

# 琉球大学学術リポジトリ

## 簡易せん断試験機によるさんご石灰質砂の液状化抵抗とせん断強度回復に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-08-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Simplified simple shear apparatus, Coral calcareous sand, Liquefaction resistance, Shear strength recovery 作成者: 山城, 哲朗, 原, 久夫, 与那城, 仁 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/1441">http://hdl.handle.net/20.500.12000/1441</a>

# 簡易せん断試験機によるさんご石灰質砂の 液状化抵抗とせん断強度回復に関する研究

山城 哲朗\* 原 久夫\*\* 与那城 仁\*\*\*

A Study on the Liquefaction Resistance and Recovery of Shear Strength of Coral Calcareous Sand Using Simplified Simple Shear Apparatus

Tetsuro YAMASHIRO Hisao HARA and Hitoshi YONASHIRO

## Abstract

The paper aims to examine the features of coral calcareous sand (Chi-bishi and kouri sands) as the material of grain crushability. The experiment was carried under undrain shear condition via 3 typed-tests: Monotonic test, stress controlled test, strain controlled test.

The results was followed: (1) As to Monotonic test, angle of shear resistance of chi-bishi sand is bigger than Toyoura sand, regardless of relation density. (2) According to Stress and Strain controlled test, Chi-bishi sand had shown larger value of liquefaction resistance. (3) Trial to recompression after strain controlled test, it found that the shear strength value of Chi-bishi sand greatly increased compared with the unchanged Toyoura sand.

Key words: Simplified simple shear apparatus, Coral calcareous sand, Liquefaction resistance, Shear strength recovery.

## 1. はじめに

1964年の新潟地震以来、砂地盤の液状化による被害の甚大さが一般に知られるようになった。砂地盤における液状化の発生はビルや橋梁などの地上に見える構造物の破壊だけでなく、地中に埋められたライフラインの破壊をも引き起こしている。液状化による被害は単なる構造物の被害にとどまらず、都市機能の“麻痺”につながるという重大な問題を含んでいる。このようなことから液状化に関する研究の重要性が認識され、多くの研究者によって広範囲にわたる研究がなされてきた。

これまでの液状化に関する研究は多くの場合、豊浦砂を用いた等方圧密供試体における三軸圧縮試験により行われてきた。しかし、実際の液状化による地盤の崩壊を考えた場合、三軸圧縮状態だけでなく三軸伸張状態および単純せん断状態も含まれている。さらに地震前の地盤内の応力状態は等方的な応力状態であることはほとんどなく、異方的な応力状態にある。これまで単純せん断状態および異方圧密状態についての研究は余り行われていないが、これらの状態を再現した研究も重要だと考えられる。また、繰返し非排水せん断履歴を受けた地盤は再圧密後のせん断強度が大きくなることが知られている。龍岡ら<sup>1)</sup>は等方圧密した供試体に、三軸圧縮試験機を用いて液状化させた後、さらに等方圧密を行い液状化させることにより砂の圧縮性と液状化履歴との関係から供試体の砂構造の変化の様子を示した。これにより液状化後の供試体は間隙水圧の消散・再圧密により密度が増加する様子がわかった。

ここで砂粒子が破碎する破碎性土に着目してみると、西日本の広い地域に分布するマサ土などの風化残積土や南九州地方に分布する、しらすなどの火山性堆積物は、土木工事において多くの問題を有しており、災害を引き起こしやすい土であることが知られている。これらの土の土粒子は粒子表面の脆さや不均一な粒子形状、さらに多孔質であることに起因して脆弱であり、破碎されやすい不安定な地盤材料といえる。また1995年の兵庫県南部地震では、従来液状化され難いとされていた、細粒分を多く含む埋め立て地盤が液状化した。これより、今まで液状化の対象として

ここで砂粒子が破碎する破碎性土に着目してみると、西日本の広い地域に分布するマサ土などの風化残積土や南九州地方に分布する、しらすなどの火山性堆積物は、土木工事において多くの問題を有しており、災害を引き起こしやすい土であることが知られている。これらの土の土粒子は粒子表面の脆さや不均一な粒子形状、さらに多孔質であることに起因して脆弱であり、破碎されやすい不安定な地盤材料といえる。また1995年の兵庫県南部地震では、従来液状化され難いとされていた、細粒分を多く含む埋め立て地盤が液状化した。これより、今まで液状化の対象として

本論文は平成12年度土木学会西部支部で一部発表

\* 大学院理工学研究科環境建設工学専攻  
(Graduate student, Civil Eng.&Arch)

\*\* 工学部環境建設工学科

(Dept. of Civil Eng. & Arch, Faculty of Eng)

\*\*\* (株)沖縄建設技研

(Okinawa kensetsu giken. Co.)

考えられていなかった破碎性土へ関心が向き始めていった。粒子表面形状の液状化強度の影響について日下部ら<sup>2)</sup>は、若狭砂と豊浦砂を用いて粒子表面の形状が異なる二種類の砂の液状化抵抗について検討し、表面形状が粗い若狭砂は表面が滑らかな豊浦砂に比べ液状化抵抗が強いことを示している。また日下部ら<sup>3)</sup>は豊浦砂と同一の粒度に調整された粒子破碎特性をもつ「しらす」を用いて液状化抵抗を調べるとともに、超微粒子のシリカ薄液を浸透注入することにより破碎性砂の液状化抵抗が向上することを示している。しかし、一方で岡林ら<sup>4)</sup>は非排水繰返しせん断試験からしらすと豊浦砂の液状化強度曲線を示したが、繰返し回数少ない部分では豊浦砂よりもしらすが高い液状化強度を示しているが、繰返し回数の多い部分では液状化強度が逆転する結果を得ている。このような特性はしらすの粒子破碎特性と関連していると考えられており、ほかの破碎性土による数多くの試験結果が必要であると言える。

一方、沖縄県をはじめとする南西諸島の周辺海域にはさんご礁が発達しており、その海域の海底地盤はさんご礁から供給される石灰質堆積物が分布している。これらの堆積物は密度が小さく、大きな間隙を形成し粒子破碎を生じやすい不安定な地盤を形成している。新城ら<sup>5)</sup>はさんご礁砂礫地盤の強度評価に関連してさんご石灰質砂礫の力学特性について検討しているが、地盤の液状化を対象とはしていない。

最近沖縄ではさんご礁の浅い海を利用して離島架橋や港湾施設などの社会活動基盤の整備が行われているが、物流システムを海運に大きく依存する沖縄にとって防災の点からもこれらの構造物を支える地盤の液状化を考慮することは重要であると考えられる。

そこで本研究では粒子破碎砂の素材としての特徴を明らかにするために、粒子破碎特性をもつさんご石灰質砂について単調荷重の非排水せん断試験、応力振幅一定試験、ひずみ振幅漸増試験を行った。ひずみ振幅漸増方式は、ひずみが徐々に増加しせん断応力も変化しながら液状化にいた

るといふ点で、応力振幅一定試験よりもより地震時の挙動に近いということから用いた。

また、せん断強度の回復要因として、

- ① 砂粒子の固結によるもの。
  - ② 間隙水圧の消散・再圧密によるもの。
- があると考えられる。そこで砂粒子の固結による強度回復を圧密時間を変えて単調荷重の非排水せん断試験を行い、間隙水圧の消散・再圧密による強度回復を液状化試験を行った後、圧密時間を変えて単調荷重の非排水試験を行いその影響を調べた。実験試料は粒子破碎特性をもつチービス砂、古宇利島架橋事業現場より採取された試料砂である。その結果とシリカ質で非破碎砂である豊浦砂の結果とを比較した。

## 2. 試料および実験方法

使用した試料は沖縄県那覇市沖合慶備瀬付近の海底砂と今帰仁村古宇利島周辺海域の深さ 25.45m～27.45m、35.45m～37.45m からボーリングにより採取された試料および古宇利島周辺海岸の表層砂である。ボーリングにより採取した試料は人為的に砕き 2mm ふるいを通過した試料を使用した。試料の物理的性質は表-1に示すとおりである。供試体寸法は直径が 7.5cm、高さが 5cm である。

試験装置は日下部らが開発した簡易せん断試験装置<sup>6)</sup>を用いた。図-1に試験装置の概略構造を、写真-1に試験装置を示している。本装置では、ゴムスリーブおよびキャップとペダスタルでシールされた供試体に、側方向応力と軸方向応力の等方圧成分の拘束圧を真空ポンプによる負圧で作用させる。さらに軸方向応力の異方圧成分を独立させて載荷する。そのため異方圧密・非排水せん断過程で三軸応力室を必要としない。加えて、供試体の飽和度を高める方法として二重負圧法のみを採用しているため、通常の二重管ビューレット、セル圧、背圧供給装置も不要である。したがって、本試験装置は構成の簡素化を図り、かつ側方向

表-1 試料の物理的性質

	チービス砂	古宇利砂		
		表層砂	25.45～27.45m	35.45～37.45m
土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.668	2.733	2.690	2.687
最大間隙比 $e_{max}$	1.35	1.240	2.222	1.892
最小間隙比 $e_{min}$	1.048	0.832	0.982	0.906
粗砂分 %	49.2	31.7	4.3	16.4
中砂分 %	30.1	47.6	13.3	16.0
細砂分 %	20.4	11.1	18.5	33.0
シルト分 %	0.3	2.0	35.9	25.6
粘土分 %		7.6	18.0	9.0
均等係数 $U_c$	2.61	8.83	41.54	50.91
曲率係数 $U'c$	0.92	2.34	0.37	2.54

と軸方向応力の計測・制御を可能とするものである。

図-1 および写真-1 に試験装置の概略構造図と試験装置を示した。図の番号によって具体的な構成について以下に述べる。側方向応力は真空レギュレーターで調節した負圧を②のキャップと③のペDESTALを介し①の供試体に作用させ、⑦の差圧計で計測する。異方圧密時の鉛直荷重は⑧のベログラムシリンダーに連結されたリニアモーションブロックに加えられ⑩のクロスガイドリニアモーションの鉛直動にガイドされキャップを介して供試体に載荷される。鉛直荷重は④のロードセルで計測する。水平方向のせん断変位は⑨のハーモニックギア付ステッピングモーターの回転運動を治具により水平運動に変換し、⑩の水平用リニアモーションレールに固定したキャップを介して供試体に加えられる。そのとき水平荷重は⑤のロードセルで、変位は⑥の非接触変位系の分解能は $0.6\mu\text{m}$ で、高さ6cmの供試体では $9 \times 10^{-5}$ のせん断ひずみに相当する。⑩は、XY運動のリニアモーションガイド2本を直交させた一体型でコンパクトであると同時に、きわめて高い直交精度と高剛性が得られ、静摩擦と動摩擦の差もほとんどない。摩擦抵抗は標準的な直径6cmの供試体の場合、せん断応力で $0.49\text{kN/m}^2$ に相当する。非排水せん断過程でこのクロスガイドの鉛直方向の変位を固定する事により、簡便な方法で単純せん断条件の再現が可能になる。

⑨のモーターは、減速比1/100のハーモニックギアを装着しており、一般の平歯車に見られる歯の噛み合い誤差が無く、 $0.0036$ 度/ステップの高い位置決め精度が可能である。そのため、このモーターと⑥の非接触変位計、⑤の水平荷重用ロードセル及びコンピューターにより形成されるクローズドループにより、ひずみ制御と応力制御の試験の実施ができる。

試験はB値0.97以上を確認したものに関して実施した。圧密方法は静止土圧係数 $K_0$ を0.50に設定した異方圧密とした。異方圧密条件は有効側方応力が $30.9\text{kpa}$ 、有効軸方向応力が $61.8\text{kpa}$ である。試験は単調載荷試験とひずみ振幅漸増試験の非排水単純せん断試験を実施した。ひずみ振幅漸増試験は第一波目のせん断ひずみ片振幅を $\pm 5 \times 10^{-4}$ とし、第2波目以降、順次せん断ひずみ片振幅を1.5倍間隔で漸増させるひずみ制御の正弦波を用いている。また単純せん断はせん断中に非排水かつ供試体高さを一定に保つ方法で行った。なお、表-2に各実験で用いた試料名と供試体の相対密度の一覧表を示す。

### 3. 単調載荷試験の結果と考察

図-2、図-3は豊浦砂とチービシ砂の相対密度35%、50%、

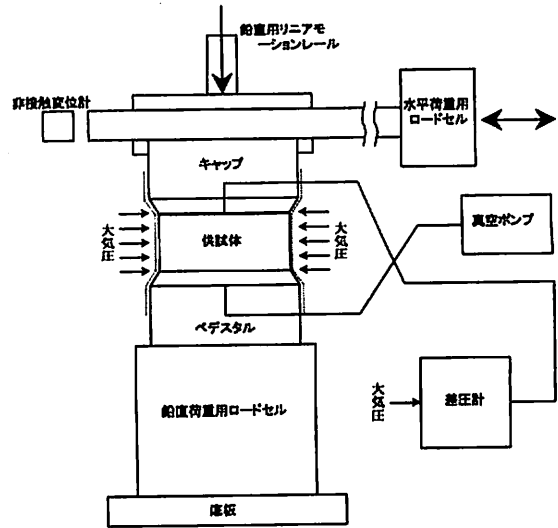


図-1 簡易せん断試験装置概要図

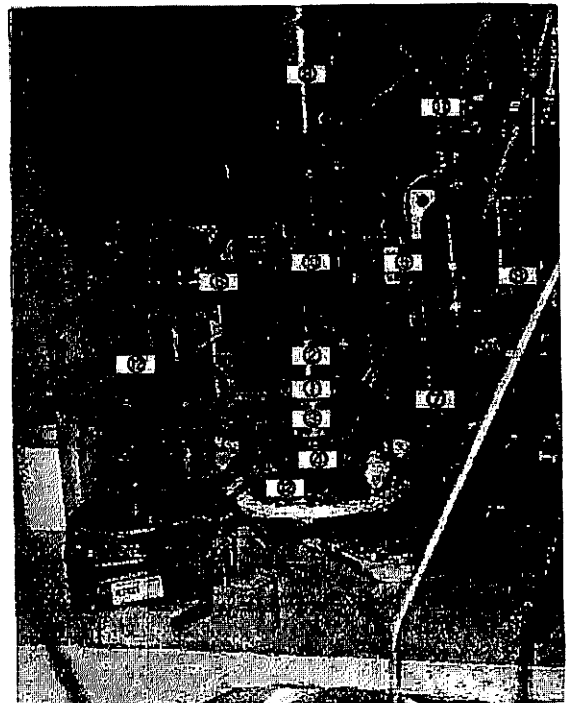


写真-1 簡易せん断試験装置

65%、80%に関する有効応力経路、およびせん断抵抗角 $\phi'$ と相対密度 $D_r$ の関係を示したものである。なお、せん断抵抗角 $\phi'$ は次式により求めた。

$$\phi' = \tan^{-1}(\tau/\sigma'_v)$$

ここに $\phi'$ はせん断抵抗角を、 $\tau$ は変相点以後のせん断応力を、 $\sigma'_v$ は鉛直有効応力を示す。これから、チービシ砂のせん断抵抗角 $\phi'$ は相対密度 $D_r$ によらずほぼ一定値( $\phi' \approx 31 \sim 32^\circ$ )を示し、材料に固有な値を有することがわかる。また、チービシ砂のせん断抵抗角は豊浦砂のせん断抵抗角( $\phi' \approx 25 \sim 28^\circ$ )に比べて大きい値をとることがわか

表-2 試験条件

	試験条件	相対密度 $D_r$	試料				
			豊浦砂	チービシ砂	古宇利砂		
					表層砂	深さ25.45~27.45m試料	深さ35.45~37.45m試料
圧密非排水試験	単調載荷試験	35%	○	○			
		50%	○	○			
		65%	○	○			
	応力振幅一定試験	35%	○	○	○	○	○
		80%	○	○			
	液状化後単調載荷試験	80%	○		○	○	○

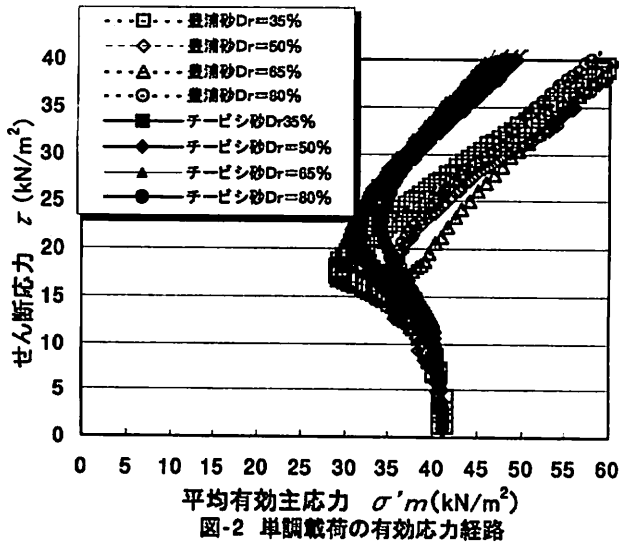


図-2 単調載荷の有効応力経路

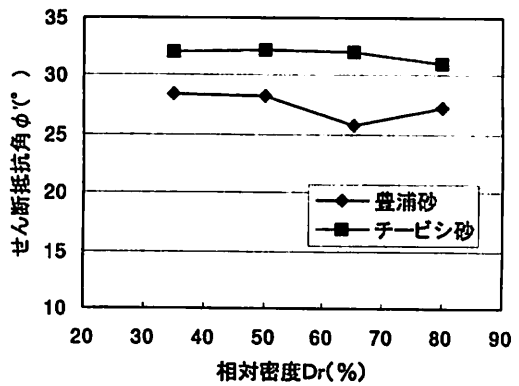


図-3 せん断抵抗角と相対密度の関係

る。これはチービシ砂の粒子表面形状が角張っていることにより、粒子固体間の噛み合いが生じるため、豊浦砂に比べて値が大きくなると考えられる。

4. 液状化試験の結果と考察

4-1. 応力振幅一定試験

図-4、図-5、図-6 は、相対密度 35% の豊浦砂とチービシ砂のせん断応力～時間、せん断ひずみ～時間、間隙水圧～時間関係を示したものである。なお、繰り返しせん断応力は豊浦砂が 0.279、チービシ砂が 0.246 である。繰り返しせん断応力がほぼ等しいにもかかわらず、せん断ひずみ～時間関係において豊浦砂は初期の数回目で急激にせん断ひずみが増加するが、チービシ砂はせん断ひずみの急激な増加は現れず、豊浦砂に比べ緩やかな増加を示す。間隙水圧～時間関係においても、豊浦砂は早い時間で間隙水圧が急上昇し、有効応力がゼロになり液状化している事がわかる。これに対してチービシ砂は間隙水圧の発生は緩やかで、豊浦砂よりも大きな液状化抵抗を発揮していることがわかる。

図-7 は相対密度 35% の豊浦砂とチービシ砂における、

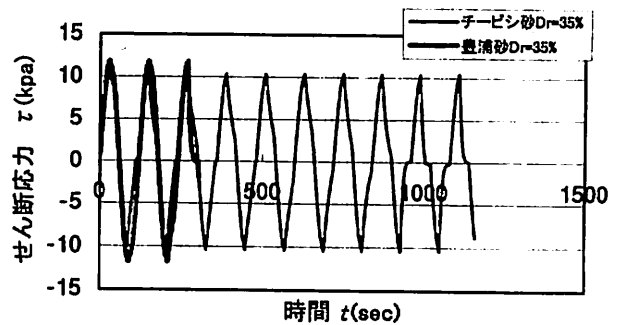


図-4 せん断応力～時間関係

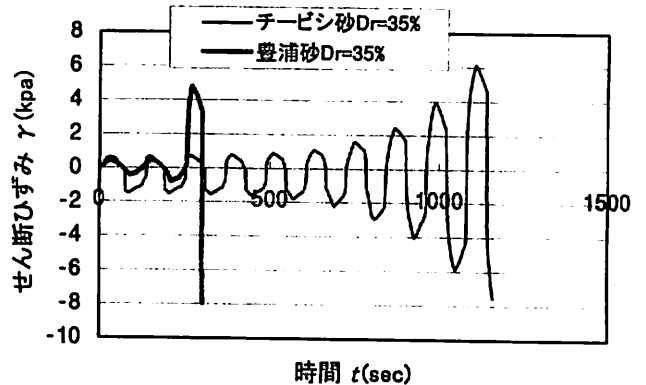


図-5 せん断ひずみ～時間関係

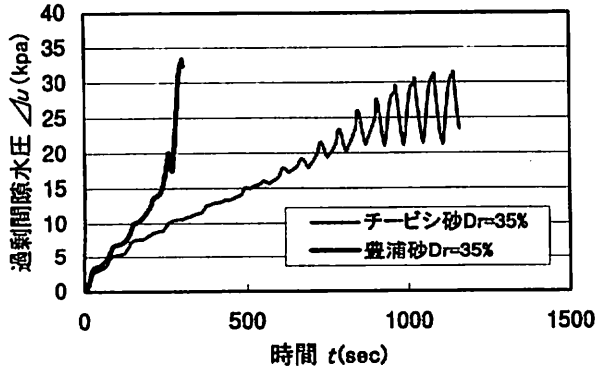


図6 過剰間隙水圧～時間関係

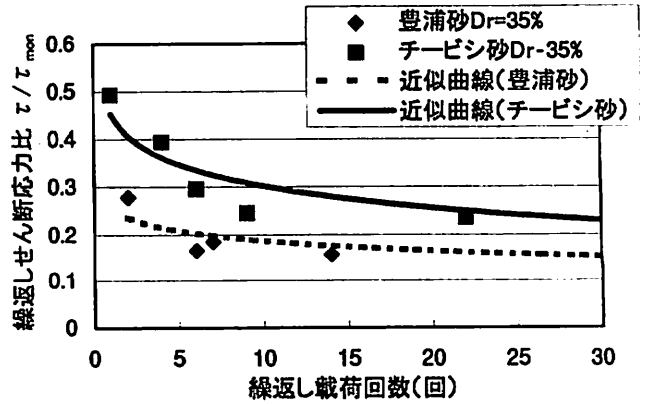


図7 繰返しせん断応力～繰返し载荷回数関係

片振幅ひずみ 5%に達するまでの繰返し载荷回数と単調载荷試験によるせん断強度  $\tau_{mon}$  で正規化した繰返しせん断応力の関係を示したものである。相対密度がほとんど等しいにもかかわらず、チービシ砂の液状化抵抗が、豊浦砂に比べ強いことを示している。これは粒径がほぼ均一で粒子表面の滑らかな豊浦砂に対してチービシ砂は粒径が不均一で粒子表面が粗いことが関係していると考えられる。

せん断抵抗が急激に小さくならず、豊浦砂に比べて液状化に対する「ねばり」を有することがわかる。これは両砂の同一せん断ひずみ  $\gamma$  における有効応力点を比較しても、豊浦砂に比べてチービシ砂のほうが間隙水圧の発生量が少なく、大きなせん断応力を発揮していることから判断できる。さらに、せん断変位量が最大時における応力～ひずみ曲線の閉ループの面積（塑性仕事  $W_p$ ）を求め相対密度との関係を図-10 に示す。この図より豊浦砂に比べ明らかにチービシ砂が液状化に抵抗する「ねばり」を有しており、応力振幅一定試験の結果と一致していることがわかる。

4.2. ひずみ振幅漸増試験の結果と考察

図-8, 図-9 はひずみ振幅漸増試験から得られた豊浦砂, チービシ砂の相対密度  $D_r=80\%$ におけるせん断応力～せん断ひずみ関係, および有効応力経路を示したものである。なお, 図-9 における  $\sigma'_m$  は平均有効応力であり, その初期値は次式で示される。

$$\sigma'_m = \frac{1}{3} \sigma'_v (1 + 2K_0)$$

これらの図において、豊浦砂は両振幅せん断ひずみが 2% 以下で有効応力がゼロになりせん断抵抗が極めて小さい状態となることから、供試体に液状化が発生していることがわかる。

一方、チービシ砂はせん断ひずみが 2%を超えた後もせ

5. せん断強度回復試験の結果と考察

さんご石灰質砂は  $CaCO_3$  を多く含むことが知られている<sup>7)</sup>、この  $CaCO_3$  は水と反応することで粒子同士が固結する性質を持っている。また豊浦砂を用いた実験において、液状化した供試体は液状化前と比べ密度が増加することが知られている<sup>1)</sup>。これらのことから、せん断強度の回復要因を砂粒子の固結作用による強度回復と、間隙水圧の消散と再圧密による強度回復の二つの点から調べた。

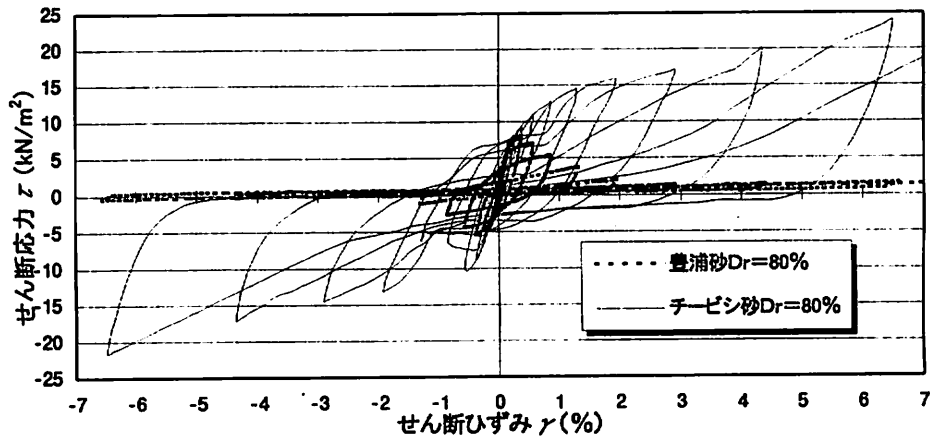


図8 ひずみ漸増のせん断応力～せん断ひずみ関係

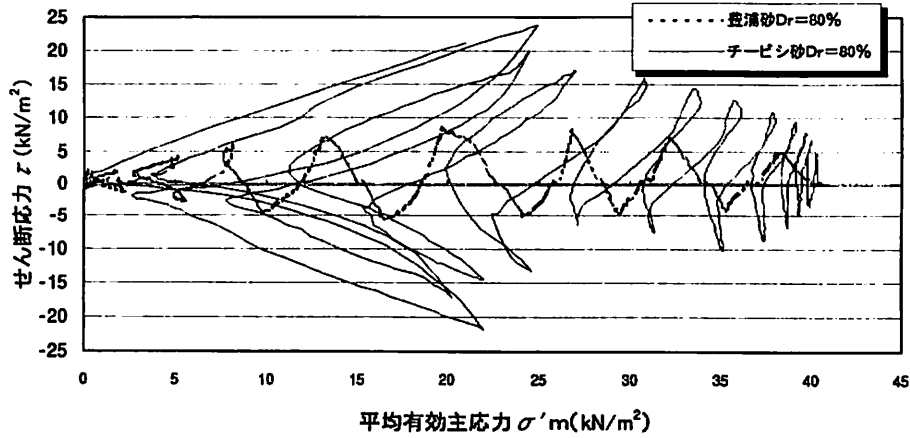


図-9 ひずみ漸増の有効応力経路図

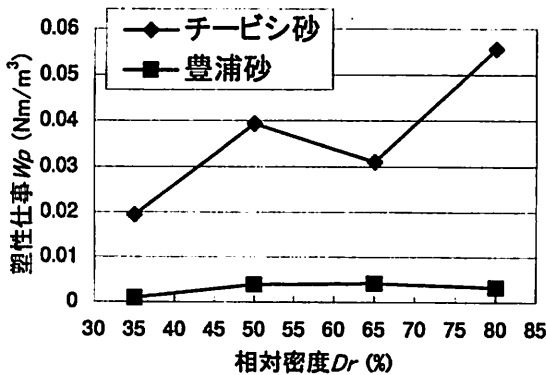


図-10 塑性仕事と相対密度の関係

5-1. 固結作用による強度増加

表-3 に試験条件及び単調載荷の非排水せん断試験における、 $\gamma=4\%$ 時のせん断応力を示す。“単調載荷”試験で $\gamma=4\%$ 程度で $\tau$ が一定となることからこの値をせん断強度の目安とし“液状化後単調載荷”試験結果と比較した。一般に砂のせん断強度は圧密時間に依存しないことが知られている。今回用いた試料は粒子破碎特性をもつ石灰質砂であり、圧密時間の長期化に伴い砂自体の固結作用による強度回復もあるだろうと考えた。図-11 は深さ 25.45～

27.45m から採取した試料の各圧密時間におけるせん断応力～せん断ひずみ関係である。この図から、せん断応力～せん断ひずみ関係は圧密時間に依存しないことがわかる。表-3 においても、各圧密時間のせん断応力は各試料で多少のばらつきがあるものの、圧密時間によらずほぼ一定値を示し、今回設定した圧密時間内において砂粒子の固結作用による強度の増加は発現しないことがわかった。

5-2. 間隙水圧の消散と再圧密による強度増加

表-3 において“液状化後単調載荷”試験での 25 分間再圧密を行った結果は、“単調載荷”の各圧密時間の結果と比べ、豊浦砂を除き、明らかに大きな値を示していることがわかる。これは液状化後の間隙水圧の消散と再圧密により供試体の相対密度が上がることで、より大きなせん断応力を発揮したと考えられる。もっとも顕著な密度の変化を示した表層砂は、ひずみ振幅漸増試験前は相対密度  $Dr$  が 70%を示したが試験後圧密終了時に相対密度  $Dr$  は 80%に増加していた。これに対して豊浦砂はひずみ振幅漸増試験前は相対密度  $Dr$  は 62%を示し、試験後圧密終了時に相対密度  $Dr$  は 73%を示したが、せん断強度は“液状化後単調載荷”と“単調載荷”でほとんど変化を示さなかった。

図-12, 図-13 は深さ 25.45～27.45m から採取した試料

表-3 試験条件と結果

試験条件		豊浦砂	古宇利砂			
			表層砂	深さ25.45～27.45m試料	深さ35.45～37.45m試料	
圧密非排水試験	単調載荷	圧密時間	せん断ひずみ $\gamma=4\%$ に対するせん断応力 $\tau$ (kpa)			
		25分	12.1	11.3	12.1	11.0
		1時間	11.9	13.1	13.2	13.0
		4時間	12.2	14.9	13.3	13.8
	12時間	11.1	15.4	15.0	13.0	
	液状化後単調載荷	0分	0.26	0.36	0.53	0.39
25分		13.3	31.7	26.5	25.1	

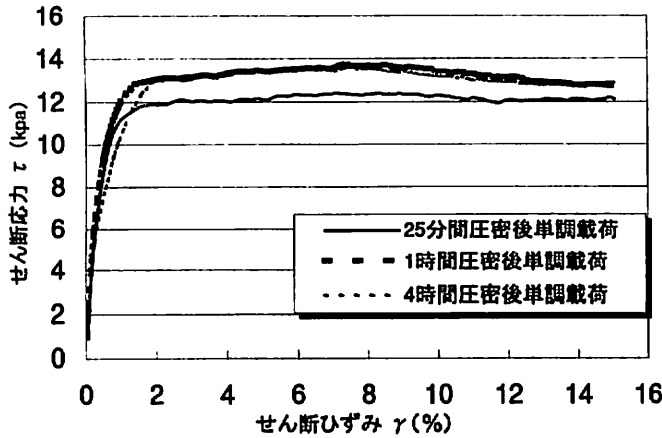


図-11 圧密時間ごとのせん断応力～せん断ひずみ関係  
古宇利砂・深さ25.45～27.45m試料  
(単調荷重の非排水せん断試験)

と深さ 35.45～35.75m から採取した試料の 25 分間圧密後単調荷重, 液状化直後単調荷重, および液状化後 25 分間圧密単調荷重試験のせん断応力～せん断ひずみ関係である。これらの図から明らかなように, 25 分間圧密後単調荷重の非排水せん断試験のせん断強さはせん断ひずみ 4% 付近から流動化し, せん断応力が一定値を示すのに対し, 液状化後 25 分間圧密後単調荷重の非排水せん断試験によるせん断強さは流動化せずせん断応力は増加傾向を示していることがわかる。

6. まとめ

本研究では簡易せん断試験機を用いてさんご石灰質砂の液状化抵抗および液状化後のせん断強度回復を測定した。その結果, 次のことがわかった。

- ① 単調荷重試験時のせん断抵抗角は相対密度  $D_r$  によらずほぼ一定値で豊浦砂よりも大きな値を示す。
- ② 応力振幅一定方式, ひずみ振幅漸増方式の液状化試験においてさんご石灰質砂は豊浦砂に比べ明らかに液状化に対する「ねばり」を有する。
- ③ 砂粒子自体の固結作用による強度増加は今回実験した圧密時間ではみられない。
- ④ ひずみ振幅漸増方式による液状化試験後, 再圧密することにより古宇利砂は豊浦砂に比べ, せん断強さが大きく増加する。

今後の課題として,

- ① 液状化後のせん断強度の回復を再圧密の時間を変化させて調べる。
- ② 再圧密後の相対密度での供試体を作成し単調荷重試験を行うことでせん断強度の回復と相対密度の関係を検討する。

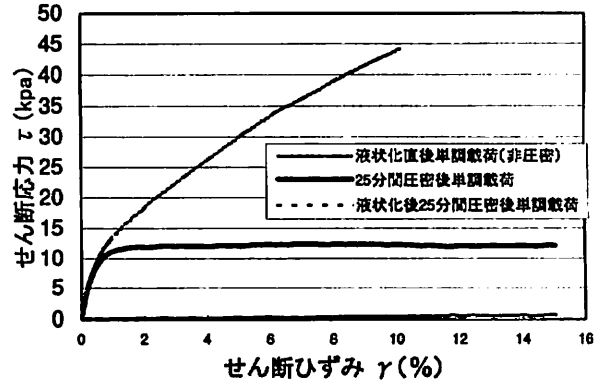


図-12 古宇利砂・25.45～27.45m試料の各条件のせん断応力～せん断ひずみ関係 (単調荷重の非排水試験せん断試験)

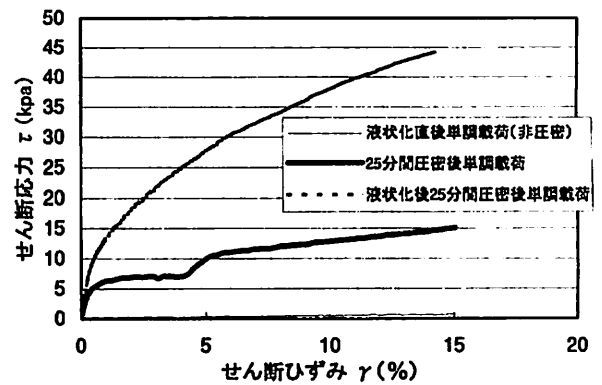


図-13 各条件のせん断応力～せん断ひずみ関係  
古宇利砂・深さ35.45～37.45m試料  
(単調荷重の非排水せん断試験)

- ③ 相対密度が等しい供試体においても供試体作成方法の違いによる液状化強度およびせん断強度の回復への影響を検討する。

参考文献

- 1) Tatsuka, F. et al: A cyclic undrained simple shear testing method for soils, Geotechnical Testing Journal, Vol.12, No4, pp.269-280, 1989.
- 2) 日下部 伸, 森尾 敏: 粒子表面形状が異なる砂の地震応答液状化抵抗, 土木学会論文集, No517/III, pp149-158, 1995.6
- 3) 日下部 伸, 森尾 敏, 小田 恵之輔, 岡林 巧, 兵動正幸: シリカ薄液で改良された破砕性砂の液状化抵抗, 土木学会論文集, III, 1999.5
- 4) 岡林 巧, 兵動 正幸, 安福 規之, 村田 秀一: 乱した一時しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動, 土木学会論文報告集, No561/III-38, pp97~106, 1994.
- 5) 新城 俊也: さんご礫砂地盤の強度評価に関する研究 平成7年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp 1-51, 1997.3
- 6) 日下部 伸: 簡易せん断試験機の試作と種々の液状化試験への適用, 土木学会論文集 No.617/III-46, pp299-304, 1999.3.
- 7) 比嘉 理絵: 石灰質差の鋼材との摩擦特性について, 第12回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp82-83, 1999.