究 谏 報

研 究速報

砂の液状化過程における弾性的変形特性の変化

Change of Quasi-elastic Deformation Properties during Liquefaction Process of Sands

関 潤 一*·河 上 定 弘**·佐 藤 司* 古 副 Junichi KOSEKI, Sadahiro KAWAKAMI, Takeshi SATO

1. はじめに

地震時の飽和砂の液状化は、体積が一定に保たれる非排 水条件下において、繰返しせん断を受けた砂が塑性的な体 積収縮傾向を示すのに対し、これと釣り合うだけの体積膨 張傾向が有効応力の低下によって生じ、最終的には有効応 力が著しく低下してせん断抵抗がほとんど失われる現象と して説明することができる.後者の体積膨張傾向は.従来 の液状化モデルでは弾性的な変形成分として取り扱われる ことが多い.

そこで、中空円筒供試体を用いた繰返しねじり・三軸試 験装置を新たに製作して豊浦砂の液状化試験を実施し、そ の過程における弾性的な微小変形特性の変化を調べた.同 様な研究を、これまで円柱供試体の軸方向に載荷する三軸 試験により実施してきている^{1),2)}が、今回は中空円筒供 試体に微小なねじりせん断を加えて水平面上のせん断剛性 率を測定した点に特色がある.

2. 試験装置および試験方法

新たに製作した圧力セルと測定装置の模式図を図1に. セル上方に設置した2方向載荷装置の模式図を図2に示 す.

気乾状態の豊浦砂(平均粒径 0.18 mm)を用いて外径 20 cm, 内径 16 cm, 高さ 30 cm の中空円筒供試体を空中 落下法により作成し、飽和させて有効拘束圧 100 kPa まで 等方圧密した後に、非排水状態で繰返しせん断した. Test 6 では軸方向に、Test7ではねじり方向に繰返し載荷を行い 液状化まで至らせた.両試験とも、途中のいくつかの応力 段階において、軸方向およびねじり方向に 0.001%のひず み振幅レベルで微小繰返し載荷を行い、弾性的な微小変形 特性を測定した。

*東京大学生産技術研究所 第5部 **鳥取県庁(元東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻)



3.試験結果

Test 6,7の非排水繰返しせん断中の応力ひずみ関係を それぞれ図 3,4 に示す.図中には、途中で実施した微小 繰返し載荷時の結果の例も示したが、これらの応力ひずみ 関係の傾きから、鉛直方向の非排水ヤング率 E_{vu} と水平面 上の非排水せん断剛性率 G_u を求めた.なお、初期せん断 が作用した状態でねじり方向に微小繰返し載荷を行うと、 図4中に示したように除荷時の応力ひずみ関係に乱れが生 じた.これは載荷装置のねじり方向の剛性が不足していた ためと考えられ、装置の改良を現在行っている.

両試験における E_{vu} と有効鉛直応力 σ_{v} の関係, G_{u} と有 効平均応力 $\sigma_{m}'=(\sigma_{v}'+\sigma_{h}')/2$ の関係を, それぞれ図 5, 6 に示す. ただし, σ_{h} 'は有効水平応力である. 図中には, 等方圧密中に測定した結果もあわせて示したが,同じ応力 レベルにおいては,液状化過程で測定した E_{vu} と G_{u} のほう が,等方圧密中の測定値よりも小さくなる傾向が見られた. これは,供試体の構造が液状化過程において劣化したため と考えられる.

ここで,排水状態でのヤング率がその方向の有効直応力のm乗に比例する関数であるとし,ポアソン比についても応力状態の関数として定式化を行うと,排水鉛直ヤング率 E_vと非排水鉛直ヤング率 E_vの関係は次式により表される³⁾.

$$E_{v} = E_{vu} \frac{1 + 2(aR^{m})^{0.5} v_{0} x}{1 + x}$$
$$x = -\left(\frac{d \sigma_{h}}{d \sigma_{v}}\right) = \frac{1 - 2(aR^{m})^{0.5} v_{0}}{2aR^{m} \left[1 - v_{0} - (aR^{m})^{-0.5} v_{0} + 2(bE_{h}) / (\sigma_{h}^{*}(d_{0} - d_{i}))\right]}$$

ここに、aは初期異方性の程度を示す係数(等方応力状態 における E_v と排水水平ヤング率 E_h の比)、Rは主応力比 (= σ_v'/σ_h')、 v_0 は等方応力状態における排水ポアソン比、 bはメンブレンペネトレーション(以下では MPと称す



51 卷 11 号 (1999.11)

る)の影響を示す係数, d₀と d_iは供試体の外径と内径で ある.

上式の妥当性について検討するために,等方圧密中に測 定した E_v と E_v の比と有効拘束圧 (この場合は $\sigma_v = \sigma_v$) の関係を計算値と比較したものを図7に示す. a=1.1 (Hoque⁴⁾ による), *m*=0.6 (等方圧密中のE_の測定値に基 づく)とし、さらに $b=1.7 \times 10^{-3}/\log_{2} 10$ (後藤⁵⁾ による) として MPの影響も考慮することにより、E_w/E_vの実測値 に見られる傾向が説明できることがわかる.これは、同一 の応力状態でもヤング率は排水条件によって異なり、さら に σ_v が等しく E_v が同じ場合でも E_{vn} は σ_h の影響を受けて 変化することを示している.一方.間隙水がせん断応力を 伝達しないためにせん断剛性率は排水条件の影響を受け ず,等方圧密中に測定した G。は同一の応力状態で測定し た排水せん断剛性率Gと一致した.

繰返しせん断中に測定した Emから上式を用いて推定し



等方応力状態

たE,を,等方圧密中のE,の測定値と比較したものを図8 に示す. 同図と図6から,同じ応力レベルにおいては Test 7のねじり試験中 ($\sigma_{v}'=\sigma_{h}'$) および Test 6 における三軸伸 張状態 (σ_{v} '< σ_{b} ') のほうが, Test 6 の三軸圧縮状態 $(\sigma_v' > \sigma_h')$ よりも $E_v \ge G_u$ の低下率が大きくなる傾向が見 られる.これは、供試体を空中落下法で作成したために、 鉛直方向の圧縮荷重に対しては構造が比較的安定している のに対し、それ以外の方向からの荷重に対しては構造が損 傷を受けやすいためと考えられる.

繰返しせん断中の E.の推定値および G.の測定値を,等 方圧密中の平均的な関係 $(E_v \sim \sigma_v', G_u \sim \sigma_m')$ を用いて 同一の応力状態において算定した値で正規化した結果を図 9,10に示す.ばらつきが大きいものの、全般に、有効応 力レベルが低下して液状化に近づくほど弾性的な変形係数 の低下率が大きくなり、特に有効応力が数 kPa 以下になる と著しく低下する傾向のあることがわかる。これは、前述 した構造の損傷が数 kPa 以下の有効応力レベルで特に著し く進行するためと考えることもできるが、このような超低 拘束圧下では、供試体の自重の影響により供試体内の有効 応力分布の不均一性も無視できない大きさとなっている点 に留意する必要がある.また、以上においてはせん断剛性 率が基本的には σ_m の関数であるとして整理を行ったが、 この点については十分な検討を行っておらず、より複雑な モデルの提案もなされている⁶⁰ため、今後も検討を続け たい.

4.まとめ

砂の液状化試験中に測定した鉛直方向のヤング率と水平 面上のせん断剛性率は,等方圧密中よりも低下しており, 繰返しせん断によって砂の構造が損傷していると考えられ ることを示した.弾塑性モデルを用いて液状化解析を行う 場合には,このような弾性的変形特性の変化の影響を適切 に考慮する必要があると考えられる.

装置製作と試験の一部を担当した永山浩氏(日本鋼管工 事,元日本大学生産工学部学生)に深謝の意を表する. (1999年8月10日受理)

参考文献

- 濱谷正司,古関潤一,龍岡文夫,真栄城徳泰:豊浦砂の非 排水繰返し三軸試験における弾・塑性的変形特性,第24 回地震工学研究発表会,pp.425-428,1997.
- 2) 古関潤一, 真栄城徳泰, 浦野泉, 佐藤剛司, 太田行: 細粒 分を有する砂質土の液状化過程における弾性的変形特性, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム 発表論文集, 地盤工学会, pp. 385-390, 1999.
- 3) 龍岡文夫,小高猛司:地盤材料の三軸試験における非排水 弾性変形特性について、土木学会第51回年次学術講演会、 pp.98-99,1996.
- Hoque, E.: Elastic deformation of sands in triaxial tests, 東京大 学博士論文, 1996.
- 5) 後藤聡: Strength and characteristics of granular materials in triaxial tests, 東京大学博士論文, 1986.
- 6) 龍岡文夫,石原雅規,内村太郎:直交亜疑似弾性モデルと その諸性質,第34回地盤工学研究発表会,pp.369-370,1999.