

繰返し荷重を受ける粘土のストレス・ダイレイタンスー関係

九州大学 工学部 学○吉川幸夫 正 落合英俊
正 林 重徳 正 梅崎健夫

1. まえがき

繰返し荷重を受ける地盤には、静的載荷理論では予測しきれない大きな変形が生じ、これは解決すべき重要な問題である。本研究は、繰返し載荷による粘土の変形特性を静的載荷問題に置き換え¹⁾、評価することを試みるものである。そのために、繰返し載荷に伴う粘土の変形問題を繰返し回数毎に変化するストレス・ダイレイタンスー関係を的確に把握する必要がある。本文は、非排水試験により得られる繰返し回数毎の間隙水圧特性を検討し、応力・ひずみ関係の基となるストレス・ダイレイタンスー関係を考察したものである。

2. ストレス・ダイレイタンスー関係の評価法

2.1 応力・ひずみパラメータ 図-1の $p' (= (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3) \sim q (= \sigma_1' - \sigma_3')$ 平面において、土要素が全応力経路 AB の繰返し応力を受ける場合を考えると、繰返し回数の増加に伴い間隙水圧が蓄積され、繰返し回数 N 回目の載荷時及び除荷時における応力点が各々 B_N 及び A_N 点であるとする。 B_N 点において測定される間隙水圧 u_g は、載荷応力の等方応力成分 Δp とダイレイタンスーに起因する u_d との和で表され则认为²⁾。また、全体積ひずみ ε_v は、 Δp による体積ひずみ $\varepsilon_v(c)$ と Δq によるダイレイタンスーに起因する体積ひずみ $\varepsilon_v(d)$ とに分けられる。せん断ひずみ ε は、 $\varepsilon = \varepsilon_1 - 1/3 \cdot \varepsilon_v$ で示され、 ε_1 は最大主ひずみである。

2.2 ストレス・ダイレイタンスー関係の評価 ストレス・ダイレイタンスー関係は、土のせん断挙動を特性づける重要な関係の一つである。粘土の排水繰返し圧縮試験は、間隙水圧分布により供試体の要素性に問題がある。このため、非排水試験を行い発生する間隙水圧を正確に捉え、これを体積ひずみ $\varepsilon_v(d)$ に置き換える方法を述べる。静的載荷問題において、排水による体積ひずみ増分と非排水による間隙水圧増分には、次のような関係が成立する³⁾。

$$\Delta u = \Delta p + \Delta u_d, \quad \Delta u_d = d \varepsilon_v(d) / C$$

$C = \kappa (\ln p_0' / p') / ((1 + e_0) \cdot \Delta p')$ κ : 体積圧縮係数 e_0 : 初期間隙比

この関係が繰返し載荷問題においても適用できるとすると、 $\eta' \sim -d(u_d / p_0') / d\varepsilon$ 関係を応力比・ひずみ増分比関係と置き換えられる¹⁾。図-2は、非排水繰返し載荷試験における応力ひずみ関係の模式図である。実線のような繰返し載荷経路を回数毎に静的載荷問題と捉え、回数毎に整理することにより、繰返し載荷に伴うダイレイタンスー特性の変化を $\eta' \sim -d(u_d / p_0') / d\varepsilon$ 関係により評価することができる。

3. 試料および実験方法

試料は、有明粘土 ($G_s = 2.633$, $W_L = 118\%$, $I_p = 79\%$) を用いた。200% の含水比で繰返しした試料を 0.5 kgf/cm^2 で予圧密した後、直径5cm、高さ10cmに切り出して作成した。試験は繰返し三軸試験機を用い、背圧 (2.0 kgf/cm^2) を24時間負荷させた後、所定の圧密圧力 ($p_0' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$) で24時間等方圧密させた。その後、側圧 ($\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$) を一定に保ちながら所定の応力比 ($\eta = q/p = 0.6$) を周波数 $f = 0.02 \text{ Hz}$ の片振り正弦波として載荷する三軸圧縮試験を行った。なお、間隙水圧は全面で測定を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 有効応力経路 繰返し載荷における有効応力経路を図-3に示す。併せてひずみ制御 ($\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ mm/min}$) によるCU試験の有効応力経路と限界状態線を示した。繰返し載荷による有効応力経路は、静的載荷にお

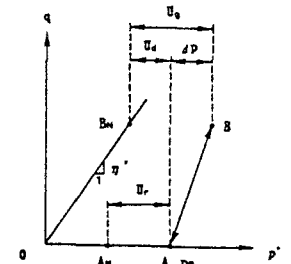
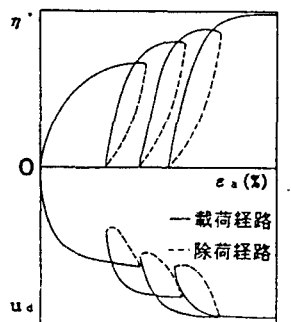


図-1 応力パラメータ

図-2 $\eta' \sim \varepsilon \sim u_d$ 関係 (模式図)

ける非排水経路の内側をたどる。また、载荷初期において u_d の発生する割合が初期以降のそれに比べ大きく、繰返し载荷回数の増加に伴い間隙水圧が蓄積され、有効応力経路は p' 減少方向へシフトして行く。間隙水圧の発生量は徐々に少なくなり、 $N=10^3$ 程度の繰返し回数において有効応力経路は、ほぼ p' 一定の経路となる。さらに $N=10^4$ において、CU試験における限界状態線に有効応力経路の上端が接するような形となる。このように有効応力経路は、繰返し回数が増加するに連れ過圧密的な経路へと変化する。

4.2 応力比・ひずみ・間隙水圧特性 有効応力比と間隙水圧の特性を繰返し回数毎に整理した結果を図-4に示す。繰返し载荷による有効応力比の増加に伴い間隙水圧 u_d も増加する。繰返し回数毎の有効応力比の最大値と u_d の最大値とは一致せず、 u_d は有効応力比が最大となる前に減少へと転じる。また、 u_d の増加は回数を増す毎に減少し、 $N=10^4$ において u_d の増分は極めて小さくなる。なお、この時点で $u_d/p_o' = 0.776$ であり、圧密圧力の約8割にまで達した。

4.3 $\eta' \sim -d(u_d/p_o')/d\varepsilon$ 関係 前述した $\eta' \sim \varepsilon \sim u_d/p_o'$ 関係から各回数毎の $\eta' \sim -d(u_d/p_o')/d\varepsilon$ 関係を整理したのが図-5である。繰返し载荷1サイクルのループについては、繰返し回数の増加に伴って間隙水圧 u_d は発生しにくくなる。 $\eta' \sim -d(u_d/p_o')/d\varepsilon$ 関係は、直線的な形状から双曲線へと曲率を徐々に増大させながらその形状を変えて行く。 $N=10^4$ 以降は、修正Cam-Clayモデルの応力比・ひずみ増分比関係に類似した関数形となる。このことは、非排水試験による間隙水圧 u_d を排水試験時の体積ひずみ ε_v と関係づけてストレス・ダイレイタンスー関係を評価することの可能性を示唆するものである。また、各回数において $-d(u_d/p_o')/d\varepsilon = 0$ の有効応力比は、ほぼ $\eta' = 1.05$ である。

5. まとめ

本研究では、繰返し荷重を受ける粘土の変形問題の重要な関係の一つであるストレス・ダイレイタンスー関係を非排水試験結果に基づき評価した。繰返し载荷に伴う粘土の有効応力経路と $\eta' \sim -d(u_d/p_o')/d\varepsilon$ 関係は、繰返し回数を重ねることにより間隙水圧増分 Δu_d が減少して行き、過圧密的な傾向となる。繰返し载荷に伴う $\eta' \sim -d(u_d/p_o')/d\varepsilon$ 関係は、直線的な関係から双曲線的な関係へと変化する。

【参考文献】

1) 落合ら：繰返し荷重を受ける飽和粘土の変形挙動に関する一考察，31回土質工学シンポジウム論文集，pp. 23-26，1986. 2) 梅崎ら：繰返し荷重を受ける粘土の応力・ひずみ関係，繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシンポジウム，pp. 61-68，1990. 3) 軽部ら：繰返し粘土のダイレイタンスーとせん断強度のついて，土木学会論文集第135号，pp16-24，1966

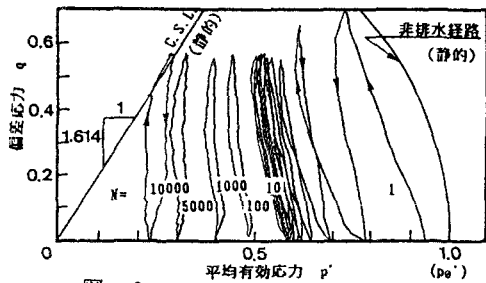


図-3 有効応力経路

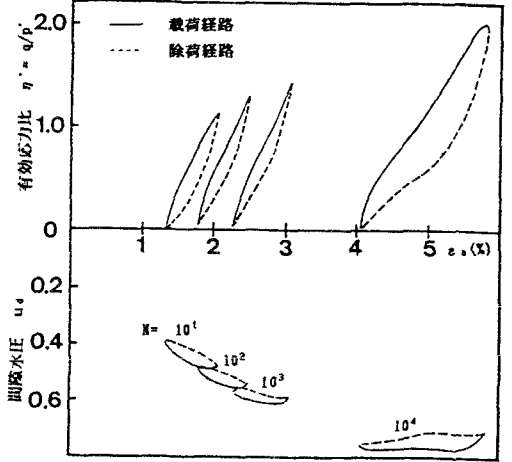


図-4 N 回目の $\eta' \sim \varepsilon \sim u_d$ 関係

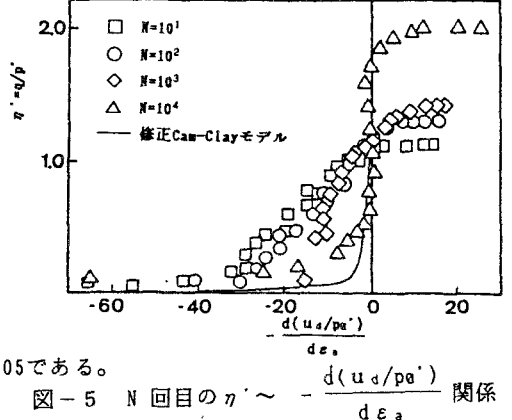


図-5 N 回目の $\eta' \sim -\frac{d(u_d/p_o')}{d\varepsilon}$ 関係