

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14821

研究課題名(和文) 繰返し吸排水履歴を受ける不飽和土の変形・破壊メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of deformation and failure mechanism of unsaturated soil subjected to cyclic water absorption and drainage history

研究代表者

吉川 高広 (Yoshikawa, Takahiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：20771075

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)：降雨による自然斜面や盛土の崩壊メカニズム解明を目的に、まずは不飽和土供試体が吸水により変形から破壊に至る三軸圧縮試験とその数値シミュレーションを実施した。その結果、供試体の初期応力比が極端に高くなければ、サクシオンがゼロに低下後、間隙圧上昇による吸水で応力比と飽和度がさらに上昇して、最終的には限界状態線の上側で示す「塑性体積膨張を伴う軟化挙動」を呈することにより破壊に至ることを明らかにした。次に降雨模型実験および熱海盛土崩壊の再現解析を行った結果、降雨浸透や地下水流入により、上述の供試体の場合と同じ変形・破壊メカニズムが生じて、模型斜面および盛土が最終的にはすべり破壊に至ることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで降雨による自然斜面や盛土の崩壊要因として、不飽和土の飽和化や間隙圧上昇による強度低下等が挙げられていたが、申請者らが開発した飽和・不飽和両対応の慣性力考慮の弾塑性有限変形解析コードを用いて、限界状態線 $q=Mp'$ の上側で示す「塑性体積膨張を伴う軟化挙動」を呈して、土供試体、模型斜面および実被災盛土が吸水により変形から破壊に至ると具体的に示すことができた。今後、崩壊メカニズムに基づく対策工の評価・提案を行っていく上でも、意義のある研究成果となった。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the collapse mechanism of natural slopes and embankments due to rainfall, we first conducted triaxial compression tests where unsaturated soil specimens deformed to fail due to water absorption and their numerical simulations. As a result, it was found that if the initial stress ratio of the specimen is not extremely high, after the suction decreases to zero, the stress ratio and saturation degree increase further due to water absorption caused by the increase in pore pressure, eventually leading to failure by the "softening behavior with plastic volume expansion" exhibited above the critical state line $q=Mp'$. Next, reproduction analyses of rainfall model experiments and the Atami embankment collapse showed that rainfall infiltration and groundwater inflow caused the same deformation and failure mechanism as in the case of the specimens described above, leading to eventual slip failure of the model slope and the Atami embankment.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 弾塑性 慣性力 吸水破壊 降雨

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

降雨による自然斜面や盛土の崩壊が多発している。その崩壊要因として、不飽和状態にある土が飽和化する際に強度低下することが挙げられているが、その詳細な崩壊メカニズムまでは明らかになっていない。その理由として、地盤・土構造物の不均一性に起因する現象の複雑さが第一に挙げられるが、不飽和土の力学的研究が発展途上にあることも考えられる。

降雨時の斜面・盛土の崩壊予測には、浸透解析と安定解析を用いた手法が主として用いられる。しかし、地盤・土構造物の詳細な崩壊メカニズムを解明するためには、安全率が1を超えるか否か、つまり破壊するか否かのみを扱うだけでなく、降雨により変形から破壊に至るまでの一連の過程を数値シミュレートする必要がある。また、破壊現象は加速度運動を伴って生じるため、たとえ外力が降雨であっても、慣性力を考慮可能な変形解析が必要となる。さらに、変形から破壊に至るまでの大変形挙動を数値シミュレートするには、土の変形とともに現れる幾何的非線形性を取り入れる有限変形論に基づく解析手法が必要となる。

また、不飽和地盤・土構造物は、日常的に降雨と乾燥(吸水と排水)の繰返し環境に置かれているものの、繰返し吸排水履歴を受ける不飽和土の力学的研究は少ない。不飽和土特有の吸水圧縮(飽和コラプス)挙動が、降雨による斜面や盛土の崩壊メカニズムに関係すると言われているが、日常的に繰返し吸排水履歴を受けている不飽和地盤・土構造物が、飽和コラプスに起因して崩壊するとは考えにくい。また、不飽和土の飽和度変化を扱うために必要な水分特性曲線は、吸排水時のヒステリシス性を持つことが注目されているものの、吸排水を複数回繰返しした際の挙動に関する研究はほとんど無い。

2. 研究の目的

本研究では、飽和・不飽和両対応の慣性力を考慮した有限変形解析コードを用いて、繰返し吸排水履歴を受けた不飽和地盤・土構造物が、降雨により変形から破壊に至るまでの一連過程を数値シミュレートすることで、その崩壊メカニズムを明らかにすることを目的とする。

斜面や盛土等の実地盤・土構造物の変形・破壊メカニズムを解明することを最終的な目標とする一方で、まずは繰返し吸排水履歴を受けた不飽和土供試体が吸水により変形から破壊に至る三軸圧縮試験の数値シミュレーションを行い、供試体レベルでの変形・破壊メカニズムを明らかにする。一般に三軸試験は要素試験と捉えられることが多いが、本研究では三軸試験といえども、初期条件・境界条件が明確に整備された初期値・境界値問題と捉える。供試体レベルで変形から破壊に至る一連の過程を再現できなければ、実地盤・土構造物の崩壊メカニズムを解明できないと考えるからである。

3. 研究の方法

上述の目的を達成するために、次の(1)~(3)の段階を経る。

(1) 不飽和土の三軸試験の実施

研究期間の制限から、非塑性シルトを土材料として、次に示す三軸試験を行う。

- ・ 繰返し吸排水履歴を受けた不飽和土供試体に対する単調三軸圧縮試験
 - ・ 繰返し吸排水履歴を受けた不飽和土供試体が吸水により変形から破壊に至る三軸圧縮試験
- このとき、試験時間の短縮を図るために、セラミックディスクに比べて非常に薄い微細多孔質膜(Nishimura et al., 2012)を用いる。

(2) 不飽和土の三軸試験の数値シミュレーション

申請者らが開発した飽和・不飽和両対応の慣性力を考慮した有限変形解析コード(Noda & Yoshikawa, 2015; Yoshikawa & Noda, 2022)を用いて、(1)の実験の数値シミュレーションを行い、不飽和シルト三軸供試体が吸水により変形から破壊に至るメカニズムを明らかにする。

(3) 降雨模型実験における模型斜面および実被災地盤・土構造物の変形・破壊シミュレーション

降雨模型実験における不飽和模型斜面および実被災地盤・土構造物の変形・破壊シミュレーションを実施して、(2)を通じて明らかになった土供試体の吸水破壊メカニズムに基づいて、降雨時の斜面・盛土の変形・破壊メカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 密な不飽和非塑性シルト三軸供試体の吸水破壊試験とその数値シミュレーション

実験条件と解析条件

実験に用いた土試料は非塑性シルト(DLクレイ、土粒子密度2.70)である。次の()~()の手順で実験を行った。()含水比25%になるように調整した土試料をモールド内で静的に締固めて、間隙比1.04、飽和度65%の円筒供試体(直径50mm、高さ100mm)を作製する。()排気非排水条件下で供試体を三軸試験機に設置し、セル圧を800kPaまで上昇させて、基底応力を800kPaにする。()空気圧を600kPaまで上昇させて、基底応力を200kPaにする。このとき供試体下

端での計測水圧は 580kPa (サクシオン 20kPa) で、間隙比は 0.85 であった。その後、供試体のサクシオンを変えないように水圧を調節し排水条件に変えた。() 側圧一定の排気排水条件下で応力比が 1.17 となるまで軸荷重速度 0.8N/min で三軸圧縮して、初期せん断を行う。() 軸荷重を一定に保ったまま、水圧を 600kPa まで上昇させて、サクシオンを 0kPa にする。この段階では破壊に至らなかった。() サクシオンは 0kPa のまま、間隙圧 (空気圧と水圧) を上昇させて、更なる吸水により供試体を破壊に至らしめる。なお、手順 () の前に、サクシオンを 20 0 20kPa と変化させて繰返し吸排水履歴を与えた場合と与えない場合の側圧一定・排気排水単調三軸圧縮試験も実施したが、両条件でほぼ同じ単調せん断挙動が得られたため、本吸水破壊試験ではこのような繰返し吸排水履歴を与えなかった。

数値シミュレーションには、不飽和の効果を検討した弾塑性構成式 SYS Cam-clay model (Yoshikawa & Noda, 2020) を搭載した慣性力対応の空気～水～土連成有限変形解析コード (Noda & Yoshikawa, 2015) を用いた。図 1 は解析に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。簡単のため、円筒供試体の軸対称性を仮定し、重力の影響は無視した。実験手順 () の終了時を初期状態として、手順 () の過程から数値シミュレートを実施した。

実験結果と解析結果

図 2 と図 3 はそれぞれ実験結果と解析結果を示す。解析結果は、供試体を 1 要素として見た場合の見かけの挙動を示した。図 4 は応力比 1.17 でサクシオンを 20kPa から 0kPa に低下した後の軸ひずみの経時変化について、実験と解析の比較を示す。各図中に示す は、各段階の開始点 (前段階の終了時点) を示す。図 2 の実験結果と図 3 の解析結果の比較より、解析結果は実験結果の特徴をよく捉えることができている。特に図中に青色で示したサクシオンを 20kPa から 0kPa に低下させる段階と、赤色で示した間隙圧を 650kPa から 660kPa に上昇させる段階において、実験と解析の両方で軸変位の進展が大きく、著しい軟化挙動を呈している。また、サクシオン低下段階では飽和度上昇に伴い体積圧縮している一方で、間隙圧上昇段階では飽和度変化はほぼ無く、体積膨張している。これは、サクシオン低下段階は飽和度上昇により塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す一方で、間隙圧を 650kPa から 660kPa に上昇させる段階では、Cam-clay モデルの特徴である限界状態線 $q = Mp'$ 上側の有効応力 (骨格応力) 状態で塑性膨張を伴う軟化挙動を示したからである。また、図 4 から、特にサクシオン低下段階と間隙圧を 650kPa から 660kPa に上昇させる段階で軸変位が急激に生じる様子が見られ、加速度を伴いながら運動していることがわかる。

このように、サクシオン低下過程では塑性体積圧縮を伴う軟化挙動を呈し、その後の間隙圧上昇過程では限界状態線上側に応力状態をとると塑性体積膨張を伴う軟化挙動を呈して、最終的には軸変位が収束することなく破壊に至ることを示した。また、吸水による変形・破壊といえども加速度運動を伴い、慣性力を考慮できる変形解析コードの必要性を示した。

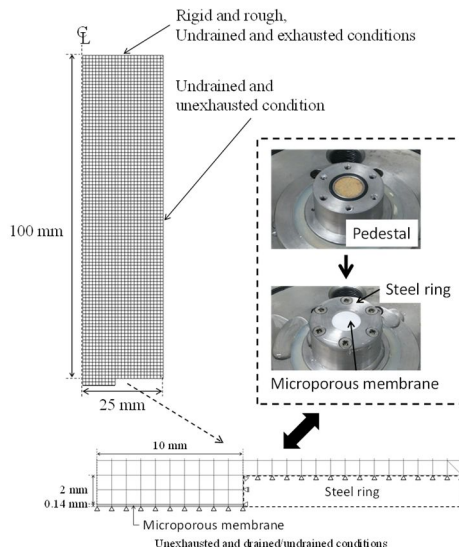


図 1 吸水破壊試験の解析断面 (密な供試体の場合)

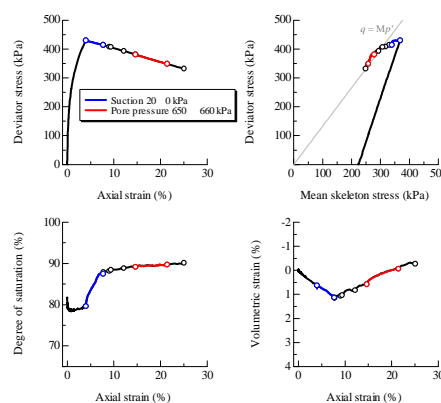


図 2 吸水破壊の実験結果 (密な供試体の場合)

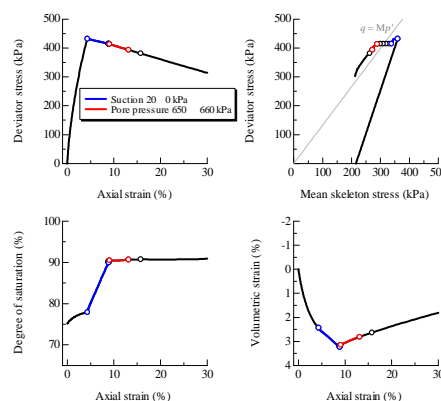


図 3 吸水破壊の解析結果 (密な供試体の場合)

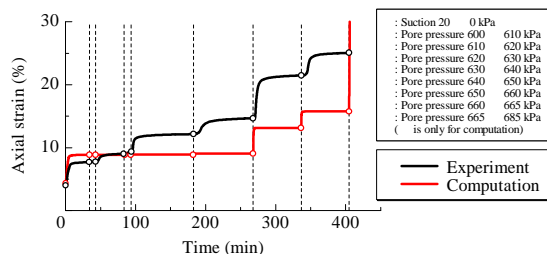


図 4 吸水破壊試験時の軸変位進展の様子 (密な供試体の場合)

(2) 緩い不飽和非塑性シルト三軸供試体の吸水破壊試験とその数値シミュレーション

実験条件と解析条件

(1) の場合と同じ非塑性シルト (DL クレー、土粒子密度 2.70) を実験に用いた。次の () ~ () の手順で実験を行った。() 含水比 20% になるように調整した土試料をモールド内で静的に締固めて、間隙比 1.18、飽和度 46% の円筒供試体 (直径 50mm、高さ 100mm) を作製する。() 排気非排水条件下で供試体を三軸試験機に設置し、セル圧を 20kPa まで上昇させる。() セル圧と

空気圧を同時に上昇させて、セル圧 60kPa、空気圧 40kPa にする。このとき供試体下端での計測水圧は 20kPa (サクシオン 20kPa) であった。その後、供試体のサクシオンを変えないように水圧を調節して排水条件に変えた。()セル圧を 540kPa まで上昇させて、基底応力を 500kPa にする。()水圧を 40kPa まで上昇させて、サクシオンを 0kPa にする。()セル圧を 560kPa、空気圧を 60kPa まで上昇させて、サクシオンを 20kPa にする。このとき、間隙比は 0.965、飽和度は 61%であった。()側圧一定の排気排水条件下で応力比が 0.7 となるまで軸荷重速度 0.8N/min で三軸圧縮して、初期せん断を行う。()軸荷重を一定に保ったまま、水圧を 60kPa まで上昇させて、サクシオンを 0kPa にする。この段階では破壊に至らなかった。()サクシオンは 0kPa のまま、間隙圧(空気圧と水圧)を上昇させて、更なる吸水により供試体を破壊に至らしめる。なお、手順()の後に、さらにサクシオンを 20 0 20kPa と変化させて繰返し吸排水履歴を与えた場合と与えない場合は、ほぼ同じ飽和度と間隙比の結果が得られたため、本吸水破壊試験ではこのような 2 回の繰返し吸排水履歴までは与えなかった。

数値シミュレーションには、慣性力対応の空気～水～土連成有限変形解析コード (Noda & Yoshikawa, 2015; Yoshikawa & Noda, 2022) を用いて、土骨格の構成モデルとして不飽和の効果を検討した弾塑性構成式 SYS Cam-clay model (Yoshikawa & Noda, 2020) または複合負荷弾塑性構成モデル (Yamada et al., 2022) を搭載する場合の 2 ケースを実施した。ここでは土骨格の構成モデルの違いが解析結果に与える影響に注目するために、1 要素の有限要素メッシュを用いて、円筒供試体の軸対称性を仮定し、重力の影響は無視した。実験手順()の終了時を初期状態として、手順()の過程から数値シミュレートを実施した。

実験結果と解析結果

図 5 は実験結果を示す。図 6 と図 7 はそれぞれ、不飽和の効果を検討した SYS Cam-clay model と複合負荷弾塑性構成モデルを用いた場合の解析結果を示す。

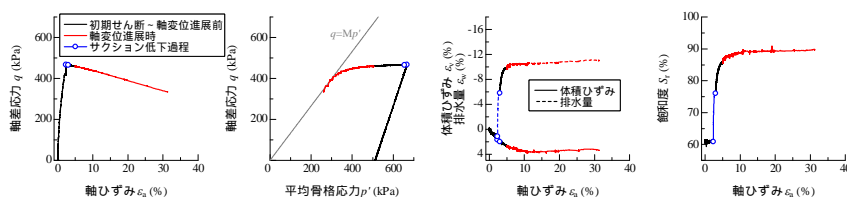


図 5 吸水破壊の実験結果 (緩い供試体の場合)

まず図 5 の実験結果

について、初期せん断後のサクシオン低下過程においては、吸水して飽和度が上昇し、若干の軸変位と体積圧縮が生じている。その後の間隙圧上昇過程においては、サクシオンはゼロのまま吸水して飽和度が上昇し、骨格応力経路が $q = Mp'$ に近づくにつれて軸変位の進展が

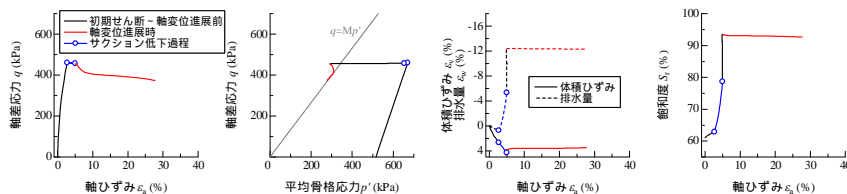


図 6 不飽和の効果を検討した SYS Cam-clay model による吸水破壊の解析結果 (緩い供試体の場合)

大きくなり、また軸ひずみ 10%程度までは体積圧縮、その後は若干体積膨張している。

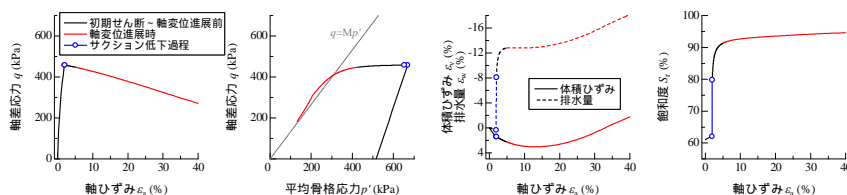


図 7 複合負荷弾塑性構成モデルによる吸水破壊の解析結果 (緩い供試体の場合)

次に図 6 の不飽和の効果を検討した SYS Cam-clay model を用いた場合の解析結果について、サクシオン低下過程においては、有効飽和度が上昇して吸水圧縮する挙動が表現されている。一方で間隙圧上昇過程では、封入空気圧の圧縮により吸水して飽和度が上昇する挙動は表現されているが、骨格応力が $q = Mp'$ の上側に状態をとるまでは軸変位が進展していない。この理由は、 $p' \sim q$ 関係図上で楕円型の降伏曲面を有する (修正) Cam-clay model では、応力経路が降伏曲面の内側に向けて除荷するためである。 $q = Mp'$ の上側に状態を移すと、塑性体積膨張を伴う軟化により、急激に軸差応力が低下して軸変位が進展し、体積膨張が生じている。

最後に図 7 の複合負荷弾塑性構成モデルを用いた場合の解析結果について、構成モデルに不飽和の効果を検討していないため、サクシオン低下過程では軸変位と体積変化がほぼ生じていない。一方で間隙圧上昇過程においては、 $q = Mp'$ 下側での軸差応力の低下、軸変位の進展および体積圧縮挙動を表現できている。この理由は、Drucker-Prager model が有する特徴により、応力比の増大が降伏曲面を拡大させて、間隙圧上昇過程でも負荷挙動を呈するためである。その結果、軸ひずみに対する飽和度変化の挙動もよく再現できている。

(3) 降雨模型実験における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーション

Chueasamat et al. (2018) の降雨模型実験を参照した。本実験は、1G 重力場において、DL clay から成る基盤の上に、霞ヶ浦砂から成る不飽和斜面を構築し、上方から散水する実験である。不飽和の効果を検討した弾塑性構成式 SYS Cam-clay model (Yoshikawa & Noda, 2020) を搭載した慣性力対応の空気～水～土連成有限変形解析コード (Noda & Yoshikawa, 2015; Yoshikawa &

Noda, 2022) を用いて、その数値シミュレーションを実施した。

その結果、不飽和模型斜面が変形から破壊に至る挙動の再現に成功した。このとき、(1)の場合における土供試体の吸水破壊シミュレーションと同じく、すべり面上の土要素が限界状態線 $q=Mp'$ の上側で示す「塑性体積膨張を伴う軟化挙動」を呈することにより、斜面はすべり破壊に至ることを明らかにした。さらに、25, 50, 100mm/h の3種類の降雨強度の違いに応じた変形・破壊挙動の違いも再現した。

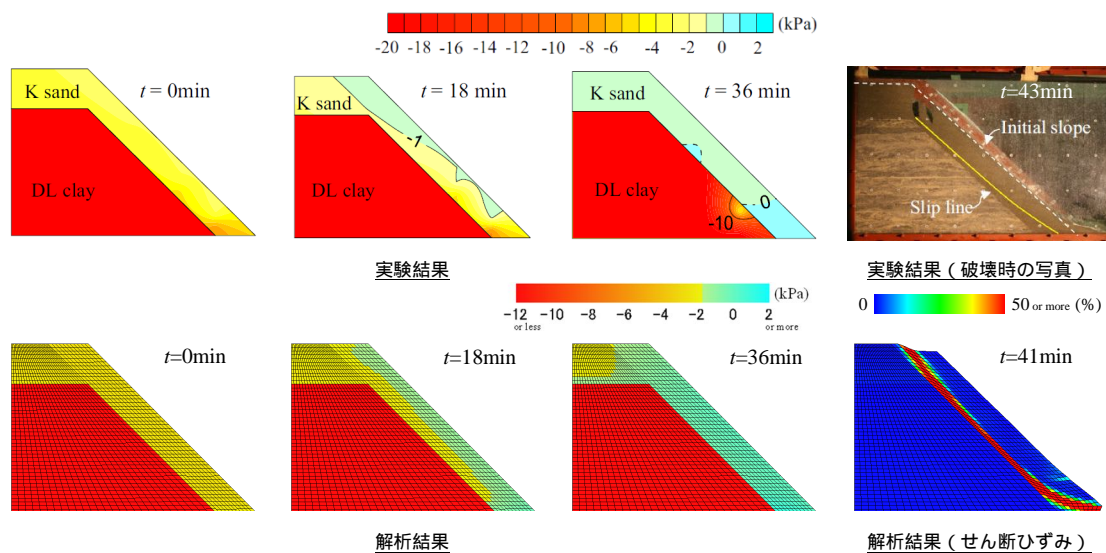


図8 降雨強度 100mm/h の場合の間隙水圧分布

図9 降雨強度 100mm/h の場合のすべり破壊の様子

(4) 熱海盛土崩壊メカニズムに関する数値解析

令和3年7月3日に熱海市の逢初川源頭部で盛土が崩壊し、土石流災害が発生した。この盛土崩壊のメカニズムを明らかにするために、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model を搭載した慣性力対応の空気～水～土連成有限変形解析コード (Noda & Yoshikawa, 2015) により、盛土構築から崩壊までの一連過程の数値解析を行った。

その結果、高盛土構築により高応力比状態にあった盛土底部において、地下水流入に伴って間隙水圧と飽和度が上昇して、まずは飽和化した後で、さらなる地下水流入に伴い、(1)の場合における土供試体の吸水破壊シミュレーションと同じく、塑性体積膨張を伴う軟化現象が生じて、集水しやすい盛土法尻付近から上方へとすべり面が順次形成され、最終的に盛土全体が崩壊に至ることを示した。このように、社会的に大きな問題となっていた熱海盛土崩壊のメカニズム解明を果たしたことは、社会的に大きな意義を持つ。

< 引用文献 >

- Chueasamat, A., Hori, T., Saito, H., Sato, T. & Kohgo, Y.: Experimental tests of slope failure due to rainfalls using 1g physical slope models, *Soils and Foundations*, 58(2), 290-305, 2018.
- Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Microporous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, *Geotechnical Testing Journal*, the American Society for Testing and Materials, 35(1), 201-208, 2012.
- Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 55(1), 45-62, 2015.
- Yamada, S., Noda, T., Nakano, M. and Asaoka, A.: Combined-loading elastoplastic constitutive model for a unified description of the mechanical behavior of the soil skeleton, *Computers and Geotechnics*, 141, 104521, 2022.
- Yoshikawa, T. and Noda, T.: Triaxial test on water absorption compression of unsaturated soil and its soil-water-air-coupled elastoplastic finite deformation analysis, *Soils and Foundations*, 60(5), 1151-1170, 2020.
- Yoshikawa, T. and Noda, T.: Development and validation of deformation analysis method for unsaturated soil based on new effective saturation degree considering trapped air, 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 吉川高広
2. 発表標題 盛土崩落原因の検討（数値解析）
3. 学会等名 2021年7月熱海土石流災害における関連学会の技術支援活動の報告会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉川高広, 野田利弘, 中野正樹
2. 発表標題 三相系弾塑性有限変形解析コードによる熱海市逢初川盛土崩壊の数値シミュレーション
3. 学会等名 第28回計算工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉川高広, 野田利弘, 中野正樹
2. 発表標題 熱海盛土崩壊メカニズムに関する空気～水～土連成弾塑性有限変形解析
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 吉川高広, 野田利弘
2. 発表標題 緩い不飽和非塑性シルト三軸供試体の吸水破壊シミュレーション
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Noda, T. and Yoshikawa, T.
2. 発表標題 Two types of water absorption failure mechanism of unsaturated silt triaxial specimen
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 吉川高広, 野田利弘, 西沢建吾
2. 発表標題 降雨模型実験における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーション
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川高広, 野田利弘, 西沢建吾
2. 発表標題 空気～水～土連成有限変形解析コードによる降雨模型実験における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーション
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川高広, 野田利弘, 西沢建吾
2. 発表標題 空気～水～土連成有限変形解析コードによる降雨模型実験における不飽和斜面の変形・破壊メカニズムの解明
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 Yoshikawa, T., Noda, T. and Nishizawa, K.
2. 発表標題 Simulation of deformation followed by failure of unsaturated slope in a rainfall model test
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川高広, 野田利弘
2. 発表標題 慣性力考慮の弾塑性有限変形解析による不飽和シルト三軸供試体の吸水破壊メカニズムの解明
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshikawa, T. and Noda, T.
2. 発表標題 Clarification of water absorption failure mechanisms of unsaturated silt triaxial specimen through three-phase elastoplastic finite deformation analysis considering inertia force
3. 学会等名 COUPLED PROBLEMS 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川高広, 野田利弘, 広瀬祥
2. 発表標題 サクシヨン低下と間隙圧上昇による緩い不飽和シルト三軸供試体の吸水破壊実験
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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