

令和 6 年 4 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04261

研究課題名（和文）締固め構造物の不均一性評価手法の確立と設計施工管理プロセスの体系化

研究課題名（英文）Establishment of evaluation method for the heterogeneity of compacted earth structures and systematization of design and construction management processes

研究代表者

河井 克之（Kawai, Katsuyuki）

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：30304132

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：「締固め」は、ある含水状態にある地盤材料に圧縮荷重を加えて、間隙空気を押し出しながら密にすることと定義できる。そのため地盤材料内の土粒子と水、空気の複雑な相互作用が生じる境界値問題となっており、実施工では施工品質が施工過程の大きく影響を受ける。ここでは、実施工で用いる転圧によって生じる締固め品質の不均一性について数値シミュレーションで明らかにした。また、実際の造成盛土において物理探査を実施し、施工時の不均一性げ原因となっていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

盛土造成時には予め現地で実物大の「締固め」試験を実施し、求められる「締固め度」を達成できる様に、施工層厚や転圧回数といった施工方法を決定してきたが、同じ施工方法であっても、材料の含水状態によって仕上がりが異なることを示した。また、実際に施工に用いる転圧では、地盤内にせん断応力生じさせながら移動することを意味し、弾塑性材料である地盤材料においては、初期の転圧方向が盛土内の不均一性に影響を及ぼすことが明らかとなった。これは研究成果として挙げている物理探査結果でも分かるように、盛土内での透水性の局所化にもつながることを示す。今後、材料の含水状態に応じた施工方法を模索することが重要となる。

研究成果の概要（英文）："Compaction" can be defined as the process of compressing a soil material in a certain moisture state to drain air and achieve densification. Therefore, it involves complex interactions among soil particles, water, and air within the soil material and can be regarded as a boundary value problem. The quality of construction is significantly influenced by the construction process. Here, we elucidated the heterogeneity of compaction degree resulting from roller compaction used in actual construction through numerical simulations. Additionally, we conducted physical investigations on actual embankments to demonstrate the causes of heterogeneity during construction.

研究分野：地盤工学

キーワード：締固め 転圧 盛土

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アースダムや河川堤防、道路、鉄道盛土から宅地造成まで、陸上の地盤構造物は「締固め」によって建造される。適切な地盤材料が容易に入手できれば、安価で良品質、長期耐用性のある構造物が可能となる。しかしながら、材料の長距離輸送や産業廃棄物となる発生土砂量を抑える目的で、現場近くもしくは現地で採取可能な材料を施工に用いることが多いため、材料選定の自由度は低い。また、たとえ良品質の材料を確保できたとしても、盛立ては締固め度を測定して施工管理を行うことが主である。締固め度は施工のための基準であって、地盤構造物の求める安定性や遮水性を確保する基準とはなり得ないため、鋼やRCを材料とする構造物の様に要求性能に応じた設計を行うことが難しい。近年では、ICT施工によって締固め層厚や締固め回数などを管理するようになったが、これも施工プロセスの面的管理に他ならない。転圧重機で同時に地盤の加速度応答を計測し、地盤の剛性評価を行う試みもなされるようになってきたが、依然、設計と施工の間に隔たりがあるのは、そもそもの「締固め」を力学体系の中で定義することなく施工性を追求してきたことによると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、「締固め」を地盤材料内の土粒子～間隙水～間隙空気の相互作用の結果として捉えることで、不飽和土の力学として体系化し、施工時の「締固め」による品質変化や締固め構造物内に発現する不均一性の原因となる要因を整理、設計や施工、維持管理手法を普遍的なモデルで記述することを目的としている。

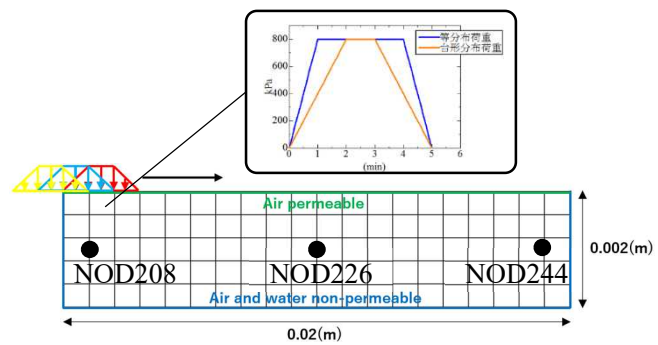


図-1 解析メッシュおよび荷重条件

3. 研究の方法

(1) 転圧シミュレーション

「締固め」は、土粒子、間隙水、間隙空気の相互作用による現象であるため、三相混合体として地盤材料をモデル化し、境界値問題を解く必要がある。ここでは、土/水/空気連成有限要素解析コード DACSAR-MP^①を用いた。図-1に、室内模型試験を模した締固め層厚0.02m、転圧長さ0.02mの解析ケース(Case-1)における解析メッシュを示す。水理境界として領域の上下左右端すべて非排水境界、空気境界として上面のみ排気境界を与えた。転圧については、上面の三要素にまたがって図のような荷重分布を左端から右端へと移動させ、往復させる。転圧荷重は、実際の転圧荷重に近い分布とするために、台形分布荷重を与え、最大荷重1600kPaを設定した。図中に転圧荷重載荷時から通過するまでの、一要素当たりの時間～荷重関係を示す。また、一要素のサイズをそのまま鉛直方向に要素数を増やすことで、締固め層厚0.04m(Case-2)、0.06m(Case3)の解析領域を設定し、締固め層厚の異なる転圧シミュレーションも実施した。表-1に、入力材料定数、図-2に水分特性曲線を示す。初期間隙比を0.85とし、含水比の違いは初期飽和度の異なる材料として与えた。また、図-2に示す吸水曲線上の保水状態を満たす様に、初期飽和度に応じた初期サクションを与えた。別途行った静的締固めシミュレーションにおいて設定荷重での最適含水比は19～20%の範囲内にあることが分かっている^②。

また、同じ材料定数を用いた実物大谷埋め盛土の転圧シミュレーションも

表-1 入力材料定数

λ	κ	$k_w(m/min)$	M
0.107	0.011	6.94E-6	1.344
α	n_s	$k_a(m/min)$	m
30	1.0	0.000694	0.8

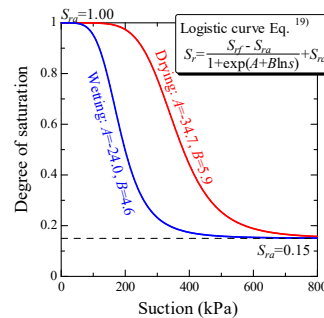


図-2 解析で用いた水分特性曲線

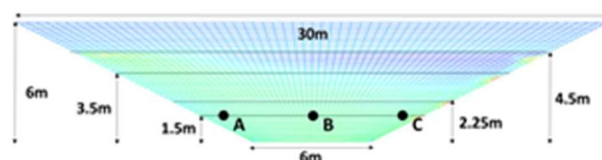


図-3 谷埋め盛土シミュレーションの解析領域

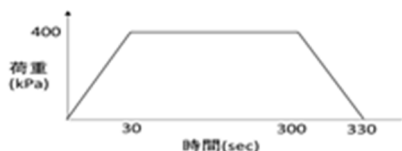


図-4 一要素当たりの荷重履歴

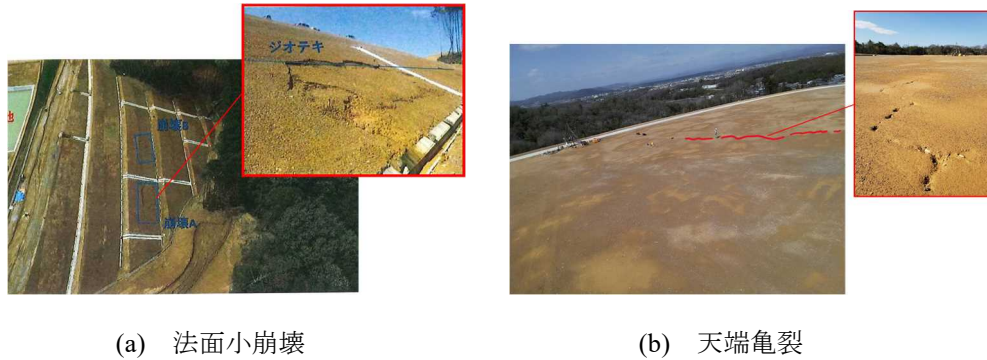


図-4 大型造成地における崩壊事例

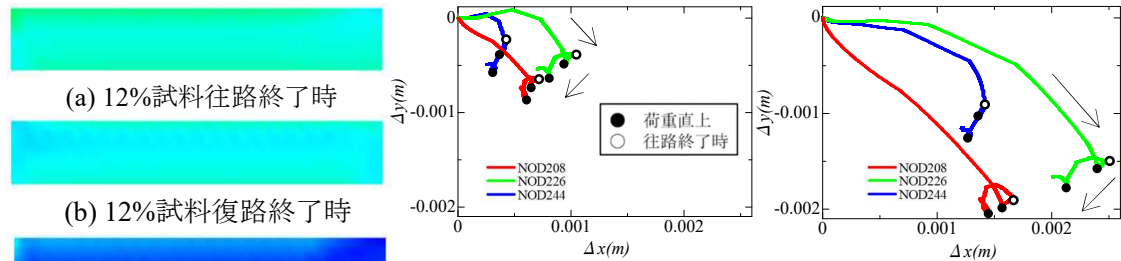


図-5 Case-1 間隙比分布

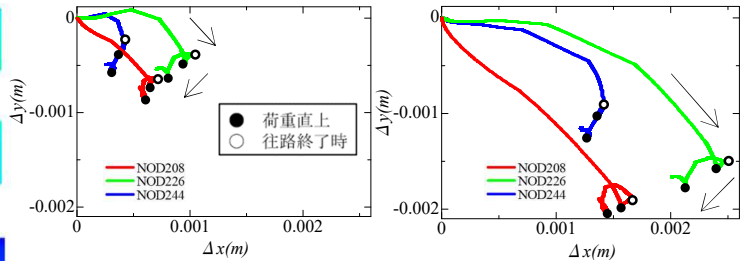


図-6 Case-1 水平方向の節点変位比較

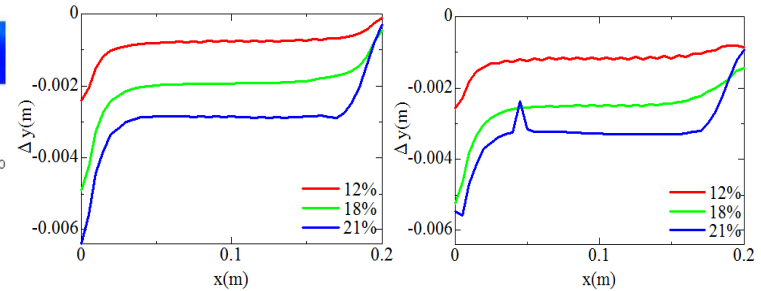


図-7 Case-1 転圧面圧縮量

行った。図-3 に解析メッシュを示す。施工は5層に分けて行う複層締固めを想定している。ここでは、転圧荷重として400kPaを設定する。既往研究で行われた同材料の一次元締固めシミュレーションでは、最適含水比は22(%)であり、ここでは乾燥側の含水比になるように材料の初期含水比を14,16,18(%)の3種類を設定した。転圧荷重は、締固めを行う層の上面に分布荷重を移動させることで表現した。図-3 に一つの要素が受ける荷重履歴を示す。転圧に用いる重機の大きさの影響を表現するために、転圧荷重の分布幅は4mと2mを設定した。ただし、図-3 で示す同じ荷重履歴となるように、2m幅の分布荷重の移動速度は4mの半分となるように設定した。

(2) 造成地盤の電気比抵抗探査

実地盤における締固めの不均一化によって起こっている問題を可視化するために造成時に問題のあった盛土で電気比抵抗探査を実施し、その被害要因を調べた。図-4 は兵庫県南部の山間部の造成地で最大30mの高盛土である。法面は補強材によって補強しているものの造成初期から小雨でも法面小崩壊が複数回確認されているほか、天端では図中赤線で示す様に法肩と平行に段差を伴う亀裂が発生している。もともと使用している地盤材料は細粒分を多く含んでおり、含水比が高い状態では大きな締固め度が望めないものであるものの、その原因が施工過程にあるとして、法面横断方向および天端で電気比抵抗探査を実施した。ここではより解像度の高い電気比抵抗分布で崩壊原因となる滞水箇所を特定するために、電極配置は2極法のダイポールダイポール配置を採用した。

4. 研究成果

(1) 転圧シミュレーション

図-5 に含水比12%および21%におけるシミュレーションから得られた間隙比分布を示す。含水比21%は最適含水比に近いので、全体的に間隙比が小さく良く締め固められている。往路転圧終了時では転圧末(右)方向に間隙比が小さな領域がある。これは転圧によって転圧面付近ではせん断変形が進行方向に卓越するからである。逆に転圧開始位置で間隙比が大きくなっている。この傾向は、復路転圧でやや薄れるものの、転圧開始方向に依存した間隙比分布になることが分かる。また、最もよく締め固まるのは層の真ん中あたりで、転圧面付近は除荷時に膨潤するためや

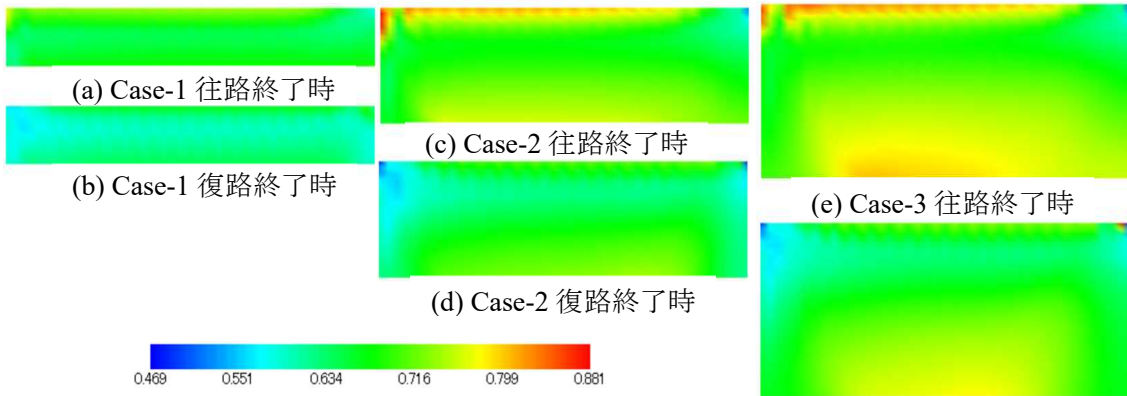
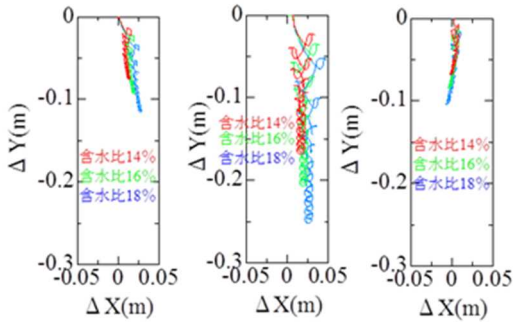


図-8 層厚の異なる 18%試料転圧後の間隙比分布

(f) Case-3 復路終了時



(a) 点 A (b) 点 B (c) 点 C

図-9 節点変位

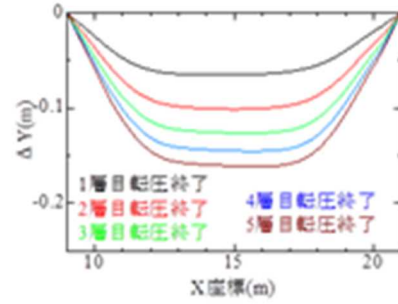


図-10 1層目上端鉛直変位 (含水比 14%, 底面幅 6m, 転圧幅 4m)

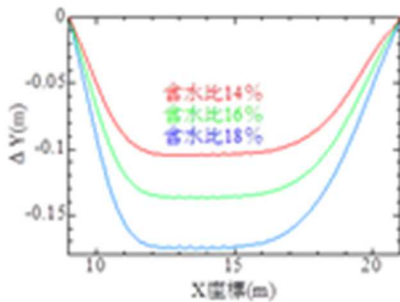


図-11 1層目上端鉛直変位 (底面幅 6m, 転圧幅 4m)

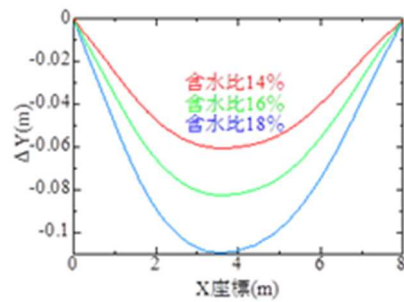


図-12 1層目上端鉛直変位 (底面幅 2m, 転圧幅 4m)

や間隙比は大きくなっている。図-6 に図-1 に示す 3 つの節点の変位を示す。図中には、転圧荷重が直上に来た時と往路終了時を黒丸、白丸で表している。いずれも転圧荷重接近時に大きく転圧進行方向に移動し、直上で最も大きく鉛直方向に圧縮、通過後、膨張している。その結果、往路と復路で塑性変形が生じている。含水比 12%では接近時にも膨張している。また、解析右端境界に近い NOD244 では右方への変形が拘束されていることも分かる。図-7 に転圧面の圧縮量を示す。含水比が最適含水比近付くにつれて圧縮量が大きく、左右での高低差が大きくなっている。その傾向は復路ではやや改善はされているものの、荷重が往復しても左右対称の分布とはならないことが分かる。図-8 に、含水比 18%試料で層厚が異なる場合の転圧による間隙比分布の大きさを比較する。転圧荷重は深くなるほど応力が伝播する範囲が広がるため、深部ほど間隙比の大きい緩い領域が現れている。また、転圧面から同じ深さ(0.02m)までも比較しても、傾向は同じであるものの、層厚が大きい程、平均的な間隙比も大きくなっている。ただし、復路転圧による往路転圧後からの締め固め度の進展は、層厚が大きい程大きくなる。つまり、層厚が大きい場合、繰り返し転圧によって圧縮量の蓄積が大きくなると言える。

図-9 に谷埋め盛土の転圧シミュレーションで得られた図-3 中で示す点 A~C の変位挙動を示す。まず、点 B の挙動に注目すると、転圧荷重接近時、移動方向に沈下し、転圧荷重が直上で最も圧縮し、通過後には膨張しながら転圧荷重進行方向とは逆方向に移動するのが分かる。転圧荷重の往復や複層転圧で非可逆的な変位を呈しながら最終的には鉛直方向への変位方向に収束していく様子がうかがえる。しかしながら、解析領域境界に近い点 A,C では領域の拘束の影響を受けるため、荷重の繰り返し作用で水平方向にも変位が蓄積しており、締め固め度の非対称性につながる。図-10 に含水比 14%の場合の 1 層目の上面の鉛直方向変位を示す。全体的な圧縮量は左方の方が大きいものの圧縮量の最大箇所は中央よりも右方にきている。2 層目、3 層目と上層の転圧を行うことでやや改善されるものの非対称性の圧縮変位は残留するのが分かる。この傾向

は含水比の増加とともに顕著になる。図-11は、同条件で行った転圧幅2mに設定した場合の1層目上端の変位である。転圧幅が短くなることでより圧縮量が大きくなっているだけでなく、圧縮量最大値も左方に移動しているのが分かる。図-12は、谷底の底面幅を2mとして行った時に得られた1層目上端の鉛直変位である。図-6と比較するとより谷地形の境界領域の影響を受け、中央付近の水平に近い領域が狭くなるのが分かる。また初期転圧方向への非可逆的な変位が小さくなることによるのか圧縮量が最大となる点が左方に寄っている。

(2) 造成地盤の電気比抵抗探査

地盤における電気探査から得られる電気比抵抗は表-2に示す様に、材料状態に大きく依存する。しかしながら、造成地の様に人工構造物では地盤材料はある程度一様であるという事を考えると、土壌水分量が最も大きな支配要因となる。図-13に法面の探査から得られた電気比抵抗分布を示す。ピンク色から青色になるに従って電気比抵抗が小さくなること、つまり土壌水分量が高いことを示す。図中最下小段周辺のピンク色部分で小崩壊が生じており、地盤内で崩壊によって連続性が失われたことで電気比抵抗が高くなっていると考えられる。図からは法面上部、小段下に水分量の多い領域が宙水の様に確認できる。図中の白線は補強材、橙色線は排水材を示すが、宙水は補強材の上に生じているのが分かる。この様に建設材料を地盤構造物に設置する場合、その接地面を水平になるように一旦締め固めて平滑に均すが、転圧シミュレーションで示した様に、転圧面が最も締め固め度が高くなる。これは結果的に転圧面の透水係数が低くなることになり、ここで示す宙水が発生しやすい状態を促進することになる。ここでは、転圧面上部に浸透雨水が滞留しやすい構造となっており、排水材が補強材上に設置されている部分ではいくらか排水されるものの、施工プロセスが小崩壊に影響したものと考えられる。図-14は天端で実施した探査から得られた電気比抵抗分布である。図中右側地表面近傍で深度5mぐらまで電気比抵抗の小さい、土壌水分量の高い領域が確認できる。この場所は、最も深い谷を埋め立てた部分で、施工前に赤線で示した位置に工専用道路を設けている。この工専用道路は、そのまま崩すことなく、その後の盛り立てを行っている。つまり、かなり強く転圧した面上での締め固めとなり、より宙水が形成しやすい条件であったと想像できる。この様に、締め固め施工で生じる締め固め度の不均一性が宙水の形成に寄与し、構造物の降雨時不安定性に影響を及ぼすと言える。

表-2 電気比抵抗と物性

低	← 比抵抗 →	高
低	地下水・間隙水の比抵抗	高
多	導電性鉱物含有量	少
高	温度	低
大	水飽和度	小
多	粘土鉱物含有量	少
強	風化	弱

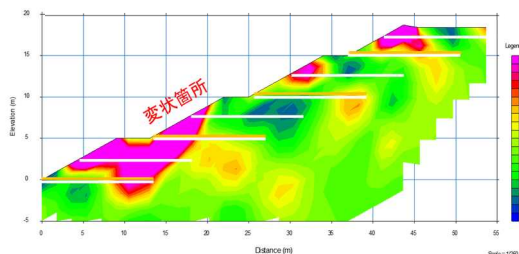


図-13 法面の探査から得られた電気比抵抗分布

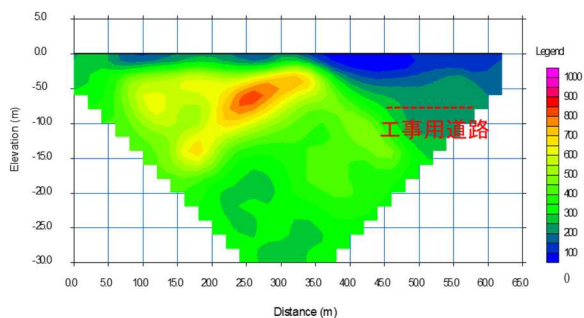


図-14 天端の探査から得られた電気比抵抗分布

<引用文献>

- ① Sugiyama, Y., K. Kawai and A. Iizuka: Effects of stress conditions on B-value measurement, *Soils and Foundations*, Vol.56, No.5, pp.848-860, 2016
- ② 河井克之, 有西海飛, 中島晃司: 土/水/空気連成解析による転圧時の締め固め度分布の検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), 第77巻, 第2号, pp/I_263-I_273, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 K. Kawai, K. Nakashima, K. Yasutomi, and N. Otaka	4. 巻 Vol.53, No.2
2. 論文標題 Estimation of drain pipe effects using electrical prospecting and unsaturated soil/water coupled analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SEAGS-AGSSEA Journal	6. 最初と最後の頁 43-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 河井克之, 片岡沙都紀, 中島晃司	4. 巻 1
2. 論文標題 スラグ混合土模型盛土の雨水浸透挙動及びアルカリ成分漏出について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第15回地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 535-540
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakashima, K., Kawai, K., and Fumoto, T	4. 巻 21
2. 論文標題 Impacts of suffusion factor on heterogenization of soils	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int. J. of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 22-27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 高野保英, 麓隆行, 河井克之	4. 巻 77
2. 論文標題 X線CT画像を利用した凍結および融解に伴う珪砂内部の変形計測の試み	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集(水工学論文集)	6. 最初と最後の頁 I_1357-I_1262
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.77.2_I_1357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 河井克之, 有西海飛, 中島晃司	4. 巻 77
2. 論文標題 土/水/空気連成解析による転圧時の締固め度分布の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_263-I_273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawai K, Nakashima K, Yasutomi K, Otaka N	4. 巻 1289
2. 論文標題 Effects of the cross-sectional shape of drain pipes on seepage of rainwater	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012087 ~ 012087
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/1289/1/012087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Kawai, S. Kataoka, K. Nakashima	4. 巻 1
2. 論文標題 Monitoring seepage behavior of infiltrated rainwater and the transport of alkaline components within an embankment model constructed of steel slag-mixed soil	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of 9th International Congress on Environmental Geotechnics	6. 最初と最後の頁 283-290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 澤野 命, 斐 翔磨, 河井 克之, 中島 晃司
2. 発表標題 電気比抵抗探査による土中水形態の評価
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 晃司, 河井 克之
2. 発表標題 インデックスマッチング法を用いた土の内部侵食の可視化手法
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田英昭, 中島晃司, 河井克之
2. 発表標題 盛土模型を用いた浸潤面挙動把握における電気探査の適応評価
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河井克之・中島晃司・麓隆行
2. 発表標題 模型試験を用いた転圧が締固め品質に及ぼす影響
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 Kawai, K., Arinishi, K., Kataoka, S. and Nakashima, K.
2. 発表標題 Seepage behavior within embankment constructed of mixed soil with slag
3. 学会等名 4th ICTG
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤野命, 中山祐希, 河井克之, 中島晃司
2. 発表標題 反射スペクトル測定による盛土のり面植生評価
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 友近温人, 片岡沙都紀, 河井克之, 齋藤雅彦
2. 発表標題 締固め時の飽和度が土の透水性に与える影響
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 深津翔大, 前田和徳, 河井克之, 中島晃司, 竹内建吾
2. 発表標題 排水機能を有する新しい管継手部材の性能照査 -1
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 竹内建吾, 河井克之, 中島晃司, 前田和徳, 深津翔大
2. 発表標題 排水機能を有する新しい管継手部材の性能照査 -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 吉田英昭, 河井克之, 中島晃司
2. 発表標題 浸透条件に着目した河川堤防の内部変状評価
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 友近温人, 片岡沙都紀, 河井克之, 齋藤雅彦
2. 発表標題 透水係数の異なる層を有した盛土内部の浸透挙動に関する研究
3. 学会等名 建設コンサルタンツ協会近畿支部第56回研究発表会
4. 発表年 2023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	麓 隆行 (Fumoto Takayuki) (30315981)	近畿大学・理工学部・教授 (34419)	

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
---------	---------