

砂の非排水繰返しせん断特性におよぼす細粒分の活性の影響

山口大学 学生会員 ○石川智

山口大学 正会員

兵動正幸 オレンセロランド

山口大学 正会員

中田幸男 吉本憲正

1. まえがき 自然地盤における砂のほとんどは細粒分を含んでいる。これまでの細粒分を含む砂に関する研究において、細粒分の増加に伴う液状化強度の変化は、細粒分が塑性を有する場合は増加し¹⁾、非塑性の場合は減少する²⁾という見解が多く示されてきた。しかしながら、その解釈は必ずしも一貫しておらず研究者によってまちまちの説明が行われてきた。その理由は、細粒分混じり砂の初期状態の評価に一貫性がなく、研究者毎に異なった供試体作製法、初期状態を用いていたことによると考えられる。本研究では、砂に塑性および非塑性の細粒分を様々な割合で混合し、砂分が卓越する領域では突固め法により、粘性土が卓越する領域では予圧密法によってそれぞれ供試体を作製し、一連の非排水繰返しせん断試験を行った。その結果を用いて、細粒分混じり砂の繰返しせん断強度に対する細粒分の活性の影響について検討した。

2. 試料および試験方法 本研究では、粗粒土試料として粒度調整を行った三河珪砂 ($F_c=0\%$)、塑性細粒土試料として山口県岩国市の岩国港で採取した岩国粘土 ($F_c=98\%$, $I_p=47.5$)、非塑性細粒土試料として鳥取県西部地震の際に境港市の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 ($F_c=98\%$, $I_p=NP$) 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。試料の混合割合は、乾燥重量比で 100:0, 90:10, 85:15, 83:17, 80:20, 70:30, 50:50, 0:100 の 8 通りである。供試体は、岩国粘土混合土のうち塑性を有した $F_c=19.6\%$ 以上の試料については予圧密法³⁾により、また岩国粘土混合土のうち非塑性となった $F_c=16.7\%$ 以下および鳥取シルト混合土全試料については突固め法³⁾によって作製し、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 で圧密した後の供試体の間隙比 e と細粒分含有率 F_c の関係を示す。間隙比は、岩国粘土混合土では $F_c=10\%$ 程度で、鳥取シルト混合土では $F_c=20\sim30\%$ で最小となる。岩国粘土混合土においては、 $F_c=19.6\%$ 以上において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、鳥取シルト混合土では、砂だけでなく細粒分であるシルトも粒状体としての構造を持つため、同一の圧密圧力下においても異なる間隙比状態が存在することが明らかである。鳥取シルト混合土の $F_c=29.4\%$ 以上の供試体においては、通水過程時においてコラップスによる著しい体積収縮を起こし、特に、低いエネルギーで突固めた初期に緩い試料の方がより大きな体積圧縮を起こしたため、圧密後の骨格間隙比が逆転する現象が生じた。

細粒分を含む砂の力学特性は、砂の骨格構造が支配要因と考えられる。そこで本研究では、細粒分を間隙とみなす砂骨格間隙比⁴⁾の概念を用い、砂のみで形成される骨格の状態を把握することを試みた。図-2 に供試体の圧密後の骨格間隙比 e_g と細粒分含有率 F_c 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、珪砂のみの場合の最大間隙比に近づき、やがてそれを超えていく様子がわかる。供試体の骨格間隙比が珪砂の最大間隙比付近においては、最も緩い状態の砂骨格構造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の場合は砂骨格構造が不安定となりやがて、細粒が支配する構造へと推移していくと考えられる。また、高いエネルギーで突固めた初期に密な試料において、岩国粘土混合土では $F_c=15\%$ 付近で、鳥取シルト混合土では $F_c=20\%$ 付近で供試体の骨格間隙比が砂の最大間隙比を超えることが示されている。これより、細粒分は砂の骨格構造の形成を阻害する働きを持つと推察され、特に岩国粘土は鳥取シルトよりも強くその傾向を示すことが認められる。

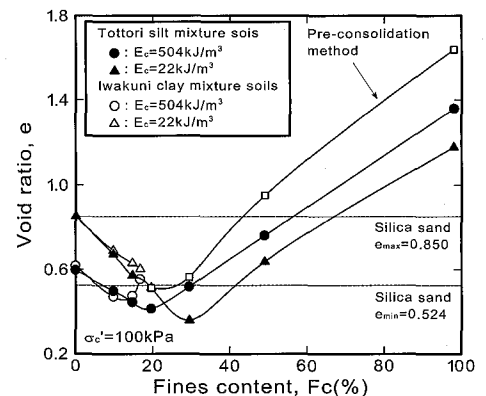


図-1 間隙比と細粒分含有率の関係

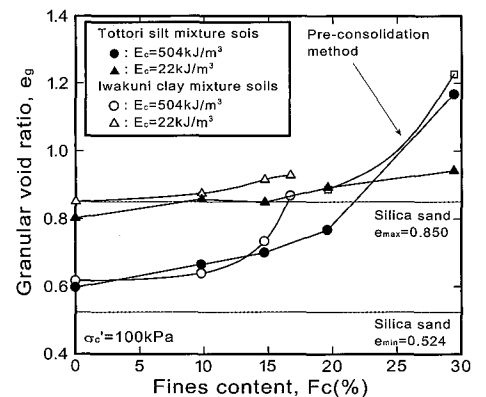


図-2 骨格間隙比と細粒分含有率の関係

3. 試験結果および考察 図-3 に繰返しせん断強度 $R_{L(N=20)}$ と細粒分含有率 F_c の関係を示す。なお、繰返しせん断強度（以下、強度と表記）は、繰返し回数 20 回で軸ひずみ両振幅 5% を生じる繰返しせん断応力比とした。初期に密な岩国粘土混合土の場合、強度は、細粒分含有率の増加に伴い大きく減少した後増加に転じ、 $F_c=30\%$ 以降でほぼ一定となった。一方、初期に密な鳥取シルト混合土の場合、強度は一旦増加した後大きく減少し、 $F_c=30\%$ 付近で極小値を示すと、再び増加する複雑な挙動を示した。この挙動に対しては、混合土の間隙比および骨格間隙比のどちらを用いても適切に表現できない。そこで、細粒分が砂と同等の骨格を形成するとみなす間隙比と、骨格形成に全く寄与しないと考える骨格間隙比の間に位置し、細粒分をある程度の割合で骨格形成に加担する要素とみなす等価骨格間隙比⁵⁾ の概念を用い、細粒分が混合土全体の構造に与える影響の割合について検討した。等価骨格間隙比 e_{ge} は、骨格間隙比を拡張したものとして、砂が骨格を形成し得る範囲の細粒分含有率において成立し⁵⁾、次式で表される。ここに、 e は間隙比、 f_c は体積比での細粒分含有率、 b は細粒分の寄与率である。なお、本研究でのこの式の適用範囲は岩国粘土混合土では $F_c=16.7\%$ 以下、鳥取シルト混合土では $F_c=29.4\%$ 以下であった。

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

Ni ら⁶⁾ は、 b が取る範囲を、塑性細粒分の場合は $-\infty \leq b \leq 0$ 、非塑性細粒分の場合は $0 \leq b \leq 1$ としている。 $F_c > 0\%$ の強度が $F_c = 0\%$ と等しくなる b を検討した結果、岩国粘土混合土では $b=0.2$ 、鳥取シルト混合土では $b=0.3$ としたときの等価骨格間隙比が強度と最も良い相関を示す結果が得られた。図-4 に繰返しせん断強度比 $R_{L(N=20)}$ と等価骨格間隙比 e_{ge} の関係を示す。図は、それぞれの最適な b による等価骨格間隙比について示しており、すなわち、岩国粘土混合土では、砂分に対して細粒分が 20%、鳥取シルト混合土では 30% の割合で強度に寄与していることを意味している。これは、砂が骨格を形成し得る細粒分含有率からなる場合、細粒分は砂骨格の間隙を充填するように働くため、同一の骨格間隙比であれば細粒分含有率が高い土の方が、全体としてより密であることによると考えられる。また、どちらの混合土においても、寄与率が正の値であることから、混合土中の細粒分は全体の骨格形成に寄与し、強度を増加させる働きがあると推察される。岩国粘土混合土の方が、細粒分が全体の強度に及ぼす影響は小さく、細粒分の活性や粒度の影響によって強度が変化する傾向にあることを伺わせた。

4. まとめ 本研究により、細粒分を含む砂の繰返しせん断特性に及ぼす細粒分の影響は、粗粒分が骨格を形成し得る部分において、細粒分の塑性の有無によらず、全体の繰返しせん断強度を増加させるものであった。一方で、細粒分の活性や粒度の影響により、塑性細粒分が発揮する強度は、非塑性細粒分と比較して、わずかに小さいことが明らかとなった。

参考文献

- [1] 桑野二郎：粘土分含有率が砂質土の非排水繰返しせん断特性に及ぼす影響、粘性土の動的性質に関するシンポジウム論文集, pp. 143-148, 1995.
- [2] 黄大振, 柳沢栄司, 菅野高弘：シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文報告集, No. 463, pp. 25-33, 1993.
- [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] Mitchell, J. K.: *Fundamentals of Soil Behaviour*, Wiley, 1976.
- [5] 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.
- [6] Ni, Q. et al: Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils, *Geotechnique* **54**, No. 9, pp. 561-569, 2004.

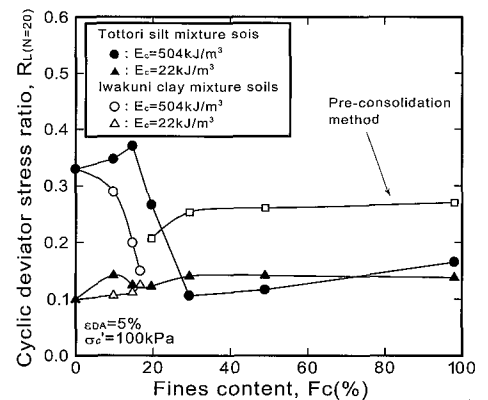


図-3 繰返しせん断強度比と細粒分含有率の関係

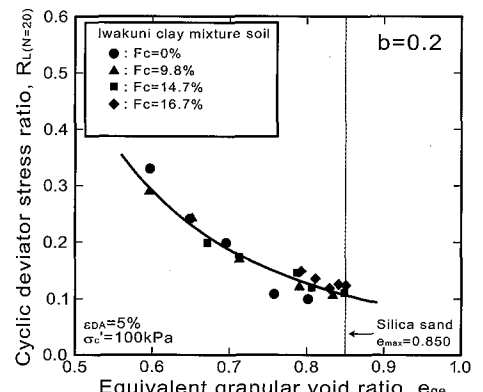


図-4(a) 岩国粘土混合土の繰返しせん断強度比と等価骨格間隙比の関係 ($b=0.2$)

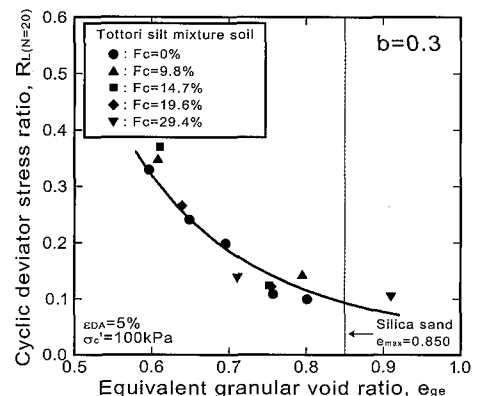


図-4(b) 鳥取シルト混合土の繰返しせん断強度比と等価骨格間隙比の関係 ($b=0.3$)