

非排水繰返し载荷を受ける粘土の限界状態

九州大学大学院 学 ○村上 哲

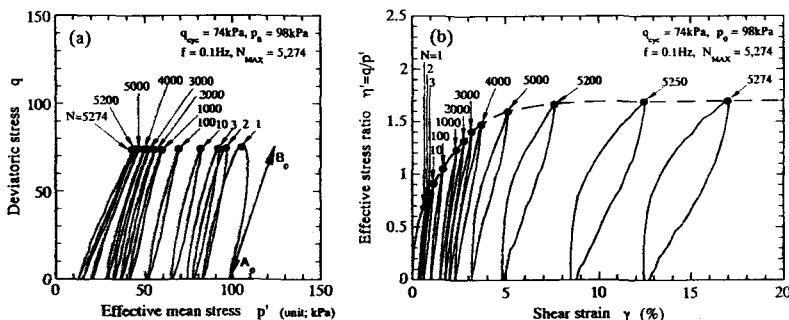
九州大学工学部 正 落合英俊

九州大学工学部 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的手法により定量的に評価することを目的としている。著者らはこれまでに周波数0.02Hzで、繰返し応力の振幅を種々変えた繰返し三軸圧縮試験を実施し、ある繰返し応力レベル以上においてせん断ひずみが増大しせん断応力最大時(载荷点)の有効応力比 $\eta' (=q/p')$ 、偏差応力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 、平均有効応力 $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ が一定値に達する(この状態を限界状態(Limit State)と呼ぶ)ことを示した。また、偏差応力 $q \sim$ 平均有効応力 p' 平面上で限界状態に達する応力点を近似した一本の直線における p' 軸切片 p^* で決定される応力パラメータ $\eta_{cyc} (=q/(p'-p^*))$ を用いると、限界状態に達する応力レベルのみならずそれ以下の応力レベルの挙動に関しても、载荷点の応力パラメータとせん断ひずみが一義的な関係として捉えられることが実験結果より認められた¹⁾。しかしながら、繰返し载荷を受ける粘土の限界状態は繰返し応力の周波数に依存することが予想される。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限界状態を調べ考察したものである。

2. 限界状態の定義

正規圧密粘土に対し非排水状態で図-1(a)に示されるような全応力経路 A_0B_0 の繰返し応力を作用させると有効応力経路は閉じたループを描きながら左方へ移動する。図-1



の●印は各载荷サイクル

図-1 ヒステリシスループおよび载荷点の挙動

ルの载荷点を示している。ある载荷点から次の载荷点までの平均有効応力 p' の減少量は、载荷初期段階で最も大きく、繰返し载荷の継続とともに減少し、最終的にはある応力点に収束するようである。この現象は、図-1(b)の有効応力比 $\eta' (=q/p')$ とせん断ひずみ $\gamma (=2(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3)$ 関係からも認められる。●印を滑らかに結んだ破線で示される载荷点の挙動は、せん断ひずみの増大に伴って有効応力比が単調に増加し一定値に収束する曲線で示される。繰返し応力振幅が一定であるので、载荷点の偏差応力 q_{cyc} もまた一定である。すなわち、有効応力比が一定値に収束するということは、平均有効応力がある限界値に達することとなる。繰返し载荷によってせん断ひずみが増大し载荷点の有効応力が収束する状態を本研究では繰返し载荷を受ける粘土の限界状態と考える。

3. 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日間一次元予圧密したものである。予圧密試料から直径5cm、高さ

表-1 試験条件

Consolidation Stress p_0 (kPa)	Cyclic Stress q_{cyc}/p_0	Frequency f (Hz)	Void Ratio e	Number of Cycles N_{MAX}
98	0.68	0.1	2.173	36,550
98	0.71	0.1	2.274	13,330
98	0.75	0.1	2.236	5,274
98	0.80	0.1	2.192	300
98	0.88	0.1	2.164	64
98	0.75	0.05	2.105	11,975
98	0.81	0.05	2.191	343
98	0.85	0.05	2.246	117
98	0.70	0.02	2.213	6,750
98	0.75	0.02	2.267	3,330
98	0.81	0.02	2.258	85
98	0.92	0.02	2.080	17
196	0.77	0.02	1.950	156

10cmの円柱状に切出した供試体に対し、応力制御方式の繰返し三軸圧縮試験を実施した。所定の圧密応力 $p_0(=(\sigma_1+2\sigma_3)/3, \sigma_1=\sigma_3)$ 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 $q_{cyc}(=\sigma_1+\Delta\sigma_1-\sigma_3, \sigma_3=一定)$ を所定の周波数 f の片振り正弦波として軸ひずみが18%を超えるまで与えた。試験条件を表-1に示す。実施した試験における繰返し応力の大きさは非排水せん断強度のおよそ7割以上に相当する。なお、試験中には背圧196kPaが負荷された。

4. 試験結果および考察 非排水状態で繰返し載荷を受ける粘土の限界状態を最大せん断応力時の有効応力が収束する状態と考えた。限界状態を詳細に調べるために次のような手順により、一定値に収束する応力

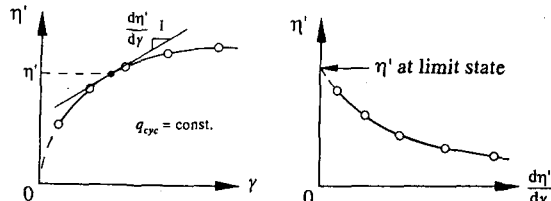


図-2 限界状態における有効応力の算出方法

状態を求めた。載荷点における有効応力比 $\sim$ せん断ひずみ曲線においてその接線勾配を求め、これと有効応力比との関係から接線勾配がゼロとなる有効応力比を推定する。偏差応力が一定であるので推定した有効応力比から限界状態に達する平均有効応力が算出され、限界状態の応力点が得られる(図-2参照)。得られた応力点を $q/p_0 \sim p'/p_0$ 平面にプロットすると図-3のようになる。周波数が同一の試験ケースの場合、限界状態の応力点は $q/p_0 \sim p'/p_0$ 平面において一本の直線(以下、繰返しの限界状態線(CLSL; Cyclic loading's Limit State Line)と称す)で近似できる。各周波数のCLSLの p'/p_0 軸切片は共通である。一方、CLSLの傾き H^* は周波数に依存するが、CLSLの傾き H^* と周波数 f の対数の間には図-4のような直線関係が認められる。この直線の傾きを Λ とするとCLSLは次式で表される。

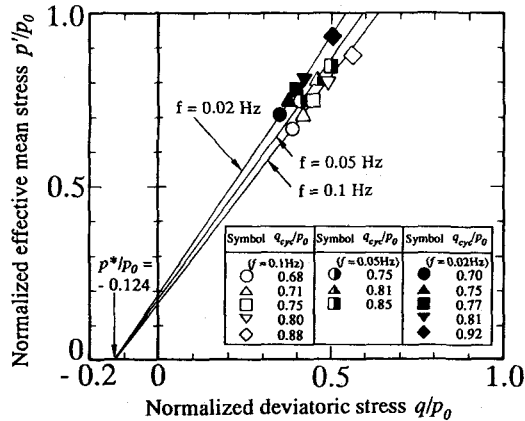


図-3 繰返し載荷を受ける粘土の限界状態

$q = H^*(p' - p^*)$ (1) $H^* = H^*_0 + \Lambda \log(f/f_0)$ (2)
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。式(1),(2)を用いると2種類の周波数でのCLSLの傾きとCLSLの p' 軸切片 p^* が分れば、任意の周波数におけるCLSLを推定することができる。

5. まとめ 非排水繰返し載荷を受ける粘土の限界状態を試験結果に基づいて調べた。その結果、周波数0.02Hz同様、周波数0.1, 0.05Hzにおいても限界状態の応力点は $q/p_0 \sim p'/p_0$ 平面で共通の p'/p_0 軸切片を有し周波数により傾きが異なる一本の直線で近似できた。また、載荷点において、 p' 軸切片 p^* で決定される応力パラメータ $\eta_{cyc}(=q/(p'-p^*))$ とせん断ひずみが一義的な関係として捉えられることを周波数0.1, 0.05Hzにおいても確認している。

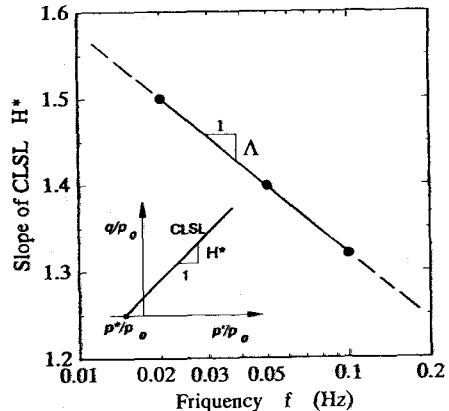


図-4 周波数 f とCLSLの傾き H^* の関係

【参考文献】1)村上ら;非排水繰返し応力を受ける粘土の応力 $\sim$ ひずみ $\sim$ 間隙水圧特性,第28回土質工学研究発表会概要集, pp.1053-1054, 1993.