

砂質土のせん断挙動の逆解析

鹿児島大学工学部 学○荻/迫和弘 正 三隅浩二
同 上 学 佐藤 清 学 寺脇 学

1. はじめに 土の構成則はできるだけ少ない実験結果より導かれることが望ましい。本報告では、砂質土のような正負のダイレイタンス挙動を呈する複雑な土質材料のせん断挙動のメカニズムを拘束圧一定条件および平均主応力一定条件で得られる排水せん断試験データを用いて逆解析する方法について議論している。

2. 砂質土のコンプライアンスマトリックス成分の検出 式(1)は土質材料で一般的に成り立つ構成式で、 $[C]$ をコンプライアンスマトリックスと呼び、その成分 $C_1 \sim C_4$ は土質材料の変形の生じやすさを表す。本研究の目的は、せん断にともなう $C_1 \sim C_4$ の変化を実験データより直接求めて、流れ則やダイレイタンスなどのせん断挙動を解明することにある。4つの未知な $[C]$ の成分を求めるためには、4つの応力ひずみ曲線の接線勾配が既知でなければならない。したがって、提案手法で必要なのは、砂質土の拘束圧一定条件および平均主応力一定条件より得られる排水せん断試験データと、それらの応力ひずみ曲線の接線勾配をはかるテクニック(非線形最小自乗法 etc.)である。なお、平均主応力一定試験の p' の値は、応力レベルを揃えるために拘束圧一定試験で変化する p' の値の平均値をとる必要がある。

さて今回は、Sacramento River Sand (S.R.S., $Dr=38\%$)を解析の対象とするが、そのS.R.S.をよく説明できるラディモデル、式(2)～式(5)を利用して、提案手法の有効性を確かめる。ラディモデル¹⁾の特徴はそのメカニズムの組み立て方がユニークなことである。まず、等方圧縮、膨潤の挙動より弾性挙動と塑性圧縮挙動(plastic collapse strains)のメカニズムを決定している。次に、それらがせん断挙動時にも同様に働くと考えて、広範囲の拘束圧における三軸圧縮試験データを説明できる第2の塑性挙動のメカニズム(plastic expansive strains)を決定している。式(2)を見てわかるように、弾性挙動は非線形等方弾性、collapse 挙動は関連流れ則、expansive 挙動は非関連流れ則に従う。

ところで、土質材料は一般に拘束圧が増せば増すほど変形しにくくなるので、 $C_1 \sim C_4$ は拘束圧の増加により小さくなっていく。したがって、 $C_1 \sim C_4$ は平均主応力 p' を掛けて正規化すれば、その値は応力径路に依存せずに η' 軸に対してはユニークなラインになると考えられる。このことが逆解析に採用した2つの試験径路で問題となる応力レベルの範囲でほぼ成り立っていることを図1～図4で確かめている。白四角のプロットは拘束圧一定条件より得られる $C_i \cdot p'$, $i=1, 2, 3, 4$ の変化を示し、黒丸は平均主応力一定条件より得られる $C_i \cdot p'$, $i=1, 2, 3, 4$ の変化を表している。図1～図4より、近似的にどの応力レベルにおいても両者が一致していると見なして良いことがわかる。したがって、任意の応力レベルではかられる先の4つの変形係数より、 $C_i \cdot p'$, $i=1, 2, 3, 4$ をすべて逆算する方法が有効であることがわかる。なお、 $C_i \cdot p'$, $i=1, 2, 3, 4$ は2つの応力径路の交差する応力比 $\eta' = 0.948$ で厳密に得られる。

土が関連流れ則に従うのか、非関連流れ則に従うのかを判定するには C_2 と C_3 の挙動を比較すればよい。また、図5の C_4/C_1 より、弾性挙動の卓越したせん断初期の挙動より弾性挙動のポアソン比を算出することができるので、この値がせん断後期の塑性変形の卓越する領域でも変わらないとすれば、 $\det[C^P] = 0$ を満たすように、せん断中の弾性挙動と塑性挙動とを分離することができる。図6でせん断後期に $\det[C]$ の値が増大しているのは、弾性挙動の発生が塑性挙動の $\det[C^P] = 0$ のバランスを崩すためであると考えられる。

3. おわりに 砂のせん断挙動は複雑なので、砂の構成式も一般に難しい。砂の構成式はせん断の詳細なメカニズムを表すが、構成式や数多くのパラメータをどんなにながめてみても砂のせん断挙動のすべてを把握できるものではない。また、砂の応力ひずみ曲線は視覚的にせん断挙動の複雑さを理解させてくれるが、ある限られた応力径路の情報だけしか教えてくれない。そこで本報告では、特殊な応力径路に関与しないせん断のメカニズムを直接理解するために、式(1)に示すコンプライアンスマトリックス $[C]$ の成分を求めて、それを応力比に対してプロットすることを試みた。非線形性は美しい。砂のせん断挙動よりむしろ線形性を見いだしてパラメータを決定することも必要かもしれないが、流れ則やダイレイタンスをありのままの形で理解することの方が大事であると考ええる。

参考文献

- 1) Poul V. Lade : Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces, Report to the National Science Foundation, Grant No. GK37445, 1975
- 2) 三隅, 佐藤, 福本, 田平: 逆解析による土質材料の流れ則の判定, 平成2年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 554-555, 1991

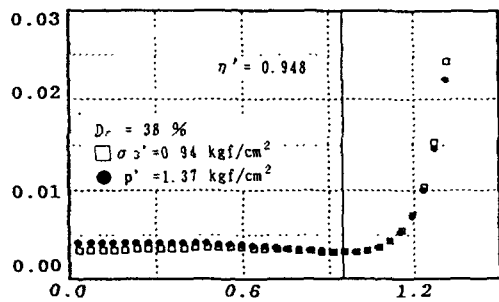


図1 $C_1 * p'$ の変化 η'

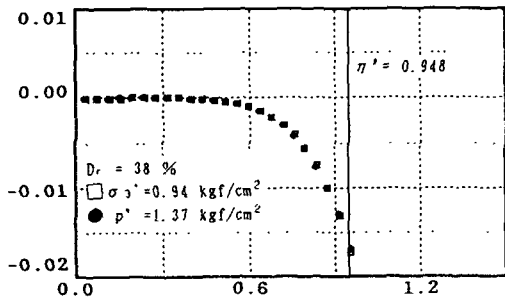


図3 $C_3 * p'$ の変化 η'

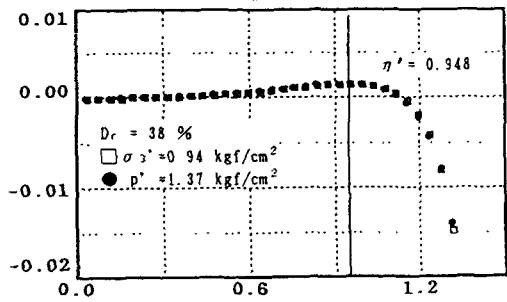


図2 $C_2 * p'$ の変化 η'

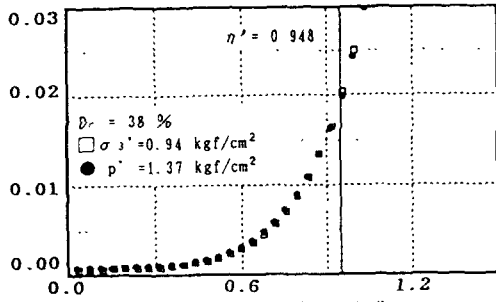


図4 $C_4 * p'$ の変化 η'

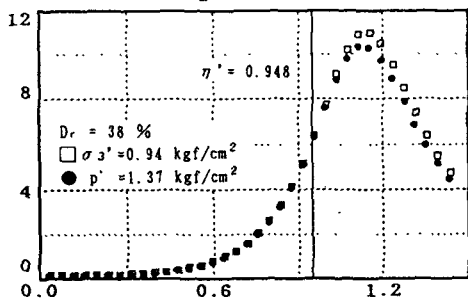


図5 C_4 / C_1 の変化 η'

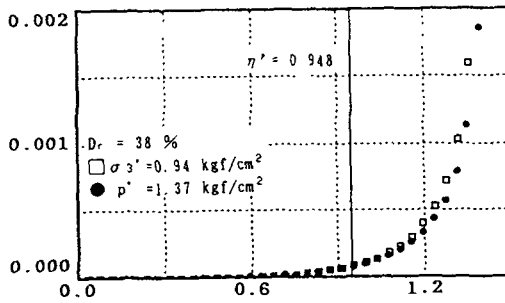


図6 C_4 / C_1 の変化 η'

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dp' \\ dq \end{pmatrix} \quad \text{--- (1)}$$

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3(1-2\nu)}{E} & 0 \\ 0 & \frac{2(1+\nu)}{3E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dp' \\ dq \end{pmatrix}$$

elastic

$$+ h_c \begin{pmatrix} \frac{\partial g_c}{\partial p'} \cdot \frac{\partial f_c}{\partial p} & \frac{\partial g_c}{\partial p'} \cdot \frac{\partial f_c}{\partial q} \\ \frac{\partial g_c}{\partial q} \cdot \frac{\partial f_c}{\partial p} & \frac{\partial g_c}{\partial q} \cdot \frac{\partial f_c}{\partial q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dp' \\ dq \end{pmatrix}$$

collapse

$$+ h_p \begin{pmatrix} \frac{\partial g_p}{\partial p'} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial p} & \frac{\partial g_p}{\partial p'} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial q} \\ \frac{\partial g_p}{\partial q} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial p} & \frac{\partial g_p}{\partial q} \cdot \frac{\partial f_p}{\partial q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dp' \\ dq \end{pmatrix} \quad \text{(2)}$$

expansive

$$E = K_{ur} \cdot p_a \cdot (\sigma_3')^\nu$$

$\nu = 0.2$

$$f_c = l_1^2 - 2 \cdot l_2$$

$$h_c = \frac{dW_c}{df_c} \left(p' \cdot \frac{\partial g_c}{\partial p} + q \cdot \frac{\partial g_c}{\partial q} \right) - 1$$

$$W_c = C \cdot p_a \cdot (f_c / p_a)^p$$

$$f_p = (l_1^3 / l_3 - 2.7) \cdot (l_1 / p_a)^\eta$$

$$g_p = l_1^3 - \{2.7 + \eta_2 \cdot (p_a / l_1)^\eta\} \cdot l_2$$

$$\eta_2 = S \cdot f_p + R \cdot \sigma_3'^{1/2} + t$$

$$h_p = \frac{dW_p}{df_p} \left(p' \cdot \frac{\partial g_p}{\partial p} + q \cdot \frac{\partial g_p}{\partial q} \right) - 1$$

$$f_p = a \cdot \exp(-bW_p) \cdot (W_p / p_a)^{1/q}$$