



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载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载荷を行うと、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。これは载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  $\sigma'_v$  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、 $\sigma'_h$  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  $E_{vu}$  の関係は次式により表される<sup>3)</sup>。

$$E_v = E_{vu} \frac{1 + 2(aR^m)^{0.5} v_0 \alpha}{1 + \alpha}$$

$$\alpha = -\left(\frac{d\sigma'_h}{d\sigma'_v}\right) = \frac{1 - 2(aR^m)^{0.5} v_0}{2aR^m \left[1 - v_0 - (aR^m)^{0.5} v_0 + 2(bE_h) / (\sigma'_h(d_0 - d_i))\right]}$$

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（ $=\sigma'_v / \sigma'_h$ ）、 $v_0$  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

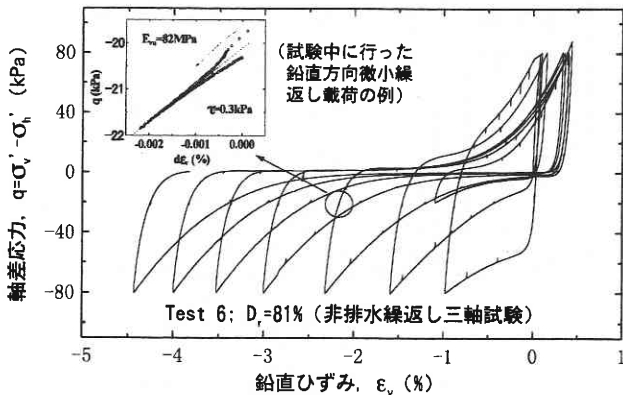


図 3 Test 6 の応力ひずみ関係

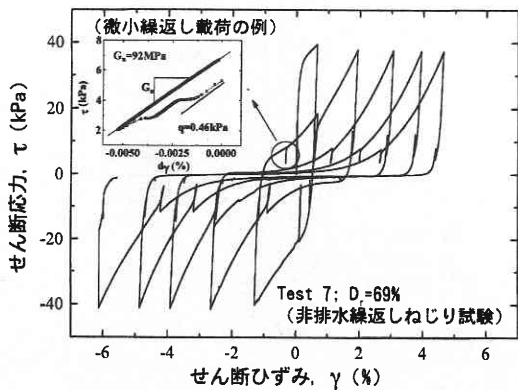


図 4 Test 7 の応力ひずみ関係

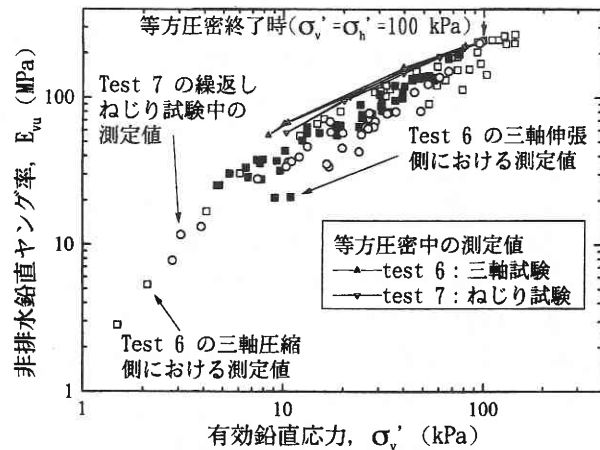


図 5 非排水ヤング率と有効鉛直応力の関係

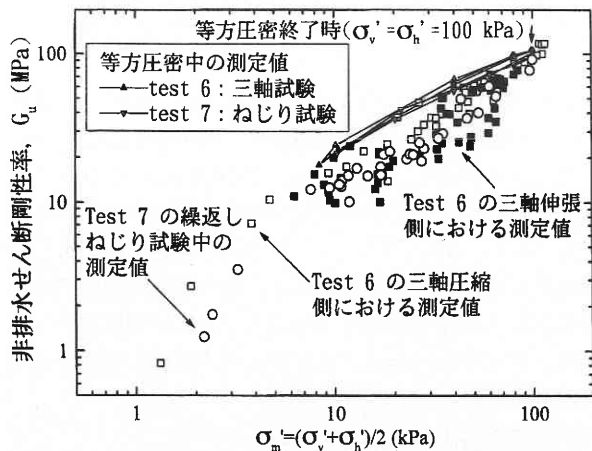


図 6 非排水せん断剛性率と有効平均応力の関係

る)の影響を示す係数,  $d_0$  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  $E_{vu}$  と  $E_v$  の比と有効拘束圧 (この場合は  $\sigma_v' = \sigma_h'$ ) の関係を実験値と比較したものを図7に示す。  $a=1.1$  (Hoque<sup>4)</sup> による),  $m=0.6$  (等方圧密中の  $E_v$  の測定値に基づく) とし, さらに  $b=1.7 \times 10^{-3} / \log_{10}$  (後藤<sup>5)</sup> による) としてMPの影響も考慮することにより,  $E_{vu}/E_v$  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  $\sigma_v'$  が等しく  $E_v$  が同じ場合でも  $E_{vu}$  は  $\sigma_h'$  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  $G_u$  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  $E_{vu}$  から上式を用いて推定し

た  $E_v$  を, 等方圧密中の  $E_v$  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 ( $\sigma_v' < \sigma_h'$ ) のほうが, Test 6の三軸圧縮状態 ( $\sigma_v' > \sigma_h'$ ) よりも  $E_v$  と  $G_u$  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  $E_v$  の推定値および  $G_u$  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, 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

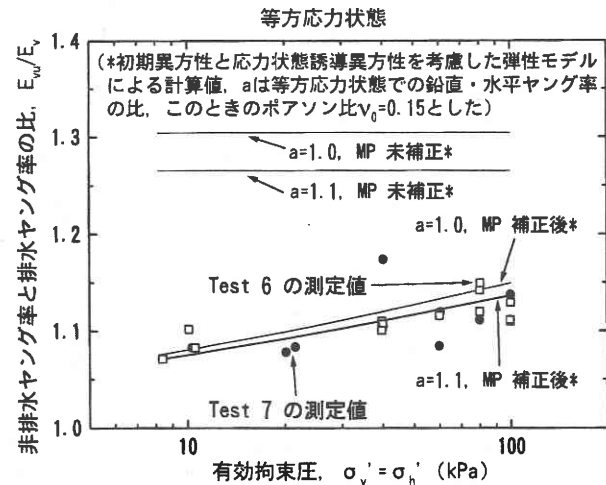


図7 等方圧密中の非排水・排水ヤング率の比

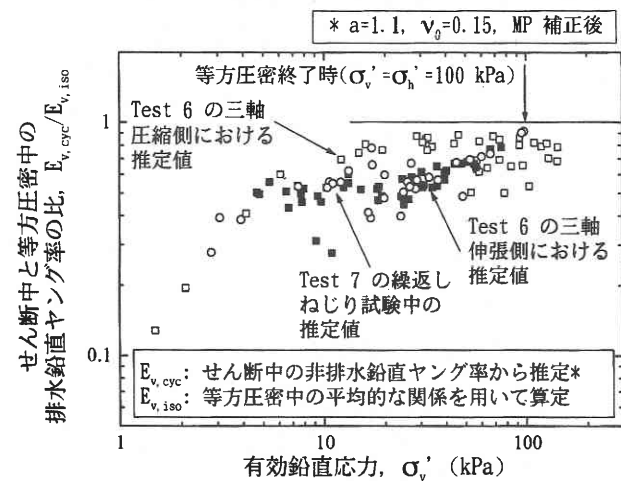


図9 繰返しせん断中と等方圧密中の排水ヤング率の比

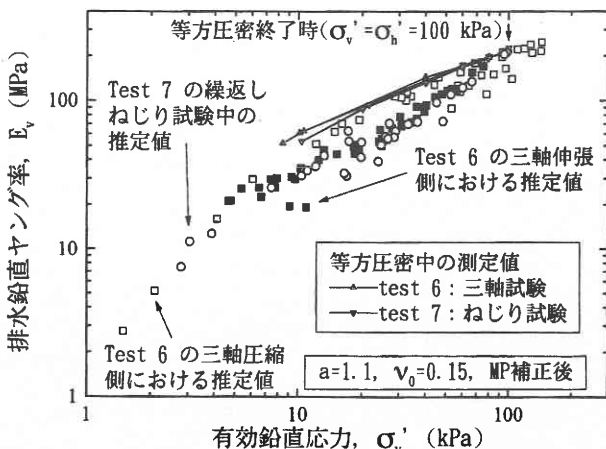


図8 排水ヤング率と有効鉛直応力の関係

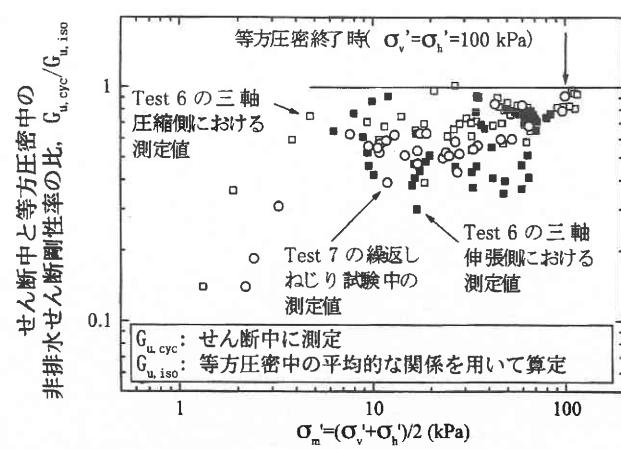


図10 繰返しせん断中と等方圧密中の非排水せん断剛性率の比

## 研 究 速 報

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  $\sigma_m$  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<sup>6)</sup> 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。

(1999年8月10日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 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.
- 4) 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: 直交垂擬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.