

Ⅲ-A70

液状化過程における豊浦砂の塑性的変形特性

鳥取県 正会員 ○河上定弘  
 日本鋼管工事株式会社 正会員 永山 浩  
 東京大学生産技術研究所 正会員 古関潤一

**1. はじめに** これまでに液状化過程における豊浦砂の弾・塑性的変形特性に関する研究を三軸試験装置を用いて行ってきた<sup>1)</sup>。ここでは、中型中空ねじり・三軸試験装置を用いて非排水繰返しねじり試験を実施し、ねじり方向及び鉛直方向の微小繰返し载荷により直接求めた弾性的変形特性<sup>2)</sup>、Rowe のストレス・ダイレタンシー則、およびメンブレンペネトレーション(以後 MP と称する)量の評価式<sup>3)</sup>を非排水試験の等体積条件に適用することで塑性的変形挙動を間接的に求め、その特性について検討した。

**2. 試験方法** 気乾状態の豊浦砂を用いて、空中落下法で外径  $d_o=20\text{cm}$ ・内径  $d_i=16\text{cm}$ ・高さ  $30\text{cm}$  の供試体を作製し飽和させた。有効拘束圧  $100\text{kPa}$  で等方圧密した後、繰返しせん断応力片振幅を  $40\text{kPa}$  として有効鉛直応力  $\sigma_v'$  が有効水平応力  $\sigma_h'$  と等しくなるように制御した非排水繰返しねじり試験を実施した。試験中にねじり方向および鉛直方向に微小繰返し载荷を行い、液状化過程におけるせん断剛性率  $G$  と鉛直ヤング率  $E_v$  を直接求めた。試験方法と測定装置の詳細については文献 2) を参照されたい。なお、以下の検討では供試体中央高さでの各応力値を用いている。

**3. 豊浦砂の非排水繰返しねじり試験における塑性的変形挙動モデル**

(1)せん断ひずみの塑性成分  $G$  を  $\sigma_m'=(\sigma_v'+\sigma_h')/2$  の関数であると仮定し(式(1))、弾性せん断ひずみ増分  $d\gamma^e$  を実測したせん断応力増分  $d\tau$  と  $G$  から式(2)で求め、塑性せん断ひずみ増分  $d\gamma^p$  を実測した全ひずみ増分  $d\gamma$  から  $d\gamma^e$  を差し引くことで算出する。

$$G = G_0 (\sigma_m' / \sigma_0')^n \text{ --- (1)}, \quad d\gamma^e = d\tau / G \text{ --- (2)}, \quad d\gamma^p = d\gamma - d\gamma^e \text{ --- (3)}$$

ここで、 $G_0$ 、 $\sigma_0'$  は正規化するための基準値で、 $n$  は応力状態依存性を考慮するための乗数であり、等方圧密中の測定値に基づいて  $G_0=5.47\text{MPa}$ 、 $n=0.632$  とした。

(2)体積ひずみの塑性成分  $d\tau$  に対する体積ひずみ増分  $d\varepsilon_{vol}$  を弾性成分  $d\varepsilon_{vol}^e$ 、塑性成分  $d\varepsilon_{vol}^p$  および MP による成分  $d\varepsilon_{MP}$  に分け、さらに  $d\varepsilon_{vol}^p$  をダイレタンシーに起因する成分  $(d\varepsilon_{vol}^p)_{dila}$  と平均有効主応力の変化に起因する成分  $(d\varepsilon_{vol}^p)_p$  に分けて式(4)で与える。

$$d\varepsilon_{vol} = d\varepsilon_{vol}^e + d\varepsilon_{vol}^p + d\varepsilon_{MP} = d\varepsilon_{vol}^e + (d\varepsilon_{vol}^p)_{dila} + (d\varepsilon_{vol}^p)_p + d\varepsilon_{MP} \text{ --- (4)}$$

$d\varepsilon_{vol}^e$  は軸対称直交異方性を仮定して図 1 中に示した式で算出する<sup>1)</sup>。必要なパラメータの値は等方圧密中の  $E_v$  の測定値および既往の試験結果に基づいて設定した。また、 $d\varepsilon_{MP}$  は  $d\varepsilon_{MP}=4b \cdot d\sigma_h' / \{\sigma_h'(d_o-d_i)\}$  で与えられる。 $b$  は MP の程度を表す材料パラメータで後藤<sup>3)</sup>の試験結果に基づき  $b=1.7 \times 10^{-3} / \ln 10$  とした。さらに、 $(d\varepsilon_{vol}^p)_{dila}$  を以下のように求めることで非排水試験時 ( $d\varepsilon_{vol}=0$ ) の  $(d\varepsilon_{vol}^p)_p$  が間接的に評価できる。

$(d\varepsilon_{vol}^p)_{dila}$  は、ひずみ増分のモール円から式(5)の2次方程式で表される。

$$\left( \frac{1}{\tan \psi} \right)^2 \cdot \left\{ \frac{(d\varepsilon_{vol}^p)_{dila} - d\varepsilon_2^p}{2} \right\}^2 + 2 \cdot d\varepsilon_v^p \cdot \left\{ \frac{(d\varepsilon_{vol}^p)_{dila} - d\varepsilon_2^p}{2} \right\} - \{(d\varepsilon_v^p)\}^2 + \left( \frac{d\gamma^p}{2} \right)^2 = 0 \text{ --- (5)}$$

式(5)中のダイレタンシー角  $\psi$  は Rowe のストレス・ダイレタンシー則から塑性せん断ひずみ増分  $d\gamma^p$  の符号に応じて以下の2通りの式で、塑性鉛直ひずみ増分  $d\varepsilon_v^p$  は  $d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_v - d\varepsilon_v^e$  で与えられる。

キーワード: 非排水繰返しねじり試験、液状化、豊浦砂、弾性変形特性、塑性変形特性

連絡先: 東京都港区六本木 7-22-1 東京大学生産技術研究所, Tel: 03-3402-6231, Fax: 03-3402-6231

$$d\gamma^p > 0 \text{ のとき, } \sin v = \frac{(K-1) - (K+1)\sin\phi_{mob}}{(K-1)\sin\phi_{mob} - (K+1)}, \quad d\gamma^p < 0 \text{ のとき, } \sin v = \frac{-(K-1) - (K+1)\sin\phi_{mob}}{(K-1)\sin\phi_{mob} + (K+1)} \quad (6)$$

ここで  $K=2.77^{(1)}$  とした。また中間主ひずみ増分  $d\epsilon_2^p$  は  $d\epsilon_2^p = (d\epsilon_1^p - d\epsilon_3^p)/2$ 、つまり二次元空間で生じる体積ひずみの1.5倍の体積ひずみが三次元空間で生じると仮定した。

**4. 試験結果および考察** 式(4)に示した体積ひずみの各成分の積分値と平均有効主応力  $p'$  との関係を図1~図3に示す。図4は図3の試験開始直後の拡大図で図3, 4中には同じ試験装置を用いて実施した非排水繰返し三軸試験結果<sup>2)</sup>も併せて示す。図1より、液状化過程における  $\epsilon_{vol}^o$  は、等方応力状態から  $\sigma_v' = \sigma_h'$  として繰返しねじりせん断を行っているためにほぼ同一の応力経路をたどるので  $p'$  に対してほぼ一義的な関係が得られている。また、中空円筒供試体であるためにMPの影響が大きく、 $\epsilon_{MP}$  が  $\epsilon_{vol}^o$  と同程度以上であることが分かる。図2において  $p'=0$  付近において  $(\epsilon_{vol}^p)_{dila}$  が大きく変動しているのは、応力の測定誤差に起因していると考えられる。図3, 4より  $(\epsilon_{vol}^p)_p$  はゼロとはならず、 $p'$  が減少するのに伴って塑性的に膨張している。このような全般的な傾向は三軸試験結果でも同様である。従来の液状化解析の多くでは  $(\epsilon_{vol}^p)_p$  をゼロと仮定しているが、この仮定の下で今回適用した弾性変形特性を用いる場合には、この  $(\epsilon_{vol}^p)_p$  を間接的に考慮するために、弾性変形特性を等方圧密中に得られた特性よりも柔らかく設定することが必要である。

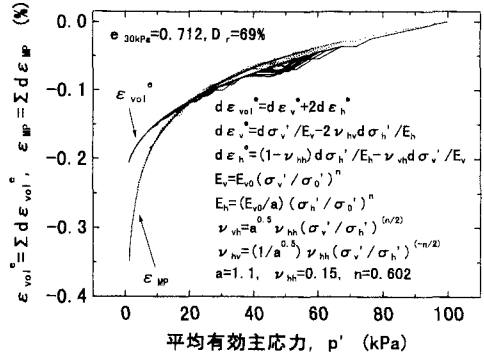


図1  $p'$  と  $\epsilon_{vol}^o, \epsilon_{MP}$  の関係

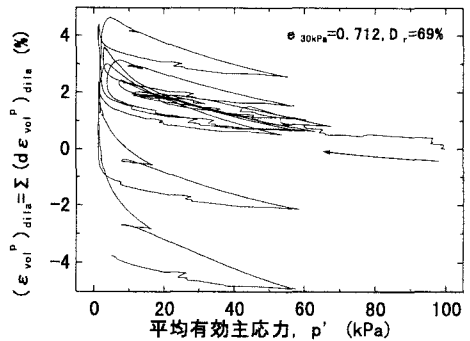


図2  $p'$  と  $(\epsilon_{vol}^p)_{dila}$  の関係

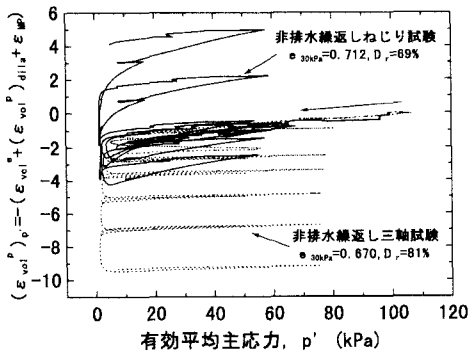


図3  $p'$  と  $(\epsilon_{vol}^p)_p$  の関係

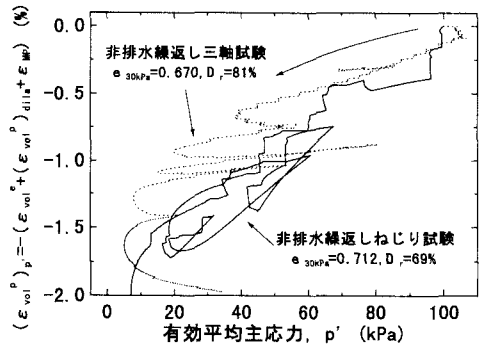


図4  $p'$  と  $(\epsilon_{vol}^p)_p$  の関係の拡大図

**5. まとめ** 非排水繰返しせん断試験で生じた体積ひずみを①弾性成分、②MPによる成分、③ダイラタンシーによる塑性成分、④有効平均主応力の変化による塑性成分に分けて評価し、三軸試験同様に④の成分はゼロではなく、 $p'$ の減少に伴って塑性的に膨張する特性があることが分かった。

**参考文献** 1) 濱谷正司ほか(1997), "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. 2) 河上定弘ほか(1999), "液状化過程における豊浦砂の微小変形特性", 第34回地盤工学会研究発表会投稿中. 3) 後藤聡(1986), "Strength and characteristics of granular materials in triaxial tests", 東京大学博士論文. 4) Pradhan, T. B. S. (1990), "The behavior of sand subjected to monotonic and cyclic loadings", 京都大学博士論文