

砂・細粒土混合土のせん断挙動に及ぼす細粒分の影響

山口大学大学院 学生会員 ○立場晴司 KIM, Uk-Gie
山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正

01. まえがき 自然地盤における砂質土のほとんどは細粒分を含み、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、粒度調整した砂と様々な細粒分を入れ混ぜることにより、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⁾。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²⁾の方が有効であることを示した。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・細粒土混合土の強度に及ぼす細粒分の寄与率大きさ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。

2.2. 供試体作製及び間隙比 供試体作製は、混合土全試料に対して湿潤突固め法を用いて所定の2種類の締固めエネルギー($E_c=22, 504\text{kJ/m}^3$)で突き固めることにより行った。図-3はV6-混合土を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すものである。V6-混合土の図を見ると間隙比は $F_c=10\sim 15\%$ 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、締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、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。また、図-4は混合土の骨格間隙比と細粒分含有率の関係を示すものである。細粒分を間隙とみなすため細粒分含有率の増加に伴い間隙比は増加傾向にあることが分かる。 $E_c=22\text{ kJ/m}^3$ で作製した供試体と $E_c=504\text{kJ/m}^3$ の $F_c=17\%$ 程度以降の岩国粘土混合土の供試体においてはV6の $e_{\max}$ より大きくなり、骨格構造がゆるいものに移っていくことが分かる。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100kPa、ひずみ速度0.1%/minの条件下で試験を行った。

3. 非排水せん断試験結果と考察 **3.1. 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⁾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、図-2に示すように混合土を粗粒土相、細粒土相、間隙等価骨格間隙比、細粒分含有率、寄与率、粒径比

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 Mix.	0	0.0	2.652	NP	0.861	4.04
Silica sand-V3	0	0.0	2.647	NP	1.450	1.31
Silica sand-V6	0	0.0	2.666	NP	0.340	1.05
Iwakuni clay	98	38.8	2.610	47.54	0.006	-
Tottori silt	98	6.0	2.665	NP	0.019	2.85

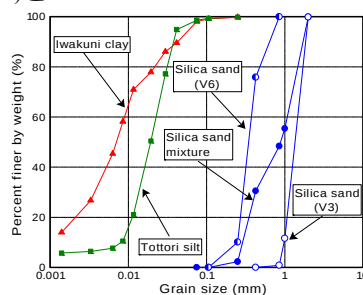


図-1 粒径加積曲線

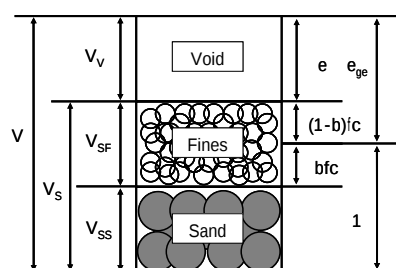


図-2 混合土の三相モデル

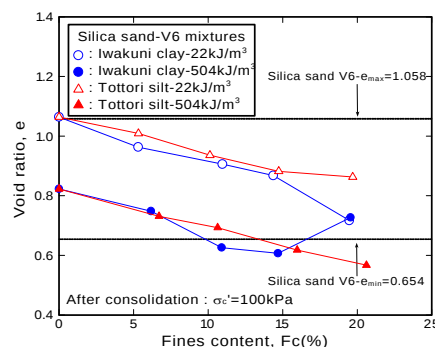


図-3 間隙比と細粒分含有率の関係

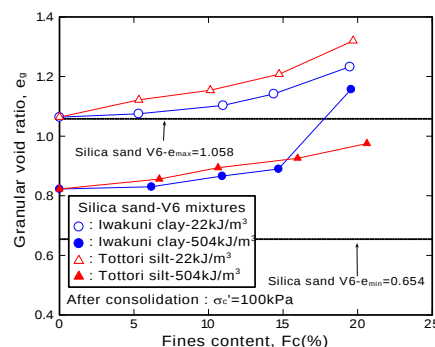


図-4 骨格間隙比と細粒分含有率の関係

相の三相に分け、粗粒分の骨格と等価とみなす Thevanayagam ら²⁾が提案した次式の等価骨格間隙比の概念を用いた。

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

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いわゆる砂骨格間隙比を表す。

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 $\varepsilon_a=20\%$ 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²⁾。

図-5 はピーク強度と細粒分含有率の関係を示した図である。鳥取シルトとの混合土は V3, V6 共に $F_c=20\%$ 以下では最大軸差応力は砂に依存しており最大軸差応力比のピークが見られなかった。しかし、岩国粘土との混合土の場合は V3 では $E_c=22\text{kJ/m}^3$ の場合では細粒分が間隙に充満し最大軸差応力比が増加傾向となり、 $E_c=504\text{kJ/m}^3$ の場合では細粒分含有率の増加に伴い最大軸差応力比は減少傾向となった。V6 においても $E_c=504\text{kJ/m}^3$ では細粒分含有率の増加に伴い最大軸差応力比は減少傾向となった。しかし、 $E_c=22\text{kJ/m}^3$ では細粒分含有率の増加によらず最大軸差応力比はほぼ一定であった。

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、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。

3.2. 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は、粗粒土と細粒土の粒径の比が考えられる。Ni³⁾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。

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

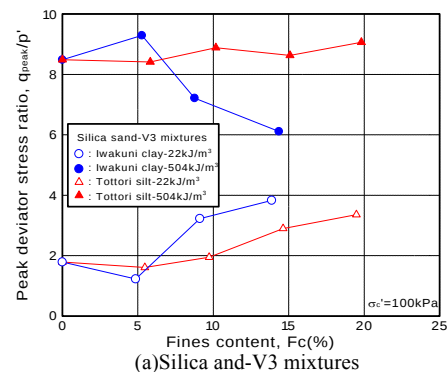
ここに、 $d_{10, \text{Host sand}}$ は粗粒土の通過質量百分率 10%の粒径であり、間隙の大きさのおおよその指標となる。 $d_{50, \text{Fines}}$ は細粒土の通過質量百分率 50%の粒径であり、細粒分の平均的な大きさを表す。図-5 に寄与率 b と粒径比 χ の関係を示す。図より、粒径比が大きくなるほど寄与率は減少する傾向が得られ、寄与率と粒径比の間に一定の相関性が認められ、次に示す式を提案する。

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

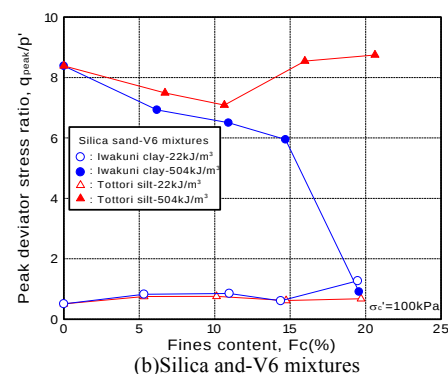
4. 結論 粒径の異なる砂と塑性の異なる細粒土(岩国粘土、鳥取シルト)混じり混合土について等価骨格間隙比に着目し、非排水単調せん断試験結果をまとめた。本研究より得られた成果は以下のとおりである。

1. 粒度分布が異なる砂のそれぞれの定常状態 $e_{ge}-\log(p')$ 関係から、細粒土が骨格形成に寄与する度合い(寄与率)を決定した。2. 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) 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)Thevanayagam, S., Shenthan, 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. 3)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.



(a)Silica and-V3 mixtures



(b)Silica and-V6 mixtures

図-5 ピーク強度と細粒分含有率の関係

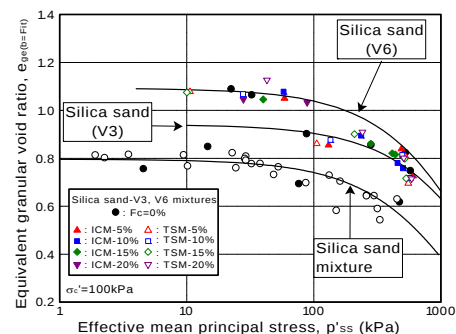


図-6 等価骨格間隙比と平均有効主応力の関係

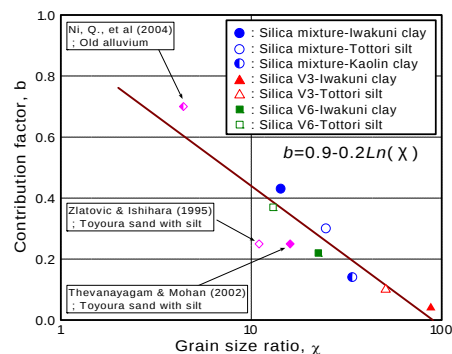


図-7 寄与率と粒径比の関係