

シルトを含む砂のせん断特性について

黄 大振*・柳沢栄司**・菅野高弘***

本研究では、シルトを含む砂の液状化強度及びせん断特性を調べるために、非排水繰返し単純せん断試験及び繰返し三軸試験を行った。その結果、シルトを含む砂の液状化強度は、相対密度一定の条件ではシルト含有率30%で最小となることが判明した。この差はシルト分含有量によるダイレイタンス特性の差にその原因があると判断し、シルトを含む砂の静的三軸圧縮試験も行った。その結果、液状化強度特性は排水および非排水せん断特性とよい対応関係にあり、応力-ダイレイタンス関係の傾きを表す λ 値と液状化強度との間に強い相関があることが判明した。

Keywords: *liquefaction, silt content, cyclic shear test, stress dilatancy*

1. まえがき

1987年千葉県東方沖地震では東京湾内沿いの埋立地盤および人工島などで液状化が発生¹⁾し、ウォーターフロント開発における災害との関連で注目をあびた。また、最近発生したロマブリエタ地震(1989)においてもサンフランシスコ湾岸の埋立地盤における液状化現象が顕著であり、噴砂の特性からきれいな砂地盤ばかりでなく細粒分を含む砂地盤での液状化についても詳細な検討が必要であることが示された²⁾。

このような液状化した地盤に含まれている細粒分は一般には粘土も含むため、細粒分を含む砂の動的強度特性は砂の粒状体の性質に粘性土の粘着力成分が加えられてきれいな砂のように簡単に評価しにくくなる。細粒分を含む砂の動的強さに関してはこれまでもかなりの研究が行われ、ある程度の知見が得られている。石原ら³⁾は30回の繰返しで液状化が生ずる応力比を液状化強度とした時の細粒分含有率の影響を調べ、その結果、細粒分が多いほど液状化強度は増加し、過圧密比による液状化強度の増加幅も細粒分が多いほど大きくなることを示している。また草野ら⁴⁾は細粒分を含む不擾乱試料に対して繰返し三軸試験を行い、細粒分を多く含んだ砂質土が N 値が小さいにもかかわらず液状化強度は大きくなる傾向があることを示している。細粒分の含有量が増えると液状化強度が大きくなる理由は粘土の粘着力成分に起因すると言われており、粘土の含有量やその活性度などが液状化強度に影響するものと考えられている。しかし、一般には細粒分にしめるシルトの割合も大きいので、細粒分のうち粘性のある粘土と比粘性のシルトを区別し

た方がよいと考えられる。ここでは細粒分を含む砂の液状化強度に関する研究の第一段階として粘土とシルトを分離した人工的な試料を作成し、低塑性または非塑性のシルトを含む砂について動的強度特性を調べることにした。

本研究ではシルト分の含有量が液状化強度特性に及ぼす影響を調べるために繰返し単純せん断試験装置及び繰返し三軸せん断試験装置を用いて液状化強度試験を行った。資料としては粒径 $74\mu\text{m}$ 以下の細粒分から粒子の沈降速度を利用してシルト分だけを採取し、砂とシルトを混合した時の液状化強度の変化を調べた。その結果、シルトの含有量によって液状化強度が変化することが判明したが、この液状化強度の違いの原因を粒子間のダイレイタンスにあると判断し、各試料のダイレイタンスによる抵抗力を調べるために排水、非排水条件での静的三軸圧縮試験を平均主応力一定の条件で行い、シルトを含む試料の静的せん断特性と液状化強度との関連性を検討した。

2. 液状化試験

(1) 実験装置

液状化試験ではNGI型単純せん断試験装置と繰返し三軸試験装置を用いて非排水繰返しせん断試験を行った。液状化試験に単純せん断試験装置を利用したのはより実地盤に近い状態を再現するためである。供試体は高さ3cm、直径7cmで応力状態は側方ひずみが拘束される平面ひずみ状態である。単純せん断試験は K_0 圧密するのが普通であるが、NGI型単純せん断試験装置の場合は K_0 値が未知であることと液状化した時点での応力状態が不均一⁵⁾であることを考慮し、この試験では等方圧密状態で行った。実験装置は空気圧制御方式で、試験時のアナログ信号はデジタル信号に変換しレコーダを用いて記録する方式を採用した。また、実験装置の応力状

*正会員 工博 三星綜合建設株式会社技術研究所 前任研究員 (韓国 SEOUL 特別市中区西小門洞 58-9 中央 B/D)

**正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

***正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科

表-1 試料の物理的諸量

試料	D50(mm)	Gs	$\gamma(kg/cm^3)$	塑性指数	e max	e min	e 50
SAND	0.21	2.643	1.51-1.52	NP	0.9567	0.5772	0.767
SILT10%	0.19	2.64	1.53-1.55	NP	0.9393	0.5227	0.731
SILT30%	0.17	2.642	1.55-1.59	NP	0.9061	0.4381	0.672
SILT50%	0.074	2.643	1.54-1.55	NP	0.9973	0.4796	0.737
SILT70%	0.012	2.643	1.52-1.54	NP	1.1962	0.5775	0.887
SILT100%	0.009	2.644	1.52-1.53	NP	1.5209	0.7445	1.133

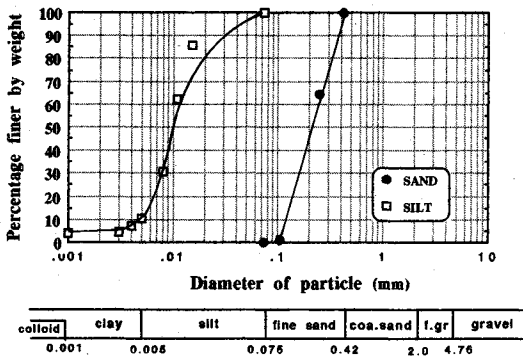


図-1 砂とシルトの粒径加積曲線

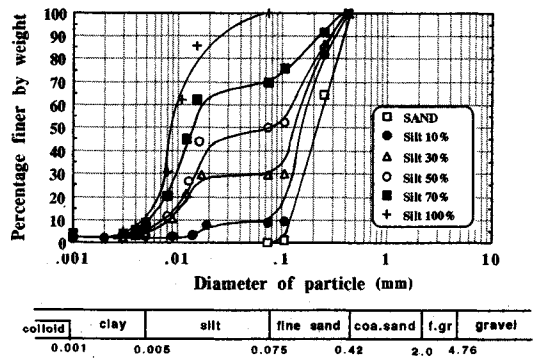


図-2 各試料の粒径加積曲線

態に起因した強度の違いを調べるため、繰返し三軸試験も行った。使用した供試体は高さ 12.5 cm、直径 5 cm の標準寸法である。

一方、単調載荷平均主応力一定の三軸圧縮試験では標準寸法の供試体を使用し、応力経路は応力回路内に比例調整弁及びコンピューティングリレーを組み込むことによって種々の応力経路を一つのハンドルで設定することのできるものとした。これにより載荷誤差を減らすことができた。

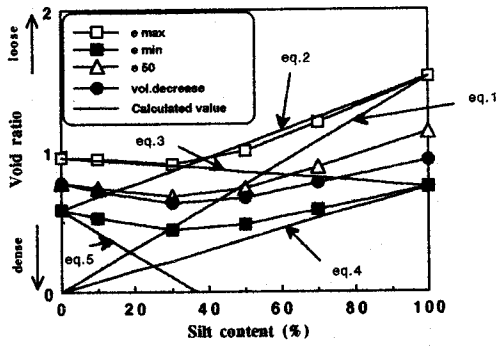
(2) 試験試料

試料は豊浦標準砂製造の際にできた細粒分の中からシルト分だけを取り出し、豊浦標準砂と混ぜて砂とシルトの混合試料として使用した。表-1 に試料の物理的諸量を示した。ここで e_{50} は相対密度 50% の間隙比である。本実験に使ったシルトは前にも述べたように豊浦標準砂製造の時できた細粒分から粘土分を除去したものでありシルト分の構成鉱物あるいは比重などが豊浦標準砂とよく一致しており、砂とシルトの平均粒径の違いはおよそ 20 倍位であった。砂と細粒分の分離は 75 μm のふるいによって簡単に行えるが、細粒分の中でのシルトと粘土の分離はかなり難しい作業である。そのため本研究では第一段階として水洗いを三回繰返し、ある程度粘土分を除去した後、第二段階として Stokes 法則の沈降速度を利用して粘土分含有率 5% 以下になるまで除去し

た。図-1 に豊浦標準砂と採取されたシルトの粒径加積曲線を示す。シルトの粒径加積曲線は 60% 以上が 0.01 mm より小さいことからシルトの範囲の中では小さめに属することがわかる。実験に用いた試料の粒径加積曲線を図-2 に表した。試料は人工的に混合したものであり、あまりなめらかな形ではないがシルト含有量は意図した通りになっていることがわかる。液状化強度は密度に大きく影響するものであり、各試料に対して同じ密度に合わせるの重要なことである。表-1 には各試料の最大間隙比と最小間隙比も示しているが各試料ごとにかなり差があることがわかる。これらの値は土質工学会基準に基づいて求めたものであり、基準では粒径 75 μm 以下の細粒分が 5% 以下の試料に限定しているが、ここで使われた細粒分は粘着力のないシルトであり、代わるべき適切な方法もないので、同じ方法で求めた値をそのまま使った。また各試料の塑性指数を求めるためにコンシステンシー限界試験を行ったが、求めることはできず塑性指数はすべて非塑性 (NP) となった。

(3) 細粒分を含む砂の密度

砂の密度を表すパラメータとしては間隙比 e 、相対密度 D_r 、余裕間隙比などが多く使われている。液状化強度試験の場合は相対密度をパラメータとして密度を一定にするのが一般的である。これはゆるい砂では相対密度と液状化抵抗の関係がほぼ直線的に比例すること⁹⁾に基



図—3 各試料の間隙比

づいているためである。

細粒分を含む砂の場合、原地盤においては細粒分が多くなると間隙比が大きくなる傾向が認められる。図—3に本実験に利用したシルト分を含む各試料の最大間隙比、最小間隙比、相対密度50%の間隙比 e_{50} と余裕間隙比 $e_{vol. decrease} (= e - e_{min})$ をそれぞれ示した。ここで余裕間隙比 (vol. decrease potential) は $e - e_{min}$ で定義され、ここで e は現在の間隙比、 e_{min} は最小間隙比としてきれいな砂の $e_{50} - e_{min}$ の値と同じ volume decrease potential を持つ間隙比をいう。図からわかるように、各試料の間隙比を一定にするとシルト含有率30%の試料は相対的に緩い状態になり、シルト100%の試料は密な状態になる。このようなことは次のような理論に根拠する。

最密あるいは最緩に詰められた状態のシルトに最密あるいは最緩状態の砂が混入した場合、あるいはその逆を考えることにより、砂とシルトの最大・最小間隙比からシルトを含む砂の間隙比を推定することができる。

砂およびシルトの最大および最小間隙比をそれぞれ $(e_{max})_{sand}$ 、 $(e_{max})_{silt}$ 及び $(e_{min})_{sand}$ 、 $(e_{min})_{silt}$ と書けば、緩いシルトに $p\%$ の砂粒子が間隙を持たない状態で混入したとすると、全体の間隙比 e_p は、

$$e_p = \left(1 - \frac{p_{sand}}{100}\right) \cdot (e_{max})_{silt} \dots\dots\dots (1)$$

となり、最密構造を有する砂が混入した場合の e_p は

$$e_p = \frac{p_{sand}}{100} \cdot (e_{min})_{sand} + \left(1 - \frac{p_{sand}}{100}\right) \cdot (e_{max})_{silt} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

また、もっとも緩い砂の間隙に最密状態の間隙を有するシルトが $p\%$ 加えられたと仮定すると次の計算が成立する。

$$e_p = (e_{max})_{sand} + \left((e_{min})_{silt} - (e_{max})_{sand}\right) \cdot \frac{p_{silt}}{100} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

一方、最密状態のシルトに間隙を持たない砂の粒子が $p\%$ 加えられた場合は次のようになる。

$$e_p = \left(1 - \frac{p_{sand}}{100}\right) \cdot (e_{min})_{silt} \dots\dots\dots (4)$$

それに対して、最も密に詰められている砂に間隙を持たないシルト粒子が $p\%$ 加えられた場合は次式になる。

$$e_p = \left(1 - \frac{p_{silt}}{100}\right) \cdot (e_{min})_{sand} \dots\dots\dots (5)$$

上記の式を用いてシルト含有量の変化に伴う間隙比の変化を求め、図—3に示すように実験結果と比較したところ、最大間隙比の場合は式(2)と式(3)の交点約32%が最小値になり、最小間隙比の場合は式(4)と式(5)の交点約42%が最小値になることが確かめられる。実験値では密な状態では混合率30%のところでもっとも密になるが、計算上では約40%で最小値をとるなど実験値とかなりよく符合した。緩い状態では最密構造を有する砂粒子が混入したと仮定した方式(2)が砂粒子が間隙を持たない状態で混入したと仮定した場合よりもより実験値に近い結果が得られている。したがって、シルトのような非塑性な細粒分を含んだ砂は、砂およびシルトの最大・最小間隙比が個別に求められていれば、上記の式によって混合物の最大間隙比および最小間隙比は予測が可能であると考えられる。

細粒分を含む砂においてはあらゆる混合比について密度の一定な供試体を作製することはほとんど不可能であり、したがって石原らをはじめ細粒分に関する研究は相対密度を一定にした論文が多い⁷⁾。また、相対密度50%の供試体を用いた研究が多く、既存のデータとの比較も配慮し、本実験では各試料の密度を相対密度50%の場合を中心に検討を行うことにした。

(4) 供試体作成及び実験手順

供試体の作成は乾燥砂をランマで軽く突き固めながら相対密度を調整した。ランマは単純せん断の場合250g、三軸試験の場合340gのものを用いた。供試体はCO₂循環、脱気水循環し完全に飽和された後、1kgf/cm²で等方圧密した。ここで相対密度50%、70%及び過圧密された供試体の密度は供試体作成直後の値である。相対密度50%の試料は各試料ともに背圧1kgf/cm²をかけたが相対密度70%のシルトを含む試料は完全に飽和されないことを考慮し、背圧を2kgf/cm²までかけた。圧密時間は砂の場合3時間からシルト100%の場合36時間まで十分に圧密した。なおB値は0.96以上のものを採用した。実験の後、供試体の中のシルト分分布が均等であるかどうかを調べるために供試体を三等分してそれぞれのシルト含有量を測定したが、ほぼ同じで均等に分布していることが分かった。

3. 繰返しせん断試験

(1) シルトを含む試料の液状化強度

図—4に各試料の繰返し単純せん断時の液状化応力比

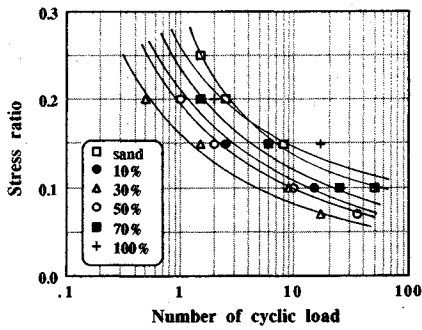


図-4 $D_r=50\%$ の液状化強度曲線

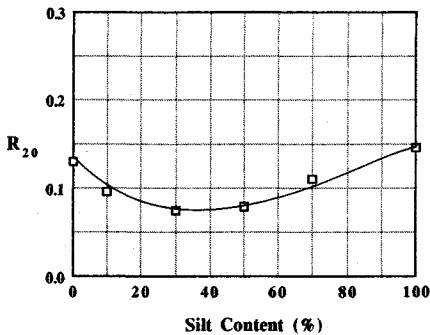
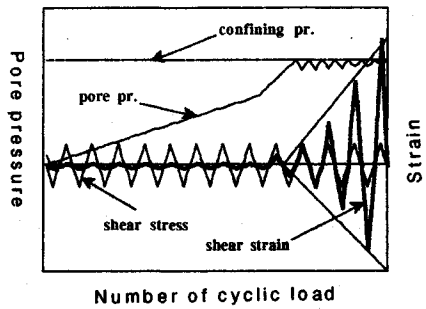
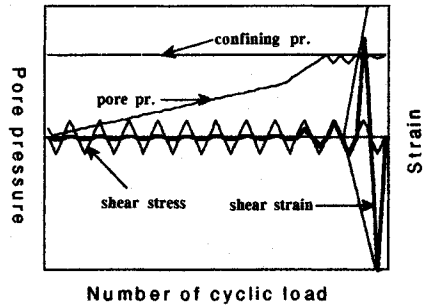


図-5 液状化強度とシルト含有率の関係



(a) 豊浦標準砂



(b) シルト30%を含む砂

図-6 せん断ひずみの発生仕方

と繰返し回数との関係を表した。普通、液状化強度を求める場合には間隙水圧が上昇して拘束圧と等しくなった時点で初期液状化と判断するが、本研究ではシルト分含有率を変えた時の初期液状化の判断がしにくい点を考慮して、両振幅ひずみ5%の時に初期液状化と判断した。また周波数は0.1 Hzである。この図には豊浦標準砂からシルト100%までの各試料の液状化強度曲線を各々示しており、シルトを含まない砂の場合は豊浦標準砂に対する既往の結果⁸⁾(福島らの単純せん断試験結果)とほぼ一致している。しかしシルトを含む砂の場合はこれまで得られた傾向とは異なる結果が得られた。すなわちこれまで粘土も含む細粒分の場合は含有量が増えることによって間隙水圧が上昇しにくくなり、液状化強度は高くなる⁴⁾、また低塑性のシルトが90%以上の細粒分の場合はきれいな砂とほぼ同じであるといわれてきた¹⁾。本研究ではシルト分含有率30%までは液状化強度が徐々に低下し、シルト分含有率30%以上からはシルト分含有率の増加によって再び上昇して行く傾向が得られた。

このような結果をより分かりやすく表したのが図-5である。図-5は繰返し回数20回での液状化に必要とするせん断応力比 R_{20} とシルト分含有率の関係を示したものである。この図からシルト分含有量の増加による液状化強度の変化が読み取れる。液状化強度がシルト分含有率30%の時一番小さくなる原因として以下のような

原因が考えられる。まず細粒分含有量の増加と共に液状化強度が増加する現象は粒子間の粘着力に起因することで説明されているが、本研究で使用した細粒分は極く低塑性あるいは非塑性と言えるシルトであるため粘着力による液状化強度の増加はあまりないと判断される。細粒分含有率の違いによるダイレイタンシー特性の違いにその原因があると思われる。すなわち、砂と砂の粒子間に砂より小さいシルト粒子が適量含まれると粒子間の噛み合いがはがれやすくなり、液状化強度が低くなると考えられる。シルト分含有率30%以上になると砂と砂の間に挟まれているシルト粒子の影響がうすれてシルト粒子同士の噛み合いが生じて液状化強度が少し上がって行くものと推測される。

図-6は繰返しせん断応力による間隙水圧の上昇とせん断ひずみの出方の例を示している。図-6(a)は豊浦標準砂、(b)はシルト分含有率30%の場合である。両方とも繰返し回数が増えることによって間隙水圧が上昇してせん断ひずみが大きくなるのは同じであるが、間隙水圧が拘束応力とほぼ等しくなり有効応力を失った所でのせん断ひずみには違いがある。すなわち豊浦標準砂の場合は有効応力がゼロに近付いたところでのせん断ひずみの増加幅が緩やかであるがシルト30%の場合は初期液状化のところでは急激な増加を見せている。これは前に述べた噛み合いがはずれやすいかどうかを裏付けていることと考えられる。

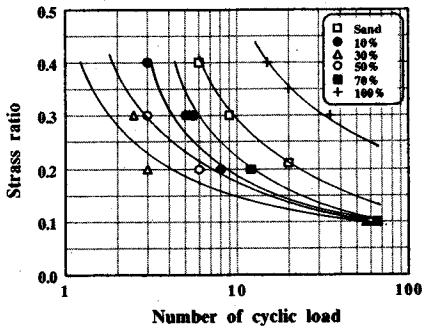


図-7 $D_r=70\%$ の液状化強度曲線

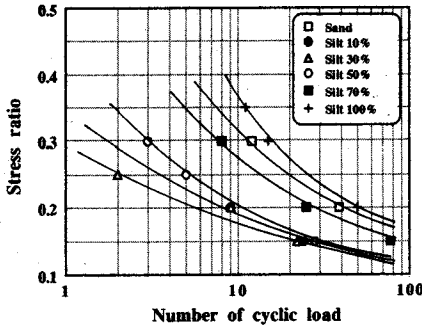


図-8 $OCR=2$ の液状化強度曲線

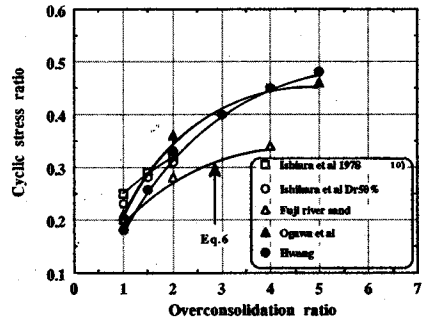


図-9 石原らの結果との比較

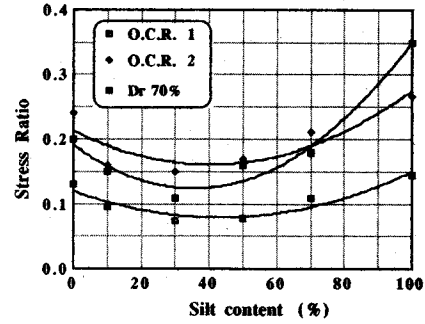


図-10 各条件の R_{20} とシルト含有率の関係

(2) 密度及び過圧密比を変えた時の液状化強度

密度を変えて相対密度 70% での繰返し単純せん断試験を行った結果を図-7 に示した。相対密度 50% の結果に比べて全体的に液状化強度は増加しているがやはりシルト含有率 30% の試料がもっとも低かった。液状化強度曲線の全体的な形状は相対密度 50% に比べて急な傾きを持っている。

次に、過圧密状態におけるシルトを含む砂の液状化強度の増加傾向を調べることを目的として、過圧密比 (OCR) が 2.0 の繰返し単純せん断試験を行った。その結果を図-8 に示す。液状化強度曲線の傾向は相対密度 70% の結果とほぼ同様で、シルト分 30% で一番低い結果を示すことは変わらなかった。

一方、石原ら⁹⁾は富士川砂を用い、過圧密比を変えた繰返し単純せん断試験の結果から、次のような式を導いた。

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma'_v}\right)_{OCR} = \sqrt{OCR} \left(\frac{\tau_l}{\sigma'_v}\right)_{N.C} \dots\dots\dots (6)$$

この式 (6) によると砂の液状化強度は過圧密比 (OCR) の平方根に比例して大きくなることになっている。本研究では、相対密度 50% の豊浦標準砂供試体により過圧密比をかえた繰返し単純せん断試験を行い、液状化抵抗応力比 (R_{20}) と過圧密比 (OCR) の関係を求め図-9 に示す。この図によると、 R_{20} は $OCR^{0.88}$ に比例して大きくなる結果が得られた。この値は石原らが

求めた砂についての値よりやや大きいのが、これは対象となった砂の種類が異なったためと判断される。

図-4 と図-8 の試験結果から、 $OCR=1$ と $OCR=2$ の R_{20} とシルト含有率の関係を図-10 に示す。石原らの研究では細粒分が多いほど過圧密比の影響が大きくなることが報告されているが⁹⁾、図-10 によると、 $OCR=2$ の R_{20} は $OCR=1$ より全体的に大きくなり、シルトの含有量が多くなっても過圧密による液状化強度の増加幅はきれいな砂と変わらない結果となった。また、過圧密状態でもシルト含有率 30% の時も最も弱い強度を示した。このようなことも粘着力のないシルトと粘着力のある粘土の違いではないかと判断される。図-10 には、 $OCR=1$ 、 $OCR=2$ の他に相対密度 70% の時の液状化抵抗応力比 (R_{20}) と細粒分含有率の関係を併記した。いずれもシルト含有率 30% の時に一番弱いことは変わらないが、密になるほど強度低下の幅が大きくなった。また、相対密度 70% の試料はシルト含有率 70% 以上から急に増加した。

(3) 繰返し単純せん断と繰返し三軸試験

NGI 型あるいは CAMBRIDGE 型単純せん断試験装置においては供試体に与えられる応力の分布が不均一であることが知られており、また、供試体の応力状態の有限要素解析から、表面の 80% 以上では応力が均一になることも発表されている¹¹⁾。

本研究では前述したシルトを含む砂に対する繰返し単

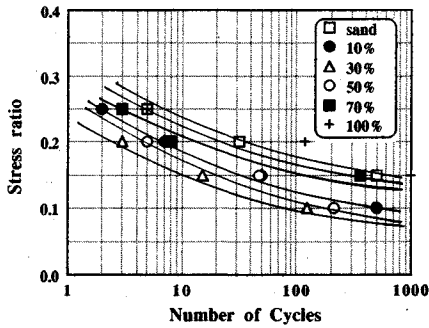


図-11 繰返し三軸試験の液状化強度曲線

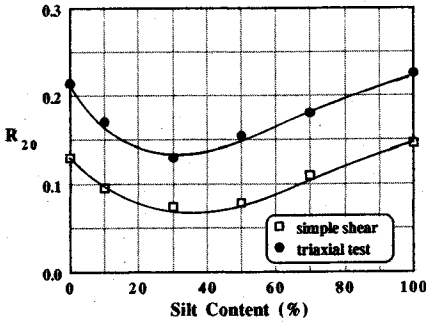


図-12 単純せん断と三軸試験の比較

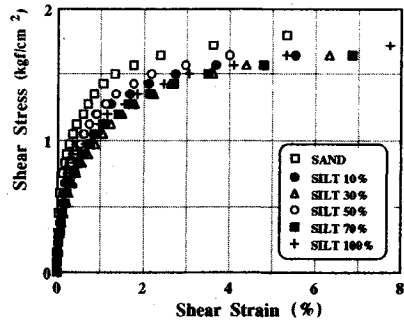


図-13 せん断応力とせん断ひずみの関係

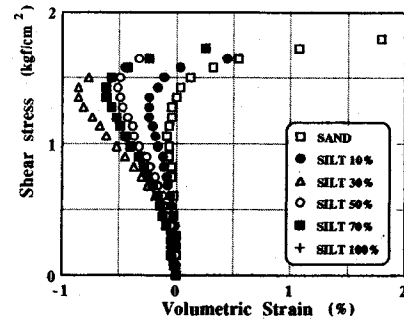


図-14 せん断応力と体積ひずみの関係

純せん断試験結果が応力分布の不均一に起因する可能性もあると考え、繰返し三軸試験結果と比較することを試みた。図-11には各シルト含有率に対する繰返し三軸試験結果を示している。この図と図-4の単純せん断試験を比較すると、液状化強度は三軸試験の方が全般的に高く現れているが、シルト分含有率30%の試料がもっとも低いことには変わりがなかった。

図-12では繰返し単純せん断試験の結果と繰返し三軸試験の結果を液状化抵抗応力比 R_{20} で比較した。初期液状化の判断は三軸試験の場合は軸ひずみ5%の時と判断した。曲線の形状は両試験ともに相似しているが三軸試験の方が単純せん断より全体的に高い強度を示している。これは応力分布の不均一¹²⁾などの試験機の特長や影響によるものと考えられるが、シルト含有量による影響の傾向が両者ともよく合っていることに注目したい。

4. 静的三軸試験

(1) 排水試験

前に述べた各試料の液状化強度の差を確かめるために繰返し三軸試験と同一相対密度、同一拘束応力の条件下で静的三軸圧縮試験を行った。特に、粒子間のダイレイタンシー特性を調べるため平均主応力一定の条件で行った。図-13にせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。シルト分含有率50%の値が少し傾向を異にするが液状化強度と同様に静的強度でも30%の時にもっとも弱い傾向が明らかに見られ、また30%以上からの再増加の傾

向も現れている。このことから液状化強度だけではなく静的強度においても相対密度一定の場合にはシルト分含有率30%の時に一番低いことが言える。図-14にせん断応力と体積ひずみとの関係を示したが、ここでもシルト分含有率30%の時に体積収縮ひずみが最も大きな値を示している。この結果は平均主応力一定条件での結果であるため体積ひずみ量はせん断だけによる体積変化すなわち負のダイレイタンシー量を表すことになる。液状化強度が最も小さいシルト分含有率30%の砂が体積収縮ひずみが最も大きくなるという結果は、液状化メカニズムにおいて負のダイレイタンシーが液状化強度に大きな影響を及ぼすことを示唆している。この図でもう一つ注目する必要があるのは体積ひずみの発生が顕著になるせん断応力に違いがあることである。すなわち、シルト分を含む砂がきれいな砂より小さいせん断応力で粒子間のズレが始まることを意味する。

(2) 非排水試験

次に平均主応力一定の条件での静的非排水試験を行い間隙水圧の変化状況を調べた。図-15に各試料の有効応力経路を示す。図には変相線と破壊線も表示しているが各試料の変相点を結ぶ変相線がほぼ直線で表されることがわかる。また変相点での応力、いわゆる変相応力を各試料ごとに比べるときれいな砂の場合が軸差応力1.0 kgf/cm²位で一番高く、シルト分含有率10%の0.75 kgf/cm²程度、シルト分含有率30%以上の試料は0.5 kgf/cm²程度であり、シルト分含有率が30%以下の範

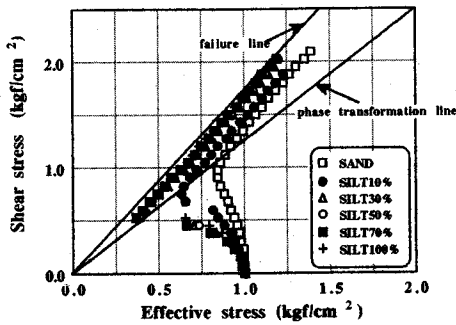


図-15 有効応力経路図

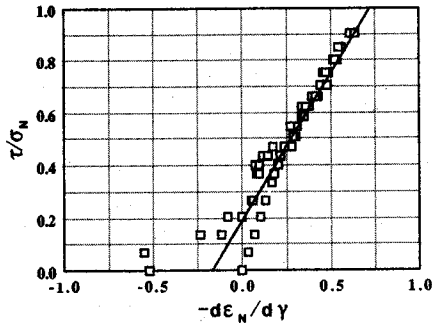
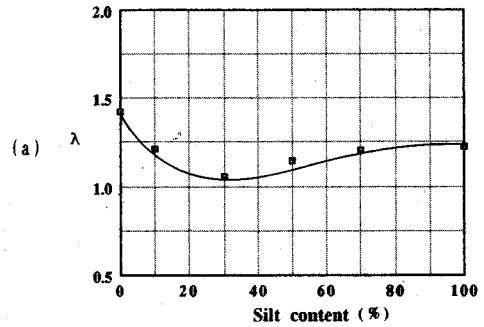
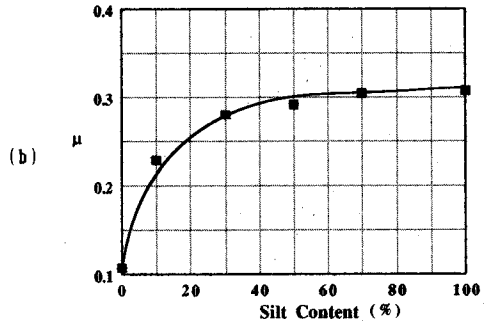


図-16 応力-ダイレイタンスー関係



(a)



(b)

図-17 ダイレイタンスー係数λとμの分布

囲では液状化強度の低い試料ほど低い変相応力を示した。このような結果も粒子間のダイレイタンスーによる抵抗力の違いに起因するものではないかと判断される。図-14に述べたように排水試験でのせん断応力-体積ひずみ図ではシルト含有率30%の試料がもっとも大きな体積ひずみが得られてそれ以上の含有率では再び小さくなったが、非排水試験での有効応力図ではシルト含有率30%以上はあまり変わらなかった。

(3) 静的試験と繰返し載荷試験結果の比較

前述した実験結果から同じ試料に対する動的及び静的試験結果には共通点があることがわかる。それは非排水繰返し試験強度と静的三軸排水、非排水強度両方ともシルト含有率30%の試料がもっとも低いことである。このような結果をまとめるとシルト分を含んだ砂がダイレイタンスーによる抵抗力が小さいことを示す。これを検証するために松岡ら¹³⁾が提案した粒子間の滑りに基づいた応力-ダイレイタンスー式にあてはめて各試料のダイレイタンスーにより分担されるせん断抵抗に関する係数λ値と液状化強度の関係を調べた。

松岡ら¹³⁾はせん断時の土粒子のダイレイタンスー機構の微視的な解析からモービライズ面上の応力-ひずみ間の関係式を導いた。式(7)はその代表的な式である。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \lambda \left(-\frac{d\epsilon_N}{d\gamma} \right) + \mu \dots \dots \dots (7)$$

ここに、λとμはそれぞれダイレイタンスーと摩擦により分担されるせん断抵抗成分に関する係数である。

標準砂の排水せん断試験結果を縦軸にτ/σ_N、横軸にdε_N/dγをとりプロットすると、データは少しばらつきがあるがほぼ直線に沿っている。シルトを含んだ場合もτ/σ_N~dε_N/dγの関係は、傾きや位置には変化が見られたが、直線関係が成り立つ結果が得られた。

各試料の試験結果からλ値とシルト含有率の関係を図-17(a)に示す。液状化強度及び静的強度と同じように30%の試料がもっとも低い。この結果からシルト分30%の試料のダイレイタンスーによる抵抗力が一番小さいことと言えるし、液状化強度はダイレイタンスーによる抵抗力と密接な関連性があると判断することができる。

一方、式(7)でのもう一つの係数μと細粒含有率の関係を示したのが図-17(b)であるが、細粒分が多いほど大きな値を表していることがわかる。このことは係数μが粒子間摩擦角φの関数であり、細粒分の含有量が多くなるほど供試体の単位面積での粒子間の接する面積が大きくなるためと考えられる。

図-18はこのλ値と非排水繰返し単純せん断試験のR₂₀との関係を示しているが、この関係は図からもわかるように非常によい直線関係であった。すなわち液状化強度はダイレイタンスーによる抵抗力の大きさに比例する。図-18からλとR₂₀の関係は式(8)で表される。

$$R_{20} = 0.154\lambda - 0.09 \dots \dots \dots (8)$$

この式からλの値を用いて液状化強度の推測ができる程度できると考えられる。

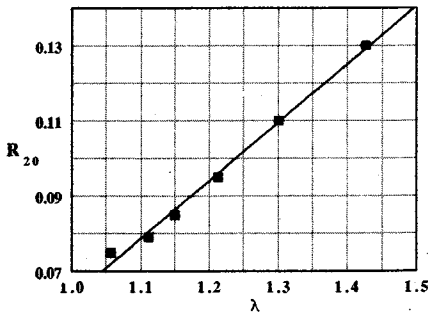


図-18 ダイレイタンス係数 λ と R_{20} の関係

次に排水試験時の体積ひずみ曲線あるいは非排水試験における有効応力経路から液状化強度を予想する方法について検討してみた。図-14に示した各試料の体積ひずみ、最大収縮ひずみが生じる時点のせん断応力に対するそのひずみ量の比を最大体積ひずみ比 R_{VC} と定義し、 R_{VC} と繰返し単純せん断試験の R_{20} の関係を図-19に示す。この図によると、 R_{20} は R_{VC} の増加に伴い減少し、 R_{20} と R_{VC} の関係は直線関係を示し式(9)で表される。

$$R_{20} = -0.06R_{VC} + 0.129 \dots \dots \dots (9)$$

この関係から、液状化強度が小さいほど体積ひずみすなわち負のダイレイタンスーが大きいことおよび最大圧縮点でのせん断応力が大きいことが理解される。

図-15に示す非排水試験の有効応力経路において最大間隙水圧が生じる時点でのせん断応力に対するその間隙水圧の比を最大間隙水圧比 R_{UC} と定義し、 R_{UC} と繰返し単純せん断試験の R_{20} の関係を求め図-20に示す。 R_{20} は R_{UC} の増加に伴い減少し、式(9)と同様に直線関係を示し式(10)で表される。

$$R_{20} = -0.1R_{UC} + 0.145 \dots \dots \dots (10)$$

ここで傾きは密度によって変わる係数である。この式はシルトを含む豊浦砂に対する実験結果から導いた関係式であり、全ての試料に適用されるとは言えないが、液状化強度が静的せん断的な体積圧縮比に関連づけられることは砂の液状化強度を知るうえで重要な情報となることと考えられる。

5. 結 論

本研究ではシルト分を含む砂に対して非排水繰返し単純せん断試験および繰返し三軸試験を実施し、シルト分の含有量が液状化強度に及ぼす影響を調べた。さらに平均主応力一定の条件で静的三軸試験を行い、静的試験結果と非排水繰返し試験結果の関連性を検討した。本研究より得られた主要な結果をまとめると以下のようになる。

1. 細粒分を含む砂の液状化特性を検討するために、まず第一段階として低塑性のシルトを含む砂について混合比を変えて最大・最小間隙比を求めた。その結果、最

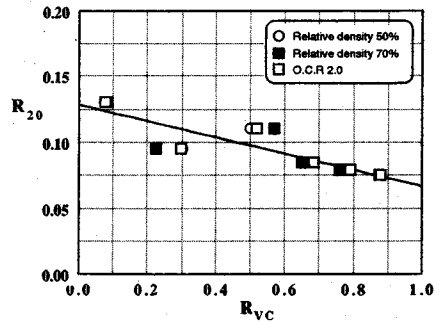


図-19 体積ひずみ比と R_{20} の関係

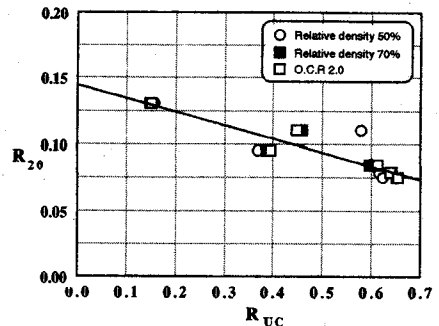


図-20 間隙水圧比と R_{20} の関係

大・最小間隙比とともに混合率が30%の時に最も小さくなることが判明した。

2. 液状化強度に及ぼすシルト分含有率の影響はかなり大きく、相対密度が同じであればシルト分含有率30%の試料がもっとも低い液状化強度を表す。

3. 過圧密比及び相対密度を変えた場合もシルト分含有率30%の試料が一番低い強度を示す。

4. シルト分含有率30%の試料が最も低い液状化強度を示すのは各粒子間のダイレイタンスーによる抵抗力がもっとも小さいことにその原因がある。

5. 動的試験結果と静的平均主応力一定の試験結果間には関連性があり、液状化強度と最大体積ひずみ比 R_{VC} および最大間隙水圧比 R_{UC} は直線関係が成り立ち、液状化強度は R_{VC} 、 R_{UC} の増加にしたがい低下する。

参 考 文 献

- 1) 森伸一郎・沼田淳紀・境野典夫・長谷川昌弘：埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性，土と基礎，Vol. 39-2，No. 397，pp. 17~22，1991。
- 2) 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，第45回年次学術講演会講演概要集 / III，pp. 690~691，1990。
- 3) 石原研而・袖川正人：細粒分を含む飽和砂の液状化，第8回土質工学研究発表会講演集，pp. 323~326，1973。
- 4) 草野 郁：細粒分を含む砂質地盤の液状化強度の推定法，土木学会論文報告集，第418号 / III-13，pp. 55~64，1990。
- 5) Ishihara, K. and Yamazaki, F.: Cyclic Simple Shear Tests

- on Saturated Sand in Multi-Directional Loading, Soils and Foundations, Vol.20, No.1, pp.45~59, 1980.
- 6) De Alba, P., H.B. Seed and C.K. Chan : Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests, Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.102, No.GT 9, pp.909~927, 1976.
 - 7) 草野 郁・阿部 博：細粒分を含む砂質地盤の液状化強度の推定法，第24回土質工学研究発表会講演集，pp.745~748, 1989.
 - 8) 土岐祥介・三浦清一：飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について，土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集，pp.1~35, 1988.
 - 9) Ishihara, K. and Takatsu, H. : Effect of Overconsolidation and Ko Conditions on the Liquefaction Characteristics of sands, Soils and Foundations, Vol.19, No.4, pp.60~68, 1979.
 - 10) Ishihara, K., M. Sodekawa and Y. Tanaka : Effect of Overconsolidation on liquefaction Characteristics of Sands Containing Fines, Dynamic Geotechnical Testing ASTM STP 654, pp.246~264, 1978.
 - 11) A.S. Lucks, J.T. Christian, G.E. Brandow, and K. Höeg Stress Condition in NGI Simple Shear Test, Jour. of Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, Vol.98, No.SM 1, pp.155~160, 1972.
 - 12) Shen, C.K., Sadigh, K. and Herrmann, L.R., : An Analysis of NGI Simple Shear Apparatus for Cyclic Soil Testing, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, pp.148~162, 1978.
 - 13) 松岡 元：3主応力下の土の応力~ひずみ関係について，京大防災研年報，16-B, pp.711~733, 1963.

(1991.12.5 受付)

SHEAR CHARACTERISTICS OF SILT CONTAINING SAND

Daejin HWANG, Eiji YANAGISAWA and Takahiro SUGANO

Undrained cyclic simple shear tests and undrained cyclic triaxial tests were performed on silt-containing sand in order to investigate the effects of silt contents on the liquefaction strength and shear characteristics of the sand. From the view that the difference of liquefaction strength for different content of silt derives from dilatancy characteristics of the sand, stress-dilatancy relation of the sand was obtained from drained triaxial test in which the mean principal stress was kept constant. Considerations on liquefaction behaviors were made by comparing the drained and undrained behaviors of sands during static shear test. It is concluded that λ -value of the stress-dilatancy relation will be closely related to the liquefaction strength.