

III-249

非排水繰返し载荷を受ける粘土の有効応力-ひずみ関係

茨城大学工学部 正 ○村上 哲
 九州大学工学部 正 落合英俊
 佐賀大学 正 林 重徳

1.はじめに

本研究は、非排水繰返し载荷を受ける粘土の挙動を実験結果に基づき定量的に評価する手法を確立することを目的としている。基本的な考え方は、各繰返し载荷サイクルにおける除荷直前の応力状態（せん断応力の最大時）に着目し、有効応力-せん断ひずみ関係と繰返し载荷回数-間隙水圧関係を各々実験により求め、それらを結合させるものである。本文は、繰返し応力の周波数及び振幅を種々変えた繰返し三軸圧縮試験を実施し、実験結果に基づいて繰返し载荷を受ける粘土の有効応力-せん断ひずみ関係について定量的評価を試みたものである。

2.試験概要

試料は、練返しした有明粘土（ $\rho_s=2.627\text{g/cm}^3$, $w_L=98.0\%$, $I_P=53.5$ ）で、鉛直応力49kPaで28日間一次元的に予圧密したものである。予圧密試料から直径5cm, 高さ10cmの円柱状に切出した供試体に対し、応力制御方式繰返し三軸圧縮試験（ $\sigma_2=\sigma_3$ ）を実施した。所定の圧密応力 $p_0=(\sigma_1+2\sigma_3)/3=\sigma_3=98\text{kPa}$ にて24時間等方圧密した飽和粘土供試体に対し、非排水状態で繰返し応力 $q_{cyc}=(\sigma_1+\Delta\sigma_1-\sigma_3)$ を所定の周波数 f (0.1, 0.05, 0.02Hzの3種類)の片振り正弦波として、所定の载荷回数もしくは軸ひずみが18%に達するまで与えた。なお、試験中には背圧196kPaが負荷された。

3.有効応力-ひずみ関係

非排水状態で正規圧密粘土に対し繰返し応力を作用させた場合、各载荷サイクルにおける圧縮せん断応力の最大時の挙動に着目すると、有効応力比 $\eta' (=q'/p')$ は単調に増加し、それに伴いせん断ひずみ $\gamma_d (=2(\epsilon_1-\epsilon_3)/3)$ は増大する。本試験条件において、非排水せん断強度の約7割以上の繰返し応力を作用させると、有効応力比はある一定値に収束しせん断ひずみが増大することが認められた（図-1）。この状態を繰返し限界状態（Cyclic loading's Limit State）と定義する。繰返し限界状態に至った試験ケースに対して、その有効応力点を $q'/p_0 \sim p'/p_0$ 平面にプロットすると図-2のようになる。周波数が同一の試験ケースの場合、限界状態の有効応力点は $q'/p_0 \sim p'/p_0$ 平面において p'/p_0 軸で共通切片 p^*/p_0 を有する一本の直線で近似できる。繰返し载荷時の限界状態線（CLSL）の傾き H^* は周波数 f により変化し、その常用対数との間には図-3のような直線関係が認められる。この直線の傾きを L とするとCLSLは次式で表される。

$$q = H^* (p' - p^*) \quad (1)$$

$$H^* = H^*_0 - L \log (f/f_0) \quad (2)$$

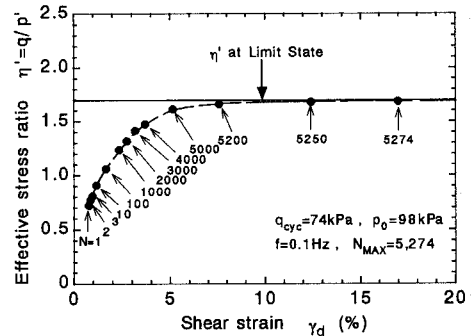


図-1 有効応力比 η' とせん断ひずみ γ_d の関係

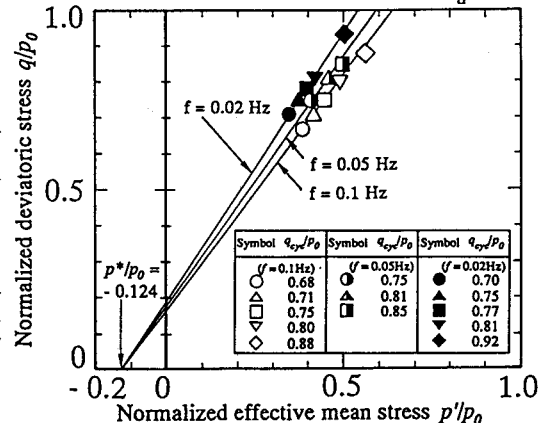


図-2 繰返し载荷を受ける粘土の限界状態

ここで、 f_0 は基準となる周波数、 H^*_0 は $f=f_0$ の時のCLSLの傾きである。

非排水状態で繰返し応力が作用する粘土のせん断応力の最大時におけるせん断ひずみ γ_d を評価するために次のような有効応力状態を表わす応力パラメータ η_{cyc} を導入する。

$$\eta_{cyc} = q_{cyc} / (p' - p^*) \quad (3)$$

ここで、 p^* はCLSLの p' 軸切片である。任意の荷回数における η_{cyc} と γ_d の関係を $f=0.1\text{Hz}$ の試験結果に対してプロットすると図-4のようになる。応力パラメータとして、 η_{cyc} を用いると、限界状態に至る場合ばかりでなく、それ以下の繰返し応力レベルに関しても、 γ_d を繰返し応力レベルや荷回数に依存しない一義的な関係として評価できる。

$\eta_{cyc} \sim \gamma_d$ 曲線は γ_d が増大するに伴って η_{cyc} が H^* に収束する曲線関係を示す。なお、以上と同様の関係は、 $f=0.05, 0.02\text{Hz}$ の試験結果においても認められた。このような有効応力とせん断ひずみの関係を表わす為に次式のような経験式を用いて近似する。

$$\gamma_d = \kappa_s \ln \{ H^{*2} / (H^{*2} - \eta_{cyc}^2) \} \quad (4)$$

ここで、 κ_s は周波数に依存する定数である。 κ_s を変化させることにより、試験結果にフィッティングすることができ、図-4はその例である。式(4)の係数 κ_s と周波数 f の関係を図-5に示す。 $\kappa_s \sim \log f$ 関係には直線関係が認められ、ここで、直線の傾きを G 、 $f=f_0$ の時の κ_s を κ_{s0} とすると任意の周波数の κ_s は次式で得られる。

$$\kappa_s = \kappa_{s0} - G \log (f/f_0) \quad (5)$$

以上のことから、2種類の周波数の繰返し三軸試験を実施し、式(2)、(3)と(5)の定数 H^* 、 L 、 p^* 、 κ_{s0} および G を定めることによって、ある繰返し応力が作用する粘土がある有効応力状態に達した時に生じているせん断ひずみを(4)式を用いて予測することができる。

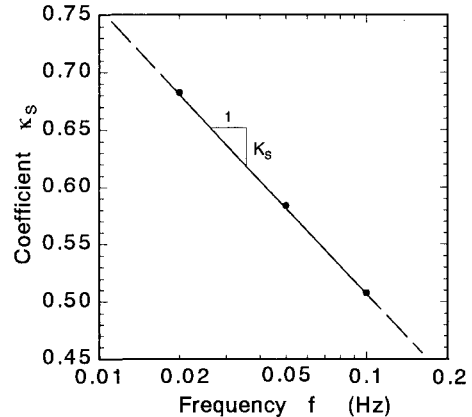
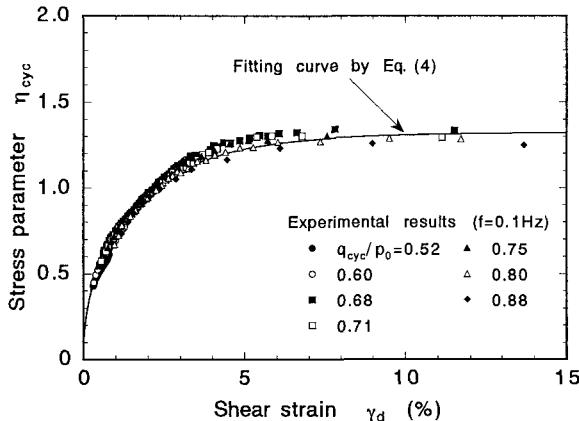


図-4 応力パラメータ η_{cyc} とせん断ひずみ γ_d の関係 図-5 周波数 f と経験式 κ_s の係数の関係

4.おわりに

非排水繰返し荷重を受ける粘土の圧縮せん断応力の最大時における有効応力-ひずみ関係に対し、繰返し限界状態線により決定される応力パラメータと式(4)の経験式を用いて定量的な評価を行なった。繰返し荷重によって累積する間隙水圧と荷回数の関係を評価することができれば、非排水繰返し荷重を受ける粘土の挙動を予測することが可能となる。