

## 塑性の異なる細粒分と砂の混合土の非排水繰返しせん断強度の評価

山口大学院 学生会員 ○KIM, Uk-Gie 貞廣育子  
山口大学院 正会員 兵動正幸 吉本憲正

**1. まえがき** 自然地盤に存在する砂質土のほとんどは細粒分を含んでおり、設計上明確に砂として取り扱うことが困難な土が多く存在する。細粒分を含む砂に関する研究においては、多くの研究者たちが混合土の初期状態を表す方法として、骨格間隙比  $e_g$ <sup>1)</sup>を用いている。しかし、混合土の初期状態の評価には十分ではなく、混合土の強度の統一的な評価が困難な状況である。筆者ら<sup>2,3)</sup>は、砂に塑性の異なる細粒土(岩国粘土、鳥取シルト、カオリン粘土)を混合した供試体に対して一連の非排水単調せん断試験を行い、実験結果として等価骨格間隙比の概念<sup>4)</sup>を導入し、混合土の強度を統一的に評価することの出来るパラメータを策定した。本稿は、細粒分混じり砂の供試体に対して繰返しせん断試験を行い、同一な供試体の単調せん断試験の結果から策定したパラメータを用いて、繰返しせん断強度に対する細粒分の影響について検討した。

**2. 試料および試験方法** 実験に用いた試料は、粒度調整を行った三河珪砂( $e_{max}=0.850$ ,  $e_{min}=0.524$ )

と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、低い塑性を有するカオリン粘土の3種類である。表-1に示したようにこれらの試料を用い、様々な細粒分

含有率からなる混合土試料を作製した。岩国粘土及び鳥取シルトは2%の砂分を含んでいたため、各混合試料の細粒分含有率は自然細粒分含有率よりも低くなっている。供試体の作製は、塑性を有する試料に対しては予圧密法によって、非塑性の試料に対しては湿潤突固め法を用いて突固めエネルギー( $E_c=22, 504\text{kJ/m}^3$ )を変化させることで行い、有効拘束圧 100kPa、載荷荷重周波数 0.02Hz の条件下で非排水繰返しせん断試験を行った。図-1に圧密応力 100kPa で圧密した後の間隙比と細粒分含有率の関係を示す。図より、岩国粘土とカオリン混合土の間隙比は  $F_c=10\sim15\%$ 程度で、鳥取シルト混合土は  $F_c=30\%$ 程度で最小になる。岩国粘土混合土  $F_c=19.6\%$ とカオリン粘土混合土  $F_c=30\%$ 以上においては間隙比が所定の圧密応力に対応して一義的な大きさとなったが、鳥取シルト混合土は、細粒分であるシルトも粒状体としての構造を持つため、異なる間隙比が存在する。また、 $F_c=29.4\%$ 以上では、通水過程時にコラプスによる体積収縮を起こすことが明らかである。図-2に圧密後の骨格間隙比と細粒分含有率の関係を示す。図より骨格間隙比は細粒分含有率の増加に伴い増加し、粗粒子の  $e_{max}$  に近づき、やがてそれを超えていく様子が分かる。これらは、最緩状態の粗粒子骨格の間隙に細粒分が充填されている状態と推察され、これ以上の骨格間隙比では骨格構造を失い、細粒土が支配する構造へと推移していくと考えられる。

表-1 試料の混合割合と細粒分含有率の関係

| Silica sand                | Iwakuni clay               |                   | Tottori silt               |                   | Kaolin clay                |                   |
|----------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Mixture rate by weight (%) | Mixture rate by weight (%) | Fines content (%) | Mixture rate by weight (%) | Fines content (%) | Mixture rate by weight (%) | Fines content (%) |
| 100                        | 0                          | 0.0               | 0                          | 0.0               | 0                          | 0.0               |
| 90                         | 10                         | 9.8               | 10                         | 9.8               | 10                         | 10.0              |
| 85                         | 15                         | 14.7              | 15                         | 14.7              | 15                         | 15.0              |
| 83                         | 17                         | 16.7              | -                          | -                 | -                          | -                 |
| 80                         | 20                         | 19.6              | 20                         | 19.6              | 20                         | 20.0              |
| 70                         | 30                         | 29.4              | 30                         | 29.4              | 30                         | 30.0              |
| 50                         | 50                         | 49.0              | 50                         | 49.0              | -                          | -                 |
| 0                          | 100                        | 98.0              | 100                        | 98.0              | 100                        | 100.0             |

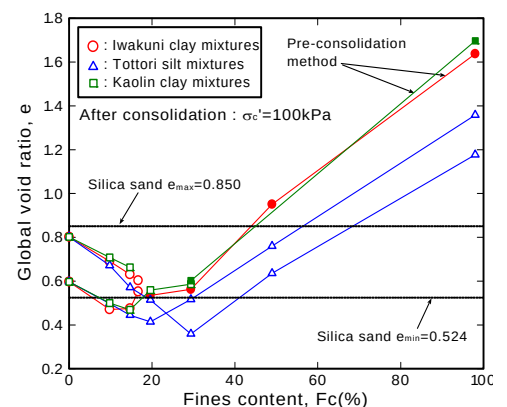


図-1 間隙比と細粒分含有率の関係

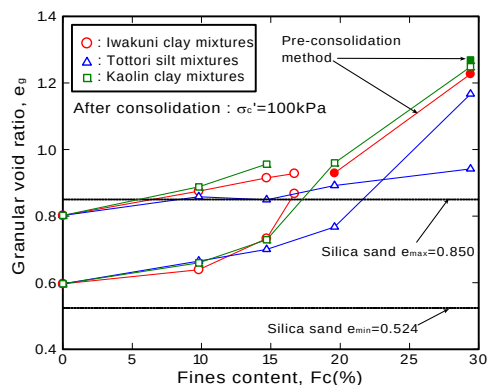


図-2 骨格間隙比と細粒分含有率の関係

キーワード 混合土, 骨格間隙比, 等価骨格間隙比, 繰返しせん断強度

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 理工学研究科 地盤工学研究室 TEL(0836)85-9344

**3. 試験結果および考察** 筆者らのこれまでの研究<sup>2,3)</sup>で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ことが明らかとなった。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<sup>4)</sup>が提案した次式の等価骨格間隙比の概念を用いた。

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

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す。3種類の混合土に対して、非排水単調せん断試験を行い、軸ひずみ $\epsilon_a=20\%$ 時を定常状態とし、その時の  $e_{ge}-\log(p')$  関係を表す定常状態線において  $F_c=0\sim 20\%$  の強度が  $F_c=0\%$  と等しくなる寄与率  $b$  を決定した。その結果、**図-3** に示したように、岩国粘土混合土において  $b$  は 0.30、鳥取シルト混合土は  $b=0.43$ 、カオリン混合土は  $b=0.14$  となった。非排水単調せん断試験から求めた寄与率  $b$  による等価骨格間隙比  $e_g$  と液状化抵抗比  $R_{L(N=20)}$  の関係を **図-4** に示す。図より、液状化抵抗比と等価骨格間隙比の間に細粒分の種類と細粒分含有率の違いにもかかわらず  $F_c=0\%$  の液状化強度と一義的に定まる結果が得られた。

実務では、地盤の密度を表すパラメータとして相対密度が多く用いられる。本研究では相対密度を**式-(2)**に示す等価骨格相対密度  $D_{rge}$  に置き換えることで、混合土においても成立させることが可能であると考えられる。

$$D_{rge} = \frac{e_{max} - e_{ge}}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここに、 $e_{max}$ 、 $e_{min}$  は、粗粒土の最大・最小間隙比である。**図-5** に液状化抵抗比  $R_{L(N=20)}$  と等価骨格相対密度  $D_{rge}$  の関係を示す。図より、両者の間に一義的な関係が認められ、Ishihara<sup>5)</sup>の式による液状化強度の推定値と実験値の比較では、よい対応が示されている。これより、細粒土が骨格形成に寄与する度合いを適切に評価することで、混合土においても既往の研究で示されてきた密度と液状化強度の関係が適用できることが明らかである。本研究の結果では  $D_{rge}=20\%$  以下について一律に液状化強度を 0.1 として評価し、 $D_{rge}=20\%$  以上については次に示す式を提案する。

$$R_L = 0.0032 D_{rge} + 0.04 \quad (3)$$

なお、本実験で用いた細粒土の塑性指数は、NP~50 程度であり、骨格間隙比で表現し得る範囲の細粒分含有率において、混合土はすべて非塑性である。

**4. まとめ** 本研究では、非排水せん断試験から得られた定常状態の  $e_{ge}-\log(p')$  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、繰返しせん断強度に及ぼす細粒分の影響を一義的に説明できることが明らかとなった。これらの結果を用いた等価骨格相対密度によって液状化抵抗比を適切に評価できる式を提案した。

**参考文献** 1) Mitchell, J. K.: Fundamentals of Soil Behaviour, Wiley, 1976. 2) 金部基ら: 砂・粘土混合土のせん断強度特性に及ぼす細粒分の影響, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007. 3) 石川智ら: 粘土混じり砂の非排水繰返しせん断特性, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 474-477, 2006. 4) Thevanayagam, S. et al: Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts, J. Geotech. Geoenviron. Engng 128, No. 10, pp. 849-859, 2002. 5) Ishihara, K: Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 17, No. 3, pp. 1-17. 1977.

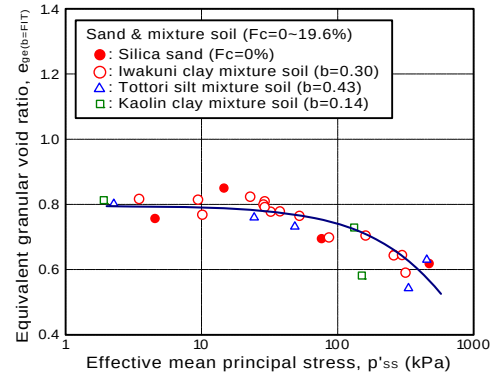


図-3 平均有効主応力と等価骨格間隙比の関係

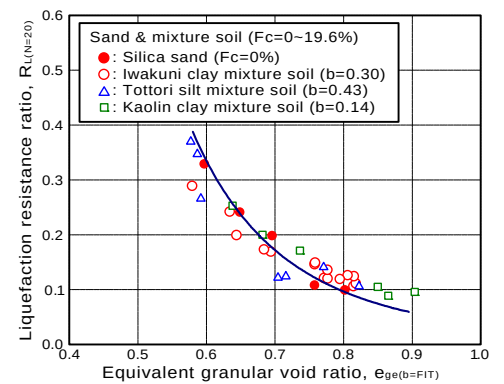


図-4 液状化抵抗比と等価骨格間隙比の関係

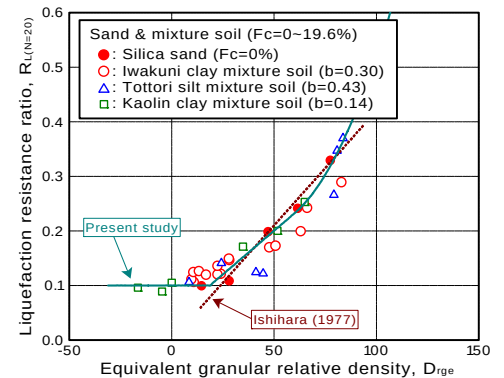


図-5 液状化抵抗比と等価骨格相対密度の関係