

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04300

研究課題名（和文）土系舗装の凍害劣化におけるX線CT画像解析と細孔径測定による現象と機構の解明

研究課題名（英文）Evaluation of freezing damage of soil pavement using X-ray CT image analysis and pore size measurement

研究代表者

河村 隆（Kawamura, Takashi）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：50324231

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：土系舗装の凍害劣化現象とその機構を明らかにするために、細粒分含有率FCが異なる供試体に対して、繰り返し凍結融解試験、ポロシメータ、弾性波速度、一軸圧縮試験を実施した。その結果、現有X線CTスキャナの精度の限界のため、凍害劣化進行の定量評価には至らなかった。しかしながら、凍結時にクラックが表面から内部に徐々に進行することを視覚的に確認した。さらに、FCが異なっても細孔全容積はほぼ同じだが、凍害劣化が生じる場合には $0.01\sim 0.5\mu\text{m}$ 程度の空隙が多いことを示した。本研究の条件においては、凍害劣化と強度の間に相関は認められなかった。土系舗装に凍害劣化には、強度よりも透水性に依存することが示唆される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面（凍結面）から内部への凍結速度、凍害劣化進行の定量評価には至らなかったものの、主材料の土質材料の特性と同様に、細粒分含有率が高いほど凍害劣化の影響を受けやすいことを明らかにした。一方、粒度試験（細粒分含有率）と弾性波速度試験の結果によって、圧縮強度を予測することが可能であることを示した。実施において、施工時の主材料の細粒分含有率を把握しておくことにより、定期的に弾性波速度によって圧縮強度を予測し、舗装の健全度を評価することが可能であると考えられる。土系舗装に凍害劣化には、材料の強度よりも透水性に依存することが示唆されることから、今後、凍害劣化と透水性との関係性に関する検討も望まれる。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the freezing damage process and mechanism of soil pavement, repeated freezing and thawing tests combined with X-ray CT image analysis, porosimeter, elastic wave velocity and uniaxial compression test were performed on soil pavement specimens with different fine particle contents. As the result, due to the precision limit of our X-ray CT scanner, it was not possible to quantitatively evaluate the freezing damage process. However, we visually confirmed that cracks progressed gradually from the surface to the inside during freezing. And, it was shown that when the fine particle content is high, the effect of freezing damage is large, and there are many micro voids. In this study, no correlation was observed between freezing damage and strength of the specimen. It is suggested that the freezing damage of soil pavement depends on the permeability rather than the strength of the material.

研究分野：地盤工学

キーワード：歩行者系舗装 土系舗装 X線CTスキャナ 細粒分含有率 細孔径分布 凍結融解 弾性波速度 圧縮強度

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

土系舗装は、保水性が高く、水たまりやぬかるみが生じないという特徴を有していることから、公園や歩道に多く適用されている。しかし、高い保水性のために凍害劣化が懸念され、積雪寒冷地への適用は進んでおらず、凍害劣化現象や耐凍害性の検討は十分行われていない。一方、融雪時に生じる水たまりやぬかるみは、夜間に凍結してスリップ事故の原因となるため、ぬかるみを生じさせない土系舗装の特徴は、融雪時に長所となる可能性を有している。

コンクリートの凍結融解試験方法 (JIS A 1148) では、水浸した供試体を周面から凍結させる試験が実施されている。一方、地盤材料の凍結は、間隙が大きいためコンクリートと大きく異なる。特に細粒分含有率 FC の高い材料において凍上現象が顕著である。地表面からの凍結に伴って間隙水が移動して土中にアイスレンズが形成され、大きな膨張変形を生じることが知られている。そのため、地盤工学分野では、地表面から進行する凍結を模擬した試験 (凍上量予測のための土の凍上試験方法, JGS 0172-2009) が主に実施されている。土系舗装においては、舗装面からの供給された雨水や融雪水の凍結が凍害劣化の主因となることから、舗装面から凍結を生じさせる試験が必要である。

2. 研究の目的

土系舗装の凍害劣化現象とその機構を明らかにすることを目的とする。そのために、以下の項目について検討する。

表面 (凍結面) から内部への凍結速度の定量評価: X 線 CT 画像解析において得られる測点間の距離の変化に基づいて、凍結面から内部への凍結による膨張速度を求め、これを凍結速度として評価する。

表面から内部への凍害劣化進行の定量評価: 融解時の残留変形に着目して、凍害劣化した範囲を推定する手法を確立し、凍結融解の繰り返し回数と劣化範囲の進行度合いを関連づけて評価する。

凍害劣化に影響する細孔径分布の同定: 凍害劣化に影響を及ぼす細孔径分布の範囲および全空隙体積を求める。

凍害劣化と材料特性の関係: 凍害劣化と材料特性 (細粒分含有率) の関係を明らかにする。

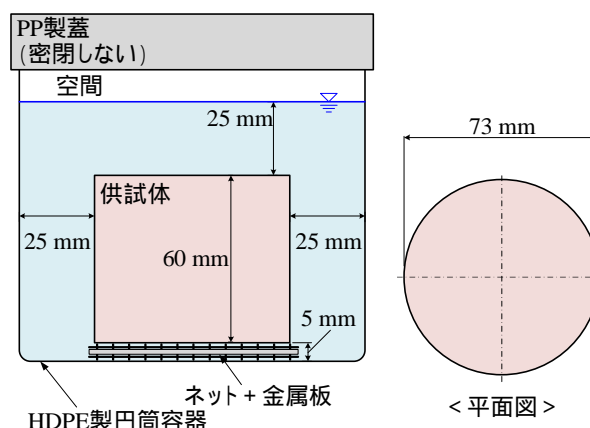
凍害劣化の微視的メカニズムの解明: ~ から得られる結果を関連づけることにより、凍害劣化現象およびその機構について検討する。

3. 研究の方法

(1) 繰り返し凍結融解試験: 表面 (凍結面) から内部への凍結速度の定量評価, 表面から内部への凍害劣化進行の定量評価, 凍害劣化と材料特性の関係

土系舗装の円柱状供試体に対して、冷凍庫・恒温庫を用いて供試体の全周面から凍結融解を行う場合 (図-1) と、ペルチェ素子ユニット型凍結融解試験装置 (申請備品) を用いて供試体の下面から凍結融解を行う場合 (図-2) の2つの方法で繰り返し凍結融解試験を実施した。

土系舗装試料の主材料には、施工実績のある粒度調整佐久土と凍結融解特性に影響する細粒分含有率の異なるものを用意した (図-3)。凍害劣化と材料特性の関係を検討するために、全周面から凍結融解を行う試験においては、細粒分含有率 (FC=7, 17, 32, 46%) の異なる4種類の供試体を用いた。凍結速度および凍害劣化の進行の定量評価を行うために、試料の下面から凍結融解を行う試験においては、粒度調整佐久土 (FC=7%) を用いた。さらに、X 線 CT 撮影時の測点としてジルコンビーズを所定量添加した。所定の養生期間を経過した後、コア抜きして供試体 (高さ 61 mm, 直径 73 mm) とした。水浸して 24 時間以上脱気を行った供試体に対して、繰り返し凍結融解試験を実施した。凍結後および融解後において、X 線 CT スキャナ ((株) アルエフ, コンピュータ断層撮影装置 NAOMi-CT) を用いて撮影を行った。撮影画像に対して、供試体全体および局所的なひずみの算定を試みた。



(2) 細孔径分布の測定: 凍害劣化に影響す

図-1 冷凍庫・恒温庫を用いた全周面からの凍結融解試験

る細孔径分布の同定

凍害劣化に影響する細孔径分布について検討するために、図-3 に示した粒度分布の土試料のうち、粒調佐久土：若里シルト = 10:0, 5:5, 2:8 の供試体に対して、ポロシメータ（外注）により細孔径分布の測定を実施した。

(3)弾性波速度の測定と一軸圧縮試験： 凍害劣化と材料特性の関係， 凍害劣化の微視的メカニズムの解明

凍害劣化と材料特性の関係について検討するために、細粒含有率（FC=20, 24, 52, 78%）の異なる土試料を主材料とする土に対して、弾性波速度測定と一軸圧縮試験を実施した。

凍結融解に伴うクラックの発生は、材料の強度や供試体内の間隙水の移動に関連しており、凍結時には間隙水の凍結膨張が生じるため、引張り強度に大きく依存していると考えられる。引張り強度を評価する圧裂引張り試験では供試体と載荷板の接触具合によって、引張り強度にばらつきが生じたため、引張り強度に大きく関連する圧縮強度について検討することとした。図-4 に示す細粒含有率 FC の異なる主材料の供試体に対して、弾性波速度試験と一軸圧縮試験を実施し、圧縮強さ、変形係数および S 波速度の関係について整理し、S 波速度を用いた圧縮強さの予測について検討した。さらに、凍害劣化と弾性波速度、強度の関係についても検討した。

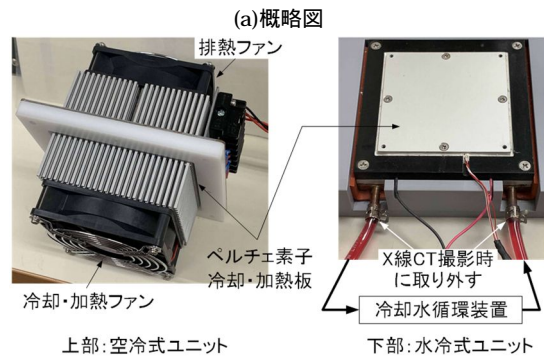
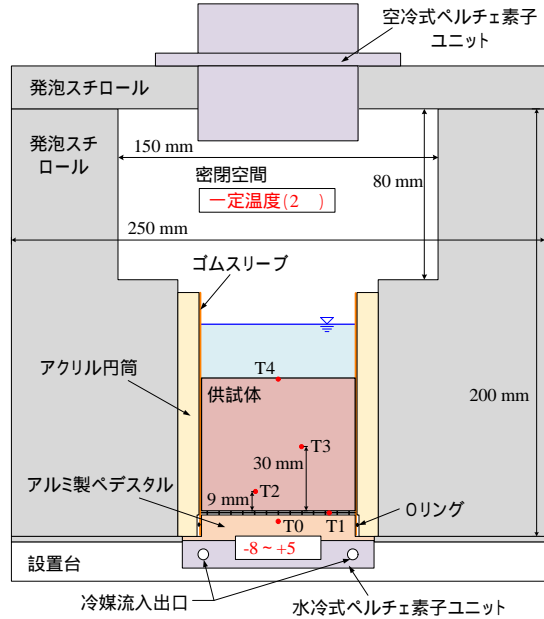


図-2 ペルチェ素子ユニットを用いた下面からの凍結融解試験装置

4. 研究成果

(1)繰り返し凍結融解試験

表-1 に凍結後、融解後の X 線 CT 画像の一例を示す。測点の移動距離に基づいて、表面（凍結面）から内部への凍結速度の定量評価、表面から内部への凍害劣化進行の定量評価を試みたが、現有する X 線 CT スキャナの精度の限界のため、凍結速度、凍害劣化進行の定量評価には至らなかった。しかし、凍結時において冷却面に近い部分（下面）から水平クラックが発生し、水平クラックの発生領域が徐々に内部に進行することを視覚的に確認した。

図-5 に全周面より凍結融解を行った場合の鉛直ひずみの変化を示す。細粒含有率 FC が 17, 32 および 46% の配合 8:2, 5:5 および 2:8 では、凍結融解サイクルの増加とともに、鉛直ひずみは徐々に増加する。FC が 30% よりも多い配合 5:5, 2:8 では、1 サイクルの変形量が大きく、凍結過程における膨張変形と直後の融解過程における膨張変形が回復する傾向が明瞭である。凍結と融解それぞれの過程における変形は、凍結過程における膨張変形の方が大きく、サイクル数の増加とともに膨張変形が蓄積し、鉛直ひずみが大きくなる。鉛直ひずみ 3% 程度を境に鉛直ひずみの増加割合が大きくなる。さらに凍結融解を繰り返すと、配合 8:2 では $n=33$ 程度、5:5 では $n=10$ 程度においては鉛直ひずみが 10% 程度に達し、それ以降は凍結融解の繰り返しの伴って鉛直ひずみが蓄積することなく、膨張収縮を繰り返す。供試体全体の鉛直ひずみがそれ以上増加しない限界点に達しているも

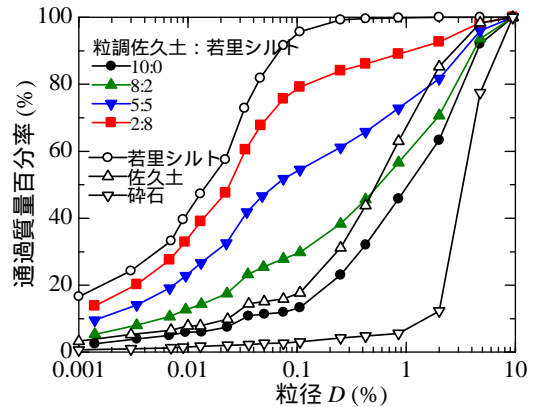


図-3 粒径加積曲線（繰り返し凍結融解試験）

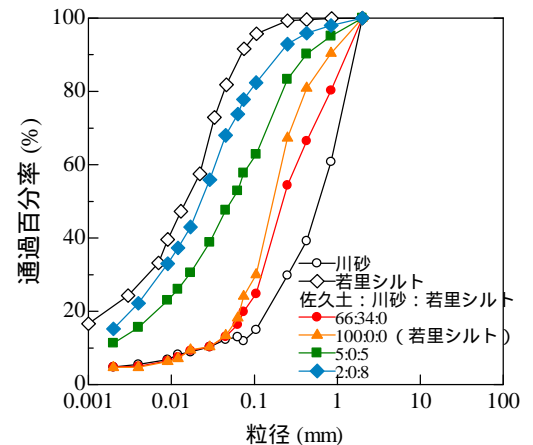


図-4 粒径加積曲線（弾性波速度，一軸圧縮試験）

表-1 X線CT画像の一例（下面からの凍結融解，粒調佐久土：若里シルト=10:0）

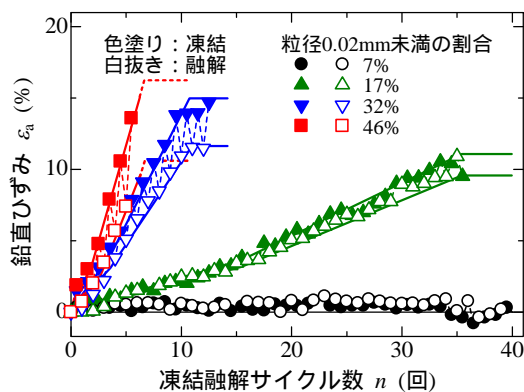
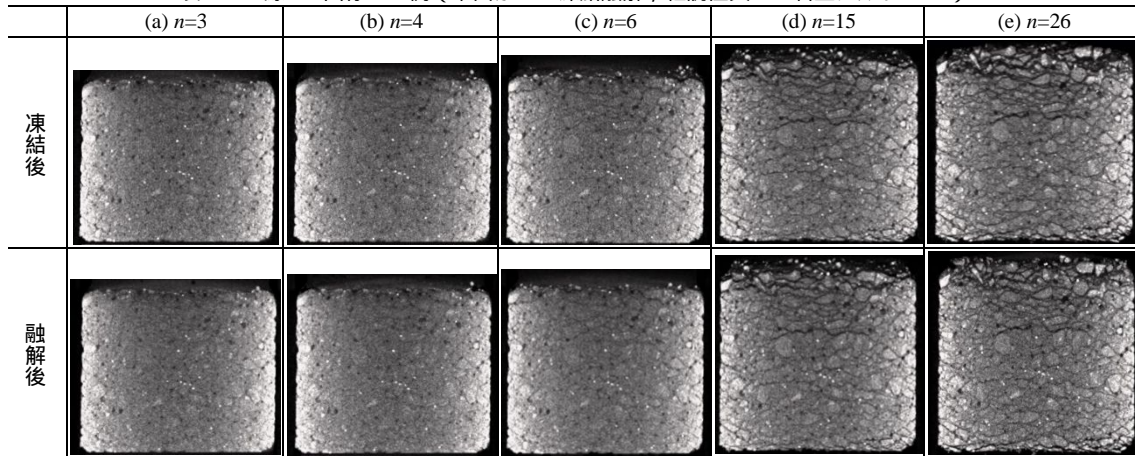


図-5 繰り返し凍結融解試験の結果（全周面からの凍結融解）

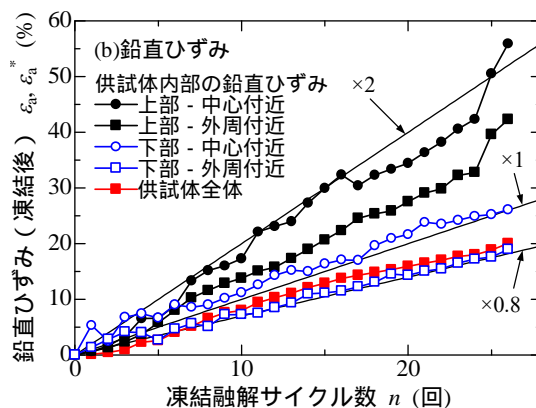


図-6 繰り返し凍結融解試験の結果（下面からの凍結融解）

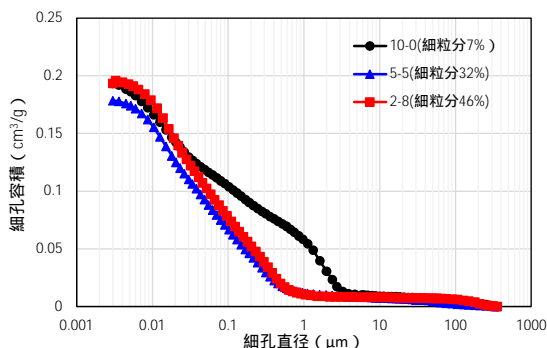


図-7 累積細孔容積

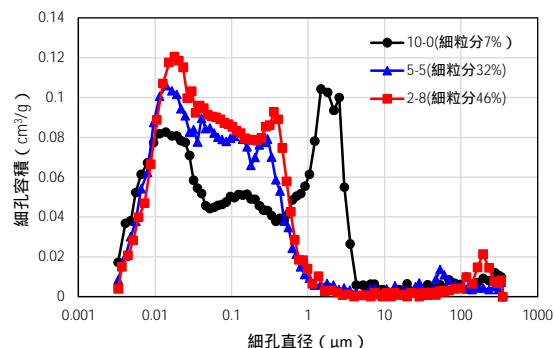


図-8 細孔径分布

のと考えられる。細粒分含有率FCが46%の配合2:8においては、 $n=6$ において鉛直ひずみ14%程度である。粒径0.02mm未満の土粒子の割合が46%で最も大きい配合2:8においても、 $n=7$ 以降さらに凍結融解を繰り返すことによって、配合5:5と同様に鉛直ひずみが蓄積することなく膨張収縮の変形を繰り返したと考えられる。

図-6に供試体の下面から凍結融解を行った試験における供試体内部の鉛直ひずみの変化を示す。凍結過程の結果のみを示している。比較のために全体の鉛直ひずみも示した。供試体内部の鉛直ひずみは、供試体上部、下部ともに中心付近の方が大きい。上部の中心付近が最も大きく、下部の外周付近の2倍以上である。表-1に示したクラックの発生挙動と比較すると、中心付近では水平方向のクラックが発達しており、供試体下面から凍結面を水平に保って徐々に凍結が上方に進行していると考えられる。一方、供試体の外周部では外周に近いほど凍結が速く進行して、高さごとの凍結の進行が異なり凍結面が傾斜するために、傾斜したクラックが発生したと考えられる。

(2) 細孔径分布の測定

図-7, 8にポロシメータの測定結果として、累積細孔容積および細孔径分布を示す。図-7に示すように、細粒分含有率FCが異なっても細孔全容積は0.18~0.19 cm³/gでほぼ同じであり、凍害劣化との関連は認められない。一方、図-8に示すように、細孔径分布は細粒分含有率FCによ

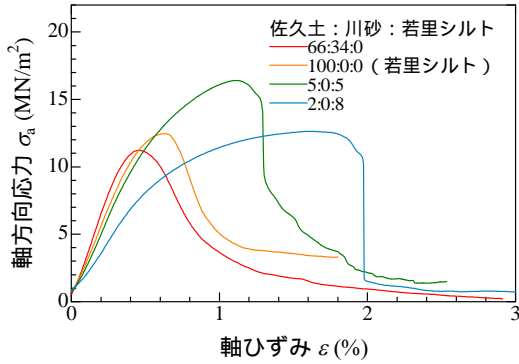


図-9 軸方向応力と軸ひずみの関係の一例

って異なっている。凍害劣化をほとんど生じない場合には細孔直径 0.5 ~ 数 μm 程度の比較的大きな空隙が多く、凍害劣化の影響が大きい場合には 0.01 ~ 0.5 μm 程度の小さな空隙が多い。細孔径全容量がほぼ同じであるが、小さな空隙が多いことから、透水性には大きな違いがあることが想定される。土系舗装の凍害劣化には、透水性に依存することが示唆される。

(3)弾性波速度の測定と一軸圧縮試験

図-9 に軸方向応力 σ_a と軸ひずみ ε の関係を示す。ピーク強度時の軸ひずみ（破壊ひずみ）は、主材料の 50% 粒径 D_{50} が小さく細粒分含有率が大きいほど大きくなる。一方、ピーク強度（一軸圧縮強さ q_u ）は、佐久土：川砂：若里シルト = 5:0:5 の結果が最も大きく、50% 粒径 D_{50} および細粒分含有率 FC の違いによる明確な傾向は見られない。

図-10 に一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の関係を示す。両者の関係は、ケースごとに原点を通る 1 本の直線で近似することができる。それぞれの近似線の決定係数 R^2 は 0.9947 ~ 1.000 であり、近似線の精度は高い。直線の傾きを $\alpha (= q_u / E_{50})$ として、 D_{50} との関係を整理して図-11 に示す。 α は、 D_{50} が大きいほど小さくなり、両者の関係は式(1)に示す 1 本の直線として近似できる。

$$\alpha = q_u / E_{50} = -0.018 D_{50} + 0.0077 \quad (1)$$

式(1)の一致係数は $R^2=0.9998$ であり、両者の相関は高い。図-10 に示した $q_u \sim \varepsilon$ 関係には、 D_{50} および細粒分含有率の違いによる明確な傾向は見られないものの、 $q_u \sim E_{50}$ 関係の傾きである α は D_{50} と明確な関係を有する。

図-12 に変形係数 E_{50} と S 波速度の 2 乗 V_s^2 の関係を示す。両者の関係は、主材料の粒度分布に関わらず原点を通る 1 本の直線となり、式(2)で近似することができる。

$$E_{50} = 0.0011 V_s^2 \quad (2)$$

式(2)の一致係数は $R^2=0.9967$ であり、精度は高く、非破壊の弾性波速度試験を実施することにより、変形係数 E_{50} が推定可能となる。

$q_u \sim E_{50}$ 関係の傾き $\alpha (= q_u / E_{50})$ 、式(1)および式(2)を連立することにより、一軸圧縮強さの予測値 q_u^* は、式(3)として導出される。

$$q_u^* = (-0.018 D_{50} + 0.0077) 0.0011 V_s^2 \quad (3)$$

D_{50} と V_s を用いることにより、一軸圧縮試験を実施することなく、 q_u を予測することが可能となる。図-13 に q_u と q_u^* の関係を示す。実測値と予測値の R^2 は 0.998 であり、式(3)の精度は高い。粒度試験と弾性波速度試験の結果によって、一軸圧縮強さ q_u を予測することが可能である。しかしながら、本研究の条件においては、凍害劣化と圧縮強度の間に相関は認められなかった。

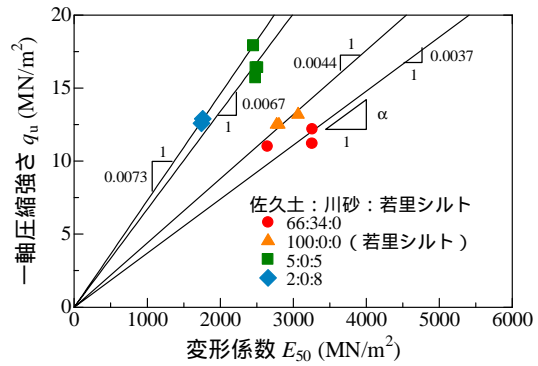


図-10 一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の関係

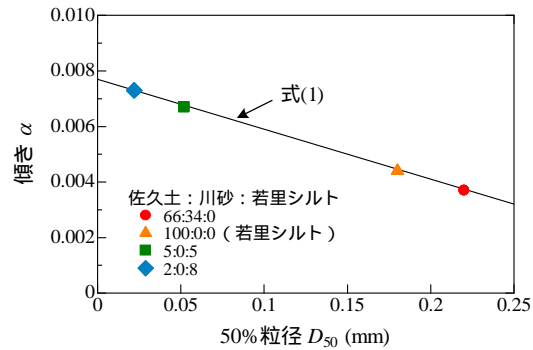


図-11 傾き α と 50% 粒径 D_{50} の関係

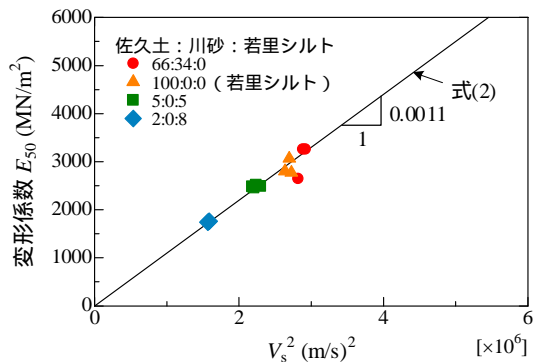


図-12 変形係数 E_{50} と S 波速度の 2 乗 V_s^2 の関係

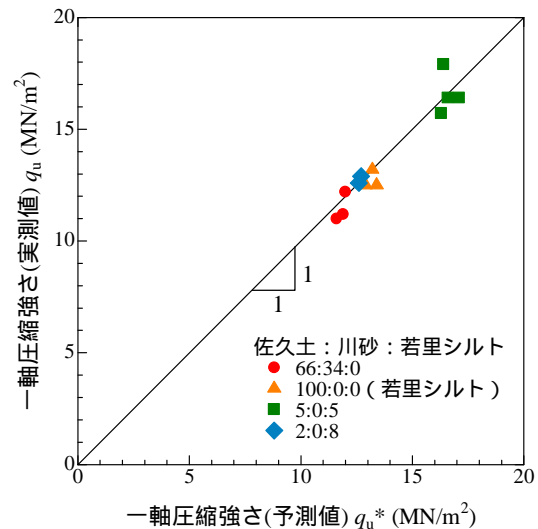


図-13 一軸圧縮強さの実測値と予測値の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 飯田紫乃, 熊田 正, 松山 寛, 横沢昌弘
2. 発表標題 粒度の異なる土系舗装の弾性波速度と圧縮・引張強度（その1）
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 飯田紫乃, 熊田 正, 松山 寛, 横沢昌弘
2. 発表標題 粒度の異なる土系舗装の弾性波速度と圧縮・引張強度（その2）
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Kawamura & Takeo Umezaki
2. 発表標題 Influences of unit cement content and fine fraction on freezing and thawing characteristics of soil pavement
3. 学会等名 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 松高芽生, 横沢昌弘, 小平計美
2. 発表標題 土系舗装におけるX線CT画像に基づく凍結融解特性（その2）
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 松高芽生, 横沢昌弘, 小平計美
2. 発表標題 土系舗装におけるX線CT画像に基づく凍結融解特性(その3)
3. 学会等名 土木学会第76 回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 福田祐己, 横沢昌弘, 小平計美
2. 発表標題 機能性土系舗装の凍結融解特性に及ぼす細粒分含有率の影響(その2)
3. 学会等名 第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 田中幹宏, 梶山 遼, 横沢昌弘, 小平計美
2. 発表標題 土系舗装におけるX線CT画像に基づく凍結融解特性(その1)
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 佐伯俊輔, 福田祐己, 横沢昌弘
2. 発表標題 機能性土系舗装の乾燥収縮および保水・吸水性に及ぼす細粒分含有率の影響
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 福田祐己, 佐伯俊輔, 横沢昌弘
2. 発表標題 機能性土系舗装の凍結融解特性に及ぼす細粒分含有率の影響
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梅崎 健夫 (Umezaki Takeo) (50193933)	信州大学・学術研究院工学系・教授 (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------