

III-139

正八面体面上の各種回転応力経路下の異方性砂の 応力・ひずみ挙動の解析

大成建設

正 員 ○松原 義仁、名古屋工業大学 正員 松岡 元

名古屋工業大学 大学院 学生員 原 康彦、 前田建設

鈴木 敏之

3主応力下の砂の変形を、2次元の砂の応力・ひずみモデルの重ね合わせにより規定する構成式に、繰返しせん断履歴、初期異方性を考慮し、異方性砂の3次元繰返し応力経路に適用した。ここでは、水平体積された異方性試料を用い、正八面体面上の半径方向せん断応力経路のみならず、Mises規準、Mohr-Coulomb規準、松岡・中井規準に沿って一周まわす回転応力経路を対象として実験を行ない、解析を試みた。

1. 砂の応力・ひずみ構成式

提案モデルは次の3つの仮定に基づいて定式化されている。³⁾イ). 3主応力下の各主ひずみは各2主応力間の2次元スベリによって生じた主ひずみ2つずつの重ね合わせとして表現する。ロ). ひずみの降伏条件は各主応力比(σ_1/σ_2 , σ_1/σ_3 , σ_2/σ_3)によって各2主応力間で独立に規定される。ハ). 上述の3個の各2主応力間では、一般座標表示の砂の構成式が成立するものとする。^{1), 2)}上記の仮定より結果のみを示せば、各主ひずみは積分可能で以下のように与えられる。

$$\begin{cases} \epsilon_1 = F(\phi_{mo12}) + F(\phi_{mo13}) \\ \epsilon_2 = F(\phi_{mo23}) + G(\phi_{mo12}) \\ \epsilon_3 = G(\phi_{mo13}) + G(\phi_{mo23}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F(\phi_{moij}) \Big\} &= k_{sij} \cdot \sin^2 \phi_{ij} \left\{ \frac{\cos \phi_{moij}}{\lambda (\sin \phi_{ij} - \sin \phi_{moij})} - \frac{1}{\sin \phi_{ij}} - \phi_{moij} \right. \\ G(\phi_{moij}) \Big\} &\quad - \tan \phi_{ij} \cdot \log_e \frac{(1 + \cos \phi_{ij}) (\sin \phi_{ij} - \sin \phi_{moij})}{\sin \phi_{ij} (1 + \cos (\phi_{ij} + \phi_{moij}))} \\ &\quad + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda} \right) \cdot \left\{ \frac{\sin \phi_{moij}}{\sin \phi_{ij} - \sin \phi_{moij}} + \log_e \frac{\sin \phi_{ij} - \sin \phi_{moij}}{\sin \phi_{ij}} \right. \\ &\quad \left. \pm \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sin \phi_{ij} - \sin \phi_{moij}} + \frac{1}{\sin \phi_{ij}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし $\phi_{moij} = \tan^{-1} \left\{ \left(\sqrt{\frac{\sigma_i}{\sigma_j}} - \sqrt{\frac{\sigma_j}{\sigma_i}} \right) / 2 \right\} \quad (3)$

($i > j, i = 1, 2, j = 2, 3$)

上式中の土質パラメータは k_s , ϕ , λ , μ の4つで、 λ , μ は土質定数と考えられ、 k_s , ϕ は繰返しせん断履歴、初期異方性により後述のように変化するものである。

2. 繰返しせん断履歴の評価

図-1は繰返しせん断時の45°面上での応力比・せん断ひずみ関係を示している。逆方向せん断開始時には、粒子間摩擦により $\tan \phi_{mo} = 2\mu$ の間ひずみは生じないとしている。⁴⁾また、「どの応力比レベルからの逆方向せん断においても、破壊時のせん断ひずみ γ_F の大きさは、単調載荷時の破壊せん断ひずみと等しい。」と仮定することで、繰返しせん断履歴を評価し、パラメータ k_s に反映させた。しかし、今回用いている応力比・せん断ひずみ曲線は、双曲線型で破壊強度 ϕ のときせん断ひずみは無限大となるので、便宜上破壊時のせん断ひずみを破壊強度 ϕ の9割の時のせん断ひずみと考えている。 k_s は単調載荷時の初期変形係数 k_{s1st} と繰返し応力比 ϕ_a にのみ関係し、次式で予測される。なお、破壊強度 ϕ については、せん断履歴の影響を考慮せず一定とした。

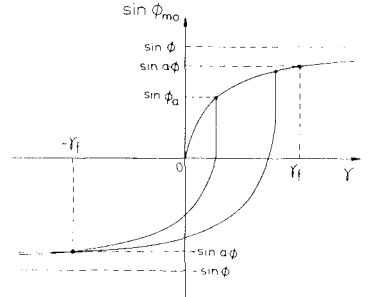


図-1 繰返しせん断履歴の評価

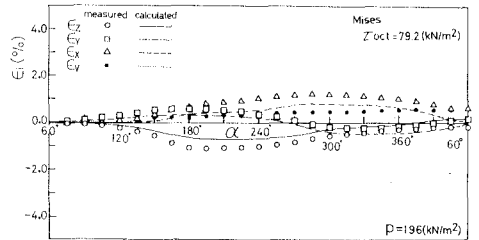


図-2 正八面体面上のMises規準に沿って回した場合の3主ひずみ・体積ひずみの実測値と解析値

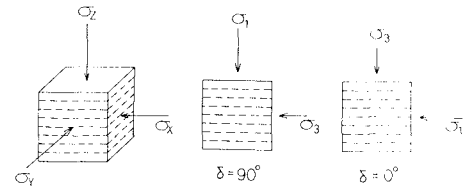


図-3 異方性砂の堆積方向と主応力方向の概念図

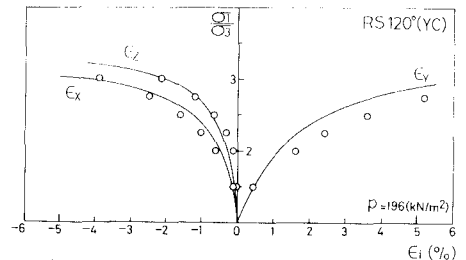


図-4 正八面体面上の三軸圧縮試験 (RS120°, Y comp.)の実測値と解析値

$$k_{sij} = \frac{\frac{\sin(a \cdot \phi_{ij})}{\sin \phi_{ij} - \sin(a \cdot \phi_{ij})} + \frac{\sin \phi_{aij}}{\sin \phi_{ij} - \sin \phi_{aij}}}{\frac{\sin(a \cdot \phi_{ij})}{\sin \phi_{ij} - \sin(a \cdot \phi_{ij})} + \frac{\sin(\phi_{aij} - \tan^{-1} 2u)}{\sin \phi_{ij} + \sin(\phi_{aij} - \tan^{-1} 2u)}} \cdot k_{sijlst} \quad (4)$$

図一2は、等方性砂（間隙比 $e_o \approx 0.66$ ）における正八面体面上で、三軸伸張（RS 60°, X ext.）下で最大・最小主応力比 $R=3.0$ までせん断したのち、Mises規準に沿って一周まわす回転応力経路の実測値と解析値を示しているが、上述のせん断履歴を考慮した解析値は、実測値の傾向を良く説明している。解析値には、土質パラメータとして $k_s=0.23\%$, $\phi=40^\circ$, $\lambda=1.2$, $\mu=0.2$ を用いている。

3. 初期異方性の評価

図一3に示すような水平堆積された異方性砂を対象にしているため、各2主応力間において最大主応力方向と堆積面とのなす角 δ が 90° のときは $k_{sij}=k_{SV}$, $\phi_{ij}=\phi_V$, $\delta=0^\circ$ のときは $k_{sij}=k_{SH}$, $\phi_{ij}=\phi_H$, 堆積面内では双方の平均値で近似し、 $k_{sij}=k_{SI}=(k_{SV}+k_{SH})/2$, $\phi_{ij}=\phi_I=(\phi_V+\phi_H)/2$ と考えている ($k_{SV}<k_{SI}<k_{SH}$, $\phi_H<\phi_I<\phi_V$)。なお、このパラメータは水平堆積された異方性供試体の三軸圧縮・伸張の2つの試験より求めることができる ($k_{SV}=0.4\%$, $\phi_V=35^\circ$, $k_{SH}=1.4\%$, $\phi_H=33^\circ$, $\lambda=1.2$, $\mu=0.2$)。図一4は異方性砂に対して正八面体面上で三軸圧縮試験（RS 120°, Y comp. $\sigma_Y>\sigma_Z=\sigma_X$ ）を行なった結果である（実験方法は後述）。実測値は等しい2主応力方向の主ひずみ ϵ_Y , ϵ_Z に違いがみられるが、初期異方性を考慮した解析値は、その差異を的確に説明している。

なお、異方性砂に繰返しせん断履歴を考慮するには、 k_{SV} , ϕ_V により規定される応力比・せん断ひずみループと、 k_{SH} , ϕ_H により規定される応力比・せん断ひずみループを最大主応力方向と堆積面とのなす角 δ により、順次どちらかに乗り移るものとする。

4. 異方性砂の正八面体面上の各種回転応力経路試験とその解析

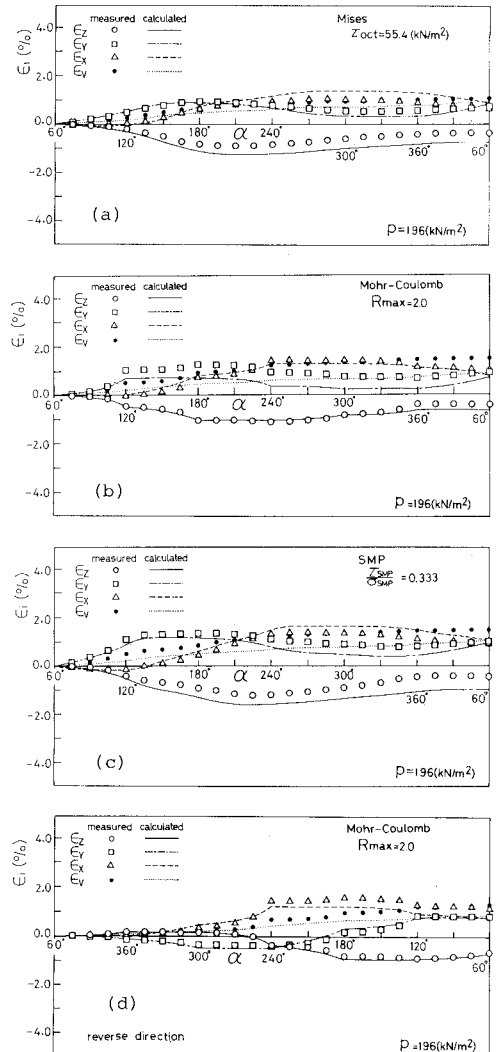
正八面体面上の半径方向せん断応力経路や、各種の回転応力経路について剛板載荷型三主応力制御試験機を用いて実験を行なった。この実験機は3方向とも、すべて載荷板の載荷機構が同一で一方の載荷板に作用する荷重の反力で、他方の載荷板を載荷する形のものである^{3),4)}。供試体は約 $96\text{mm} \times 96\text{mm} \times 110\text{mm}$ の直方体で、今回は異方性試料を作成するため、ゴムバッグ内に水を満たし、飽和した豊浦砂を水中落下させて水平堆積させた。試料は 0.1kgf/cm^2 圧密時の間隙比が約 0.86 でかなりゆるいものである。図一5(a),(b),(c),(d)は、正八面体面上の三軸伸張（RS 60°, X ext.）下で最大・最小主応力比 $R=2.0$ までせん断したのち、Mises規準、Mohr-Coulomb規準、松岡・中井規準（SMP規準）、Mohr-Coulomb規準の逆まわしの4種の回転応力経路に沿って一周まわしたときの実験結果および解析値を示している。どの回転応力経路も水平堆積された供試体であるため、等方性試料に比べ、 ϵ_X , ϵ_Y に関しては、圧縮しやすいが膨張しにくく、 ϵ_Z に関しては、圧縮しにくいが膨張しやすいという実測値の傾向を解析値は的確に説明していると思われる。

以上より、正八面体面上の各種回転応力経路下の異方性砂の変形挙動を、繰返しせん断履歴や初期異方性の影響をパラメータ k_s , ϕ に反映させることによって的確に表現することができた。

謝辞 日頃御援助頂いている本学山内利彦教授、御指導・御助言を頂いた中井照夫助教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 松岡・岩田・横原・鈴木(1986):第21回土質工学研究発表講演集
- 2) H.Matsuoka, Y.Iwata and K.Sakakibara(1986):Proc. of 2nd Int. Conf. on Numerical Models in Geomechanics, Ghent, Belgium.
- 3) 松岡・小山・山崎・松原・村井(1984):第19回土質工学研究発表講演集
- 4) 松岡・小山・山崎(1985):S&F, Vol.25, No.1, pp.27-42.



図一5 正八面体面上の各種回転応力経路における3主ひずみ・体積ひずみの実測値と解析値