

塑性のない細粒分を含む砂質土の 液状化とそれに伴う体積変化特性

足立雅樹¹・安原一哉²・島袋淳³

¹正会員 博(工) 三井不動産建設 関西支店 土木部技術課(〒530-0044 大阪市北区東天満2-10-14)

²フェロー 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科(〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)

³正会員 修(工) 徳山工業高等専門学校助手 土木建築工学科(〒745-8585 徳山市久米高城3538)

本論文は、細粒分として塑性のないシルトを砂に混合した供試体に対し、一連の非排水繰返し三軸試験を行った。前報¹⁾で提案した方法に基づき作成された締固め砂質土供試体の液状化特性、及び液状化後の体積変化特性に及ぼす、①密度、②細粒分含有率、③細粒分の種類の影響について検討した。その結果、前報¹⁾で提案した正規化繰返し強度比(=繰返しせん断応力/静的せん断強度)を用いることにより、細粒分含有率、細粒分の種類によらないユニークな液状化強度曲線が得られること、また、液状化後の体積ひずみはこの繰返し強度比によって定義された正規化安全率を用いれば、細粒分含有率によらず両者の間にはユニークな関係があることを明らかにした。

Key Words : *liquefaction, fine content, undrained strength, post-liquefaction volumetric strain*

1. まえがき

近年、いくつかの地震の際に、従来比較的液状化しにくいと言われていたシルト質土、あるいはそれらの細粒分を含む砂質土が液状化した事例が報告されている。例えば、1995年の兵庫県南部地震の際には液状化した地盤にまさ土など塑性のない細粒分が含まれていたことが報告されている²⁾。一方、1993年1月の釧路沖地震や同年7月の北海道南西沖地震の際に、軟弱地盤上の砂質シルト及びシルト質砂から成る河川堤防堤体の一部が、基礎地盤を構成する軟弱粘土の圧密沈下により水没、飽和しこの部分に液状化が生じて堤体が破壊したと報告された^{3), 4)}。

細粒分のうち、シルト質土は塑性のあるなしで地震時の挙動における役割が異なっていると想像される。過去の事例で液状化に関わったものは活性のないシルト分が多いようである。このような土の液状化のメカニズムや地盤災害に果たす役割に関する研究例はあまり多くないが、例えば森ら^{5), 6)}の研究によれば、海岸埋立地で生じた噴砂より採取したシルト質砂の液状化試験を行い、シルト質土の液状化強度は砂質土と同

様に小さいこと、また、前報¹⁾で報告した著者らの研究では、密度を同一にした非塑性シルトは砂よりも液状化しやすいことを指摘した。また、低塑性シルト～非塑性シルトに属する特殊な例として、鉱さいや石炭灰があるが、その液状化強度も砂と同程度であるとこれまでに指摘されている^{7), 8)}。

一方、砂質土におけるシルト分の役割に関する研究のうち、黄ら⁹⁾は、砂質土に含まれるシルト分は、非塑性の細粒分の増加に伴って液状化強度は低下するという点、桑野ら¹⁰⁾は塑性を有する細粒分を含む砂質土の液状化強度がその細粒分の含有量に伴って増加する傾向があるといった報告をしている。

本研究では、前報¹⁾の成果を踏まえて細粒分として非塑性シルトに着目し、この非塑性シルトを砂と混合した供試体の液状化特性に及ぼす①初期密度、②細粒分含有率及び③細粒分の種類の影響を調べた。

まず、この種の砂質土はきれいな砂のように最大・最小間隙比を決めることがむつかしいため、通常の砂の規準に従った相対密度を求めることができない。そこで、前報¹⁾と同様に乾燥密度をパラメータとし、供試体の密度を規定した。次に、細粒分含有率の規定は

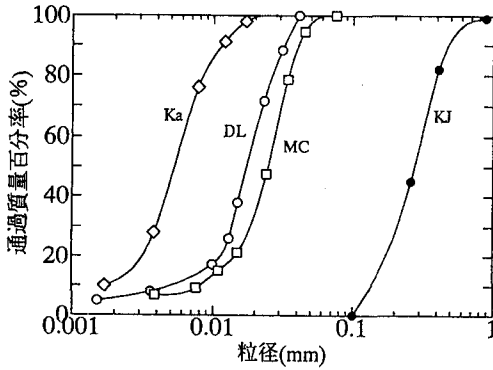


図-1 粒径加積曲線

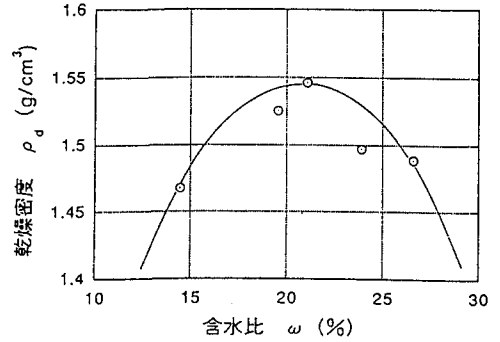


図-2 締固め試験結果(DLクレー)

表-1 試料の物理的性質

| 試料 | 細粒分 含有率 (%) | 比重 | 最大乾燥 密度 (g/cm ³) | 最適 含水比 (%) | 塑性 指数 | 平均粒径 D ₅₀ (mm) | 均等 係数 U _c |
|----|-------------------|------|------------------------------------|------------------|----------|---------------------------------|----------------------------|
| KJ | 0 | 2.62 | 1.49 | 17.0 | NP | 0.265 | 2.00 |
| Ka | 10 | 2.61 | 1.66 | 15.0 | NP | 0.245 | 2.14 |
| DL | " | 2.65 | 1.65 | 14.6 | NP | 0.225 | 6.71 |
| MC | " | 2.62 | x | x | NP | 0.225 | 6.90 |
| Ka | 20 | 2.61 | 1.80 | 12.0 | NP | 0.220 | 29.11 |
| DL | " | 2.61 | 1.72 | 12.6 | NP | 0.210 | 22.5 |
| MC | " | 2.65 | 1.68 | 15.0 | NP | 0.220 | 21.92 |
| Ka | 100 | 2.51 | x | x | 7.7 | 0.005 | 5.80 |
| DL | " | 2.53 | 1.55 | 21.1 | NP | 0.018 | 3.09 |
| MC | " | 2.65 | x | x | NP | 0.026 | 17.65 |

KJ: 久慈浜海岸砂、Ka: カオリン(粘土)、DL: 調整シルト(非塑性シルト)、MC: 浚渫シルト(非塑性シルト)

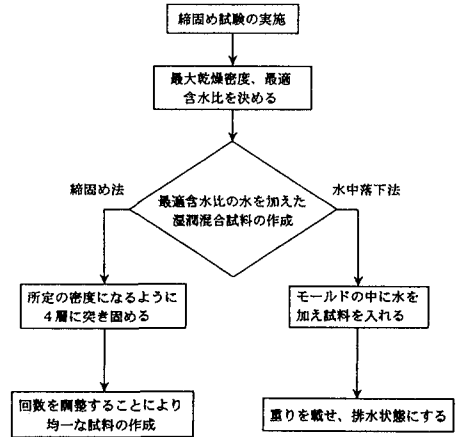


図-3 供試体の作成手順

筆者ら¹¹⁾による過去にカオリンと砂を混合した土のせん断特性に関する研究において得られた、粘土分20%までは砂質土的性質を示し、20%を境に物理的性質、及びせん断特性が異なる事実を踏まえ、細粒分として非塑性のシルトを乾燥質量で含有率20%以下となるように砂に混合し、これを供試体とした。また、供試体作成方法としては盛土地盤を対象とした(1)締固め法、埋立て地盤を対象とした(2)水中落下法の2通りの方法を用いた。このようにして作成した供試体を三軸セル内で飽和させ、非排水繰返し試験を行い、細粒分を含んだ砂質土の液状化強度及び、液状化後の体積変化特性を調べた。以下に、これらについて詳述する。

2. 試料および試験方法

(1) 試料

本研究で用いた塑性のない細粒分は2種類であり、前報¹⁾同様に市販のDLクレーと呼ばれる岩石を粉砕して生成された調整シルトと浚渫シルトを用いた。

これらの粒径加積曲線を図-1に、またこれらのシルトの物理的性質を表-1に示す。ここで、本研究で用いた浚渫シルトは粘土鉱物を含んだものであるが表-1に示すように塑性限界試験で塑性指数を測定できないことから、本報告では非塑性シルトと定義する。これらのシルトを砂(久慈浜海岸砂)と混合させ試料を作成する。作成された試料の最大乾燥密度、及び最適含水比も表-1にまとめて示した。ここで、最大乾燥密度、最適含水比はJISに規定された締固め試験(A-a法)¹²⁾によって求め、例としてDLクレーの締固め試験結果を図-2に示す。

(2) 供試体作成方法

供試体の作成方法は、表-1に示した最大乾燥密度、最適含水比となるよう、(a)締固め法、(b)水中落下法の2種類の方法によって作成した。これらの方法の手順をまとめたものが図-3である。

表-2 供試体の密度と締固め回数

| 試料 | 細粒分含有率 (%) | 密度 (g/cm ³) | 締固め回数 (回) | | | |
|-------|------------|-------------------------|-----------|-------|-------|---------|
| | | | 下層 | | 上層 | |
| | | | 1層 | 2層 | 3層 | 4層 |
| KJ | 0 | 0.91 ρ_{dmax} | 10 | 10 | 40 | 110 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 15 | 15 | 40 | 30 |
| KJ+Ka | 10 | 0.91 ρ_{dmax} | 40 | 30 | 60 | 40 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 30 | 30 | 60 | 40 |
| KJ+DL | 10 | 0.91 ρ_{dmax} | 50 | 50 | 100 | 60 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 30 | 30 | 60 | 40 |
| KJ+Ka | 20 | 0.91 ρ_{dmax} | 40 | 30 | 70 | 40 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 35 | 30 | 35 | 20 |
| KJ+DL | 20 | 0.91 ρ_{dmax} | 40 | 50 | 110 | 50 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 35 | 40 | 60 | 40 |
| KJ+MC | 20 | 0.91 ρ_{dmax} | 60 | 50 | 80 | 50 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 45 | 25 | 70 | 25 |
| DL | 100 | 0.91 ρ_{dmax} | 40 50 | 60 70 | 80 90 | 100 100 |
| | | 0.86 ρ_{dmax} | 50 50 | 60 60 | 70 70 | 80 80 |

KJ: 久慈浜海岸砂, Ka: カオリン, DL: 調整シルト, MC: 液状シルト

ア) 締固め法

まず, 所定量の試料に最適含水比となるよう水を加え, 湿潤試料を作成する。次に, この試料を三軸セル内に設置した直径5 (cm) × 高さ10 (cm) の2つ割りモールドに4層に分けて試料を入れ, 各層の表面より若干, 上のほうからランマー (340g) を落として締固める。なお, 供試体の密度は, 締固め試験で求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax} の86%, 及び91%とした。このとき, 重要なことは供試体内部の密度分布, 含水比分布が均一になるような締固め回数を予め規定しておくことである。綿密な予備試験を行った結果, 見出された方法¹⁾によると供試体を4等分にしたときに得られた供試体内の密度分布の最大・最小の差異が0.05g/cm³以下で, 含水比分布のそれが1%以下であり, ほぼ一様な供試体が得られた。このようにして決めた締固め回数を表-2に示す。

イ) 水中落下法

まず, 締固め法と同様の湿潤試料を用いて, 予め三軸セル内に直径5 (cm) × 高さ10 (cm) の2つ割りモールドを設置し, その上にカラーをつけモールド内に脱気水を入れる。モールド内にロートをを用いて湿潤試料を入れ, 上から重りを載せる。その後, コックを開き排水状態にし, 所定の高さ (10cm) の供試体を作成する。また, 水中落下法では水の中に試料を落下させるだけで密に詰まってしまうため, 最大乾燥密度 ρ_{dmax} の86%の供試体作成は困難であった。そのため, 供試体密度は最大乾燥密度 ρ_{dmax} の91%のみとした。このとき, 密度を調整するためにモールドの側方をたたくと, 供試体内の密度分布, 及び含水比分布が一様にならないため, 均一になるように質量 (0.5kg) を有する重り, 及びロートの高さ (25cm) を調整して供試体を作成した。その結果, 供試体を4等分にしたとき得られた供試体内の最大, 最小の密度差が0.05g/cm³以下, 含水比についてもが2%

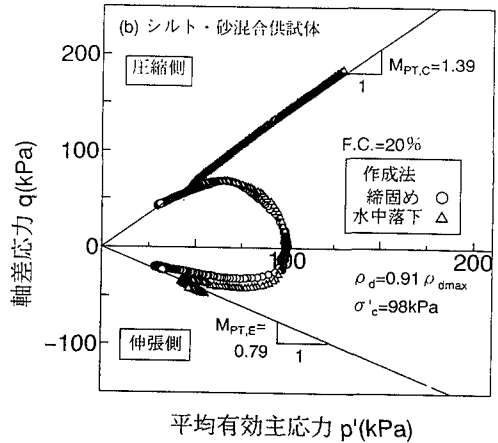
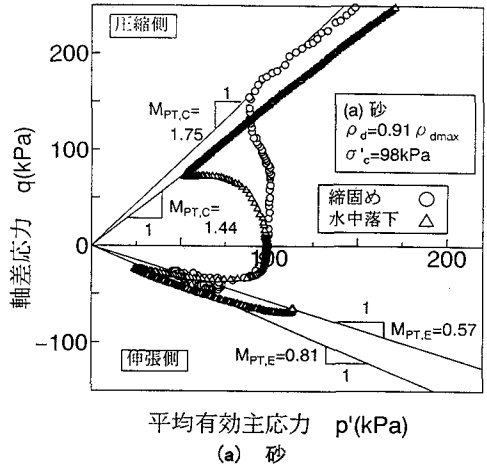


図-4 非排水せん断時の有効応力経路に及ぼす供試体作成法の影響

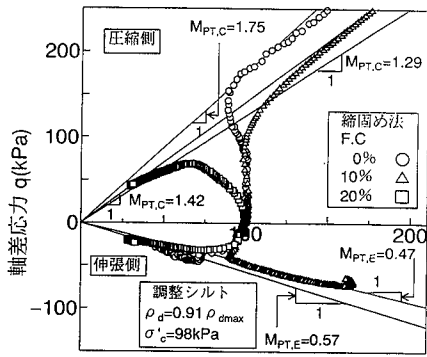
以下であり, ほぼ一様であることが確認された。

(3) 試験方法

上記の方法により作成した供試体にCO₂及び脱気水を通水させ飽和させた後, 背圧を196kPaまで加える。この状態で約8時間放置した後, B値が0.96以上であることを確認する。次いで, 等方的に有効拘束圧 $\sigma'_v = 98\text{kPa}$ のもとで供試体を圧密させた後, それぞれの供試体に対して以下の実験を行った。なお, 圧密時間は排水量が完全に落ち着くまで, 平均して約2時間30分とした。ここで, 本研究では盛土地盤を対象としているため, 本報告では, 圧密後の密度より締固め供試体作成時の初期密度を比較の対象としている。

ア) 静的三軸試験

繰返し強度 (液状化強度) と静的非排水強度を関係づ



平均有効主応力 p' (kPa)

図-5 非排水せん断時の有効応力経路に及ぼす細粒分含有率の影響

けるため静的非排水せん断試験を行って、各試料の静的非排水強度を求めた。

圧密終了後、ひずみ制御（軸ひずみ速度0.1%/min）の非排水三軸圧縮及び伸張試験を行った。なお計測は軸ひずみが20%になるまで行った。

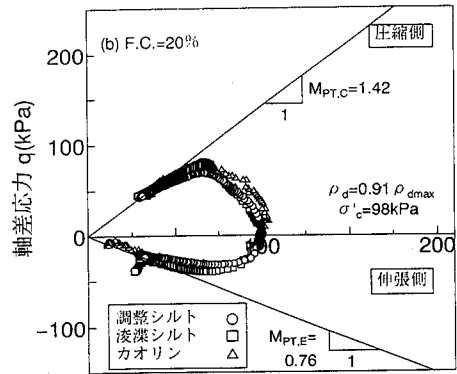
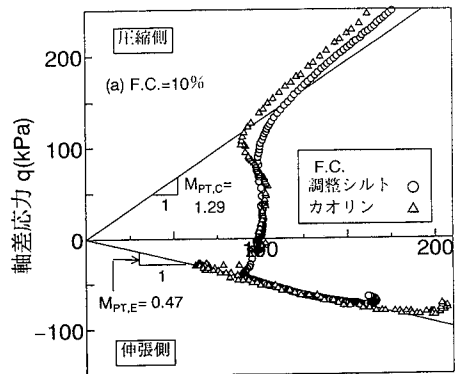
b) 繰返し三軸試験

圧密終了後、所定の繰返し応力比 τ_d / σ'_c ($\tau_d = \sigma'_d / 2$) を繰返し回数20回 ($N=20$) 載荷するか、もしくは液状化させた後、コックを開き、排水状態にして間隙水圧を消散させる。体積変化測定用のビュレットの水位が完全に落ち着くまで約5分間放置させた後、最終的な体積変化量を測定する。

3. 静的せん断特性

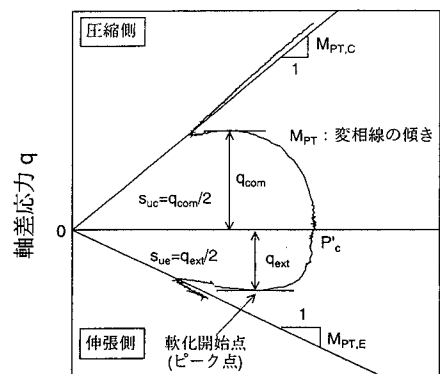
まず、同じ初期密度 $0.91 \rho_{dmax}$ で、作成方法の異なる供試体の静的非排水せん断時の有効応力経路を図-4に示す。図-4(b)は調整シルト20%混合供試体の例をプロットしている。これらの図によれば、シルト混合土、砂供試体ともに一旦収縮した後、直ちに顕著な膨脹挙動を示している。また、(a)、(b)図を比較してみると砂供試体では有効応力経路に及ぼす供試体作成法の影響が顕著にみられるのに対し、シルト混合土供試体ではその影響はほとんどないことがわかる。このことは前報¹⁾でのシルトのみ及び砂のみの供試体において供試体作成法による有効応力経路に対する影響がみられるといった結果と反するものとなったが、その原因は不明である。

次に、同じ初期密度 $0.91 \rho_{dmax}$ で細粒分含有率 (F.C.) が有効応力経路に及ぼす影響を示しているのが図-5である。この結果から、細粒分含有率が大きくなると、



平均有効主応力 p' (kPa)

図-6 非排水せん断時の有効応力経路に及ぼす細粒分の種類の影響



平均有効主応力 p'

図-7 静的強度の定義

ダイレイティブな特徴が消失し収縮的挙動を示すようになることがわかる。

次に、細粒分の種類が有効応力経路に及ぼす影響を締固め法を例として示したものが図-6(a)、(b)である。(a)図はF.C. 10%、(b)図はF.C. 20%の結果を示している。また、図中には参考としてカオリン混合供試体の結果も併記している。これらを比べてみると細粒分の種類

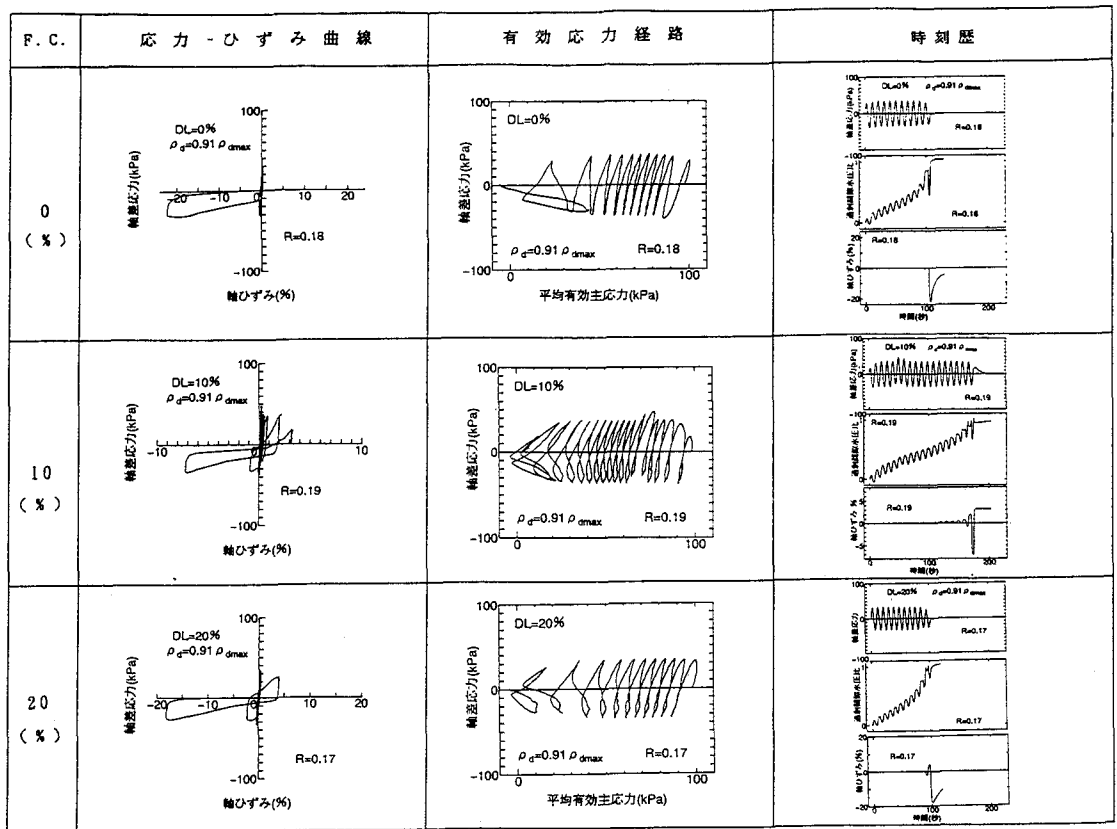


図-8 細粒含有率の異なる繰返し三軸試験結果

による静的せん断挙動への影響は少ないことがわかる。このことは表-1に示すように両者は共に非塑性であり平均粒径もほぼ等しいことから同じような試料とみなせるためと考えられる。また、圧縮側の変相線の傾きを図-5と比較してみると、図-6の傾きは図-5と等しいことから、圧縮側の変相線の傾きは細粒分の種類より細粒含有率に影響すると考えられる。

なお、後述する静的強度について定義したものが図-7である。この図に示すように圧縮側、及び伸張側の有効応力経路における軸差応力のピーク（軟化開始点）をとり、それぞれ S_{uc} 、 S_{ut} として静的強度とするが、圧縮側でピークがあらわれていないものに対しては変相点での強度とし、これをもって、後述する繰返し強度を定義した。

4. 液状化特性

(1) 応力・ひずみ・間隙水圧の時刻歴

前述したように、各試料に対する繰返し三軸試験は前報¹⁾と同様の手順で行った。ここで、調整シルトを

例として異なる細粒含有率を有する供試体 ($\rho_d = 0.91 \rho_{dmax}$) に対する典型的な繰返し試験結果を図-8にまとめている。

この図をみてみると、ほぼ同じ応力レベルの繰返しし荷荷に伴う軸ひずみ、過剰間隙水圧は細粒含有率が高いほど荷荷回数に伴って顕著に増加している。つまり、細粒含有量の多いものほど荷荷回数に伴う軸ひずみの増加割合は大きくなり、また、軸ひずみの急増点の過剰間隙水圧比は0.8付近から0.9程度と大きくなっている。

(2) 液状化強度に及ぼす細粒含有率の影響

繰返し三軸試験から得られた繰返し回数 $N=20$ 回で両振幅軸ひずみ5%のときの繰返し応力比（繰返しせん断応力/拘束圧）を液状化強度と定義して、細粒含有率の違いによる液状化強度 R_{50} と細粒含有率F.C.との関係を示したものが図-9である。図中の一点鎖線は、砂と細粒分を含む土の液状化強度と比較するため、砂の液状化強度を示したものである。これより、密度が $0.91 \rho_{dmax}$ の場合は、F.C.10%では砂に比べて液状化強

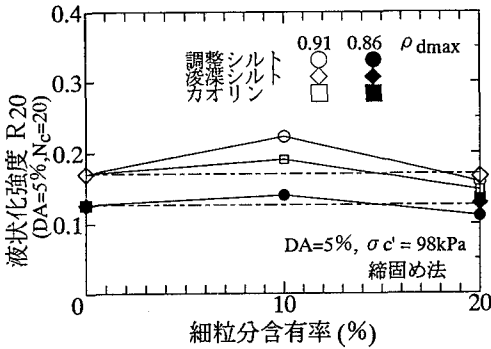


図-9 R-N曲線に及ぼす細粒分含有率の影響

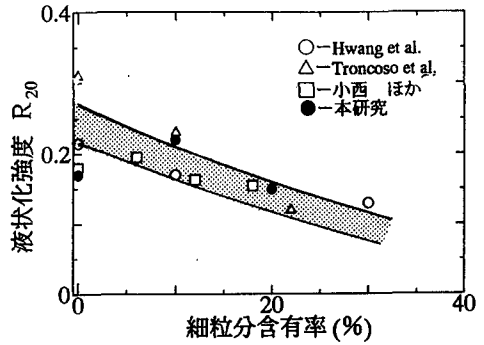


図-10 液状化強度に及ぼす非塑性細粒分含有率の影響

度は大きい。つまり砂に比べて液状化しにくい、F.C. 20%では砂に比べて液状化強度は小さくなる。このような本研究と類似の結果を得た研究例として、戸張・小西らの研究¹³⁾があり、細粒分含有率6%の時に最大の液状化強度であるとしている。これらの試験時の共通点は、細粒分がいずれも非塑性であり、供試体を締固めで作成していることである。これに対して、Troncoso and Verdugo¹⁴⁾、Kuerbis and Vaid¹⁵⁾、黄ら⁹⁾は、低塑性～非塑性の細粒分の増加に伴って非排水繰返し強度は直線的に低下するという結果を得ている。

本研究における以上の結果を含め、これまでのいくつかの研究から非塑性細粒分含有率と液状化強度 R_{20} との関係をまとめてみると図-10が得られる。これから明らかなように非塑性の細粒分が増加すると液状化強度が減少するが、本研究及び小西らの研究ではある含有率で強度が増加するが、含有率の増加に伴い強度が低下しており、傾向としては類似していると考えられる。また、この図に示した本研究と他の研究結果より、細粒分を含む砂の液状化強度は、この範囲で細粒分含有率から推測できると考えられる。しかし、この傾向は塑性を有する細粒分を含む砂質土の液状化強度がその含有量の増加に伴って増加する傾向^{10), 16)}とは好対照をなしている。この事実は細粒分の塑性の有無が液状化強度の判断に重要なインデックスになることを示唆している。

(3) 液状化強度に及ぼす密度の影響

図-11は密度の異なる供試体のR-N関係を示している。これから(2)で定義した液状化強度 R_{20} を求め、これと初期乾燥密度比 ρ/ρ_{dmax} の関係を図-12に示している。供試体作成方法として締固め法に統一した理由は、水中落下法では密度 $0.91\rho_{dmax}$ より緩い供試体を作成することが困難であるためである。また、図中には砂のみ

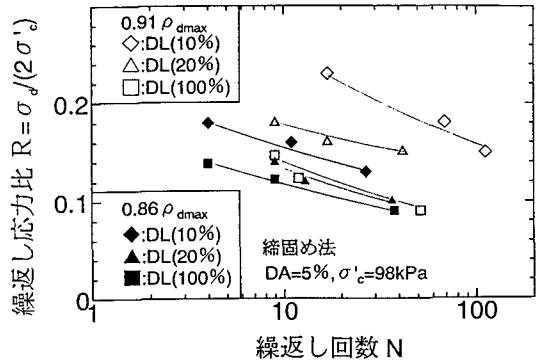


図-11 R-N曲線に及ぼす密度の影響

の場合も併記し、初期密度比による影響をみるために各プロットを直線で結んでいる。これより、F.C. 10%及び20%では砂同様密度の影響が顕著に現われているのに対し、F.C. 100%(シルトのみ)は密度の影響をそれほど受けないことがわかる。

(4) 液状化強度に及ぼす細粒分の種類の影響

細粒分含有率20%の供試体について、液状化強度に及ぼす細粒分の種類の影響を示したのが図-13である。この図をみると粘土鉱物を含むカオリン及び浚渫シルトを含有する供試体の繰返し強度に比べ、調整シルト供試体の繰返し強度が若干小さくなっていることがわかる。このことは、液状化強度には細粒分に含まれる粘土鉱物が関係してくると考えられる。

(5) 静的強度と動的強度の相関性

土の液状化強度曲線(R-N曲線)における応力比Rは我が国では、一般に三軸試験において用いられる繰返しせん断応力 $\tau_a (= \sigma_a/2)$ を拘束圧 σ'_c で正規化した τ_a/σ'_c をもって定義されるのが通例である。しかしながら、同じ土であっても時間効果やセメンテーショ

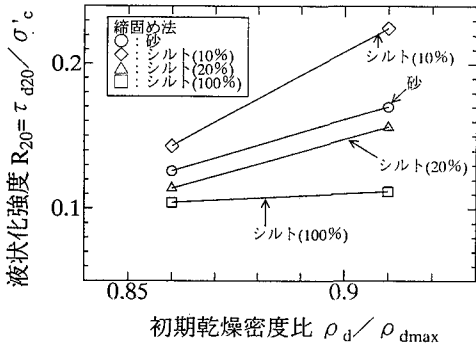


図-12 液状化強度に及ぼす密度の影響

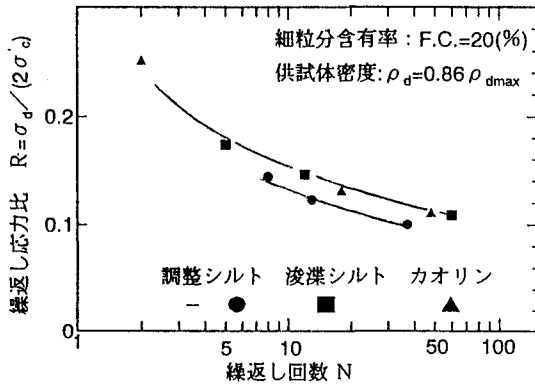


図-13 液状化強度に及ぼす細粒分の種類の影響

ン効果を受けることによって見かけ上先行荷重 σ'_a が σ' より大きくなっている場合がある。このような場合、動的強度を τ_a/σ'_c によって決めることは設計強度としての応力比を過大評価する危険性がある。このようなことを避けるためには、拘側圧 σ'_c を用いた応力比よりも、粘性土と同様^{17)・18)}に図-7で定義した静的非排水強度 s_u によって τ_a を正規化した τ_a/s_u ($=R_s$)を応力比として用い、液状化強度を決めるほうが便利である^{1)・9)・19)・20)・21)}。

この際に問題となるのは s_u としてどのような強度を用いれば良いかという点である。繰返し载荷の問題であるから、圧縮強度 s_{uc} 、伸張強度 s_{ut} あるいはこれらの平均強度 $s_u = (s_{uc} + s_{ut})/2$ を s_u として用いることが考えられる。そこでこれらのいずれを用いればより統一的な繰返し強度曲線が得られるかを確かめたものが図-14(a), (b), (c)である。この図では細粒分の異なる結果をまとめている。これらと従来の方法によって定義された図-15とを比較してみると、伸張強度 s_{ut} を用いた R_s - N 曲線が両対数表示でもっともユニークにプロットされることがわかる。このことは、液状化強度は静的強度に依存し、しかも伸張強度に大きく依存す

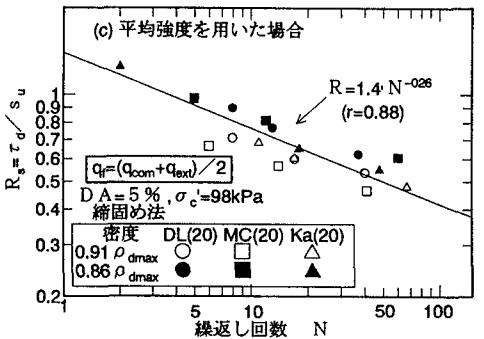
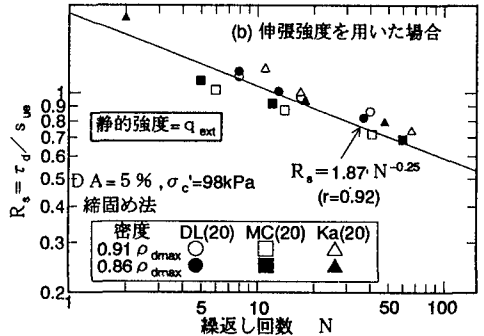
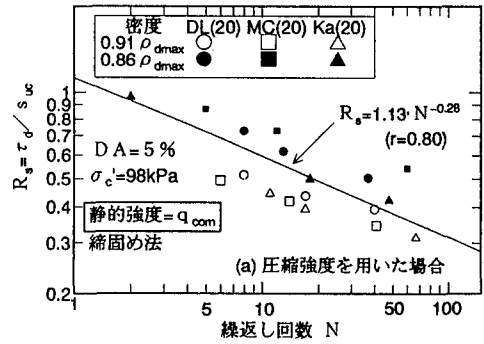


図-14 強度比による液状化強度曲線

るためだと考えられる。また、この図より、本報告で用いた試料に関しては静的伸張強度を求めれば、動的試験を行わずに液状化強度の推測が可能である。

また、細粒分含有率が異なる試験結果についても同様な整理を行った結果が図-16である。これからも s_u として s_{ut} を用いることによって細粒分含有率によらないユニークな液状化強度曲線が求まることがわかる。

以上から、いずれにしても繰返し強度比と载荷回数との関係は、本報告で用いた試料に関しては1つの砂が与えられれば、これに含まれる細粒分の性質、量などに依存しない繰返し強度曲線が得られることがわかる。

したがって、図-16は式(1)のように定式化できることがわかる。

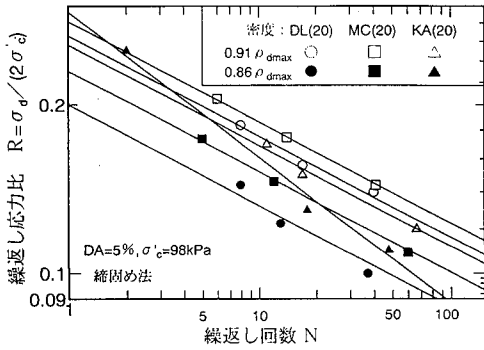


図-15 従来の方法による液状化強度曲線

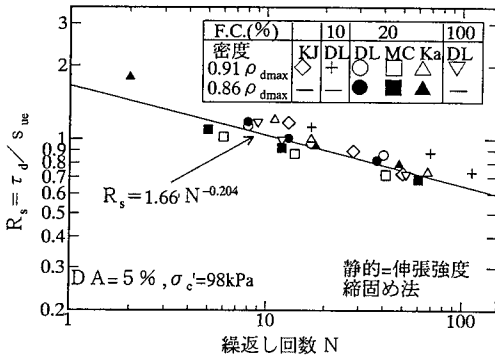


図-16 細粒分含有率の異なる供試体の強度比曲線

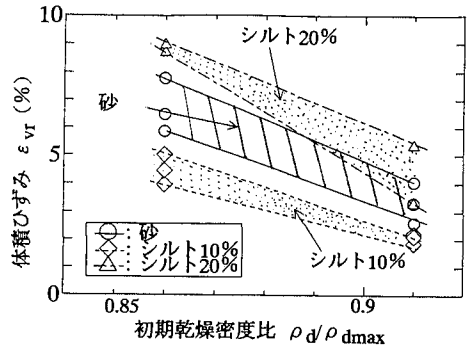


図-17 体積ひずみと密度比の関係

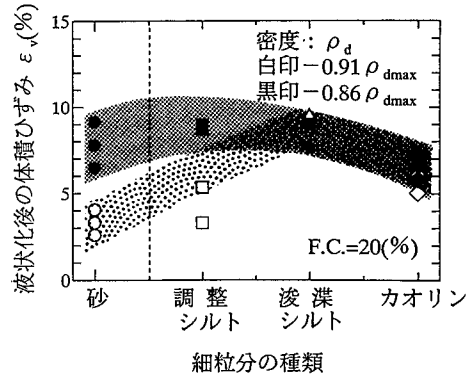


図-18 体積ひずみと細粒分の種類の関係

ここで、

$$R_s = \frac{\tau_d}{s_u} = aN^b \quad (1)$$

a, bは実験定数であるがそれらは砂の種類、供試体作成方法による堆積構造などに依存すると考えられる。

5. 液状化後の体積変化特性

(1) 液状化後の体積変化に及ぼす要因

繰返し三軸試験により液状化させた後、排水状態にして過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化を測定し、供試体の体積ひずみを求めた。

まず、細粒分含有率の影響を調べるため、締固めた供試体について、液状化後の体積ひずみ ϵ_{vr} と初期乾燥密度比 ρ_d / ρ_{dmax} の関係を図-17に示す。これには、比較のため砂 (DL=0%) の結果も付記してあり、また各初期密度比による影響を知るために各プロットを直線で結んでいる。砂に比べて細粒分含有率10%では体積ひずみは小さく、含有率20%では砂に比べて体積ひずみは大きくなる。この相違は液状化強度の大小に関係している。すなわち、図-9で示したように砂に比べて含有率10%で

は液状化強度が大きい(砂粒子間に存在する非塑性の細粒分が骨格を形成するため体積ひずみは小さく、含有率20%では液状化強度が小さい(細粒分が砂粒子の間隙部分を埋める)ため体積ひずみは大きくなっている。

さらに、砂及び細粒分含有率20%の供試体について細粒分の種類の影響を調べた結果をまとめたものが、図-18である。図中の帯状の線は密度の相違を示したものである。この図より、0.91 ρ_{dmax} (白印) より0.86 ρ_{dmax} (黒印) の方が体積ひずみに及ぼす細粒分の種類の影響はほとんどみられない。また、砂及び調整シルト混合土では密度の相違によって体積ひずみは異なり密度の小さい供試体の方が体積ひずみは大きい。一方浚渫シルト混合土及びカオリン混合土では密度の相違が体積ひずみへ及ぼす影響はほとんどみられない。つまり、粘土鉱物を含む細粒分を砂に混合した砂は、液状化後の体積ひずみは、供試体初期密度の大小に左右されることがわかる。

(2) 液状化後の体積変化と液状化安全率の関係

前報¹⁾では、液状化後の体積ひずみを繰返し载荷時の最大せん断ひずみ γ_{max} をパラメータとして整理したが、本報ではIshihara²²⁾らの方法にならって液状化

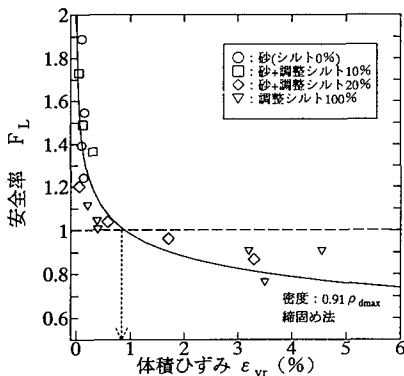


図-19 F_L と体積ひずみの関係

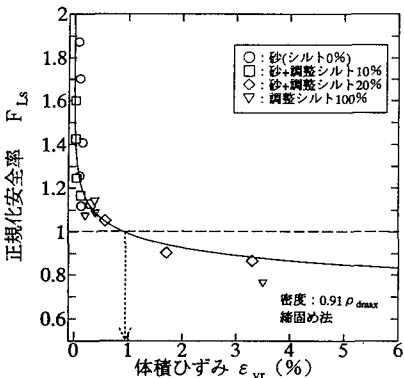


図-20 F_{LS} と体積ひずみの関係

後にどの程度の体積ひずみが生じるかを液状化安全率で評価しようというものである。この安全率と体積ひずみとの関係を密度 $0.91 \rho_{dmax}$ の締固め供試体についてまとめたものが図-19, 20である。

ここで図-19は、従来の液状化強度 $R_{20}(\tau_d / \sigma'_c)$ を用いた安全率 $F_L^{2,3)}$

$$F_L = \frac{R_{20}}{L} = \frac{(\tau_{d20} / \sigma'_c)}{(\tau_d / \sigma'_c)} \quad (2a)$$

τ_{d20} : N=20回で液状化する繰返しせん断応力
 σ'_c : 拘束圧, τ_d : 繰返しせん断応力

と体積ひずみの関係を示し、図-20は式(1)による正規化繰返しせん断応力比 R_{s20} を用いた正規化安全率 F_{LS}

$$F_{LS} = \frac{R_{s20}}{R_s} = \frac{(\tau_{d20} / s'_u)}{(\tau_d / s'_u)} \quad (2b)$$

s'_u : 非排水伸張強度

s'_u : 繰返し載荷によって生じた最大せん断ひずみに対応する静的伸張試験時の非排水伸張強度

と体積ひずみの関係を示している。いずれの関係においても、細粒分含有率によらない一義的な関係が得られるが、前者に比べ後者のほうが両者の関係にばらつきがやや少ないことがわかる。また、いずれにおいても安全率 $F=1$ における体積ひずみ(破線)は1%以下である。

6. 結論

塑性のない細粒分を含む砂質土について乾燥密度を統一した方法で供試体を作成し、一連の非排水繰返し三軸試験を行った。これにより、液状化特性及びその後の体積変化特性に及ぼす①初期密度、②細粒分含有率、③細粒分の種類の影響について調べた。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 細粒分含有率の増加に伴って液状化強度は低下するが、初期の密度を同一にした場合では、細粒分含有率10%の時が最も大きい液状化強度を示す。これは粒子間にほど良く存在する細粒分が強い骨格形成に寄与するためであると考えられる。
- 2) 砂に比べて液状化強度が小さい混合供試体について細粒分の種類の影響を比較すると、一次鉱物、及び粘土鉱物から成る細粒分を有する供試体の方が塑性のない細粒分を含む供試体より大きい液状化強度を示した。このことから、細粒分の物性が液状化強度に影響を及ぼすことがわかる。
- 3) これまでに、用いられてきた繰返し応力比 R (せん断応力/拘束圧)に代わって、繰返しせん断応力を静的非排水強度で除した正規化応力比(繰返しせん断強度比) R_s を用いることにより、密度、細粒分含有率、細粒分の種類によらないシルトのユニークな繰返し強度曲線が得られる。
- 4) 液状化後の体積ひずみ ϵ_{vr} は、上記の繰返し強度比で定義された液状化安全率 F_L とユニークな関係がある。また、細粒分として非塑性シルトを混合した砂の液状化後の ϵ_{vr} - F_L 関係は細粒分含有率の影響を受けない。

参考文献

- 1) 足立雅樹, 安原一哉, 福島正明: 非塑性シルト質土の液状化とそれに伴う体積変化特性, 土木学会論文集 No. 535/III-34, pp. 145-154, 1996.
- 2) 土木学会: 阪神大震災震害調査, 土木学会緊急報告会資料, pp. 13-18, 1995.
- 3) 1993年地震災害調査報告: 1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告, 土質工学会, pp. 187-214, 1994.
- 4) 金子正之, 田村圭司, 佐々木康, 勝山明雄, 佐藤謙司:

- 平成5年北海道南西沖地震による河川堤防被害について
第29回土質工学研究発表会概要集, Vol. 2, pp.971-972,
1994.
- 5) 沼田淳紀, 太田直之, 森伸一郎, 境野典夫, 滝本幸夫:
1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の液状化特性,
第20回土木学会地震工学研究発表会概要集, pp. 241-
244, 1989.
- 6) 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,
No. 2, pp.17-22, 1991.
- 7) Ishihara, K. and Koseki, J.:Cyclic shear strength
of fines-containing sands, *12th ICSMFE, Special
Volume of Influence of Local Soils on Seismic
Response*, pp. 101-105, 1989.
- 8) 安原一哉, 兵動正幸, 平尾和年:石炭灰による埋立地盤
の液状化特性, 土と基礎, Vol. 39, No. 2, pp. 5-10, 1991.
- 9) 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.
- 10) 桑野二郎, 飯村博忠, 中澤博志, 杉原弘一: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,
粘性土動的性質に関するシンポジウム論文集, pp. 143
-148, 1995.
- 11) 足立雅樹, 安原一哉, 佐藤研一:砂に粘土を混合した
土のせん断特性, 第28回土質工学会研究発表会概要集,
Vol. 1, pp. 879-882, 1993.
- 12) 土質工学会:土質試験の方法と解説, pp.201-210
- 13) 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概要集,
Vol. 2, pp. 727-728, 1994.
- 14) Troncoso, J.H. and Verdugo, R.:Silt content and
dynamic behavior of tailing sands, *Proc. 11th
ICSMFE*, Vol. 11, pp. 1311-1314, 1985.
- 15) Kuerbis, R. and Vaid, Y.P.:Static and cyclic
undrained behavior of silty sands, *12th Special
Volume for Discussion Session on Influence of
Local Soils on Seismic Response*, 1989.
- 16) 原田光男, 滝沢義彦, 白井伸一:細粒分を含む砂によ
って造成された海岸埋立地盤の液状化特性, 土と基礎,
Vol. 38, No. 6, pp. 21-26, 1990
- 17) 安原一哉:飽和粘性土の繰返し強度について, 第31回
地盤工学研究発表会概要集, Vol. 1, pp. 1045-1046
1996.
- 18) Hirao, K. and Yasuhara, K.:Cyclic strength of
underconsolidated clay, *Soils and Foundations*,
Vol. 31, No. 4, pp. 180-186, 1991.
- 19) 藤井照久, 兵動正幸, 小波岳治, 村田修一, 森尾敏:
異方圧密砂の非排水繰返し三軸圧縮強度について, 第
26回土質工学研究発表会概要集, Vol. 1, pp. 729-730,
1991.
- 20) 飯村博忠, 桑野二郎, 中澤博志, 杉原弘一:カオリン
を含む砂の非排水単調及び繰返しせん断特性, 第30回
土質工学研究発表会概要集, Vol. 2, pp. 839-840, 1995.
- 21) 桑野二郎, 中澤博志, 杉原弘一, 矢部浩史:細粒分を
含む砂の非排水単調及び繰返しせん断特性, 第31回地
盤工学研究発表会概要集, Vol. 1, pp. 991-992, 1996.
- 22) Ishihara, K. and Yoshimine, M:Evaluation of
settlements in sand deposits following
liquefaction during earthquakes, *Soils and
Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188, 1991
- 23) 安田進, 山口勇, 田中猛:液状化と沈下量, 過剰間隙
水圧, 第36回土木学会年次学術講演概要集, 第三部,
pp. 94-95, 1981.

(1997. 2. 18 受付)

LIQUEFACTION AND POST-LIQUEFACTION RECOMPRESSION CHARACTERISTICS OF SAND CONTAINING NON-PLASTIC SILT

Masaki ADACHI, Kazuya YASUHARA and Atsushi SHIMABUKURO

A series of cyclic triaxial tests was conducted to investigate liquefaction and post-liquefaction recompression characteristics of sands containing non-plastic silts as the fine which were prepared by tamping and water sedimentation at laboratory. In particular, the investigation was focused on the effects of relative density, silt content and kind of silt on those characteristics. Based on the results from tests, the emphasis was placed on the following: (1) There is a unique relationship between normalized strength ratio and number of load cycles, which is independent of the above three influential factors. (2) Post-liquefaction volumetric strain can be correlated to the liquefaction safety factor defined by the cyclic strength ratio, irrespective of the fine content.