

細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響 に関する基礎的研究

佐藤正行¹・小田匡寛²・風間秀彦³・小瀬木克己¹

¹正会員 東電設計(株) 耐震技術部 (〒110 東京都台東区東上野3-3-3)

²正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市大久保255)

³正会員 工博 埼玉大学講師 地盤水理実験施設 (〒338 埼玉県浦和市大久保255)

本研究は、相対密度が65%程度の比較的良質な埋立地盤を想定し、室内で調整した供試体を用いた相対密度試験、液状化強度試験、静的三軸圧縮試験および供試体の顕微鏡写真撮影等を行って、細粒分が埋立地盤の液状化強度に及ぼす影響に関して基礎的な検討を行ったものである。研究では、豊浦砂に非塑性の細粒分を混入させた試料、および兵庫県南部地震で液状化したといわれる神戸市のポートアイランドから採取したまさ土の埋立材料を室内で粒度調整した試料を用いて試験を行っている。その結果、細粒分含有率が増加し乾燥密度も増加するにも関わらず液状化強度が大きく低下する現象が見られ、この現象に関して、顕微鏡写真や砂の骨格間隙比および細粒分の間隙比等による検討を行っている。

Key Words : liquefaction, reclaimed sand, grain size, laboratory test, relative density, void ratio, dilatancy, decomposed granite soil

1. はじめに

最近の地震被害の調査結果によると、ロマブリエタ地震(1989)¹⁾、北海道南西沖地震(1993)²⁾、兵庫県南部地震(1995)³⁾等で、従来液状化しにくいとされていた細粒分を比較的多く含む埋立地盤が液状化し、大きな被害が生じた事例が報告されている。人工的に造成された埋立地盤は、自然堆積の過程である程度分級作用を受けたpoor-gradedの沖積地盤と異なり⁴⁾、兵庫県南部地震で液状化したとされるwell-gradedのまさ土の埋立地盤のように様々な粒径のものが混入する場合も多い。

次頁の写真-1に、神戸市のポートアイランドから採取したまさ土のブロック試料の間隙に後述する方法で樹脂を浸透させ、固結させて作成したプレパレート顕微鏡写真を示す。当然のことながら、小さなプレパレートがまさ土の埋立地盤を代表しているわけではないが、これらの写真は全て一枚のプレパレートから撮影したものであり、このような非常に小さな範囲の中においても、大小の粒子が不規則に様々な状態で堆積していることが分かる。

また、埋立地盤は堆積後の時間経過も自然地盤に比べて少なく、これらのことから従来の沖積地盤に対して適用してきた液状化特性の考え方をそのまま

適用することができない場合も考えられる。このような埋立地盤特有の問題を考慮した液状化特性に関する検討は今後の重要課題の一つであると思われる。

本研究は、相対密度が65%程度の比較的良質な埋立地盤を想定し、この相対密度となるように室内で調整した供試体を用いた液状化強度試験および静的三軸圧縮(CU)試験等を行って、細粒分が埋立地盤の液状化強度に及ぼす影響に関して基礎的な検討を行ったものである。

細粒分が液状化強度におよぼす影響については、今までに、砂にシルトや粘土を混入させ室内で調整した試料の液状化強度に関する研究結果が、古関ら⁵⁾、黄ら⁶⁾、戸張ら⁷⁾、佐藤ら⁸⁾、足立ら⁹⁾、桑野ら¹⁰⁾によって報告されている。古関ら⁵⁾は、豊浦標準砂に種類の異なる細粒分を混入させて三軸液状化試験を行い、細粒分の塑性指数が高いものほど液状化強度が高くなること、低塑性の細粒分の場合には、細粒分が増すとかえって液状化強度が低下する例があることを示している。黄ら⁶⁾は、低塑性または非塑性のシルト分が液状化強度に与える影響について調べ、相対密度が同じであればシルト分含有率が30%の場合に試料のダイレタンシーによる抵抗力が最も小さくなり、液状化強度も最も低くなると述べている。また、戸張ら⁷⁾および佐藤ら⁸⁾はシルト

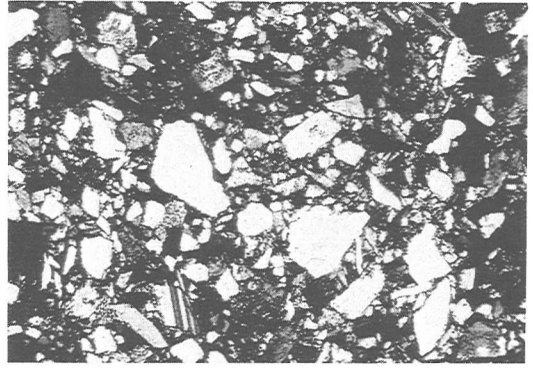
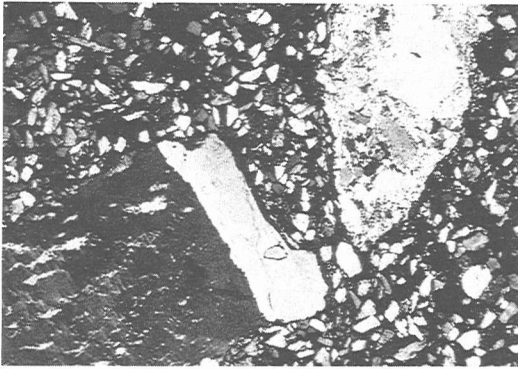


写真-1 まさ土のブロック試料の顕微鏡写真



分含有率、足立ら⁹⁾は過圧密比および細粒分の種類、桑野ら¹⁰⁾は粘土分(カオリン)がそれぞれ液状化強度におよぼす影響について報告している。このように、現在までに主に豊浦標準砂に細粒分を混入した試料による研究により多くの貴重なデータが蓄積されつつある。

本研究では、まず豊浦砂に非塑性の細粒分を混入させ、細粒分の含有率を変化させながら、相対密度試験を行い、相対密度65%の供試体の顕微鏡写真撮影、液状化強度試験および静的三軸圧縮(CU)試験を行った。その結果、細粒分含有率の増加に伴って乾燥密度は増加し、乾燥密度は含有率30~40%で最大となるが、このときに液状化強度は、砂100%の供試体の30%程度にまで低下する現象が見られた。これは、土粒子骨格の顕微鏡写真、砂粒子のみに着目した「骨格間隙比」および細粒分のみに着目した「細粒分間隙比」による検討結果から、細粒分含有率が20%程度以上となると、砂の粒子同士の接触がほとんどなくなり、全体が細粒分の挙動に支配されること、および細粒分含有率が40%程度以下では細粒分も非常に緩い状態にあることによるものと推測された。

上記の結果は、基礎的検討として豊浦砂に特殊な非塑性の細粒分を混入させたものであり、現実の埋立地盤では起こりにくい現象であることも考えられるため、次に、兵庫県南部地震で液状化したといわれる神戸市のポートアイランドから採取したまさ土の埋立材料を室内で粒度調整した試料を用いて同様の検討を行った。その結果、やはり細粒分の増加に伴い乾燥密度は増加するが、液状化強度は減少するという結果が得られた。しかし、液状化強度が最も低下するのは細粒分含有率が20%の時であり、またこの時の液状化強度は砂100%の供試体の60%程度となり、前述の非塑性の細粒分を豊浦砂に混入させた場合とは若干異なる結果となった。これは主として、

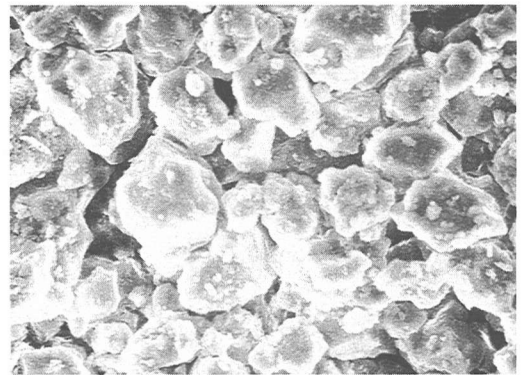
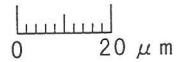


写真-2 DLクレーの粒子の電子顕微鏡写真



まさ土の細粒分が全くの非塑性ではなく、 $I_p=9$ 程度の塑性指数を有しており、扁平な粒子形状の粘土鉱物を含む材料であるためと思われる。

2. 豊浦砂を用いた検討

(1) 相対密度試験結果

豊浦砂にDLクレーを混入させ、DLクレーの含有率を変化させながら最大・最小密度試験(JGS T 161-1990に準拠)を行った。DLクレーは図-1から分かるように、 $74\mu\text{m}$ 以下の粒径のシルトを主体とした細粒分であり、非塑性(NP)の材料である。また、写真-2に示す粒子の電子顕微鏡写真によると粒子形状は角張った粒状であり、豊浦砂の粒子形状と大きな差異はない。土粒子の密度についても豊浦砂の $\rho_s=2.66\text{g}/\text{cm}^3$ に対して、DLクレーは $\rho_s=2.68\text{g}/\text{cm}^3$ であり、これも両者に大差はなく、豊浦砂とDLクレーの主な違いは粒径のみであるといえる。

一般に、細粒分含有率が10%を越えるような材料は最大・最小密度試験の適用範囲外であるが、本研

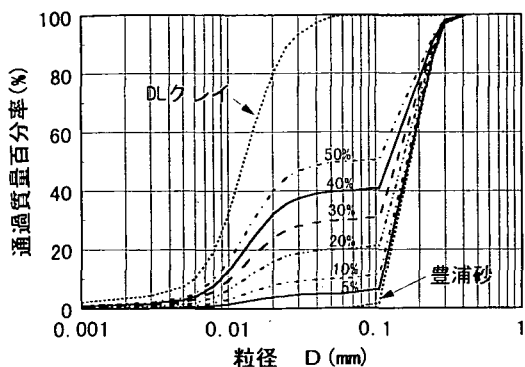


図-1 細粒分含有率を変化させた粒径加積曲線

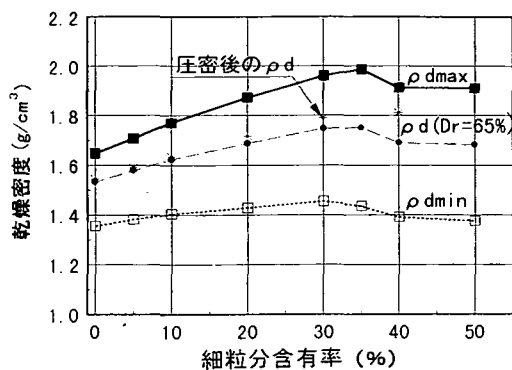


図-2 細粒分含有率と最大、最小乾燥密度および相対密度 $D_r=65\%$ の乾燥密度の関係

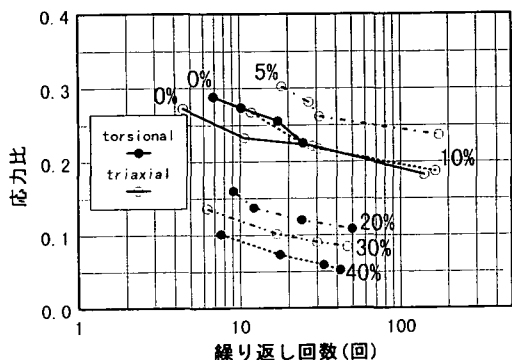


図-3 繰返しせん断応力比と液状化を生じる繰返し回数の関係(中空ねじり：せん断ひずみ両振幅7.5%，三軸：軸ひずみ両振幅5%)

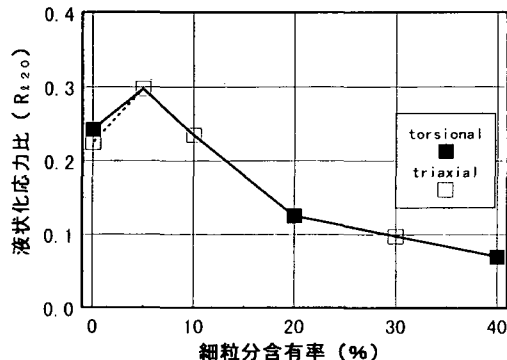


図-4 繰返し回数20回の液状化応力比 (R_{t20}) と細粒分含有率の関係

究では、細粒分含有率が異なる材料に対して室内試験を行うに際して、一定の条件下の供試体を作成するための指標として相対密度を用いることとした。

各細粒分含有率の粒径加積曲線を図-1に、細粒分含有率と最大、最小乾燥密度および相対密度 $D_r=65\%$ の乾燥密度の関係を図-2に示す。同図によると、細粒分含有率の増加に伴って乾燥密度は増加し、最大、最小乾燥密度および $D_r=65\%$ の乾燥密度とも細粒分含有率が30～35%の場合に最大値を示し、それ以上の細粒分含有率では減少している。

(2) 液状化試験結果

細粒分含有率が0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%の $D_r=65\%$ の供試体を乾燥打撃法により作成し、非排水繰返し中空ねじり試験(供試体の外径:7cm, 内径:3cm, 高さ:7cm)による液状化試験を細粒分含有率0%, 20%, 40%について⁸⁾、また非排水繰返し三軸試験(供試体の直径:5cm, 高さ:10cm)による液状化試験を細粒分含有率0%, 5%, 10%, 30%について¹¹⁾実施した。これらの液状化試験は、 1kgf/cm^2 の等方圧密を行った供

試体に対して背圧を 2kgf/cm^2 とし、B値が0.96以上であることを確認した後、正弦波の繰返し荷重を載荷して行った。なお、繰返し荷重の周波数は、中空ねじり試験では0.1Hz、三軸試験では0.2Hzとした。

乾燥打撃法による供試体作成においては、あらかじめ所定の乾燥密度に対応した量の乾燥材料を、設定した配合率でよく混合しておき、モールドをハンマーでたたきながら、この試料をモールド内に5層程度に分けて詰めた。なお、同様の方法で作成した試料を、後述する方法によって樹脂で固結させたものを切断し、断面の目視観察および顕微鏡観察を行ったが材料の分離は特に見られなかった。

細粒分含有率0%の場合については、中空ねじり試験と三軸試験の両方で試験を行っているが、これは試験方法の違いによって、繰返しせん断応力比(繰返しせん断応力を初期有効拘束圧で正規化した値)と液状化を生じる繰返し回数の関係に大差がないことを確認するために行ったものである。

なお、室内試験の際に、細粒分含有率が高いほど、供試体の作成から飽和、圧密までの過程において供

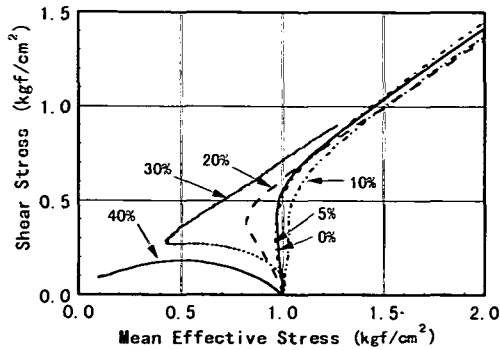


図-5 静的三軸圧縮($\bar{C}U$)試験による有効応力経路($\sigma_o' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

試体の収縮量が多くなる傾向が見受けられた。しかし、供試体の圧密後の乾燥密度を管理することが困難であったため、本研究では、乾燥打撃法によりモールド内に詰めた供試体の初期状態の相対密度を65%とすることで統一することとした。供試体作成時からの圧密後の乾燥密度の変化は図-2に示した通りである。

液状化試験結果から、中空ねじり試験ではせん断ひずみ両振幅が7.5%、三軸試験では軸ひずみ両振幅が5%に達した時点の繰返し回数を求めた。この繰返しせん断応力比と繰返し回数との関係を図-3に示す。また、図-3から読みとった繰返し回数20回の際の液状化応力比($R_{1,20}$)と細粒分含有率の関係を図-4に示す。なお、細粒分含有率が0%の場合については、比較のために、中空ねじり試験と三軸試験の両方の試験を実施したが、図-3および図-4から分かるように、両者の結果はほぼ一致していることから、ここでは両者を区別せずに比較している。

図-4を見ると、液状化強度は細粒分含有率5%の時に最大となり、10%から20%の間で急激に低下している。また、細粒分含有率が20%の $R_{1,20}$ は0%の場合の約50%となっており、さらに30%、40%と細粒分含有率が増加するにつれて液状化強度はさらに低下する傾向を示している。細粒分含有率が40%の時の $R_{1,20}$ は細粒分含有率が0%の時の約30%にまで低下している。

この液状化応力比の低下傾向は、黄ら⁶⁾が行ったシルト(豊浦標準砂製造の際にできた細粒分)と豊浦砂の混合材料による $Dr=50\%$ の試験結果とほぼ同様の傾向を示しており、非塑性の細粒分の材料が異なる場合でも、また相対密度がこれより高い65%程度の場合においても、細粒分含有率が30%~40%の時に液状化強度はかなり低下するものと思われるが、本研究の試験結果の方が液状化強度の低下が大きい結果となっている。

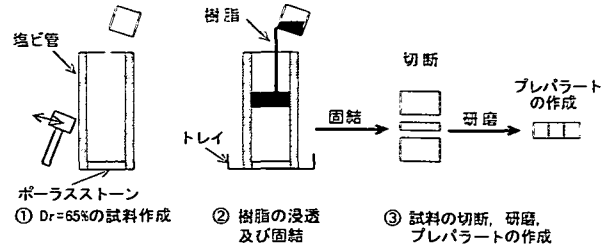


図-6 プレパラートの作成方法

また、本研究の結果では細粒分含有率が5%の際に液状化強度が最も大きくなる結果が得られたが、これは、戸張ら⁷⁾がDLクレイと豊浦砂の混合材料の $Dr=45\%$ の供試体による試験結果を行って報告している、細粒分含有率が6%の時に液状化強度が最大となった試験結果とほぼ同様の結果となっており、少なくとも、相対密度が45%~65%程度の範囲では、5~6%の細粒分含有率の時に最も大きな液状化強度を發揮するものと思われる。なお、前述の黄ら⁶⁾の結果には5%程度の含有率の試験結果が示されていないため、黄らの研究で用いた材料においても同様の結果になるかどうかについては定かではない。

(3) 静的三軸圧縮($\bar{C}U$)試験結果

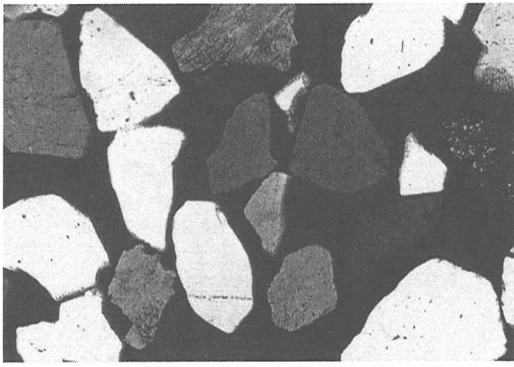
三軸試験による液状化試験と同様の方法で作成した細粒分含有率の異なる $Dr=65\%$ の供試体を用いて、拘束圧 1.0 kgf/cm^2 の条件で静的三軸圧縮($\bar{C}U$)試験を実施した。この試験結果による有効応力経路を図-5に示す。

同図によると、細粒分含有率が0%、5%、10%の供試体は、正のダイレイタンスを示す傾向が強いのに対して、細粒分含有率がそれ以上増加すると次第に負のダイレイタンスを示す傾向が強くなっており、液状化試験結果による細粒分含有率と液状化強度の関係とほぼ整合した結果となっている。

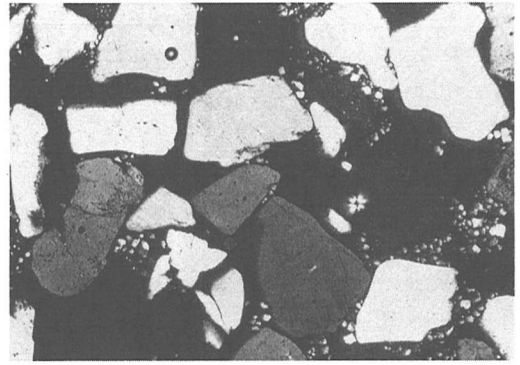
液状化試験において最も小さな液状化強度を示した細粒分含有率40%の過剰間隙水圧は、せん断の過程で終始正となっており、有効応力経路は载荷に伴って原点に向かっている。

(4) 試験結果の考察

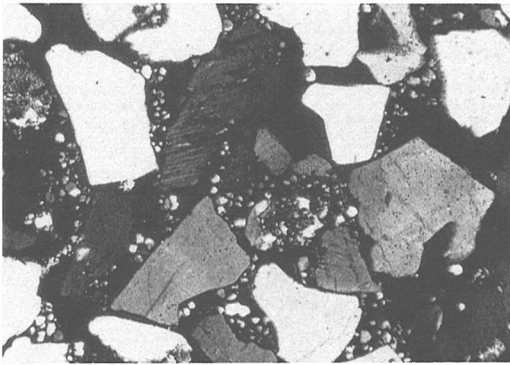
上記のように、細粒分含有率の増加に伴って $Dr=65\%$ の供試体の乾燥密度が増加するにもかかわらず、負のダイレイタンスを示す傾向が強くなり、液状化強度が急激に低下する現象について考えるため、まず粒子骨格の状態を顕微鏡で調べた。



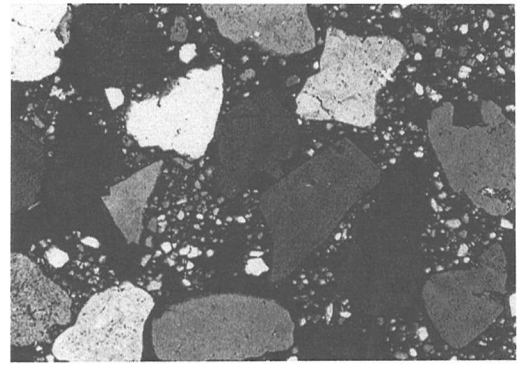
(a) 細粒分含有率 0%



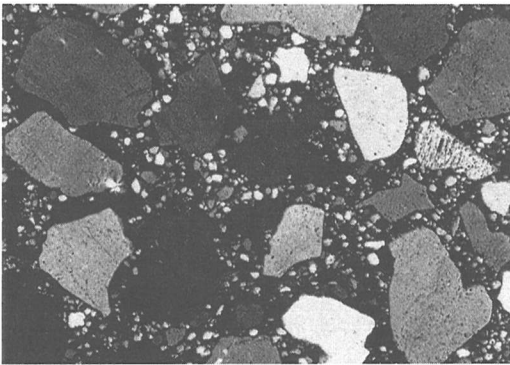
(b) 細粒分含有率 5%



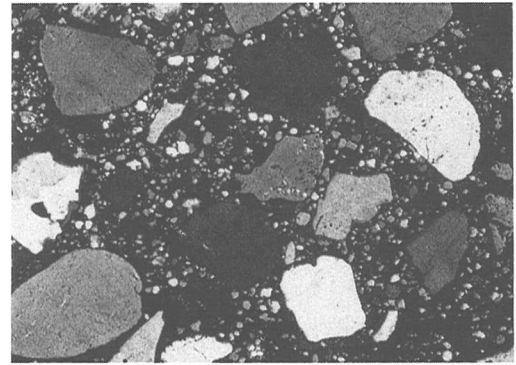
(c) 細粒分含有率 10%



(d) 細粒分含有率 20%

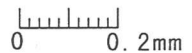


(e) 細粒分含有率 30%



(f) 細粒分含有率 40%

写真-3 細粒分を混入させた豊浦砂の顕微鏡写真



顕微鏡写真撮影のためのプレパラートの作成方法を図-6に示す。この図に示すように、プレパラートの作成は、

①塩パイプの底面にポーラスストーンを固定したモールドを作成し、豊浦砂とDLクレイを粒度配合した乾燥試料を $Dr=65\%$ に対応する所定の密度となるよ

うに詰める。

②モールド上部に無色透明の樹脂を少しずつ流し込み試料内に浸透させる。

③固化した試料をモールドから取り出し、切断、研磨して薄片を作成し、薄片からプレパラートを作成する。

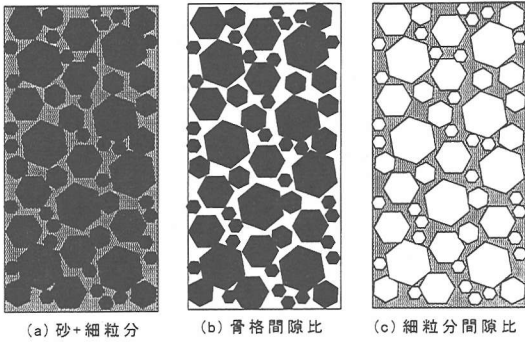


図-7 骨格間隙比と細粒分間隙比の概念

という手順で行った。

作成したプレパラートの顕微鏡写真を写真-3に示す。これらの写真から分かることを列挙すると以下の通りである。

(a) 細粒分含有率が5%の場合は、細粒分は砂の粒子の間に局所的に存在しており、砂の粒子同士の接点の近傍に集まっているものや、砂粒子に囲まれた狭い空隙に入り込んでいるものが見られる。

(b) 細粒分含有率が10%の場合は、砂粒子の空隙のかなりの部分に細粒分が入り込んでいるが、まだ細粒分の入り込んでいない部分も見られる。また、この含有率までは、砂の粒子同士は多くの接点を持っており、砂粒子同士の接点の数は含有率が0%の場合とそれほど差はないように見受けられる。

(c) 細粒分含有率が20%になると、砂粒子間の空隙にはほぼ一様に細粒分が入り込んでいる。また、砂粒子同士が直接接する点の数は少なくなってくる。

(d) 細粒分含有率が30%、40%と多くなるにつれて、砂粒子同士の間隔は次第に離れ、砂粒子が細粒分の中に浮いているような状況になってくる。

このような細粒分含有率の増加に伴う砂粒子の間隙の状況について見る目的で、図-7(b)に示すような、砂のみに着目し細粒分と空隙部分を間隙と見なした「骨格間隙比」¹⁰⁾を求め、細粒分含有率との関係を調べた。この結果を図-8に示す。図-8によると、砂の骨格間隙比は含有率の増大に伴って増加し、 $Dr=65\%$ の供試体は、細粒分含有率が20%の時に細粒分含有率が0%の最大間隙比とほぼ同じ値となっている。

このように、相対密度を指標とし、 $Dr=65\%$ で一定とした供試体では、細粒分含有率の増大に伴って細粒分が砂の骨格の間隙を埋め、乾燥密度は増大するが、細粒分含有率が10%程度以上になると次第に砂の粒子同士が連続して接触することが少なくなる。また、細粒分含有率20%の骨格間隙比はほぼ細粒分含有率0%の最大間隙比に相当することから、それ以上の

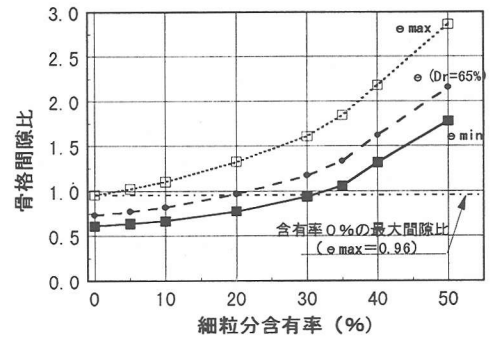


図-8 細粒分含有率と骨格間隙比の関係

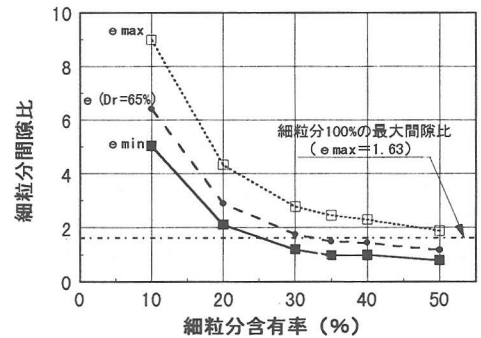


図-9 細粒分含有率と細粒分間隙比の関係

含有率では砂の粒子が細粒分中に浮いたような状態となって、供試体の強度は砂粒子の間隙を埋める細粒分に支配されるてくるものと思われる。

そこで次に、図-7(c)に示すような、砂の体積および重量を無視し、細粒分のみの間隙比を計算した「細粒分間隙比」について調べた。ただしこの時、写真-3から、砂骨格の間隙に細粒分が入り込んでいない空隙部分がおおく存在する5%の細粒分含有率については、このような整理をする事は意味がないと判断し、細粒分含有率が10%以上の場合について整理した。この結果を図-9に示す。図-9によると、細粒分間隙比は細粒分含有率20%~30%の間で大きく低下している。また細粒分含有率が30%~40%の間は間隙比が若干低下するもののほぼ一定の値となっており、この時の $Dr=65\%$ の供試体の細粒分間隙比は、細粒分100%の試料の最大間隙比にほぼ匹敵する値となっている。含有率が40%~100%の範囲では間隙比はさらに若干低下する。

このように、図-8および図-9から、細粒分含有率が20%程度~40%程度の間は、砂の骨格間隙比、細粒分間隙比とも、それぞれの単独の試料の最大間隙比と同程度以上となっており、非常に緩い状態にあるものと思われる。したがって、この範囲の細粒分含

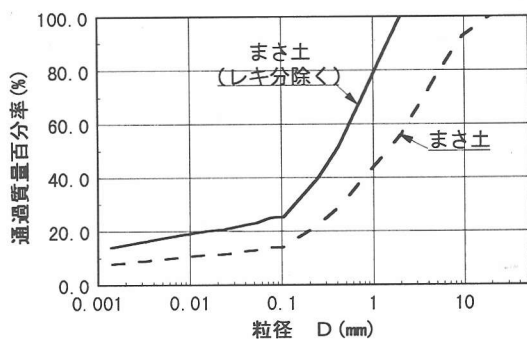


図-10 まさ土の粒径加積曲線

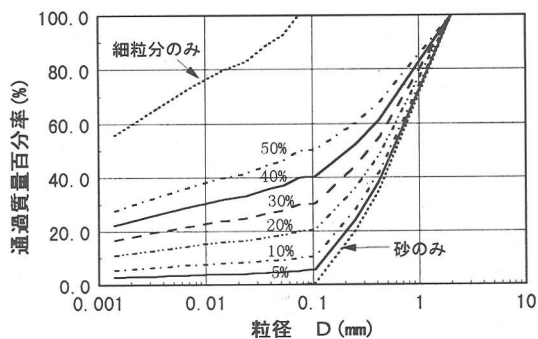


図-11 細粒分含有率ごとの粒径加積曲線

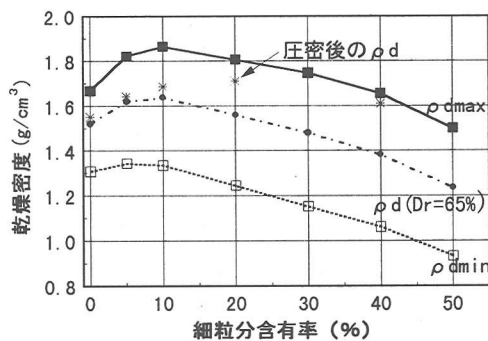


図-12 細粒分含有率と最大、最小乾燥密度および相対密度 $D_r=65\%$ の乾燥密度の関係

有率においては、相対密度を同程度とした場合に乾燥密度が非常に大きくなるにも関わらず、細粒分を含まない材料に比べて極端に小さな液状化強度となってしまうものと思われる。

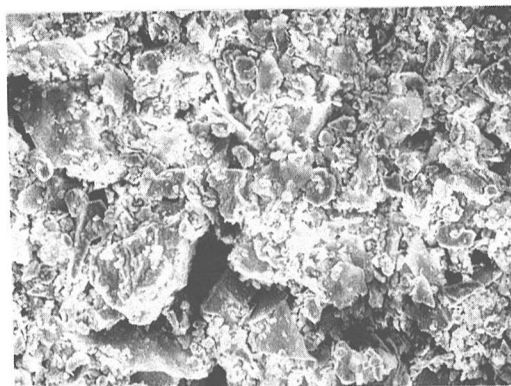
3. まさ土を用いた検討

(1) 相対密度試験結果

ポートアイランドから採取したまさ土の粒径加積曲線を図-10に破線で示す。この試料の土粒子の密度



(a) 自然乾燥状態でふるい分けした場合



(b) 水中で水洗いしながらふるい分けした場合



写真-4 まさ土の細粒分の電子顕微鏡写真

は $\rho_s=2.66\text{g/cm}^3$ であり、豊浦砂とはほぼ同じ値であった。図-10に示したように、入手したまさ土には礫分が約45%含まれていたが、室内試験の供試体の大きさを勘案し、粒径が2mm以上の礫をまずふるい分けにより取り除いて図-10中に実線で示すような材料とした。次にこの材料を75 μm のふるいを用いて細粒分と砂分に分離した。

細粒分と砂分を分離する際に、自然乾燥状態のままふるい分けした場合と、水中で水洗いしながらふるい分けした場合の細粒分の電子顕微鏡写真を写真-4に示す。この写真から、自然乾燥状態の材料をふるい分けした場合には、細粒分に扁平な粘土鉱物がほとんど含まれないが、水洗いしてふるい分けした細粒分には粘土鉱物が多く混入することが分かった。これは、粘土鉱物が砂粒子の表面に付着しており、自然乾燥状態のふるい分けでは粘土鉱物が砂粒子から分離しないためと考えられる。そこでこの研究では、水中で水洗いしながらふるい分けを行った材料を用いることとし、この方法によって分離した

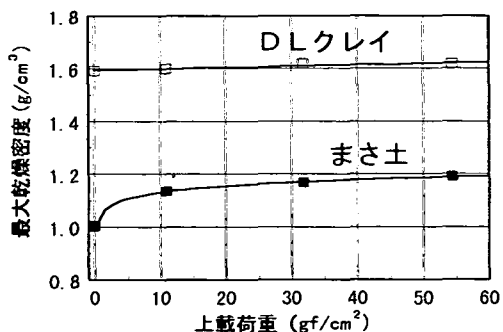


図-13 上載荷重と細粒分の最大乾燥密度の関係

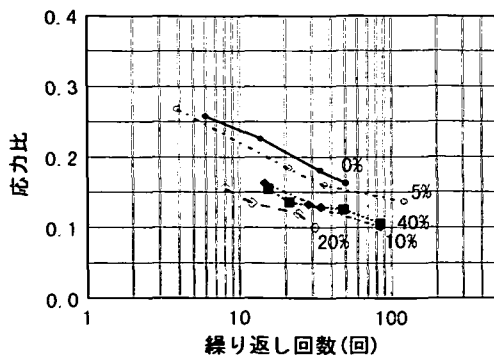


図-14 繰返しせん断応力比と液状化を生じる繰返し回数の関係 (まさ土, 軸ひずみ両振幅5%)

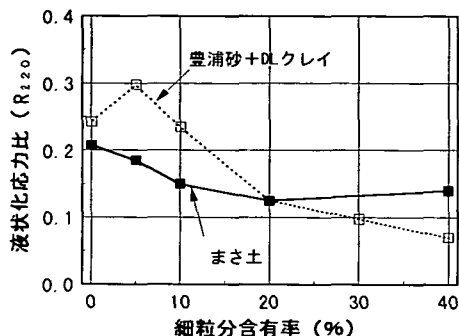


図-15 繰返し回数20回の液状化応力比 (R_{120}) と細粒分含有率の関係 (まさ土)

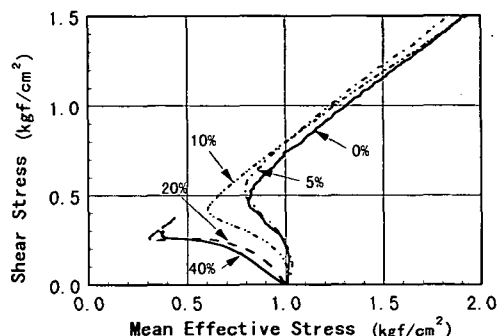


図-16 静的三軸圧縮(CU)試験による有効応力経路 (まさ土, $\sigma'_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

細粒分に対して液性限界と塑性限界試験を行ったところ、液性限界は $w_L = 26.2\%$ 、塑性限界は $w_P = 17.6\%$ となり、塑性指数は $I_P = 8.6$ であった。

このようにして分離した砂分と細粒分を炉乾燥させ、再度両者を混合し、細粒分含有率を変化させながら相対密度試験を行った。細粒分含有率ごとの粒径加積曲線を図-11に示す。また、細粒分含有率と最大乾燥密度、最小乾燥密度および相対密度65%に相当する乾燥密度の関係を図-12に示す。これらの図を見ると、最大乾燥密度および相対密度65%の試料の乾燥密度は細粒分含有率が10%のときに、また最小乾燥密度は5%のときにそれぞれ最大値を示す結果となっており、豊浦砂とDLクレイの混合供試体の乾燥密度が最大となった30%~40%の細粒分含有率に比べて低い細粒分含有率で乾燥密度が最大となっている。

まさ土の細粒分のみでの最大乾燥密度について調べるために実施した最大乾燥密度試験の結果を図-13に示す。この試験は、通常の方法で行っているが、モールドをハンマーでたたき際に試料の上に重りを乗せ、この重りの重量を変えて最大乾燥密度を測定している。

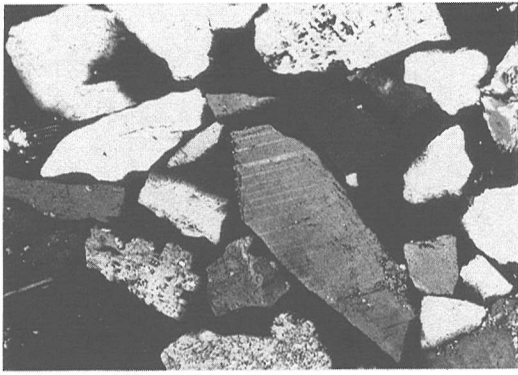
図-13中に併記したDLクレイを用いた同様の試験結

果と比較すると、非塑性で粒子形状が粒状であるDLクレイでは上載荷重による最大乾燥密度の変化が小さいのに対して、まさ土の細粒分では、特に上載圧が0~10gf/cm²の間で乾燥密度が大きく変化しており、それ以上の上載圧においても乾燥密度の増加量はDLクレイよりも大きいことが分かる。これは、前述の通り、まさ土の細粒分が完全な非塑性材料ではなく、9程度ではあるが若干の塑性指数を發揮する程度の扁平な形状の粘土鉱物を含んでいるためと考えられる。

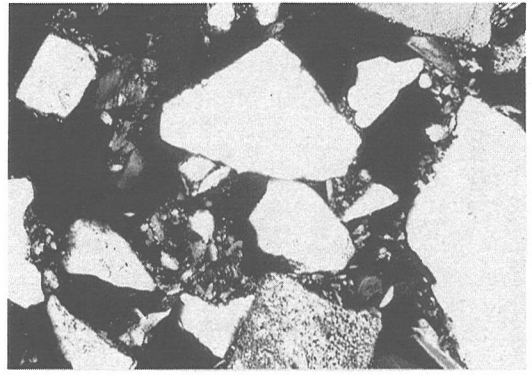
(2) 液状化試験結果

細粒分含有率が0%、5%、10%、20%および40%の相対密度65%の供試体を作成し、非排水繰返し三軸試験(供試体の直径:5cm, 高さ:10cm)による液状化試験を実施した¹²⁾。なお、供試体は、豊浦砂とDLクレイを用いた試験と全く同様の方法で作成した。

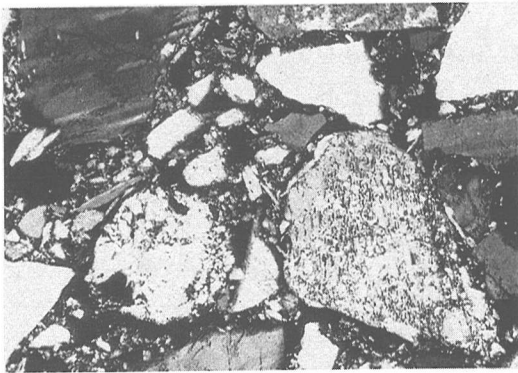
この試験結果による繰返しせん断応力比と液状化を生じる繰返し回数(軸ひずみ両振幅が5%に達したときの繰返し回数とした)の関係を図-14に示す。また、図-14から読みとった繰返し回数20回の際の液状化応力比(R_{120})と細粒分含有率の関係を図-15に示す。



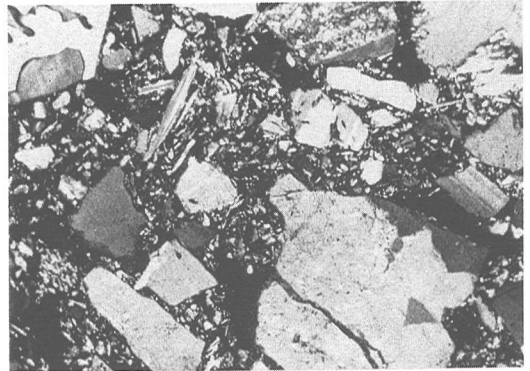
(a) 細粒分含有率 0%



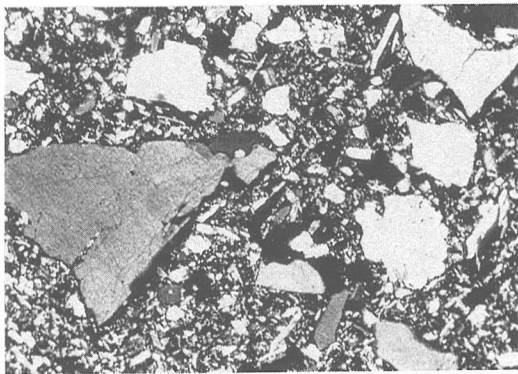
(b) 細粒分含有率 5%



(c) 細粒分含有率 10%



(d) 細粒分含有率 20%



(e) 細粒分含有率 40%

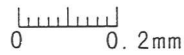


写真-5 細粒分含有率ごとのまさ土の顕微鏡写真

同図に示すように、液状化強度は細粒分含有率が0%~10%の間で急激に低下している。図-12に示したように、 $Dr=65\%$ では細粒分含有率10%の供試体の乾燥密度が最も大きくなるにも係わらず、この時の液状化強度は細粒分含有率0%の試料の約75%程度の値となっている。細粒分含有率が10%~20%の間で液状化強

度はさらに若干低下し、試験を実施した中では細粒分含有率が20%のものが最低の強度を示している。細粒分含有率が40%の場合の液状化強度は20%の場合よりも大きく10%の場合とほぼ同じ強度となっている。

以上のように、まさ土を用いて初期の相対密度を65%とした液状化試験を行った場合についても、豊浦

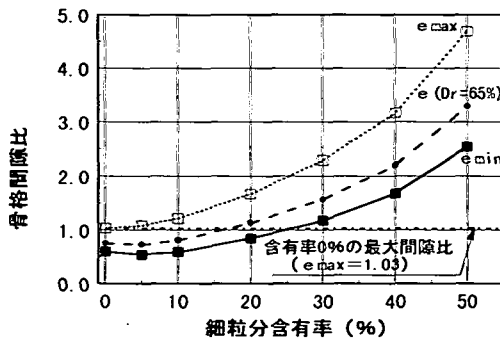


図-17 細粒分含有率と骨格間隙比の関係 (まさ土)

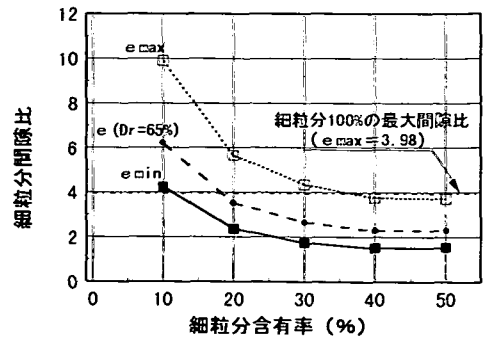


図-18 細粒分含有率と細粒分間隙比の関係 (まさ土)

砂とDLクレイの混合試料を用いた試験結果と同様に、細粒分の混入により液状化強度が低下する結果が得られた。しかし、豊浦砂とDLクレイの混合試料では、細粒分含有率が20%~40%の間は、細粒分含有率の増加に伴い液状化強度が低下する傾向を示したのに対して、まさ土の場合は細粒分含有率が20%程度で液状化強度が最低値を示し、さらに細粒分含有率が増加すると液状化強度が若干増加する結果となった。また、豊浦砂とDLクレイの混合試料では、砂100%の試料の30%程度まで液状化強度が低下するのに対して、まさ土の場合は60%程度までしか低下しない結果となった。さらに、豊浦砂とDLクレイの混合材料の場合、細粒分含有率が5%程度で液状化強度が増大する現象が見られたが、まさ土を用いた試験を実施した細粒分含有率の範囲の中では、このような特異な点は見られなかった。

(3) 静的三軸圧縮(CU)試験結果

液状化試験と同様の方法で作成したDr=65%の供試体を用いて、拘束圧1.0kgf/cm²の条件で静的三軸圧縮(CU)試験を実施した。試験結果による有効応力経路を図-16に示す。

同図によると、細粒分含有率が0%および5%の有効応力経路には大差はなく、10%、20%と増加するにつれて負のダイレイタンスを示す傾向が強くなっている。細粒分含有率が40%のケースは、せん断の初期の段階における過剰間隙水圧の増加が大きいものの、破壊線近傍の有効応力経路の位置は含有率20%のケースと大差はない。

このように、静的三軸圧縮(CU)試験による有効応力経路の傾向は、液状化強度の大小関係とほぼ対応する結果となっている。ただし、細粒分含有率が40%の時の液状化強度が10%の時の液状化強度とほぼ同様の値となり、20%の時の液状化強度よりも大きくな

る点は静的三軸圧縮(CU)試験による有効応力経路の傾向と整合していない。

図-16を図-5と比較すると、まさ土における細粒分含有率の変化に伴う有効応力経路の変化は、豊浦砂とDLクレイの混合材料の場合ほど大きくなっておらず、この点も図-4および図-15に見られる細粒分の増加に伴う液状化強度の変化の傾向と整合がとれた結果となっている。

(4) 試験結果の考察

ここで、まさ土の相対密度試験結果に対しても2.(4)と同様に、粒子骨格の状態を顕微鏡で調べ、砂の「骨格間隙比」と砂の体積を除いた部分の体積を基に計算した「細粒分間隙比」について整理してみた。まさ土の混合試料の顕微鏡写真を写真-5に示す。また、細粒分含有率と骨格間隙比および細粒分間隙比の関係をそれぞれ図-17および図-18に示す。

図-17を見ると、Dr=65%の供試体の砂の骨格間隙比は細粒分含有率の増大に伴って増加しており、細粒分含有率が17%~18%の時に細粒分含有率0%の供試体の最大間隙比とほぼ同じ値となる。従ってこの付近よりも細粒分含有率が多くなると次第に砂の粒径を有する粒子同士が連続して接触することが少なくなり、供試体の強度は次第に砂粒子の間隙を埋める細粒分に支配されてくるものと思われる。一方、図-18を見ると、17%~18%程度の細粒分含有率の時にDr=65%の供試体の細粒分間隙比は細粒分100%の最大間隙比にまで減少しており、細粒分含有率が30%程度までの間に間隙比はさらに低下している。

すなわち、豊浦砂とDLクレイの混合材料では、細粒分含有率が20%~40%の間の砂の骨格間隙比は砂の最大間隙比よりも大きく、かつ、細粒分間隙比が細粒分100%の最大間隙比程度となり、この細粒分含有率の範囲は全体が非常に緩い状態であったのに対し

て、まさ土の供試体は、細粒分含有率が17%~18%程度となる時に、砂の骨格間隙比および細粒分間隙比の両方がともにそれぞれの最大間隙比と等しくなるだけで、それ以外の細粒分含有率の範囲では、骨格間隙比か細粒分間隙比のどちらかはそれぞれの最大間隙比より小さな値となっている。

一方、細粒分100%の最大間隙比に着目すると、DLクレイは $e_{max}=1.63$ であるのに対してまさ土の細粒分は $e_{max}=3.98$ と非常に大きい値となっており、これが、 $D_r=65\%$ の供試体の細粒分間隙比が、比較的少ない細粒分含有率で細粒分100%の最大間隙比に達する原因となっている。これは主に、まさ土の細粒分には、 $I_p=9$ 程度の塑性指数を発揮する程度ではあるが、扁平な粘土鉱物を含んでいるためではないかと思われる。

以上のような材料の違いによる骨格間隙比と細粒分間隙比の特性の違いが、最小の液状化強度を示す細粒分含有率の違いや液状化強度の低下率の違いの大きな原因となっているものと推測される。

4. まとめ

本研究では、豊浦砂と非塑性の細粒分であるDLクレイの混合材料、およびまさ土の砂分と細粒分を一旦分離した後に粒度調整した材料を用いて初期の相対密度が65%の供試体を乾燥打撃法により作成し、相対密度試験、液状化試験、静的三軸圧縮($\bar{C}U$)試験等を実施して、細粒分が埋立地盤の液状化強度に及ぼす影響に関する基本的な検討を実施した。この検討から得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 細粒分含有率の増加および乾燥密度の増加は、両者とも液状化強度の増加につながるという考えが一般的な概念であるが、非塑性の細粒分を用い、初期の相対密度を65%として行った今回の試験結果は液状化強度が激減する結果となった。
- 2) ポートアイランドのまさ土を粒度調整した材料を用いた液状化試験結果からも、細粒分含有率の増加および乾燥密度の増加にもかかわらず、液状化強度が減少する結果が得られた。したがって、実際の埋立地盤においてもこのような現象が生じることが十分に考えられる。
- 3) 細粒分含有率の増加に伴う液状化強度の減少は、静的三軸圧縮($\bar{C}U$)試験の有効応力経路に見られるダイレイタンシー特性の傾向とほぼ整合しており、負のダイレイタンシーを強く示す材料ほど液状化強度が小さくなる。
- 4) 相対密度を一定とした場合に液状化強度が最も小さくなる細粒分含有率は材料によって異なり、この細粒分含有率または細粒分含有率の範囲は、砂の

「骨格間隙比」および「細粒分間隙比」を調べることによってほぼ推測できる。すなわち、これらの間隙比が両方ともそれぞれの単独の材料の最大間隙比よりも大きくなるような範囲では液状化強度は大きく低下し、その範囲が広いほど液状化強度の低下率は大きくなるものと思われる。

5) 上記の4)の特性は、今回の試験結果では、主に塑性指数、扁平な粒子の存在等の細粒分の性質の違いによるものと推測される。

以上の検討結果を踏まえ、今後の埋立地盤の液状化特性に関する検討課題として以下のような点が挙げられる。

- 1) 細粒分を含む埋立地盤の液状化強度を評価するために有効な指標の統一と、それらの指標を用いた液状化強度の評価手法の体系化。すなわち、細粒分含有率、相対密度、骨格間隙比、砂の性質(粒度、粒子形状等)、細粒分の性質(粘土分と細粒分の比率、塑性指数等)等に注目して行われた既往の研究結果の整理とこれらを統合した細粒分を含む埋立地盤の液状化強度推定式の検討。
- 2) N 値やコーン貫入試験結果等の原位置試験で得られる指標と1)の推定式の対応についての検討。
- 3) 埋立地盤の施工管理に適した指標とそれを用いた管理基準の設定方法の確立。

謝辞：本研究の実施に当たり、まさ土を大成建設(株)技術研究所の川崎宏二氏に、まさ土のブロック試料を基礎地盤コンサルタンツ(株)の池端讓氏に提供していただきました。室内試験は埼玉大学土質研究室の柴田昌則氏(現住友建設(株))、小林邦宏技官に担当していただきました。また、細粒分の電子顕微鏡写真は(株)ダイヤコンサルタントの友田雅展氏、坂上麻子氏にお願いしました。ここに心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柳沢栄司、森伸一郎：1989年ロマブリエタ地震における液状化現象について、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ、pp.690-691、1990。
- 2) 稲富隆昌 他：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告、港湾技研資料、No.791、pp.75-194、1994。
- 3) 石原研而、安田 進、原田健二：阪神・淡路大震災特集—第4回—土質特性と地盤の挙動、土木学会誌、Vol.80-7、pp.50-53、1995。
- 4) 三笠正人：阪神・淡路大震災におけるポートアイランドの液状化被害について、大阪国際サイエンスクラブ会報、167号 pp.40-45、1995。
- 5) 古関潤一、石原研而、藤井光久：細粒分を含む砂の三軸液状化試験、第21回土質工学研究発表会講演集、pp.595-596、1986。
- 6) 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.
- 7) 戸張聖久, 小西純一, 松村英彰: 砂の液状化強度に及ぼす細粒分の影響, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp. 727-728, 1994.
- 8) 佐藤正行, 小瀬木克己, 嶋田昌義, 藤谷昌弘: 埋立地盤を想定したシルト質砂調整試料の液状化強度について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ, pp. 502-503, 1995.
- 9) 足立雅樹, 安原一哉: 細粒分を含む砂質土の液状化特性(2) - 過圧密比および細粒分の種類の検討, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ, pp. 500-501, 1995.
- 10) 桑野二郎, 飯村博忠, 中沢博志, 杉原弘一: カオリンを含む砂の液状化強度, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ, pp. 506-507, 1995.
- 11) 小瀬木克己, 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 柴田昌則: 埋立地盤の液状化特性に及ぼす細粒分の影響(その1), 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 973-974, 1996.
- 12) 佐藤正行, 小瀬木克己, 小田匡寛, 風間秀彦, 柴田昌則: 埋立地盤の液状化特性に及ぼす細粒分の影響(その2), 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 975-976, 1996.

(1996.7.1受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF FINES ON LIQUEFACTION STRENGTH OF RECLAIMED GROUND

Masayuki SATO, Masanobu ODA, Hidehiko KAZAMA and Katsumi OZEKI

In order to study the effect of fines on the liquefaction strength of reclaimed ground, laboratory tests, including triaxial and torsional dynamic tests and triaxial undrained static tests, were carried out using Toyoura sand mixed with non-plastic silt at various percentages, as well as decomposed granite soil sampled from Port-island in Kobe-city which had been liquefied during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. Even though samples were all compacted up to 65% relative density, mixing of fines caused the general loss of liquefaction strength in spite of the increase of dry density. The reason for this was discussed in terms of individual void ratios by coarse and fine grains, and was examined by observing carefully the microstructure by means of thin sections and a microscope.