

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206051
 研究課題名（和文） 不飽和土の試験法・不飽和地盤の調査法の開発と
 不飽和土質力学の体系化
 研究課題名（英文） TEST METHODS ON UNSATURATED SOILS & INVESTIGATION METHODS ON
 UNSATURATED GROUND AND SYNTHESIZED MECHANICS FOR UNSATURATED SOILS
 研究代表者
 北村 良介（KITAMURA RYOSUKE）
 鹿児島大学・工学部・教授
 研究者番号：70111979

研究成果の概要：

不飽和土とは土粒子とそれらの間隙を水と空気で満たしている土塊のことである。不飽和地盤とは地下水位以浅の不飽和土からなる地表面に近い地盤のことである。本研究では、不飽和土の保水・透気・透水・圧縮・せん断挙動を明らかにするための室内土質試験、不飽和地盤の不飽和浸透挙動を明らかにするための原位置試験・地盤調査を行い、それらの結果を踏まえた不飽和土質力学の体系化を試みており、今後の研究の発展に繋がる成果を得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	22,610,870	6,780,000	29,390,870
2007年度	8,007,041	2,400,000	10,407,041
2008年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
年度			
年度			
総計	39,017,911	11,700,000	50,717,911

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：不飽和土、不飽和地盤、試験法、調査法、不飽和土質力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 不飽和土の土質試験法

不飽和土の土質試験として地盤工学会基準が定められているのは、水分特性曲線を得るための「土の保水性試験」（JGS 0151-2000）、「不飽和土の三軸圧縮試験」（JGS 0527-2000）のみである。飽和土に対しては、透水試験（JIS A1218）・一面せん断試験（JGS 0560-2000, 0561-2000）・ねじり試験（JGS 0550-1998）等は基準化されているにもかかわらず、

不飽和土に対するそれらの試験方法は基準化されていない。また、不飽和土に特有な透気試験の基準化もなされていない。

(2) 不飽和地盤の調査法

不飽和土からなる不飽和地盤の土層構成、土質特性を明らかにし、地盤の透水係数や含水量を直接計測する手法は確立されていない。

(3) 不飽和土質力学の体系化

不飽和土は固相・液相・気相からなる三相

混合体である。そのような認識の基に不飽和土の保水・透気・透水・圧縮・せん断挙動を解析する必要があるにもかかわらず、従来の土質力学では二相混合体である飽和土の連続体力学に基づく理論を延長して解析を行おうとする研究が多くなされてきている。不飽和土を飽和土の延長線上で考えるのではなく、逆に、飽和土（二相混合体）は不飽和土（三相混合体）の特別な状態（飽和度 100%）であるという視点に立脚した土質力学の体系化が必要であるとの認識が広まりつつある。

2. 研究の目的

不飽和土の試験法・不飽和地盤の調査法の未整備、不飽和土質力学の未成熟な現状を踏まえ、精度の向上を目指した不飽和土の土質試験・不飽和地盤の調査、そして、不飽和土を連続体ではなく、固相・液相・気相からなる三相混合体であることを前提とした不飽和土質力学の体系を構築することを目指し、整合性のある数値力学モデルを提案することを本研究の目的としている。

3. 研究の方法

本研究は実験的研究と理論的研究に分けられる。実験的研究は、不飽和土（土要素）を対象とした室内土質試験と不飽和地盤（土要素の集合体）を対象とした調査に分けられる。以下、本研究で行った不飽和土の室内土質試験、不飽和地盤での調査、不飽和土質力学の体系化の作業について述べる。

(1) 実験的研究

保水・透気・透水・圧縮・せん断試験では次の事項に関する検討を行った。

① 室内土質試験

・保水性試験

セラミックディスク・透水膜（透析膜、セルローズ膜、微細多孔質膜）を飽和させ、水は通すが空気を通さない状態にして間隙水圧を制御・測定した。空気侵入値（Air Entry Value:AEV）の異なるセラミックディスク・透水膜を用い、低サクションでの豊浦砂、シルト、カオリンを試料とした加圧法による保水性試験を行った。セラミックディスク・透水膜の透水係数や厚さに依存した挙動、特に平衡状態に達するまでの時間について検討した。また、得られた水分特性曲線（保水挙動）について検討した。

カオリン、ベントナイトを試料とし、蒸気圧法による保水性試験を行い、得られた水分特性曲線について検討した。

岐阜県内の山砂を使用し、サイクロメータ法と減圧法による保水性試験を行い、水分特性曲線のヒステリシス挙動と供試体の体積変化挙動について検討した。

・透水試験

不飽和透水試験装置を試作し、豊浦砂、長良川砂・シルト、鳥取砂丘砂を試料とし、不飽和透水係数、透気係数、水分特性曲線を求めた。

土中水分計を用いて不飽和浸透過程での鉛直方向の水分量の時系列変化（動的プロフィール）を求め、水分特性曲線と不飽和透水係数の精度について検討した。

・鉛直浸透試験

透水係数が不均一に分布する場において、散水条件および段階的湛水条件の鉛直浸透実験を行った。また室内実験の水と空気の詳細な挙動を把握するため、飽和-不飽和浸透流解析と気液 2 相流解析による数値シミュレーションを行った。

・圧縮試験

不飽和土の水浸沈下（コラプス）挙動を調べるため、しらす、喜界島の赤土を試料とし、一次元圧縮試験を行った。試験結果は北村モデルの妥当性を検討するために利用された。

・せん断試験

豊浦砂、まさ土、しらすを試料とし、中空ねじりせん断試験、一面せん断試験、二重セル型三軸装置を用いた三軸試験を行った。

・室内土槽試験

不飽和浸透挙動を明らかにすることを目的とし、底面が縦 120cm、横 100cm、高さが 70cm のまさ土からなる模型斜面を作製し、降雨試験を行い、土中の間隙水圧、土中水分量の時系列変化を測定した。試験結果は北村モデルの妥当性を検討するために利用された。

・サクション・土中水分・雨量・気温・土中温度・風向・風速の経時計測

降雨に伴う斜面崩壊の予知システムの構築と関連し、京都市の寺社境内、鹿児島大学海洋土木工学科棟ベランダに設置した土槽でサクション・土中水分・雨量・気温・土中温度・風向・風速を経時計測した。また、鹿児島県蒲生町新留小学校校庭ではサクション・土中水分・雨量・気温・土中温度の計測を行った。

② 不飽和地盤での原位置試験、調査

・原位置透水試験

不飽和砂質土地盤の表層部分における飽和・不飽和浸透特性値を簡便かつ迅速に算定するため、挿入型土中水分計を併用した原位置透水試験（浸潤リングによる定水位透水試験と排水試験）方法を検討した。

・地中レーダによる浸透挙動の調査

地表設置型地中レーダ（GPR）を用い、不飽和砂質土地盤の表層部分における不飽和浸透挙動を調査する手法を検討した。

・不飽和水帯の電気伝導度調査

鹿児島県内のしらすや他の火山噴出物からなる地盤において不飽和水帯の間隙水の電気伝導度を計測した。

(2) 理論的研究

北村モデルに基づく不飽和土質力学の確立を目指し、現時点での最先端の体系化作業を取りまとめた。すなわち、従来の飽和土質力学とは異なり、土粒子レベルのスケールでの力学的考察と確率論を用いて土粒子レベルでの挙動を積分することにより、不飽和土の巨視的な物理量である応力、ひずみ、間隙比、サクシオン、体積含水率（含水比、飽和度）、不飽和・飽和透水係数、透気係数、見かけの粘着成分の含水比依存性、応力-ひずみ関係、水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数-体積含水率（含水比、飽和度）関係、透気係数-体積含水率（含水比、飽和度）、晴天・雨天の繰返しによる土中水分量、土中温度の時系列変化が求められることを明らかにするため、各種の数値シミュレーションを行った。

北村モデルは、KITA-CS モデル、KITA-SAKO モデル、KITA-ARA モデル、KITA-MIYA モデル、KITA-YAMA モデルから成り立っている。以下、各モデルについて検討事項を説明する。

① KITA-CS モデル

不飽和土の圧縮・せん断挙動をシミュレートするためのモデルである。粒子接点での不連続な運動の評価について検討した。

② KITA-SAKO モデル

不飽和土の水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数-体積含水率（含水比、飽和度）関係、透気係数-体積含水率（含水比、飽和度）をシミュレートするためのモデルである。種々の不飽和土の保水性試験結果を用いてモデルの妥当性を検討した。また、ヒステリシスを表現するためにモデルの改良を行った。

③ KITA-ARA モデル

締固め曲線をシミュレートするためのモデルである。本モデルを用いることにより、KITA-SAKO モデルの入力パラメータである残留飽和度、擬似飽和度を容易に求めることができる。しらすの締固め試験結果を用いてモデルの妥当性を検討した。

④ KITA-MIYA モデル

晴天・雨天の繰返しによる土中水分量、土中温度の時系列変化をシミュレートするためのモデルである。鹿児島大学海洋土木工学科棟ベランダでの土槽試験、鹿児島県蒲生町新留小学校での計測結果を用いてモデルの妥当性を検討した。

⑤ KITA-YAMA モデル

せん断強度パラメータの一つである見かけの粘着成分の含水比依存性をシミュレートするためのモデルである。粒子接点でのメニスカスの有無を考慮し、また、有効径を導入することにより、モデルの改良を行った。

4. 研究成果

(1) 実験的研究による成果

・透水膜が従来から広く使われてきているセ

ラミックディスクより利便性が高いことを明らかにした。

・カオリンの高サクシオン領域で大きなヒステリシスを示すことを明らかにした。

・岐阜県内の山砂では湿潤過程での体積変化の非線形性が強いことを明らかにした。

・透気係数-体積含水率関係は水分特性曲線と同様にヒステリシスを描くこと、同じ飽和度では吸水過程での透気係数が排水過程より大きいことを明らかにした。一方、不飽和透水係数-体積含水率関係では明確なヒステリシスは生じなかった。

・原位置での不飽和透水係数の推定に際して一次元浸透流を仮定した解析における注意点を明らかにした。

・浸透実験結果から、特に段階的湛水実験においては、湛水のタイミングに対応した土壤水分の鋭敏な反応が確認された。

・水浸沈下量は圧密降伏応力付近で最大となること、サクシオンの変化によって体積変化が生じることを明らかにした。

・せん断過程での水浸沈下量は密度や拘束圧が小さい程大きいことを明らかにした。また、せん断強度パラメータ（ c 、 ϕ ）は含水量に変化によって見かけの粘着性部 c のみが増加することを明らかにした。

・提案した原位置試験法では、現場飽和透水係数と現場体積含水率を直接測定することによってヒステリシスを考慮した水分特性曲線を得られることを明らかにした。

・地表面から 20cm 程度の深度までの飽和・不飽和透水係数を簡便かつ精度よく得られること、不飽和浸透特性を解析するための関数モデルを良好に同定することができることを明らかにした。

・深層崩壊発生場の予測指標として、緩斜面の分布、帯水層と難透水層の境界、溪流の縦断における流量・電気伝導度・シリカ濃度の変化点、湧泉の分布などが有効であることを明らかにした。

・サクシオン・土中水分・雨量・気温・土中温度・風向・風速のデータが蓄積された。今後、これらのデータを基に北村モデルを用いた地圏シミュレータの構築に向けた作業を進めていくことを考えている。

(2) 理論的研究による成果

・北村モデルでは、土粒子レベルのスケールでの力学的考察と確率論を用いて土粒子レベルでの挙動を積分することにより、粒径加積曲線と土粒子密度、エネルギー曲面が得られれば、不飽和土の巨視的な物理量である応力、ひずみ、間隙比、サクシオン、体積含水率（含水比、飽和度）、不飽和・飽和透水係数、透気係数、見かけの粘着成分の含水比依存性、応力-ひずみ関係、水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数-体積含水率（含水比、飽和度）関係、透気係数-体積含水率（含水

比、飽和度)、晴天・雨天の繰返しによる土中水分量、土中温度の時系列変化が数値的に求められることを明らかにした。

・しらすの一次元圧縮過程における水浸沈下挙動を良好に表現できることを明らかにした。

・KITA-SAKO モデルは、しらす、アカホヤ、まさ土、赤土等の水分特性曲線、定水位透水試験より得られる透水係数を良好に予知できることを明らかにした。

・KITA-ARA モデルによって火山灰質土の残留飽和度、擬似飽和度を同定することができた。擬似飽和度は100%より小さく、50~70%程度となり、保水性試験結果と整合していることを明らかにした。

・KITA-MIYA モデルは、鹿児島大学海洋土木工学科棟ベランダでの土槽試験、鹿児島県蒲生町新留小学校での計測結果を良好に表現できることを明らかにした。

・KITA-YAMA モデルを斜面安定解析に適用し、降雨による含水量の増加が斜面を不安定化させることを明らかにした。

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 24 件)

- (1) 北村良介、酒匂一成、竹原晋平、毛管遮水層 (CapillaryBarrier) の地盤工学問題への応用、歴史都市防災論文集、Vol. 2, 127-132, 2008、査読有
- (2) 松崎陽介、宮本裕二、北村良介、不飽和地盤での雨量・温度・サクシヨンの計測と北村モデルによる浸透・蒸発挙動のモデル化、第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集、27-32、2008、査読有
- (3) 西村友良、豊田浩史、和栗将貴、静的に締固めた非塑性シルトの圧縮特性および強度特性に与える高サクシヨンの影響、地盤工学ジャーナル、Vol. 3, No. 4, 321-329, 2008、査読有
- (4) 神谷浩二、井上光弘、水分特性曲線を用いて不飽和土の透気係数と飽和土の関係を推定する関数モデルの考察、土木学会論文集 C、Vol. 64, No. 3, 650-661, 2008、査読有
- (5) 川尻峻三、加藤正司、川口貴之、渋谷啓、バンダーエレメントによる不飽和土のせん断弾性係数 G の測定と評価、土木学会応用力学論文集、Vol. 11, 436-442, 2008、査読有
- (6) 北村良介、酒匂一成、加藤俊二、水島俊基、今西肇、降雨時のしらす斜

面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験、地盤工学ジャーナル、Vol. 2, No. 3, 149-168, 2007 査読有

- (7) 中川啓、斉藤雅彦、不飽和-不均一場における水分動態解析、土木学会論文集 B、Vol. 64, No. 1, 30-40, 2008、査読有
- (8) 竹下祐二、諏訪隼人、森井俊広、不飽和砂質地盤におけるヒステリシス現象を考慮した浸透特性値の原位置試験方法、土木学会論文集 C、Vol. 63, No. 4, 1153-1162, 2007、査読有
- (9) Sugii, T., Uno, M. and Mori, Y., Development of a field measurement of unsaturated hydraulic conductivity in slopes, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 519-524, 2007、査読有
- (10) Nishimura, T., Direct shear strength of an unsaturated silty soil under low vertical stress, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 273-278, 2007、査読有
- (11) Kamiya, K. and Inoue, M., A study on the relationship between air permeability coefficient and degree of water saturation of unsaturated soils, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 231-235, 2007、査読有
- (12) Sako, K. and Kitamura, R., Kitamura model for seepage behavior of unsaturated soil, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 397-403, 2007、査読有
- (13) Takeshita, Y. and Morii, T., Field techniques for measuring field saturated and unsaturated hydraulic conductivity using soil moisture profile, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 525-530, 2007、査読有
- (14) Kato, S., Sakakibara, T. and Kuriyama, Y., Effects of intergranular adhesive force on failure criterion for granular material, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 353-358, 2007、査読有
- (15) Araki, K. and Kitamura, R., Derivation of SWCC and permeability coefficient from compaction test based on Kitamura model, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 327-333, 2007、査読有

- (16) 竹下祐二、森井俊広、土中水分計則データを用いた簡便な原位置試験方法による不飽和砂質土地盤の飽和・不飽和透水係数の測定、土木学会論文集 C、Vol. 62, No.4, 831-839, 2006、査読有
- (17) 西村友良、豊田浩史、高サクシオンを受けた非塑性不飽和シルトの見かけの粘着力、土木学会論文集 C、Vol. 62, No.2, 519-528, 2006、査読有
- (18) Sugii, T., Predicting the conductivity of unsaturated soils from a soil moisture profile, Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, 157-166, 2006、査読有
- (19) Sako, K., Kitamura, R. and Fukagawa, R., Study on slope failure due to rainfall: A comparison between experiment and simulation, Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2324-2335, 2006、査読有
- (20) Kato, S., Yoshimura, Y. and Sakakibara, T., Effects on matric suction on residual strength and deformation characteristics under low confining pressure, Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, 1267-1278, 2006、査読有
- (21) Nishimura, T., Murasawa, Y. and Okami, T., Estimating air-water hydraulic conductivity using soil-water characteristic curve, Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, 1595-1606, 2006、査読有
- (22) Sako, K. and Kitamura, R., A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol. 46, No. 5, 595-604, 2006、査読有
- (23) 酒匂一成、深川良一、岩崎賢一、里見知昭、安川郁夫、降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング、地盤工学ジャーナル、Vol. 1, No. 3, 57-69, 2006、査読有
- (24) 地頭菌隆、深層崩壊発生場予測法の提案-鹿児島県出水市矢管岳山体を例にして-、砂防学会誌、Vol. 88, 2-7, 2006、査読有
- (2) 杉井俊夫ら、植生と土質の相関性に関する一検討、第 63 回土木学会年次学術講演会 (3 部)、2008 年 9 月、札幌市
- (3) 西村友良ら、加圧膜法と加圧板法で求めた水分特性曲線の違い、第 63 回土木学会年次学術講演会 (3 部)、2008 年 9 月、札幌市
- (4) 北村良介ら、北村モデルを用いた不飽和土のせん断特性に関する一考察、第 43 回地盤工学研究発表会、2008 年 7 月、広島市
- (5) 西村友良ら、加圧膜法・加圧板法併用型不飽和一面せん断箱の改良、第 43 回地盤工学研究発表会、2008 年 7 月、広島市
- (6) 杉井俊夫ら、土の保水性試験における体積変化の評価、第 43 回地盤工学研究発表会、2008 年 7 月、広島市
- (7) 竹下裕二ら、地中レーダを用いた不飽和浸透挙動の非破壊計測、第 43 回地盤工学研究発表会、2008 年 7 月、広島市
- (8) 杉井俊夫ら、動的水分プロファイルを用いた不飽和透水係数の推定、第 62 回土木学会年次学術講演会 (3 部)、2007 年 9 月、東広島市
- (9) 酒匂一成ら、京都市東山山麓における負の間隙水圧の計測結果と過去の気象データとの比較、第 63 回土木学会年次学術講演会 (3 部)、2008 年 9 月、札幌市
- (10) 北村良介ら、北村モデルにおける粒子接点変化率について、第 42 回地盤工学研究発表会、2007 年 7 月、名古屋市
- (11) 竹下祐二ら、原位置透水試験におけるヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値の推定方法、第 42 回地盤工学研究発表会、2007 年 7 月、名古屋市
- (12) 北村良介ら、不飽和土質力学に基づく版築技術の復興に向けて、第 61 回土木学会年次学術講演会 (3 部)、2006 年 9 月、草津市
- (13) 北村良介ら、不飽和土の水分保持特性・透気透水特性のモデル化に関する一考察、第 41 回地盤工学研究発表会、2006 年 7 月、鹿児島市
- (14) 神谷浩二ら、不飽和土の透気係数を表す関数モデルの一考察、第 41 回地盤工学研究発表会、2006 年 7 月、鹿児島市

[学会発表] (計 14 件)

- (1) 北村良介、地圏シミュレータ構想と北村モデル、第 63 回土木学会年次学術講演会 (3 部)、2008 年 9 月、札幌市

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
北村 良介 (KITAMURA RYOSUKE)

鹿児島大学・工学部・教授
研究者番号：70111979

(2) 研究分担者

肥山 浩樹 (HIYAMA HIROKI)
鹿児島大学・農学部・准教授
研究者番号：10208788

地頭菌 隆 (JITOUSONO TAKASHI)
鹿児島大学・農学部・准教授
研究者番号：50145455

中川 啓 (NAKAGAWA KEI)
鹿児島大学・農学部・准教授
研究者番号：90315135

山本 健太郎 (YAMAMOTO KENTARO)
鹿児島大学・工学部・助教
研究者番号：40305157

竹下 祐二 (TAKESHITA YUJI)
岡山大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：90188178

加藤 正司 (KATO SHOJI)
神戸大学・工学部・准教授
研究者番号：10204471

杉井 俊夫 (SUGII TOSHIO)
中部大学・工学部・教授
研究者番号：90196709

西村 友良 (NISHIMURA TOMOYOSHI)
足利工業大学・工学部・教授
研究者番号：00237736

神谷 浩二 (KAMIYA KOJI)
岐阜大学・工学部・准教授
研究者番号：50252119

酒匂 一成 (SAKO KAZUNARI)
立命館大学・COE 推進機構・ポスドク研究員
研究者番号：20388143

(3) 連携研究者