

修成建設コンサルタント(株)

正会員 ○ 橋口 正悟

立命館大学大学院

学生院 久保 尚也

立命館大学

正会員 福本 武明

1. 緒言

しらす、真砂土などは脆弱な粒子からなる砂質系の粒状土で日本の特殊土として挙げられている¹⁾。このような脆弱な粒子からなる粒状土のせん断特性は、多くの人の指摘²⁾のように堅固な粒子からなる粒状土のそれとは、かなり異質なものとなる。その主要原因としてせん断過程における粒子破碎現象が挙げられるが、その影響量については設計施工上重要であるにもかかわらず具体的に把握できていない現状である。そこで本報では、既報³⁾に続き鹿児島県川辺郡で採取したしらすを試料とし三軸圧縮試験を行い、その結果を基に主として粒子破碎の影響量に重点をおいて考察を行った。

2. 粒子破碎の影響量推定法

福本^{2),4)}は、まさ土の締り特性と透水性に及ぼす粒子破碎の影響について基本的考察を行い、脆い粒状土の粒子破碎に伴う密度増加量を定量的に推測しうる式を提示し、それをせん断過程に適用し粒子破碎を生じない状態で得られる仮想上の、つまり「無破碎状態」の体積ひずみ $\varepsilon_{v,0}$ を式(1)のような形で提示した。式中の ε_v と $\varepsilon_{v,c}$ は、それぞれ実測した体積ひずみと粒子破碎の影響を考慮した体積ひずみ、

$$\varepsilon_{v,0} = \varepsilon_v + \varepsilon_{v,c} = \varepsilon_v + A \frac{e_s}{1 + e_c} I_s \quad (1)$$

$$I_s = \ln(Sw'/Sw_c) \quad (2)$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)_0 + K \frac{d\varepsilon_{v,c}}{d\varepsilon_1} \quad (3)$$

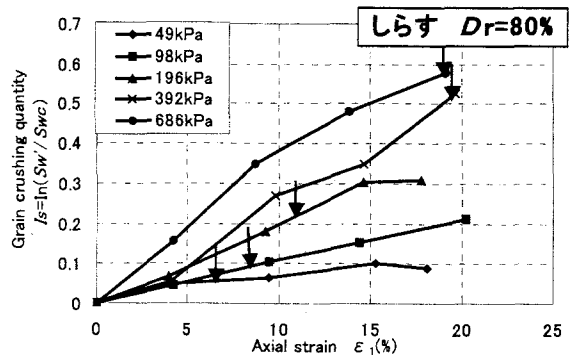
e_s と e_c は、それぞれせん断過程における間隙比と圧密終了時の間隙比、そして A は材料定数で過去の経緯から 0.826 である。また I_s は式(2)で定義される粒子破碎量である。式(2)中の Sw' と Sw_c (cm²/g) は、それぞれせん断過程と圧密終了時の比表面積である。次に筆者ら^{3),5)}は二次元粒子モデルとして鋼棒とチョーク棒を用い二軸圧縮試験を行い、得られたデータを基礎に Rowe の応力ダイレイタンシー式⁶⁾に基づく考察から「無破碎状態」の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_0$ が式(3)により推測できることを提案した。式(3)中、 (σ_1/σ_3) は主応力比、右辺第二項の $K(d\varepsilon_{v,c}/d\varepsilon_1)$ は粒子破碎の影響量を示す項であり、 K は常数である。

3. 試験方法及び結果

試料は、鹿児島県川辺郡で採取したしらすをふるい分け、粒径 0.85~0.60mm のものを取り出して絶乾状態にしデシケート内で室温に冷やしたものを使用した。なお、しらすの物理試験結果を Table1 に示す。せん断試験は、供試体の相対密度を $D_r \approx 80\%$ 、ノルウェー型三軸圧縮試験機により拘束圧を 49, 98, 196, 392, 686kPa に設定し CD 条件下で実施した。また、粒子破碎現象をより詳細に把握するためにあらかじめ定めておいた軸ひずみ (圧密終了時を含め 5ヶ所) で試験を停止し、その都度ふるい分けを行い粒子破碎量 I_s を測定することにした。Fig. 1 は、せん断過程における粒子破碎状況を表している。図中の矢印は、ピーク強度を示した時の軸ひずみ ε_1 の位置である。この図から高拘束圧時ほど大きな粒子破碎量 I_s を示すこと、およびピーク強度を過ぎると粒子破碎現象がやや鈍化することなどが確認できる。

Table-1 試料の物理試験結果

試料	粒径 (mm)	相対密度 D_r (%)	最大密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最小密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)
しらす	0.85~0.6	80	1.078	0.833	2.363



4. 応力-ひずみ-体積変化関係

しらすの実測された応力-ひずみ-体積変化関係と 2 節の手法で求めた無破碎状態の応力-ひずみ-体積変化関係を Fig. 2 ($\sigma_3=49\text{ kPa}$) と Fig. 3 ($\sigma_3=686\text{ kPa}$) に示す。なお、これらの図上には、比較のために同一条件下で実測された四種の堅固な粒子からなる砂 (愛知川砂, 木津川砂, 相馬砂, 淀川砂) の応力-ひずみ-体積変化関係を一括併記してある (半透明部分参照)。これらの図から、しらすの実測された応力-ひずみ-体積変化関係は低拘束圧下の場合、堅固な粒子からなる砂とほぼ同様な傾向を示しているのに対し、高拘束圧下では相対密度 $D_r \approx 80\%$ と密な状態であるにもかかわらず緩詰め砂に似たせん断挙動を示している。一方、せん断過程で破碎を生じないと仮定した、いわゆる無破碎状態の応力-ひずみ-体積変化関係 (太い実線) は、明瞭なピーク強度を示し、はっきりとした体積膨張を示し、図中の位置から堅固な砂に近い特性を示していることが分かる。このことから、無破碎状態の計算曲線と実測曲線との隔たりが実質的な粒子破碎の影響量を示すものと考えられ、今回の高拘束圧 686 kPa の場合、ピーク強度の低下が粒子破碎現象により 30% 程度生じることを示唆するものと解釈される。ところで、無破碎状態の応力-ひずみ曲線を求める際、式 (3) 中の右辺第二項の係数 K の設定が重要になる。この点に関し今回、各拘束圧において無破碎状態の応力-ひずみ曲線が堅固な粒子からなる砂の応力-ひずみ曲線の領域内 (半透明部分) に入るように設定しその平均を出してみた。その結果、Fig. 4 に示したように、係数 K は、拘束圧に依存せずほぼ一定で、今回のしらすの場合、 $K=1.08$ とみなしてよいことが判明した。上記の無破碎状態における計算値は、すべてこの $K=1.08$ を用いて算定したものである。

5. 結言

以上の考察の結果、しらすの粒子破碎に起因する応力-ひずみ-体積変化関係の特異性を、式 (1), (3) を用いかなり明瞭に説明できること、及び式 (3) 中の係数 K が、拘束圧に依存しない材料定数であると見なして差し支えないこと、などが判明した。今後は、相対密度、材質などを種々変えて詳細な実験的検討を積み重ね、より一般的な知見を得たいと考えている。

参考文献

- 1) 土質工学会編, 日本特殊土, 1974. 2) 例えば福本武明: もろい粒状体のせん断特性に関する考察, 第 17 回土質工学研究発表会, pp. 469~472, 1982. 3) 橋口正徳・内山高弘・福本武明: しらすのせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, pp. 577~578, 2002. 4) 福本武明: 粒子破碎現象の定式化, 第 32 回地盤工学会論文集, No. 2, pp. 315~316, 1997. 5) 福本武明・橋口正徳: 脆弱粒子から成る粒状体のせん断特性, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, pp. 579~580, 2002. 6) Rowe, P.W.: The Stress-dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 269, pp. 500~527, 1962.

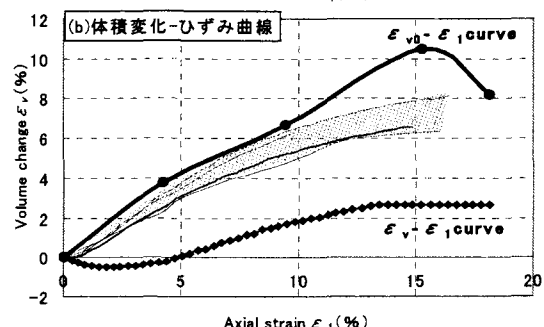
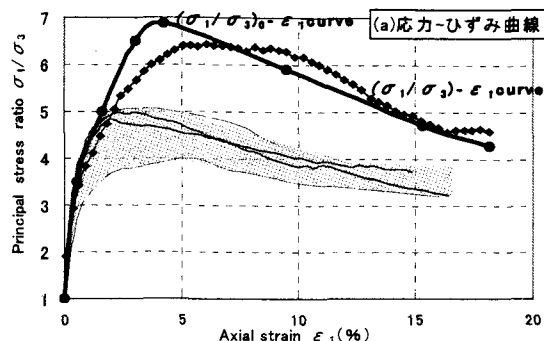


Fig. 2 応力-ひずみ-体積変化曲線 ($\sigma_3=49\text{ kPa}$)

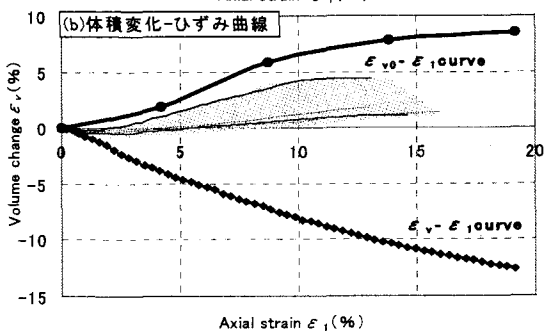
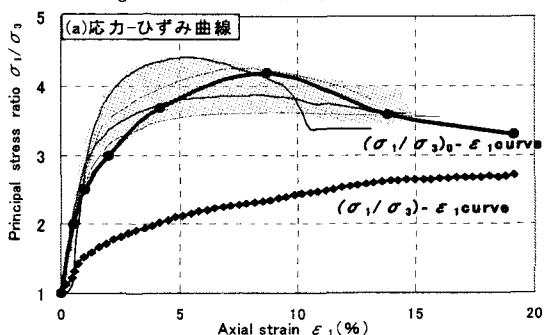


Fig. 3 応力-ひずみ-体積変化曲線 ($\sigma_3=686\text{ kPa}$)

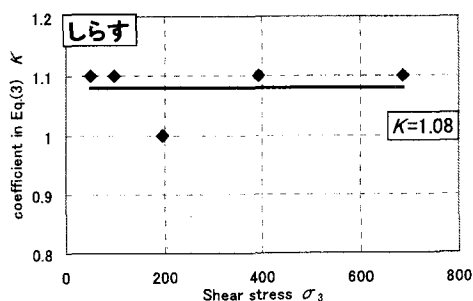


Fig. 4 係数 K と拘束圧 σ_3 の関係