

種々の砂と細粒土から成る混合土のせん断強度特性

山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本恵正
山口大学大学院 学生会員 ○立場晴司 金郁基 黒岩友也

1. まえがき 自然地盤における砂質土の多くは細粒分を含み，設計上純粋な砂として取り扱うことが困難な場合が存在する．当研究グループはこれまでに，細粒分含有率約 20%以下の混合土においては，せん断強度を表す状態量として，間隙比よりもむしろ細粒子の一部を間隙とみなす等価骨格間隙比¹⁾の方が有効であることを示した．また，砂に種々の細粒土を配合した試料に対して，排水及び非排水三軸圧縮試験を実施した結果では，等価骨格間隙比と平均有効主応力の関係において，定常状態線 SSL より細粒分の寄与率を把握することで，

細粒分を含む混合土を砂が示す強度特性と同様に評価できることが明らかとなった．さらに，細粒分の寄与率は粗粒分と細粒分の粒径比によって支配され，それぞれの粒径を知ることで細粒分の寄与率を予測できる式を提案した．²⁾本研究では，これまでの研究に加えてさらに，骨格構造を形成する粗粒土の粒度分布を変化させ，粒径の異なる珪砂(V3, V6 号)と塑性の異なる細粒土(岩国粘土，鳥取シルト)をそれぞれ混合し，一連の非排水単調せん断試験を行った．実験結果に基づき，異なる砂の粒度が混合土の強度特性に与える影響，さらに細粒分の砂骨格に寄与する度合い(寄与率)と粒径比の関係を明らかにした．

2. 試料及び試験方法

2.1. 試料の物理的性質 用いた試料は，粗粒土として三河珪砂V3号($D_{50}=1.435\text{mm}$ ， $e_{\max}=0.927$ ， $e_{\min}=0.682$)とV6号($D_{50}=0.356\text{mm}$ ， $e_{\max}=1.058$ ， $e_{\min}=0.654$)の2種類，細粒土としては山口県岩国港で採取した岩国粘土，鳥取県西部地震の際に境港市竹内工業団地において液状化により噴出した鳥取シルトの2種類である．表-1に本研究で用いた試料の物理的性質を示す．これらの粗粒土と細粒土を種々の割合で混合し，様々な細粒分含有率からなる混合土試料を作製した．試料は乾燥重量比で調整し，その混合割合は，珪砂V3-岩国粘土混合土は4通り，鳥取シルト混合土は5通り，また，珪砂V6-岩国粘土混合土は5通り，鳥取シルト混合土は5通りとした．図-1に本研究で用いた試料の粒径加積曲線を示す．

2.2. 供試体作製方法及び間隙比 供試体は，混合土の全試料に対して湿潤突固め法を用いて，所定の2種類の突固めエネルギー($E_c=22, 504\text{kJ/m}^3$)で突固めることにより作製した．図-2は100kPaの圧密応力で圧密した後の混合土の間隙比と細粒分含有率の関係を示したものである．図(a)より，V3-混合土の間隙比は細粒分含有率の増加に伴い低下し，密な供試体においては， $F_c=5\%$ 程度でV3の $e_{\min}$ より小さくなる．特に鳥取シルト混合土は，シルト自体が粒状体としての構造を持つため，細粒分含有率の増加に伴い間隙比は，同一の圧密応力下において所定のエネルギーで突固めることにより，それぞれのエネルギーによって存在し，また直線的に減少する傾向が認められる．図(b)に示すV6-混合土では密な供試体において，間隙比は $F_c=10 \sim 15\%$ 程度でV6の $e_{\min}$ より小さくなり，岩国粘土との混合土では $F_c=15\%$ 程度で最小値を示す．さらに，岩国粘土混合土の $F_c=20\%$ では，突固めエネルギーに因らずほぼ同じ間隙比となる特徴が見られる．これは，岩国粘土が構造の主体となり，砂の骨格構造は消失したためと考えられる．これらの供試体に対して単調三軸試験装置を用い，非排水条件で有効拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ ，ひずみ速度 $0.1\%/min$ の条件下で非排水単調せん断試験を行った．

表-1 試料の物理的性質

Sample	Fines content (%)	Clay content (%)	G_s	I_p	d_{50} (mm)	U_c
Silica sand-V3	0	0.0	2.647	NP	1.435	1.58
Silica sand-V6	0	0.0	2.666	NP	0.356	1.54
Iwakuni clay	98	38.8	2.610	47.54	0.007	-
Tottori silt	98	6.0	2.665	NP	0.019	2.85

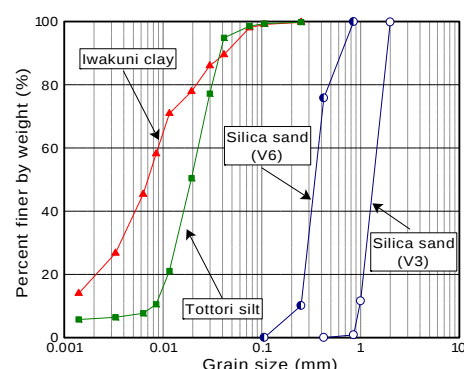
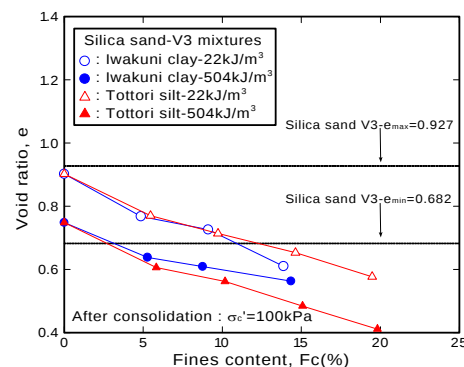
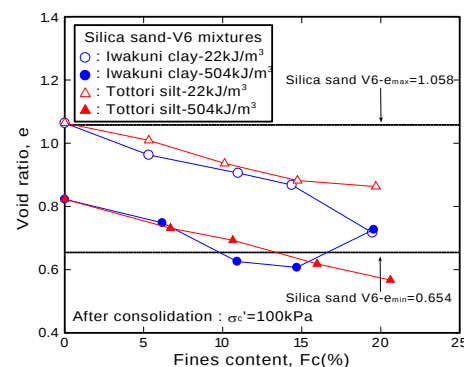


図-1 粒径加積曲線



(a) Silica sand-V3 mixtures



(b) Silica sand-V6 mixtures

図-2 間隙比と細粒分含有率の関係

3. 非排水単調せん断試験結果と考察

3.1. 非排水単調せん断試験結果と寄与率の決定 筆者らの骨格間隙比を用いたこれまでの研究³⁾より混合土の構造の主体は細粒分含有率によって変化し,特に細粒分含有率の低い混合土では,粗粒土が形成する骨格構造がその強度特性に強く影響していることが明らかとなった。しかし,骨格間隙比では細粒土は完全に間隙とみなされるため,細粒分の影響を過小評価してしまう可能性がある。そこで,細粒分の一部を粗粒分の骨格と等価とみなすThevanayagamら²⁾が提案した等価骨格間隙比 $e_{ge}=\{e+(1-b)f_c\}/\{1-(1-b)f_c\}$, $f_c=V_{sf}/V_s$ の概念を用いた。ここに, e_{ge} は等価骨格間隙比, V_{sf} は細粒分の体積, V_s は土粒子全体の体積, b は細粒分が骨格形成に寄与する割合を示し,これを寄与率と呼び0~1まで変化する。 $b=1$ のときは通常の間隙比であり, $b=0$ のときは細粒分の存在を無視した,砂骨格間隙比を表す。

本研究では非排水単調せん断試験の実験結果に基づき,せん断応力増分がほぼゼロとなった軸ひずみ $\varepsilon_a=20\%$ を定常状態とし,図-3に示す等価骨格間隙比と平均有効主応力の関係から,定常状態線SSLにおける砂骨格への細粒分の寄与率 b を検討した。これより,寄与率 b はそれぞれV3-岩国粘土混合土=0.04,鳥取シルト混合土=0.1,V6-岩国粘土混合土=0.22,鳥取シルト混合土=0.37の時に $e_{ge}-\log(p')$ 関係において細粒分含有率の違いに因らず砂のSSLと一義的に定まる結果が得られた。更に,V3,V6-混合土のSSLと筆者らが調べた粒度調整した三河珪砂と細粒土混合土のSSLの結果から,砂の粒度分布により細粒分の寄与率は異なり,定常状態に至った混合土はそれぞれ異なるSSLが存在することが分かる。

次に,Skenpton⁴⁾が示した過剰間隙水圧 $\Delta u=B[\Delta\sigma_3+A(\Delta\sigma_1-\Delta\sigma_3)]$ の式を用い,軸差応力と平均有効主応力の関係における定常状態時の間隙水圧係数 A を算出した。図-4に間隙水圧係数と等価骨格間隙比の関係を示す。 e_{ge} の増加に伴い, A は増加傾向を示し,さらに, $e-\log(p')$ 関係のSSLから得られた種々の混合土のそれぞれの寄与率を用いることにより,せん断に伴い発生する間隙水圧は間隙比に依存していることが明らかとなった。

3.2. 寄与率と試料の物性の関係 細粒分の寄与率を決定付ける要因としては,粗粒土と細粒土の粒径の比が考えられる。Ni⁵⁾らは粒径比 $\chi=d_{10,Host\ sand}/d_{50,Fines}$ により,非塑性細粒分を混合した砂の寄与率と物理パラメータの関係を示した。ここに, $d_{10,Host\ sand}$ は粗粒土の通過質量百分率10%の粒径であり,間隙の大きさのおおよその指標となる。 $d_{50,Fines}$ は細粒土の通過質量百分率50%の粒径であり,細粒分の平均的な大きさを表す。図-5に寄与率 b と粒径比 χ の関係を示す。図より,粒径比が大きくなるほど寄与率は減少する傾向が得られ,寄与率と粒径比の間に一定の相関性が認められることより,次式に示す粒径比と寄与率との関係式を提案した。

$$b = 1.0 - 0.226Ln(\chi) \quad (1)$$

4. 結論 粒径の異なる砂と塑性の異なる細粒土(岩国粘土,鳥取シルト)の混合土について等価骨格間隙比の概念を用い, $e_{ge}-\log(p')$ 関係のSSLにおいて種々の混合土の寄与率を決定した。また,非排水単調せん断試験の実験結果より,定常状態における $A-e_{ge}$ 関係から,せん断に伴い発生する間隙水圧の推移を示すことが出来た。さらに,寄与率と粒径比の間に相関性が見出され,粗粒土と細粒土の粒度を知ることによって,寄与率を予測する式を提案できた。

参考文献 1) Thevanayagam, S., Shenthana, T., Mohan, S. & Liang, J.: Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. J. Geotech. Geoenviron. Engng 28, No. 10, 849-859, 2002. 2) Kim, Uk-Gie., 兵動正幸, 吉本憲正, 立場晴司: 砂-細粒土混合土のせん断強度に及ぼす細粒分の影響, 第44回地盤工学研究発表会公演集, pp.275-276, 2009. 3) Kim, Uk-Gie., 兵動正幸, 吉本憲正, 石川智, 貞廣育子: 骨格間隙比に着目した細粒分混じり砂のせん断強度, 第43回地盤工学研究発表会公演集, pp.335-336, 2008. 4) Skempton, A. W.: The Pore Pressure Coefficient A and B, Geotechnique, Vol.4, pp.143-147, 1954. 5) Ni, Q., Tan, T. S., Dasari, G. R. & Hight, D. W.: Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils, Geotechnique 54, No. 9, pp. 561-569, 2004. 6) Zlatovic, S. and Ishihara, K. 1995. On the influence of nonplastic fines on residual strength. First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Japan, 1: 239-244.

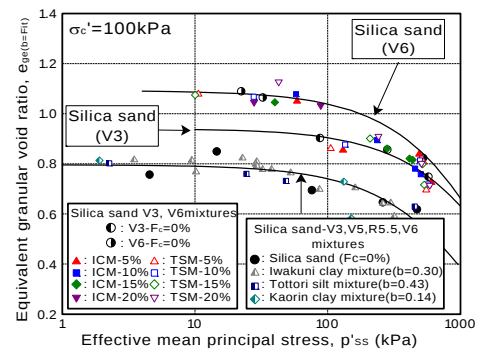


図-3 等価骨格間隙比と平均有効主応力の関係

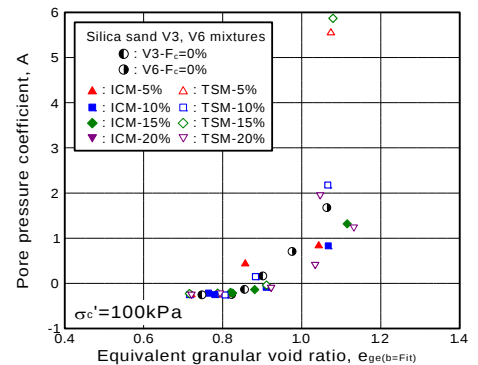


図-4 間隙水圧係数と等価骨格間隙比の関係

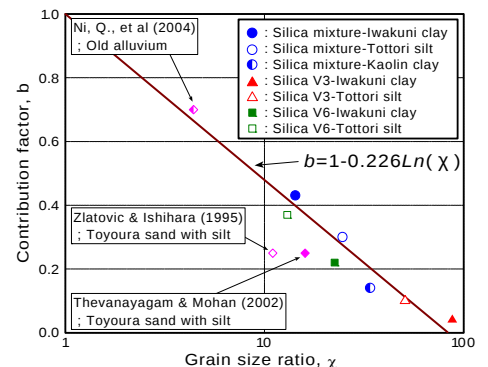


図-5 寄与率と粒径比の関係