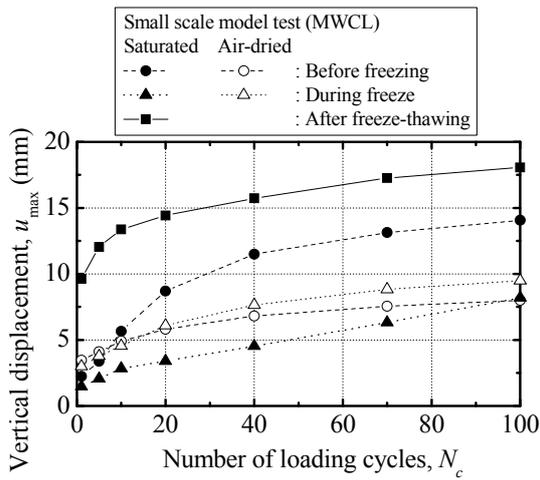
図6 支持力試験の比較（模型試験）

(2) 粒状路盤の力学特性に対する凍結融解履歴の影響評価（室内模型試験）

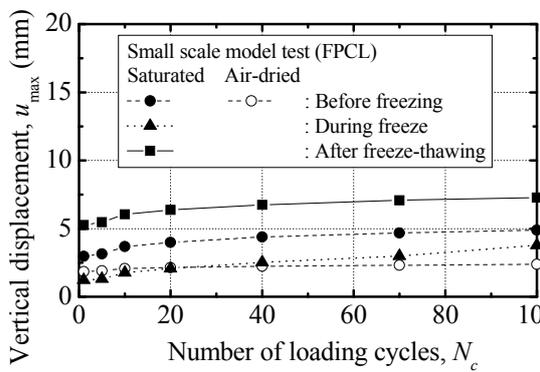
凍結融解履歴を荷可能な二次元平面ひずみ模型土槽を具備した移動荷重荷試験装置を開発し、天然砕石で構成される気乾・浸水状態の粒状路盤について各種荷方式（移動荷、定点荷、支持力）による模型試験を凍結前、凍結時、凍結融解後の各状態で実施して、凍結融解履歴が粒状路盤の力学挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、①浸水状態の粒状路盤の凍結はその剛性を増加させるが、融解後は凍結前に比べ剛性が低下すること、②浸水状態の場合、繰返し荷時の累積沈下量は、凍結融解履歴のないものと比較して、凍結時は小さく、凍結融解後は大きくなること、③凍結融解作用が繰返し荷時の沈下量に及ぼす影響は、定点荷試験より移動荷試験において顕在化すること、④荷方式に係わらず気乾状態に比べ浸水状態の方が繰返し荷時の累積沈下量は大きくなること示された（図6、図7）。

(3) 凍結融解作用を受ける舗装構造の変形傾向の把握（現地計測）

① 長期状態量計測・輪荷重荷試験
試験舗装において、舗装構造内各層の温度



(a) 移動載荷試験



(b) 定点載荷試験

図7 凍結融解中の試験結果の比較

分布、土壌水分分布（飽和度）の長期計測（図8）と輪荷重載荷試験（図9）を実施して、秋期から春期にかけての試験舗装各層の各種状態量の経時変化傾向と凍結前・凍結時・融解期の各層の剛性との相関性について検討した。その結果、凍結期に路盤剛性は増加し融解期に低下すること、および剛性の変化は路床・路盤の凍結融解に伴う土壌水分量の季節変動と密接な関連性があることが明らかになった。また、試験舗装における計測結果と、本研究で実施した要素・模型試験結果の傾向が一致することから、その妥当性を検証した。

② FWD試験

試験舗装において、平均気温が高く下層路盤中央近くまでしか凍結しなかった2008年度と、ほぼ平年並で凍上抑制層まで凍結した2009年度の秋期から春期にかけて、各年度20回ずつFWD試験を実施して、積算寒度（図10）と試験舗装各層の弾性係数（図11）の経時変化傾向、および両者の相関性について検討した。その結果、舗装構造各層の弾性係数は、凍結期に寒さの進行とともに増加し、融解期に急激に低下すること、および融解期の路床・路盤の弾性係数は凍結前より

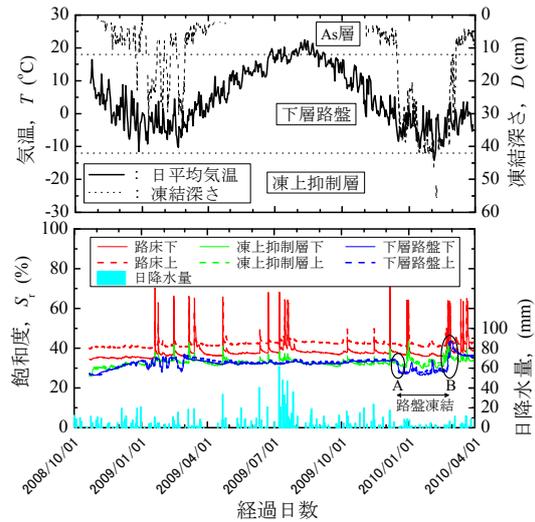


図8 舗装構造内各種状態量の長期計測結果

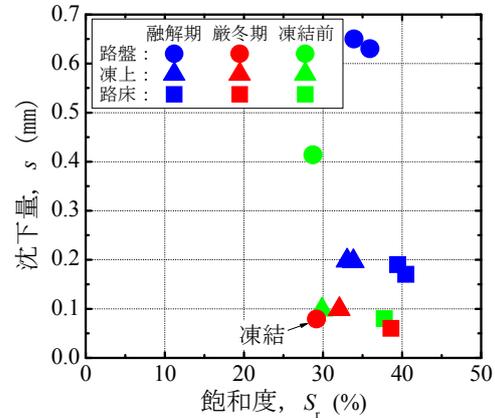


図9 凍結融解中の輪荷重載荷試験結果

若干低下する傾向にあることが明らかになった。

(4) 走行路構造の長期性能に及ぼす凍結融解作用の影響評価（数値解析）

アスファルト舗装の理論的設計方法を用いて疲労破壊寿命解析を実施して、凍結融解に伴う下層路盤の性能変化が舗装構造の長期性能（疲労寿命）に及ぼす影響を評価した。その結果、As層や路床の暫定破壊基準から計算される疲労破壊年数は、下層路盤凍結時（剛性増加時）に長くなり融解時（剛性低下時）に短くなる傾向が確認された（図12）。このため、凍結融解作用を受ける舗装構造の長期的な挙動予測手法や性能評価手法の構築には、凍結融解に伴う下層路盤の剛性変化を考慮することが重要である。また、路盤剛性の季節変動を考慮した場合には、路盤剛性を変化させない従来の設計方法に比べ、疲労寿命は長くなる傾向にあり、特に、この疲労寿命の増加割合は、凍結指数の変化に強く影響されることが明らかとなった（図13）。

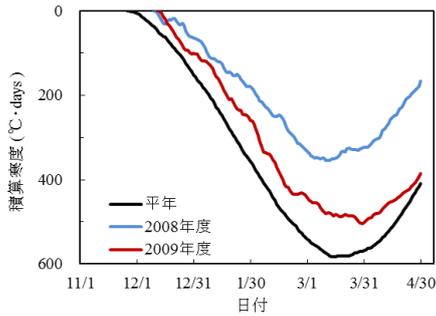


図 10 FWD試験時の積算寒度の推移

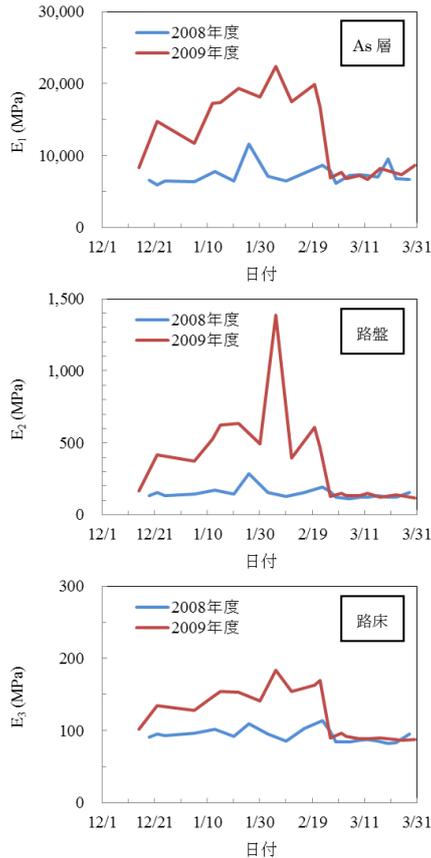


図 11 舗装各層の弾性係数の経時変化

このことから、粒状路盤材の凍結融解を考慮した舗装構造の理論的設計法の導入は、凍結指数（積算寒度）が高い地域においてより効果的であると言える。

以上の結果から、粒状路盤材が凍結融解作用を受け、凍結状態や含水状態などその状態が変動した場合、支持力特性のような力学的な性能が変化し、走行路構造の長期性能に強く影響することが明らかになった。したがって、積雪寒冷地の気象条件と調和した運輸基盤施設の理論的設計方法を確立するには、道路舗装の場合と同様に、路床・路盤材の凍上性を勘案するだけでなく、地盤の凍結融解現象

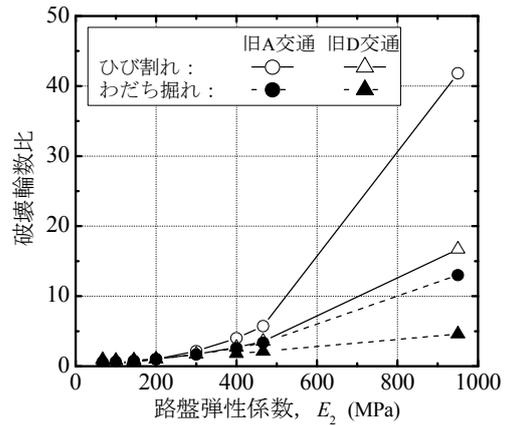


図 12 路盤剛性が疲労寿命に及ぼす影響

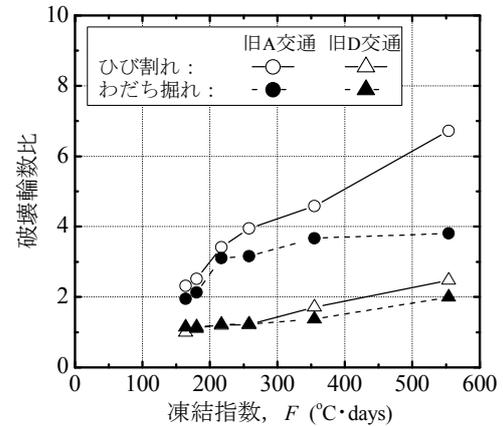


図 13 凍結指数が疲労寿命に及ぼす影響

や、それに伴う粒状路盤材の品質変化、走行路構造内の土壌水分量の季節変動を考慮することが重要である。また、このような影響を評価可能な設計手法（例えば道路舗装の理論的設計方法など）を、北海道のような積雪寒冷地の運輸基盤施設の構造設計に適用することは、意義があると結論される。

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 石川達也、安倍隆二、吉田有喜、三浦清二、粒状路盤の力学挙動に及ぼす凍結融解作用の影響評価、土木学会舗装工学論文集、査読有、Vol.15、2010、201-209.
- ② 川端伸一郎、亀山修一、金井利浩、富澤健、石田眞二、寒冷地における舗装のひび割れ被害の実態とその特徴、土木学会舗装工学論文集、査読有、Vol.15、2010、211-218.
- ③ 川端伸一郎、林啓二、亀山修一、地域特性を考慮した n 年確率凍結指数の合理的

- 決定法、土木学会論文集 C、査読有、Vol.67、No.1、2011、98-106.
- ④ 川端伸一郎、亀山修一、高見雅三、神谷光彦、凍結指数推定における各種確率分布モデルの適合性、土木学会論文集 C、査読有、Vol.65 No.3、2009、716-727.
- ⑤ 石川達也、細田充、三浦清一、関根悦夫、移動輪荷重作用下の粒状路盤の力学挙動に及ぼす含水状態の影響評価、土木学会舗装工学論文集、査読有、Vol.14、2009、9-17.
- ⑥ Ishikawa, T.、Sekine, E. and Miura, S. : Plastic deformation analysis of granular base under cyclic moving loads by cumulative damage model, Proc. of the 5th CHINA/JAPAN Workshop on Pavement Technologies, 査読無、2009、113-119.
- ⑦ Ishikawa, T.、Kamei, T.、Sekine, E. and Ohnishi, Y. : Effect evaluation of roadbed stiffness on bearing capacity of railroad ballast with discontinuous analysis, Proc. of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 査読無、Vol.2、2009、1207-1218.
- ⑧ 関根悦夫、桃谷直嗣、石川達也、講座「舗装と交通荷重に関する地盤工学」 7. 鉄道路盤の現状と課題、地盤工学会誌、査読無、Vol.57 No.3、2009、54-61.
- ⑨ 石川達也、亀井威彦、関根悦夫、大西有三、不連続体解析による路床剛性の異なる粒状路盤の支持力挙動評価、土木学会舗装工学論文集、査読有、Vol.13、2008、125-132.
- ⑩ Ishikawa, T.、Sekine, E.、Ohnishi, Y.、Application of DDA to mechanical behavior of granular base-subgrade system, Proc. of International Mini-Symposium for Numerical Discontinuous Analysis, 査読無、2008、41-52.
- ⑪ Ishikawa, T.、Hosoda, M.、Miura, S.、Sekine, E.、Influence of water content on mechanical behavior of gravel under moving wheel loads, Proc. of the 1st International Conference on Transportation Geotechnics, 査読無、2008、185-191.
- ⑫ 関根悦夫、石川達也、移動荷重を受ける有道床軌道の FEM 解析による沈下推定方法、鉄道総研報告、査読無、Vol.22 No.8、2008、11-16.

[学会発表] (計4件)

- ① 川端伸一郎他3名2番目、凍結融解作用が粒状路盤材の CBR に与える影響について、土木学会第66回年次学術講演会、2011年9月7~9日、愛媛大学(愛媛県)
- ② 川端伸一郎他2名1番目、寒冷地のアスファルト舗装におけるひび割れの広域

- 調査、土木学会第65回年次学術講演会、2010年9月3日、北海道大学(北海道)
- ③ 石川達也他3名2番目、累積損傷度理論に基づくバラスト軌道の塑性変形簡易解析法、鉄道技術連合シンポジウム J-Rail'09、2009年12月2日、国際オリンピック青少年総合センター(東京都)
- ④ 石川達也他2名2番目、再生砕石粒状路盤の繰返し変形挙動に及ぼす移動荷重の影響、第44回地盤工学研究発表会、2009年8月18日、関東学院大学(神奈川県)

[図書] (計1件)

- ① 土木学会舗装工学委員会、土木学会、舗装工学ライブラリー6 積雪寒冷地の舗装、2011、207

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・准教授
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： 00091504
横濱 勝司 (YOKOHAMA SHOUJI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号： 50299731
亀山 修一 (KAMEYAMA SHUICHI)
北海道工業大学・空間創造学部・教授
研究者番号： 30295894
川端 伸一郎 (YAMASHITA SATOSHI)
北海道工業大学・空間創造学部・准教授
研究者番号： 10224833
(H20：連携研究者、H21：研究分担者)
小野 丘 (ONO TAKASHI)
北海学園大学・工学部・教授
研究者番号： 10142689
(H20~H21：研究分担者)

(3) 連携研究者

安倍 隆二 (ABE RYUJI)
独立行政法人土木研究所・寒地道路研究グループ・主任研究員
研究者番号： 80414209
関根 悦夫 (SEKINE ETSUO)
(財)鉄道総合技術研究所・軌道技術研究部・主任研究員 (GL)
研究者番号： 00425969
八谷 好高 (HACHIYA YOSHITAKA)
独立行政法人港湾空港技術研究所・空港研究センター・センター長
研究者番号： 60356053
(H20：連携研究者)