

まさ土の非排水繰返しせん断強度と 相対密度の評価に及ぼす細粒分の影響

金 佑泰¹・兵動 正幸²・中田 幸男³・吉本 憲正⁴・野田 翔兵⁵

¹韓国海洋研究院 沿岸開発エネルギー研究部 (〒426-744 韓国京畿道安山市常緑区四2同1270)

E-mail: wootackim@kordi.re.kr

²正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hyodo@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nakata@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 山口大学助教 大学院理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nyoshi@yamaguchi-u.ac.jp

⁵学生会員 山口大学 大学院理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: r003wf@yamaguchi-u.ac.jp

2地点から採取したまさ土を対象に一連の非排水繰返し三軸試験を行った。試験結果から得られたまさ土の液状化強度は、相対密度80%以下ではほぼ一定であり、相対密度が100%以上で急上昇することが観察された。これは、JISで規定された最小、最大密度試験が乾燥状態の試料を対象としているのに対し、まさ土は細粒分を有し、水中ではコラプスを起こし、さらに圧密により体積収縮するため、緩いまさ土は結果的にほぼ一様の密度になってしまったためと考えられる。そこで、本研究では湿潤試料を対象に最小、最大密度試験を行い、新しい相対密度を再定義した。この相対密度と液状化強度との関係をまとめると、相対密度の変化に対しまさ土も豊浦砂と同様な挙動を示し、細粒分を有するまさ土の液状化強度を相対密度との関係で説明できることが明らかとなった。

Key Words : masado, fines content, compression, undrained cyclic shear strength, relative density

1. まえがき

まさ土は、粒度分布が良く締固め易いことから各種盛土材料として頻繁に利用されている。しかし、1995年の兵庫県南部地震では六甲山系のまさ土で埋立てられたポートアイランドや六甲アイランドなどの人工島で液状化が発生し港湾施設など¹⁾³⁾に大きな被害を与えた。まさ土は西日本に広く分布し、礫からシルトに至る広範な粒度組成から成り、粒子自体が脆弱で破碎し易い材料であるため破碎性土と呼ばれ、これまで「特殊土」として取り扱われてきた。破碎性土は、外力が加わることで粒子全体または一部が破碎し、それにより圧縮沈下や地盤支持力、せん断抵抗の低下をきたすことがある⁴⁾⁵⁾。圧縮特性は、外力による圧縮変形だけではなく、雨水の浸透や地下水位の上昇による水浸特性との関連もある。不飽和状態の地盤に雨水などが浸入することによってサクシヨンの低下によるコラプス沈下を起こし、構造物の不同

沈下などを起こすことも懸念される⁶⁾⁷⁾。このような圧縮特性や水浸特性は、土の風化度、細粒分含有率、間隙比などに左右される⁸⁾¹⁰⁾。

まさ土は細粒分を含むが、非塑性の細粒分を有する場合には便宜上砂と同様の方法で相対密度を求めて評価されることが多い。既往の研究で、まさ土の液状化強度は相対密度 $D_r=50\sim 80\%$ 程度の変化に対しさほど変化がないという報告がある¹⁾⁹⁾¹¹⁾。一方では、相対密度が100%を越えると液状化強度は増加するという結果も得られている⁸⁾¹²⁾。砂の相対密度を規定する最小、最大密度試験はJIS A 1202-1999¹³⁾によって定められているが、その適用は細粒分含有率5%以下の砂とされている。それ以上の細粒分を有する土には規格がないままJIS法が援用されているのが現状である。まさ土の液状化強度を的確に評価する上で、 N 値と相対密度、相対密度と液状化強度の関係を考えた時に、まさ土のように相対密度が100%を超えないと液状化強度が高くないような材料では、

表-1 試料の物理的性質

Sample	F _c (%)	ρ _s (g/cm ³)	e _{max}	e _{min}	Δe	U _c	LI
P.I.Masado	13	2.624	0.967	0.491	0.476	20.81	0.932
	0	2.618	0.967	0.512	0.455	4.67	0.716
Iwakuni Masado	11	2.673	1.042	0.616	0.426	6.68	1.63
	0	2.632	0.935	0.510	0.425	2.872	2.257
Toyoura	0	2.64	0.973	0.635	0.338	1.33	0.327

砂と同様の方法では適切な評価が出来ないため、相対密度の規定を再評価することは極めて重要と考えられる。液状化強度を N 値から直接評価する方法もあるが、まさ土についてのデータベースはほとんどなく、 N 値は相対密度に結び付けて使用されることが多いことから、相対密度を明確にすることは重要なことと考えられる。

本研究では、まさ土の諸特性(物理的特性、破碎性、締め特性など)に着目し、山口県岩国市、兵庫県神戸市より採取した乱したまさ土を対象とし、最小、最大密度試験の方法について検討し、まさ土に対する的確な相対密度の評価と液状化強度に及ぼす細粒分の影響を調べた。

2. 試料及び実験方法

本研究では神戸市の人工島ポートアイランドで採取したまさ土 (P.I. Masado) と山口県岩国市愛宕山で採取したまさ土 (Iwakuni Masado) の2種類の試料を用いて実験を行った。実際には原位置でのまさ土は礫分を含んでいたが、土全体のマトリックスは、砂分およびシルト分が支配しているという判断と供試体寸法の制約から、実験には両試料とも礫分を除去した 2mm ふり通過分を用いた。本論文ではこれらを原粒度まさ土と呼ぶ。また、細粒分を除去したまさ土についても実験を行った。さらに比較材料として、シリカ砂である豊浦砂についても実験を行った。図-1 に実験に用いた試料の粒度を示す。Iwakuni Masado の方が P.I. Masado に比べより細かい砂分を含み、いずれも 10%強の非活性の細粒分を含んでいる。表-1 に用いた試料の物理的性質を示す。表中に、JIS 法で調べた最小、最大間隙比を示しているが、最大間隙比と最小間隙比の差がまさ土は豊浦砂に比べて大きいことがわかる。また細粒分を含むまさ土の最大密度は、P.I. Masado で $\rho_{dmax}=1.760\text{g/cm}^3$ 、Iwakuni Masado で $\rho_{dmax}=1.654\text{g/cm}^3$ であったが、Inagaki ら¹⁴⁾により 1995 年兵庫県南部地震直後の神戸六甲アイランドから採取された凍結試料では、乾燥密度が $\rho_d=1.7\sim 2.1\text{g/cm}^3$ であったことが報告されており、埋立てまさ土の密度は、水中においてははかり高いことが推察される。風化の程度を示す尺度となる強熱減量値¹⁵⁾は Iwakuni Masado が P.I. Masado の約 2 倍となり Iwakuni Masado の方がより風化が進んでいることが示唆

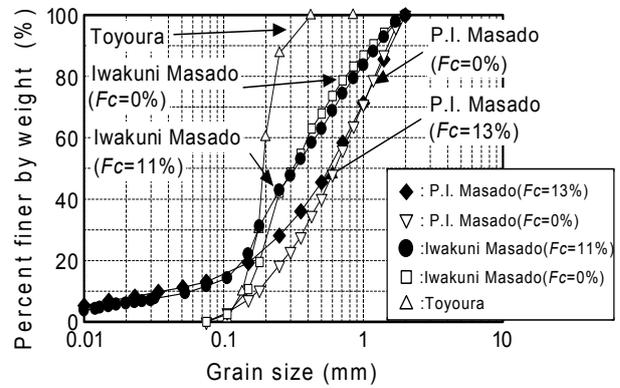


図-1 実験に用いた試料の粒度

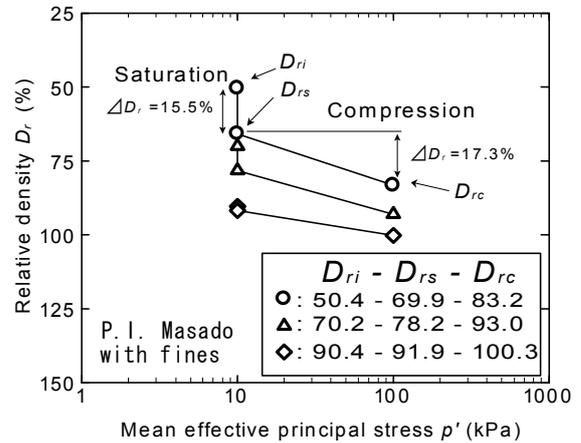


図-2 空中落下漏斗法により作製した原粒度のP.I. Masado供試体($F_c=13\%$)の水浸および等方圧縮による密度の変化

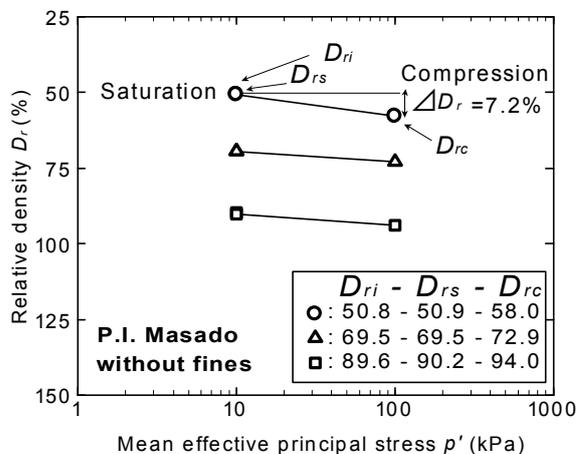


図-3 空中落下漏斗法により作製した細粒分を除去したP.I. Masado供試体($F_c=0\%$)の水浸および等方圧縮による相対密度の変化

される。

三軸供試体は空中落下漏斗法と水中堆積法の2通りの方法により作製した。空中落下漏斗法においては、細粒分の飛散を防ぐために、気乾状態の試料をモールド内できるだけ低い位置から落下させ、モールド側壁を木槌で所定回数打撃を与え所定密度の供試体を作製した。供試体作製後、二酸化炭素を注入し、脱気水で飽和させB値0.95以上を確保した。一方、水中堆積法では、これも細粒分の分離を少なくするため、モールド内に1cmほど水を張り、その中に脱気水と混合し24時間真空圧を与えて十分に脱気した試料をスプーンでゆっくり投入して供試体を作製した。さらに、密度調整のためにモールド側壁を木槌で所定回数打撃した。また、密な供試体の作製時には、モールド内の供試体の上に2.8kgの錘を載せモールド側面を木槌で打撃した。この方法は、ASTMによる最大密度試験法¹⁸⁾に習ったものである。このように作製した試料に対し、一連の非排水繰返し三軸試験を周波数0.1Hzの正弦波の軸荷重を与えることにより行った。

3. まさ土の水浸および等方応力載荷による圧縮特性

先にも述べたとおり、まさ土など細粒分を含む材料は、圧縮性が卓越していることが知られている。原因の1つは水浸による圧縮であるが、これは、不飽和で十分に締固められていない地盤に雨水等が浸入することによってサクションが低下し地盤が収縮する現象である。この体積収縮はコラプスと呼ばれる。2つ目は、粒子が脆弱であることから有効拘束圧の増加により粒子破砕を伴い、地盤の圧縮が助長されることである。まず、気乾状態の試料を空中落下漏斗法で作製した供試体について、供試体セット時から通水飽和時、等方圧密終了時の間隙比変化について調べた。

ここで、供試体作製後の間隙比を e_i 、飽和のための通水後の間隙比を e_s 、圧密後の間隙比を e_c とした。それぞれに対応する相対密度も D_{ri} 、 D_{rs} 、 D_{rc} と表示する。図-2に原粒度P.I. Masadoの、図-3に細粒分を除去したP.I. Masadoの初期目標相対密度 $D_{ri}=50, 70\%, 90\%$ の供試体の $D_r - \log p'$ 関係をそれぞれ示す。まず通水過程においては、図-2の原粒度P.I. Masadoでは、初期相対密度 $D_{ri}=50.4\%$ ($e_i=0.727$)のとき、軸方向に平均0.16cm(1.6%)、直径方向に0.06cm(1.2%)収縮し相対密度減少 $\Delta D_r=15.5\%$ (間隙比減少 $\Delta e=0.074$)となった。それにより飽和供試体の相対密度は $D_{rs}=69.9\%$ ($e_s=0.653$)となった。この通水による体積収縮は、初期相対密度が高くなるにつれ減少し、 $D_{ri}=90.4\%$ においては、水浸による体積収縮はほとんど生

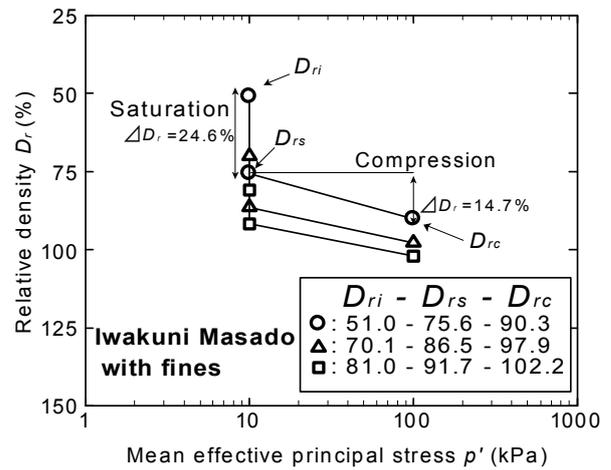


図-4 空中落下漏斗法により作製した原粒度のIwakuni Masado供試体($F_c=11\%$)の水浸および等方圧縮による相対密度の変化

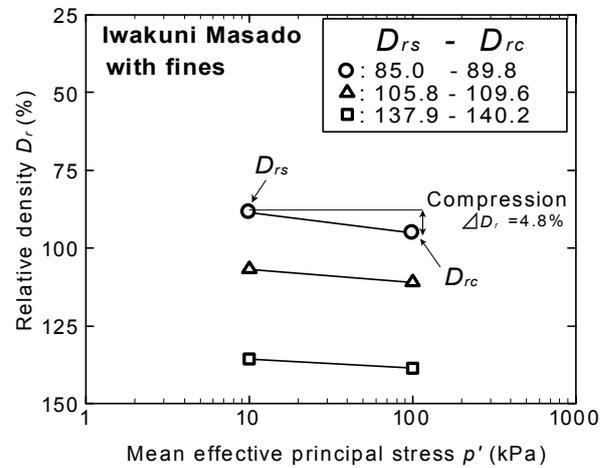


図-5 水中堆積法により作製したIwakuni Masado供試体($F_c=11\%$)の水浸および等方圧縮による相対密度の変化

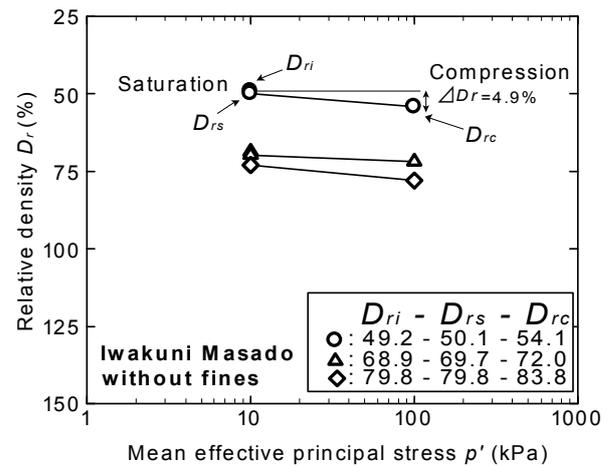


図-6 空中落下漏斗法により作製した細粒分を除去したIwakuni Masado供試体($F_c=0\%$)の水浸および等方圧縮による相対密度の変化

じていない。次に、等方圧の増加により試料は圧縮する。図-2において、 $D_{ri}=50.4\%$ の供試体では、 $\sigma'_c=10\text{kPa}$ から 100kPa の拘束圧の増加に対して $\Delta D_r=17.3\%$ 程度相対密度が増加している。

一方、細粒分を除去した試料については図-3から明らかのように、水浸による密度増加は、ほとんど生じていない。このことより水浸による体積収縮、密度増加は、細粒分の存在によることが明らかである。また、等方圧縮においては、細粒分を除去した試料の目標相対密度 $D_{ri}=50\%$ の供試体は原粒試料供試体のそれに比べ約半分の圧縮量となっている。これは、細粒分を含んだものの方が構造骨格が弱く圧縮性が高いためと考えられる。

図-4は、原粒の Iwakuni Masado の空中落下漏斗法による、図-5にはその水中堆積法による供試体、図-6には細粒分を除去し、空中落下漏斗法により作製した試料の D_r - $\log p'$ 関係をそれぞれ示す。まず、図-4の原粒の Iwakuni Masado の空中落下漏斗法による供試体においては、原粒の P.I. Masado と同様水浸によって軸方向の沈下、直径方向の収縮が認められる。その傾向は相対密度の低いものほど顕著であり、 $D_{ri}=51.0\%$ 供試体では軸方向に $0.25\text{cm}(2.5\%)$ の沈下、直径方向に $0.1\text{cm}(2.1\%)$ の収縮を生じ、相対密度は $\Delta D_r=24.6\%$ の増加を示している。また、 $\sigma'_c=10\text{kPa}$ から 100kPa までの等方圧の増加に対して $\Delta D_r=14.7\%$ 程度相対密度が増加している。一方、図-5には水中堆積法による結果を示しているが、この方法で密な供試体作製のためには、供試体の上に錘を置いてモールド側面を打撃した。原粒の Iwakuni Masado であっても最初から密な供試体の作製が可能であることが分かる。

また、細粒分を除去した試料では、図-6に示すように空中落下漏斗法による Iwakuni Masado においても圧縮量が大きく減少し、原粒試料に比べ、圧縮量が半分以下となっている。P.I. Masado と Iwakuni Masado を比較すると、風化度が高いと考えられる Iwakuni Masado のほうが水浸および等方圧の増加によるトータルの圧縮量がともに大きく現れている。

4. 非排水繰返しせん断特性

P.I. Masado, Iwakuni Masadoについて細粒分の有無、相対密度、拘束圧の異なる条件下で一連の非排水繰返しせん断試験を行い、液状化強度に及ぼすそれぞれの影響について調べた。図-7, 8に原粒Iwakuni Masadoの空中落下漏斗法による供試体における拘束圧、相対密度の異なる試料の液状化強度曲線を示す。図-7は、初期目標相対密度 $D_{ri}=50\%$ 一定で、拘束圧50, 100, 150kPaと変化したものであり、図-8は $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 一定で初期目標相対密度を

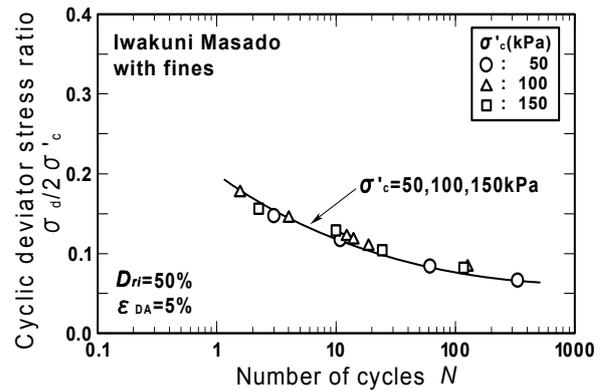


図-7 原粒度Iwakuni Masado($F_c=11\%$)の非排水繰返しせん断強度に及ぼす拘束圧の影響

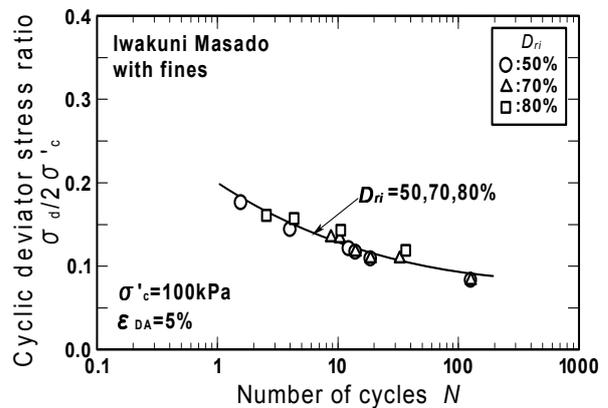


図-8 原粒度 Iwakuni Masado($F_c=11\%$)の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期相対密度の影響($D_{ri}=50-80\%$)

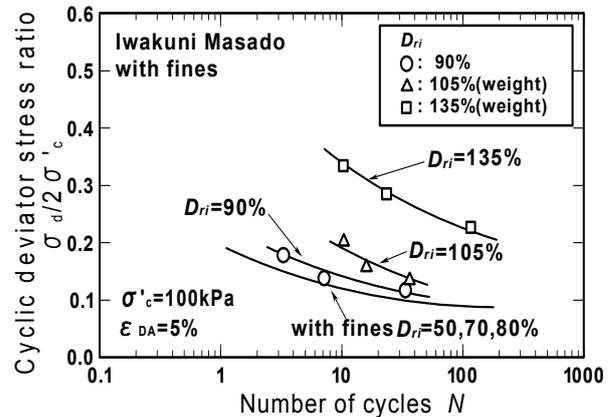


図-9 原粒度Iwakuni Masado($F_c=11\%$)の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期相対密度の影響($D_{ri}=90-135\%$)

$D_{ri}=50\%, 70\%, 80\%$ と変化した結果を示している。図-7より初期相対密度が一定の場合、拘束圧の違いによる液状化強度の違いは見られない。また、図-8において、拘束圧一定で初期目標相対密度を $D_{ri}=50\%, 70\%, 80\%$ と変化した場合においても液状化強度に有意な差は認められない。これらは、既往の研究結果^{1), 9), 11)}とも一致する。

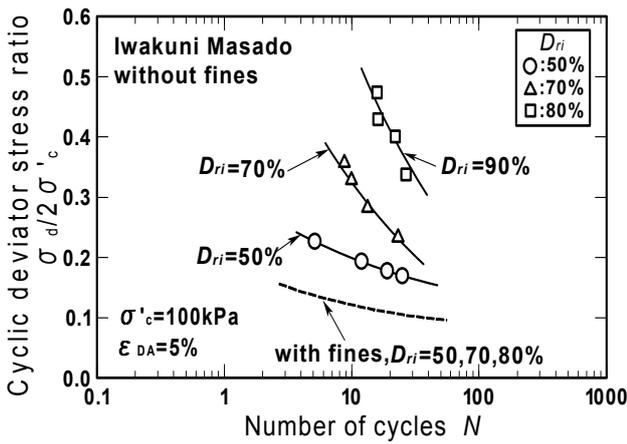


図-10 細粒分を除去したIwakuni Masado($F_c=0\%$)の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期相対密度の影響($D_{ri}=50-80\%$)

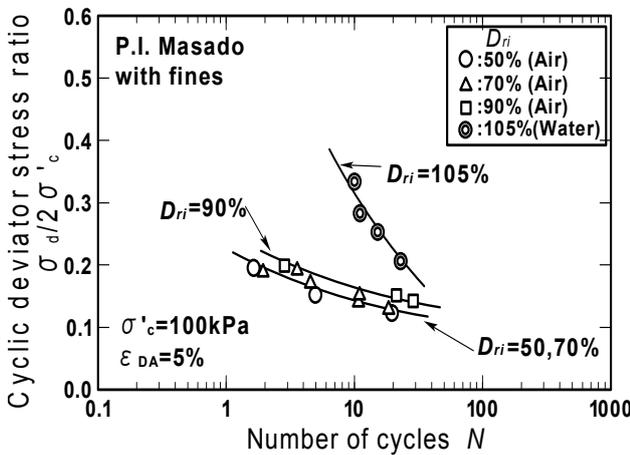


図-11 原粒度P.I. Masado($F_c=13\%$)の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期相対密度の影響($D_{ri}=50-105\%$)

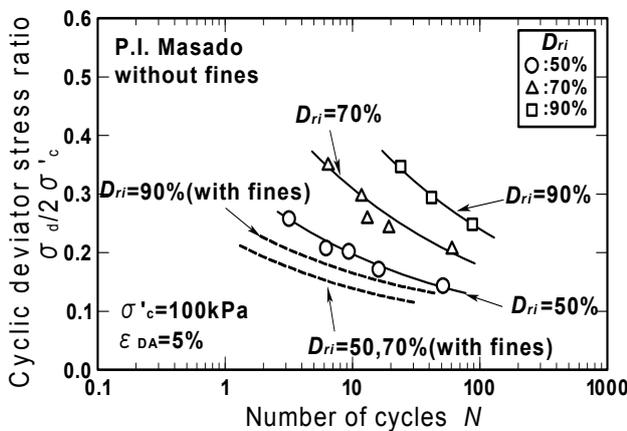


図-12 細粒分を除去したP.I. Masado($F_c=0\%$)の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期相対密度の影響 ($D_{ri}=50-90\%$)

これは、空中落下漏斗法により作製した供試体は、初期目標相対密度 D_{ri} が異なっている、飽和、圧密過程において体積収縮を起こし、結果的にほぼ同様の相対密度になったためと考えられる。

図-9に拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 一定で水中堆積法で初期目標相対密度を $D_{ri}=90\%$, 105% , 135% と変化させた場合の液状化強度曲線を示す。ここで、いずれのまさ土も水中堆積法に加えてモールド側壁を木槌で打撃する方法では $D_{ri}=90\%$ が最大の相対密度であったが、供試体上部に 2.8kg の錘をのせてモールド側面に打撃を与えることにより相対密度 100% を超える供試体を作製することができた。原粒Iwakuni Masadoにおいては $D_{ri}=80\%$ 以下では非排水繰返しせん断強度に有意な差は認められないが、 $D_{ri}=90\%$ を超える辺りから液状化強度が急増する傾向が認められる。図-10は、細粒分を除去したIwakuni Masadoの初期目標相対密度 $D_{ri}=50\%$, 70% , 80% における液状化強度曲線をそれぞれ示したものである。図中に原粒Iwakuni Masadoの結果についても比較のため示している。細粒分を除去した試料では初期目標相対密度 $D_{ri}=100\%$ 以下であっても、相対密度の増加による強度の増加は著しく、初期目標相対密度を 50% から 80% に増加することで、繰返し回数20回時の液状化強度は約2倍となっている。また、細粒分の有無で比較すると、同じ相対密度でも細粒分を除去したものは細粒分を含んだものよりも液状化強度が高いことがわかる。図-11に原粒P.I. Masadoの各初期目標相対密度 $D_{ri}=50\%$, 70% , 90% , 105% における液状化強度曲線を示す。ここで、 $D_{ri}=50\%$, $D_{ri}=70\%$, $D_{ri}=90\%$ は空中落下漏斗法により作製したものであり、 $D_{ri}=105\%$ 供試体は上に錘を置き水中堆積打撃法によって作製したものである。 $D_{ri}=50\%$, 70% , 90% においてはわずかの液状化強度の違いしか認められないが、錘を載せて水中堆積打撃法により作製した試料は $D_{ri}=100\%$ を越え、液状化強度も著しく増加している。原粒P.I. Masadoも原粒Iwakuni Masadoと同様に $D_{ri}=50\% \sim 90\%$ までは液状化強度の差異はあまりないが初期相対密度が 100% を超えると液状化強度は急増する傾向が認められる。

図-12に細粒分を除去したP.I. Masadoの初期相対密度の異なる試料の液状化強度曲線を示す。併せて図中に原粒P.I. Masadoの液状化強度曲線も比較として示す。Iwakuni Masadoと同様に細粒分を除去することで液状化強度は著しく増加し、相対密度が 50% から 90% に増加することで、繰返し回数20回時の強液状化強度は約2倍となっている。また、細粒分の有無で比較すると、同じ相対密度でも細粒分を除去したものは細粒分を含んだものよりも液状化強度が高いことが明らかである。図-13に $D_{ri}=50\%$, 70% , $\sigma'_c=100\text{kPa}$ における原粒Iwakuni Masadoと原粒P.I. Masadoの液状化強度曲線の比較を示す。

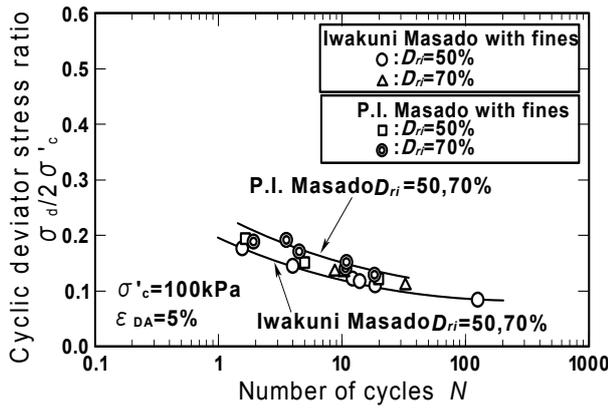


図-13 原粒度Iwakuni Masadoおよび原粒度P.I. Masadoの非排水繰返しせん断強度

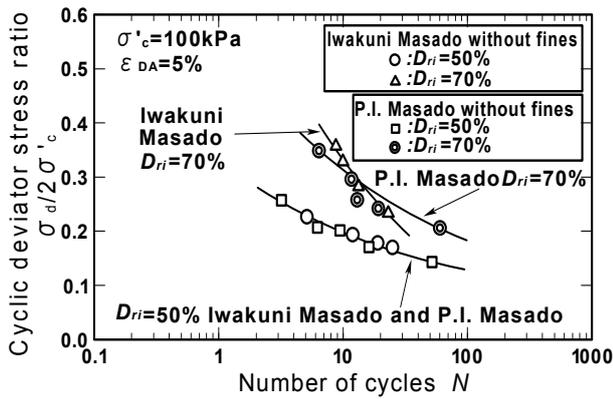


図-14 細粒分を除去したIwakuni MasadoおよびP.I. Masadoの非排水繰返しせん断強度

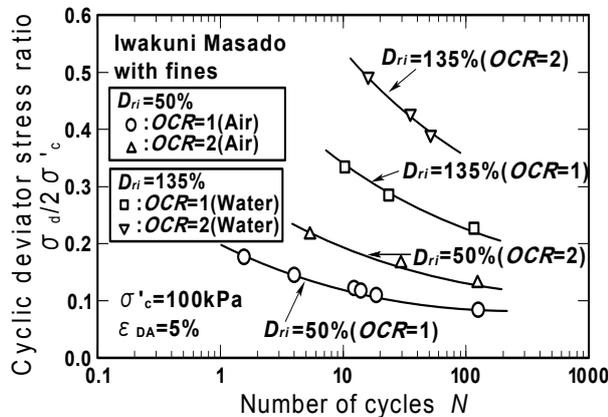


図-15 原粒度Iwakuni Masadoの非排水繰返しせん断強度におよぼす過圧密履歴の影響

同一相対密度においてはP.I. Masadoの方が、Iwakuni Masadoより液状化強度が高いことが認められる。

図-14に $D_{ri}=50\%$, 70% , いずれも細粒分を除去したIwakuni MasadoとP.I. Masadoの液状化強度曲線を示す。いずれの相対密度においても細粒分を除去した試料の液状化強度にさほどの違いは見られない。図-15は、原粒Iwakuni Masadoの空中落下供試体および水中堆積供試体それぞれの液状化強度線を過圧密履歴(OCR=2)の有無で比較したものである。過圧密履歴を与えることによ

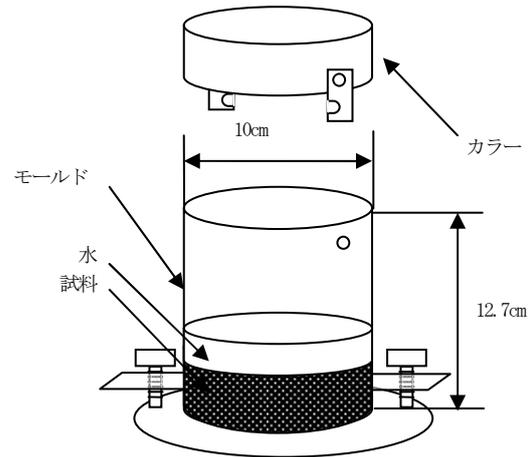


図-16 中型モールドの模式図

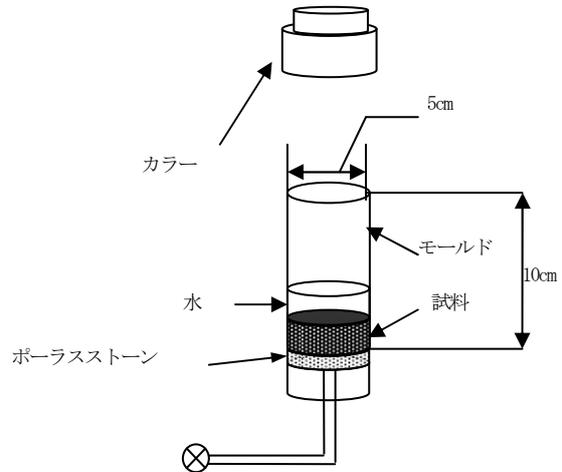


図-17 提案法の模式図

表-2 本研究で用いた最小・最大密度試験方法

試験法	試験時の土の状態	モールド	最小密度試験	最大密度試験
JIS法	乾燥	直径6cm, 高さ4cm	漏斗法	ハンマーによるモールド側面打撃
ASTM法	乾燥	直径10cm, 高さ12.7cm	漏斗法	12kgの錘载荷の上 ハンマーによるモールド側面打撃
中型モールド法	湿潤	ASTMと同じ大きさ	スプーン法	ASTM法と同じ
提案法	湿潤	直径5cm, 高さ10cm 下部から排水可能	スプーン法	2.8kgの錘载荷の上 ハンマーによるモールド側面打撃

て液状化強度は顕著な増加傾向を示している。空中落下漏斗法、水中堆積法で互いの液状化強度は異なるが、過圧密履歴による液状化強度の増加率は両者でほぼ同程度となっている。

5. 細粒分を含むまき土の最小、最大密度の新たな評価方法

相対密度を決定する上での砂の最小、最大密度試験はJISによって定められている。粒径2mm以上の礫を含む試料の最小、最大密度試験には原ら^{16, 17)}の提案法があり、この方法は礫分を含む地盤材料の試験法JGS 0132-2000として新規に基準化された。しかしながら、前述のとおり、砂に対する現行のJIS法は細粒分含有率5%以下の砂質土が対象とされており、5%以上の細粒分を有する砂質土に対しては規定がないまま、現行の方法が用いられている現状にある。本研究においても、細粒分を有するまき土に現行のJIS法を用いて最小、最大密度を求めて評価を行ったところ、原粒P.I. Masado, 原粒Iwakuni Masadoともに飽和供試体では初期相対密度が100%を超えるものも存在する結果となった。細粒分を含むまき土は、乾燥状態では不安定な構造を形成し、水浸するとコラプスにより体積収縮を起こすことから、飽和試料の液状化強度を議論する場合、最小、最大密度も湿潤状態で定義する必要があると思われる。

そこで、現行のJIS法、ASTM法⁷⁾も含め、以下の方法で最小、最大密度試験を行った。現行のJIS法とASTM法はいずれも乾燥試料を対象としたものであるが、モールドの大きさが両者で異なりASTM法では内径10cm、高さ12.8cmのモールドを用いている。また最大密度試験においてASTM法では試料の上に錘を載せてモールドに打撃を加える点も両者で異なる点である。本研究では、湿潤試料を対象にASTM法と同じ寸法のモールドを用いた場合(以下中型モールド法と呼ぶ)と、内径5cm、高さ10cmの三軸供試体作製の2つ割りモールドを用いる場合(以下提案法と呼ぶ)の2通りについて試行した。

まず、最小密度試験について述べる。図-16, 17には中型モールド法と提案法の試験装置を示す。水で飽和された湿潤状態の試料を締固める場合、図-17の提案法に示すような排水装置が有効である。しかし、中型モールド法では、あらかじめ水浸した試料をモールド内に1cmほど水を張って、その中に落下させる方法で行った。提案法も中型モールド法と同じ方法で試料を作製した。ここで中型モールド法と提案法では、最小の密度が得られるように、試料をできるだけ低い位置からスプーンで水

中にゆっくりと投入した。また上端面処理は、各方法とも最終的に鋭利な直ナイフによりモールド上部の余盛り部分を取り除くことで統一した。

次に、最大密度試験について述べる。ASTM法は乾燥試料を、中型モールド法は湿潤試料を対象とし、いずれもASTMの規定に従って締固めを行った。ここでASTM法と中型モールド法では規定の通り、試料の頂部に質量12kgの錘を載せて行った。一方提案法では、試料頂部に載せる錘の質量は、ASTM法のモールドとの体積比により2.8kgとした。さらに締固めは、10層に分割した試料を各層ごとにモールドの側面を40回打撃することによって行った。図-18, 19は提案法により得られた乾燥密度と打撃回数との関係を示すものである。図-18, 19ともに、乾燥密度は打撃回数の増加とともに増加し打撃回数1000回では定常に至っている。しかし、打撃回数400回位から乾燥密度のさほどの増加は認められないことから、打撃回数400回で十分に最大密度が得られると判断した。

図-20, 21は、各試験法により最小密度試験を5回行い、それぞれの回毎に得られた最小密度をプロットしたものである¹¹⁾。Iwakuni Masadoは4つの試験法で、P.I. MasadoはJIS法と提案法により試験を行った。図-20に各試験法より求めたIwakuni Masadoの最小密度を掲げた。図中乾燥試料を対象とするJIS法とASTM法では、ほぼ同じ値となっている。一方、湿潤試料を使用する提案法と中型モールド法では、乾燥試料を扱うJIS法、ASTM法に比べ最小密度は高めの値となり、提案法と中型モールド法の比較では、中型モールド法の方がより高くなる結果となった。しかし、中型モールド法ではモールドの下部から余剰水をうまく排水できないため、試験結果にばらつきが大きいことがわかる。提案法では下部から余剰水を排水できるよう改善したため、結果にばらつきはさほど見られない。図-21のP.I. Masadoについても、提案法による試験結果にばらつきはほとんど見られない。これら4つの最小・最大密度試験方法を表-2にまとめて示した。

図-22, 23には各試験法により得られた最大乾燥密度の測定結果を示した。図-22において、Iwakuni Masadoの各試験法で得られた最大密度を見ると、提案法による結果が最も大きな値を示している。一方、中型モールド法では試料の圧縮時にモールドの下部からうまく余剰水の排出ができないために試験結果にばらつきが生じていることがわかる。図-23のP.I. Masadoにおいては、JIS法と提案法を比べた場合、提案法による方が最大密度は大きくなっている。図-24に原粒Iwakuni Masadoと原粒P.I. Masadoの繰返し回数20回時の強度比 R_{20} とJIS法で規定した100kPaで圧密後の相対密度 D_{rc} の関係を示す。豊浦砂の場合は、

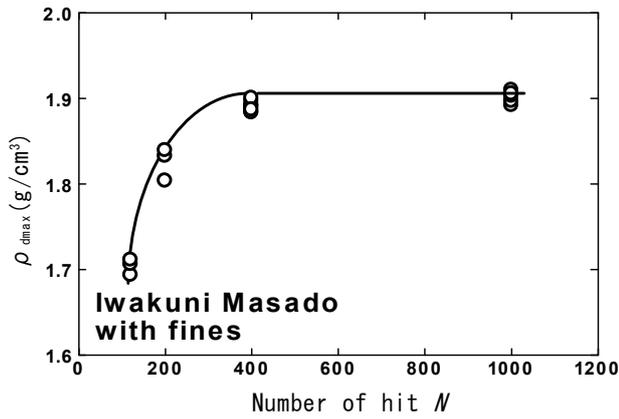


図-18 提案法におけるIwakuni Masadoの最大密度と打撃回数
の関係

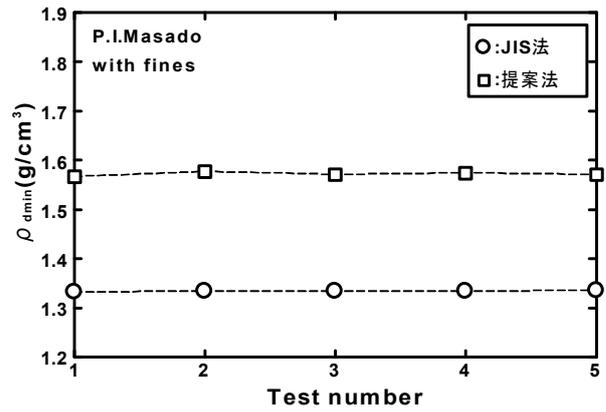


図-21 JIS法と提案法による各試験回での P.I. Masadoの最
小密度

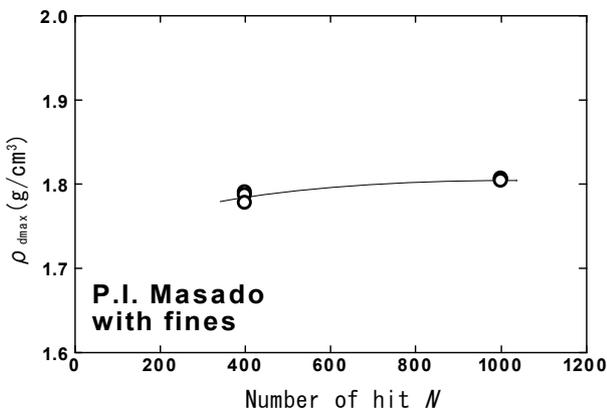


図-19 提案法におけるP.I. Masadoの最大密度と打撃回
数の関係

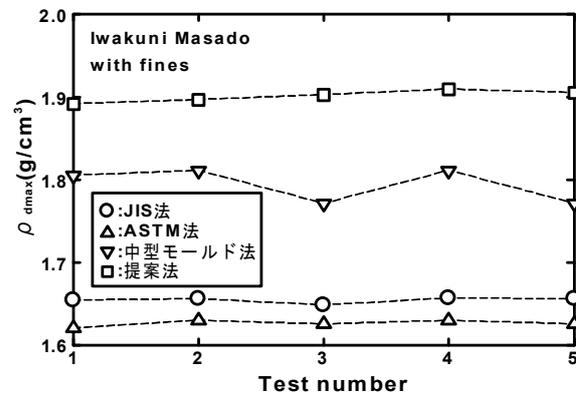


図-22 各方法による各試験回でのIwakuni Masadoの最大
密度

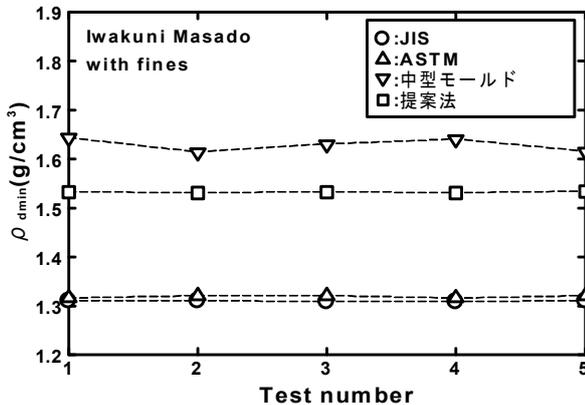


図-20 各方法によるIwakuni Masadoの各試験回での最小
密度

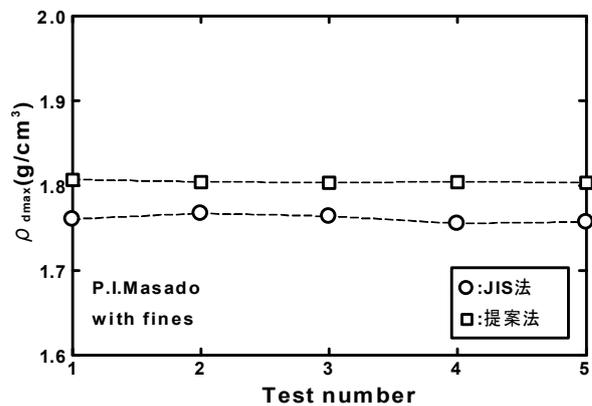


図-23 JIS法と提案法による各試験回での P.I. Masadoの
最大密度

$D_{rc}=80\%$ 付近までは液状化強度は相対密度に比例して増加し、さらに $D_{rc}=80\%$ 付近から急激に液状化強度が増加しているのに対し、Iwakuni Masadoにおいては約 $D_{rc}=100\%$ を、P.I. Masadoでは約 $D_{rc}=90\%$ を超える付近から液状化強度が増加する傾向にある。このように、まさ土と豊浦砂では液状化と相対密度の対応関係が大きく異なっており、

標準貫入試験の N 値から相対密度を評価し、液状化強度を推定する方法では大きな誤差が生じることが懸念される。

図-25 に、提案法で得られたまさ土の最大、最小間隙比を用いて計算した新しい相対密度 D_{rc}^* を導入し、繰返し回数 20 回時の液状化強度比 R_{20} との関係を示した。図

6. 結論

2種類のみさ土を対象に、一連の非排水繰返し三軸圧縮試験を行い、非排水繰返しせん断強度と相対密度の関係について検討を行った。本研究により得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 強熱減量試験の結果 P.I. Masado は 0.932, Iwakuni Masado は 2.257 となり, Iwakuni Masado の方がより風化が進んでいることが推定される。
- (2) P.I. Masado, Iwakuni Masado について原粒度および細粒分を除去した試料を対象に実験を行ったところ, 両まさ土とも細粒分を含んだものだけが水浸による体積収縮が確認されるが, 細粒分を除去した試料では体積収縮は起こらない。
- (3) 細粒分を有するまさ土は細粒分を除去したものより等方載荷による圧縮量大きい。
- (4) 原粒 Iwakuni Masado と原粒 P.I. Masado は, JIS 法による初期相対密度 50%~90%においては液状化強度に有意な差は認められない。しかし, 水中堆積法で作製した場合, 相対密度が 100%を超え, 液状化強度も著しく増加する傾向を示す。
- (5) 細粒分を除去する事で, P.I. Masado, Iwakuni Masado と液状化強度は顕著に増加する。
- (6) 細粒分を含んだまさ土は, 過圧密履歴を与えることで顕著な液状化強度の増加が認められる。
- (7) 細粒分を有するまさ土に対し, 水浸し錘を負荷して行う最小, 最大密度試験を提案した。両まさ土に適用し新しい相対密度 D_{rc}^* を求めた。その結果, 相対密度 D_{rc}^* は 100%以下で定義され, 破碎性のない他の砂等とも同等の尺度で液状化強度を比較することが可能となった。

参考文献

- 1) 風間基樹, 加賀谷俊和, 柳澤栄司: まさ土の液状化抵抗の特殊性, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.153-166, 2000.
- 2) 兵動正幸, 荒牧憲隆, 岡林巧, 中田幸男, 村田秀一: 破碎性土の定常状態と液状化強度, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.197-209, 1996.
- 3) 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.
- 4) Hyodo, M., Hyde, A. F. L. and Aramaki, N.: Liquefaction of crushable soils, *Geotechnique*, No.4, pp.527-543, 1998.
- 5) 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: まさ土の物性と液状化特性, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.207-215, 1999.
- 6) 亀井健史, 榎本雅夫: 締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.97-103, 1994.
- 7) 亀井健史, 榎本雅夫: 土の粒度の違いが締固めた土のコラプス沈下量に及ぼす影響, 土木学会論文集,

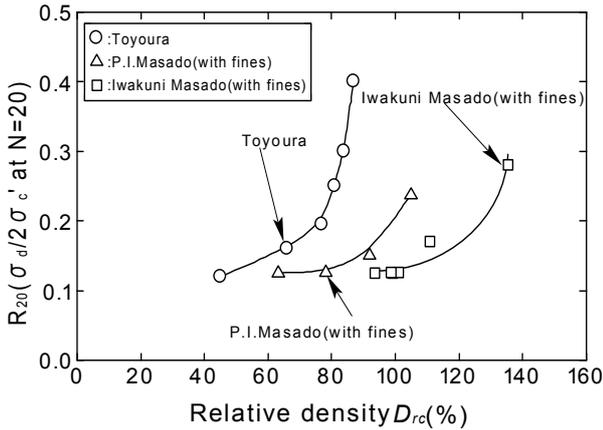


図-24 繰返し回数20回時の非排水繰返しせん断強度比 R_{20} と圧密後相対密度 D_{rc} の関係(JIS法)

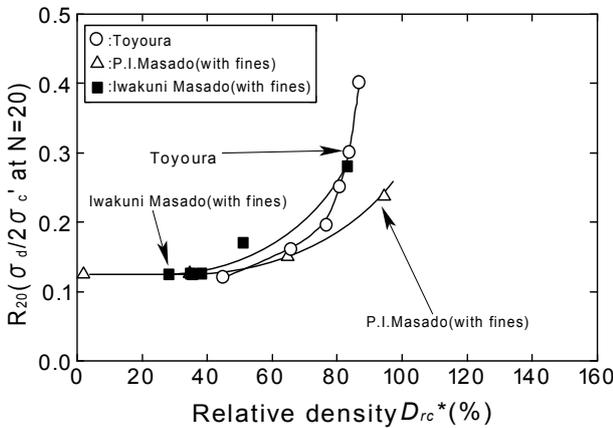


図-25 繰返し回数20回時の非排水繰返しせん断強度比 R_{20} と圧密後相対密度 D_{rc}^* の関係(提案法)

中豊浦砂の相対密度は JIS 法で求めたものであり, 図-24 と同じものである。いずれの試料の液状化強度曲線もかなり近づき, 液状化強度が急増する相対密度もかなり近い値となっている。このように, 細粒分を有するまさ土については, 提案法による最大最小間隙比から計算した相対密度 D_{rc}^* で整理を行うことにより, 相対密度 100%以内で液状化強度の比較を行うことが可能であり, N から相対密度を通じて液状化強度を評価することが可能であると判断される。また, まさ土の埋立て地盤から不攪乱試料をサンプリングすることは困難であり, 再構成試料による試験しかできないこともあるが, まさ土の水中における相対密度 D_{ri}^* を推定し試験を実施する必要があることが示唆された。

- No.535/III-34, pp.65-72, 1996.
- 8) 福島伸二, 望月美登志: 神戸人工島における埋立土の液状化特性に及ぼす密度, 拘束圧の影響, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.49-64, 2001.
 - 9) 兵動正幸, 荒牧憲隆, 徳原裕輝, 菊地慎二, 中田幸男, 村田秀一: 六甲アイランド埋立てまさ土の非排水繰返しせん断特性, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.87-98, 1997.
 - 10) 佐藤正行, 小田寛, 風間英彦, 小瀬木克己: 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, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.271-282, 1997.
 - 11) 金佑泰, 兵動正幸, 中田幸男: まさ土の繰返しせん断特性に及ぼす細粒分の影響, 第 57 回土木学会中国支部研究発表会, III-33, pp.261-262, 2005.
 - 12) 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: まさ土の物性と液状化特性, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.207-215, 1999.
 - 13) (社)地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 第 8 章 砂の最小, 最大密度試験, pp.136-145, 2001.
 - 14) Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatomi, T.: Performance of caisson type quay walls at Kobe Port, *Special Issues of Soils and Foundations*, pp.119-136, 1996.
 - 15) 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之: 風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮, せん断特性, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.131-140, 1987.
 - 16) 原忠, 吉田次男, 田中昌廣, 國生剛治: 試験方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, pp.565-566, 2003.
 - 17) 原忠, 國生剛治: 砂礫の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.
 - 18) ASTM: Relative Density of Cohesionless Soils, STP No.523, 510 pp., American Society for Testing and Materials D4253-83, D4254-83, 1973.
- (2011.9.28 受付)

ROLE OF FINES ON UNDRAINED CYCLIC SHEAR STRENGTH AND RELATIVE DENSITY OF DECOMPOSED GRANITE SOIL “MASADO”

Woo-Tae KIM, Masayuki HYODO, Yukio NAKATA, Norimasa YOSHIMOTO
and Shohei NODA

A series of undrained cyclic triaxial tests was performed on reconstituted decomposed granite soil Masado sampled from two sites. The liquefaction strengths of these Masado were almost constant when the relative density was less than 80% and they increased markedly when the relative density exceeded 100%. This was believed to be due to the fact that the relative densities were calculated based on conventional minimum and maximum density tests specified for clean dry sands whereas Masado contains non-plastic fines and volume reduction occurred during saturation. In the present study, minimum and maximum density tests were carried out using wet samples and the results were used to re-define the new relative density of the material. The relationship between liquefaction strength and the re-defined new relative density showed good correlation, with Masado showing similar trend in behavior with relative density as Toyoura sand. With the proposed method of using a re-defined relative density, a better understanding of the relation between liquefaction strength and relative density of decomposed granite soil containing fines was obtained.