

液状化過程における累積塑性せん断ひずみ特性

九州大学工学部 正 山内 豊聡

正〇坂井 晃

1. まえがき

繰返しせん断を受ける飽和砂の塑性変形は、偏差ひずみによる不可逆的な土粒子骨格の再配列に起因しているが、エンドクロニック理論では、この材料の非線形性を時間に独立で変形の関数である変数を用いて表わされる。本研究では、液状化過程における間隙水圧の発生に関わる変数として、変形の単調増加関数である累積塑性せん断ひずみを使用し、等方拘束圧および初期せん断応力を受けるときの繰返し回数および間隙水圧との関係を明らかにする。また、双曲線型の応力・ひずみ関係を用いて、間隙水圧を考慮した非線形モデルを提案し、初期せん断応力が作用する場合の間隙水圧と履歴曲線との関係について述べる。

2. 実験方法

実験には、軸圧変動の振動三軸試験装置を用い、0.5 Hz の正弦波を載荷した。試料は、豊浦標準砂を使用し、拘束圧 $\sigma'_3 = 98, 196 \text{ kN/m}^2$ で等方圧密した後、所定の異方圧密比 $K_c (= \sigma'_3 / \sigma'_1)$ が得られるまで軸圧を増加した。

3. 累積塑性せん断ひずみ特性

3.1 繰返し回数と累積塑性せん断ひずみの関係 図-1の応力・ひずみ曲線は、初期せん断応力 τ_0 が作用しているときの繰返し載荷試験における模式図である。繰返し載荷時の累積塑性せん断ひずみ γ_s^p は、載荷前の応力状態における塑性せん断ひずみの累積量である。図-2は、等方拘束圧および異方圧密比 $K_c (= 1.5)$ における累積塑性せん断ひずみ γ_s^p と繰返し回数 N の関係を示したものであり、液状化回数の違いによって γ_s^p の増加率に大きな差異がみられる。すなわち、液状化回数 N_L が小さくなると、同一の繰返し回数 N に対する γ_s^p は大きく、繰返し回数の増加とともに、 γ_s^p の1サイクル当りの増加率も増大する。このような γ_s^p と N の関係は、液状化回数 N_L の関数として次式で表わされる。

$$\gamma_s^p = \begin{cases} a \cdot N^b & (N \leq N_L) \\ a (N_L^b / N_L^b) N^b & (N > N_L) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、定数 a は、液状化回数 N_L と異方圧密比 K_c の関数として図-3に示され、次式で与えられる。

$$a = f(K_c) \cdot N_L^{-0.717} \quad (2)$$

図-4(a)に示される定数 b は、拘束圧と液状化回数に依存することなく、かつ異方圧密による影響を受けない。一方、定数 b' は、初期液状化後の γ_s^p と N の関係を結び付ける定数であり、図-4(b)に示されるように K_c の値に比例して減少する。以上述べた定数 a, b, b' を用いて、

種々の繰返しせん断応力に対する γ_s^p と N の関係を示したのが、図-2の実線で示される曲線であり、液状化回数および K_c の増加に伴う γ_s^p の変化傾向をよく表わしている。

3.2 累積塑性せん断ひずみと間隙水圧の関係

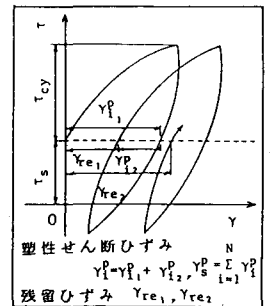


図-1 初期せん断応力を受けるときの応力・ひずみ曲線

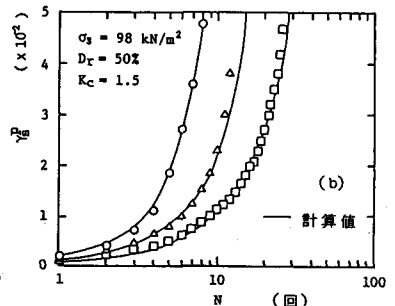
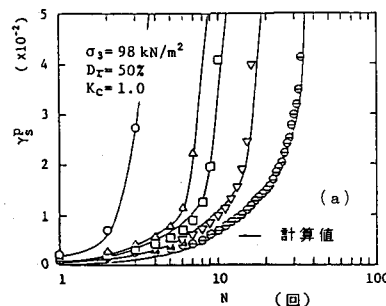


図-2 繰返し回数と累積塑性せん断ひずみの関係

初期せん断応力を受けたときの間隙水圧上昇は、異方圧密比 K_c の値が大きくなるほど、残留ひずみが増大し、急激な上昇傾向を示さない。したがって、初期せん断応力を受けるときの γ_a と u の関係は、図-5に示されるように残留ひずみ γ_{re} と比例関係にある新しい変数 γ を用いて、次式で与えられる。

$$\gamma = \gamma_a - m \gamma_{re} = \beta \{ \exp(\alpha \cdot u / \sigma_3) - 1 \} \quad (3)$$

4. 間隙水圧を考慮した非線形モデル

繰返し荷重を受ける土の変形モデルの中の一つに、双曲線で骨格曲線を表すHardin-DrnevichモデルとMasingの規則による履歴曲線を組み合わせたモデルがある。ここでは、応力・ひずみ曲線の折返し点 (τ_a, γ_a) の履歴曲線として骨格曲線を相似的に m 倍に拡大した曲線を考える。

$$\tau - \tau_a = G_0 (\gamma - \gamma_a) / \{ 1 + (\gamma - \gamma_a) / m \gamma_a \} \quad (4)$$

Masingの規則では、 $m=2$ を用いて閉じた履歴ループを表わしているが、この m の値の取り方によっては履歴曲線の特性が変化する。すなわち、図-6の模式図から、 $m=2$ のときの剛性率に比べ、 $m < 2$ の場合には剛性率は低下し、逆に $m > 2$ では増加する。R.P.ykeは、残留

ひずみを生じる応力・ひずみ曲線の表現法として、 $m=2(1-\tau_a/\tau_f)$ (正: 載荷, 負: 除荷) を与えているが、液状化過程における間隙水圧上昇量との対応関係が捉え難い。したがって、初期せん断を受けるときの履歴曲線は、式(3)の γ_a と γ_{re} の値から得られる間隙水圧を求め、かつ次式で表わされる m の値を用いることによって決定する。

$$m = 2 / (1 \pm \beta \cdot u / \sigma_3) \quad (\text{正: 載荷, 負: 除荷}) \quad (5)$$

β は定数。ここに、応力・ひずみ曲線は、まず図-7に示される経路 $O \rightarrow A \rightarrow B$ において生じる間隙水圧を求めて再載荷曲線 CE を決定し、次のサイクル $B \rightarrow C \rightarrow D$ において生じる間隙水圧によって、 E 以降の除荷曲線が決定される。図-8は、上述の計算手法を用いた結果と実験値による N と u の関係を示したものであり、ほぼ一致した結果が得られた。また、このときの応力・ひずみ曲線を描いたのが図-9であり、初期せん断応力を受けるときの、残留ひずみを生じていく傾向をよく表わしている。

図-3 液状化回数と定数 α の関係

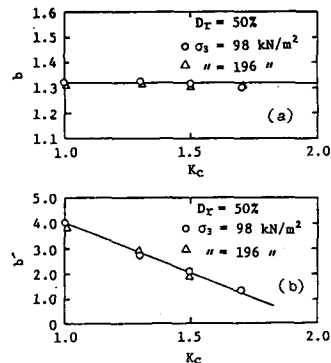


図-4 定数 b, β と異方圧密比の関係

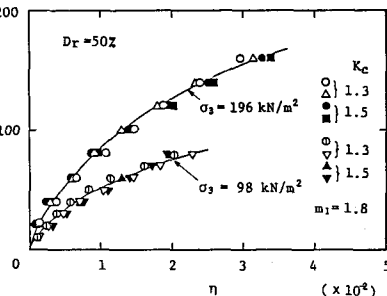


図-5 変数 γ と間隙水圧の関係

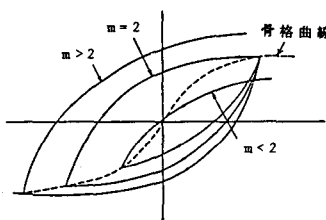


図-6 m の値による履歴曲線の特性の変化

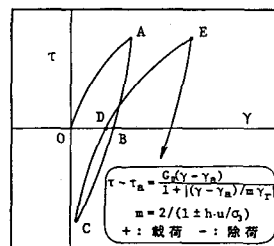


図-7 応力・ひずみ曲線の模式図

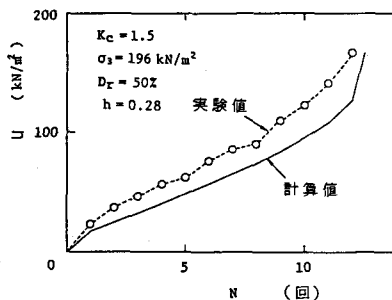


図-8 初期せん断応力を受けるときの繰返し回数と間隙水圧の関係

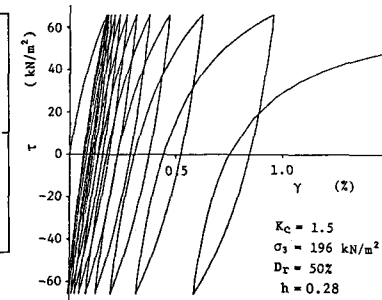


図-9 初期せん断応力を受けるときの応力・ひずみ曲線

参考文献 1) 山内・坂井・杉本・白石: 液状化における過剰間隙水圧の一評価法, 第19回工業工学研究発表会講演集, pp.541-542, 1984.

2) R.P.yke: Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings, ASCE, GT6, pp.75-726, 1979.