

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06099

研究課題名(和文) 築造過程から降雨/地震による変形・破壊まで、盛土の一生を解く

研究課題名(英文) Simulating lifetime of embankments : from construction process to deformation and failure due to heavy rain / earthquake

研究代表者

菊本 統 (KIKUMOTO, MAMORU)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：90508342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：盛土の力学的安定性を本質的に議論するには、築造後の盛土に恣意的に物性値を与えて解く従来の解析では不十分で、築造過程から降雨による含水状態の変化、地震による変形・破壊まで、土構造物の一生を追従できる解析技術が不可欠である。そこで本研究では、締固めとその後の変形を精緻に記述できる解析技術を開発し、締固め過程から、締固め後の降雨や地震による変形・破壊挙動を検討した。その結果、代表者らのモデルが最大乾燥密度と最適含水比をもつ締固め曲線や、その締固めエネルギーによる変遷を精緻に再現することが示されるとともに、締固め土の浸水コラプス現象や浸水前後でのせん断強度特性をよく予測できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土構造物の力学的安定性は、含水比や締固めエネルギーといった締固め品質に大きく影響を受ける。しかし、従来は築造後の土構造物に対して恣意的にパラメータを設定して安定性評価が行われてきた。本研究では、土構造物の締固め築造過程から、降雨による浸水崩壊や地震時の液状化まで一貫してシミュレートできる手法が実現された。この手法を用いれば、築造過程から変形・破壊まで土構造物の一生をシミュレートする地盤解析技術が確立された。ここで開発された解析技術をさらに地盤材料の風化・侵食現象に拡張することで、長期供用期間を経た土構造物の安定性をより精緻に予測できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The conventional deformation and failure analysis of the embankment require the compacted soil's physical properties after the construction. However, the embankment parameters are set arbitrary, and the mechanical stability of the embankment could not be adequately evaluated. Thus, this research project aimed to develop a rational simulation method which incorporates the embankment's whole life from the construction (compaction) process to the deformation and failure due to rainfall or earthquake. The model is based on a critical state model and extended for unsaturated soils using Bishop's effective stress, rational soil-water characteristic curve, and extended state boundary surface. It is shown that the proposed model could reproduce the mechanism of the compaction, including upper-convex compaction curve and its transition due to the increase in the compaction energy. The model could also predict the behavior of compacted soils such as wetting-induced deformation.

研究分野：地盤工学

キーワード：土構造物 締固め 浸水崩壊 液状化 構成則 限界状態 状態境界面 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

降雨に伴う飽和度・間隙水圧の変化や地震時の繰返しせん断に起因した土構造物の変形・破壊が多数、報告されている。このような降雨や地震による土構造物の変形・破壊機構は、降雨強度や地震外力だけでなく、築造時の締固め品質にも大きく依存するので、締固め築造過程から浸水および繰返しせん断による変形・破壊まで一貫して解く技術が必要になる。

これまで、締固め現象は実験的事実に基づいて経験的に管理されてきたのが現状であり、そのメカニズムは理論的には解釈されていなかった。例えば、締固め曲線や最適含水比・最大乾燥密度の力学的な意味合いは必ずしも明らかでなかった。このため最新の数値解析でも、盛土の安定性は締固め築造後を初期状態として恣意的に条件設定して評価しているのが現状であった。

2. 研究の目的

土構造物の降雨・地震時の変形破壊メカニズムを解明し、力学的な観点から構造物の設計・施工・管理を合理化するには、締固め現象や不飽和土の浸水・繰返しせん断・変形・破壊メカニズムを考慮した理論に基づく検討が不可欠である。本研究では、室内要素試験で締固め現象の観察を試みるとともに、不飽和土のモデルで試験結果を再現するとともに、締固め現象や浸水時の変形・破壊現象、非排気・非排水条件下での繰返しせん断現象の精緻な記述を試みた。

3. 研究の方法

不飽和土の体積変化は、主に間隙空気の排気か、間隙水の排水によって生じる。飽和土のモデルは圧密やせん断による間隙水の移動を説明するが、これまで締固めのメカニズムはほとんど理論的に説明されてこなかった。締固めて密度を向上させ、地盤材料の工学的性質を改善する方法は古くから経験的に行われており、Proctor は締固めの原理や試験方法を体系化し、最適含水比をもつ締固め曲線を示した。それから現在に至るまで締固めの解釈は Proctor が提案した締固め試験に基づいており、締固めの管理は最適含水比と最大乾燥密度をもとに行っている。しかし、現場と室内試験では締固め条件が異なるため現場における適切な含水比の決定は必ずしも合理的でない。そのため、締固め不足による浸水時の構造物の崩壊の防止ならびに合理的な設計を行う上で、締固め現象のメカニズムのさらなる検討が必要となる。

従来の突固めによる締固め試験は境界条件が明確ではないが、締固めは短時間に応力を載荷して間隙空気を排出させることで起こることから、不飽和土の排気・非排水条件、すなわち含水比一定の圧縮と考えることができる。ここでは、排気・非排水条件の圧密試験として締固め挙動の再現を試み、提案する不飽和土のモデルを用いたシミュレーションを行う。それらの結果から、土の締固め挙動のメカニズムを実験的及び解析的に検討する。

土構造物の力学的安定性を本質的に議論するために、飽和土の限界状態モデルをベースとして、発展型水分特性曲線モデルと Bishop の有効応力、間隙比 平均有効応力関係における状態境界面の移動を考慮した不飽和土のモデルを定式化した。実験との比較により提案モデルの検証を行った後、地震時応答を想定した非排気・非排水条件の繰返しせん断の解析を実施し、飽和度と間隙比（密度）が液状化抵抗に及ぼす影響を解析的に検討した。

4. 研究成果

4.1 室内試験による締固めメカニズムの観察

締固めて密度を向上させ、地盤材料の工学的性質を改善する方法は古くから経験的に行われており、Proctor は締固めの原理や試験方法を体系化し、最適含水比をもつ締固め曲線を示した。しかし、現場と室内試験では締固め条件が異なるため現場における適切な含水比の決定は必ずしも合理的でない。そのため、締固め不足による浸水時の構造物の崩壊の防止ならびに合理的な締固め設計を行う上で、締固めメカニズムの検討が必要となる。

従来の突固めによる締固め試験は境界条件が明確ではないが、締固めは短時間に応力を載荷して間隙空気を排出させることで起こることから、不飽和土の排気・非排水条件、すなわち含水比一定の圧縮と考えると、排気・非排水条件(含水比一定条件)の圧密試験を実施した。図-1 に静的な排気非排水一次元圧縮試験により得た締固め曲線を示す。図のように、最適含水比よりも乾燥側で見られるような締固め含水比による乾燥密度の増加を確認できた。

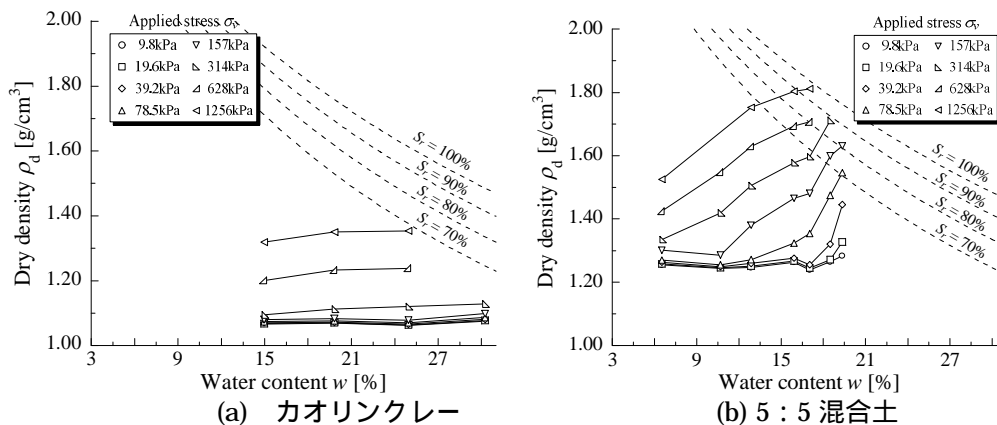


図-1 各試料の締固め曲線

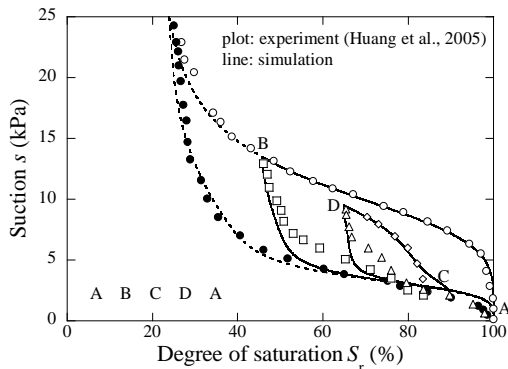


図-2 乾湿繰返し時の White silica sand の水分特性曲線と提案モデルによる解析値

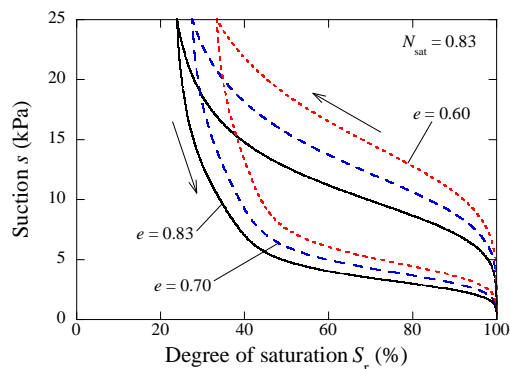


図-3 間隙比が異なる土の排水・吸水過程における水分特性曲線のシミュレーション

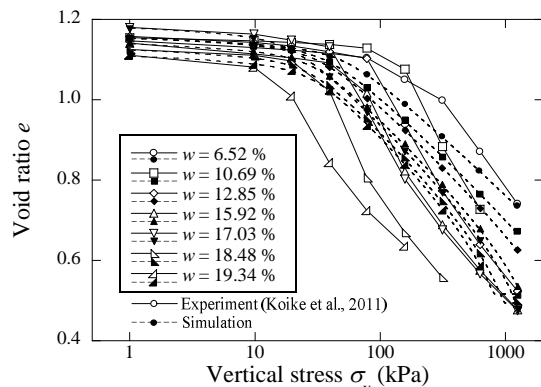


図-4 含水比一定一次元圧縮試験結果と解析値の比較

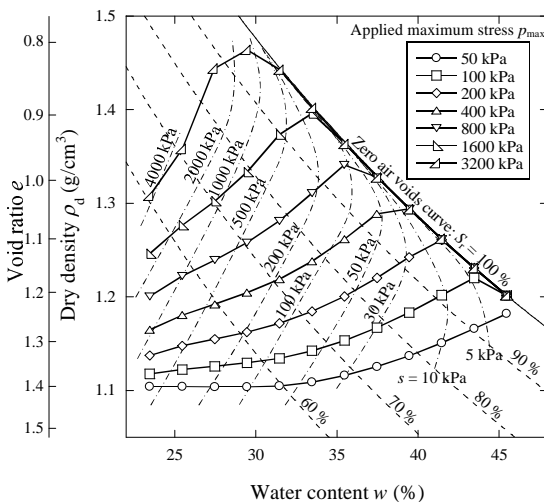
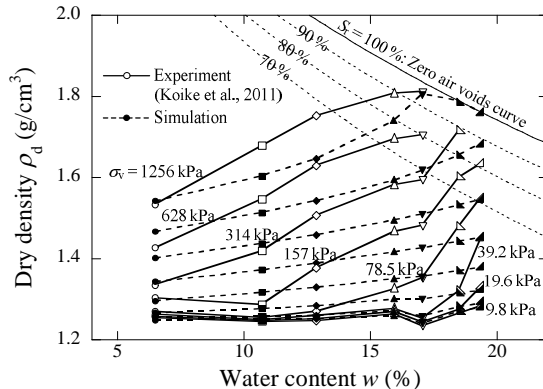


図-5 Pearl clay の締固め試験の解析

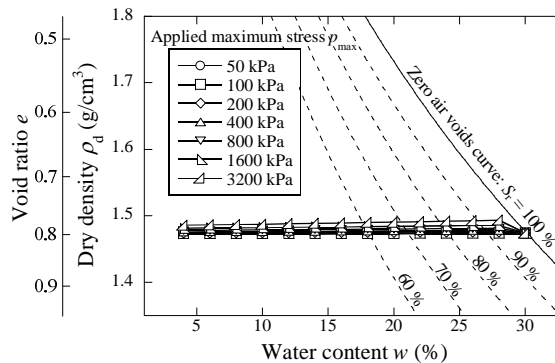


図-6 豊浦砂の締固め試験の解析

#### 4.2 締固め現象と締固め土の力学特性の数値シミュレーション

不飽和土のモデルでは、飽和土の限界状態モデルを Bishop の有効応力と発展型水分特性曲線、飽和度  $S_r$  について拡張した状態境界面により不飽和土の応答を記述した。発展型水分特性曲線モデルでは、図-2 に示すような吸排水を繰返す乾湿履歴下のヒステリシスを再現した。また、図-3 に示すように間隙比による水分保持特性の違いを考慮した。

混合土の静的締固め（排気非排水条件の一次元圧縮）について、実験値との比較を図-4 に示す。図のように、シミュレーションは定性的に実験結果を再現しており、載荷圧の増加に伴い間隙空気が排出され体積圧縮する様子や、含水比が低いほど同じ拘束圧下に対して緩い間隙を保持する様子を再現した。図-5, 6 は、Pearl clay と豊浦砂について、含水比と載荷圧を変化させて実施した静的締固めのシミュレーション結果で、締固め含水比と最終状態（除荷後）の乾燥密度の関係である。図-5 に示す Pearl clay では、最適含水比と最大乾燥密度をもつ上に凸な締固め曲線を算出し、実際の土にみられる締固めエネルギーの増加に伴う最適含水比の減少と最大乾燥密度の増加を適切に再現した。一方、図-6 に示す豊浦砂の解析では、含水比によらず締固めによる密度変化が小さく、締固め曲線は平坦である。経験的に分級された砂は明確な最大乾燥密度があらわれないが、提案モデルはこのような土の種類（力学的・水理学的特性）による締固め挙動の違いも適切に表現した。

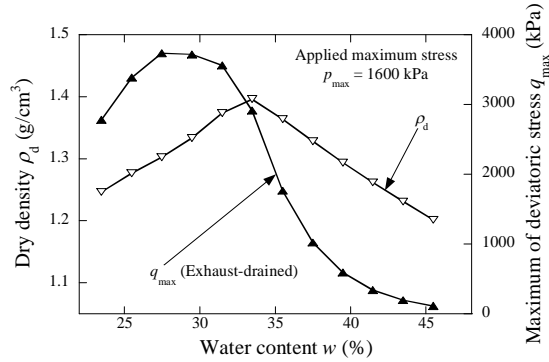


図-7 締固め曲線とせん断強度の関係

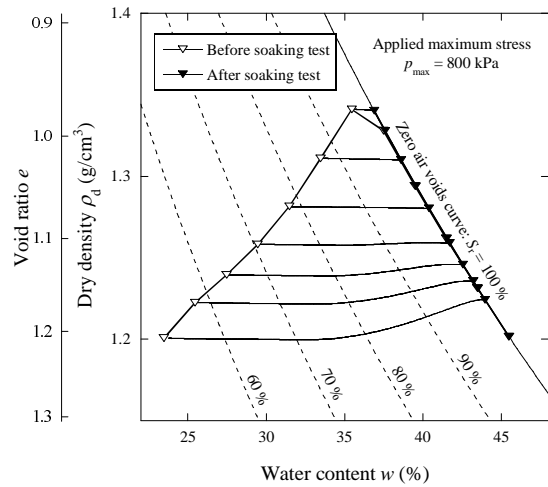


図-8 締固め土の浸水のシミュレーション

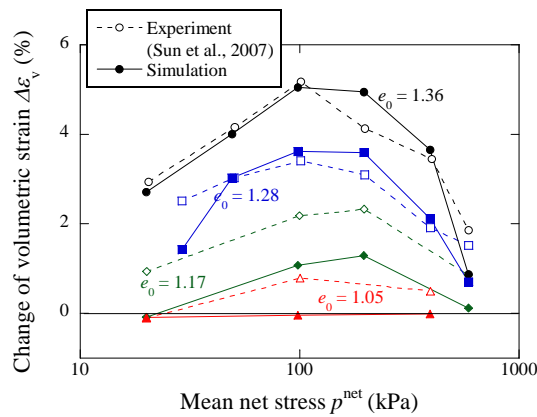


図-9 等方応力下での浸水コラプス挙動の試験結果と解析値の比較

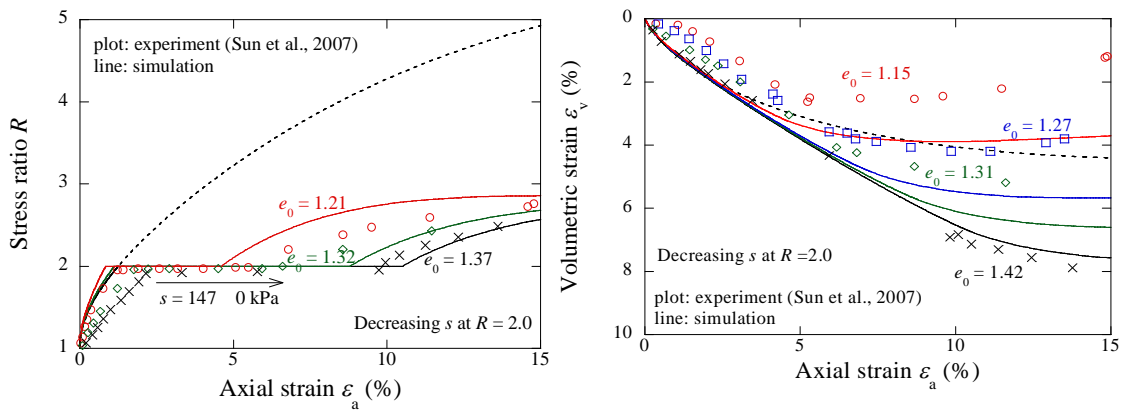


図-10 異方応力下での基底応力一定浸水試験の結果と解析値の比較

次に、締固め後のせん断や浸水による変形や破壊をシミュレートした。図-7 には、含水比一定条件下での圧縮により締固めを行って得た締固め曲線と、締固め後にサクシオン一定条件下で三軸せん断した際のピーク強度を示す。図のように、ピーク強度が最大になる締固め含水比は乾燥密度が最大となる含水比よりやや低く、一般に言われる締固め土の特徴を適切に表現した。一方、図-8 は締固め後に各締固め含水比で得た土に対して浸水シミュレーションの結果を示す。図は締固め後の浸水過程での含水比と乾燥密度の変化を示している。図より、最適含水比より湿潤側では浸水による変化はほとんど見られないが、乾燥側では浸水に伴ってゼロ空気間隙曲線上に移動しながら、締固め度の低い土は圧縮傾向を呈している。浸水後の密度を比較すると、最適含水比で締固めた試料の乾燥密度が最も大きいことから、最適含水比で締固めることが浸水後の圧縮剛性やせん断剛性を確保する点で重要であることが示された。

つづいて、Sun らの不飽和 Pearl clay を用いた浸水コラプス試験と不飽和のモデルによる計算を比較する。所定のサクシオン ( $s=147$  kPa) を受けて等方および異方応力下にある不飽和土が基底応力一定条件下で浸水を受ける際の応答をシミュレートした。異方応力下での浸水試験は、サクシオン一定条件下で排気排水せん断した後、所定の応力比で基底応力一定の浸水試験を行い、その後、再せん断した。図-9 に等方応力下での基底応力一定条件の浸水試験とシミュレーションの比較を示す。図は浸水時の拘束応力と体積圧縮量の関係を、供試体の密度ごとに示しており、

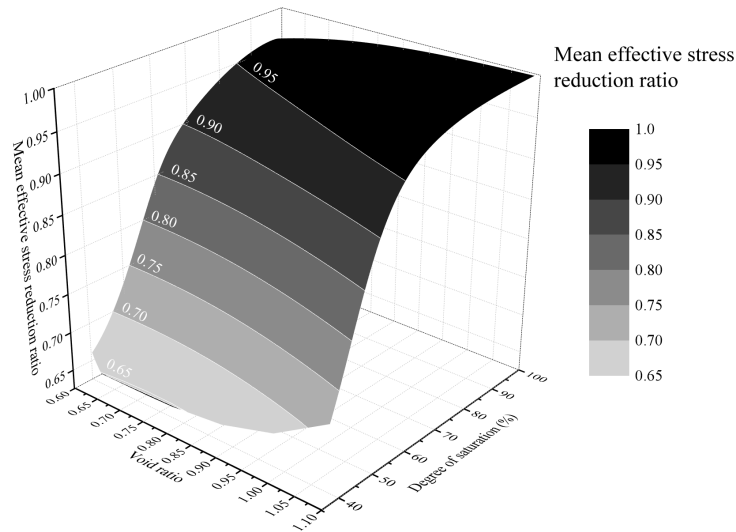


図-11 不飽和土の液状化抵抗に及ぼす間隙比と飽和度の影響 ( $\sigma_{c0} = 20 \text{ kPa}$ )

浸水コラプスによる体積圧縮量は緩い試料ほど相対的に小さくなる傾向が確認された。また、拘束圧に対してはコラプス挙動が凸型になり、ピークの左側では過圧密の影響で剛性が高く、ピークの右側では拘束応力の増加による間隙比の減少で飽和度が増加し、浸水時の飽和度変化が小さくなるという 2 つの効果のトレードオフ関係が認められた。異方応力下での浸水試験と解析の比較は図-10 に示した。異方応力下では浸水によって体積圧縮とともに、顕著なせん断変形を生じること、せん断変形の量は密度や偏差応力比に大きく依存することが既往実験で指摘されていたが、解析は密度や応力比による違いを定量的なレベルまでよく表現した。

最後に、締固め土の地震時応答に関連して、飽和度と間隙比が不飽和土の繰返しせん断挙動に及ぼす影響を数値パラメトリックスタディにより検討した。この検討では、事前に築館火山灰質砂質土の非排気非排水繰返し三軸せん断試験 (Unno et al., 2013) の解析を行い、解析が実験値を概ね再現することを確認している。試験は拘束応力一定、非排気・非排水条件で、所定の繰返し回数ごとに軸ひずみの振幅を増やして実施されており、解析も同一条件で行った。解析では、せん断初期の間隙比  $e$  を 0.60~1.09 の範囲、飽和度  $S_r$  を 40~100% の範囲で変化させて、非排気・非排水繰返しせん断を行い、液状化の発生有無の判断指標として有効応力減少率を観察したものである。図-11 より、緩く飽和度が高い土ほど、液状化抵抗が低いことがわかる。特に、飽和度による液状化抵抗の違いは顕著であった。例えば、有効応力減少比 0.9 を基準として液状化抵抗を論ずるなら、飽和度 70% 程度以上の土は液状化の発生可能性があり、それ以下では液状化に対する懸念は少ないと言える。

#### 4.3 結論

含水比一定条件で静的締固めの要素試験を実施し、締固め曲線を得た。ただし、飽和近くで供試体の非排水条件を保持するのは難しく、最適含水比より湿潤側の応答の観察には課題を残した。試験のシミュレーションでは、飽和度による剛性の違いと排気できる間隙空気量の違いという 2 つのメカニズムにより、最適含水比と最大乾燥密度をもつ締固め曲線をよく再現した。

解析では、飽和土の限界状態モデルをベースとして、不飽和土特性を発展型水分特性曲線モデルと Bishop の有効応力、間隙比 拘束圧平面における状態境界面の移動で考慮した不飽和土のモデルを提案し、それにより締固めからその後の浸水、せん断下の応答まで解析的に再現できることを示した。特に、提案モデルは、不飽和土と飽和土の変形・強度特性の違いや不飽和土の浸水時のコラプス現象を適切に記述できることが示された。また、このモデルを用いれば、締固め含水比と乾燥密度の関係における上に凸な締固め曲線とその締固めエネルギーによる変遷、あるいは粘土や砂などの地盤材料の種類による締固め特性の違いがよく再現できることがわかった。さらに、地震時応答を想定した非排気・非排水条件の繰返しせん断のシミュレーションを実施し、既往実験との比較によりモデルの検証を行うとともに、飽和度と間隙比 (密度) が液状化抵抗に及ぼす影響を解析的に考察した。

一連の検討の結果、降雨や地震に対する土構造物の力学的安定性は外力特性だけに依存するのではなく、土構造物の締固め品質にも依存することを解析的に明示するとともに、土構造物の力学的安定性を本質的に議論するには、締固め築造過程から降雨や地震による変形・破壊まで一貫してシミュレートする新しい地盤解析技術が不可欠であることを実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Komolvilas, V. and Kikumoto, M.	4. 巻 41(10)
2. 論文標題 Simulation of liquefaction of unsaturated soil using critical state soil model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 1217-1246
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nag.2669	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 該当する

1. 著者名 Komolvilas, V. and Kikumoto, M.	4. 巻 9
2. 論文標題 Fully undrained cyclic loading simulation on unsaturated soils using an elastoplastic model for unsaturated soils	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. of the 3rd European Conf. on unsaturated soils (E-UNSAT 2016)	6. 最初と最後の頁 17008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/e3sconf/20160917008	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 該当する

1. 著者名 Nakamura, K. and Kikumoto, M.	4. 巻 9
2. 論文標題 A finite strain elastoplastic constitutive model for unsaturated soils incorporating mechanisms of compaction and hydraulic collapse	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. of the 3rd European Conf. on unsaturated soils (E-UNSAT 2016)	6. 最初と最後の頁 17001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/e3sconf/20160917001	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Chortham, S., Kikumoto, M. and Komolvilas, V.
2. 発表標題 Simulation on liquefaction of unsaturated compacted soils -effect of compaction degree-
3. 学会等名 7th Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engrg. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Fang, X., Kikumoto, M. and Cui, Y.
2 . 発表標題 Theory of loosening earth pressure on a shallow tunnel in unsaturated ground
3 . 学会等名 3rd ATC6 Sym. ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Putra, A. D., Takahashi, M. and Kikumoto, M.
2 . 発表標題 Weathering-induced deformation of crushed weak rocks and its countermeasure
3 . 学会等名 7th Int. Sym. on Deformation Characteristics of Geomaterials ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Komolvilas, V. and Kikumoto, M.
2 . 発表標題 Simulation of Soaking-Induced Collapse of Unsaturated Soil
3 . 学会等名 30th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Komolvilas, V. and Kikumoto, M.
2 . 発表標題 A series of fully undrained cyclic loading simulation on unsaturated soils using an elastoplastic model for unsaturated soils
3 . 学会等名 19th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Geomechanics laboratory at YNU  
<http://www.cvg.ynu.ac.jp/G3/MamoruKikumoto/index.html>

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