

最小二乗法を駆使したしらすの三軸試験データ解析

鹿児島大学大学院 学生会員 野村 将平
鹿児島大学大学院 正会員 三隅 浩二

1. はじめに 地盤の変形・破壊予測を行うためには事前に地盤を構成する土質材料の弾塑性パラメータを正しく評価しておくことが必要である. 有限要素法などによる予測結果は用いたパラメータの数値に大きく依存するため, より正確なパラメータを求める必要がある. 本報告では三軸試験結果に最小二乗法を駆使することで弾塑性パラメータを決定する方法を提案する. 今回はしらすの三軸試験結果より弾塑性パラメータおよび過圧密解消のメカニズムを決定して, 提案方法の有効性を確認する.

2. 弾塑性パラメータの決定 圧縮指数 λ はせん断時における体積ひずみやせん断ひずみの発生量を決める重要なパラメータである. この圧縮指数 λ を過圧密の程度($v_\lambda = v + \lambda \ln p'$)の等しい2組の体積比 v と平均有効主応力 p' の値を用いて決定することができる. すなわち, 三軸供試体が圧縮から膨張に転じるときの圧縮側の最大体積ひずみ $\varepsilon_{v \max}$ に着目し $(\varepsilon_{v \max})_A = (\varepsilon_{v \max})_B$ ならば $(v_\lambda)_A = (v_\lambda)_B$, すなわち, $(v + \lambda \ln p')_A = (v + \lambda \ln p')_B$ の関係より $\lambda = ((v)_A - (v)_B) / ((\ln p')_B - (\ln p')_A)$ を決定することができる. 図1は圧縮から膨張に転じるときの $\varepsilon_{v \max}$ とせん断開始時の体積比 v_0 の関係を示す. まずフィッティングパラメータ c を図1より決定する. すなわち最も過圧密な供試体の $\varepsilon_{v \max}$ の値を $c (=0.00215)$ とした. 次に, $p'_0 = 49.0 \text{ kPa}$ と $p'_0 = 98.1 \text{ kPa}$ のデータのそれぞれに実験式 $y = ax^b + c$, $y = a(x+d)^b + c$ ($y = \varepsilon_{v \max}$, $x = v_0$)をあてはめて, $a = 1.66 \times 10^{-6}$, $b = 10.05044$, $d = 0.17553$ を得ている. これらの曲線の隔たりが $d = (v)_A - (v)_B$ であるので, ここに, $\lambda = 0.253$ を決定した. 図2は得られた応力比 $\eta' \sim$ 塑性せん断ひずみ $\varepsilon_s^p \sim$ 塑性体積ひずみ ε_v^p 関係の一例ならびに限界状態パラメータ M の決定法を示す. すなわち塑性体積ひずみ ε_v^p が圧縮から膨張に転じるときの応力比 $\eta' = q/p'$ より $M (=1.36)$ を決定している. 図3のプロットは各試験で得られた供試体が圧縮から膨張に転じるときの接線勾配 $d\eta' / d\varepsilon_s$ と $v_\lambda = v + \lambda \ln p'$ の関係を示している. 右下がりの直線はプロットに線形最小二乗法を適用して得たものである. この直線を用いて限界状態線の位置を決めるパラメータ $\Gamma (=3.62)$ は $d\eta' / d\varepsilon_s = 0$ の v_λ の値より決定した. その他, 弾性ひずみの発生量に関わる膨潤指数 $\kappa (=1.25 \times 10^{-3})$ とポアソン比 $\nu' (=0.37)$ は, 拘束圧一定条件で除荷を行って直接求めた. さらに正規圧密線的位置を決めるパラメータ N は $N = \Gamma + (\lambda - \kappa) \ln 2$ より 3.79 を決定した.

3. 過圧密解消のメカニズム さて, 上記の弾塑性パラメータを使えば式(1)より正規降伏面の大きさ p_y^* と下負荷面の大きさ p_y' の比を表すパラメータ $R = p_y' / p_y^*$ を求めることができる.

$$R = p_y' / p_y^* = \{p' (M^2 + \eta'^2) / M^2\} / \exp \{(N - v_\kappa) / (\lambda - \kappa)\}, v_\kappa = v + \kappa \ln p' \quad (1)$$

一方, R の変化率 $U = dR / |d\varepsilon^p|$ は式(2), 式(3)より求めることができる. 但し塑性ひずみ増分比 $\phi = (M^2 - \eta'^2) / 2\eta'$ である.

$$U = dR / |d\varepsilon^p| = (m^{-1} - 1) R / DM \cdot d\varepsilon_v^p / |d\varepsilon_v^p| \cdot 1 / (1 + (1/\phi)^2)^{0.5} \quad D = (\lambda - \kappa) / M v_0 \quad (2)$$

$$m^{-1} = d(\ln p_y') / d(\ln p_y^*) = \{M^2 - \eta'^2 + 6\eta'\} (\lambda - \kappa) / [\{v_{0.2}(3 - \eta') \cdot d\varepsilon_v / d\varepsilon_s \cdot d\varepsilon_s / d\eta' - \kappa\} \cdot \{M^2 + \eta'^2\}] \quad (3)$$

得られた $U \sim R$ 関係に実験式 $y = a \cdot \exp(bx^2 + cx)$ ($y = U$, $x = R$)をあてはめてフィッティングを行った. ここに, $a = 12.0871$, $b = 25.25088$, $c = -23.04904$ が得られている. また, これらの $U \sim R$ 関係と弾塑性パラメータを弾塑性構成式に組み込むことで, 応力 $\sim$ ひずみ曲線の再現を試みた. 図5は $\varepsilon_s \sim \eta'$ 関係, 図6は $\varepsilon_v \sim \eta'$ 関係を示している. 図5をみると再現結果の方が試験結果よりも ε_s の発生が少なくなっているものの, 試験全体としてはある程度再現できていると考えられる. 一方, 図6をみると精度よく試験結果を再現できていることがわかる. これにより, 最小二乗法を駆使した三軸試験データ解析法の有効性を確認することができた.

4. 参考文献

- 1) J. H. Atkinson, P. L. Bransby, The Mechanics of Soils, McGRAW-HILL Book Company (UK) Limited, Chapter 12 The Behaviour of Sands, pp. 235-262, 1978
- 2) 三隅浩二, 小田原市典, 土木学会第66回年次学術講演会概要集, 砂質土の拘束圧・初期間隙比の組み合わせと三軸試験結果の関係, III-417, pp. 833-834, 2011

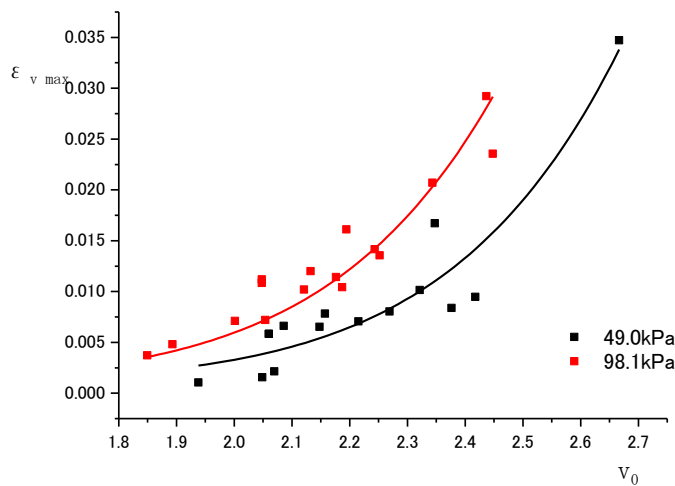


図1 $\epsilon_{v \max} \sim V_0$ 関係

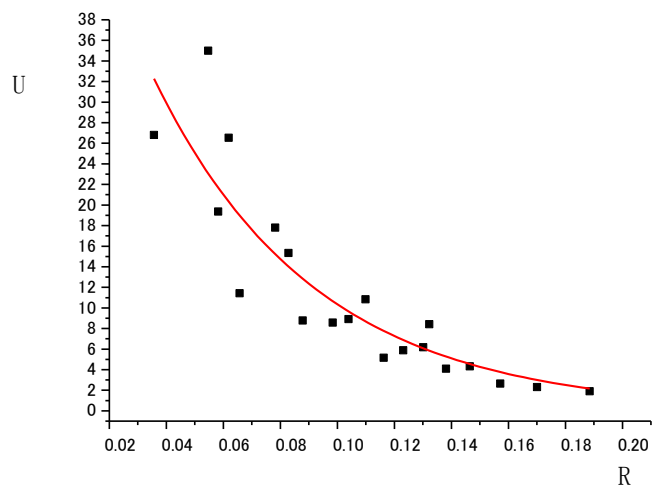


図4 $U \sim R$ 関係のフィッティング

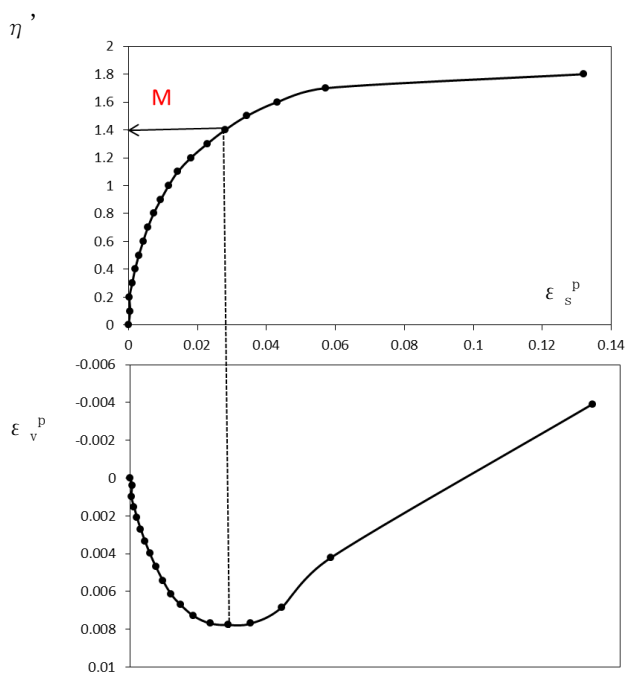


図2 $\eta' \sim \epsilon_s^p \sim \epsilon_v^p$ 関係

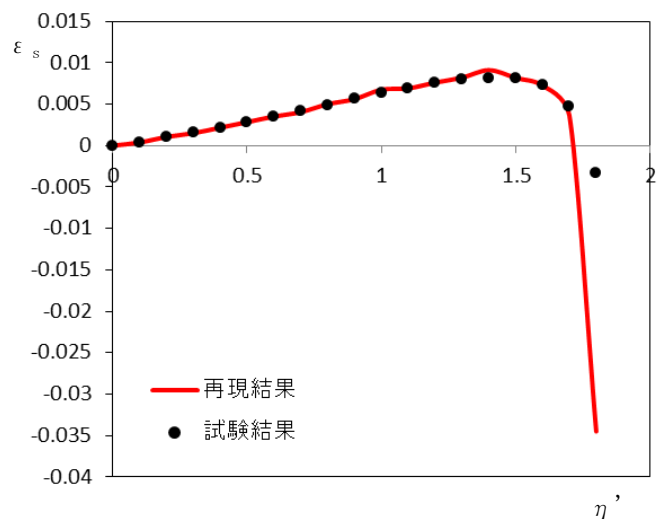


図5 再現結果と試験結果の比較 ($\epsilon_s \sim \eta'$ 関係)

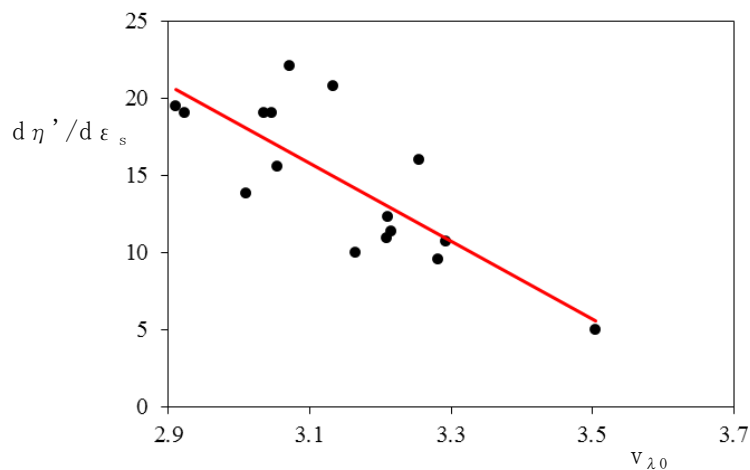


図3 $d\eta'/d\epsilon_s \sim v_{\lambda 0}$ 関係

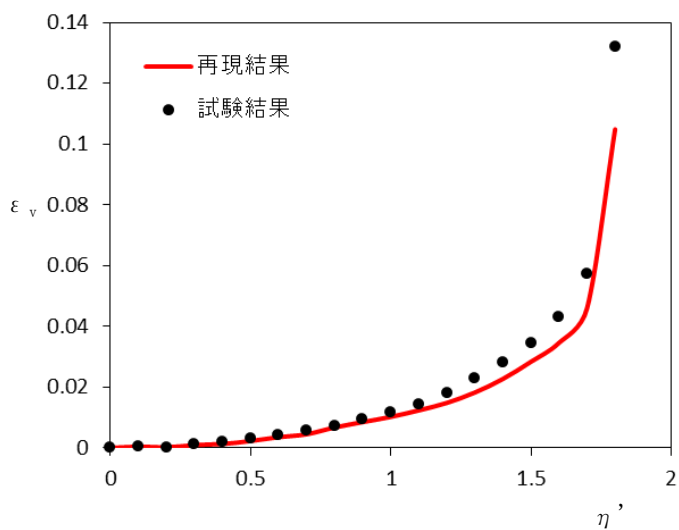


図6 再現結果と試験結果の比較 ($\epsilon_v \sim \eta'$ 関係)