

砂-細粒土混合土のせん断強度に及ぼす粒度分布の影響

山口大学院 学生員 ○Kim, Uk-Gie, 立場晴司
山口大学部 正会員 兵動正幸, 吉本憲正
韓国建設技術研究員 Ham, Tae-Gew

1. はじめに

地盤の設計について検討する際、対象地盤の適切な土質定数を設定する必要があるが、自然に存在する砂質土地盤のほとんどは細粒分を含み、設計上明確に純粋な

砂として取り扱うことが困難な土が多く存在する。当研究グループはこれまで、粒度調整した砂と様々な細粒分とを混ぜることにより、砂から細粒土に至るまで土のせん断強度特性を連続的に調べてきた^{1, 2)}。その結果、混合土はある程度の細粒分含有率以上になると細粒分自体の強さによって支配され、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になった。さらに、細粒分含有率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³⁾の方が有効であることが明らかとなった。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、砂・細粒土の混合土の強度に及ぼす細粒分の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 実験に用いた試料は、粗粒土試料として三河珪砂V3号($D_{50}=1.45\text{mm}$, $e_{\max}=0.927$, $e_{\min}=0.682$)とV6号($D_{50}=0.34\text{mm}$, $e_{\max}=1.058$, $e_{\min}=0.654$)の2種類、細粒土試料として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に試料の物性を示す。本研究では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に既往の混合砂と今回用いた試料の粒径加積曲線を示す。

表-1 試料の物理的性質

Sample	G_s	d_{50} (mm)	U_c	Fines content (%)	Clay content (%)	I_p
Silica sand-V3	2.647	1.450	1.31	0	0.0	NP
Silica sand-V6	2.666	0.340	1.50	0	0.0	NP
Iwakuni clay	2.610	0.006	-	98	38.8	47.54
Tottori silt	2.665	0.019	2.85	98	6.0	NP

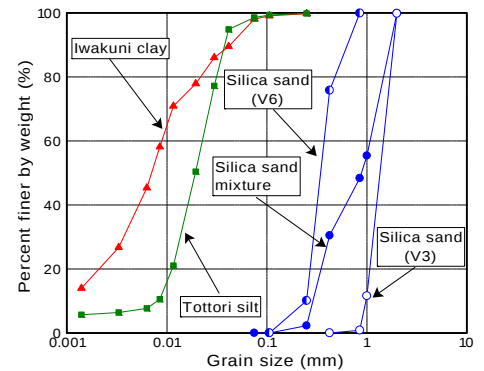
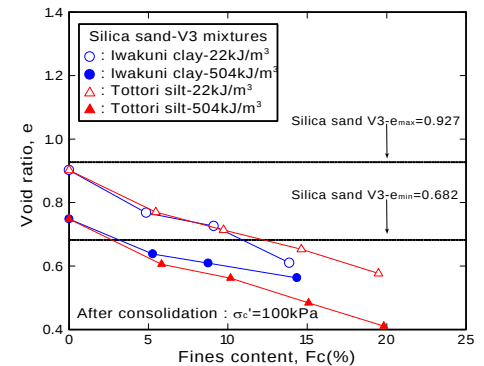
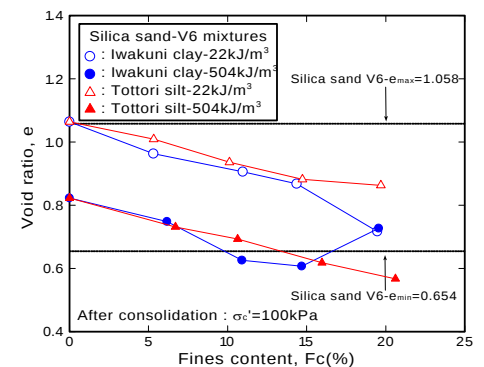


図-1 粒径加積曲線



(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

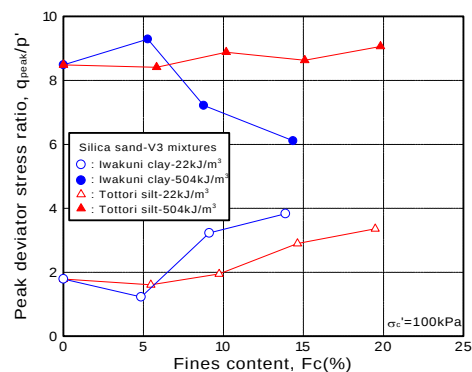
2.2. 供試体作製方法及び間隙比 供試体作製方法は、混合土全試料に対して湿潤突固め法を用いて所定の2種類の突固めエネルギー($E_c=22, 504\text{kJ/m}^3$)で突き固めることにより行った。

図-2はそれぞれのエネルギーで突固めた後100kPaの圧密応力で圧密した混合土の間隙比と細粒分含有率の関係を示すものである。図(a)より、 $E_c=504\text{kJ/m}^3$ で突固めた場合のV3-混合土の間隙比は $F_c=5\%$ 程度でV3の $e_{\min}$ より小さくなっている。ここで鳥取シルト混合土は、シルトも粒状体としての構造を持つため、異なる突固めエネルギーに対しほぼ平行に減少する傾向が認められる。また、V6-混合土においては図-(b)のように、 $E_c=504\text{kJ/m}^3$ で突固めた場合、間隙比は $F_c=10\sim15\%$ 程度で、V6の $e_{\min}$ より小さくなっている。一方、岩国粘土との混合土では $E_c=504\text{kJ/m}^3$ の場合 $F_c=15\%$ 程度で最小値となっている。さらに、 $F_c=20\%$ では、突固めエネルギーに関わらずほぼ同じ間隙比になる特徴が見られる。これは、この状態において混合土は岩国粘土主体の構造となり、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非排水条件で有効拘束圧100kPa、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。

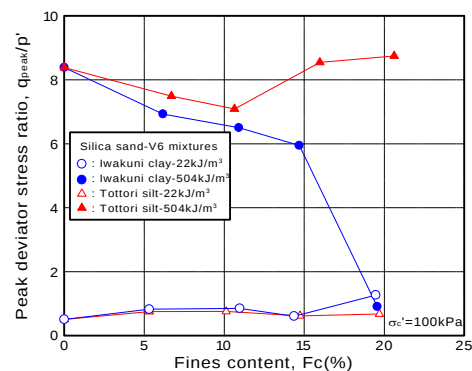
3. 非排水せん断特性

3.1. 非排水単調せん断強度 図-3に最大軸差応力を有効拘束圧で正規化した最大軸差応力比と細粒分含有率の関係を示す。まず、突固めエネルギーの低い緩詰め状態では、細粒分含有率の増加に伴い、最大軸差応力比も増加する傾向にある。これは、粗粒分が成す緩い骨格構造に対して細粒分が増加することにより、粗粒子骨格間隙内に細粒分が充てんされていくことにより密度が増加し強度が増加したためと考えられる。また、粒径が大きいV3混合土ではより大きな増加が見られる。突固めエネルギーの高い状態では、岩国粘土混合土の場合、 F_c の増加に伴い最大軸差応力は減少して $F_c=20\%$ 付近でせん断強度は緩詰め状態の供試体とほぼ一点に収束していく様子がみられる。これは、砂のみで構成されている強い砂骨格構造状態で細粒分が増加することにより、細粒分の潤滑作用によって、砂の骨格構造が失われ、強度の減少に至ったと考えられる。また、鳥取シルト混合土の場合、シルトも粒状体の構造を持つため、図(b)のV6混合土では $F_c=10\%$ 以降、砂と同様なシルト自体の強度を示すことが分かる。

混合土の非排水単調せん断試験の結果から、軸ひずみ $\epsilon_a=20\%$ 時の残留せん断強度と間隙比 e の関係を図-4に示す。図より、細粒分含有率が増加するほど間隙比は減少し、同じ細粒分含有率については間隙比が小さいほど強度が上昇する

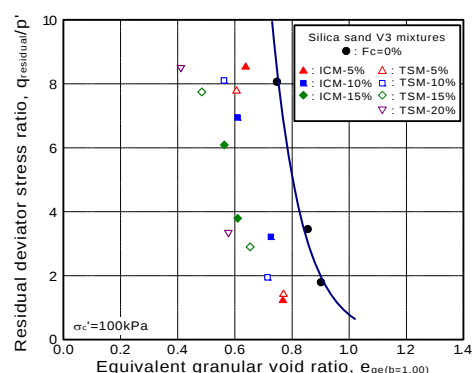


(a) Silica sand-V3 mixtures

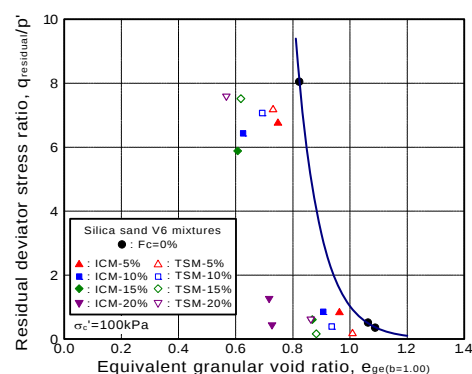


(b) Silica sand-V6 mixtures

図-3 最大軸差応力比と細粒分含有率の関係



(a) Silica sand-V3 mixtures



(b) Silica sand-V6 mixtures

図-4 残留せん断応力と間隙比の関係

傾向がみられる．しかし，間隙比による評価は混合土の粗粒子がなす骨格構造の初期状態の評価が出来ないため，細粒分含有率の違いにより異なる強度が見られ一義的な関係が見られない．

3.2. 非排水せん断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^{1, 2)}で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を完全に間隙とみなすため，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³⁾が提案した次式の等価骨格間隙比の概念を用いた．

$$e_{ge} = \frac{e + (1-b)f_c}{1 - (1-b)f_c} ; f_c = \frac{V_{sf}}{V_s} \quad (1)$$

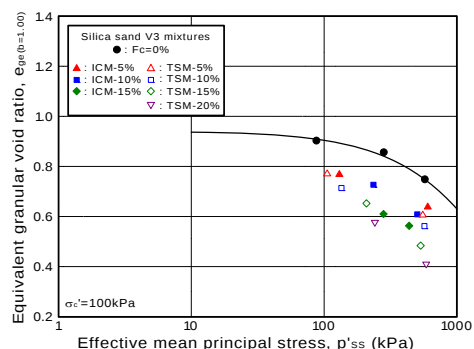
ここに， e_{ge} は等価骨格間隙比， V_{sf} は細粒分の体積， V_s は土粒子全体の体積， b は細粒分が骨格形成に寄与する割合を示し，これを寄与率と呼び 0～1 まで変化する． $b=1$ のときは通常の間隙比であり， $b=0$ のときは細粒分の存在を無視した砂骨格間隙比と等価である．

非排水せん断試験において，せん断応力増分がほぼゼロになった軸ひずみ $\epsilon_a=20\%$ 時を定常状態とし，その時の間隙比と平均有効主応力の関係を表す定常状態線において寄与率 b を決定した．図-5 に V3 混合土及び V6 混合土の定常状態における間隙比 e と平均有効主応力 p'_{ss} の関係をそれぞれ示す．

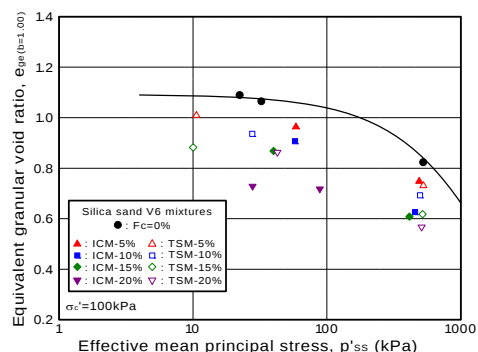
図-5 より，同一の間隙比であれば，定常状態時の平均有効主応力は細粒分含有率の増加に伴って低下し，細粒分毎に個別に存在することがわかる．また，SSL は細粒分含有率の違いによりそれぞれ異なり，同じ細粒土による混合土であっても一義的に表現できない．

図-6 は SSL を式(1)の等価骨格間隙比と有効応力の関係で表したものである．図のように寄与率 b は 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，細粒分含有率の違いにもかかわらず $e_{ge}-\log(p')$ 関係が一義的に定まる結果が得られた．また，既往の研究とも比較すると粒度分布が異なるそれぞれの砂に対して異なる SSL が存在していることがわかる．

図-7 に残留せん断強度比と等価間隙比 e_{eq} の関係を示す．図-7 の結果においては，SSL から求めた寄与率 b を用いたときの等価骨格間隙比を示している．図から混合土に対して様々な細粒分含有率と間隙比を持っている試料についてもそれぞれ



(a) Silica sand-V3 mixtures



(b) Silica sand-V6 mixtures

図-5 間隙比と平均有効主応力の関係

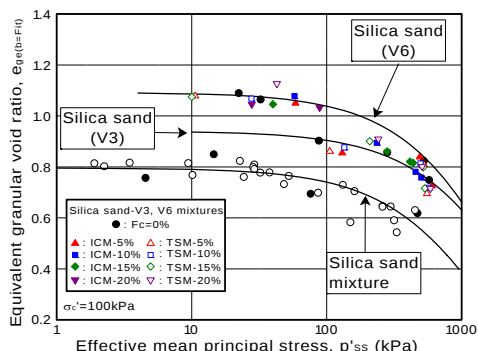


図-6 等価骨格間隙比と平均有効主応力の関係

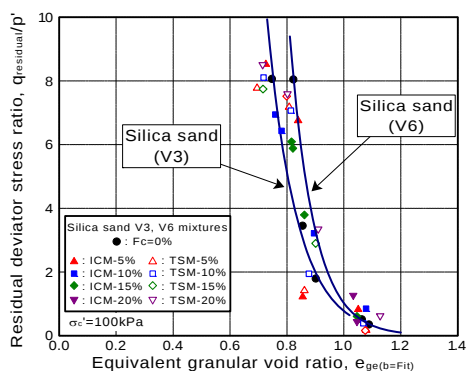


図-7 残留せん断応力と等価骨格間隙比の関係

れの $F_c=0\%$ (V3, V6)砂のみで構成されている間隙比と残留せん断強度比に最も良い相関を示すという結果が得られた。即ち、珪砂 V3 号に対して岩国粘土の場合では、細粒分が砂分の 4%，鳥取シルトは 10%，珪砂 V3 号に対しては岩国粘土混合土では 22%，鳥取シルト混合土では 37%の割合で単調せん断強度に寄与していることを意味している。

3.3. 寄与率と試料の物性の関係 寄与率を決定づける要因として、粗粒土と細粒土の粒径の比が考えられる。Ni⁴⁾らは次式で表される粒径比 χ によって、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。

$$\chi = \frac{d_{10, \text{Host sand}}}{d_{50, \text{Fines}}} \quad (2)$$

ここに、 $d_{10, \text{Host sand}}$ 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。 $d_{50, \text{Fines}}$ 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-8 に参考文献と本研究で求めた寄与率 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、寄与率の評価を次式のように表すことが出来る。

$$b = 0.9 - 0.2 \ln(\chi) \quad (3)$$

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)混じり混合土について等価骨格間隙比に着目し，非排水単調せん断試験結果をまとめた。本研究より得られた成果は以下のとおりである。

1. 粒度分布が異なる砂のそれぞれの軸ひずみ $\varepsilon_a=20\%$ 時の $e_{ge}-\log(p')$ 関係から，細粒子が粗粒子骨格に寄与する度合い b (寄与率)を決定した。
2. 寄与率と粒径比の間に一義的な相関性が得られ，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することができた。

《参考文献》

- 1) 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.
- 2) Hyodo, M., Orense, R., Ishikawa, S., Yamada, S., Kim, U. & Kim, J., Effects of fines content on cyclic shear characteristics of sand-clay mixtures, New Zealand Workshop on Geotechnical earthquake engineering, pp.81-88, 2006.
- 3) 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.
- 4) Q. Ni., T. S. TAN., G. R. Dasari, and D. W. Hight : Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils, Geotechnique, Vol 54, No. 9, pp. 561-569, 2004.

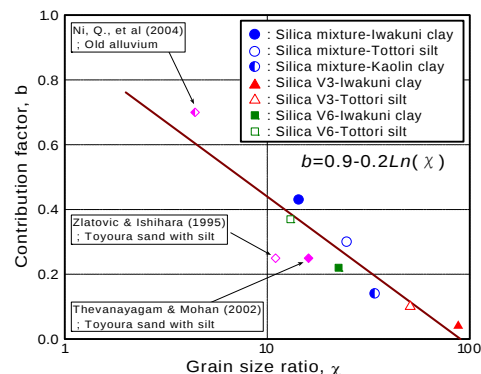


図-8 寄与率と粒径比の関係