

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360192

研究課題名(和文) 築造過程から豪雨による変形・破壊まで、盛土の一生を解く

研究課題名(英文) Solving a lifetime of embankment from construction process to deformation and failure due to heavy rain

研究代表者

菊本 統 (Kikumoto, Mamoru)

横浜国立大学・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) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、吸排水に伴うヒステリシスや体積変化による飽和度変化の影響も考慮した発展型の水分特性曲線モデルと、それを組み込んで締固め過程から変形・破壊までシミュレートできる不飽和土の構成則を開発した。これらのモデルの適用性は、排気非排水圧縮や浸水、せん断シミュレーションを通して検証し、同モデルを用いれば最適含水比と最大乾燥密度を持つ締固め曲線を解析的に表現できることを明らかにした。さらに、有限変形理論に基づいて、2年目までに開発、検証を行った構成モデルと水分特性曲線モデルを組み込んだ有限要素解析コードを開発するとともに、大変形問題のシミュレーションを通して検証を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel soil water characteristic curve model incorporating the effects of hydraulic hysteresis and volumetric behavior is proposed and an elastoplastic constitutive model for unsaturated soils which can describe compaction process and successive deformation and failure behavior is developed. The validity of the model is checked through simulations of exhausted-air and undrained compression tests, soaking tests and shearing tests. It is seen that the proposed model can also describe compaction curve having optimum moisture content and maximum dry density. A finite element analysis code, in which the SWCC model and the constitutive model are implemented, is then developed based on finite deformation theory. Finally, simulations of box-shear tests on unsaturated soils are conducted using the finite element code and it is revealed that the newly developed code can be applied to large deformation behavior of unsaturated soil.

研究分野：地盤力学

 キーワード：不飽和土 弾塑性構成則 有限変形解析 締固め現象 豪雨 超弾性構成則 浸水コラプス 多相混合
体理論

1. 研究開始当初の背景

豪雨や長雨に対する盛土の力学的安定性は降雨特性（降雨強度や連続雨量）だけでなく、締固め時の施工品質にも大きく依存する。しかし、地盤の変形を弾性論、破壊を剛塑性論により解いた Terzaghi 以降の古典的土質力学に対して、弾塑性力学に基づく最近の地盤解析技術は変形から破壊に至る地盤の応答を一元的に取り扱えるようになってきたものの、依然として締固め現象は理論的には解釈されていない。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解析条件を設定して評価しているのが現状である。そこで本研究では、豪雨による盛土の崩壊メカニズムや力学的安定性を本質的に議論することを目的として、「締固めによる築造過程から豪雨による変形・破壊まで（ゆりかごから墓場まで）、盛土の一生を一貫してシミュレートする新しい地盤解析技術」の開発を試みる。なお、開発する技術の実用化を推進するため、本研究ではしとしと降り続く長雨から秒単位で刻々と降雨強度が変わる集中豪雨まで降雨特性を詳細に観測して適切な水理境界条件を設定した上で解析を実施する。

2. 研究の目的

土構造物の締固め築造過程とその後の変形・破壊挙動の締固め品質による違いを考慮できる不飽和土の構成則の定式化を試みることに、それに基づく土・水・空気連成の浸透・変形解析法を開発し、盛土（群）の締固め施工から豪雨による崩壊まで一貫して解く。開発した解析手法を用いて豪雨や長雨による盛土の崩壊メカニズムの解明を試みるとともに、解析的に合理的な防災対策法を探索する。特に、豪雨や長雨による昨今の盛土被害の頻発に鑑み、これまで想定していなかった特異な降雨特性まで含めて検討する。

3. 研究の方法

既往実験のレビューと新たに実施する要素試験の結果をもとに応募者らの不飽和土（盛土）と自然堆積土（基礎地盤）のモデルを検証・改良して、土・水・空気三相系の浸透・変形連成有限要素解析コードに導入し、盛土の築造から崩壊まで解く手法を開発する。また、解析の妥当性は実験との比較により検証する。数値計算は、実際の豪雨・長雨を想定した水理境界条件の下で、盛土の締固め条件、排水工や各種補強法を変化させて盛土の降雨崩壊シミュレーションを行い、盛土の崩壊機構について考察する。

4. 研究成果

(1) 不飽和土の構成則と締固め・浸水現象
飽和過圧密土の構成則・下負荷面修正カムクレイをベースとして、代表者らが提案する発展型水分特性曲線モデルと間隙比・平均有効応力・飽和度空間での限界状態面（状態

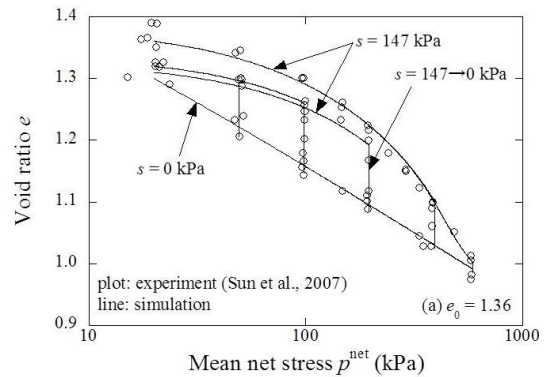


図1 5種類の等方応力下の浸水試験と提案モデルによるシミュレーション

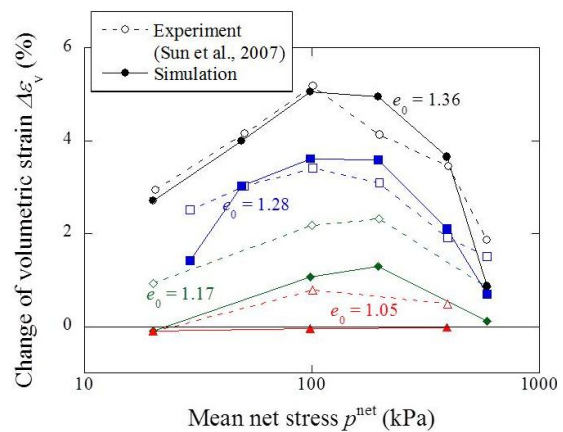


図2 初期間隙比・拘束応力が異なる不飽和土の等方応力下の浸水コラプス試験とシミュレーション

変数 α)を導入し、Bishopの有効応力を応力変数とした不飽和土の弾塑性構成モデルを定式化した。

不飽和土の要素試験との比較では、提案モデルが排気排水圧縮時のサクシオン一定条件での体積圧縮に伴う飽和度の増加や圧縮曲線の飽和土の正規圧密線への漸近、サクシオン減少に伴う水浸とコラプス挙動など、不飽和土の典型的な応答を精緻に捉える(図1)とともに、密度や拘束応力による水浸時の体積圧縮量の違いを的確に捉える(図2)ことが示された。また、提案モデルは異方応力下での水浸によるせん断変形と破壊をよく再現することが示された(図3)。

さらに、提案モデルを用いて排気非排水条件下の圧縮試験の解析を実施した。この計算は、間隙空気の排出による圧縮、すなわち締固めのシミュレーションに該当する。提案モデルによる解析では、従来、解析的には記述することが難しかった含水比・乾燥密度平面上に凸な締固め曲線や、締固め曲線の圧縮応力(締固めエネルギーに相当)による変遷をよく再現した(図4)。

(2) 微小変形理論に基づく水土空気3相系の浸透-変形連成有限要素解析

開発した不飽和度の構成モデルを組み込んだ数値解析により、土構造物の締固め築造

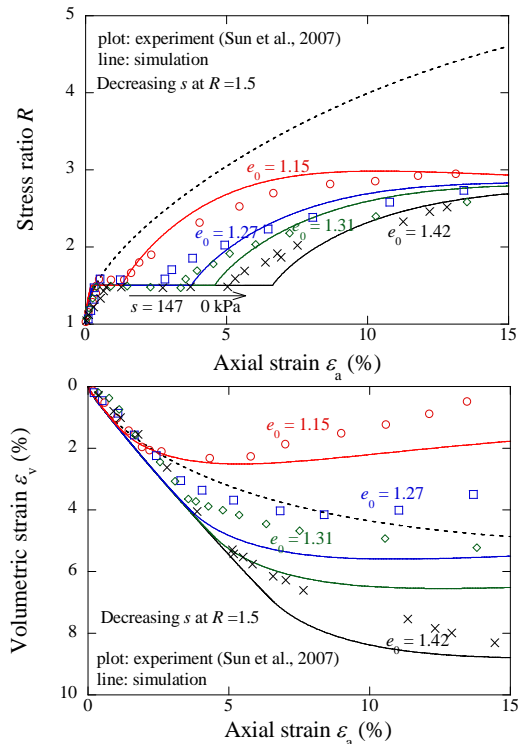


図3 異方応力下の浸水試験と提案モデルによるシミュレーション

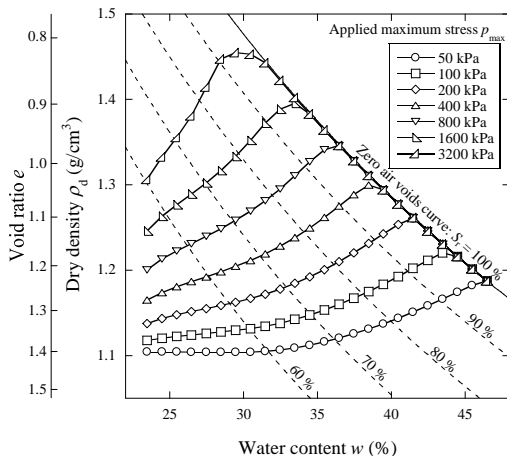


図4 提案モデルによる締固め曲線の記述 (Pearl clay)

過程をシミュレートした。解析は土水空気 3 相系の支配方程式 (釣合式, 各相の質量保存則) を Sandhu の手法に倣って有限要素法により空間離散化し, 後退差分により時間離散化して実施した。

1.5m の高さの土構造物の築造を想定して, 一層 30cm で計 5 層の締固め過程を 1 次元圧縮問題としてシミュレートした。締固め過程は排気非排水の境界条件を与えて, 各築造過程で地表面に 200kPa の上載圧を与えた。図 5 は 5 層を締固めた後の築造完了時の間隙比分布であるが, 30cm の層ごとに完成時の間隙比が異なる様子や要素シミュレーションで得られた最適含水比 $w_{opt} = 40\%$ よりも実際の築造過程での最適含水比はやや低く 38%程度であることがわかった。

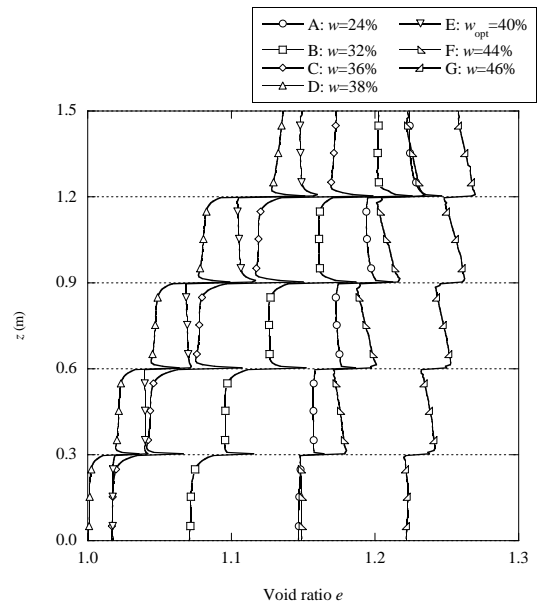


図5 5層の一次元締固め築造過程のシミュレーション (7種類の締固め含水比での築造完了時の間隙比分布の違い)

(3) 有限変形論に基づく不飽和土の弾塑性構成モデルの再定式化

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合理化をはかるには, 締固め現象や不飽和土の浸水・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。2 では土の締固め現象が表現できる不飽和土の構成モデルを微小変形理論に基づいて提案し, 不飽和土の様々な要素試験を通してその適用性を明らかにしているが, 降雨や地震による変形・破壊では大きな変形を伴うと予想されることから, 力学的により厳密なアプローチとして有限変形理論の枠組みで記述されることが望ましい。そこで, この不飽和土のモデルを有限変形の枠組みへと拡張した。

(4) 有限変形理論に基づく土-水-空気 3 相浸透-変形連成有限要素法の開発

Borja and Song (2013a, b)を参考にしつつ, 有限変形論に基づく不飽和土の有限要素法を開発した。なお, 本研究の特色は土構造物の築造過程も再現できる締固め現象を考慮できる不飽和土の構成モデルを用いることにある。ここでは, 変形勾配テンソルの乗算分解と超弾性構成式を用いて有限変形論の定式化を行った。この方法を用いれば, 従来よく用いられてきた変形速度の加算分解と亜弾性構成式を用いた有限変形の定式化の幾つかの欠点を解消できる。なお, 応力積分はリターンマッピング法により行い, 変形増分の大きさに依存しない高精度な解を目指した。

a) 三軸試験のシミュレーション

4 の構成則を導入した解析コードを作成し, 1 要素で三軸試験のシミュレーションを行った。図 6 より, ステップ数が極端に粗い場合であっても解析結果は逸脱することな

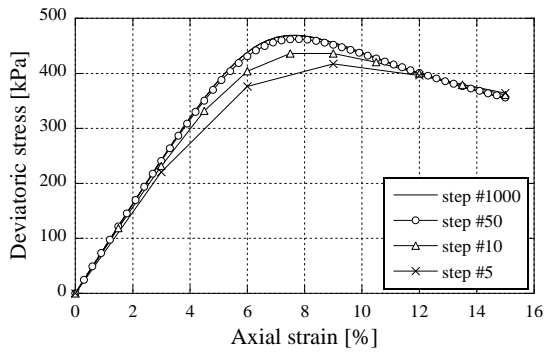


図6 刻み幅を変えた三軸試験の解析結果

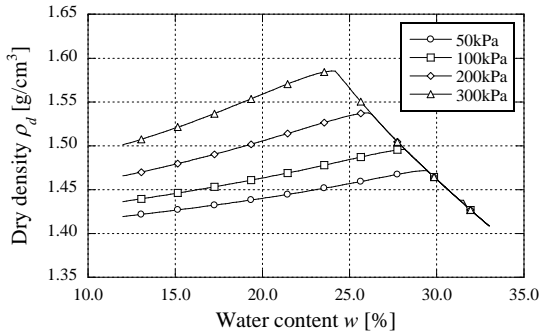


図7 解析的に再現された締固め曲線

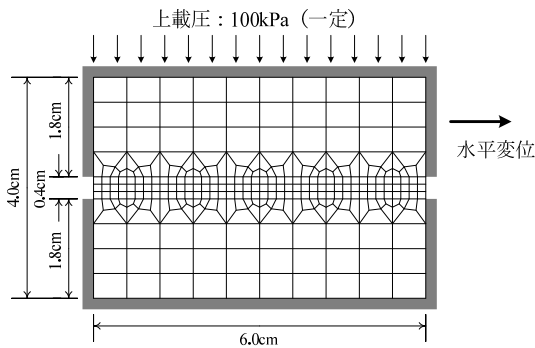


図8 一面せん断解析の解析モデル

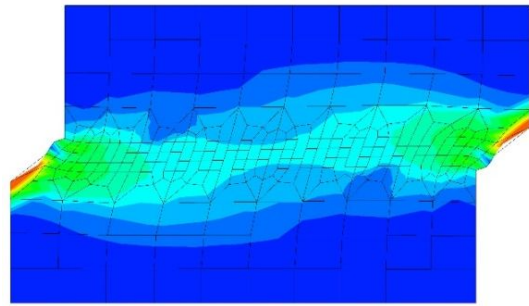
く精度良く応力積分がなされており、誤差の蓄積も少ないことが確認できる。従来の陽解法を用いた定式化では、大きな増分ステップでは誤差が蓄積してしまうため、このような結果は得られず本定式化の有用性が実証された。

b) 締固め試験のシミュレーション

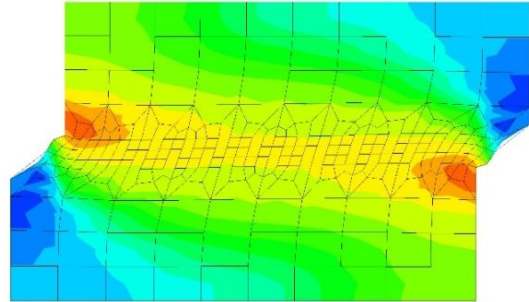
締固めでは含水比がほとんど変化しないことに着目して、排気非排水条件での圧縮試験を締固めとみなして、1要素で解析を行った。図7より、有限変形理論の枠組みへと拡張した構成則においても、含水比-乾燥密度関係で土の締固め曲線がよく表現された。

c) 一面せん断のシミュレーション

降雨・地震時の局所的大変形を視野に入れて、図8の有限要素モデルで一面せん断試験の解析を行った。図9より、対数せん断ひずみがせん断面付近に帯状に分布して、実際の試験で報告されているのと同様の現象が表現されている。ここでは緩詰め土を想定し



(a) 対数せん断ひずみ



(b) 飽和度

図9 一面せん断解析の解析結果

たパラメータを設定しており、せん断による体積圧縮により飽和度が増加しており、不飽和土の特徴的な応答をよく表現している。

(5) まとめ

不飽和土の構成則を定式化し、締固め現象とその後の浸水変形・破壊現象をシミュレートできることを示した。また、提案モデルを組み込んだ微小変形に基づく有限要素解析により、土構造物の締固め築造過程を再現した。続いて、不飽和土の構成則を有限変形理論に拡張し、土-水-空気3相連成解析を定式化した。計算ステップ数を極端に減らした場合でも、逸脱することなく精度良く応力積分がなされ、誤差の蓄積も少ないことを確認した。締固めの解析では、本解析が土の締固め現象が定性的によく表現することを確認した。3つ目の一面せん断解析では、局所的大変形を伴う厳しい解析条件においても、不飽和土の特性を良く表現し、本解析手法の高い適用性が確認された。

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3件)

Nakamura, K. and Kikumoto, M. : Modeling water-NAPL-air three-phase capillary behavior in soils, *Soils and Foundations*, vol. 54, no. 6, 1225-1235, 2014.

中村圭太, 菊本統: 水 NAPL 空気 3相系の特性曲線モデル, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, vol.17, no. 2, 831-840, 2014年.

木谷憶人, 菊本統, 中村圭太: ヒステリ

シスを考慮した水 NAPL 空気3相系の特性曲線モデル, 土木学会論文集 A2 (応用力学), vol.17, no. 2, 859-868, 2014年.

〔学会発表〕(計7件)

松本亜里沙, 菊本統, 福田拓海, 京川裕之: スレーキング現象と変形挙動の実験的検討, 第59回地盤工学シンポジウム論文集, pp.607-614, 2014年11月.
福田拓海, 菊本統, 松本亜里沙, 京川裕之: スレーキング現象と変形挙動の構成モデリング, 第59回地盤工学シンポジウム論文集, pp.599-606, 2014年11月.
Kikumoto, M. and Nakamura, K.: Three-phase FE simulation for the penetration behaviors of LNAPL and DNAPL into the unsaturated ground, Proc. 14th Int. Conf. of the Int. Assoc. for Computer Methods and Advances in Geomechanics (14th IACMAG), Kyoto, Japan, pp. 1373-1378, Sep. 2014.
木谷憶人, 菊本統, 中村圭太: ヒステリシスを考慮した水-空気-油3相系の特性曲線モデル, 第49回地盤工学研究発表会, 北九州市, 講演集(CD-ROM), 2014年7月.
中村圭太, 菊本統: 地盤の発展型気液液3相保持モデルと不飽和地盤へのNAPLの侵入シミュレーション, 第10回地盤工学会関東支部研究発表会 (Geokanto2013), 東京都, 講演概要集(CD-ROM), 2013年10月.
福田圭吾, 菊本統, 京川裕之, 中島伸一郎: 地盤材料のスレーキング現象と物理・力学特性の変化に関する実験, 第68回土木学会年次学術講演会, 習志野市, 講演概要集(CD-ROM), 2013年9月.
築造過程から変形・破壊まで, 土構造物の一生を解く土のモデル, 第33回西日本岩盤工学シンポジウム, 宇部市, 2012年8月(特別講演).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 不飽和土壌中の非水溶性液体の挙動解析方法
発明者: 菊本統, 中村圭太, 木谷憶人
権利者: 横浜国立大学
種類: 特許
番号: 特願 2014-109802
出願年月日: 2014年5月
国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊本 統 (KIKUMOTO, Mamoru)
横浜国立大学・都市イノベーション研究院・准教授
研究者番号: 90508342

(2) 研究分担者

中島 伸一郎 (NAKASHIMA, Shinichiro)
山口大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 70346089

小山 倫史 (KOYAMA, Tomofumi)
関西大学・社会安全学部・准教授
研究者番号: 20467450

(3) 連携研究者

酒井 直樹 (SAKAI, Naoki)
独立行政法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究ユニット・主任研究員
研究者番号: 40414990