

Ⅲ-40

不飽和砂質土の繰返しせん断変形挙動

東北大学大学院 学○ 海野 寿康・高村浩之

東北大学大学院 正 仙頭紀明・渦岡良介・風間基樹

1. はじめに

砂の飽和度が低下すると液状化抵抗が増加することは、液状化研究の初期から知られている^{1), 2), 3)}。これらの研究は、きれいな砂における飽和度100-70%の三軸試験結果である。不飽和供試体を用いた従来の試験は、液状化強度の変化に着目したものがほとんどであり、繰返しせん断中のサクシヨンの変化については、検討されていない。

本稿では、飽和及び不飽和状態における繰返し三軸試験の結果を示し、不飽和砂質土の繰返しせん断変形特性と繰返し中のサクシオンについて考察する。

2. 試験試料

土は、2003年三陸南地震において崩壊した築館町館下地区崩壊現場⁴⁾より採取した土（以降、築館土と称する）を用いた。築館土の土粒子密度と粒度分布を表-1に示す。土粒子の密度 ρ_s は 2.478g/cm^3 である。また、細粒分を含むが塑性指数はN.Pであり非塑性である。図-1は築館土の水分特性曲線である。比較のために豊浦砂をあわせて示す。築館土の水分特性はサクシオン $s=17\text{-}20\text{kPa}$ 付近が空気侵入値(AEV)である。土がこの値よりも低い含水状態にある場合、AEVの値よりも高い含水状態と比較し、より大きなサクシオンを発揮ようになる。同一サクシオン下における築館土は豊浦砂と比べ含水比が高く、砂質土としては保水性が良い土である。

表-1 築館土の土粒子密度と粒度分布

土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	粒度分布 (%)				塑性指数
	礫分	砂分	シルト分	粘土分	
2.478	17	53	22	8	N.P

3. 試験概要

室内試験は飽和三軸試験装置と不飽和三軸試験装置を用いた。供試体は作製時に乾燥密度 $\rho_d = 1.2\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w_0 = 35\%$ になるよう調整した後、モールドにスプーンで流し込み作製した。試験は、繰返しせん断をステップ載荷で片振幅0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0%のひずみを各10波づつサイン波で与えるひずみ制御方式である。飽和試験と不飽和試験の試験条件は、下記の通りである。

飽和三軸試験：有効拘束圧 σ'_c は 20kPa である。築館土は細粒分を多く含む土のため、 CO_2 置換と脱気

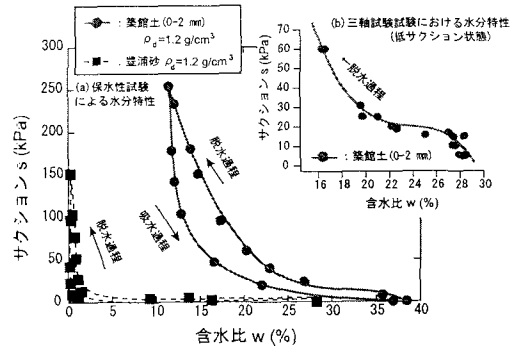


図-1 水分特性曲線

水、バックプレッシャーを 100kPa を与えただけではB値が0.95以上にならない(概ねB値 $=0.4\text{-}0.5$ 程度)。そこで通水時に2重負圧法を用いている。載荷は非排水条件下で行っており、載荷周波数は 0.1Hz である。

不飽和三軸試験：装置は不飽和三軸試験装置(JGS 0527-1998)を繰返しせん断が行えるよう改良した装置を使用している。装置は間隙水圧 u_w と間隙空気圧 u_a を個々に計測できる。供試体下部には空気侵入値 200kPa のセラミックディスクを設置し、ガラス繊維フィルターを介して供試体上部より間隙空気圧を任意に与えている。初期サクシオン値($u_w=0$, u_a を設定)は5, 10, 15, 17, 20, 25, 60 kPaの7ケースとした。初期基底応力 $\sigma_{\text{net}} (= \sigma - u_a)$ は 20kPa であり、供試体作製時の水分状態は、脱水状態である。載荷周波数については、セラミックディスクの透水係数が 10^{-7}cm/s 以下であるため載荷速度によっては間隙水圧が正確に測定できなくなる。そこで予備試験を行い、 0.005Hz と決定した。この試験では、非排気・非排水条件でせん断を与える。

飽和試験、不飽和試験どちらも供試体サイズは直径 5.0cm 、高さ 10cm の円柱形であり、土試料は 2.0mm 以下に粒度調整したものを用いた。

4. 繰返しせん断変形特性

図-2は飽和、不飽和条件下の繰返しせん断付与時のせん断応力-軸ひずみ関係の一例である。飽和させたケース(a)では繰返しせん断によりせん断抵抗が低下、供試体が軟化していることが分かる。この時、過剰間隙水圧比は1.0に達しているため(図-3参照)、い

いわゆる液状化が生じている。対して不飽和供試体であるケース (b) と (c) を見ると、ケース (b) では繰返しせん断により供試体はせん断抵抗の低下が生じ、ひずみ振幅の増加によってひずみ軟化挙動を示す。一方、不飽和の程度が大きい、ケース (c) では繰返しせん断を与えてもひずみ硬化挙動を示している。

図-4 は、ケース (b) と (c) の繰返しせん断時のサクシジョンの履歴である。ケース (b) と (c) どちらも繰返しせん断によってサクシジョンは低下する。ひずみ軟化を示すケース (b) では、サクシジョンは 0kPa 以下となり -16kPa まで低下、試験終了時に -13kPa である。試験終了時の基底応力 σ_{net} が 13kPa であることを考慮すると、いわゆる飽和土に対して定義される有効応力は 0kPa となっている。一方、ひずみ硬化を示すケース (c) ではサクシジョンは低下するが 0 には至らない。

次に累積損失エネルギーを用いて試験結果を整理する。図-5 は累積損失エネルギーの蓄積経過を示したものである。ここで累積損失エネルギーは初期有効拘束圧または初期基底応力で正規化している。飽和状態およびサクシジョンが 5-17kPa の不飽和供試体では累積損失エネルギーは軸ひずみ 2.0% 終了 (载荷 60 回) までなだらかな上昇であるのに対し、初期サクシジョンが 20kPa 以上のものはひずみが 0.8% 以降 (载荷 20 回以降) 急激な上昇をとる。このことから、サクシジョンが 20kPa と 17kPa の供試体のエネルギー吸収性能は著しく異なることがわかる。これは、図-6 の繰返しせん断終了時の累積損失エネルギーと初期飽和度の関係からも読み取れる。すなわち、飽和度の低下とともに累積損失エネルギーは増加傾向にあるが、特にサクシジョンが 20kPa 以上の供試体で著しく累積損失エネルギーが増加する。このサクシジョンが 17-20kPa の状態は図-1 における空気侵入値 (AEV) の値とほぼ一致する。したがって、繰返しせん断による軟化、著しいせん断抵抗の低下を生じさせるような状態は、土中の空気 (あるいは水) の状態に大きく影響を受ける。繰返しせん断によって有効応力が極端に小さく成る状態は、飽和状態からサクシジョンが空気侵入値 (AEV) の状態までであると考えられる。

5. まとめ

本研究から次の結果を得た。

1. 不飽和供試体のサクシジョンは繰返しせん断により低下するが、その低下の程度は飽和度によって異なる。
2. 空気侵入値 (AEV) 以下の初期サクシジョンでは、有

効応力は極端に低い状態になっており、ひずみ軟化を生じる。一方、空気侵入値 (AEV) 以上の初期サクシジョンの供試体では繰返しせん断による軟化挙動をとらない。

3. 空気侵入値 (AEV) を境にして土中の空気の存在形態が変化し、その事によりせん断変形挙動に差が生じたと考えられる。

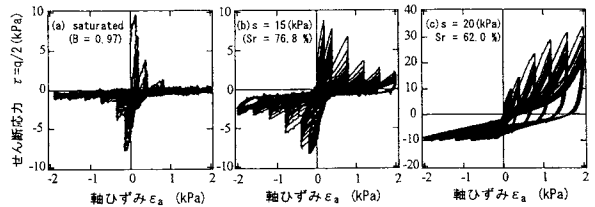


図-2 応力-ひずみ関係

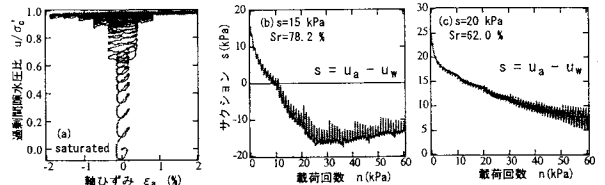


図-3 飽和土における過剰間隙水圧比

図-4 繰返しせん断中のサクシジョン

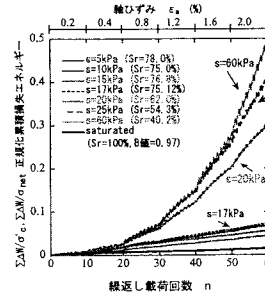


図-5 正規化累積損失エネルギーの蓄積

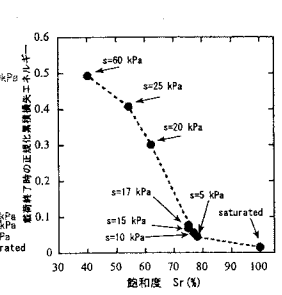


図-6 载荷終了時の累積損失エネルギーと飽和度

参考文献

- 1) 例えば Yoshimi, Y., Yanaka, K. and Tokimatsu, K.: Liquefaction resistance of a partially saturated sand, Soil and Foundations Vol.29, No.2, pp.157-162.
- 2) 社本康広, 後藤 茂: 不飽和砂の液状化抵抗の評価法 (その 1) 繰返しせん断履歴効果を考慮した液状化抵抗の評価法, 第 37 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.1985-1986, 2002.
- 3) 後藤 茂, 社本康広: 不飽和砂の液状化抵抗の評価法 (その 2) 繰返しせん断履歴効果を与えた不飽和砂の液状化試験, 第 37 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.1987-1988, 2002.
- 4) 地盤工学会: 2003 年三陸南沖地震宮城県北部地震災害調査報告書, pp.19-29, 2003.