

# 火山性粗粒土の繰返し非排水せん断特性 に及ぼす破碎細粒分の影響

八木一善<sup>1</sup>・三浦清一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 ㈱地崎工業 土木部技術課 (〒064-8588 札幌市中央区南4条西7丁目)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

本研究では、粒子破碎によって生ずる細粒分が火山性粗粒土の強度-変形特性に及ぼす影響を調べるため、細粒分の含有率と過圧密比を変化させた供試体に対する繰返し非排水三軸試験と一次元圧密試験を行っている。一連の試験結果から、非塑性の破碎細粒分が増加すると正規圧密された供試体の液状化強度は確実に低下し、それは幾何学的に求められた最大・最小間隙比で定まる相対密度の低下によって説明できることがわかった。また過圧密履歴を受けた供試体では、破碎細粒分の含有率や過圧密比が増すほど液状化強度や圧密降伏応力は高くなり、間隙比変化だけでは説明できない新たな強度増加がもたらされる要因を考察している。

**Key Words** : volcanic coarse-grained soil, liquefaction, fines, consolidation yielding stress, particle breakage, overconsolidation

## 1. はじめに

火山性粗粒土に関する過去の研究<sup>1),2)</sup>は、圧密あるいはせん断過程で有効平均主応力が増加すると、その静的・動的力学挙動は粒子破碎の影響を大きく受けることを明らかにしている。また、過圧密履歴を受けることによって繰返し非排水せん断強度は著しく増加し、その強度増加は構成粒子が脆弱であるほど大きいとされている<sup>3)</sup>。このような破碎性火山灰土の強度増加は、先行圧密圧力が高くなるほど顕著となる粒子破碎による粒子間接点の増加、密度や粒子配列構造の変化などがもたらすセメンテーション的な効果<sup>3)</sup>によるものと考えられていた。

硬質な粒子から成る粒状体であっても、高い拘束圧下でせん断を受けると粒子破碎が生じ、それに伴って強度増加がもたらされるという報告<sup>4),5),6)</sup>がある。例えば Lee<sup>4)</sup> は、高圧下で粒子破碎性を示すサクラメント砂について、せん断中にボンド構造 (Adhesive bonding) が発達することを実験的に明らかにしている。また萩原<sup>6)</sup> は、高拘束圧下にある砂礫土ではせん断中の粒子破碎によって粘着力が発達し、それは有効平均主応力が高くなるほど著しくなることを示した。また、粒子破碎がせん断を受ける粒状体のボンド構造 (あるいは粘着力) を発達させる要因は、粒子破碎によって生じた細粒分が大きな粒子の表面に付着し、粘性を帯びるためとしている。すなわち、細粒分がより大きな粒子同士の“つなぎの働き”をするという考えである。

一方、風間<sup>7)</sup>はまさ土に関する一連の試験結果から、適当な量の細粒分は土粒子骨格の変形を助長すると述べている。また兵動<sup>8)</sup>は、しらすの母粒子が粉碎されて生じた細粒分を除去すると、拘束圧が変化しても原粒度のしらすより大きな繰返しせん断強度が得られることを報告している。これらの研究からは、細粒分が土の骨格を成す粒子同士の結合力を低減する“ころのような働き”をすること<sup>7)</sup>も示唆されている。

この粒子間に存在する細粒分がどのような働きをするのかは、砂質土に関する多くの研究<sup>9)~16)</sup>によれば、細粒分の含有率やその性質によるところが大きいようである。例えば正規圧密された砂質土に関する既往の研究では、概ね次のような見解が示されている。

- ・非塑性あるいは低塑性の細粒分を砂質土に混合すると、細粒分の増加によって液状化強度は低下し、ある細粒分含有率 (もしくは粘土分含有率) にて液状化強度は最小値となる<sup>9),11),12),13),16)</sup>。
- ・塑性指数  $I_p$  の高い細粒分であるほど液状化強度は高くなる傾向があつて、混合される細粒分の性質は液状化強度に影響を与える<sup>9),10),12),14),15)</sup>。

また佐藤<sup>14)</sup>は、細粒分が増加すると砂粒子同士の接触点が減少することも確認している。よって火山性粗粒土の粒子破碎によって生ずる細粒分の含有率や性質も、その強度に影響を及ぼす重要な要因になるものと思われる。

過圧密履歴を受けた豊浦砂について、黄<sup>11)</sup>は非塑性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

表-1 細粒分のみの物理的指標

細粒分 (Fc ≤ 75 μm)		WL (%)	Ip	SILT (%)	CLAY (%)
当幌火山灰土	原位置試料の細粒分	79.7	N.P.	45	55
	破砕細粒分, Fc crushed (圧密過程で生じたもの)	75.0	N.P.	50	50
	破砕細粒分, Fc crushed (粒子を粉碎して作成)	77.3	N.P.	45	55
NSF-CLAY		54.0	26.0	0	100
MC-CLAY		87.0	49.0	8	92

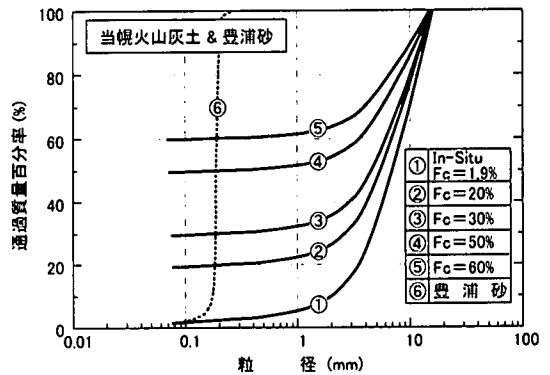


図-1 細粒分を混合した試料の粒径加積曲線

の増加幅はきれいな砂と変わらないとした。また足立ら<sup>17)</sup>は、非塑性シルトの過圧密履歴による強度増加は、砂質土の場合よりも大きくなると述べている。このように、細粒分が含まれる土の液化強度に関しては、細粒分の性質やその含有率だけではなく応力履歴の影響も無視できない。

構成粒子が脆弱な火山性粗粒土の場合は、先行圧密圧力の増大によって粒子破砕が卓越し、粒子の再配列や粒度変化が生じるとともに、細粒分は著しく増加することがわかっている<sup>3)</sup>。前述の砂、砂礫土、しらす、まさ土の力学特性に及ぼす細粒分の影響を踏まえると、粒子破砕によって細粒分が増加するような破砕性火山灰土の場合は、その破砕細粒分の量や性質が力学特性に及ぼす影響を把握しておくことが重要と思われる。

そこで本研究では、火山性粗粒土の粒子破砕によって生じる非塑性の細粒分（破砕細粒分）が強度-変形特性に与える影響に着目し、一連の室内試験を行っている。具体的には、供試体の細粒分含有率と先行圧密圧力を変化させて種々の圧密履歴を与えた後、繰返し非排水三軸試験および一次元圧密試験を行って強度-変形特性の変化を調べた。また比較のために、通常の粘土を混合した供試体についても同様の繰返し非排水せん断試験を実施し、細粒分の性質による力学挙動の違いも詳しく検討した。

## 2. 試験に用いた試料

試験に用いた試料（当幌火山灰土、TOUHORO VOLCANIC SOIL）は、北海道中標津町当幌地区の土被り厚約2mの切土斜面から採取された摩周火山の降下火砕堆積物（Ma-1）である。その噴出年代は約1.1~1.3万年前と推定されており、道東に広く分布している。1994年の北海道東方沖地震（ $M=8.1$ ）の際には、この火山灰土が主体となる地盤の液化化や盛土の崩壊がもたらされている<sup>1)</sup>。

試料に混合する細粒分は、当幌火山灰土の粗粒子をハンマーで粉碎し、ふるい分けによって作成したもの（破砕細粒分, Fc crushed）である。また破砕細粒分との比較のために、塑性を有するNSF-CLAYおよびMC-CLAYを混合した試料に関する試験も行った。表-1に、当幌火山灰土の原位置試料に含まれる細粒分、圧密過程の粒子破砕によって発生した細粒分、試料に混合する各細粒分の物理的指標を示す。粉碎して作成した破砕細粒分は、JIS A 1205による塑性限界試験<sup>18)</sup>では塑性指数が求まらずにN.P.という結果になる。また、原位置試料に含まれる細粒分や粒子破砕で生ずる細粒分とほぼ同一の性質を有している。粘土分の割合は、当然ながらNSF-CLAYやMC-CLAYよりも破砕細粒分が最も低い。

図-1は、当幌火山灰土の原位置試料（In-Situ Fc供試体）と、混合する細粒分の初期含有率Fcを変化させた試料の粒径加積曲線を示している。当幌火山灰土は豊浦砂に比べて粗粒であるが、原位置試料の細粒分含有率は1.9%と非常に低い値である。なお、本研究では全て15.9mmふるいを通過したものをを用いている。

表-2では、原位置試料と細粒分を混合した各試料に関する物理的特性を示した。当幌火山灰土の構成粒子は非常にポーラスで、多くの内部空隙を有しているために乾燥密度 $\rho_d$ は非常に小さな値となる。また、表-2に示した最大・最小密度 $\rho_{d,max}$ 、 $\rho_{d,min}$ はJIS A 1224<sup>19)</sup>に準じて求めているが、その粒径の一部は試験の基準外にあることに注意が必要である。

## 3. 試験方法

試験に用いた供試体は、乱した試料に所定の量の細粒分を混合し、多重ふるい落下法(MSP法、ふるい目の大きさ20mm, 7層)により再構成されたものである。細粒分の含有率を変化させた場合、粒子破砕を生じさせず

表-2 当幌火山灰土の物理的特性

SAMPLE NAME	Fc (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>50</sub> (mm)	U <sub>c</sub>
			max	min			
In-Situ Fc	1.9	2.53	0.520	0.470	0.515	7.3	4.63
Fc crushed	17	2.53	—	—	0.526	5.2	—
	30	2.53	—	—	0.558	4.2	—
	50	2.53	—	—	0.578	0.075	—
	60	2.53	—	—	0.591	0.060	—
	100	2.53	—	—	0.653	—	—
NSF-CLAY	30	2.71	—	—	0.583	4.2	—
MC-CLAY	30	2.74	—	—	0.561	4.2	—

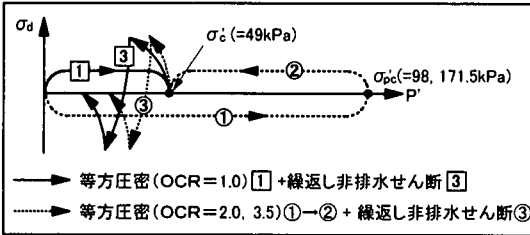


図-2 繰返し非排水せん断試験の応力経路

に供試体の密度を統一することは困難であるため、OCRを変化させた供試体の密度の平均的な値を各Fc値に対する目標密度としている。また $\rho_c$ は、OCRが変化しても目標値に対して $\pm 5\%$ の範囲内に入るように設定した。この目標とした圧密後の密度 $\rho_c$ は表-2に示される。なお、三軸供試体の寸法は直径70mm、高さ170mm、用いたメンブレンの厚さは0.2mmである。

供試体を三軸セル内に設置し、二酸化炭素、脱水水を通した後に、196kPaのバックプレッシャーを供給して飽和させた。この方法により、全ての供試体の間隙水圧係数B値は確実に0.96以上の値を得ている。飽和が完了した後は、過圧密比OCR(=1.0, 2.0, 3.5)に対応する先行圧密圧力 $\sigma'_c$ (=49~171.5kPa)にて等方圧密を行った。圧密の終了は、体積ひずみの変化率が $1.0 \times 10^{-4} \%$ /min以下になった時とし、全ての供試体の圧密時間 $T_c$ は24hr以内となっている。圧密が完了した後は、有効拘束圧 $\sigma'_c=49$ kPaのもとで等方的に膨張(1hr)させている。

図-2に、繰返し非排水せん断試験の応力経路を示す。繰返し非排水せん断試験では、圧密→膨張が完了した三軸供試体に対し、有効拘束圧 $\sigma'_c=49$ kPaのもとで軸差応力振幅一定、載荷周波数0.1Hzの正弦波にて繰返し非排水せん断を行った。

一次元圧密試験に用いた供試体は、繰返し非排水せん断試験と同様に三軸セル内にて先行的に正規圧密あるいは過圧密履歴を与えたものである。圧密後は三軸供試体にモールドを被せて排水させ、これを冷凍したうえで一次元圧密試験用の供試体寸法(直径60mm、高さ

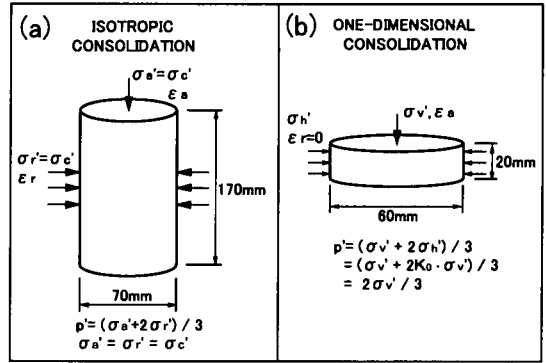


図-3 圧密時の供試体の有効応力状態:

(a)等方圧密、(b)一次元圧密

20mm)に成形した。なお、一次元圧密はJIS A 1217の圧密試験の方法<sup>18)</sup>によって行っている。

等方圧密過程では、新たな粒子破砕が生じて破砕細粒分 $\Delta Fc$ が発生する。このため等方圧密のみの三軸試験も実施し、ふるい分析によって圧密後の細粒分含有率 $Fc'$ (= $Fc + \Delta Fc$ )を調べている。ふるい分け(75 $\mu$ m)では、まず試験後の試料をふるい内でほぐし、軽くふるいを揺すった後に(100回)、水洗いにて細粒分の洗い流しを行った。なお、本論文で述べる過圧密比OCRと圧密後の細粒分含有率 $Fc'$ は、繰返し非排水三軸試験、一次元圧密試験ともに三軸試験装置での等方圧密によるものを指している。すなわち、 $Fc'$ は繰返し非排水せん断直前、あるいは一次元圧密直前の細粒分含有率である。

三軸試験での等方圧密時および一次元圧密時の供試体の有効応力状態をそれぞれ図-3(a), (b)に示す。また一次元圧密では、静止土圧係数 $K_0$ を0.5と仮定して有効平均主応力 $p'$ を算出している。

#### 4. 試験結果と考察

##### (1)過圧密履歴を受けた再構成供試体の液状化強度

図-4は、原位置試料を再構成した供試体(In-Situ Fc供試体)に関して、過圧密比OCRを変化させた場合の液状化強度(DA=5%)を比較している。また図にはブロックサンプリングによって採取された不攪乱供試体に関する液状化強度線(OCR=1.0)も示した。不攪乱供試体の採取深度は1.8m、有効土被り圧は $\sigma'_v=29.4$ kPaであり、試料を採取した地層はほぼ均一である。図-4から、当幌火山灰土の液状化強度は過圧密比の増加に伴って極めて高くなることが注目される。またOCR=2.0の液状化強度は、不攪乱供試体の液状化強度とほぼ同等になるという結果が得られている。

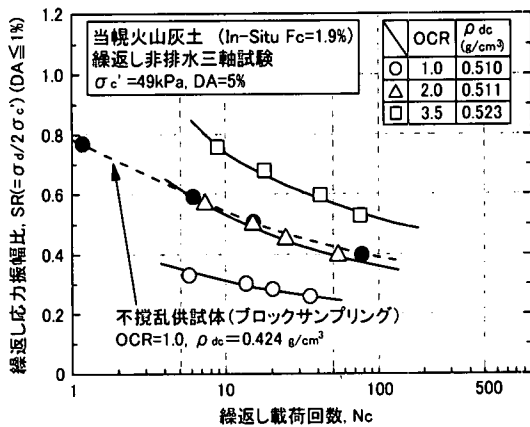


図-4 過圧密履歴を受けた火山灰土の液状化強度

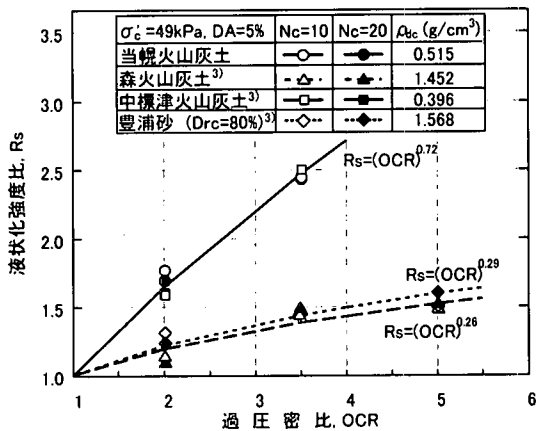


図-5 過圧密による強度増加割合  $R_s$  と OCR の関係

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調べるため、過圧密による液状化強度の増加割合  $R_s$  と OCR との関係を探ったのが図-5である。ここで  $R_s$  は、 $N_c=10$  回あるいは 20 回で DA が 5% となるときの“過圧密供試体の液状化強度  $SR_{OC}$  / 正規圧密供試体の液状化強度  $SR_{NC}$ ” で定義している。また図では、森火山灰土、中標津火山灰土および密な豊浦砂 ( $Drc=80\%$ ) に関する  $R_s$  - OCR 関係<sup>3)</sup> も示した。

火山性粗粒土の過圧密による強度増加は、当幌火山灰土以外のものについてのこれまでの研究<sup>3)</sup> から、細粒分を含まない砂の場合と同様に次式によって表せることが明らかにされている。

$$R_s = (OCR)^m \quad (1)$$

ここで、 $m$  は過圧密に伴う強度の増加の程度を表してい

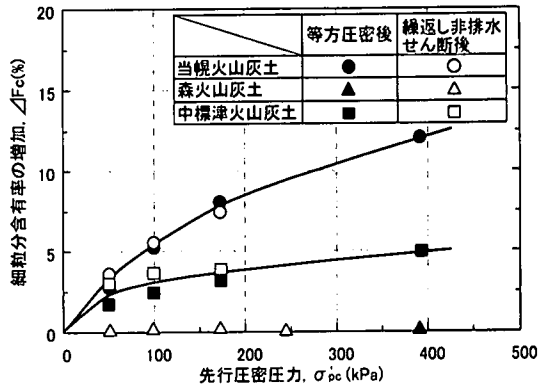


図-6 圧密による細粒分増加と先行圧密圧力の関係

る。構成粒子が硬質な森火山灰土の指数  $m$  は密な豊浦砂の値と比べて大きな違いはないが、脆弱な粒子から成る当幌火山灰土と中標津火山灰土の  $m$  はそれらに比べて極めて高い値となる。これは、以下に述べるように、当幌火山灰土や中標津火山灰土が著しく粒子破碎性を示す粒状体であること<sup>3)</sup> に起因していると思われる。ここで、図-5 や式(1) は当然ながら拘束圧によって変わる可能性がある。

各火山灰土の粒子破碎性を調べるために、等方圧密後および繰返し非排水せん断後の細粒分含有率の増加  $\Delta F_c$  と先行圧密圧力  $\sigma'_{pc}$  との関係を図-6 に示した。図で示されるように、森火山灰土では粒子破碎による細粒分増加は生じていないが、当幌火山灰土や中標津火山灰土では圧密過程で顕著な細粒分の増加がもたらされている。特にそれは当幌火山灰土で大となるが、これは先行圧密圧力の増加に伴って著しい粒子破碎が生じ、粒子配列構造に大きな変化(細粒化)が生じていることを意味している。例えば当幌火山灰土では、 $\sigma'_c=392\text{kPa}$  の等方圧密過程で約 12% の細粒分増加がもたらされている。

また図-6 では、当幌火山灰土の等方圧密後と繰返し非排水せん断後の  $\Delta F_c$  に有意な差は認められない。このことから、非常に脆弱な粒子から成る火山性粗粒土であっても、せん断時の有効拘束圧が低い場合 ( $\sigma'_c=49\text{kPa}$ ) には、有効応力が低減する繰返し非排水せん断過程よりも圧密過程で生じる粒子破碎が支配的になることがわかる。

以上のことから、過圧密による液状化強度の増加には、その圧密過程で生じる粒子破碎が強く関与していると思われる。よって粒子破碎性を示す火山性粗粒土は、その強度特性が応力履歴の影響を大きく受けやすい粒状体であるといえよう。

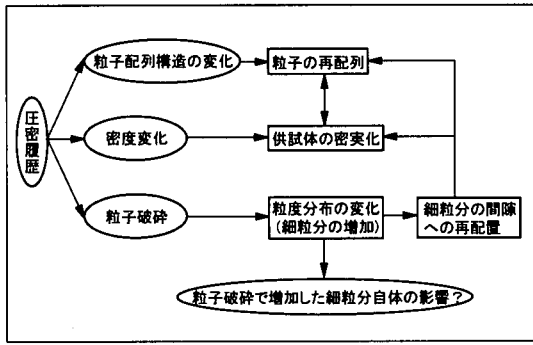


図-7 過圧密履歴による強度増加の諸要因

(2) 破碎細粒分の増加による液状化強度の変化

前述の当幌火山灰土の過圧密履歴による強度増加の原因は、まず粒度構成や応力状態の変化に伴う粒子の再配列によるものが考えられる。また、図-4 および図-5 では密度調整された供試体に関する結果を示したが、通常は過圧密履歴を与えることによって密実な供試体となる。このような過圧密によって強度増加が生じる要因を整理したのが図-7 である。粒子破碎による細粒化は、密度の増加やより安定した粒子配列構造になることに貢献するものと考えられるが、増加した破碎細粒分自体が強度特性に与える影響については未だ明らかにされていない。

そこで、人為的に当幌火山灰土を粒子破碎させて作成した細粒分(破碎細粒分,  $F_c$  crushed)を試料に混合し、液状化強度の変化を調べてみた。図-8(a), (b), (c)は、破碎細粒分の初期含有率  $F_c$  を変化させた供試体の液状化強度を、それぞれ  $OCR=1.0$ ,  $2.0$  および  $3.5$  の場合について示したものである。図に示されるように、破碎細粒分の増加によって正規圧密火山灰土の液状化強度は確実に低下する。一方、過圧密履歴を受けた供試体は正規圧密供試体に比べて液状化強度の変動が小さく、 $OCR=3.5$  ではむしろ細粒分増加によって強度は高くなる傾向が認められる。

これらの破碎細粒分を混合した試料について、図-5と同様に過圧密による強度増加割合  $R_s$  と  $OCR$  との関係求めたのが図-9 である。破碎細粒分の含有率が非常に高い火山灰土に関しても、その  $R_s$ - $OCR$  関係は式(1)によって表すことができる。また式(1)の強度増加指数  $m$  は破碎細粒分が増えるほど高い値を示し、細粒分の増加に伴って当幌火山灰土の過圧密効果は増大するという結果が得られた。なお、非塑性シルトを用いた試験結果<sup>17)</sup>においても砂の場合より高い  $m$  値 ( $\approx 0.65$ ) が得られると報告されているが、当幌火山灰土の  $m$  値はそれよりもはるかに高い値である。

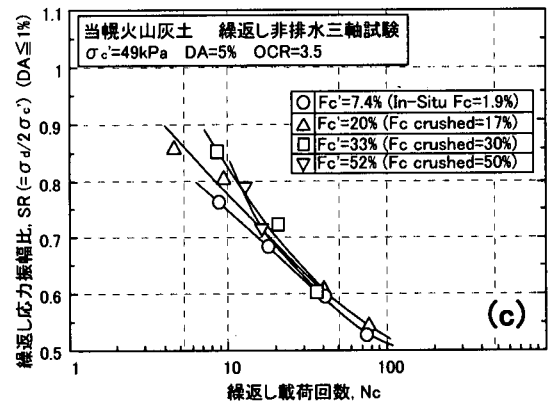
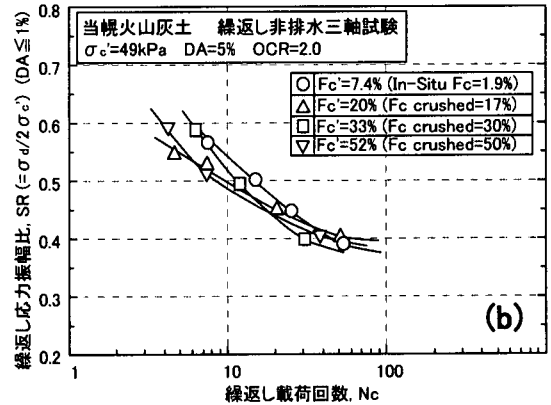
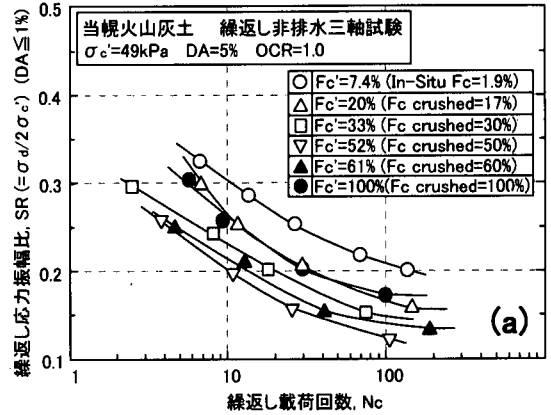


図-8 破碎細粒分を含む火山灰土の液状化強度：  
(a)  $OCR=1.0$ , (b)  $OCR=2.0$ , (c)  $OCR=3.5$

次に、細粒分増加による液状化強度の変化割合  $R_{FC}$  と圧密後の細粒分含有率  $F_c'$  の関係を図-10 に示した。液状化強度比  $R_{FC}$  は、任意の供試体の液状化強度を正規圧密された In-Situ  $F_c$  供試体の値で正規化したものであり、それぞれ  $N_c=10$  回あるいは  $20$  回で  $DA=5\%$  に至る場合

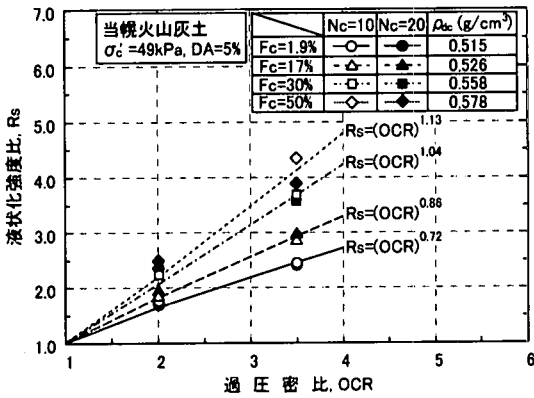


図-9 過圧密による強度増加割合  $R_s$  と OCR の関係

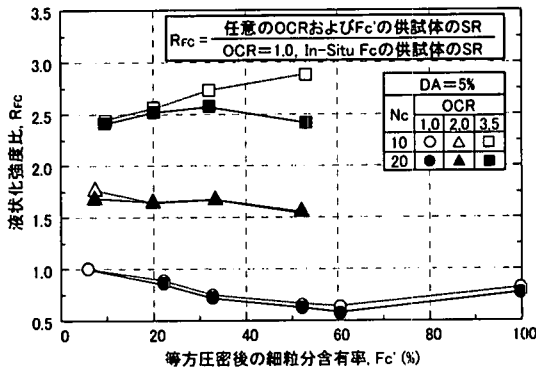


図-10 破碎細粒分の増加による液状化強度の変化

の SR で算定している。OCR=1.0 の場合は、 $F_c$  の増加に伴って液状化強度が低下し、 $F_c \approx 60\%$  にて  $R_{Fc}$  は最小値となる。さらに  $F_c=100\%$  になると再び強度は増加するが、それらの供試体の液状化強度は In-Situ Fc 供試体のそれよりも低い値である。一方、過圧密履歴を受けた供試体は正規圧密の場合とは異なり、OCR=2.0 では  $F_c$  増加による  $R_{Fc}$  の低下は小さく、逆に OCR=3.5 では破碎細粒分の増加によって  $R_{Fc}$  は高くなる傾向が示されている。またこの傾向は、 $N_c=10$  回の場合にて顕著となる。

(3) 細粒分の増加に伴う軸ひずみ・間隙水圧挙動の変化

破碎細粒分を含有する供試体に関して、OCR ごとに過剰間隙水圧の発生特性を比較したのが図-11(a), (b), (c)である。この図の縦軸は過剰間隙水圧比  $\Delta u / \sigma'_c$ 、横軸は繰返し載荷回数  $N_c$  を  $DA=5\%$  時の  $N_c$  で正規化した繰返し載荷回数比であり、各 OCR での比較はほぼ同じ繰返し応力振幅比について行っている。図-11(a)の正規圧密火山灰土に関する過剰間隙水圧比は、いずれも軸

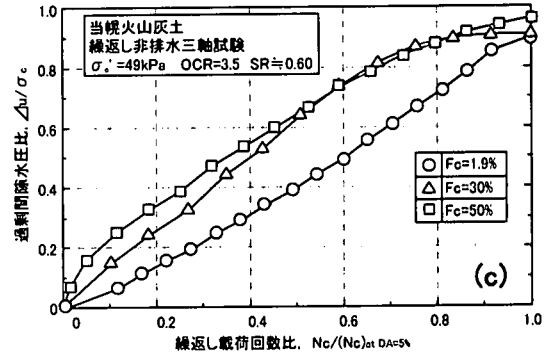
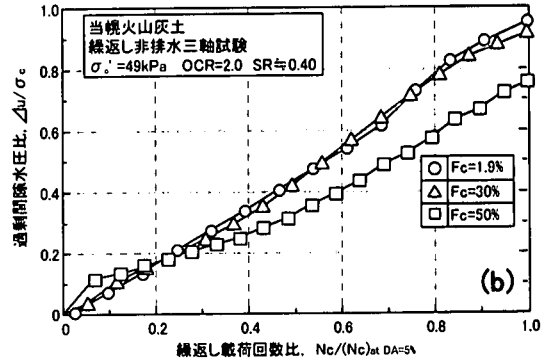
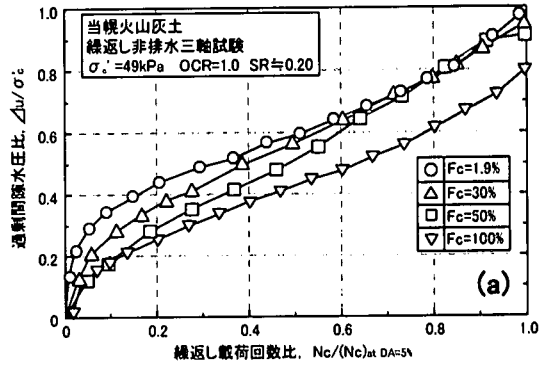


図-11 細粒分を混合した試料の間隙水圧発生特性：  
(a)OCR=1.0, (b)OCR=2.0, (c)OCR=3.5

ひずみの進行とともに緩やかに漸増し、破碎細粒分の含有率が高くなるほど過剰間隙水圧の発生は遅れる傾向にある。また、 $DA=5\%$  時の  $\Delta u / \sigma'_c$  は細粒分含有率が高いほど 1.0 よりも小さな値となる傾向があるが、OCR=2.0 の場合についても同様のことがいえる。OCR=3.5 では  $F_c$  が大きいほど  $\Delta u / \sigma'_c$  の値が高くなり、その過剰間隙水圧挙動は OCR=1.0 や 2.0 の場合とやや傾向が異なるという結果が得られている。

図-12(a), (b), (c)は、両振幅軸ひずみ  $DA$  を  $DA=5\%$  で正規化した値と繰返し載荷回数比との関係である。

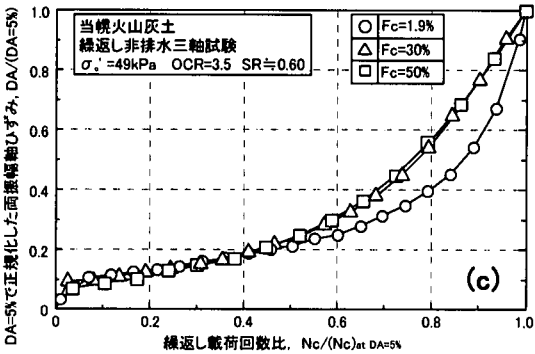
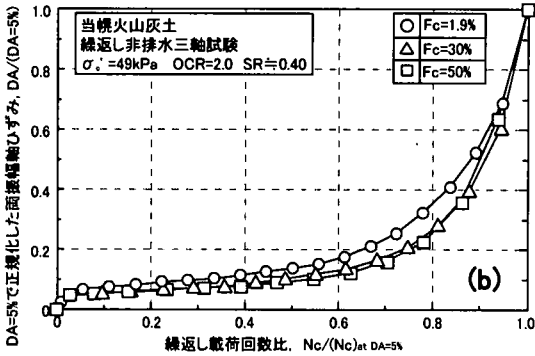
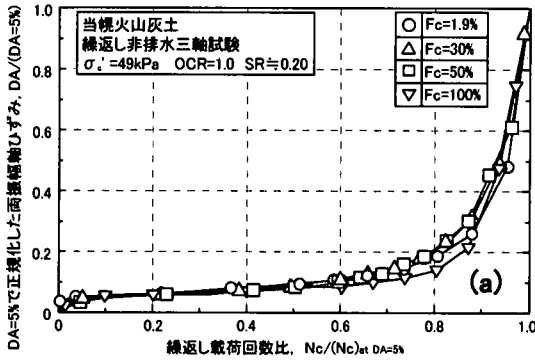


図-12 細粒分を混合した試料の軸ひずみ発生特性：  
(a)OCR=1.0, (b)OCR=2.0, (c)OCR=3.5

OCR=1.0 の場合 (図-12(a)) は、繰返し載荷回数比が 0.9 を超えると急激に軸ひずみが増大するという極めて脆性的な破壊形態となる。ところが、OCR が高くなると繰返し載荷の進行に伴って軸ひずみは漸増するようになる。これは、先行圧密圧力の増加によって、細粒分がより大きな粒子同士の結合を強めるような“つなぎの働き”をしたためと考えられる。以下では、破碎細粒分がもたらすこのような作用を“新たな粒子間接点力”と称することにする。また図では、OCR=3.5 を除くと、破碎細粒分の増加が軸ひずみの発生特性に大きな影響を

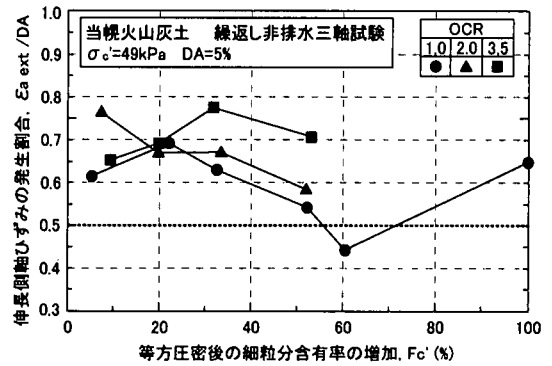


図-13 破碎細粒分の増加による構造異方性の変化

及ぼしていないようにも見える。

再構成供試体といえども、細粒分の少ない火山性粗粒土は、OCR に関係なく圧縮側よりも伸張側への変形が卓越するという構造の異方性を有している<sup>3)</sup>。そこで各供試体の破壊時 (DA=5%) における伸張側軸ひずみの発生割合  $\epsilon_{i, ext} / DA$  を求め、 $F_c$  との関連を調べたのが図-13 である。なお、 $\epsilon_{i, ext} / DA$  が 0.5 であるときは伸張側と圧縮側で発生する軸ひずみが等しく、等方的な繰返し非排水変形挙動であることを意味している。図-13 では、細粒分の少ない当幌火山灰土や破碎細粒分の場合 ( $F_c=100\%$ ) においても、やや異方的な力学特性が存在することが示されている。しかし OCR=1.0 と 2.0 の場合は、細粒分の増加によって  $F_c=60\%$  に至るまで等方的な変形挙動に移行していく。その原因は、細粒分の増加によって粒子間接点数が減少し、骨格を成す粒子の構造異方性が失われるためと考えられる。ところが OCR=3.5 の場合は、細粒分の増加によって  $\epsilon_{i, ext} / DA$  は高くなるという傾向を示す。これは、先行圧密圧力が高くなることで、粗粒子接点の消失を補うような破碎細粒分による新たな粒子間接点力が動員され、異方的変形挙動をもたらす粒子配列構造が保持されたためと推察される。

このように、非塑性の破碎細粒分を混合した正規圧密火山灰土の繰返し非排水せん断強さは細粒分が増えるほど低下する。しかし、過圧密履歴を与えた供試体の強度-変形-間隙水圧挙動は、破碎細粒分の影響を受けて正規圧密供試体とは異なる傾向を示すという結果が得られた。なお、拘束圧を変化させた場合や粒子破碎性が異なる火山性粗粒土を対象とした場合に、同様な傾向が得られるのかについては今後の研究課題である。

#### (4) 正規圧密火山灰土の破碎細粒分の増加に伴う強度変化の要因

表-2 で示したように、破碎細粒分の含有量が増えるると供試体の密度は増加し、間隙比は減少する。しかし、

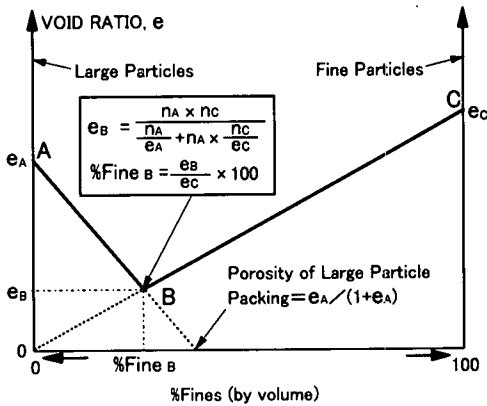


図-14 球状粒子の理論的な間隙比と%Finesの関係<sup>19)</sup>

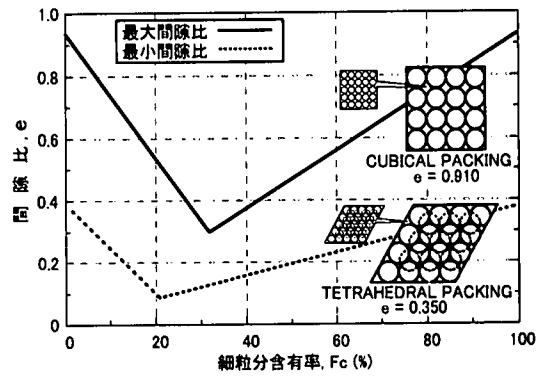


図-15 理想的な粒子配列による間隙比とFcの関係

間隙比が減少してもそれぞれの粒度分布が異なるために相対密度が増加しているとは限らない。ところが当幌火山灰土の場合、粒径が最大・最小密度試験の適用外であって、相対密度を求めるための最大・最小間隙比を得ることが困難である。そこで、Ladeら<sup>19)</sup>が提案した2球混合モデルを応用して当幌火山灰土の最大・最小間隙比を推定し、破碎細粒分の増加による強度変化の説明を試みた。

Ladeら<sup>19)</sup>は、大きな粒径の球形粒子と細粒分とが混合されるとき、体積比で表される細粒分の含有割合%Finesと間隙比 $e$ には図-14で示されるような理論的關係があることを説明している。この關係は粒径には無関係であって、図のB点は細粒分量の変化によって間隙比が最小となる点である。また、2球混合モデルによって求まるB点の間隙比 $e_B$ と%Finesの値%Fines<sub>B</sub>は次式によって定められる<sup>19)</sup>。

$$e_B = \frac{n_A \cdot n_C}{\frac{n_A}{e_A} + n_A \cdot \frac{n_C}{e_C}} \quad (2)$$

$$\%Fines_B = \frac{e_B}{e_C} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3)$$

ここで、 $n_A$ および $e_A$ は図-14のA点における大きな粒子の間隙率と間隙比であり、 $n_C$ および $e_C$ はそれぞれ図のC点における細粒分の間隙率と間隙比である。なお、表-2で示したように、細粒分の含有率が変化しても土粒子の密度が全て等しい当幌火山灰土の場合、%FinesをFcで表すことができる。

次に図-15では、理想化された最も緩い粒子配列であるCubical Packing<sup>20)</sup>と最も密な粒子配列Tetrahedral Packing<sup>20)</sup>について2球混合モデルを用いて得た間隙比 $e$

とFcの關係を示した。図中の実線はCubical Packingの場合の最大間隙比 $e_{max}$ 、また点線はTetrahedral Packingによる最小間隙比 $e_{min}$ を表している。これらの間隙比の値は、当幌火山灰土の供試体の間隙比( $e=2.877\sim 3.905$ )よりもはるかに小さな値となっている。この当幌火山灰土の間隙比が大きくなる原因は、粗粒子が主体であるという粒子形状によるものだけではなく、粒子が多孔質で内部に多くの空隙を有しているためと考えられる<sup>20,21)</sup>。また、火山性粗粒土の含水比は非常に高い値となることが知られている<sup>21),22),23)</sup>、これは閉塞された粒子内空隙だけではなく、開口された空隙も多く含むことを示唆している。また細粒分については、BridgingおよびAdhesionの影響が存在するため、幾何学的計算で仮定したような理想的な粒子配列構造を示さない可能性が強い。

そこで、粗粒分に関してはJIS A-1110に準じて求めた吸水率 $Q(=135.66\%)$ を用いて、式(5)により粒子内空隙に相当する間隙比 $e_n$ を求めている。また供試体内の $e_n$ は、細粒分を除く粒子の含有率によって変化するもの仮定し、式(6)によって $e_n$ による最大および最小間隙比の値の補正を試みた(図-16 ①)。

$$Q = \frac{W - W_s}{W_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4)$$

$$e_n = \frac{V_{in}}{V_s} = \frac{(W - W_s) / \rho_w}{W_s / \rho_s} = \frac{Q \cdot \rho_s}{100} \quad (5)$$

$$e' = e + e_n \cdot (1 - Fc / 100) \quad (6)$$

ここで、 $W$ は水で満たされた内部空隙を含む粒子の全重量、 $W_s$ は土粒子骨格のみの重量、 $V_n$ は粒子内部の空隙の体積、 $V_s$ は土粒子骨格の体積、 $\rho_s$ は土粒子の密度、 $e'$ は粒子内空隙を考慮して補正された間隙比である。



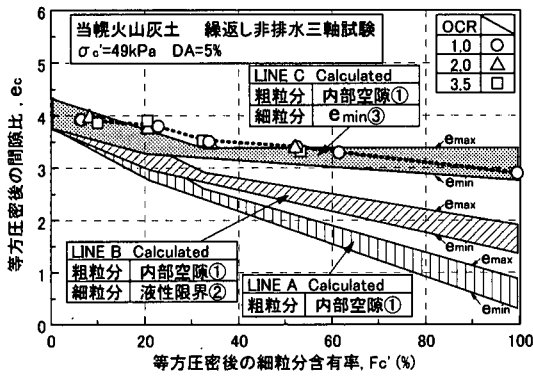


図-16 補正後の間隙比の存在範囲と  $F_c'$  の関係

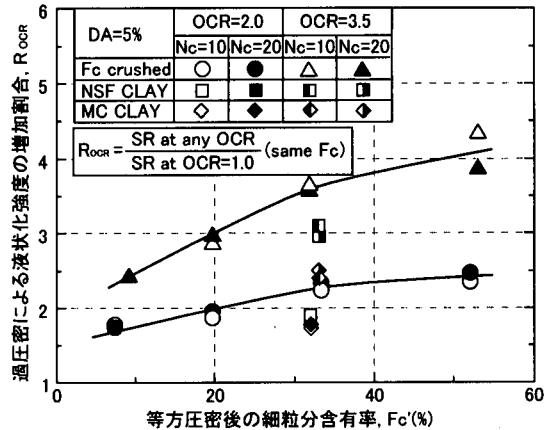


図-18 過圧密による強度増加割合  $R_{OCR}$  と  $F_c'$  の関係

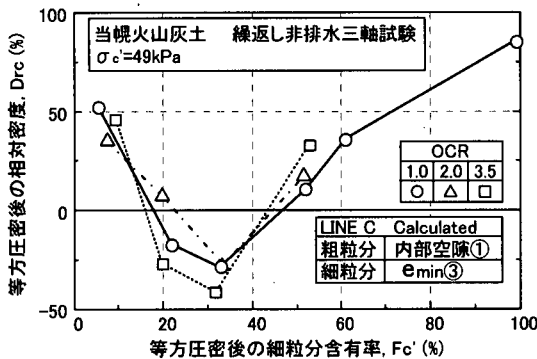


図-17 供試体の圧密後の相対密度  $D_{rc}$  と  $F_c'$  の関係

また細粒分に関しては、その液性限界を調べる際に求めた含水比  $\omega$  と土粒子の比重  $\rho_s$  を用い、飽和度  $S_r = 100\%$  と仮定して  $F_c = 100\%$  の場合の間隙比を逆算し、細粒分含有率に応じた最大・最小間隙比の補正 (図-16 ②) を試みた。さらに図-6 では、最大・最小密度試験の適用の範囲外となるが、細粒分のみに関する最大密度試験から得られた最小間隙比 (図-16 ③) により補正を試みた結果も示した。

図-16 では、当幌火山灰土の圧密後の供試体の間隙比  $e_c$  も示し、幾何学的計算によって求まる  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  との相対的な位置関係を表している。砂の最大・最小密度試験結果から得られる  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  の場合と同様に、これらの  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  は圧密圧力の変化の影響までを考慮したものではない。しかし、いずれの補正方法によっても、試験時と同様に細粒分増加に伴って間隙比が減少する傾向が認められた。特に、推定ライン C は実際の試験結果と良い一致を示している。

この結果を基にして、推定ライン C によって定まる最大・最小間隙比を用いて圧密後の相対密度  $D_{rc}$  を算出し、 $D_{rc}$  と  $F_c'$  の関係を求めたのが図-17 である。図か

ら、OCR によらず細粒分の増加によって  $D_{rc}$  は低下し、 $F_c' = 30\%$  を超えると再び  $D_{rc}$  は増加する傾向にあることがわかる。前述のように、圧密圧力の変化まで考慮した相対密度ではないために、 $F_c' = 30\%$  における相対密度は負の値となり、また図-10 で示した正規圧密火山灰土の液状化強度が最小となる  $F_c'$  値とは完全な一致はみないものの、両者の傾向は類似したものになっていることがわかる。

以上から、破碎細粒分の増加に伴う間隙比の減少は、必ずしも液状化強度の増加に貢献するものではなく、特に OCR=1.0 における液状化強度の低下は間隙比が最大間隙比近傍の不安定な状態になることを反映した結果と考えられる。また、上記のように推定された相対密度が火山性粗粒土の液状化強度の変化に関与していることから、その相対密度に影響を与える粒子内部の空隙も液状化強度に影響を及ぼす要因になるものと考えられる。

### (5) 過圧密火山灰土の破碎細粒分の増加に伴う強度変化の要因

過圧密火山灰土の破碎細粒分増加に伴う強度増大は、その供試体密度が正規圧密供試体と大きく変わらないことから明らかなように、図-17 のような相対密度の変化だけでは説明することができない。そこで以下では、破碎細粒分の含有率やその性質、圧密過程でもたらされる粒子破碎に着目し、過圧密履歴による強度変化の要因を探った。

図-18 は、過圧密によってもたらされる液状化強度の増加割合  $R_{OCR}$  と  $F_c'$  との関係を示している。 $R_{OCR}$  は、過圧密供試体の液状化強度を同じ  $F_c$  の正規圧密供試体の液状化強度で正規化したものである。また図には、塑性を有する細粒分の NSF CLAY ( $I_p = 26.0$ )、MC CLAY ( $I_p = 49.0$ ) を 30% 混合した試料に関するデータもプロ

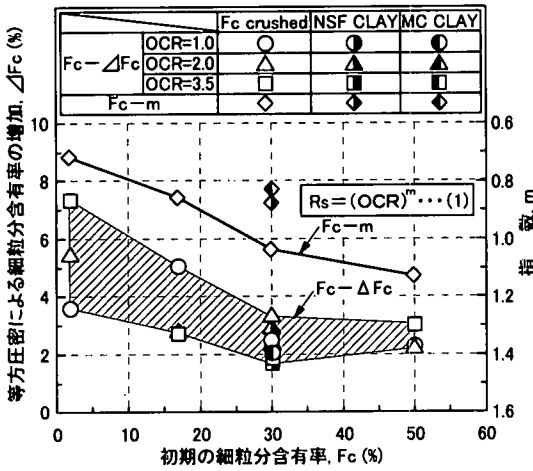


図-19 Fc-m関係およびFc-ΔFc関係

ットした。

図-10で示された結果と同様に、破碎性火山灰土の $R_{OCR}$ は先行圧密圧力が高くなるほど増加し、過圧密による強度増加は破碎細粒分の含有率に強く依存する。ただし、 $F_c \approx 33\%$ を超えると細粒分増加に伴う $R_{OCR}$ の増加は鈍くなることが認められる。また塑性を有する細粒分を含む火山灰土より、非塑性となる破碎細粒分を混合した火山灰土の方が $R_{OCR}$ は高いという結果も得られている。

このような過圧密による強度増加と粒子破碎との関連を調べるため、図-19に $F_c$ と等方圧密による細粒分含有率の増加 $\Delta F_c$ との関係、 $F_c$ と図-9で示した過圧密による強度増加指数 $m$ との関係を示した。当幌火山灰土の $F_c-\Delta F_c$ 関係では、破碎細粒分が増えるとOCRごとの $\Delta F_c$ 値にばらつきが生じているが、 $F_c=30\%$ までは破碎細粒分の増加によって $\Delta F_c$ が急激に減少することがわかる。また $F_c$ がそれ以上の値となっても、粒子破碎量の変化は小さいようである。さらに、 $F_c-m$ 関係は $F_c-\Delta F_c$ 関係と極めて類似していることから、 $F_c=30\%$  ( $F_c \approx 33\%$ )以上の細粒分含有率にて $F_c-m$ 関係および図-18の $F_c-R_{OCR}$ 関係の勾配が緩くなる理由は、相対密度の変化の影響だけではなく、圧密過程で生じる粒子破碎の影響が小さくなるためと判断される。また、このような細粒分の増加による粒子破碎の減少は、変形挙動における構造異方性の消失と同様に“細粒分増加によって骨格をなす粒子同士の接触点が減少するため”<sup>10)</sup>と考えられる。

一方、図-19の $m$ 値においても細粒分の種類の違いによる過圧密効果の変化が現れているが、3種類の細粒分の $\Delta F_c$ はほぼ同じであることから、粒子破碎はこの過圧密効果の相違に直接関係していないものと思われる。

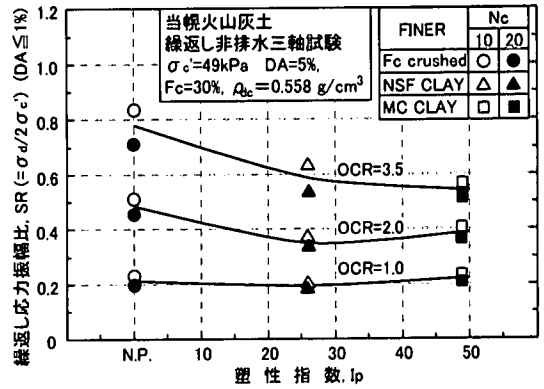


図-20 細粒分の塑性の違いによる液状化強度の変化

そこで、OCRごとに細粒分の塑性指数 $I_p$ と液状化強度との関係を図示したのが図-20である。古関ら<sup>9)</sup>、原田ら<sup>11)</sup>、桑野ら<sup>12)</sup>は砂に含有される細粒分の $I_p$ が高いほど液状化強度は大きくなるとしているが、正規圧密された火山性粗粒土の場合は $I_p$ が変化しても液状化強度に大きな変化は認められなかった。また火山性粗粒土が過圧密履歴を受けると、むしろ $I_p$ が低くなるほど液状化強度は高い値を示す傾向にある。

破碎細粒分を含む火山性粗粒土が過圧密履歴を受けると、セメンテーションを保有する原位置火山灰土のように固結した様相を呈する。これは先行圧密圧力の増加によって粒子の再配列が促され、さらに粗粒子の間に存在する破碎細粒分によって粒子間接触力が新たに動員されたものと考えられることができる。また塑性を有する細粒分の場合よりも、物理試験上は非塑性と判定される破碎細粒分を混合した方が過圧密効果は高いことから、先行圧密圧力の増加によって破碎細粒分に火山性粗粒土の強度を増加させるような性質が生じているといえる。

#### (6) 破碎細粒分による圧密降伏応力の変化

破碎細粒分の存在と過圧密履歴が圧密降伏応力に及ぼす影響を調べるために、液状化試験の場合と同様に三軸セル内で等方圧密を行った供試体を用いて一連の一次元圧密試験を行っている。その試験結果を図-21(a), (b), (c)に示す。これらの図は、それぞれOCR=1.0, 2.0および3.5に関する破碎細粒分を混合した供試体の $e-\log p'$ 関係を表している。一次元圧密前の初期間隙比 $e_0$ は、 $F_c$ が高くなるほど小さな値となるが、一次元圧密過程でも間隙比は著しく低下している。それは一次元圧密過程でも構成粒子の破碎が生ずるためであり<sup>2)</sup>、その破碎の程度は破碎細粒分の含有量によって変化するものと推察される。

図-21の結果を基に、三笠らの方法<sup>18)</sup>によって求め

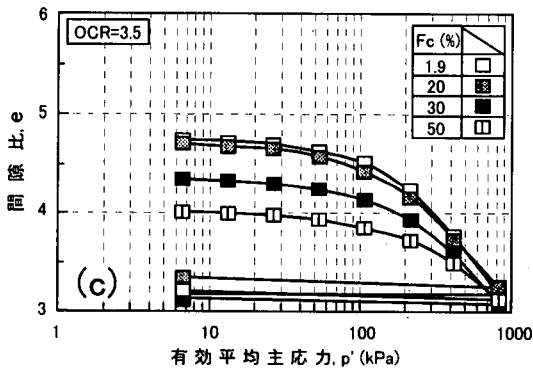
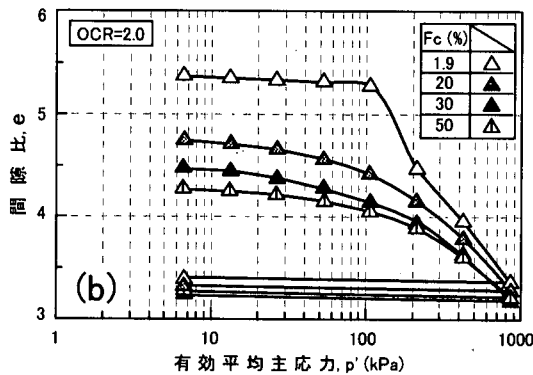
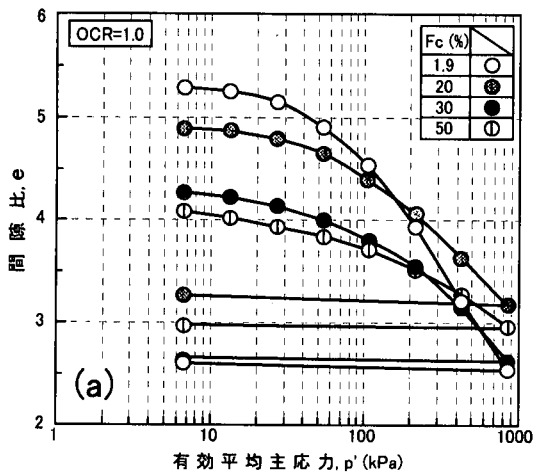


図-21 破碎細粒分を混合した供試体の  $e$ - $\log p'$  関係：  
(a)OCR=1.0, (b)OCR=2.0, (c)OCR=3.5

られた圧縮指数  $C_c$ , 降伏時の間隙比  $e_c$  および圧密降伏応力  $p_c$  と  $F_c$  との関係それぞれ整理してみた。まず図-22 は、圧縮指数  $C_c$  と  $F_c$  との関係を示している。いずれの試料においても破碎細粒分の増加に伴って  $C_c$  は著しく低下し、この  $C_c$  と  $F_c$  には一義的な関係が存在することがわかる。またその関係は、先行的に受けた過圧

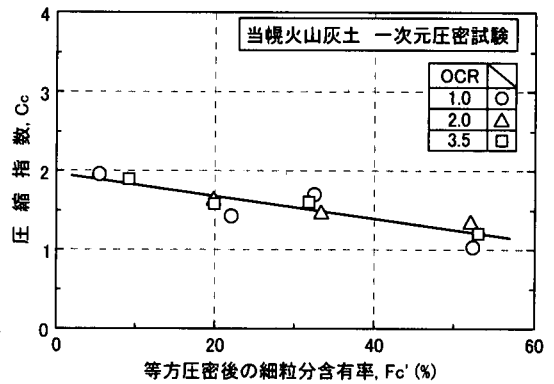


図-22 圧縮指数  $C_c$  と細粒分含有率  $F_c$  との関係

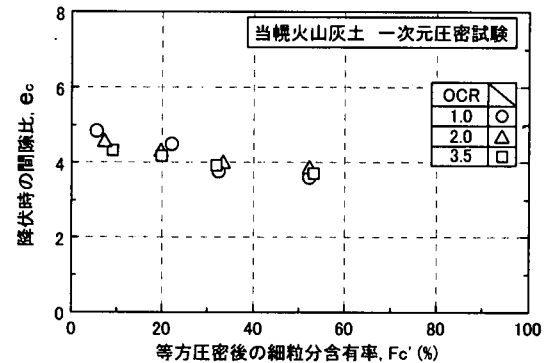


図-23 降伏時の間隙比  $e_c$  と  $F_c$  との関係

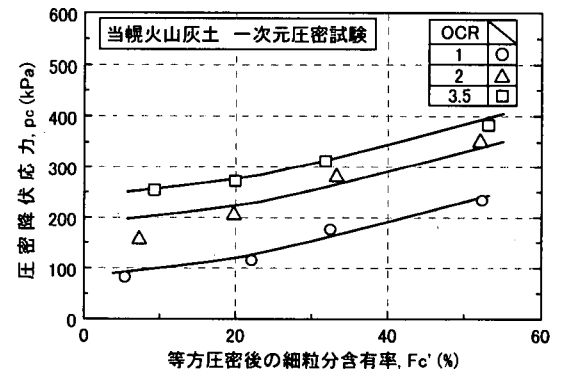


図-24 圧密降伏応力  $p_c$  と細粒分含有率  $F_c$  との関係

密履歴の影響をあまり受けにくいようである。

図-23 に示される  $e_c$ - $F_c$  関係では、 $C_c$ - $F_c$  関係と同様に過圧密履歴の影響をあまり受けず、 $e_c$  は  $F_c$  の値に大きく依存していることがわかる。このように、正規圧密領域における供試体の圧縮性は供試体の粒度組成、すなわち破碎細粒分の含有率によって決定されている。

図-24 では、各供試体の圧密降伏応力  $p_c$  と破碎細粒分の含有率  $F_c$  との関係調べてみた。OCR=1.0 に関しては、 $F_c$  の増加によって  $p_c$  の増加が生じ、液状化強度の場合とは異なる傾向が示されている。これは繰返し非排水せん断と一次元圧密とは、破壊時の応力状態や排水条件が異なるためと考えられる。一方、先行的に過圧密履歴を受けた場合は OCR が高くなるほど  $p_c$  が高くなる傾向を示し、先行的な応力履歴によって新たな粒子間接点力が与えられることが顕著に現れている。ただし、破碎細粒分の増加による  $p_c$  の増加幅はいずれの OCR においてもほぼ同等であって、 $C_c$  が過圧密履歴の影響をあまり受けないという結果が圧密降伏応力の変化に反映されている。

## 5. ま と め

火山性粗粒土では粒子破碎によって顕著な細粒分の増加がもたされることから、主としてその繰返し非排水せん断強度-変形特性に及ぼす破碎細粒分の影響について調べた。一連の試験結果から、以下のような結論が得られている。

- 1) 火山性粗粒土の粒子破碎によって生ずる細粒分は、その繰返し非排水せん断強度-変形特性に大きな影響を及ぼす。例えば正規圧密履歴を受けた供試体は、破碎細粒分の増加によって液状化強度が低減される。
- 2) この正規圧密供試体の破碎細粒分増加による液状化強度の低下は、幾何学的な2球混合モデルによって求められた相対密度の低下によって説明することができる。
- 3) 細粒分含有率や先行圧密圧力が高いほど、液状化強度における過圧密効果は高い。圧密降伏応力においても、細粒分含有率が高いほど、また先行的に受けた圧密圧力が高いほどその値は大きくなる。これは粗粒子間に存在する破碎細粒分が、粒子間接点力をもたすためと考えられる。
- 4) 非塑性となる破碎細粒分と塑性細粒分を混合した供試体の液状化強度を比較すると、破碎細粒分を混合した方が過圧密による強度増加は高い。この結果は、破碎細粒分には強度増加に貢献するような性質があることを示唆している。
- 5) 破碎細粒分が増えると、圧密過程で生ずる粒子破碎量は減少する。このため、当幌火山灰土では破碎細粒分の含有率が30%を超えると、液状化強度における過圧密効果の増加は鈍くなる。

謝辞：本研究では、室内試験とデータ整理において根本信二、大西正容（北海道開発局）、前宗孝（北海道

大学大学院）各君の協力を得ている。また室蘭工業大学の川村志麻助手、阿曾沼剛氏（北海道大学大学院）には、当幌火山灰土のサンプリング等にて協力を得た。未筆ながら、記して深甚なる感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 三浦清一、八木一善、川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的小よび動的力学挙動と粒子破碎，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.159-170，1996。
- 2) 三浦清一、八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.257-269，1997。
- 3) 三浦清一、八木一善、川村志麻：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，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.221-229，1996。
- 4) Lee, K. L.: Adhesion bonds in sands at high pressure, *Proc. of ASCE*, Vol.103, No. GT8, pp. 908-913, 1977.
- 5) Coop, M. R.: The mechanics of uncemented carbonated sands, *Geotechnique*, Vol.40, No.4, pp. 607-626, 1990.
- 6) 荻原敏行、北澤浩二、日下治治：砂礫土の高圧下での粒子破碎と粘着力の発達について，土木学会論文集，No.541/III-35，pp.47-55，1996。
- 7) 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。
- 8) 兵動正幸、中田幸男、澤村仁志、山脇大輔：しらすの繰返しせん断特性に及ぼす細粒分の影響，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp.781-782，2000。
- 9) 古関潤一、石原研而、藤井光久：細粒分を含む砂の三軸液状化試験，第21回土質工学研究発表会講演集，pp.595-596，1986。
- 10) 原田光男、浦沢義彦、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強度特性，土と基礎，Vol.38，No.6，pp.21-26，1990。
- 11) 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。
- 12) 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繰返し強度に影響を与える諸因子，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp.989-990，1996。
- 13) 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および繰返しせん断特性，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp.991-992，1996。
- 14) 佐藤正行、小田匡寛、風間秀彦、小瀬木克巳：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。
- 15) 足立雅樹、安原一哉、島袋淳：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，土木学会論文集，No.596/III-43，pp.29-38，1998。
- 16) 矢島寿一、沼田佳久、中根淳：細粒分を含む砂質土の液状

- 化特性と液状化強度評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.624/III-47, pp.113-122, 1999.
- 17) 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.
- 18) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 2000.
- 19) Lade, P. V., Liggio, C. D. and Yamamoto, J. A. : Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.21, No.4, pp.336-347, 1998.
- 20) 斎藤孝夫, 三木五三郎: 破碎しやすい火山レキ(摩周火山降下軽石)の二、三の特性, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, III-185, pp.583-586, 1972.
- 21) 富田平四郎, 鈴木敬, 松川進: 火山性粗粒土の粒子破碎が締固め土の性質に及ぼす影響, 土と基礎, Vol.46, No.4, pp.37-40, 1998.
- 22) 三浦清一, 八木一善, 田中洋行, 阿曾沼剛: 破碎性粗粒土の力学特性と評価 - 主として北海道火山性堆積地盤について -, 土と基礎, Vol.48, No.10, pp.15-18, 2000.

(2001. 3. 23 受付)

## EFFECT OF PARTICLE-CRUSHED FINES ON CYCLIC UNDRAINED SHEAR BEHAVIOR OF VOLCANIC COARSE-GRAINED SOILS

Kazuyoshi YAGI and Seiichi MIURA

This paper presents the results of an experimental investigation on volcanic coarse-grained soils with fines, which are produced by particle crushing. A series of cyclic undrained triaxial tests and one-dimensional consolidation tests were carried out on reconstituted specimens, varying  $F_c$ ,  $OCR$  and  $I_p$  of fines. The test results showed that liquefaction strength of specimens with  $OCR=1.0$  decreases with the increase in  $F_c$ . On the other hand, liquefaction strength and consolidation yielding stress of overconsolidated specimen increase with the increase in  $OCR$  and  $F_c$ . Moreover, the amount of particle crushing is decreased with the increase in  $F_c$ . Therefore, it was considered that the strength increase due to fines induced by particle crushing depends mainly on the increment of particle to particle contacts.