

北大工学部 正員 三 浦 清 一
 “ “ “ 土 岐 祥 介
 (株)大林組 “ 成 田 凡 史

[1] まえがき 繰返し応力下における砂地盤の変形特性と疲状化特性を推定するためには、まず単調載荷時の応力-ひずみ関係を正確に把握しておくことが必要である。本報告では、既に弾塑性理論によって求めた排水条件下の応力-ひずみ関係式^{1), 2)}に、弾性ダイレイタンスーの成分を新たに考慮して誘導した非排水有効応力経路の予測式ならびにそれと実験値との対比が示されている。

[2] 試料および実験方法 実験に用いた試料は豊浦標準砂 ($G_s = 2.65$, $e_{\max} = 0.992$, $e_{\min} = 0.625$)³⁾であり、供試体 (径 50 mm, 高さ 120 mm, 相対密度 $D_r = 55\%$) は、全て勿重ふり下法 (MSP法)⁴⁾ で作製した。これらの供試体に CO_2 を通し、引続き脱気水で飽和させたのち、196 kPa のバックプレッシャーを与えている。

この手順で作製した供試体について、1). 等方圧密・膨張試験、2). 平均主応力一定三軸圧縮条件における載荷・除荷試験および 3). 等方圧密 ($P_c = 98, 196, 392 \text{ kPa}$) 側圧一定非排水三軸圧縮試験を実施した。

なお、側圧の変化する試験ではメンブレン貫入補正を行なっている。また、軸圧は三軸セル内に取り付けたロードセルによって測定した。以下の議論で用いる応力、ひずみパラメータは前報^{1), 2)} の定義と同じである。

[3] 実験結果と考察

3-1. 弾性ダイレイタンスー 任意応力経路下のせん断過程において発生するひずみ $d\epsilon_{ij}$ は、それが平均主応力の大きさに依存することを考慮することによって、圧密による成分 ($d\epsilon_{ij}$)_d とせん断による成分 ($d\epsilon_{ij}$)_s の線型和で表わせる²⁾。ここで、($d\epsilon_{ij}$)_d は平均主応力一定条件下で載荷・除荷試験を行なうことにより、その弾性成分 ($d\epsilon_{ij}^e$)_d と塑性成分 ($d\epsilon_{ij}^p$)_d に分離できるはずである ($(d\epsilon_{ij})_d = (d\epsilon_{ij}^e)_d + (d\epsilon_{ij}^p)_d$)。

一般に排水条件における応力-ひずみ関係のモデル化に際し、($d\epsilon_{ij}$)_d は ($d\epsilon_{ij}^e$)_d $\ll$ ($d\epsilon_{ij}^p$)_d であることから無視されている。ところが、そのようなモデルを非排水条件へ適用する場合には、特に弾性ダイレイタンスーの成分を評価しておくことが要求される。それは、体積ひずみ成分が非排水条件での微小変形レベルにおける間隙水圧の応答に無視できない影響を及ぼすからである。

平均主応力一定三軸圧縮条件 ($P = P_c = 196 \text{ kPa}$) の載荷・除荷・再載荷試験から得た応力比 $\eta (= \tau/p)$ と主ひずみ ϵ_a, ϵ_r との関係が、図-1に示されている。 $\eta = 1.15 \pm 0$ の除荷・再載荷曲線に着目すると、両者は一致せず明瞭なループが見られる。この事実、この間で塑性ひずみが新たに生じていること、すなわち降伏点が移動することを意味している。したがって、繰返し応力のようにせん断応力の反転を伴う場合の変形特性のモデル化には、移動硬化理論の適用が要求されるものと考えられる。 $\eta = 0.3 \pm 0, 0.9 \pm 0.65, 1.3 \pm 1.0$ などの $\Delta\eta$ の小さい除荷・再載荷曲線では、各ひずみはループを描くことなく、かつ除荷・再載荷のサイクル終了時には元の値にほぼ回復しているようである。このことは除荷開始時の応力比の大きさによらず認められるから、せん断に関する弾性体積ひずみ $(\epsilon_v^e)_d$ は、各 $\Delta\eta$ で生じたひず

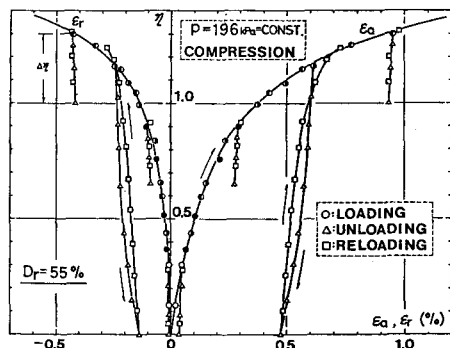


Fig. 1

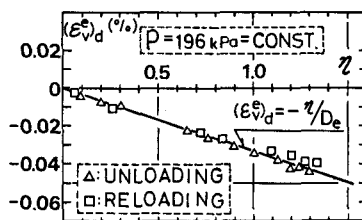


Fig. 2

みを重ね合わせることによって評価できると考えられる。日野・中井⁵⁾は同様の手法を適用し、理論値との比較を示している。

この方法で求めた $(d\varepsilon_v^e)_d$ も η に対してプロットしたのが図-2である。図から、弾性ダイレイタンシーはせん断中常に膨張側であり、かつ η とほぼ直線関係にあるものと見做すことができ、式(1)で算出される。なお、等方弾性体のフック則(式(2))によると $(d\varepsilon_v^e)_d=0$ となり、上述の弾性ダイレイタンシー現象は説明不可能である。

3-2 圧密による弾性体積ひずみ 図-3, 4は等方圧密・膨張試験から得た体積ひずみ $(\varepsilon_v)_s$ と平均主応力 P との関係も、片対数および両対数上で示したものである。膨張時と再圧密時のひずみは、 P の大きさによらずほぼ一致していることから、これを近似的に弾性ひずみと考えますまらはいはない。また、通常の応力レベルでは弾性成分 $(d\varepsilon_v^e)_s$ および塑性成分 $(d\varepsilon_v^p)_s$ も、従来用いられてきている片対数整理($e-\log P$)では、その評価が難しいことを図-3は示している。前報⁶⁾での実験からも明らかのように、圧密に伴う体積ひずみは、気体の断熱膨張あるいは断熱圧縮の支配方程式($pV^\gamma = \text{const.}$)と類似の式形をとる両対数上の整理から算出するのが適切であることが、図-4より明らかである。したがって、圧密に伴う弾性体積ひずみは式(3)によつて表わすことができる。

〔4〕 非排水有効応力経路の予測と実験値との比較

非排水せん断過程においては、常に $d\varepsilon_v=0$ である。したがって、非排水条件を表わす式によつて有効応力経路の予測が可能である。

$$(d\varepsilon_v^p)_s + (d\varepsilon_v^p)_d = -(d\varepsilon_v^e)_s - (d\varepsilon_v^e)_d \quad \text{--- (6)}$$

弾性ひずみ増分 $(d\varepsilon_v^e)_d$, $(d\varepsilon_v^e)_s$ は式(1), (3)から、塑性ひずみ増分 $(d\varepsilon_v^p)_d$, $(d\varepsilon_v^p)_s$ は式(4), (5)²⁾からそれぞれ求められる。なお、各ひずみ増分は η および P に関して全て積分可能である。

図-5には、表-1に与えられている各パラメータの値を用いて予測した非排水三軸圧縮試験の有効応力経路と実験値との対比が示されている。比較的良好な一致が見られるようである。なお、破線で示されているように弾性ダイレイタンシーの成分を無視した場合には、微小変形レベルでの発生間隙水圧を過大評価する傾向にあることが明らかである。

〔あとがき〕 非排水有効応力経路の予測においては、弾性ダイレイタンシーの評価を無視できないことが示された。最後に本研究に

ついて御教示頂いた北郷 繁教授および実験に協力を得た三浦 均也(現大学院生)君に謝意を表す。

〔参考文献〕

1). 三浦・土岐・永田 (1981); 第16回 土質工学研究発表会
2). 三浦・土岐・箱 (1981); " "
3). 土質工学会 (1979); 土質試験法, 第2回改訂版

$$(d\varepsilon_v^e)_d = -d\eta/De \quad \text{--- (1)}$$

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} (d\sigma_{ij} - \frac{3\nu}{1+\nu} \delta_{ij} dP) \quad \text{--- (2)}$$

$$(d\varepsilon_v^e)_s = k \left\{ \ell(P/R_0)^k - (\ell-n)(P/R_0)^{k-n} \right\} \cdot \frac{dP}{P} \quad \text{--- (3)}$$

$$(d\varepsilon_v^p)_d = \frac{C_d}{P} \left\{ (P/G)^{\frac{1-B}{B}} + CamA^{\frac{1}{B}}(1-B)(\eta-\eta_0) \right\}^{\frac{B}{1-B}} \cdot (m-\eta) d\eta, \quad (B \neq 1) \quad \text{--- (4)}$$

$$(d\varepsilon_v^p)_s = k (\ell-n)(P/R_0)^{k-n} \cdot \frac{dP}{P} \quad \text{--- (5)}$$

CONSOLI.	SHEAR.
k=0.23	m=1.2, A=2.6(p/196) ^{-0.8}
l=0.7	C _d =1.0, G [*] =1570(p/196) ^{-0.5}
n=0.2	B=1.57, D _e =3400

Table 1

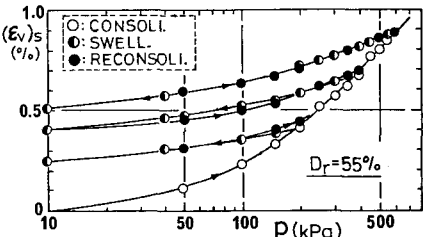


Fig. 3

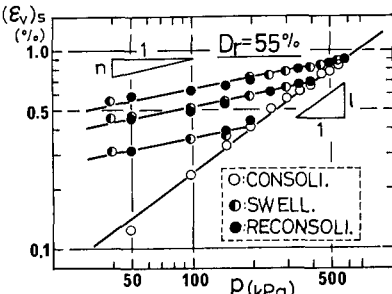


Fig. 4

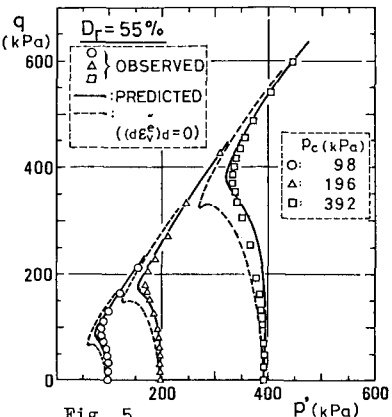


Fig. 5