

平成21年 4月24日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760365
 研究課題名（和文） 微視構造に着目した火山灰質ロームの不飽和力学特性と水分移動特性の解明
 研究課題名（英文） Investigation of unsaturated strength and infiltration properties for volcanic cohesive soil from the point of view micro structural deformation
 研究代表者
 清原 雄康 (KIYOHARA YUKOH)
 八戸工業高等専門学校・建設環境工学科・助教
 研究者番号：20369911

研究成果の概要：

土粒子構造と水分特性や荷重載荷時の変形特性のメカニズム解明のために、サクシオンを0, 50, 90kPa, 拘束圧 0, 10, 100kN/m² の各条件下での不飽和三軸試験を行った。そして攪乱・不攪乱状態の八戸ロームにおけるせん断挙動、サクシオンや基底応力が体積変化に及ぼす影響を把握するとともに、せん断時の間隙比と水分特性履歴から微視構造の変化について推察した。また、八戸しらすを用いて野外での水分移動履歴把握と履歴を考慮した予測解析も行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	120,000	3,720,000

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, 火山灰質粘性土, 三軸試験, 水分特性曲線

1. 研究開始当初の背景

火山灰土起源のロームは一般に鋭敏比が高い土として知られており、攪乱による土粒子配列や土粒子の集合状態、間隙構造の変化により、土粒子中のメニスカス水、バルク水の存在形態が変化し、サクシオン由来の強度特性も変化する。土中水分が変化したときの地

盤の支持力評価や切盛土斜面の安定解析、廃棄物処分場底面遮水材としての強度、透水性等の機能評価に際しては、その地盤の自然含水状態下での保水浸透特性、圧密特性やせん断特性を精度良く求めることが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、東北地方に分布する不攪乱、攪乱状態の八戸ローム（火山灰質砂質粘性土）を用い、土粒子の微視構造の違いに基づく水分移動特性と力学特性との関係を明らかにする。試料採取から不飽和三軸せん断試験に至る手法や制御方法等のノウハウの確立、不攪乱と攪乱試料での水分特性、圧密特性、せん断強度特性の変化を定量的に把握するとともに、ミクロな土粒子骨格構造、サクシジョンの存在形態との関係を把握する。また、既存の不攪乱採取試料の一軸試験結果と今回行う予定の不飽和三軸試験結果の関係を整理し、両者の関係の整合性を検証し、一軸試験結果を再評価するとともに、本手法の有用性について検討する。さらに、対象としているロームからなる自然地盤での水分状態を精度良く把握するために、微視的に雨水の浸透の水分移動のメカニズム解明も行い、地盤環境工学的な視点からも、力学的特性と水分特性の解明を行う。

3. 研究の方法

不攪乱、攪乱状態の八戸ローム供試体を、それぞれサクシジョン 0, 50, 90 kPa, 拘束圧 0, 10, 100 kN/m² の各設定条件下で、サクシジョンを計測しながらの排気・非排水条件および排気・排水条件で、不飽和三軸圧縮試験を行った。間隙比の変化や水分特性曲線の変化履歴の把握や、土粒子構造の違いと変形形態の違いについて推察を行った。

また、野外に火山灰質砂質土である八戸しらすからなる人工盛土を作製し、降雨時の水分特性の変化挙動を把握し、微視構造を反映する水分特性履歴を考慮した不飽和浸透流解析も行った。

4. 研究成果

(1) 攪乱・不攪乱状態のロームのせん断時の水分特性履歴の把握

図 1, 図 2 に不飽和三軸試験時の各設定基底応力 c , サクシジョン s での不攪乱土, 攪乱土の水分特性履歴をそれぞれ示した。不攪乱土でのサクシジョンは、団粒内部に保水されていた水分の浸出により破壊までは間隙比や飽和度にあまり依存せず低下し、破壊後は基底応力 100kN/m² の場合において間隙比の顕著な低下が生じ、それに伴う飽和度増加によると思われるサクシジョン低下が続いた。また、初期設定サクシジョンが大きいほど、サクシジョン低下量も大きくなる傾向にあった。拘束圧が大きいほどその傾向は顕著で、間隙空気の排気による土骨格の変形が生じやすく、初期飽和度が比較的高い状況下で、図 3 に示したように団粒化したペッドが乱されたり、ペッド内に保持されていた水分が流出したり、ペッド間の間隙が狭まったりして、間隙比の変

化を伴わなくともペッド内やペッド間の乱

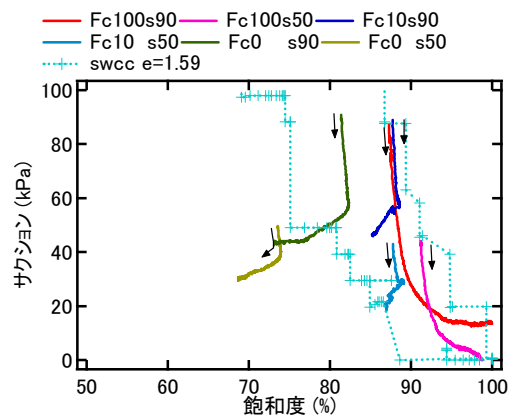


図 1 不攪乱土の水分特性履歴

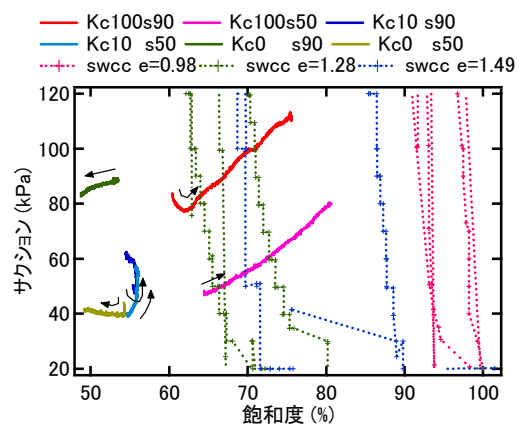


図 2 攪乱土の水分特性履歴

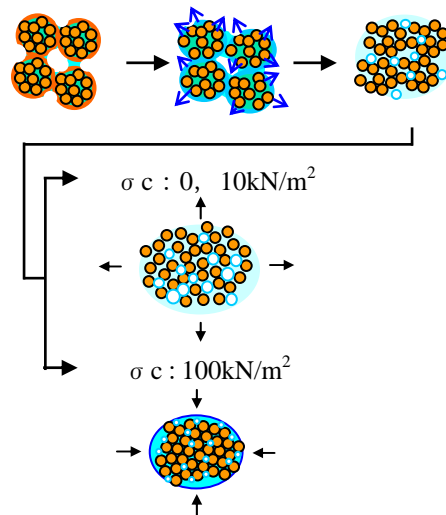


図 3 不攪乱土の変形挙動と水分移動モード

れに起因する土粒子構造の変化が生じ、サクシジョンが低下したと推察される。破壊後、つまりペッドが十分乱された後は、間隙比の変化が生じたものと考えられる。水分特性履歴は概ね室内保水試験（試料間隙比 1.59）から

得られた主曲線の範囲内を推移した。

攪乱土ではいずれの試験条件でも間隙比や飽和度に対してサクシオンはほとんど低下しなかった。そして拘束圧 10 kN/m² 以上では、せん断初期から間隙比が低下し飽和度が増加する傾向にあったが、間隙の減少によるメニスカス力増加の影響と思われるサクシオンの上昇が生じた。

この原因として、図 4 に示したように攪乱土の場合は不攪乱土より初期飽和度が低い状況下で、間隙比の減少により土粒子間の間隙が狭まりメニスカス力が増加したことが考えられる。

(2) 八戸ロームのサクシオン増加に対するせん断強度増加率の把握

図 5 にサクシオンと主応力差の最大値の関係を示した。サクシオン 0 kPa でのセメンテーションや土粒子の骨格構造のみに起因した不攪乱、攪乱の強度差は約 40 kN/m² であった。またサクシオンの増加に対する強度の増加率は不攪乱土で 1.57、攪乱土で 0.48 と、サクシオンの強度増加に対する寄与率は不攪乱土の方が攪乱土より約 3 倍大きかった。

(3) 初期および破壊時サクシオンがせん断強度に及ぼす影響

(式 1) から求まる破壊面に作用するせん断応力 τ_θ と、(式 2) から求まる Fredlund らが提案した不飽和土の Mohr-Coulomb 式を用いたせん断応力の算出結果とは、良好な整合性が得られ、(式 2) の妥当性が確認できた。

$$\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_{1f} - \sigma_{3f}) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \phi'\right) \quad (\text{式1})$$

ここで、 τ_θ : せん断応力、 σ_{1f} 、 σ_{3f} : 垂直水平応力、 ϕ' : 内部摩擦角である。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \cdot \tan \phi' + \chi \cdot (u_a - u_w)_f \cdot \tan \phi' \quad (\text{式2})$$

ここで、 τ_f : 破壊時せん断応力、 c' : 粘着力、 σ : 全応力、 u_a : 間隙空気圧、 ϕ' : 内部摩擦角、 χ : Bishop の有効応力係数、 u_w : 間隙水圧である。

(4) サクシオン、基底応力が体積変化に及ぼす影響

主応力差が最大値をとるまでのデータから、(式 3) に従って基底応力、サクシオンが体積変化に及ぼす割合を決定した。(式 3) 中の m_1^a は、せん断過程でサクシオンを一定に保てる UD 試験結果から(式 3)の第 2 項をゼロとして決定した。そして m_1^a を決めた後、UU 試験結果から m_2^a を決定した

$$\frac{dV_a}{V_0} = m_1^a \cdot d(\sigma - u_a) + m_2^a \cdot d(u_a - u_w) \quad (\text{式3})$$

ここで、 V_a : 間隙体積、 V_0 : 供試体体積、

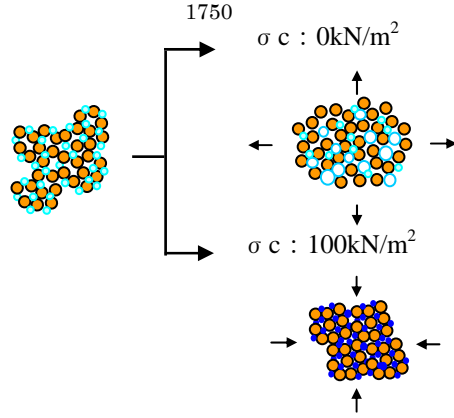


図 4 攪乱土の変形挙動と水分移動モード

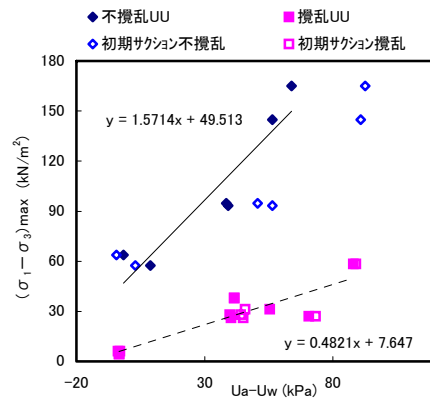


図 5 サクシオンと最大主応力差の関係

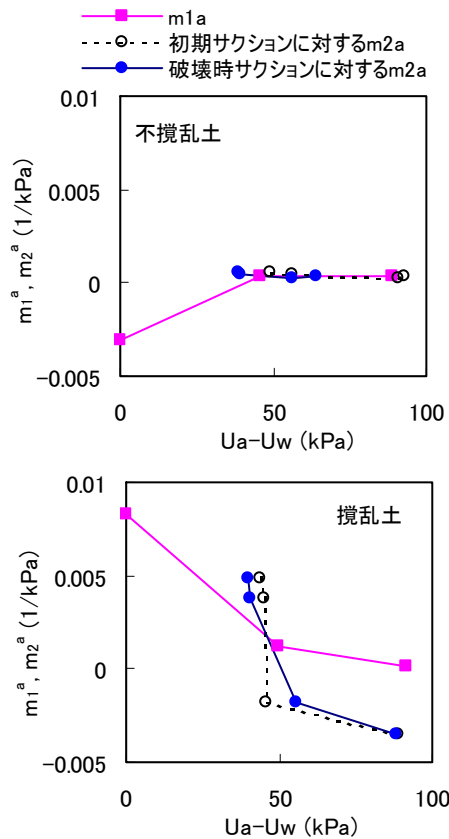


図 6 サクシオンに対する m_1^a と m_2^a の関係

m_1^a : 基底応力由来の体積変化係数, m_2^a : サクシオン由来の体積変化係数, σ : 平均全応力, u_a : 間隙空気圧, u_w : 間隙水圧である. 図 6 に示したように不攪乱土での m_1^a は設定サクシオン 0 kPa の飽和試料において, -0.003 [1/kPa] の膨張傾向を示した. サクシオン 50, 90 kPa では, 約 0.0003 [1/kPa] とわずかではあるが収縮傾向を示し, 基底応力に対する体積変化は, 飽和試料の約 1/10 に低減した. m_2^a はいずれのケースでも 0.0003~0.0005 [1/kPa] であった.

攪乱試料では設定サクシオン 0kPa の飽和試料では 0.008 [1/kPa], サクシオン 50, 90 kPa の試料では, 0.001, 0.0001 [1/kPa] の収縮傾向を示した. m_2^a は-0.003~0.005 [1/kPa] であった. そしてサクシオンが増加するにつれ, m_1^a , m_2^a は低下する傾向にあった. m_1^a はいずれのサクシオン条件でも収縮側に作用したが, m_2^a は 50 kPa 付近から収縮から膨張側へと傾向が変化した.

(5) 野外人工盛土斜面での水分特性履歴の把握と水分特性履歴を考慮した雨水浸透予測解析コードの開発

図 7 に示したような野外盛土にて体積含水率とサクシオンの計測を行い, 体積含水率とサクシオンから得られた水分特性履歴の把握を行い, その結果を図 8 に示した. 昼夜で 30 kPa 程度の日変動を繰り返しながら変化し, 降雨がない期間では最大 60 kPa 程度のサクシオンが作用していた. 降雨時の体積含水率の最大値は約 40%で, 間隙率が 51.9%に対し, 空気封入率は約 20%であった.

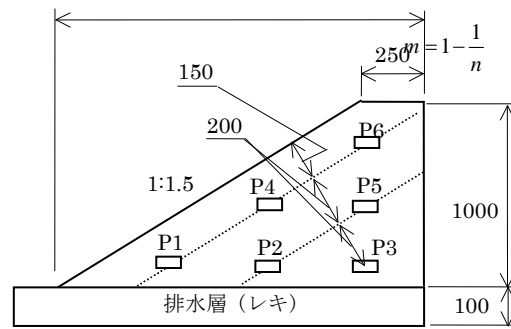
水分特性履歴を包絡する線が水分特性曲線の主排水, 主吸水曲線に相当するものと思われ, 履歴を包絡する点を Van Genuchten 式 (以下 VG と称す) (式 4) に RETC コードを用いてフィッティングさせ, VG 定数を決定した.

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[\frac{1}{1 + |\alpha \cdot h|^n} \right]^m + \theta_r \quad (式 4)$$

ここで, θ_r : 吸水・排水各過程での残留体積含水率 (θ_{rw}, θ_{rd}), θ_s : 吸水・排水各過程での飽和体積含水率 (θ_{sw}, θ_{sd}), α, n, m : 吸水・排水各過程での VG 定数 (α_w, n_w, m_w), (α_d, n_d, m_d) である.

室内で行った土柱法や加圧法により得られた水分特性値は, ほぼ両主曲線内に包含される結果となった.

また, 水分特性履歴に Luckner らが提案したモデルを用い, 封入空気の影響を考慮した不飽和浸透流解析を行ったところ, 図 9 に示したように降雨による体積含水率の増加や高含水状態を保持しながらの排水挙動を良好に再現できた.



P1~P6 : 土壌水分計 単位(mm)

P6 : テンシオメーター

図 7 人工盛土概要図

--- VGフィット排水 — VGフィット吸水
 △ 土柱法排水 ▲ 土柱法吸水
 ○ 加圧法排水 ● 加圧法吸水

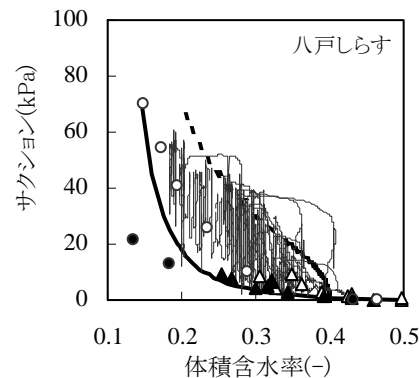


図 8 八戸しらすの水分特性履歴

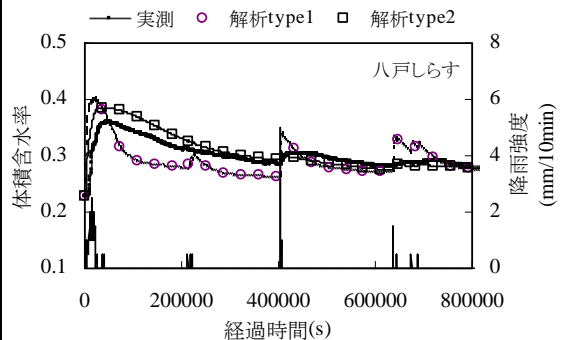


図 9 八戸しらす盛土の体積含水率の実測値と解析値の経時変化

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 2 件)

① 清原雄康, 風間基樹, 渦岡良介: 水分特性履歴を考慮した火山灰質盛土の降雨時浸透特性, 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集, pp.181-184, 2007.

② 清原雄康, 風間基樹: 火山灰質粗粒土からなる野外盛土の水分移動モニタリング, 土木

学会論文集C, Vol.64, No.3, pp. 519-531, 2008.

〔学会発表〕(計3件)

①清原雄康, 風間基樹: 攪乱不攪乱八戸ロームの不飽和せん断強度特性, 第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表講演集, pp.759-760, 2007年7月6日, 名古屋国際会議場にて.

②清原雄康, 風間基樹: 不飽和三軸試験における攪乱・不攪乱八戸ロームの間隙比と水分特性履歴, 第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集, pp.759-760, 2008年7月9日, 広島国際会議場にて.

③清原雄康, 風間基樹: 基底応力・サクションが八戸ロームの体積変化挙動に及ぼす影響, 第63回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-455, 2008年9月11日, 東北大学にて.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清原 雄康 (KIYOHARA YUKOH)
八戸工業高等専門学校・建設環境工学科・
助教
研究者番号: 20369911

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし