

III-5 異なる三主応力を受ける砂の除荷、再載荷時の挙動

鹿島建設技術研究所
 東京大学工学部

正会員 宇田川 玲子
 “ 山田 恭央
 “ 石原 研而

▷はじめに◁

地震時には、大きさのみならず方向も変化するせん断応力が地盤内に作用すると考えられる。このような応力下における砂地盤の挙動を明らかにするために、三主応力を各々独立に制御できる立方体三軸せん断装置を用いて種々の載荷試験を行ってきた^{1),2)}。さらにその実験結果に基づき、砂の初期構造の異方性および降伏条件の異方性を考慮した、三次元応力状態における砂の変形モデルを提唱したが³⁾、簡明を期したために、除荷、再載荷時に生ずるひずみは等方的、かつ完全弾性的であると定めた。しかし、等方性はともかく、完全弾性の仮定が成立しないことは多くの研究で指摘されている。そこで、本研究では一連の排水繰返し載荷試験を行ない、除荷、再載荷時の挙動について基礎的な検討を加えてみた。

▷実験装置および方法◁

実験に用いた立方体三軸せん断装置については以前に詳述したので¹⁾、ここでは省略する。飽和富士川砂 ($G_s = 2.728$, $D_{50} = 0.40\text{mm}$, $U_c = 2.14$, $e_{\max} = 1.03$, $e_{\min} = 0.48$) を水中で堆積させて作製した供試体を 1kgf/cm^2 まで等方圧密したのち、平均主応力一定の条件で、図1に示す13の応力径路ごとにそれぞれ繰返し載荷試験を行なった。なお、繰返し載荷回数を重ねるごとに除荷を開始する応力比、 τ_{oct}/p' ($\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3}\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\}^{1/2}$, $p' = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$)、を0.085, 0.170, 0.339, 0.509と増加させ、完全に除荷して応力比零としたのち次の再載荷に移行した。

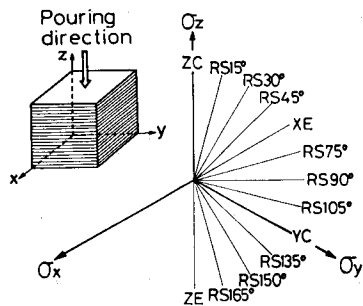


図1. 試験に用いた応力径路

▷実験結果と考察◁

図2には、実験結果の例として、通常の三軸圧縮試験に対応するZC方向の繰返し載荷試験時の体積ひずみ、 v 、とせん断ひずみ、 $\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3}\{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2\}^{1/2}$ 、を応力比に対してプロットしてみた。せん断方向角、 θ (図1参照)、の小さな試験では、図2(a)にみられるように、除荷、再載荷時を通じて常に体積収縮傾向が認められる。しかし θ の大きな試験では、除荷時には体積が収縮するものの、再載荷時にはほとんど体積変化が生じないが、あるいはわずかに体積が膨張する傾向を示す。なお、除荷、再載荷のサイクルが終了した時には、もとの状態よりも常に体積は減少しており、既往の最大応力比を越えようと体積ひずみは急増し、virgin 載荷曲線と包絡線とする。一方、図2(b)にみられるように、せん断ひずみはループを描くものの、除荷、再載荷のサイクル

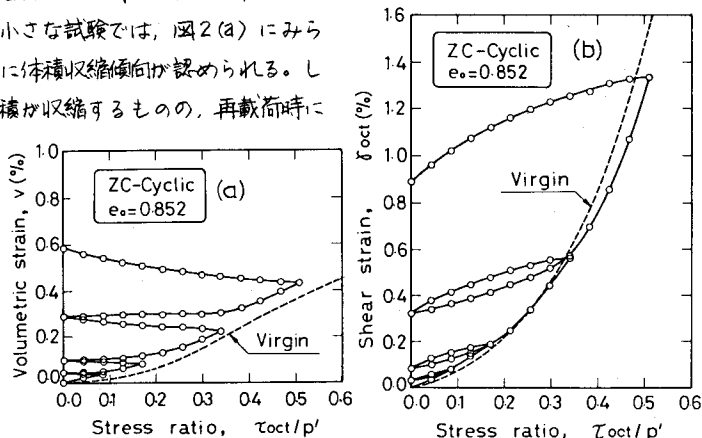


図2. 実験結果の一例——ZC方向での繰返し載荷試験

終了時にはもとの値とほぼ等しくなっている。また、応力比が大きくなると、virgin 載荷時よりせん断ひずみが小さくなることも注目される。

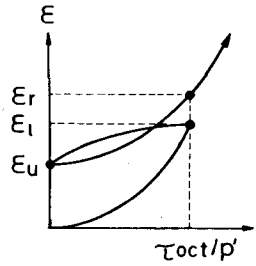


図3. 応力比-ひずみ関係模式図

図3の応力比-主ひずみ関係の模式図で定義される、 E_L , E_u , E_r (各々除荷開始時、除荷終了時、再載荷終了時のひずみに相当) を各試験より読み取り、除荷時のひずみ回復量、 $|E_L - E_r|$ 、に対し除荷開始時と再載荷終了時のひずみの差、 $|E_r - E_u|$ 、をプロットしたのが図4である。図4(a)の $E_L > 0$ (圧縮ひずみ) のプロットをみると、○印の水平方向ひずみ、△印の鉛直方向ひずみの別にかかわらず、再載荷終了時には除荷開始時より大きなひずみとなっていることがわかる。一方、図4(b)の $E_L < 0$ (伸張ひずみ) のプロットでは、逆に再載荷終了時のひずみは除荷開始時より小さくなっているが、やはりひずみの方向——鉛直或水平——に依存せず一定の傾向を示している。この圧縮ひずみと伸張ひずみの対照的な性質により、図2でせん断ひずみがループを描いているにもかかわらず、除荷開始時より再載荷終了時の体積ひずみが大きくなる特性が説明できよう。なお図4をみると、ぼらつきはあるものの、除荷時のひずみ回復量が大きい程、除荷開始時と再載荷終了時のひずみの差が大きくなっていることがわかる。

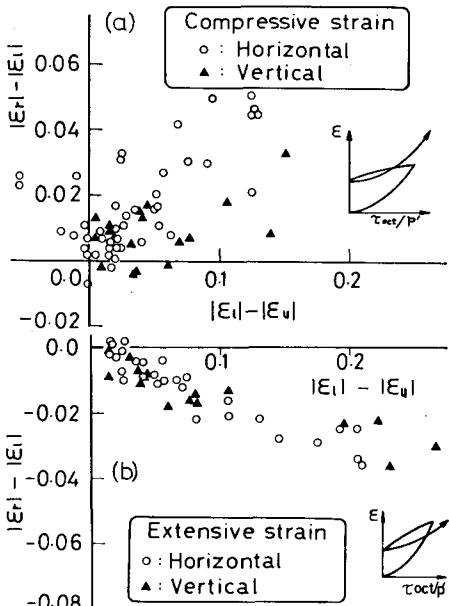


図4. $(|E_L - E_u|) \sim (|E_r - E_L|)$ 関係

図4では、 $\sigma_y' = \sigma_z' > \sigma_x'$ の XE 方向での繰返し載荷試験時の、除荷、再載荷過程における ΔE_y と ΔE_z を比較し、異方性について検討してみた。応力状態が同一でも、(a)図に示した除荷時には、 $\Delta E_z < \Delta E_y < 0$ と鉛直方向に伸張しやすい傾向が認められる。これは virgin 時と共通する性質であるが、両者の差はそれほど大きいものではない。一方(b)図の再載荷時には、virgin 時のように鉛直方向より水平方向に収縮しにくい性質は認められず、ほぼ $\Delta E_y = \Delta E_z$ となっている。また、YC 方向での繰返し載荷時には、鉛直、水平方向のひずみに有意な差は認められず、各試験の除荷、再載荷時のせん断ひずみ、体積ひずみの増分量にも供試体初期構造の異方性の影響はほとんどみられなかった。これらを総合すると、除荷、再載荷時の変形は virgin 時とは異なり、かなり等方的であると結論できよう。

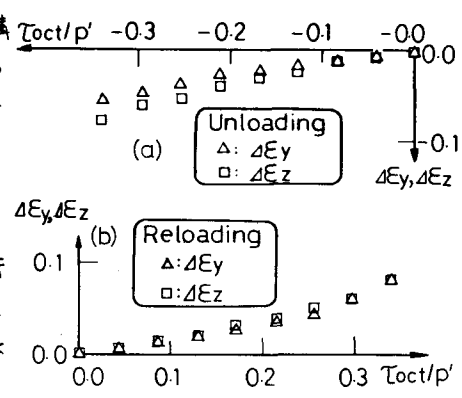


図5. XE 方向での繰返し載荷時の ΔE_y と ΔE_z

ひずみ

除荷、再載荷時の挙動に差異をあて排水繰返し載荷試験を行ない、圧縮、伸張ひずみの相違により変形の様相が異なることを明らかにした。また、除荷、再載荷時の変形は virgin 時と異なりかなり等方的なものであることがわかった。

参考文献

(1) Yamada & Ishihara (1979): Anisotropic Deformation Characteristics of Sand under Three Dimensional Stress Conditions, Soils & Foundations, Vol.19, No.2. (2) 山田・石原(1977): せん断方向E変化させた砂の排水繰返し載荷試験, 土木学会32回年次学術講演会講演記録集. (3) 山田・石原(1980), 三次元応力状態における砂の変形モデル, 第15回土壌工学研究発表会発表講演集.