

# 破碎性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形—強度特性に及ぼす応力履歴の影響

三浦清一<sup>1</sup>・八木一善<sup>2</sup>・川村志麻<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町 27-1)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 地崎工業 技術開発部 (〒064 札幌市中央区南 4 条西 7 丁目)

<sup>3</sup>正会員 工修 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町 27-1)

本研究では、数種の粗粒火山灰土の過圧密による繰返し非排水せん断挙動の変化を調べた。得た結論は次のようである。1) 粗粒火山灰土の過圧密による繰返し非排水せん断強度の変化割合  $R_s$  は、通常の砂と同様に過圧密比のみによって表現できる ( $R_s = (OCR)^m$ )。なおこの関係は、任意の繰返し回数、任意の両振幅軸ひずみにおいて成立する。2) 過圧密によってもたらされるこのような液状化強度の変化は、構成粒子の脆弱性によって異なる。すなわち、破碎性火山灰土では極めて高い強度の増加率 ( $m$ ) を示すが、非破碎性火山灰土では通常の砂と同程度の  $m$  値となる。3) 脆弱な粒子から構成される粗粒火山灰土であっても、有効応力の低減する繰返し非排水せん断過程ではその粒子破碎はほとんど無視できる。

**Key Words** : volcanic coarse-grained soil, overconsolidation, particle breakage, stress history, liquefaction

## 1. ま え が き

火山灰土は我が国の大半を覆っており、特に北海道においては比較的歴史の新しい未風化火山灰土(火山性粗粒土)地帯が多い。これらは有効な工学材料として多用されている反面、その力学的特性についてはほとんど知られていないため、実務面で困難な問題をいくつか提起している。たとえば、粗粒火山灰土の締固め密度は締固めで生ずる粒子破碎の影響を大きく受けるため<sup>1)</sup>、合理的な締固め管理基準の設定が難しいとされている。

一方、最近の大地震によって、この種の火山灰地盤が被害を受けている。すなわち、1993年釧路沖地震では火山灰土による造成地において、1993年北海道南西沖地震では駒ヶ岳の噴火による火砕流堆積物を主体とした地盤において、さらに1994年北海道東方沖地震では中標津町東部の摩周火山噴出物からなる自然地盤において、それぞれ液状化が主因とみられる地盤災害がもたらされている<sup>2)</sup>。このように、粗粒火山灰土に対する適切な設計・施工を行うための動力学的研究の新たな展開が求められている。

以上のような背景から、筆者らは噴出起源の異なる数種の火山灰質粗粒土について、一連の静的および繰返し非排水三軸試験を実施し、それらの静的・動的力学挙動を調べた<sup>2)</sup>。これらの試験結果から、いわゆる脆弱な粒子から構成される火山灰土では、せん断によってもたら

される破碎の生じ方には特徴的な条件が存在することがわかった。またこのような火山灰土では、通常の堅硬な粒子からなるクリーンな砂とは異なり、構成粒子の破碎がその力学挙動に及ぼす影響は極めて大であることが示された。

本研究では、このような破碎性粗粒土の動的せん断機構を解明するための基礎的資料を得るために、応力履歴による火山灰土の繰返しせん断挙動の変化を詳細に調べた。具体的には、噴出起源の異なる3種類の粗粒火山灰土に種々の過圧密履歴を与え、その繰返し非排水変形—強度特性の変化を検討した。また、過圧密あるいは繰返し非排水せん断過程において生ずる粒子破碎の程度や特徴についても議論している。

## 2. 火山灰試料と試験方法

本研究が対象にした火山灰土は、①森町姫川(森火山灰土(MORI VOLCANIC SOIL))、②門別町富川(富川火山灰土(TOMIKAWA VOLCANIC SOIL))、③中標津町武佐(中標津火山灰土(NAKASHIBETSU VOLCANIC SOIL))で採取したものである。図—1で示されるように、森、富川、中標津火山灰土はそれぞれ駒ヶ岳、支笏、摩周の降下生成物である。これらの噴出年代や地質学的特性等については既報で詳述されている<sup>2)</sup>。

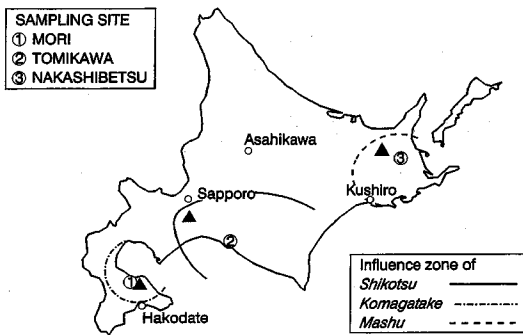


図-1 各火山灰土の採取地点と噴出起源

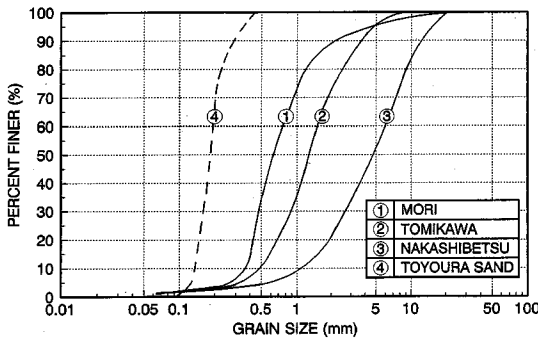


図-2 粒径加積曲線

各火山灰土の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-2にそれぞれ豊浦砂のデータと比較して示す。いずれも豊浦砂より粗粒であるが、細粒分(75 $\mu$ m以下)含有率 $F_c$ は2%以下と極めて少ない。ここで、富川、中標津火山灰土の乾燥密度 $\rho_d$ が低い値を示しているのは、その構成粒子の多孔質性によるものと思われる。また、森火山灰土の土粒子の密度 $\rho_s$ は黒色鉱物を多く含むため、他の火山灰土に比べて高めの値である。なお、表-1に示した最大および最小密度は地盤工学会基準<sup>3)</sup>に基づいて求めたものである。従って、最大粒径などに試験法の適用範囲を越えているものがあることから、ここで決定された値は一つの参考指標とみなすべきかもしれない。

全ての供試体は、圧密後の供試体密度 $\rho_{dc}$ が表-1に示した原位置地盤の値になるように多重ふるい落下法<sup>3)</sup>(MSP法、ふるい目の大きさ20mm、7層)によって再構成した。森、富川火山灰土ではほぼ満足できる均一な供試体をこの方法により得ているが、中標津火山灰土では粗粒子の集中することがあるため、分級の起こらない状態が確認された供試体が本試験で採用されている。また、比較のために試験した豊浦砂の圧密後の相対密度 $D_{rc}$ は、目標値80%に対して $\pm 3\%$ 以内の範囲にある。なお三軸供試体の寸法は直径70mm、高さ170mmであ

表-1 物理的性質

SAMPLE NAME	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>		$\rho_d$ In-Situ g/cm <sup>3</sup>	$D_{50}$ mm	$U_c$	$F_c$ %
		max	min				
① MORI	2.82	1.589	1.314	1.49	0.66	2.37	0.15
② TOMIKAWA	2.22	0.522	0.426	0.49	1.25	3.05	1.07
③ NAKASHIBETSU	2.46	0.407	0.287	0.41	4.60	5.11	1.83
④ TOYOUA SAND	2.64	1.639	1.336	—	0.18	1.60	0

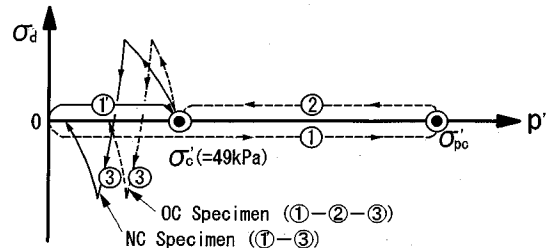


図-3 過圧密履歴の与え方

り、用いたメンブレンの厚さは0.25mmである。

供試体をセル内に設置後、二酸化炭素、脱気水を通し、引続き196kPaのバックプレッシャーを供給することにより飽和させた。この方法により、全ての供試体の間隙水圧係数 $B$ は確実に0.96以上の値を得ている。繰返し非排水せん断開始前の圧密圧力 $\sigma'_c$ は全て49kPaである。

供試体に与える過圧密履歴は、図-3に示す手順によった。すなわち、所定の過圧密比 $OCR(=\sigma'_{pc}/\sigma'_c=1.0, 2.0, 3.5, 5.0)$ に対応する先行圧密圧力 $\sigma'_{pc}$ で等方圧密を与えた後(体積ひずみの変化率が $1.0 \times 10^{-4}\%/min$ 以下になった時を先行圧密完了としている)、圧密圧力 $\sigma'_c=49kPa$ のもとで等方的に膨張させている(約5時間)。例えば $OCR=5$ の過圧密供試体(OC Specimen)は、 $\sigma'_{pc}=245kPa$ のもとで等方圧密後、 $\sigma'_c=49kPa$ まで等方的に吸水膨張させ、引続き繰返し非排水せん断を与えた(①→②→③)。また、 $OCR=1$ の正規圧密供試体(NC Specimen)は $\sigma'_c=49kPa$ で等方圧密後、繰返し非排水せん断試験を行っている(①→③)。

繰返し非排水せん断は、繰返し非排水三軸試験装置を用いて軸差応力振幅一定、載荷周波数0.1Hzの正弦波のもとで与えている。試験中は軸荷重、軸変位および間隙水圧変化を連続的に記録し、試験結果は繰返し軸差応力の片振幅 $\sigma_d$ に基づいて整理している。

以上の試験が終了した後、ふるい分析によって試験前後の粒度変化を調べている。ここで、富川、中標津火山灰土の構成粒子は脆弱なため、ふるい分けの過程で新たな粒子破砕がもたらされることのないよう、電動式の自

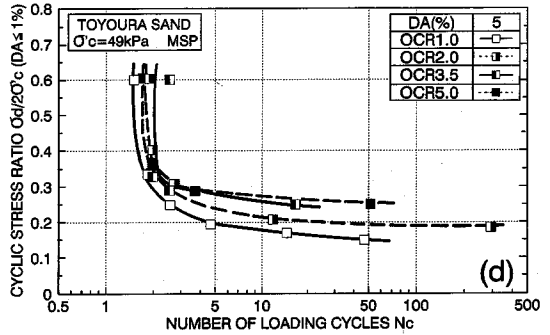
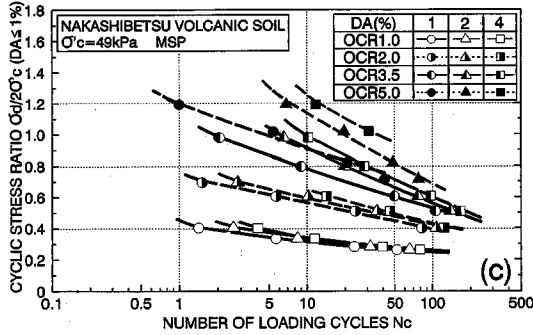
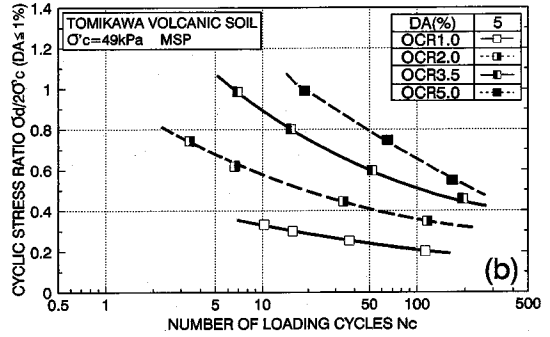
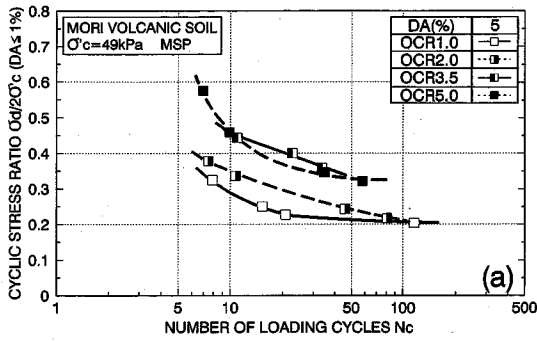


図-4 過圧密による液状化強度の変化：(a) 森火山灰土、(b) 富川火山灰土、(c) 中標津火山灰土、(d) 豊浦砂

動ふるい装置を用いることはしなかった。すなわち、十分な時間をかけて、所定回数だけふるいを上下左右に動かすことを基本とし、必要に応じて手でふるいをたたくなどの極めて軽い衝撃を与えるようにしている。

### 3. 試験結果と考察

#### (1) 過圧密履歴による繰返し非排水せん断挙動の変化

図-4 (a)~(d) は、任意の過圧密状態にある森、富川、中標津火山灰土および豊浦砂の繰返し非排水三軸試験 ( $\sigma'_c = 49$  kPa) の結果を、正規圧密状態の結果と比較して示したものである。図は両振幅軸ひずみ  $DA = 5\%$  が生じたときの繰返し回数  $N_c$  と、 $DA = 1\%$  に至るまでの繰返し応力比の平均値  $\sigma_d/2\sigma'_c$  ( $=SR$ ) の関係で表されている。ただし、中標津火山灰土では特に  $OCR$  が高くなってくると  $DA = 5\%$  に至る前にネッキング破壊が生じるため、 $DA = 4\%$  について整理した結果を示している。なお、参考のため  $DA = 1, 2\%$  のデータも併せて示した。

図-4 から、いずれの火山灰土においても、豊浦砂と同様に過圧密による液状化強度の確実な増加が認められる。特に、富川火山灰土と中標津火山灰土は森火山灰土や豊浦砂と比較して、先行圧密圧力  $\sigma'_{pc}$  の増加に伴う液状化強度の増加が顕著となっている。なお、いずれの火

山灰土においても密な砂の特徴である高い繰返し応力比での液状化強度線の急激な立ち上がり(図-4 (d) 参照)は見られず、むしろ繰返し回数に対する繰返し応力比の変化は鈍く、緩い砂の強度線に近い傾向にある。

図-5 と図-6 は、 $OCR = 1$  と  $5$  における各火山灰土の代表的な有効応力経路および軸差応力-軸ひずみ関係を示している。これらのタイムヒストリーは基本的に繰返し応力比  $SR = 0.25 \sim 0.35$  の範囲で整理しているが、この範囲で所定の破壊に至らない富川、中標津火山灰土の  $OCR = 5$  に関しては、それぞれ  $SR = 0.549, 0.715$  の例を示している。

両図の比較から、 $OCR$  の違いによって繰返し非排水変形挙動に著しい相違が存在していることが認められる。 $OCR = 1$  にある各火山灰土や豊浦砂の有効応力経路では、第1波目の載荷段階から高い過剰間隙水圧の蓄積が認められるが、 $OCR = 5$  の場合は過剰間隙水圧の蓄積が緩やかで、過圧密を受けたことによる過剰間隙水圧挙動の変化が明瞭に現れている。このことは、図-7 のような結果の整理を試みることによってより明確になる。すなわち、繰返し非排水せん断の第1波目で発生する過剰間隙水圧  $\Delta u_1$  に着目してみると、 $\Delta u_1$  は  $OCR$  の増加に伴って顕著に減少し、過圧密により発生間隙水圧が確実に抑制されていることがわかる。また図-7 (d) で明らかなように、各火山灰土の過圧密による間隙水圧

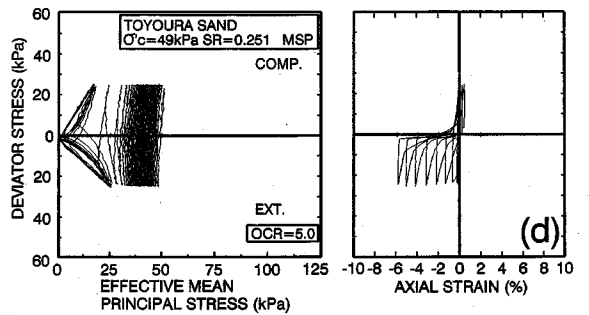
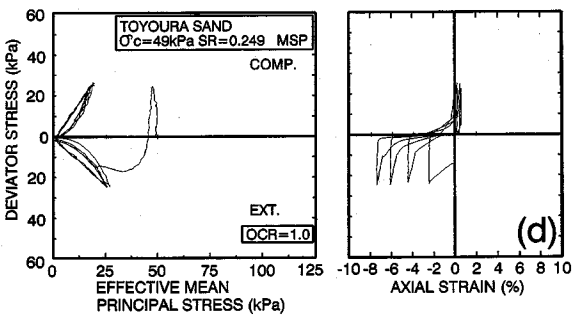
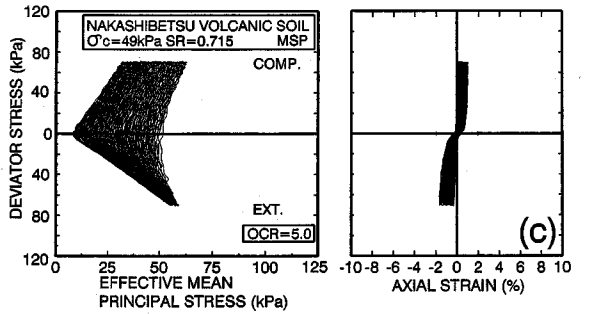
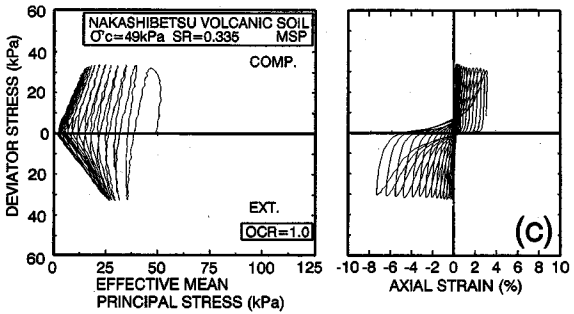
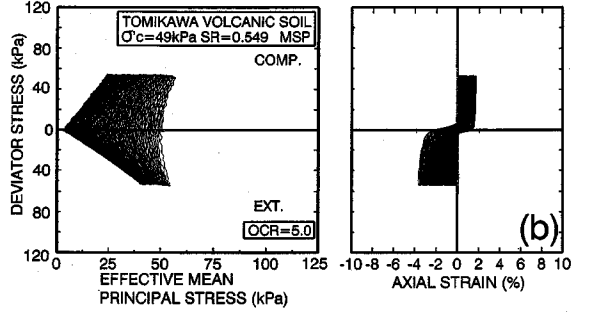
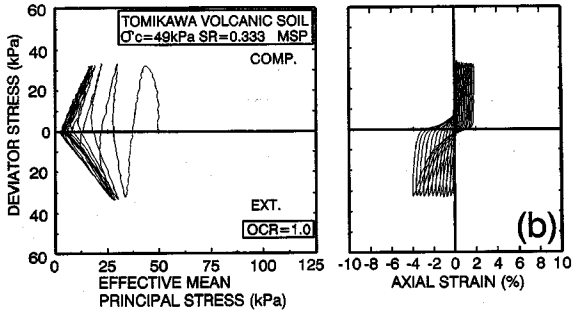
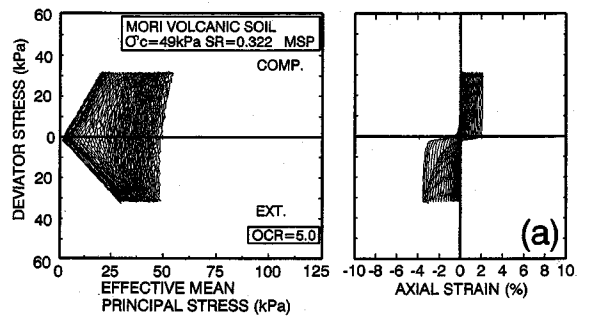
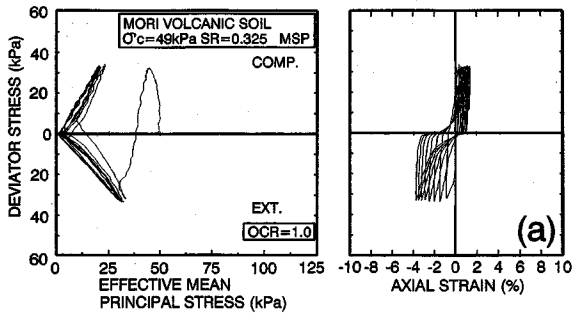


図-5 OCR=1における有効応力経路と軸差応力-軸ひずみ関係：(a) 森火山灰土、(b) 富川火山灰土、(c) 中標津火山灰土、(d) 豊浦砂

図-6 OCR=5における有効応力経路と軸差応力-軸ひずみ関係：(a) 森火山灰土、(b) 富川火山灰土、(c) 中標津火山灰土、(d) 豊浦砂

抑制効果は豊浦砂よりもはるかに顕著である。

このことは繰返し非排水変形の大きさに関しても言える。すなわち、図-8に示されているように、繰返し非排水せん断の第1波目での発生軸ひずみ  $\varepsilon_{a1}$  (白抜き記

号)は、SRの大きさによってその程度に差があるものの、少なくともOCRの増加とともに減少し、変形しづらくなっていることがわかる。一方、図-5と図-6における各火山灰土の応力-ひずみ挙動では、豊浦砂のよ

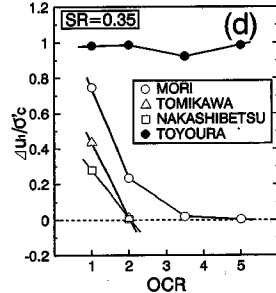
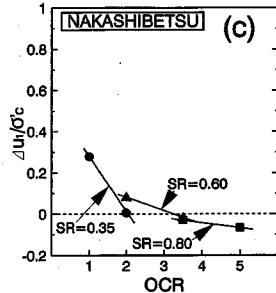
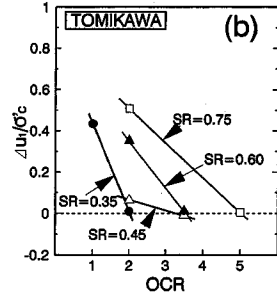
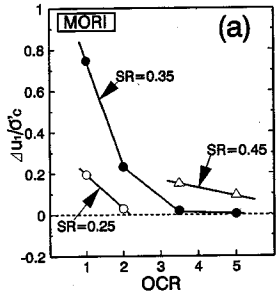
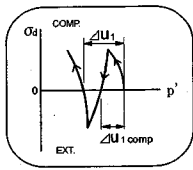


図-7 繰返し非排水せん断第1波目の発生間隙水圧と過圧密比の関係：(a) 森火山灰土，(b) 富川火山灰土，(c) 中標津火山灰土，(d) SR=0.35での比較

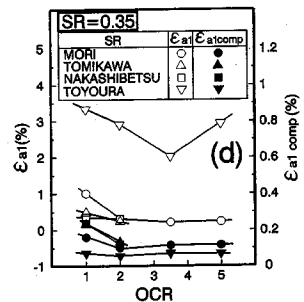
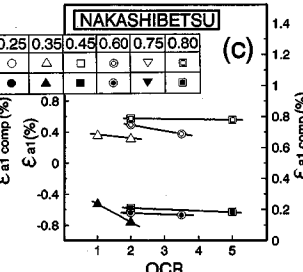
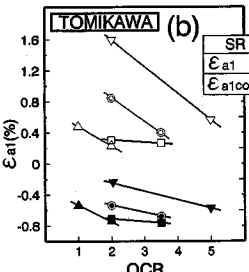
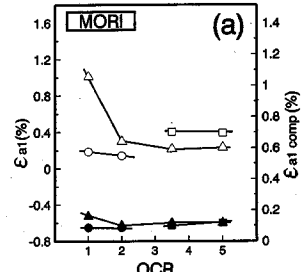
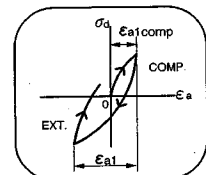


図-8 繰返し非排水せん断第1波目に発生する軸ひずみと過圧密比の関係：(a) 森火山灰土，(b) 富川火山灰土，(c) 中標津火山灰土，(d) SR=0.35での比較

うなクリーンな砂<sup>9)</sup>ほど顕著ではないが圧縮側よりも伸張側へ変形が卓越するという初期構造の異方性が存在するようである。また、図-8の繰返し非排水せん断第1波目で発生する圧縮側軸ひずみ  $\epsilon_{a1 comp}$  (黒塗り記号) と OCR の関係からも明らかのように、過圧密による変形パターンの変化は顕著ではないように思われる。このことから、供試体作成時に形成される堆積構造の特性は、大きな等方圧密圧力 (今回は  $\sigma_{pc} = 245$  kPa) を受けて

もある程度保持されているのではないかと推定できる。なお、このような異方的力学挙動は、不攪乱火山灰土の繰返し非排水せん断挙動においても同様に存在していることが示されている<sup>2)</sup>。

次に過圧密による繰返し非排水せん断強さの変化を定量的に示すため、過圧密による液状化強度の増加率  $R_s$  と OCR の関係を調べてみた。ここで  $R_s$  は、所定の両振幅軸ひずみ  $DA$  および所定の繰返し回数  $N_c$  における

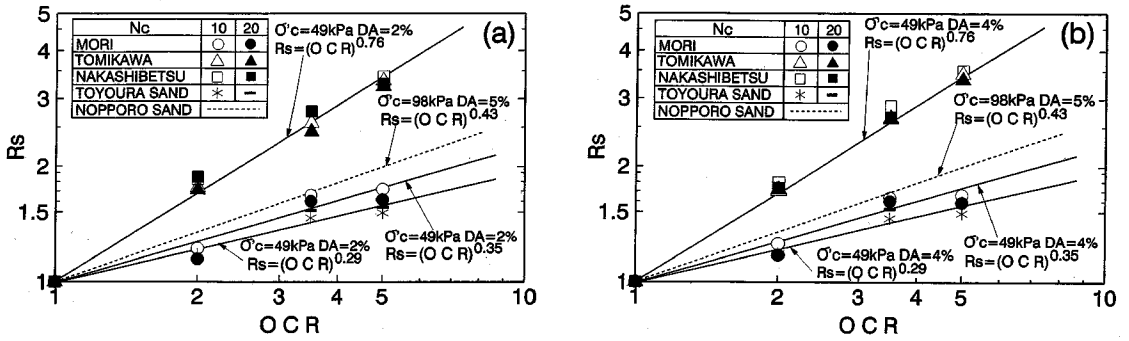


図-9 液状化強度増加率  $R_s$  と  $OCR$  の関係：(a)  $DA=2\%$ 、(b)  $DA=4\%$

表-2 火山灰土と砂質土に関する強度増加指数  $m$

SOIL SAMPLES	$\sigma'_c$ (kPa)	DA (%)	Nc	m
MORI VOLCANIC SOIL	49	1, 2, 3, 4, 5	10, 20	0.35
TOMIKAWA VOLCANIC SOIL	49	1, 2, 3, 4, 5	10, 20	0.76
NAKASHIBETSU VOLCANIC SOIL	49	1, 2, 3, 4	10, 20	0.76
TOYOURA SAND (Drc=80%)	49	1, 2, 3, 4, 5	10, 20	0.29
TOYOURA SAND (Drc=50, 80%) <sup>8)</sup>	98	10	10, 20	0.125~0.25
NOPPORO SAND (Drc=91%) <sup>7)</sup>	98	1, 2, 5	5, 10, 20	0.43

“過圧密供試体の液状化強度  $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{oc}$ /正規圧密供試体の液状化強度  $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{NC}$ ” で定義している。

$$R_s = [(\sigma_d/2\sigma'_c)_{oc} / (\sigma_d/2\sigma'_c)_{NC}]_{at any DA and Nc} \quad (1)$$

図-9 (a), (b) は、森、富川、中標津火山灰土について  $N_c=10, 20$  回においてそれぞれ  $DA=2\%$  と  $4\%$  が生じる時の  $R_s-OCR$  関係を、砂に関する既存の研究結果<sup>6), 7), 8)</sup>と同様に、過圧密による強度増加は次式によって表せることが明らかである。

$$R_s = (OCR)^m \quad (2)$$

ここに  $m$  は、直線の勾配であって強度の増加割合を表す。なお表-2には、各火山灰土と砂質土に対する  $m$  値を一括して示した。森火山灰土の強度増加率  $m$  は、クリーンな砂である豊浦砂<sup>2)</sup>や野幌砂<sup>7)</sup>のそれと大きな違いはないようである。一方、富川、中標津火山灰土の強度増加率  $m$  は、森火山灰土や砂質土と比べて極めて高い値を示していることが注目される。このことは、森火山灰土の構成粒子が堅硬であるのに対し、富川、中標津火山灰土は著しい粒子破碎性を示す粒状体である<sup>2)</sup>ことに起因していると思われる。すなわち、富川、中標津

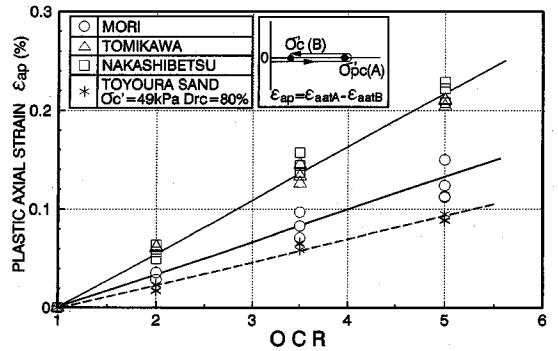
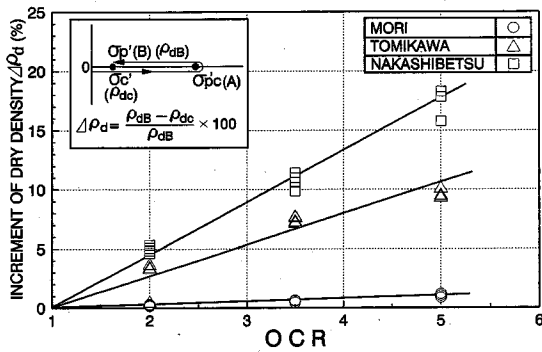


図-10 過圧密過程でもたらされた塑性軸ひずみ  $\epsilon_{ap}$

火山灰土では先行圧密圧力の増加に伴って顕著な粒子破碎が生じ、前述の初期構造異方性のある程度保持しつつも粒子配列構造が大きく変化(細粒化)していると考えられる。

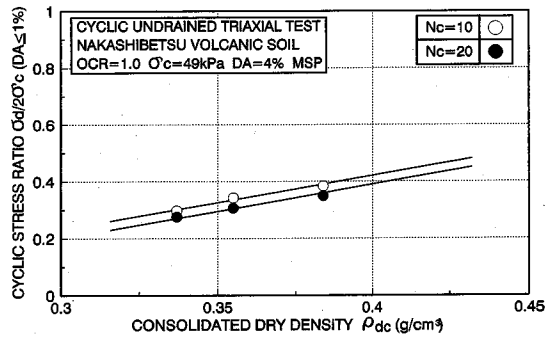
過圧密による液状化強度の増加に粒子配列構造の変化が関係しているとする、過圧密過程でもたらされる軸ひずみ量にその影響を見ることができるかもしれない。そこで図-10に示すように、各火山灰土と豊浦砂に関して、等方圧密-膨張過程を経ることにより発生する塑性ひずみ  $\epsilon_{ap}$  と  $OCR$  の関係を調べた。 $\epsilon_{ap}$  は、図-10の挿入図に描かれているように、先行圧密圧力  $\sigma'_c$  (A点) で生じた軸ひずみから  $\sigma'_c$  に膨張させた時 (B点) の軸



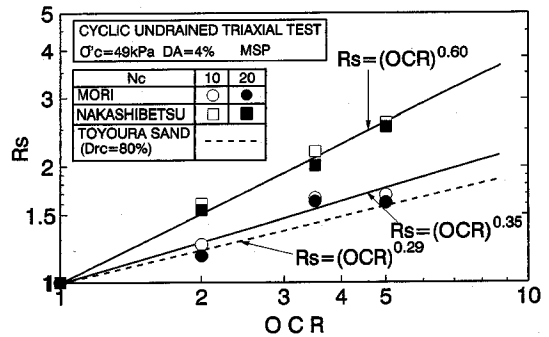
図一11 過圧密過程による供試体密度の変化

ひずみの差として定義されている。龍岡ら<sup>8)</sup>は、豊浦砂の塑性軸ひずみは OCR が大きくなるほど増大し、過圧密による液状化強度の増加率は塑性軸ひずみに支配されることを示唆した。図一10では、豊浦砂だけではなく火山灰土においても OCR と  $\epsilon_{ap}$  に良好な正の相関があることがわかる。また、各 OCR における森火山灰土の塑性ひずみは豊浦砂よりも若干大きめの値 (1.6 倍) となっているが、富川、中標津火山灰土の塑性ひずみは、ともに豊浦砂の約 2.7 倍とはるかに大きな値となっている。このことから、過圧密による液状化強度の増加は過圧密履歴過程によって供試体に与えられた塑性ひずみ仕事によるものであり、構成粒子が脆弱な火山灰土ほど塑性ひずみ仕事量が大きくなるためであると指摘できよう。

一方、粒子破碎性を示す富川、中標津火山灰土の場合は、上述のような塑性ひずみ仕事の増大の影響の他、圧密・膨張過程で生ずる供試体密度の変化の影響が含まれていることが考えられる。そこで、まず過圧密履歴による供試体密度の変化を定量化するために、図一11に示すように圧密圧力  $\sigma'_{pc} = 49 \text{ kPa}$ 、すなわち正規圧密状態での乾燥密度  $\rho_{dc}$  と  $\sigma'_{pc}$  (A 点) を経て除荷が終了した時点 (B 点: 過圧密完了) での乾燥密度  $\rho_{dB}$  を調べてみた。図一11は、これらの  $\rho_{dc}$  と  $\rho_{dB}$  により求められる供試体密度の増加割合  $\Delta\rho_d (= (\rho_{dB} - \rho_{dc}) / \rho_{dB})$  と OCR の関係を整理したものである。森火山灰土を除く他の火山灰土の供試体密度が先行圧密圧力の増加に伴って顕著に増加しており、特に中標津火山灰土の OCR=5 では OCR=1 に比べて約 18% もの密度増加となっている。また富川火山灰土でも約 11% の密度増加状態となっている。これは、他の試料より脆弱な粒子からなっているため、圧密圧力の増加に伴う粒子破碎によって間隙が減少 (細粒化) するためである。ここで、富川火山灰土の液状化強度は初期密度の依存性が小さいことがわかっているが<sup>9)</sup>、中標津火山灰土の密度変化はかなり大きいので液状化強度の増加に少なからず影響を及ぼしていると



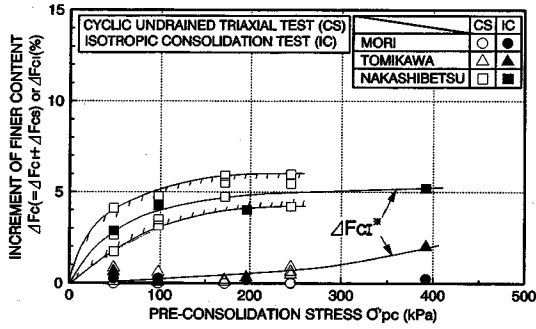
図一12 密度変化による液状化強度の変化



図一13 密度変化の影響を除去した  $R_s$ —OCR 関係 (DA=4%)

考えられた。このため、中標津火山灰土の元々の粒度で供試体密度だけを変えた一連の繰返し非排水三軸試験を行い、密度変化による液状化強度の変化を調べてみたのが図一12である。図から、中標津火山灰土には無視できない密度依存性が存在していることがわかる。なお、図示は省略したが、豊浦砂の場合<sup>10)</sup>と同様の繰返し強度補正曲線を得ることができている。

図一11から正規圧密供試体と過圧密供試体の密度の違いを求め、次にこれらの密度変化による繰返し強度の変化を、たとえば中標津火山灰土では図一12を基本として算出した。このような補正をして求めた  $R_s$ —OCR 関係を図一13に示した。なお、正規圧密供試体と過圧密供試体の粒度分布の違いは小さくないと考えられるが、ここでは一応過圧密のみによってもたらされた繰返し非排水強さの変化を表現しようと試みている。また図には、過圧密による密度変化が小さい森火山灰土や豊浦砂のデータも併記している。中標津火山灰土の  $m$  は 0.60 となり、構成粒子が硬質な森火山灰土や豊浦砂よりもやはり液状化強度の増加はるかに大きい結果となっている。また、密度変化の影響を除去しない  $m = 0.76$  との比較から、液状化強度増加に対する構造変化の貢献は約 77% (OCR=5 の場合) を占めていると指摘できる。すなわち、残りの 23% は密度変化によるも



※ $\Delta F_{ci}$ :  $\Delta F_c$  induced during isotropic consolidation-swelling (process ①→② shown in Fig.3)

図-14 細粒分含有率の増加量と先行圧密圧力の関係

のと考えられる。

このように、破碎性火山灰土の過圧密による液状化強度の増加は、粒子破碎を伴った微視構造の変化によるところが大であると言える。以上のことから、過圧密履歴が液状化強度の増加を与えるような土粒子同士を結合させる何らかの作用（たとえばセメンテーション）を、構成粒子の破碎とともに、もたらしたと推定されよう。

## (2) 過圧密による粒子破碎

構成粒子の破碎が力学挙動に及ぼす影響を表現するための一つの指標として、75 μm 以下の細粒分含有率の増加量  $\Delta F_c$  に注目して議論するのは有効であることをすでに示した<sup>2)</sup>。ただし、 $\Delta F_c$  は起こり得る構成粒子の様々な破碎の形態をすべて表現できるものではないので、その工学的適用にはさらにいくつかの工夫が必要である。

ここでは、火山灰土の等方圧密過程 (IC) と繰返し非排水せん断過程 (CS) でもたらされる粒子破碎を定量的に示すため、所定の OCR を経て繰返しせん断を受けた後の細粒分含有率の増加量  $\Delta F_c$  と、等方圧密過程のみでもたらされる細粒分増加量  $\Delta F_{ci}$  を調べてみた。図-14 は、ふるい分析で求められた  $\Delta F_c$  と  $\Delta F_{ci}$  を先行圧密圧力  $\sigma'_{pc}$  に対して示している。中標津火山灰土の細粒分の増加は他の火山灰土よりも卓越しており、最大で 6% 前後の値となる。ここで、中標津火山灰土はその構成粒子の脆弱性のためか、斜線ゾーンで示されるようなデータのばらつきが認められる。このばらつきの原因として、MSP 法による供試体作成時にもたらされる初期の細粒分の測定誤差が挙げられるが、この供試体作成時でのばらつきを照査したところ、ほぼ ±1% 以内であった。なお、森火山灰土は本研究の圧力レベルではほとんど粒子破碎せず、富川火山灰土では最大で 2% ほどの細粒分増加を示す結果となっている。

次に、図-14 で示された等方圧密過程での  $\Delta F_{ci}$  から繰返し非排水せん断のみで生ずる細粒分含有率の増加量

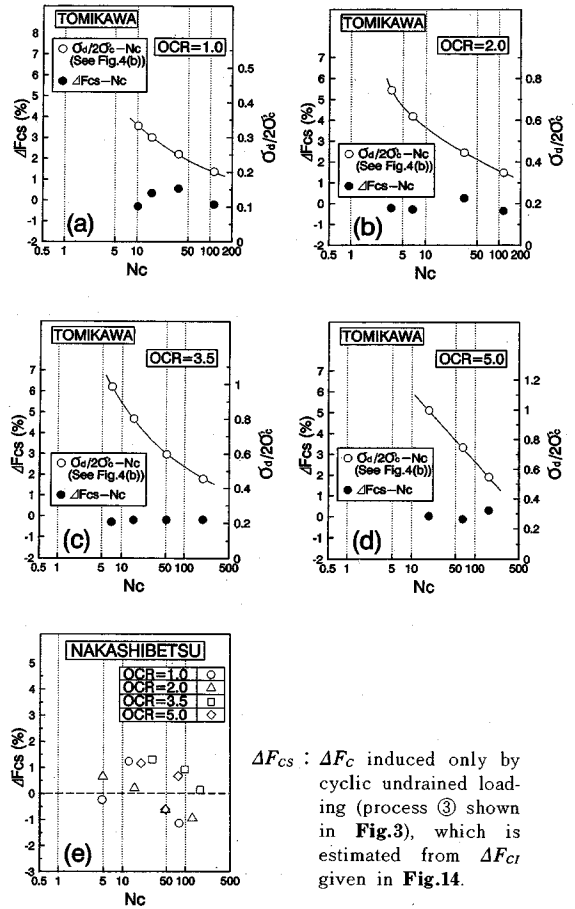


図-15 繰返し非排水せん断による粒子破碎：(a)~(d) 富川火山灰土 ( $DA=5\%$ ,  $\sigma'_c=49$  kPa), (e) 中標津火山灰土 ( $DA=4\%$ ,  $\sigma'_c=49$  kPa)

$\Delta F_{cs}$  ( $=\Delta F_c - \Delta F_{ci}$ ) を求めた。図-15 (a)~(d) は、富川火山灰土の各 OCR における  $\Delta F_{cs} - \sigma'_c/2\sigma'_c - Nc$  関係を示している。これらの図から、富川火山灰土では繰返し回数や繰返し応力の大きさに関係なく、 $\Delta F_{cs}$  値はほとんど無視できる程度の値であることがわかる。このことは、中標津火山灰土においても同様である。すなわち、図-15 (e) に示すように、繰返し応力レベルや繰返し回数に関係なく中標津火山灰土の  $\Delta F_{cs}$  値は ±1.3% の範囲にあり、初期細粒分の誤差内を推移する値を示していることから、中標津火山灰土においても繰返し非排水せん断過程で生ずる粒子破碎はごく僅かであるといえよう。

以上のことから、火山灰土の粒子破碎は有効応力の低減する繰返し非排水せん断過程ではほとんど発生せず、その大部分が圧密過程において生じたものであるといえる。なお、このような富川、中標津火山灰土の圧密・せん断過程でもたらされる粒子破碎 (=細粒化) は、応力



系や排水条件にかかわらず有効平均主応力  $p'$  と一義的な関係にあることが確認されている<sup>2)</sup>。

#### 4. ま と め

本研究では、過圧密による粗粒火山灰土の動的力学挙動の変化と粒子破碎特性を調べた。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 過圧密履歴を受けた粗粒火山灰土の液状化強度は、通常の砂と同様に過圧密比が高くなるほど増加する。なおその強度増加は、過圧密比のみの指数関数で表現できる。
- 2) 火山灰質土の過圧密による液状化強度の変化は構成粒子の脆弱性により異なり、破碎性火山灰土では極めて高い強度増加率  $m$  を示すが、非破碎性の火山灰土では通常の砂と同程度の強度増加となる。例えば、森火山灰土では  $m=0.35$ 、富川、中標津火山灰土では  $m=0.76$  である。
- 3) 火山灰質粒状体の粒子破碎は、有効応力が低減していくような繰返し非排水せん断過程ではほとんど発生しない。
- 4) 破碎性火山灰土の過圧密による液状化強度の増加の主因は、粒子破碎がもたらす粒子間接点でのセメンテーション的効果を伴う微視的構造変化によるものであって、圧密による密度変化の貢献は少ない。

謝辞：本研究では、実験およびデータ整理に室蘭工業大学大学院の阿曾沼剛（現 防衛庁）、左近利秋、中田隆文、笠井隆治、各君の協力を得た。またサンプリングでは、磯崎真一氏（北海道開発コンサルタント（株））および池田晃一氏（北海道土質コンサルタント（株））に多大なご支援を頂いた。記して深甚なる感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 谷口秀男：締固めによる粗粒火山灰の粒子破碎が締固め密度に及ぼす影響，土と基礎，Vol. 27, No. 6, pp. 29-34, 1979.
- 2) 三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破碎，土木学会論文集，No. 547/Ⅲ-36, 1996.
- 3) 土質工学会：土質試験の方法と解説，1990.
- 4) Miura, S. and Toki, S. : A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77, 1982.
- 5) Miura, S. and Toki, S. : Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 3, pp. 69-84, 1984.
- 6) Ishihara, K. and Takatsu, H. : Effects of overconsolidation and Ko conditions on the liquefaction characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 4, pp. 59-68, 1979.
- 7) 三浦清一，土岐祥介，岡積敏雄：過圧密履歴を有する異方性砂の変形—強度特性，第20回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp. 581-584, 1985.
- 8) Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M. and Pradhan, T. B. S. : Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 1, pp. 119-131, 1988.
- 9) 三浦清一，八木一善：火山成粗粒土の動的力学特性に及ぼす応力履歴の影響，火山灰質土の性質とその設計・施工に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 229-236, 1995.
- 10) Miura, S., Toki, S. and Tatsuoka, F. : Cyclic undrained triaxial behavior of sand by a cooperative test program in Japan, *Dynamic Geotechnical Testing II*, ASTM STP 1213, pp. 246-260, 1994.

(1996. 1. 11 受付)

## EFFECT OF STRESS HISTORY ON CYCLIC UNDRAINED DEFORMATION — STRENGTH CHARACTERISTICS OF VOLCANIC COARSE-GRAINED SOILS

Seiichi MIURA, Kazuyoshi YAGI and Shima KAWAMURA

This paper presents the results of an experimental investigation on three different volcanic coarse-grained soils in the cyclic undrained triaxial tests varying both maximum past consolidation pressure and the overconsolidation ratio (OCR). Test results showed that the variation in cyclic deformation-strength behaviors due to overconsolidation was observed more clearly in the volcanic soils with which particle breakage had been induced during consolidation process and their variation characteristics relate uniquely to the OCR value. Therefore, the cyclic undrained triaxial strength of overconsolidated volcanic soils can be determined only by OCR. It was also considered that strength increase by overconsolidation is attributed mainly to the fabric change with significant particle breakages.