

三軸試験における砂の応力ひずみ関係における載荷速度感応係数 β

東京大学大学院
東京理科大学

学生会員 ○清田 隆
正会員 龍岡 文夫

1. はじめに

土の応力ひずみ関係の構成モデルは、粘性による所謂「応力ひずみ関係の載荷速度依存性」を考慮できることが重要である。また、砂の粘性を表現するモデルのひとつとして三要素モデルに基づく方法が提案されている。三要素モデルでは、ひずみ ϵ は弾性成分 ϵ^e と非可逆（粘塑性）成分 ϵ^p に、応力 σ は非粘性成分 σ^e と粘性成分 σ^p に分解される。 σ^p は、 ϵ^p の増加に伴って減衰しない場合（Isotach 粘性）と減衰する場合（TESRA 粘性）がある。Isotach 粘性で単調載荷の場合では、 σ^p は ϵ^p に常に比例して非可逆ひずみ速度 $d\epsilon^p/dt$ の非線形の関数である。これに対し、貧配合の豊浦砂や Hostun 砂は TESRA 粘性を持つことが知られているが、本研究では他の貧配合の砂の粘性を実験的に検討した。また、従来検討してこなかった三軸伸張試験と繰返し三軸試験での粘性を新たに検討した。

2. 供試体と実験方法

豊浦砂よりも粒径の細かい珪砂 8 号（図 1）を使用し、緩詰め供試体（ $e_0 = 1.180 \sim 1.192$, $Dr = 23.7 \sim 25.7\%$ ）を空中落下法により作成した。供試体は直径約 $\phi 70$ mm、高さ約 155 mm であり、 CO_2 法により飽和させた。ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.025\%/min$ で $\sigma'_v = 400$ kPa まで等方圧密し、3 時間等方排水クリープした後、所定の排水せん断を実施した。

3. 試験結果と載荷速度感応係数 β の測定

(1) 三軸圧縮 (TC) 試験

ひずみ速度が 10 倍、100 倍、200 倍異なる単調載荷排水三軸圧縮 (TC) 試験と、せん断中軸ひずみ速度を 200 倍急変させた TC 試験を実施した（図 2）。ひずみ速度が一定であれば、異なるひずみ速度でもほぼ同一の応力ひずみ曲線が得られた。一方、軸ひずみを急増減すると応力比も急増減した。更に、その後ひずみ速度が一定な単調載荷を継続すると急増減した応力は減衰して、ひずみ速度に依存しない一義的な応力ひずみ曲線に漸近する傾向が認められる。このような挙動の粘性は TESRA 粘性と呼ばれており、豊浦砂や Hostun 砂のような貧配合の砂で観察されている。珪砂 8 号は、非常に粒径が小さいが、貧配合の砂と同様の粘性を持っていることが分かった。

$\dot{\epsilon}^p$ の変化だけによって生じる主応力比 $R = \sigma_1/\sigma_3$ の変化量を ΔR とする（図 3）。載荷速度感応係数 β を、変化率 $\Delta R/R$ の軸ひずみ速度の変化（ $\dot{\epsilon}_{\text{after}}/\dot{\epsilon}_{\text{before}}$ ）の対数に対する比で定義する。珪砂 8 号では、 $\beta = 0.0289$ が求まった（図 4）。この値は、後に示すように豊浦砂の値に似ている。

(2) 三軸伸張 (TE) 試験

係数 β は、従来上述のように TC 試験によって測定されてきたが、本研究ではそれに加えて三軸伸張 (TE) 試験（図 5）と三軸繰返し試験を行い、載荷中にひずみ速度を急変させた。TE 試験でも、TC 試験の場合と同様、ひずみ速度の急増減に伴い応力比も急増減し、ひずみ速度を一定に保てば一義的な応力ひずみ関係に漸近する傾向が得られた。また、 $R = \sigma_1/\sigma_3$ を用いた図 4 の整理では、TC 試験と TE 試験のデータの差がなく、この様に定義した係数 β に対する中間主応力と構造異方性の影響は小さいことが分かる。また、図 6 には様々な地盤試料の係数 β と平均粒径 D_{50} の関係を示すが、

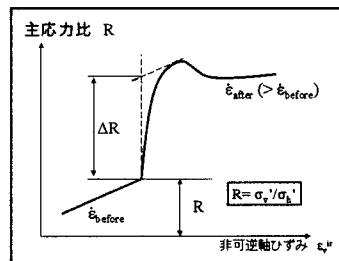
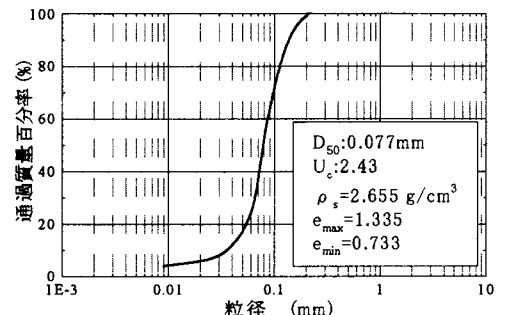
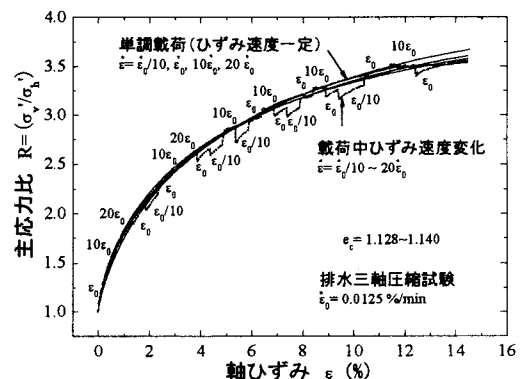
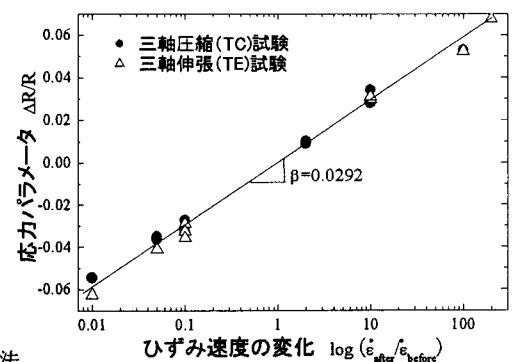
図3 応力パラメータ ($\Delta R/R$) の設定手法

図1 珪砂8号の粒度分布

図2 主応力比 R ~ 軸ひずみ ϵ_v 関係 (TC)図4 TC, TE 試験による粘性係数 β

珪砂 8 号は他の砂礫と似た係数 β を持つことが分かる。

(3) 三軸繰返し試験

載荷中にひずみ速度を急変させた三軸繰返し試験の結果の例を図 7 に示す。三軸圧縮応力状態と三軸伸張応力状態を連続的にかつ一つの応力パラメータを用いて表現するために、以下の修正応力比 Y を用いている。試験結果より、ひずみ速度急変時の応力比の挙動は、TC 単調載荷と TE 単調載荷試験での傾向と同様である。

三軸圧縮 (TC) 状態：

$$Y = R - 1 \quad R = \sigma'_1 / \sigma'_3 = \sigma'_v / \sigma'_h \geq 1.0$$

三軸伸張 (TE) 状態：

$$Y = 1 - R \quad R = \sigma'_1 / \sigma'_3 = \sigma'_h / \sigma'_v \geq 1.0$$

図 7 に矢印で示した三軸圧縮載荷に対する除荷および再載荷の範囲では、軸ひずみ速度を急増（急減）させると、応力比 $R = \sigma'_1 / \sigma'_3$ は急減（急増）している。このため、 $\Delta R / R$ を用いて整理すると図 8 が得られ、ばらつきが非常に大きいことが分かる。すなわち図 7 で示した除荷および再載荷の範囲でのデータ（図中で円で囲まれた点）が、TC と TE での単調載荷試験での関係（図 4）から大きく外れる。

以上を踏まえ、単調載荷と繰返し載荷で統一的に係数 β を評価できる方法を検討した。まず、除荷および再載荷の応力ひずみ関係は、対角線上の単調載荷時の応力ひずみ関係と相似形であると仮定する。図 9 の a 点での粘性による主応力変化 ΔR を求める場合、それは点 a の主応力ではなく点 a^* での主応力比 R^* に比例すると仮定する。 a^* 点は a 点から投影された点であり、 Y_1 と Y_2 に対する Y_a の相対的關係は、 $Y = 0$ と Y_2 に対する Y_a^* の相対的關係と等しい。 R^* の値は、点 a^* の修正応力比 Y^* から求まる（伸張応力状態から再載荷する場合も同様の考え方を適用する）。ここで、 R^* は Y^* の符号と同じとする。即ち、TC 状態では $R^* = R = Y + 1 > 0$ となり、TE 状態では $R^* = -R = Y - 1 < 0$ となる。更に、応力比の変化を ΔR^+ とし、 $\Delta R = \Delta Y$ とする。したがって、TC 状態では $\Delta R^+ = \Delta Y = \Delta R$ 、TE 状態では $\Delta R^+ = \Delta Y = -\Delta R$ となる。

図 10 に、上記を基に図 8 に示すデータを再整理して、応力パラメータ（ $\Delta R^+ / R^*$ ）とひずみ速度の変化比の対数との関係を示す。若干のばらつきは認められるが、ひずみ速度の変化が大きくなるほど、応力比の変化も大きくなる傾向が得られた。これらの結果より、繰返し載荷時の粘性特性を評価する場合は、相似則に基づいた応力パラメータ（ $\Delta R^+ / R^*$ ）を用いた整理が必要であることが分かる。

4. 結論

珪砂 8 号を用いて、単調載荷もしくは軸ひずみ速度を急変させた排水三軸試験を実施した。TC、TE 試験いずれの試験においても他の貧配合の砂（豊浦砂等）と同等の荷速度感応係数 β を得た。これは、係数 β に対する中間主応力と構造異方性の影響が小さいことを示す。

また、相似則に基づいて整理された応力パラメータ（ $\Delta R^+ / R^*$ ）を用いることで、単調載荷時と繰返し載荷時の粘性特性（即ち係数 β ）を統一的に評価できる。

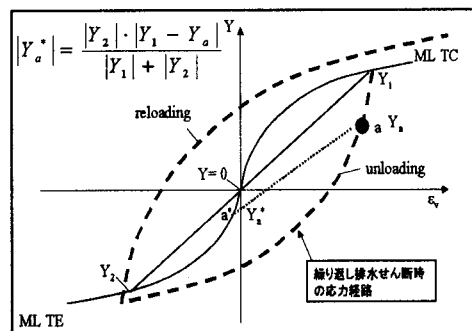


図 9 繰返し載荷における R^* の設定方法

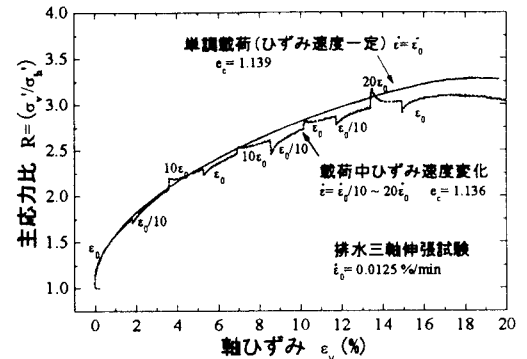


図 5 主応力比 $R \sim$ 軸ひずみ e_v 関係 (TE)

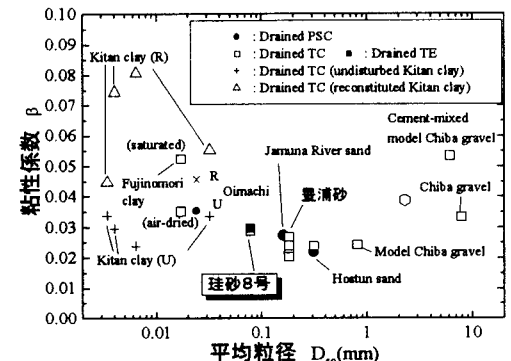


図 6 様々な試料の粘性係数 β

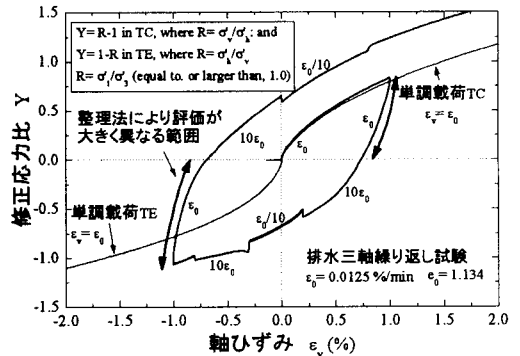


図 7 修正応力比 $Y \sim$ 軸ひずみ e_v の関係

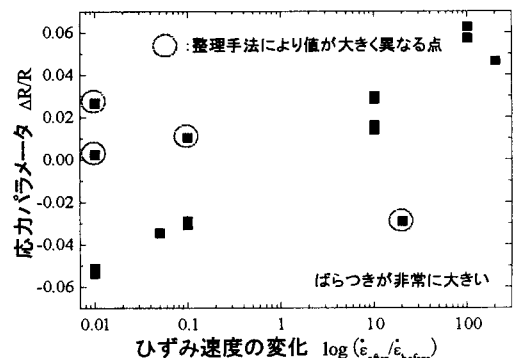


図 8 $\Delta R / R$ による粘性係数 β の評価

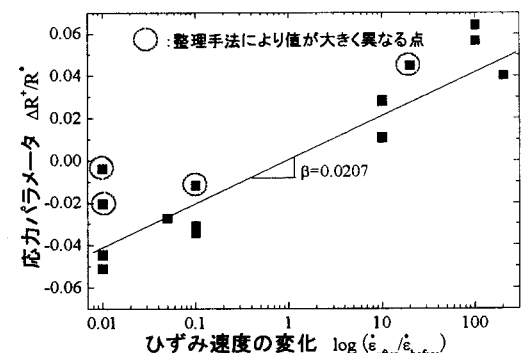


図 10 $\Delta R^+ / R^*$ による粘性係数 β の評価