

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 7 月 1 日

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：平成 22 年度～平成 24 年度

課題番号：22560497

研究課題名（和文） 降雨と地震の複合作用に対する盛土安定性能評価のための基礎的研究

研究課題名（英文） Evaluation of safety for embankment due to rain fall and earth quake

研究代表者 西村 友良 (NISHIMURA TOMOYOSHI)

足利工業大学・工学部・教授

研究者番号：00237736

研究成果の概要（和文）：研究成果として水分特性曲線は不飽和土の有効応力解析に不可欠であること。不飽和土の安定性評価には浸透作用およびサクシオン载荷によるコラプス量の把握が必要。繰返し载荷時の不飽和状態の過剰間隙水圧の発生は小さく、不飽和状態から再度浸透作用を受けた土は液状化破壊を示した。また加圧膜法によるサクシオン制御を行い、規準化されている加圧板法では得られない高い測定技術の蓄積が得られた。

研究成果の概要（英文）：This study obtained as followings; SWCC is useful to conduct effective stress analysis for unsaturated soils. Collapse behavior performed during seepage and applying of suction that influence to unsaturated soil properties. At cyclic loading triaxial tests under undrained conditions, excess pore-water pressure occurred a few. Other hands, unsaturated soils due to seepage described that excess pore-water ratio approached to 1.0 and took a failure as fully saturated soil. Also suction control technique was developed through this test program.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
23 年度	900,000	270,000	1,170,000
24 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：土木工学

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 サクシオン 繰返し三軸試験 液状化 降雨浸透

1. 研究開始当初の背景

気候変動によって集中豪雨の多発や予測

を上回る時間的降雨量が発生し、土砂災害に対する対策がこれまで以上に求められてい

る。さらに我が国は地震被害への対策も必要であり、近年“降雨浸透と地震の複合作用に対する土構造物の強化対策が強く求められている。土構造物の中で斜面を有する盛土内部は不飽和状態である。不飽和土は土粒子、間隙空気、間隙水によって構成されている。不飽和土中にはサクシオンが作用し、サクシオンが不飽和土のせん断強さ、体積変化、透水性などの工学的性質に深い関わり合いがある。不飽和土の工学的性質の解明の重要性が高まる中で特に“降雨浸透による崩壊の予測”と“降雨浸透後の地震に対する性能評価の検証”は盛土の弱点箇所・危険個所の抽出、防災の観点からも重要である。

表1 試料の物理的特性

土粒子の密度 ρ_s/cm^3	2.65
含水比 %	10.0
乾燥密度 ρ_d/cm^3	1.387
間隙比	0.91
飽和度 %	29.1
最大乾燥密度 ρ_{dmax}/cm^3	1.59
最適含水比 %	17.0

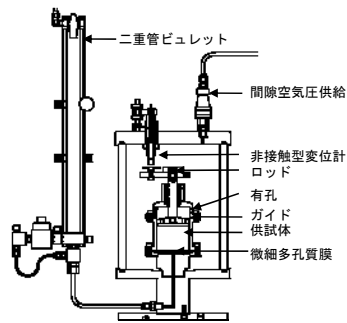


図1 水分特性曲線測定装置

表2 膜の物性

材質	ポリエーテルスルホン
膜厚 μm	140
孔径 μm	0.45
空気侵入値 kPa	250
飽和透水係 m/sec	5.19×10^{-8}

2. 研究の目的

“降雨浸透による崩壊の予測”と“降雨浸透後の地震に対する性能評価の検証”は盛土の弱点箇所・危険個所の抽出、防災の観点からも重要である。本研究では不飽和土を対象に不飽和非排気・非排水三軸圧縮試験および非排気・非排水状態の不飽和繰返し三軸試験を行い、土の保水性と単調載荷・繰返し載荷時の強度特性を関連付けて堤防安定強化対策

のための基礎研究を行う。また加圧板法に代わる加圧膜法によって土の水分特性曲線を測定し、不飽和土の有効応力解析に役立てるとともにサクシオン制御を伴う不飽和土の繰返し三軸試験測定技術の蓄積を試みる。

3. 研究の方法

本研究の主な試験は土の保水性試験、不飽和非排気・非排水三軸圧縮試験（単調載荷試験）、不飽和非排気・非排水繰返し三軸試験、不飽和土に浸透作用を行い、さらには見かけ飽和状態の土を対象に非排気・非排水状態の繰返し三軸試験を実施した。

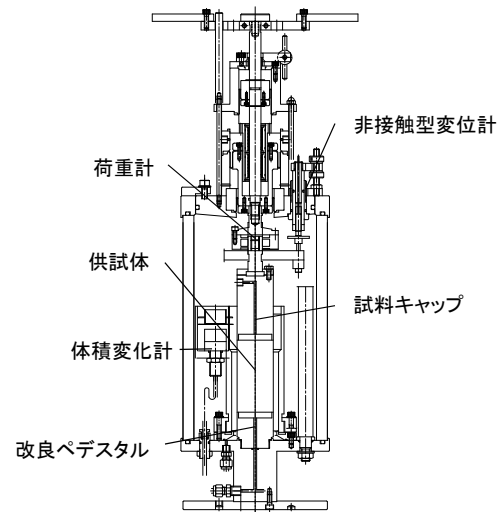


図2 繰返し三軸試験機の三軸室

実験に用いた試料は当初、砂質土を対象と考えたが、地震被害を受ける盛土は全てが砂質土ではなく、細粒分を含む土質材料を選択することで、本研究の成果が防災・減災のため広く社会に寄与すると判断した。実験計画では非塑性シルトを用いた。さらに研究代表者が知る限りでは、砂質土に関する液状化現象の研究報告に比べて細粒分を含む材料の不飽和状態の研究報告は見当たらない。試料の非塑性シルトの諸量を表1に示す。試料の含水比を10%に調整し所定の乾燥密度になるように静的に締固めた。

保水性試験では図1の加圧膜法対応水分特性曲線測定装置を用いた。使用した膜は微細多孔質膜と呼ばれ表2に物性を示す。

単調載荷試験と繰返し載荷試験はともに不飽和土用三軸圧縮試験機、不飽和土用繰返し三軸試験機を使用した。不飽和土用繰返し三軸試験機の三軸室を図2に示す。構成は二重セル式三軸室、加圧膜法用ベDESTAL、体積変化計、圧力制御装置、二重管ビュレット等からなる。間隙水圧計は三軸室外部に設けたが、間隙空気圧計の設置箇所については、可能な限り管路中の空気量が少ない方が良

いと考え三軸室内に設けた。また電磁弁によって管経路の開閉制御を行った。不飽和繰返し三軸試験機のその他の性能は次のようである。空圧サーボ式応力制御荷方式、応力制御容量 5kN、荷波形正弦波、荷周波数範囲 0.001Hz から 2Hz、低サクシオン荷制御のため低容量レギュレータ使用。制御ソフトウェア PCD-30A (共和電業) によるデータ集録である。

改良ペダスタル中央に微細多孔質膜を置きプレートと Oリングとで挟む。研究代表者は、土の水分特性曲線の測定を通じて微細多孔質膜とセラミックディスクの比較を行い、

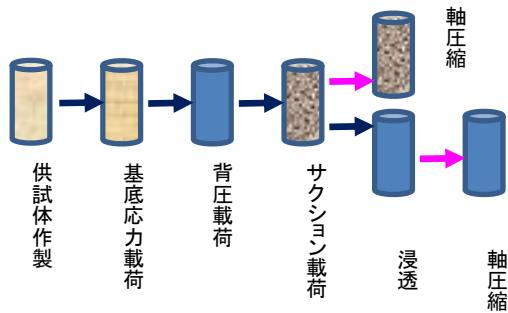


図3 試験手順

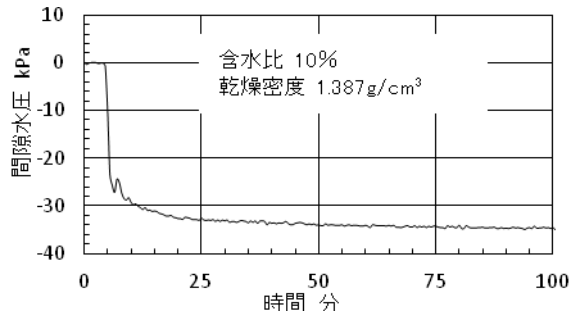


図4 初期サクシオンの測定

微細多孔質膜の方がサクシオン平衡に至る時間が大幅に短縮されることを確認していた。

試験手順を図3に示す。供試体を作製(①)し三軸室に設置した後、供試体に所定の基底応力を荷(②)、100kPaの背圧を荷(③)して有効拘束圧で見かけ飽和状態とした。その後基底応力を一定に保ったまま、加圧膜法でサクシオンを荷(④)した。再度、水頭差 50cm の浸透作用を供試体に少なくとも 24 時間以上与え、見かけ飽和状態に戻した(⑥)。ここで、見かけ飽和状態とは供試体に背圧または浸透作用を与えた後、サクシオンがゼロであっても飽和度が 100%未満の状態のこととした。

強度定数(せん断抵抗角と見かけの粘着力)から繰返し荷試験時の破壊規準線を求

めるために試験手順⑥の後、非排気・非排水条件三軸圧縮試験を実施した(⑦)。比較のために試験手順④でサクシオンを制御した後、基底応力が異なる非排気・非排水条件の三軸圧縮試験を実施している。ひずみ速度は毎分 0.013%とした。また非排気・非排水条件の繰返し荷試験は⑦の段階で実施した。初期繰返し応力振幅比は 0.25 を主体に、荷周波数は 0.1、0.5、1.0Hz、サンプリング周波数 50Hz とした。供試体作製直後の供試体の初期サクシオンを測定した。間隙水圧計の計測値の変化を図4に示す。75分以降はほぼ平衡状態と判断でき、供試体の初期サクシオンを 34.6kPa とした。

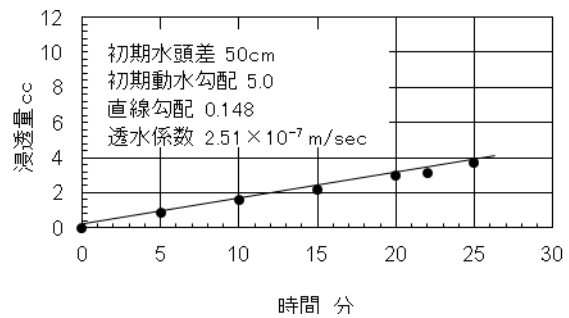


図5 浸透量の経時変化

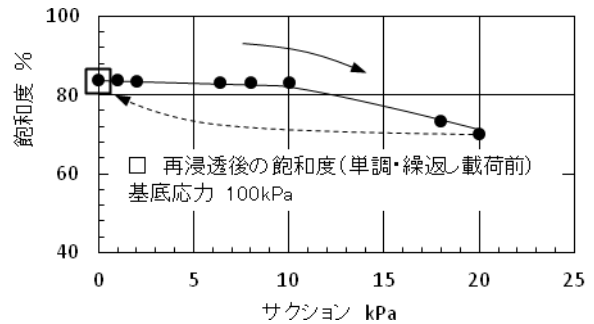


図6 水分特性曲線(飽和度の変化)

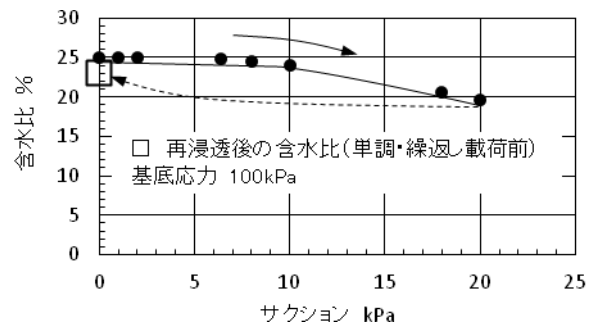


図7 水分特性曲線(含水比の変化)

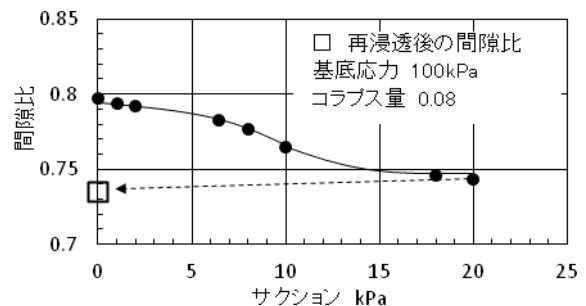


図8 水分特性曲線（間隙比の変化）

水頭差 50cm の浸透作用を供試体に与え、透水係数を測定した。浸透量の経時変化を図5に示す。経過時間と浸透量の関係に直線性が保たれており、得られた透水係数は $2.51 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ であった。

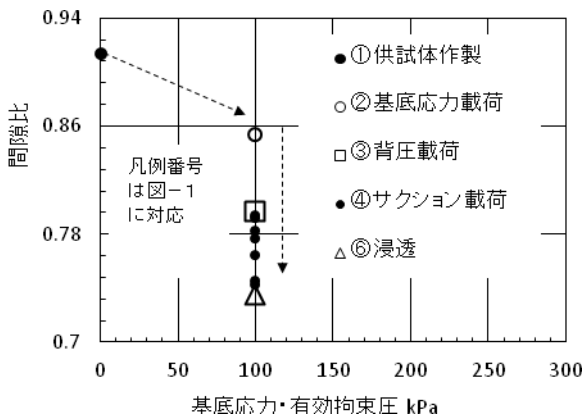


図9 試験手順に沿った間隙比の変化

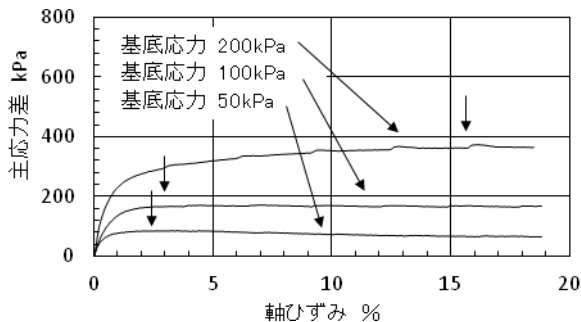


図10 応力-ひずみ曲線

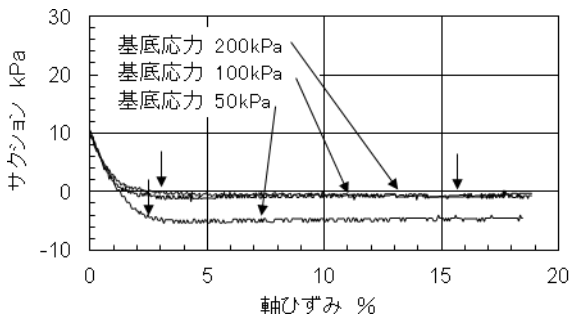


図11 サクシオン-軸ひずみ曲線

4. 研究成果

4.1 水分特性曲線とコラプス現象

図6～8に乾燥過程の水分特性曲線を示す。サクシオン0kPaにおける飽和度が83.9%であった。サクシオンが0kPaから10kPaまで飽和度の低下は非常に小さい。10kPa以後、飽和度は低下しサクシオン20kPaにおいて70%近くまで低下している。再び、供試体に水浸作用を与え、0kPaまでサクシオンを低下すると飽和度は83.4%であり、飽和度100%に至ることはなく、見かけ飽和状態であった。図7は含水比の変化を示す。また、図8にはサクシオン増加・減少による間隙比の変化を示す。サクシオン増加とともに減少し、サクシオン20kPaにおいて0.743まで低下した。

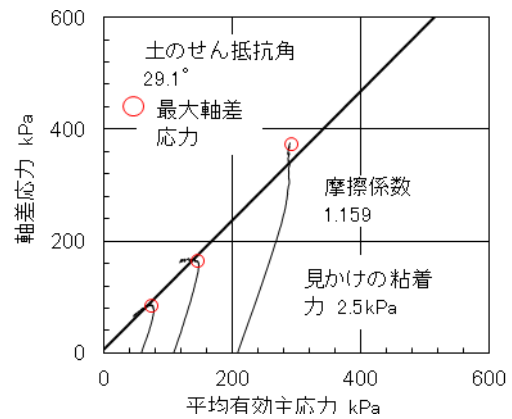


図12 有効応力経路（不飽和状態）

表3 強度定数

	ン 10kPa	浸透作
係	1.159	1.2
	29.1	0.8
力 kPa	2.5	0

再び、供試体に浸透作用を与えるとコラプス現象によって0.735まで体積収縮を起こしている。さらに図9に試験手順に沿った間隙比の変化を示している。間隙比はどの過程においても減少し、軸圧縮前（単調載荷前、繰返し載荷前）には供試体の乾燥密度が増加しており、間隙比の変化を測定することが重要である。

4.2 単調載荷試験結果

図10にサクシオン10kPaの場合の応力-軸ひずみ曲線を示す。基底応力が大きいほど、最大主応力差を示す軸ひずみ量が增大している。図11にサクシオンの変化を示している。10kPaの初期サクシオンはせん断が開始されると低下を見せている。基底応力の大きさに関わらず軸ひずみ量が1.0%近くでサクシオンはゼロに近づき、せん断過程終了までサクシオンがゼロ付近の値を保っている。ところが、基底応力50kPaの場合は0kPaより

も小さくなっている。このようなサクシオン値が負値を示したのは計測された間隙空気圧よりも間隙水圧が上回ったためである。

図 12 に平均有効主応力と主応力差ならびに破壊規準線を示す。サクシオン 10kPa の場合は Bishop の不飽和土の有効応力式の χ を有効飽和度に置き換え有効応力を算定した。最大主応力差の値に着目して破壊規準線を描き、それぞれの強度定数を求め表 3 にとりまとめた。サクシオン 10kPa の場合、土のせん断抵抗角は 29.1° 、浸透後は 30.8° であり、浸透後の方が 1.7° 大きい。見かけの粘着力については浸透後の場合、0kPa。サクシオン 10kPa の場合、サクシオン効果によって

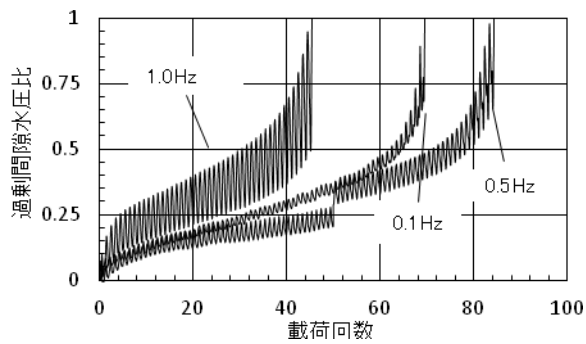


図 13 過剰間隙水圧比の変化

表 4 過剰間隙水圧比 1.0 の繰返し特性

载荷		载荷	軸	軸	応力
0.1	94	9	4.8	5.	0.21
0.5	1	84	2.8	.	0.19
1.0	45	45	1.	1.	0.2

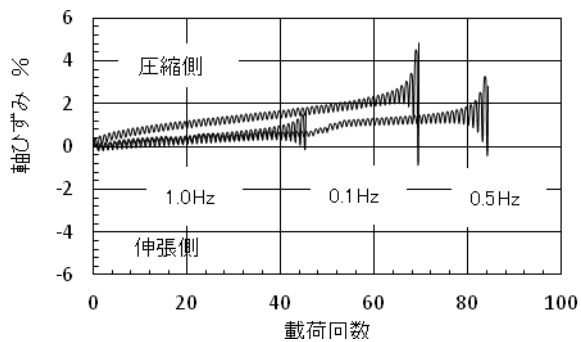


図 14 軸ひずみの増加と载荷周波数

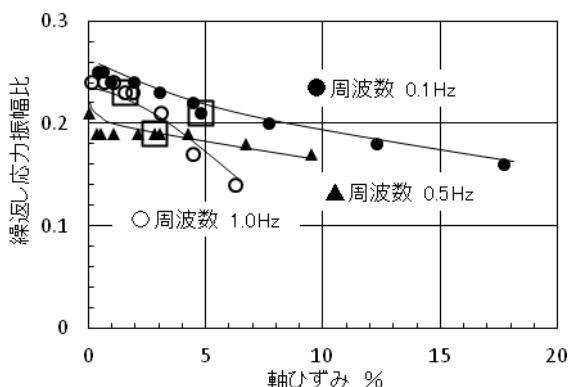


図 15 軸ひずみと繰返し応力振幅比の関係

2.5kPa の値が求められた

4.3 繰返し三軸試験結果

非排気・非排水条件で繰返し载荷を行い、過剰間隙水圧比と繰返し载荷回数との関係を図-12 に示す。表 4 には過剰間隙水圧比が

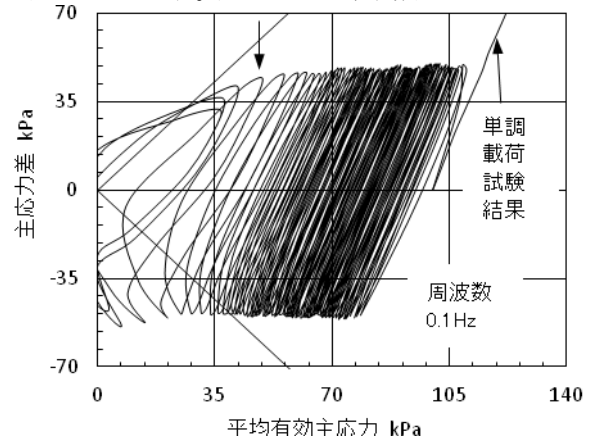


図-16 平均有効主応力と主応力差の関係(载荷周波数 0.1Hz)

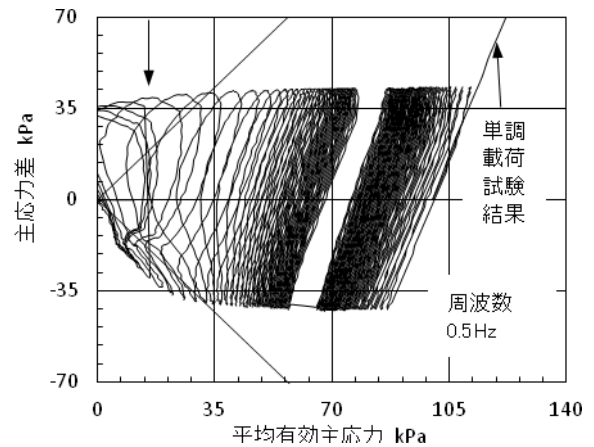


図 17 平均有効主応力と主応力差の関係(载荷周波数 0.5Hz)

1.0 に到達した時の载荷時間、载荷回数、軸ひずみ、軸ひずみ幅、繰返し応力振幅比を示す。過剰間隙水圧は繰返し载荷開始とともに発生している。载荷周波数が 1.0Hz よりも小さいと過剰間隙水圧比が 1.0 に至る载荷回数が増大するが、0.5Hz の方が 0.1Hz よりも大きいので载荷周波数と载荷回数との間には

定性的な関係を見出すことはできない。

軸ひずみの変化を図 14 に示す。載荷周波数に関わらず軸方向の変形が圧縮側で進行し過剰間隙水圧比 1.0 付近で軸ひずみが急増している。

圧縮側の繰返し応力振幅比と軸ひずみの関係を図 15 に示す。載荷周波数 0.1Hz と 0.5Hz の場合は繰返し応力振幅比が軸ひずみとともにゆるやかに減少する。載荷周波数 1.0Hz の場合は、軸ひずみに対する繰返し応力振幅比の低下が比較的大きいが、これらの挙動に与える載荷周波数の影響を定性的に關係付ける結果ではない。

図 16～18 に平均有効主応力と主応力差の關

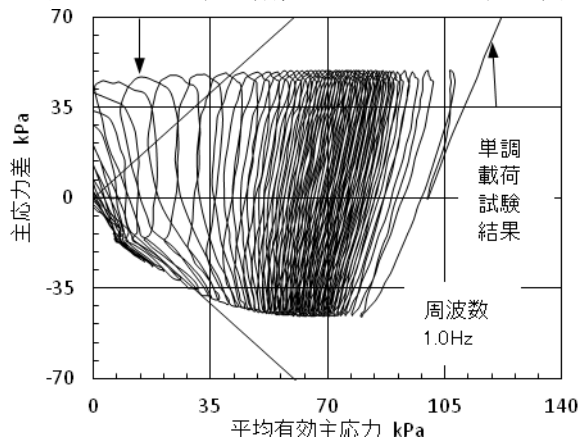


図 18 平均有効主応力と主応力差の關係 (載荷周波数 1.0Hz)

係を示す。ただし、不飽和状態から浸透を受けた場合の結果である。繰返し載荷が始まると、有効応力は減少を示している。載荷周波数が 0.1Hz と 1.0Hz の場合には明確である。載荷周波数が 0.5Hz と 1.0Hz の場合に、平均有効主応力に対する圧縮側の主応力差は破壊規準線よりも大きな値を示している。しかし、伸張側では破壊規準線に沿って平均有効主応力が減少を示している。一方、載荷周波数が 0.1Hz の場合、過剰間隙水圧比 1.0 の時点の応力状態は圧縮・伸張破壊規準線で囲まれた内側にある。一方、不飽和状態 (サクシオン 20kPa) の非排気・非排水条件・繰返し三軸試験では明確な破壊は確認されなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕

Nishimura, T.: Application of micro-porous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, 第 18 回国際地盤工学会議, (査), 2013. (掲載決定)

Nishimura, T.: Liquefaction test of compacted, unsaturated soil and saturated

soil with controlling matric suction, The 5th INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SYMPOSIUM IGS-Incheon 2013, (査), pp.279-284, 2013. 西村友良・松本正文: 不飽和・飽和繰返し三軸試験方法の試み 大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム, (査), pp.117-124, 2013.

Nishimura, T., J. Koseki 他 2 名: Micro-porous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, Geotechnical Testing Journal, ASTM, (査), Vol. 35, pp.201-208, 2012.

Nishimura, T.: Evaluation of effective stress of an unsaturated soil under cyclic loading, Proceedings of the International symposium on Earthquake-Induced Landslides, (査), pp.537-546, 2012.

Nishimura, T., Koseki, J. & Rahardjo, H.: Determination of air entry value for different compacted unsaturated soils, Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, (査), pp.604-609, 2012.

〔学会発表〕

松本正文・西村友良・古関潤一: 不飽和履歴を受けた不飽和土の繰返し三軸試験結果, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013 年. (掲載決定)

松本正文・西村友良: 加圧膜法を用いた不飽和繰返し非排水三軸試験, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.645-646, 2012 年.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 友良 (Nishimura Tomoyoshi)

研究者番号: 00237736

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

豊田浩史 (Toyota Hirofumi)

研究者番号: 90272864