

粒子特性の評価と工学的意義

3. 粒径・粒度の評価と土の力学挙動

石川 達也 (いしかわ たつや)
北海道大学大学院助教授 工学研究科

兵動 正幸 (ひょうどう まさゆき)
山口大学教授 工学部社会建設工学科

陳 光 齊 (ちん こうさい)
九州大学大学院助教授 工学研究院

3.1 はじめに

自然界の土には、比較的均等な粒径からなる砂、砂と粘性土が入れ混じって出来た混合土、さらに、まさ土やしらすのように粗粒分の破碎による細粒分を有し、広範な粒度を示す土など様々な土が存在する。自然の土の力学挙動は、土粒子の生来的な性質である一次性質、例えば鉱物組成、粒子形状や粒子強度などの粒状体としての特質に加え、粒度など粒状集合体としての特性に大きく依存することが知られている。これは、土全体が大きさの異なる土粒子から構成される場合、外力の作用による粒子間力の伝達は非一様となり、種々の大きさの粒子が土にどの程度含まれるかによって粒子構造や粒子間力の伝達機構といった粒子の相互作用が変化するためである。また、細粒分を含むと細粒分の活性の有無によっても保水性、粘性、塑性等の細粒分の物理的、工学的性質が異なり粒子の相互作用が変化するため、土の力学挙動も異なる。このため、地盤の力学挙動を評価する場合にも、大きさの異なる個々の粒子が、粒状集合体である地盤の中で相対的にどのような役割を演じることになるのかを見極めることが重要になる。

本章では、まず土がどのような大きさの粒子から構成されているかを示す指標について説明する。つづいて、粒径・粒度が土の工学的性質に及ぼす影響についての既往の研究を示しながら、地盤を粒状体として扱うことの意味合いを考えることとする。最後に、工学的な応用事例として、サンドサンプリングに与える粒径・粒度の影響についての数値解析事例を紹介する。

3.2 粒径・粒度の評価とモデル化

3.2.1 粒径・粒度の評価法

土あるいは地盤が、どのような大きさの粒子で構成されるかは、土の工学的性質を左右する一つの重要な要因である。このため、礫、砂、シルト、粘土などの異なる粒径区分に属する土粒子の含有割合を何らかの指標で明らかにすることが土の特性を知る第一歩であると考えられている。この場合、土がどのような粒子によって構成されるかは、土粒子そのものの絶対的な大きさを示す「粒径」と、土がどのような粒径の土粒子で構成されるかという相対的な土の組成を示す粒径分布（粒度）によ

って表現される。

一般に、粒径・粒度を評価するには、扱う土がどのような粒径組成のものであるかによって、評価指標を使い分けることが望ましい。細粒土の場合には、粒度と工学的性質の相関性は薄く、コンシステンシー特性が有用であるが、粗粒土やシルト・粘土を含む粒径幅の広い砂質土を扱う場合には、粒径の大きさを表す指標として最大粒径や平均粒径（50%粒径 D_{50} ）などを、粒径分布の幅を表す指標として均等係数 U_c を用いることが多い。また、砂とシルト、粘土など異なる粒径の土を混合させた混合土については、75 μm ふるいを通過した粒子の含有質量百分率である細粒分含有率 F_c など、混合土を粗粒分と細粒分に分離して評価する指標を用いることが多い。ここでは、混合土においてしばしば用いられる評価指標である骨格間隙比^{1),2)}と Rate of Gross Volume of Fine Content to Void³⁾（以下 *GVFC* と略す）を紹介する。図-3.1は、骨格間隙比と *GVFC* の概念を示しているが、前者は、細粒分の体積も間隙とみなし、間隙および細粒分の体積を粗粒分粒子体積で除した値を、また後者は、粗粒分の骨格間隙中に占める細粒分の総体積の割合を示している。骨格間隙比 e_g と *GVFC* は、それぞれ次式のように表される。

$$e_g = \frac{V_v + V_{sf}}{V_{ss}} = \frac{V_{es}}{V_{ss}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$GVFC = \frac{V_{sf} + V_{ef}}{V_{es}} = \frac{V_{(s+e)f}}{V_{es}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

飽和した混合土において細粒土と砂の土粒子密度を等価と仮定すると、骨格間隙比は次式でも与えられる^{2),4)}。

$$e_g = \frac{\rho_s(1+w)}{\rho(1-F_c)} - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

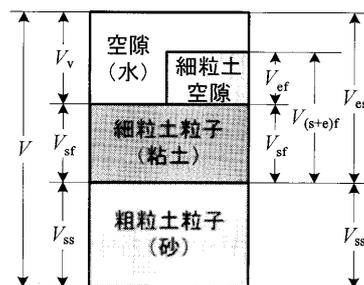


図-3.1 混合土の三相モデル（骨格間隙比と *GVFC* の概念図）

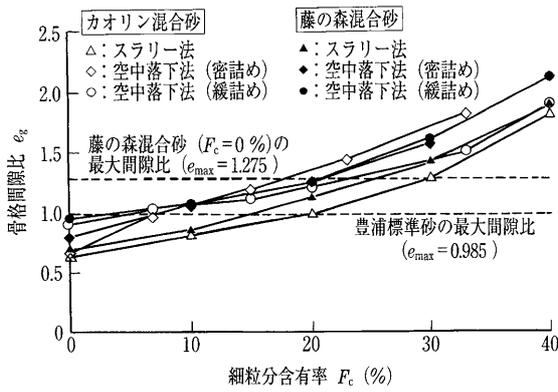


図-3.2 骨格間隙比と細粒分含有率の関係⁵⁾

ここに、 ρ_s は土粒子の密度、 ρ は飽和密度、 w は含水比、 F_c は細粒土含有率（細粒分含有率、または粘土含有率）である。

図-3.2は2種類の異なる活性細粒土と砂の混合土についての骨格間隙比 e_g と細粒分含有率 F_c の関係⁵⁾を示したものである。骨格間隙比は細粒分含有率の増加に伴って増大し、細粒分含有率が約 $F_c = 10 \sim 20\%$ で骨格間隙比が砂の最大間隙比を上回ることが報告されている^{5)~8)}。砂の最大間隙比よりも骨格間隙比が小さい場合は構造の主体は砂であり、大きい場合には主に細粒土が構造を成していると判断される。なお、次式で定義される理論限界細粒分含有率 F_{clim} ⁹⁾以上細粒分を含む場合にも、細粒分主体の構造になるとされている。

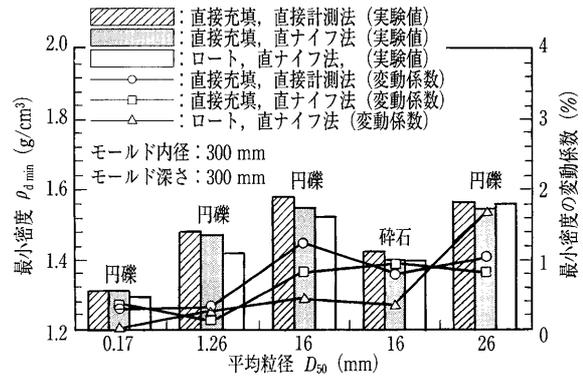
$$F_{clim} = \frac{n_c(1-n_f)}{1-n_c \cdot n_f} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 n_c は粗粒土骨格の間隙率、 n_f は細粒分の間隙率である。

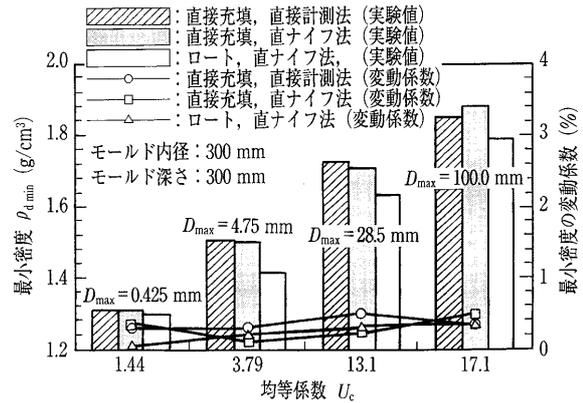
一方、細粒分含有率とGVFCの違いは、前者が、密度情報が適切に反映されない指標であるのに対し、後者は、供試体密度の大小、すなわち細粒分による骨格間隙の充填度を表す指標であることである。野並ら³⁾は、細粒分の混入割合が増加した場合に強度が低下するのは、粗粒分土粒子間のかみ合わせの低下によるものであるとの考えに基づき、骨格間隙比やGVFCの観点から、細粒分がせん断強度に与える影響を検討している。

3.2.2 粒径・粒度のモデル化

粗粒材料、例えばロックフィルダムの堤体を構成するような粒径の大きな実材料を用いて、室内で強度・変形特性試験を行うことは一般に困難である。そのような場合、同一母岩から作製された粒径の小さい粒度の試料を、試験装置のサイズから決まる最大粒径に合わせた試験粒度に調整して用いることが多い。実材料の粒度(原粒度)を一定の割合で縮小する試験粒度には、原粒度の粒径加積曲線(粒度曲線)を平行移動して得られる「相似粒度」や、ある粒径より大きい粒径のものを除去して得られる「せん頭粒度」などがある。図-3.3は、礫の最小密度に及ぼす粒径・粒度の影響を検討したものである¹⁰⁾。同図によると、均等係数が等しい相似粒度試料の場合には、同一材料であれば平均粒径の増加とともに最小密度は増



(a) 相似粒度試料 ($U_c=1.44$) の場合



(b) せん頭粒度試料の場合

図-3.3 最小密度に及ぼす粒径・粒度の影響¹⁰⁾

加し、最大粒径が異なるせん頭粒度の場合には、均等係数が小さいほど最小密度は小さくなる。一方、最大密度に対しても、締固めエネルギー一定の条件であれば、相似粒度試料の場合、最大粒径の大きい試料ほどよく締まること¹¹⁾や、せん頭粒度試料の場合、均等係数の大きい試料ほどよく締まること¹²⁾が報告されている。このように粒径・粒度が最大・最小密度へ影響を及ぼすのは、同一の地点から採取された試料でも細粒分と粗粒分とで材質や粒子形状が異なる場合があることがその一因である。加えて、粒径・粒度と粒子破碎が強い相関を有していることが挙げられる。例えば、同じ材料から取られた試料でも大きい粒径の粒子ほど強度が低下することが知られており、最大粒径の最大密度への影響は、粒径が大きくなるほど著しい粒子破碎を伴うことに起因すると考えられている。このため、小さい最大粒径、硬い粒子、低拘束圧の場合など粒子破碎の比較的生じにくい状況では、最大粒径が最大密度に及ぼす影響も小さくなると予想される。一般に、最大・最小密度を用いて計算される相対密度は、粗粒土の工学的性質を決める重要な指標の一つであり、試料の石質や粒度にかかわらずに静力学的特性や動力学的特性を評価する指標として広く利用されている。赤司ら¹³⁾は、最大粒径や均等係数が異なる粒状材料を同じ間隙比で比較するのは問題があると考え、材料の変形・強度特性を同じ相対密度で比較することを提案している。

以上のように、相似粒度やせん頭粒度などの試験粒度

と原粒度の試料の強度・変形特性試験結果が同一となるためには、両者間で粒子形状などの幾何学的条件や粒子強度などの力学的な相似条件を満足する必要がある。しかし、現実には不可能な場合が多々あるため、原粒度と異なる試験粒度試料を用いて試験を行う場合には、実材料と小さい粒度の試料の工学的性質の違いなど、粒径・粒度の影響に着目して、実材料の力学挙動を推定する必要がある。

3.3 粒径と土の力学挙動

同一鉱物組成の土粒子でも、試験結果が粒径によって異なる「粒径効果」を呈する場合がある。本節では、粒径効果の研究事例を紹介し、粒径が土の力学挙動に及ぼす影響とその原因について考える。

3.3.1 土と構造物の相互作用に及ぼす影響

地盤を構成する土粒子の大きさは、地盤の破壊挙動にも影響を与える。例えば、粒度の異なる3種類の粗粒土を用いて、水平模型地盤上に置いた帯基礎の最大荷重(支持力) P_{max} と、平均粒径 D_{50} と基礎幅 B の比の関係を調べた龍岡ら¹⁴⁾の研究では、実測支持力と理論上の支持力の比は、(平均粒径/基礎幅)によって大きく変化している(図-3.4)。この結果は、帯基礎の支持力の算定について粒径や基礎幅の寸法を考慮する必要性を示している。特に、基礎幅一定の条件で考えた場合、粒径が大きくなると地盤の支持力は増加する傾向にあり、粒径効果を確認できる。粒径効果は、せん断帯の厚さが粒径によって決まり、粒径が小さくせん断層が薄いと地盤の破壊が進行しやすいために現れると考えられている。このため、地盤内に明確にせん断帯が生じやすい場合¹⁵⁾には粒径効果について注意が必要である。ただし、粒径効果を確認できなかったという報告もあり、粒径効果が表面化するかどうかは、基礎の形状や寸法、土の締め具合などによっても異なるようである。

この他の研究事例としては、補強土のせん断強度特性に関するものや土と杭材との摩擦特性に関するものがある。このうち、松島ら¹⁶⁾は、粒径が異なる3種類の粗粒土を用いて大型直接せん断試験を実施し、土とジオグリッドからなる補強土のせん断特性に及ぼす粒径効

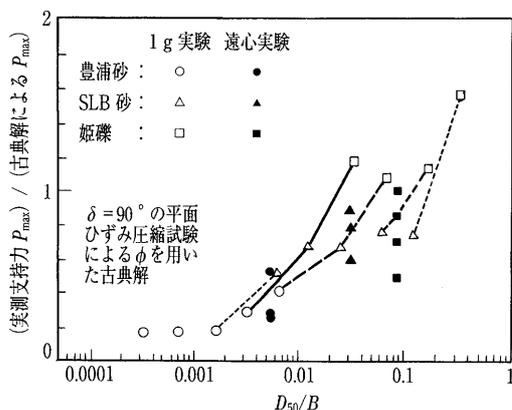


図-3.4 粒状体地盤上の帯基礎の支持力試験における最大荷重に対する粒径の影響¹⁴⁾

果について検討している。その結果、粒径が大きくなるとせん断面に抵抗する領域が拡大するため、ピーク強度が早期に発現され、剛性が低下しにくくなることを示している。また、杭の支持力問題においては、周面摩擦力を評価するために土と杭材との摩擦特性を把握する必要があるが、砂と鋼材との接触面における摩擦力は、杭の表面粗さ(粗度)と土粒径の比に強く依存し、粗度と粒径の比が増加すると摩擦角は増大することが示唆されている¹⁷⁾。これらの研究事例でも、地盤中の構造物の設計計算において、粒径効果を評価することの重要性が再確認できる。

3.3.2 土の特性そのものに及ぼす影響

同一密度における相似粒度試料間の強度差については、これまで数多くの報告がなされている。その多くは、図-3.5¹⁸⁾のように、粒径が大きくなる程、せん断強度が低下すること(以下「負の粒径効果」と称す)を示す結果である。その一方で、粒径の大きい試料ほどせん断強度が大きくなる(以下「正の粒径効果」と称す)といった報告¹⁹⁾や、粒度にかかわらず強度差は生じないといった報告²⁰⁾もあり、粒径の違いに起因する強度差に関する見解は一致していない。粒径に強度が依存する原因は十分解明されていないものの、一つは、扱う土粒子の破碎性にあると考えられている。例えば、せん断強度が低下するのは、粒径が大きくなる程、粒子破碎量が多くなり、せん断中の正のダイレイタンスを抑制することにあると説明されている²¹⁾。また逆に、土粒子が比較的硬質で粒子破碎のほとんど生じない場合には、正の粒径効果が報告されている¹⁹⁾。粒子破碎と土の工学的性質の関係については、第5章で詳しく解説されるが、粒径・粒度と土粒子の破碎性に限ってみれば、平均粒径が大きく、均等係数が小さく、細粒分混入量の少ない試料ほど粒子破碎量は多くなる²²⁾。したがって、このような条件下では、負の粒径効果が顕在化しやすくなると考えられる。

土の破壊時に粒径に依存してせん断層が発生することも理由の一つである。ピーク状態から残留状態に至るまでに単位長さ当たりのせん断層内で消費されるひずみエネルギーは、せん断層の厚さとせん断層内のせん断変形量の積に比例する。このとき、せん断層の厚さは土の粒

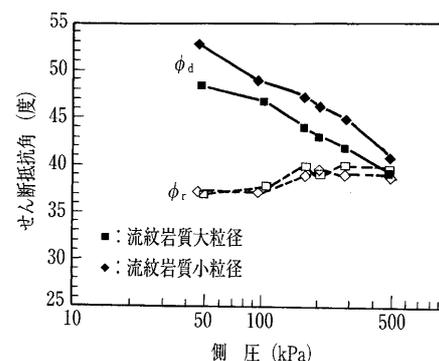


図-3.5 粒径が異なる相似粒度試料のせん断抵抗角の比較¹⁸⁾

講座

径にはほぼ比例し、平均粒径の10~20倍程度であるとされている²³⁾。また、種々の粒径・粒度の砂礫を用いた平面ひずみ圧縮試験により、せん断層の変形量に及ぼす平均粒径の影響を検討した奥山らの研究²⁴⁾によると、せん断応力レベルと平均粒径の0.66乗で正規化されたピーク後のせん断層の変形量には、均等係数に依らない一義的な関係があるとされている。このため、地盤内にせん断層が完成して破壊状態となるのに必要なひずみエネルギーは、平均粒径と正の相関関係にあり、土が破壊すると粒径の影響が現れると考えられる。

3.4 粒度と土の力学挙動

本節では、特に細粒分に注目して、粒度の違いが土の力学挙動に及ぼす影響について述べる。

3.4.1 概要

粒度の影響を調べるために、これまで砂と細粒土を種々の割合で混合して作製した混合土を対象とした研究が数多くなされてきた。その際、細粒土としては、活性を有するものと非活性のものがそれぞれ用いられてきた。前者の研究は、砂から粘土に至る広範な土の力学挙動を体系化しようとするものであり、特にその途中の中間土と呼ばれる土の力学挙動を明確にしようとするものである^{4)~7),25),26)}。一方、後者の研究は、地震時の液状化に関わるものが多く、非活性の細粒分を含む砂が液状化を起こしやすいという結論が導かれている場合が多い^{8),27)}。図-3.1は、砂と細粒土から成る混合土の三相モデルを示している。混合土においては、砂分が卓越し、砂が構造を成す領域では細粒分を間隙とみなして砂のみで骨格を形成すると考えた骨格間隙比の概念^{1),2)}が用いられる。

3.4.2 砂細粒土混合土の力学挙動

大嶺ら²⁶⁾は低塑性粘土と高塑性粘土のそれぞれを豊浦砂と種々の割合で混合して作製した混合土を用いて非排水三軸圧縮試験（有効拘束圧 $\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$ 、ひずみ速度 $0.07\%/\text{min}$ ）を行った。図-3.6に高塑性粘土と砂の混合土の有効応力経路および応力比とせん断ひずみの関係を細粒分含有率の変化に対して示している。図から、混合土は砂と細粒土の中間的な挙動を示し、細粒分含有率の増加に伴い砂から細粒土の挙動へと連続的な変化が認められる。図-3.7は兵動ら⁷⁾による中塑性粘土と砂の混合土に対する一連の非排水三軸圧縮試験結果（ $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ 、ひずみ速度 $0.1\%/\text{min}$ ）を示したものである。ここでは、細粒分含有率 F_c が20%を超える混合土については細粒土の体積が骨格の最大間隙比を上回り細粒土の影響が卓越するため、予圧密法により、また20%未満の混合土では砂骨格が構造を成すことから、突固め法により供試体が準備されている。図より、砂が構造を成すと考えられる細粒分含有率 $F_c < 20\%$ において強度は、供試体作製のために加えた突固めエネルギーの影響を大きく受けることがわかる。しかし、細粒分が砂の

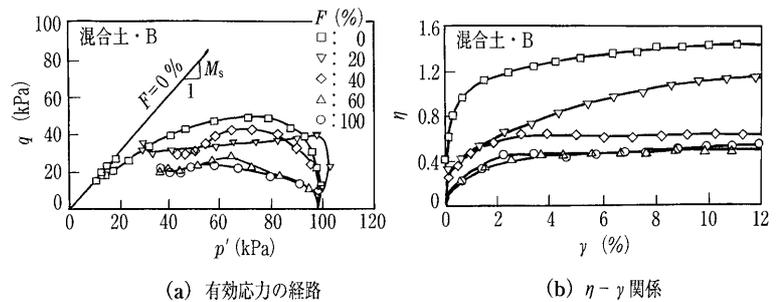


図-3.6 砂・活性細粒土混合土の非排水三軸試験結果²⁶⁾

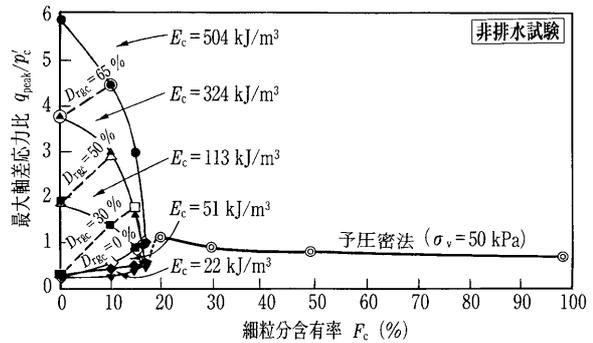


図-3.7 砂・活性細粒土混合土の非排水せん断強度と細粒分含有率の関係⁷⁾

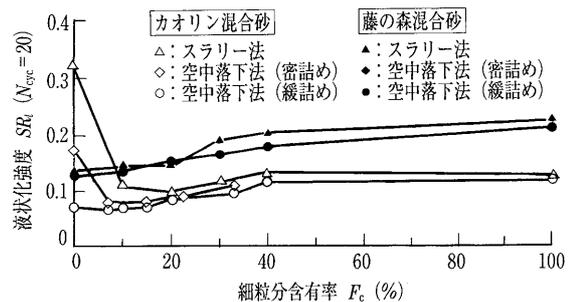
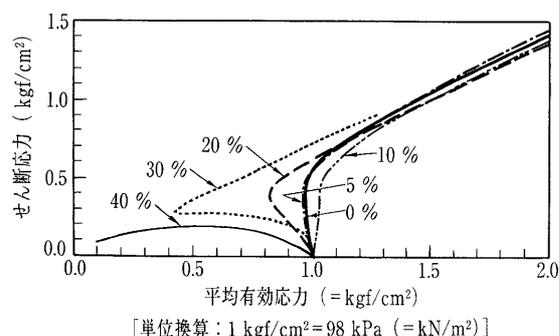


図-3.8 液状化強度と細粒分含有率の関係⁵⁾

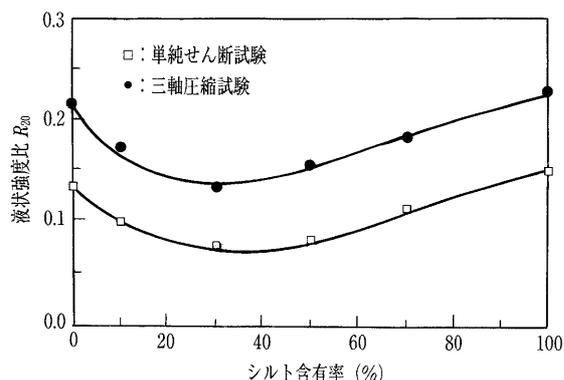
骨格を埋め尽くし砂粒子が細粒土中に散在すると考えられる $F_c > 20\%$ 以上においては強度がほぼ一定となることから、砂が構造の主体となる混合土では粒度の影響が顕著であることが明らかである。

図-3.8は供試体作製方法が異なる2種類の活性細粒土と砂の混合土（カオリン混合砂・藤の森混合砂）を用いた非排水繰返し三軸試験（ $\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$ 、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ ）の結果⁵⁾を示したものである。これらの試料の骨格間隙比と細粒分含有率の関係は図-3.2に対応している。両図より、カオリン混合砂の液状化強度は骨格間隙比が砂の最大間隙比を下回る $F_c = 20\%$ 以下において骨格間隙比の影響を受けるが、それ以上の細粒分含有率では骨格間隙比の影響は無く、カオリン粘土のみの繰返しせん断強度に近づくことがわかる。このように、活性細粒土と砂の混合土の単調および繰返しせん断強度特性に及ぼす粒度の影響は $F_c = 20\sim 30\%$ 付近を境に大きく変化している。また、砂が構造を成す場合には粒度の他に砂骨格の密度が強度特性に影響を及ぼすことがわかる。

図-3.9は、細粒分含有率の異なる非塑性細粒土（DL



図—3.9 砂・非活性細粒土混合土の非排水三軸試験結果⁸⁾



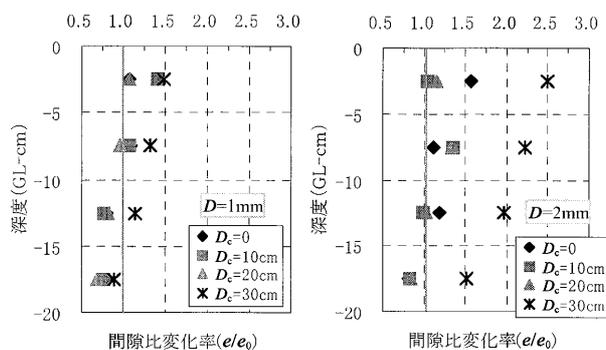
図—3.10 液状化強度とシルト含有率の関係²⁷⁾

クレイ) と豊浦砂の混合土供試体 ($D_r=65\%$) を用いた非排水三軸圧縮試験 ($\sigma'_c=98\text{ kPa}$) の結果⁸⁾である。同図において、 $F_c=0, 5, 10\%$ では膨張挙動が顕著であるが、 $F_c=20\%$ 以上では細粒分含有率の増加に伴い徐々に収縮挙動へと推移する傾向が認められる。また、同図より、変相点の応力は $F_c=20\%$ 以上では細粒分含有率が高いほど低い値となることがわかる。同様な傾向は黄ら²⁷⁾の研究によっても報告されている。

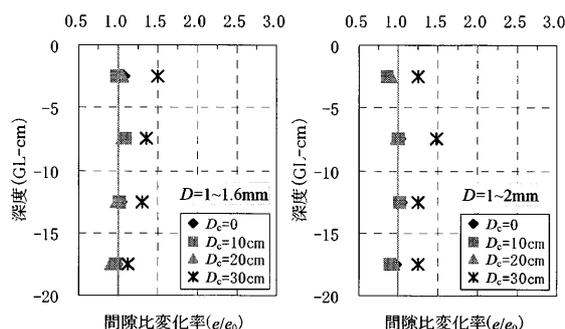
図—3.10は非活性シルトが液状化強度に与える影響を調べた研究結果²⁷⁾である。細粒分含有率を変化させた混合試料を用いて、相対密度を $D_r=50\%$ に統一させた条件で繰返し単純せん断試験と繰返し三軸試験が行われている。図より、相対密度一定条件における液状化強度はシルト含有率30%で最も低くなるが、すべてのシルト含有率においてその含有量の影響を受けて変化することがわかる。非活性細粒土と砂の混合土の場合、細粒土自体が最大・最小間隙比を有するために細粒土自体の液状化強度もその密度により異なる。したがって、構造の主体が細粒土であっても液状化強度は細粒土の骨格間隙比の影響を受けて変化する。このように混合土のせん断挙動は、細粒分の活性の有無によって異なるが、これらの性質を明らかにする上で構造の主体となる側の粒子の密度に着目した骨格間隙比が重要なパラメーターとして位置づけられるといえる。

3.5 粒径・粒度の評価が必要な事例

本節では、粒径・粒度がサンプリングに及ぼす影響について考察した陳の研究事例²⁸⁾を紹介する。



図—3.11 単一粒径地盤におけるサンプラー内場所による間隙比変化率の分布²⁴⁾



図—3.12 複合粒径地盤におけるサンプラー内場所による間隙比変化率の分布²⁸⁾

3.5.1 解析概要

圧入型サンドサンプラーを用いて、砂をサンプリングする時、サンプラー押込みによってサンプラー内への砂粒子の侵入や内部砂の変形が発生し、サンプリングされた砂は元の地盤の状態と異なる場合がある。したがって、サンプリングされた砂の品質(状態)を適正に評価することが、試験結果の適切な応用には非常に重要である。陳らは、砂粒子個々の挙動を非連続体として扱うことができる個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) を用いて、サンプラー押込み時のサンドサンプラー内への砂粒子の侵入メカニズムについて検討を行い、粒径・粒度がサンプリングに及ぼす影響について考察している。この研究では、幅 40 cm・高さ 40 cm のできる限り密な 2 次元モデル地盤に内径 7 cm (肉厚 1.5 mm) のサンプラーを 20 cm 押し込む DEM シミュレーションを実施している (口絵写真—9²⁸⁾)。解析は、モデル地盤の粒径・粒度による影響を評価するために、単一粒径地盤 ($D=1.0, 2.0\text{ mm}$) と複合粒径地盤 ($D=1.0\sim 1.6\text{ mm}, 1.0\sim 2.0\text{ mm}$) に対して実施している。

3.5.2 サンプリングに与える粒径・粒度の影響

陳らは、原地盤の間隙比に対して、サンプリング後にサンドサンプラー内の間隙比がどのように変化してきたかに着目して、サンプリングされた砂の品質を評価している。図—3.11、図—3.12は、サンプラー内での砂粒子の挙動を把握するため、サンプラー内の半分の領域を16分割して、サンプリング前後の間隙比の変化を検討した結果である。図中、 D_c は分割した小領域中央からサンプラー中心軸までの距離、また e_0 は原地盤間隙比、 e はサ

講座

ンプリング後の間隙比である。砂サンプルは、その間隙比変化率 e/e_0 が 1 より大きい場合原地盤より緩くなり、1 より小さい場合原地盤より密になる。図を見ると、2 mm の単一粒径地盤では、砂サンプルの間隙比変化率は、1 mm の単一粒径地盤の間隙比変化率よりかなり大きい。これは、粒径が大きくなるとサンプルの乱れが大きくなることを示唆していると考えられる。また、複合粒径地盤では、砂サンプルの間隙比変化率が最外周領域を除いて、平均粒径に依らずほぼ 1 に近い状態にあり、単一粒径地盤に比べ乱れの範囲が狭くサンプルの乱れは少ない。複合粒径地盤において、間隙比変化率と平均粒径に相関関係が認められなかった原因として、陳らは、単一粒径地盤との初期間隙比の違いを挙げている。これは、複合粒径地盤では、初期間隙比が単一粒径地盤より大きいため、乱れの伝播距離が少なく、中心部までその影響が及ばなかったことがその理由である。

この研究事例では、圧入型サンドサンプラーの肉厚部の押込みにより、くさび状に圧縮された砂粒子がサンプラー通過と共に、サンプラー内部で押し上げられ乱される現象を、DEM 要素の粒径・粒度を変更して数値実験を行い、地盤を粒状体として扱うことの有用性を明らかにしている。陳らは、このような解析結果を踏まえて、少ない乱れで原地盤の性状を代表できるように、圧入型サンドサンプラーで採取されたサンプルの適切な利用方法を提案している。

参考文献

- Mitchell, J. K.: Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons Inc., 1976.
- 大嶺 聖・落合英俊: 二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No. 448/III-19, pp. 121~130, 1992.
- 野並 賢・加藤正司・柴田彦彦・吉森久貴: 粗粒土にグラスビーズを混入した試料のせん断強度特性, 土木学会論文集, No. 757/III-66, pp. 155~166, 2004.
- Gergiannou, V. N., Burland, J. B. and Hight, D. W.: The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension, Geotechnique, Vol. 40, No. 3, pp. 431~449, 1990.
- 桑野二郎・中澤博志・杉原弘一・矢部浩史: 細粒分を含む砂の非排水繰返しせん断強度, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 993~994, 1996.
- 伊東周作・兵動正幸・藤井照久・山本陽一・谷口聡一: 砂・粘土・中間土の非排水単調及び繰返しせん断特性, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 233~243, 2001.
- Hyodo, M.: Effect of sand particles on cyclic and monotonic shear behaviour of mixed soils, Lecture papers of International symposium on geomechanics and geotechnics of particulate media (IS-Yamaguchi), 2006.
- 佐藤正行・小田匡寛・風間秀彦・小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液化化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 271~282, 1997.
- Skempton, A. W. and Brogan, J. M.: Experiments on piping in sandy gravels, Geotechnique, Vol. 44, No. 3, pp. 449~460, 1994.
- 原 忠・國生剛治: 砂礫の最小・最大密度に及ぼす影響因子の分析, 土木学会論文集, No. 778/III-69, pp. 151~162, 2004.
- 赤司六哉: ロック材料の密度管理と強度確認試験, 土と基礎, Vol. 33, No. 6, pp. 19~24, 1985.
- 原 忠・吉田次男・田中昌廣・國生剛治: 試験法の違いが砂礫の最小・最大密度に与える影響, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 565~566, 2003.
- 赤司六哉・高田 真・平田登基男・相馬 明: ロック材料の相対密度について (第2報), 第14回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 337~340, 1979.
- Tatsuoka, F., Goto, S., Tanaka, T., Tani, K. and Kimura, Y.: Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, Proc. Int. Conf. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, IS Nagoya 97 (Asaoka, Adachi and Oka eds.), Pergamon Press, pp. 133~138, 1997.
- 岡村未対・竹村次朗・木村 孟: 砂地盤における円形及び帯基礎の支持力に関する研究, 土木学会論文集, No. 463/III-22, pp. 85~94, 1993.
- 松島健一・毛利栄征・龍岡文夫: 大型直接せん断試験による補強土の粒子径効果, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 665~666, 2004.
- 新城俊也・小宮康明・永吉功治・国吉真文: 砂と鋼材との摩擦特性に及ぼす粒径と粗度の関係, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1475~1476, 2004.
- 軽部大蔵・野並 賢・鶴ヶ崎和博・山口 充: 相似粒度に調整した粗粒材料の強度特性に及ぼす粒子形状と粒子破碎の影響, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 201~211, 1993.
- 鎌田隆司・ブラダンテージ・今井五郎: 砂のせん断特性に及ぼす粒径の影響, 第48回土木学会年次学術講演概要集, 第3部(A), pp. 902~903, 1993.
- 高橋邦夫・春日井康夫: 捨て石材の強度特性における粒度組成と最大粒径の影響, 粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 41~48, 1986.
- 粗粒材料の変形と強度, 土質工学会, pp. 172~201, 1986.
- Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S.: Physical characteristics of sands with different primary properties, Soils and Foundations, Vol. 37, No. 3, pp. 53~64, 1997.
- Yoshida, T., Tatsuoka, F., Siddiquee, M. S. A. and Kamegai, Y.: Shear banding in sands observed in plane strain compression, Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks (Chambon et al., eds.), Balkema, pp. 165~179, 1995.
- 奥山義英・山田眞一・大家充裕・佐藤信光・吉田 輝・龍岡文夫: 粒状体のせん断層の変形特性に及ぼす均等係数と粒径の影響, 第37回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 587~588, 2002.
- Ni, Q., Tan, S., Dasri, G. R. and Hight, D. W.: Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils, Geotechnique 54, No. 9, pp. 561~569, 2004.
- 大嶺 聖・落合英俊・吉田信夫: 土構造に着目した混合土の強度特性, 土木学会論文集, No. 469/III-19, pp. 55~64, 1993.
- 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, 土木学会論文集, No. 463/III-22, pp. 25~33, 1993.
- 平松浩三・善 功企・陳 光齊・田平健二: サンドサンプラー内への砂粒子侵入メカニズムに関する一考察, 第59回土木学会年次学術講演概要集, 第3部, pp. 799~800, 2004.