

多様な応力経路下における密な礫の繰返し三軸試験とそのシミュレーション

東京大学生産技術研究所 正会員 古関潤一
 東京大学 Kandasamyiyer Balakrishnaiyer

1.はじめに

締固めて作成した密な礫試料を対象に、鉛直応力 σ_v 、水平応力 σ_h 、または平均応力 $\sigma_m = (\sigma_v + \sigma_h)/2$ を一定に保つ排水三軸試験を実施した。これまでに、このような異なる応力経路下での単調載荷時の応力ひずみ関係を統一的に表現する方法¹⁾と、一定の応力経路下での大振幅繰返し載荷時の応力ひずみ関係をモデル化する方法²⁾について検討してきた。ここでは、多様な応力経路下で実施した繰返し三軸試験結果のシミュレーションに、これらの方法を組み合わせて適用した結果を報告する。

2.試験方法

含水比を5.5%に調整した千葉レキ ($D_{50} = 40\text{mm}$, $D_{50} = 10\text{mm}$, $F_c = 4\%$) を室内で強く締固めて初期間隙比 $e_o = 0.222$ 、乾燥密度 2.22g/cm^3 の矩形供試体 (高さ 57cm 、断面 $23 \times 23\text{cm}$) を作成した。等方圧密の後、図1に実線として示す応力経路で繰返し三軸せん断した。その際に、いくつかの応力状態で鉛直・水平方向に微小振幅の繰返し載荷を行い、弾性的な変形特性を測定した。

3.モデル化の方法

$\sin(\phi)_{\text{mob}} = [(\sigma_v - \sigma_h) / (\sigma_v + \sigma_h)]$ とせん断ひずみ $\gamma = [\epsilon_v - \epsilon_h]$ をパラメータとして用いると、軸差応力 $q = [\sigma_v - \sigma_h]$ と軸ひずみ ϵ_v を用いた場合よりも三軸圧縮側と三軸伸張側での単調載荷時の応力ひずみ関係が対称に近づく。しかし図2aに示すように応力経路により異なる関係となるため、 $\sin(\phi)_{\text{mob}} / \sin(\phi)_{\text{peak}}$ と $\Sigma (d\gamma^p / \gamma_r)$ を新たな応力・ひずみパラメータとして定義した(図2b)¹⁾。ここで、 $\sin(\phi)_{\text{peak}}$ は $\sin(\phi)_{\text{mob}}$ のピーク値、 $d\gamma^p$ は塑性的なせん断ひずみ増分、 $\gamma_r = [\tau_{\text{peak}} / G_o]$ は基準ひずみ、 $\tau_{\text{peak}} = [q_{\text{peak}} / 2]$ はピーク応力状態におけるせん断応力、 G_o は微小ひずみレベルでの 45° 面上におけるせん断弾性係数である $[= 1 / \{ (1 + \nu_{vh}) / E_v + (1 + 2\nu_{vh} - \nu_{hh}) / E_h \}]$ 。

正規化に用いた $\sin(\phi)_{\text{peak}}$ 、 τ_{peak} 、 G_o は一定ではなく、図3に示す破壊包絡線と前述した弾性的変形特性の定式化結果³⁾に基づき、各時点での平均応力 σ_m を一定に保つような応力経路に対して求まる変数として設定した。そのためにひずみパラメータは増分の総和をとる形式で定義されている。

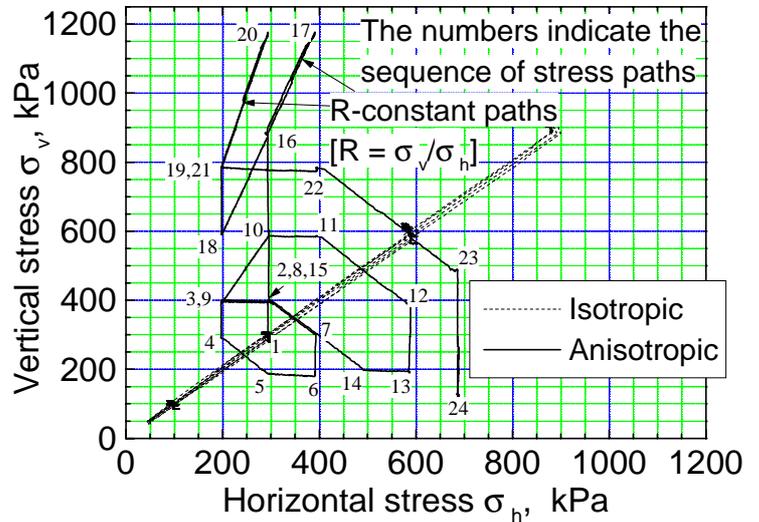


図1 繰返し三軸試験に用いた応力経路

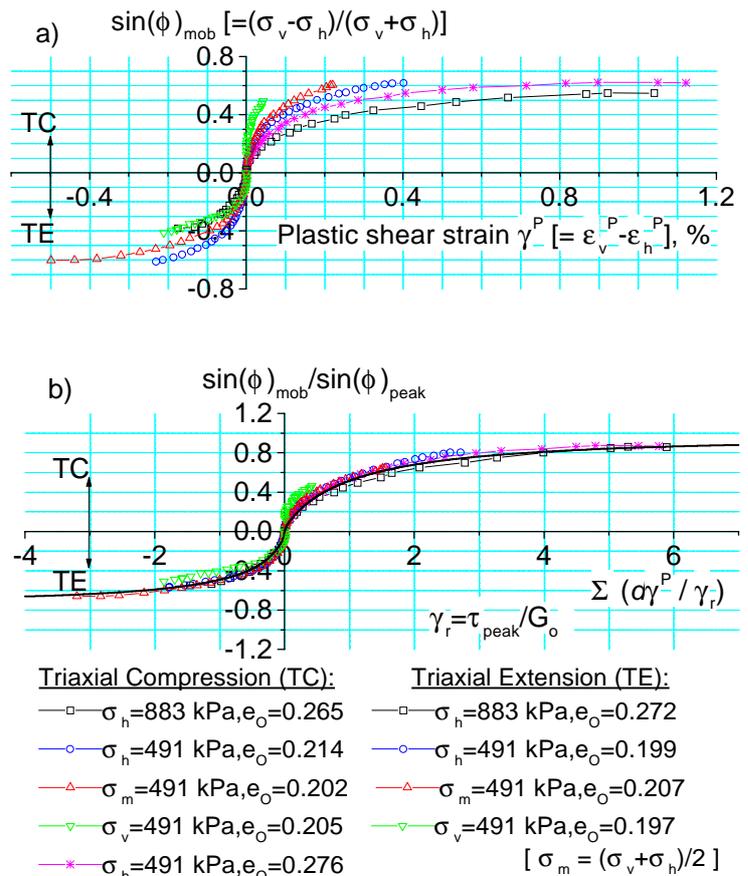


図2 単調載荷時の応力ひずみ関係¹⁾

キーワード：礫、三軸試験、応力 - ひずみ関係、モデル化、繰返し載荷、応力経路

連絡先：〒153-8505 目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 (Tel 03-5452-6421, Fax 03-5452-6423)

繰返し載荷時のモデル化には、応力ひずみ関係が完全には対称ではないことと、繰返し載荷中にひずみ硬化が生じることの影響を考慮して、Masingの第2法則を一般化したProportional rule⁴⁾と、生じたひずみ量に応じて骨格曲線を平行移動させるDrag rule⁴⁾を適用した。前報²⁾で検討対象とした σ_h 一定(=883kPa)の繰返し三軸試験における $\sin(\phi)_{mob} \sim \gamma^P$ 関係の実験値と計算値の比較を図4に示す。Drag ruleを適用した図4bのほうが、適用しない図4aよりもはるかに適合度が高いことがわかる。さらに今回は、 $\sin(\phi)_{mob}/\sin(\phi)_{peak} \sim \Sigma(d\gamma^P/\gamma_r)$ 関係に対して上記2種類の履歴則を新たに適用した。

4.応力ひずみ関係の実測値と計算値の比較

図1に示した多様な応力経路における $\sin(\phi)_{mob}/\sin(\phi)_{peak} \sim$

$\Sigma(d\gamma^P/\gamma_r)$ 関係の実験値と計算値の比較を図5aに示す。これを $\sin(\phi)_{mob} \sim \gamma^P$ 関係に変換すると図5bとなる。計算値は実験値と比較的よく対応し、特に、応力比 $R=\sigma_v/\sigma_h$ を一定に保った応力経路下で γ^P が変化する現象を、計算でも良好に再現することができた。これに対して、 $\sin(\phi)_{mob} \sim \gamma^P$ 関係に基づくモデル化は、前述した応力経路依存性の問題に加えて、 R が一定の応力経路下で γ^P が変化する現象を再現することができない点で限界がある。

5.まとめ

修正した応力・ひずみパラメーターと2種類の履歴則を併用することにより、多様な三軸応力経路下での密な礫の繰返しせん断変形特性をモデル化できることを示した。今後はダイレイタンス挙動のモデル化が必要である。

参考文献 1) Balakrishnaiyerら(2000): Modified stress-strain state parameter for representing small strain deformation characteristics of dense gravel, 第35回地盤工学研究発表会, pp.313-314. 2) Balakrishnaiyerら(1999): Modeling of cyclic stress-strain relationships of a densely compacted gravel, 土木学会第54回年次学術講演会第3部(A), pp.62-63. 3) Balakrishnaiyerら(1999): Stress state dependency of small strain deformation characteristics of gravelly soil, 第34回地盤工学研究発表会, pp.197-198. 4) 増田達ら(1996): 平面ひずみ水平繰返し載荷における砂の非線形応力 - ひずみ履歴関係, 土木学会第51回年次学術講演会第3部(A), pp.40-41.

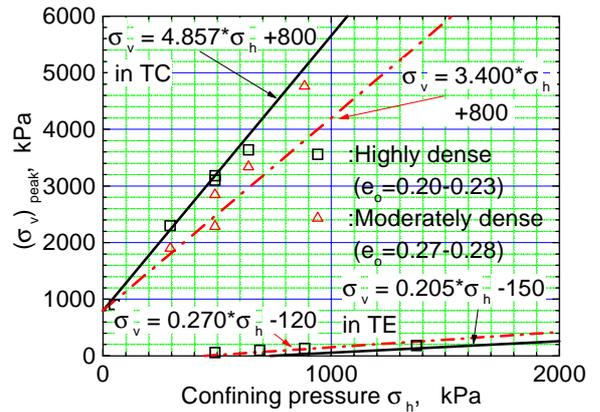


図3 三軸圧縮側(TC)と伸張側(TE)の破壊包絡線

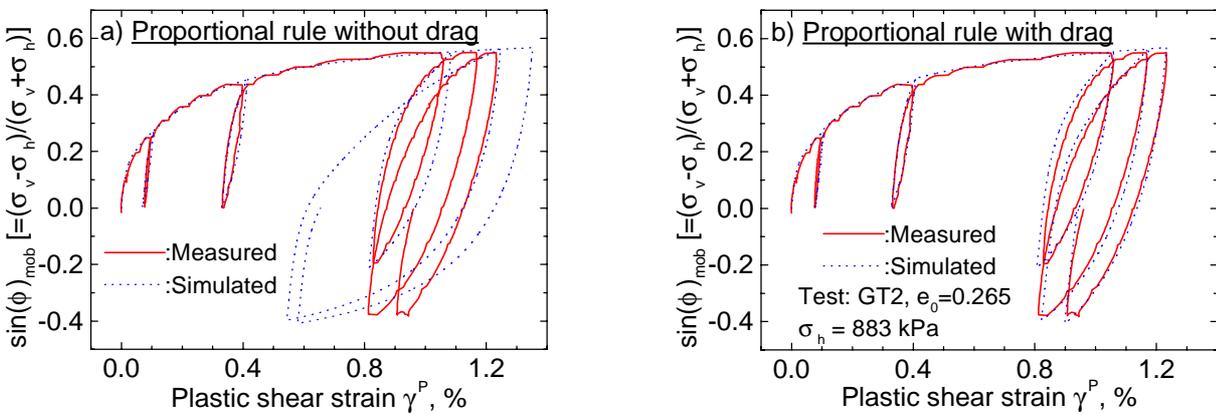


図4 σ_h 一定(=883kPa)の繰返し載荷時における応力ひずみ関係の実験値と計算値の比較

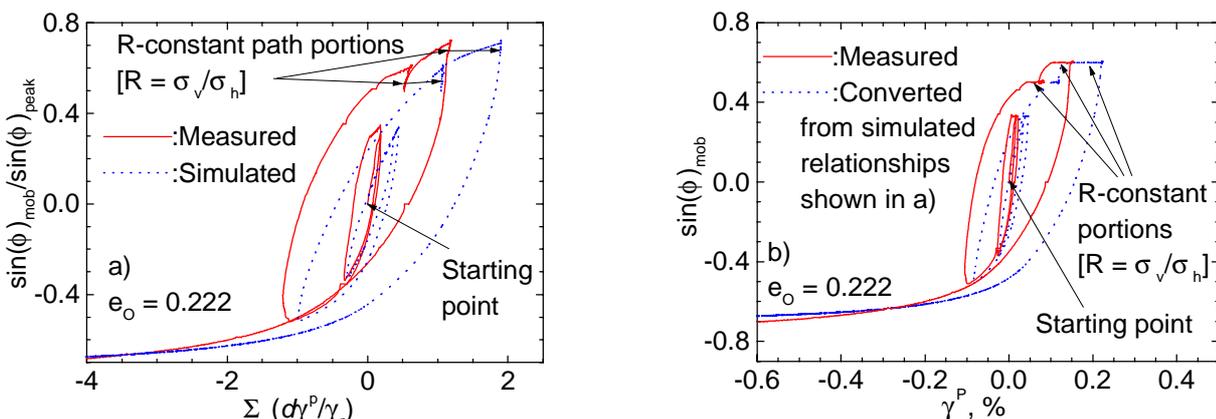


図5 図1に示した応力経路での繰返し載荷時における応力ひずみ関係の実験値と計算値の比較