排水・非排水条件下における繰返し載荷時の砂のひずみの定常化

名古屋工業大学 学生会員 ○大橋 龍起,浅野 加南子 名古屋工業大学 正会員 H.M.Shahin 中井 照夫, 東京大学 正会員 京川 裕之

1. はじめに

繰返し載荷時の砂の挙動は, 排水条件下では締固め挙動, 非排水条件下では液状化現象と密接に関係している。 これまで移動硬化則や修正応力による記述が試みられてきたが, ひずみの定常化に至るまでの応力・ひずみ挙動 を精緻に表現するまでには至っていない。土の材料特性を表す構成式は, 地盤の変形解析において広く用いられ ている有限要素法(FEM)解析には欠かせない。そのため、地盤の液状化解析などの精度向上には, 構成式の発展が 不可欠である。著者らは過去の報告より, 排水繰返し載荷時の砂は, ダイレイタンシー特性を変化させながら体 積変の収束する定常状態に至ることを示し, ストレス・ダイレイタンシー関係(以後, S-D 関係と表記)の変化につ いて検討を重ねてきた¹⁾。本稿では, 繰返し載荷挙動を正確に表現できる構成式の開発を目的とし, 三軸試験機を 用いて排水・非排水条件下での繰返しせん断試験を実施し, 繰返し載荷時の砂の変形特性ついて検討を行う。

2. 実験概要

試験には,水中落下法で作成した豊浦標準砂の初期異方性の少ないやや密詰め供試体(*e*₁₉₆=0.656~0.665)を使用し, 等方応力状態 (*p*'=196kPa) を初期状態として、平均主応力一定下で三軸両振り繰返しせん断試験を実施した。試 験は,排水条件下で主応力比振幅(*σ*₁/*σ*₃) = 3.0 一定の繰返しせん断試験(Test1),有効主応力比振幅(*σ*₁/*σ*₃')を2.0, 1.5,3.0 と変化させた繰返しせん断試験を排水(Test2)および非排水(Test3)条件下で行った。なお,Test2,Test3 で は各有効応力比振幅で定常化を確認後に,有効応力比振幅を変化させる。以上の計3ケースについて検討する。 3.実験結果

(1)主応力比振幅一定の両振り繰返しせん断試験

Fig.1に,主応力比振幅R=3.0 一定の両振り繰返しせん断試験の結果を示す。各図は,(a)応力比(q/p)–軸差ひずみ (*ε*_d)関係,(b)応力比(q/p)–間隙比(e)関係,(c)定常状態における応力比(q/p)–間隙比(e)関係,(d)S-D関係をそれぞれ 示す。(d)では,中間主応力の影響を統一的に評価するため,修正応力t_{ij}²⁾の応力・ひずみ増分パラメータを用いて 整理を行った。(a)図より,繰返し載荷に伴い徐々にせん断剛性が大きくなり,やがて変形は収束して定常状態に 至る。(b)図より,せん断回数の増加とともに1サイクルあたりの圧縮量は減少し,最終的にはある間隙比において 体積変化も定常状態に至ることがわかる。ただし,(c)図に示すように,定常状態では体積圧縮量と膨張量がバラ ンスし,ループを描くように体積変化が平衡状態に至っている。つまり,定常状態時でも弾性挙動ではなく弾塑 性挙動を呈している。(d)図のS-D 関係は,繰返し回数の増加に伴い徐々に膨張側に移行している。



Fig.1 主応力比振幅 R=3 の両振り繰返しせん断試験

(2) 定常化後, 主応力比振幅を変化させる繰返しせん断試験

Fig.2, Fig.3 に,有効応力比一定の排水繰返し試験(Test2)に ついて,応力比-軸差ひずみ関係及び応力比-間隙比関係を示す。 図中の各色塗りプロットは各主応力比振幅での初期載荷を, 白抜きプロットは最終載荷を表している。図より,一度定常 化した砂は,より小さい応力比振幅で繰返し載荷を行っても, 定常状態を維持している。しかし,より大きな主応力比振幅 で繰返し載荷を行うと,定常化していた砂が再びせん断変形 や体積変化を生じ,載荷の進行に伴いそのせん断変形や体積 変化も繰返し回数の増加と共に徐々に収束し,再び定常状態 に至る。Fig.4, Fig.5 に,有効応力比一定の非排水繰返し試験

(Test3)について、有効応力比-軸差ひずみ関係及び有効応力 比-平均有効応力関係を示す。Fig.4(a)より、排水条件の時と同 様に繰返し載荷に伴ってせん断変形が収束する定常状態に至 ることがわかる。有効応力比が一定の繰返しでは何れの場合 も、繰返し回数の進行に伴い平均有効応力は減少するが最終 的には平均有効応力がこれ以上減少しないという定常状態に 至っている。そのため非排水条件下では、応力比が大きくな らない限り、繰返し載荷を行っても完全液状化には至らない。 Fig.4, Fig.5 より、有効応力比振幅の減少・増加に伴う定常状 態の変化の仕方は、排水条件の時のそれと同じである。 4. まとめ

排水・非排水試験はお互いに間隙水を介入して密接 な関係があり、排水条件が異なるからといって、砂自 体の変形特性が変化するわけではない。そのため、液 状化の表現を目的とする構成則であっても,非排水試 験結果だけでなく、排水試験によるダイレイタンシー 特性の変化を精緻に検討する必要がある。むしろ、現 象の本質を見極めるのであれば後者が有効である。ま た, 偏差応力の振幅が一定の非排水繰返し試験を応力 比振幅一定の排水繰返し試験と比較されることがある が、この二つは対応しておらず、有効応力比での制御 によって比較可能となる。実地盤においては、非排水 繰返し載荷後の排水による, 粒子の骨格構造の変化が 無いと仮定すると、一度繰返し載荷を経験した地盤に 前回よりも有効応力比振幅の小さい地震動を長時間与 えたとしても液状化が発生しないと考えることができ る。しかし、これは同一載荷方向(三軸圧縮・伸張条 件)の場合だけの議論であり、今後は主応力軸の回転 等についても実験・検討を進める予定である。

<u>参考文献</u> 1) 大橋ら:第 23 回中部地盤工学シンポジウム 2)T.Nakai and Y. Mihara, S&F, 24(2), pp.82-94, 1984.



(a)Stage1(R=2) (b)Stage2(R=1.5) (c)Stage3(R=3)

Fig.2 各応力比振幅での q/p - Ed 関係 (Drain)



(a)Stage1(R=2) (b)Stage2(R=1.5) (c)Stage3(R=3) Fig.3 各応力比振幅での *e* - *q*/*p* 関係 (Drain)





