

# 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

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)

噴出起源の異なる幾つかの北海道粗粒火山灰土について、排水・非排水三軸圧縮、平面ひずみ圧縮及び繰返し非排水せん断試験を実施し、それらの力学特性を調べた。一連の実験と考察から、1) せん断中に有効平均主応力が増加するような応力条件では構成粒子の破碎が確実にもたらされるもの、繰返し非排水せん断過程で液状化に向かうような場合は粒子破碎はほとんど生じない、2) 破碎性の卓越する火山灰土の応力一ひずみ一強度特性は有効拘束圧(あるいは平均主応力)に強く依存するとともに、通常の密度の砂ではみられない特異なダイレイタンシー挙動を示す、3) 降下生成物で構成されている火山灰地盤の静的・動的力学特性にはクリーンな砂よりもはるかに強い異方向性が存在する、等の知見が得られた。

**Key Words** : volcanic coarse-grained soil, granular material, particle breakage, liquefaction, anisotropy

## 1. はじめに

北海道では、新第三紀から第四紀にかけて激しい火山活動が起こり、それらの噴火に伴い火山灰、軽石、スコリアなど種々の火山碎屑物が生成されている。これらの火山碎屑物は、その生成過程により降下生成物(降下火砕堆積物 (*fa*))と流下生成物(火砕流堆積物 (*fl*))に大まかに分類される<sup>1)</sup>が、堆積構造、構成要素、分布地域、風化の程度などが堆積環境によって大きく異なるため、その力学的性質は極めて多岐にわたることが予想される。またこのような火山灰質土は北海道に広く分布し、有効な工学材料として多用されてきているが、しらすや泥炭に比べて工学的見地に立った研究は非常に限定されている。従って、火山灰質土に与えられている地盤工学的な説明はかなり立ち遅れているといえる。

火山灰地盤、特に粗粒火山灰土では、北海道域を襲った最近の大地震により無視できない被害もたらされている。例えば、1993年釧路沖地震(M=7.8)では、釧路市緑ヶ丘地区の造成地において火山灰質土の崩壊による住宅破壊が見られた<sup>2)</sup>。類似の被害は過去の地震の際にも道央圏の火山灰地盤でも生じている<sup>3)</sup>。また、1993年北海道南西沖地震(M=7.8)においては、駒ヶ岳山麓西側の森町赤井川や七飯町大沼地区一帯で駒ヶ岳噴火の際の火砕流堆積物が液状化し、また森港では埋立て材料の火山灰質砂や礫が噴出して諸施設に甚大な被害が与



写真-1 北海道東方沖地震による摩周降下生成物の液状化

えられている<sup>4),5)</sup>。さらに、1994年北海道東方沖地震(M=8.1)の際には、中標津町東部の住宅地にて火山性粗粒土の自然堆積地盤が広範に液状化し、道路や住宅等に被害が及んだ(写真-1参照)<sup>6)</sup>。これらの被災事例からも明らかなように、火山灰地盤の動的力学特性を的確に把握し、その耐震性能の評価と対策を早急に進めなければならぬ。

このような背景から、本研究では北海道各地の自然堆積地盤から採取した粗粒火山灰土に一連の排水・非排水三軸試験及び平面ひずみ試験、さらに繰返し非排水せん断試験を行い、その力学特性の解明を試みた。その結果、北海道に分布する粗粒火山灰土は通常のクリーンな砂

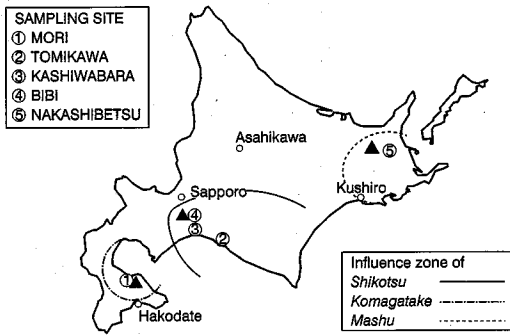


図-1 各火山灰土の試料採取位置

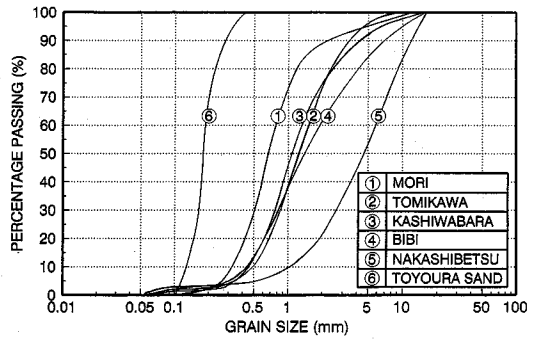


図-2 試験に用いた試料の粒径加積曲線

表-1 物理特性一覧

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	1.249	1.49	0.64	2.3	0.2
② TOMIKAWA	2.22	0.549	0.433	0.49	1.1	2.8	1.0
③ KASHIWABARA	2.34	0.623	0.462	0.53	1.25	3.1	1.3
④ BIBI	2.28	0.734	0.624	0.65	1.42	4.0	1.4
⑤ NAKASHIBETSU	2.51	0.410	0.278	0.41	4.6	5.1	1.8
⑥ TOYOURA SAND	2.64	1.639	1.336	—	0.18	1.3	0

(いわゆる 75  $\mu\text{m}$  以下の細粒分を含まない砂)とは極めて異なるせん断挙動を呈すること、またせん断の条件によっては顕著な構成粒子の破砕が認められること、などが明らかにされている。さらに本文では、定量化された粒子破砕についても考察している。

## 2. 火山灰試料と試験方法

試験には北海道の3火山から噴出した5種類の降下火山灰を用いた。各試料の採取地点を図-1に示す。駒ヶ岳を噴出起源とする試料は森町字姫川で採取したもの(①森火山灰土(MORI VOLCANIC SOIL))で、1640年の噴火による降下堆積物(Ko-d)である。支笏カルデラの噴出物は、門別町富川(②富川火山灰土(TOMIKAWA VOLCANIC SOIL))、苫小牧市柏原(③柏原火山灰土(KASHIWABARA VOLCANIC SOIL))、千歳市美々(④美々火山灰土(BIBI VOLCANIC SOIL))の3地点から採取している。その噴出年代は3.1~3.4万年前と推定され支笏第一テフラ(Spfa-1)に属する。道東では、中標津町武佐において摩周火山噴出物のうち比較的上層部に属する降下堆積物(Ma-1)を採取している(⑤中標津火山灰土(NAKASHIBETSU VOLCANIC SOIL))。この試料

は、1994年北海道東方沖地震の際に液状化現象が認められた火山性粗粒土(写真-1参照)と同一のものである。この火山灰土の噴出年代は、1.1~1.3万年前とされている。以上の火山灰土の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-2に、それぞれ豊浦標準砂のそれと比較して示す。いずれの試料も細粒分 $F_c$ (75  $\mu\text{m}$ 以下)は2%以下と極めて少ないが、中標津火山灰土は他の火山灰土よりもかなり粗粒である。なお、森火山灰土を除く各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密度は黒色鉱物を多く含むため、他に比べて大きな値である。なお表-1に示した最大及び最小密度は、地盤工学会規準<sup>7)</sup>に基づいてもとめたものである。したがって、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、参考値とみなされるべきである。

試験手順は、基本的に地盤工学会基準<sup>7)</sup>によっている。すべての再構成供試体は、圧密後の密度 $\rho_{dc}$ が表-1に示した原位置のそれになるように多重ふるい落下法(MSP法)<sup>8)</sup>によって作製された。なお、これらの $\rho_{dc}$ は原位置密度 $\rho_{d \text{ in-situ}}$ に対して $\pm 5\%$ の範囲内にある。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。

森、柏原火山灰土については、それぞれ土被り厚が1~2mの均一な堆積土層からブロックサンプリング<sup>9)</sup>による不攪乱試料を採取した。図-3に示すように、凍結状態にあるブロック試料から、供試体の軸方向が原位置の鉛直および水平方向に一致するように切り出した2種類のものを準備している。従って、図のBV供試体とBH供試体の軸方向は互いに90°異なった状態にある。このように作製された凍結供試体は、セル内で有効拘束圧 $\sigma'_c = 19.6 \text{ kPa}$ のもとで2時間以上放置し融解させている。

供試体を設置後、二酸化炭素、脱気水を通し、引き続き196 kPaのバックプレッシャーを供給することにより飽

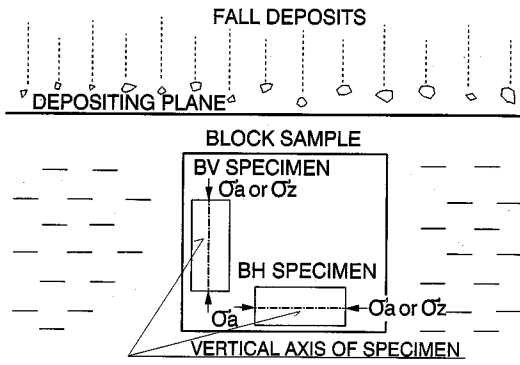


図-3 不攪乱供試体の作製法

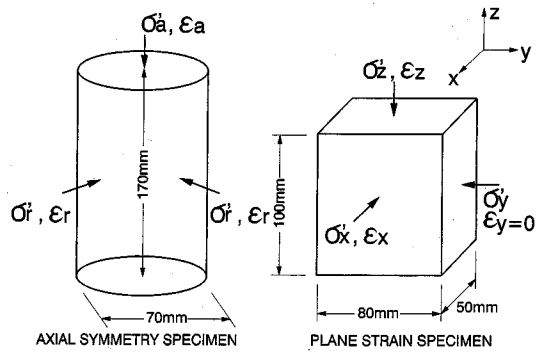


図-4 円柱、角柱供試体寸法と応力・ひずみパラメータ

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。その後、所定の有効拘束圧 $\sigma'_c$ のもとで2時間以上等方圧密した後にせん断を与えている。静的試験では、三軸試験及び平面ひずみ試験装置<sup>10)</sup>を用い、排水あるいは非排水条件のもとで側圧一定・ひずみ制御(0.20%/min)のせん断を行った。繰返し非排水せん断は、空圧式の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0.1 Hzの正弦波のもとで行っている。ここで、三軸供試体及び平面ひずみ供試体の寸法は図-4に示すようである。なお磯崎ら<sup>11)</sup>は、富川火山灰土の応力-ひずみ-ダイレイタンス挙動におよぼす供試体寸法の影響は極めて小さいことを明らかにしている。

三軸及び平面ひずみ試験では、図-4の応力・ひずみパラメータにより、有効平均主応力 $p'$ 、軸差応力 $q$ および体積ひずみ $\varepsilon_v$ を次のように定義している。

・軸対称応力条件

$$p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r) / 3 \quad (1)$$

$$q = |\sigma'_a - \sigma'_r| \quad (2)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \quad (3)$$

・平面ひずみ応力条件

$$p' = (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) / 3 \quad (4)$$

$$q = (((\sigma'_x - \sigma'_y)^2 + (\sigma'_y - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_x)^2) / 2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (6)$$

$$\sigma'_x = \sigma'_3, \sigma'_y = \sigma'_2, \sigma'_z = \sigma'_1 \quad (7)$$

なお、繰返し非排水三軸試験における繰返し偏差応力の片振幅 $\sigma_d$ は次のように表されている。

$$\sigma_d = (P_C + P_E) / 2A_C \quad (8)$$

ここで、 $P_C$ 、 $P_E$ ：圧縮側および伸張側の繰返し軸荷重片振幅、 $A_C$ ：圧密後の供試体断面積である。

また、繰返し非排水せん断試験では、軸荷重、軸変位及び間隙水圧変化がモニターされ、試験結果は繰返し偏差応力の片振幅 $\sigma_d$ に基づいて整理されている。

### 3. 試験結果と考察

#### (1) 火山性粗粒土の三軸力学挙動

図-5(a)、(b)は、再構成供試体に対する排水、非排水三軸圧縮試験から得られた最大・最小主応力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3 = \sigma'_a/\sigma'_r)$ と最大、最小主ひずみ $\varepsilon_1 (= \varepsilon_a)$ 、 $\varepsilon_3 (= \varepsilon_r)$ の関係を、森、富川、中標津火山灰土と比較して示したものである。圧密圧力 $\sigma'_c$ は49、196 kPaのものである。まず排水試験結果から、森火山灰土の応力-ひずみ関係は密な砂や過圧密粘土が示すひずみ硬化-軟化型の挙動に類似していることがわかる。一方、富川、中標津火山灰土の応力-ひずみ関係は、ゆる詰め砂か正規圧密粘土の挙動のように主応力比が単調に増加していくようである。この傾向は有効拘束圧 $\sigma'_c$ が高くなるほど顕著である。次いで非排水試験では、排水条件に比べて応力-ひずみ曲線の初期の立上りは急になっており、基本的に密な砂のそれに似た挙動が得られている。また有効拘束圧 $\sigma'_c$ の増加に伴って同じひずみレベルでの主応力比が小さくなり、顕著な有効拘束圧依存性を示す結果となっている。このことは、排水条件についてより際立ったものとなっているが、非排水条件でも指摘される。

ここで富川、中標津火山灰土では、軸ひずみ $\varepsilon_a (= \varepsilon_1)$ の発達に比べ、側方ひずみ $\varepsilon_r (= \varepsilon_3)$ の発達が極めて小さいことが注目される。この傾向は有効拘束圧が高いほど著しいようである。他の火山灰土と比較してみるために、表-2に排水試験における破壊時の最大・最小主ひずみ比 $(-\varepsilon_3/\varepsilon_1)_f$ (ポアソン比に相当)の値を示した。例えば中標津火山灰土では、 $\sigma'_c = 392$  kPaの試験で $\varepsilon_1 = 30\%$ に対し $\varepsilon_3 = 3.0\%$ にすぎなかった。なお、この傾向は富川火山灰土と噴出起源を等しくする柏原、美々火山灰土においても同様に認められる。これらのことから、森火山灰土を除いた火山性粗粒土では半径方向の変形が非常に拘束された状態で破壊に至っているといえる。なお後述の不攪乱柏原火山灰土においても、 $(-\varepsilon_3/\varepsilon_1)_f = 0.18 \sim 0.33$ の値が得られていることから、原位置状態

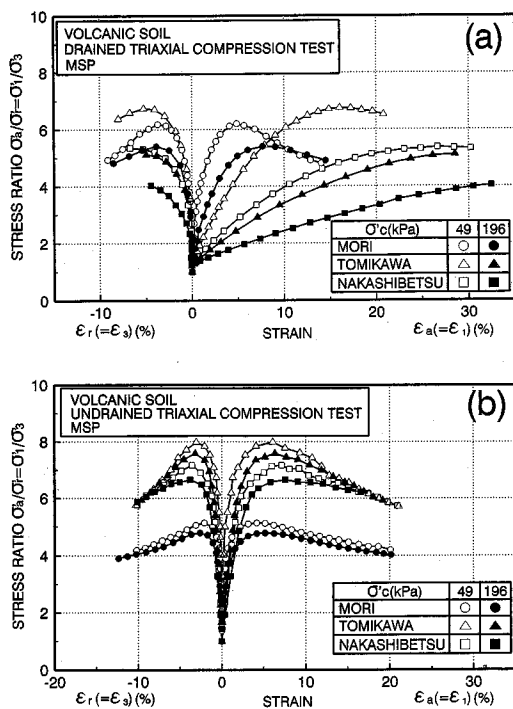


図-5 各火山灰土の主応力比—主ひずみ関係：(a) 排水条件、(b) 非排水条件

表-2 破壊時の主ひずみ比  $(-\epsilon_3/\epsilon_1)_f$

SAMPLE NAME	$(-\epsilon_3/\epsilon_1)_f$			
	$\sigma'_c$ (kPa)			
	49	98	196	392
①MORI	0.68	0.45	0.47	0.41
②TOMIKAWA	0.30	0.25	0.17	0.14
③KASHIWABARA	0.27	0.22	0.17	—
④BIBI	0.36	0.29	0.24	0.19
⑤NAKASHIBETSU	0.22	0.15	0.14	0.10

でも同様のことが指摘される。

図-6 (a), (b) は、排水・非排水条件でのダイレイタンスー挙動を、軸ひずみ  $\epsilon_a$  と体積ひずみ  $\epsilon_v$  (排水試験)、過剰間隙水圧  $\Delta u$  (非排水試験) の関係として示したものである。比較のために豊浦砂のデータもプロットしている。森火山灰土は豊浦砂と類似したダイレイタンスー挙動を呈しているが、富川、中標津火山灰土はせん断に伴う体積収縮が著しく、また圧密圧力が高くなるほど体積収縮量も大きくなることが明らかである。なお、せん断による体積収縮傾向は中標津火山灰土で最も著しく、密な豊浦砂や森火山灰土に見られるような正のダイレイタンスーへの移行は全く認められない。非排水条件では、せん断開始とともに正の過剰間隙水圧が発生している。このように、せん断により常に有効応力の

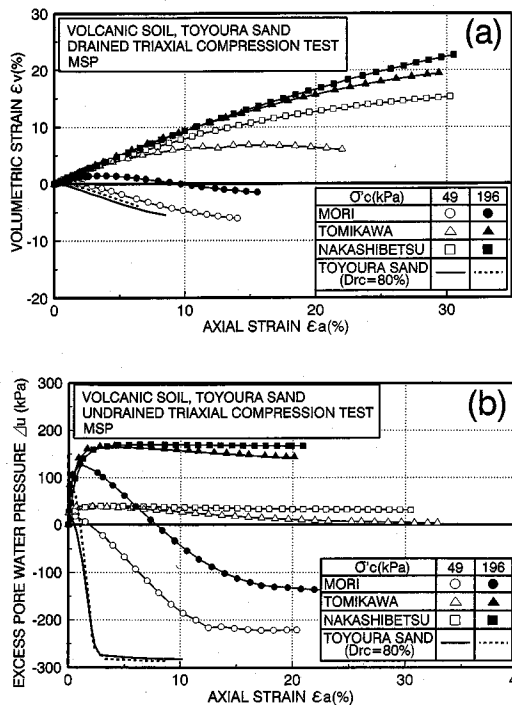


図-6 ダイレイタンスー特性：(a) 排水試験による体積ひずみ—軸ひずみ関係、(b) 非排水試験による過剰間隙水圧—軸ひずみ関係

増加する排水試験とは破壊時の有効応力レベルに大きな差が生じることに注目すべきである。このことは、排水条件の違いによる応力—ひずみ関係の有効拘束圧依存性の差を反映している結果であると推定される。

非排水試験での各火山灰土の有効応力経路の相違を明らかにするために、圧密圧力  $\sigma'_c$  で正規化した  $p'-q$  関係を図-7に示した。図から、密な豊浦砂や森火山灰土は変相点を境に負のダイレイタンスーから正のダイレイタンスーに転じ、破壊は正の領域で生じていることがわかる。それに対して、中標津火山灰土や富川火山灰土では破壊に至るまでダイレイタンスー挙動の負から正への反転がないのが明瞭に示されている。

図-8では、中標津火山灰土の  $\sigma'_c = 49, 98, 196, 392$  kPa での正規化した有効応力経路が示されている。図で明らかなように、 $\sigma'_c = 49, 98$  kPa では負から正に向かうダイレイタンスー挙動の反転が見られるが、破壊は負のダイレイタンスー領域内である。一方、 $\sigma'_c = 196, 392$  kPa では正のダイレイタンスー方向に転ずることはなく、その経路はせん断の進行とともに破壊線に沿って有効応力が減少していくという非常に緩い砂のそれに類似した挙動を示している。このように、 $\sigma'_c$  の大きさに極めて依存する非排水せん断挙動を呈することが明確である。

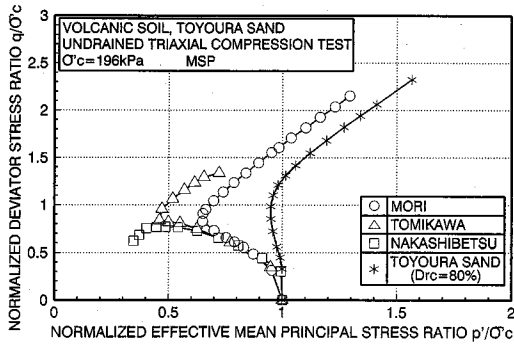


図-7 正規化した有効応力経路

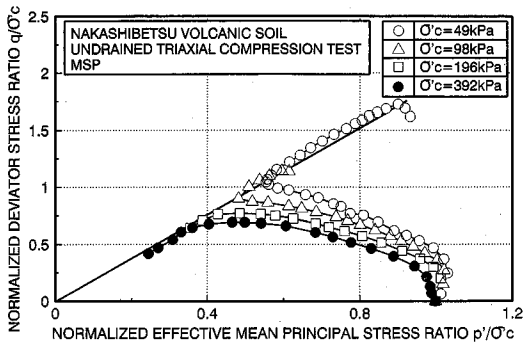


図-8 中標津火山灰土の有効応力経路

図-9 (a), (b) は、排水及び非排水条件でのせん断抵抗角  $\phi_d$ 、 $\phi' (= \arcsin(\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3))$  と有効拘束圧  $\sigma'_c$  の関係を全ての火山灰土について整理したものである。なお、比較のために豊浦砂の試験結果も示している。いずれの火山灰土でも、排水試験では有効拘束圧の増大に伴って  $\phi_d$  が減少し、それは豊浦砂よりも火山灰土において著しくなるようである。一方、非排水試験での  $\phi'$  の拘束圧依存性は排水試験ほど明確ではない。排水条件によるこのような強度特性の拘束圧依存性の違いは、せん断時の有効平均主応力  $p'$  の変化（大きさ）に強く関わっていることを示すものである。

図-10 は、 $\phi_d$ 、 $\phi'$  と破壊時の有効平均主応力  $p_f$  との関係を整理したものである。図-7や図-8の有効応力経路の比較からも明らかのように、非排水条件では有効拘束圧  $\sigma'_c$  の違いにかかわらず、破壊時の有効平均主応力  $p_f$  の値が漸近してくる傾向にあるが、両者の関係は、排水・非排水条件での応力経路の差によらず、各火山灰土ではほぼ一義的なものとなるのが理解される。また、前述のように富川、柏原、美々火山灰土は噴出源を等しくする火山灰土であるが、それらは極めて類似した関係で表されることがわかる。また図中では、有効平均主応力の増大に伴ってせん断強度は減少していくものの、その減少傾向は中標津火山灰土で最も激しく、森火山灰土

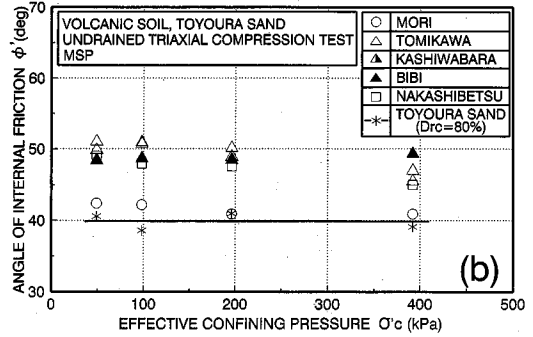
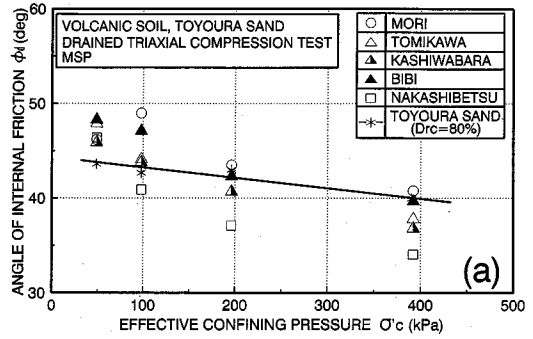


図-9 各火山灰土の内部摩擦角と有効拘束圧の関係：(a)  $\phi_d - \sigma'_c$  関係、(b)  $\phi' - \sigma'_c$  関係

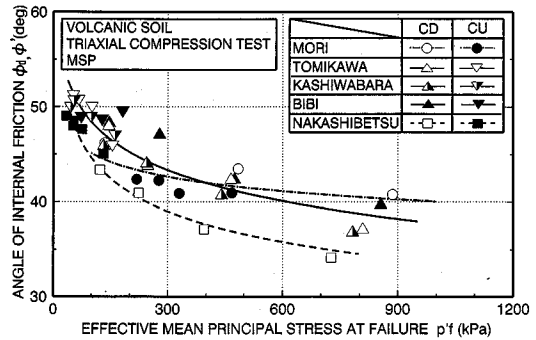


図-10 破壊時の有効平均主応力とせん断抵抗角の関係

で最も緩やかなものとなっていることが示されている。なお、この有効平均主応力の増加に伴うせん断強度の低下は、後述のように構成粒子の破砕性と密接な関係にある。

## (2) 火山性粗粒土の平面ひずみ力学挙動

ここでは、火山性粗粒土の力学挙動と破砕特性に及ぼす応力系の影響を明らかにするためにに行った平面ひずみ試験結果を考察する。

図-11 (a), (b) は、森、富川火山灰土及び豊浦砂に対する排水平面ひずみ試験 (D. PS 試験) で得た応力

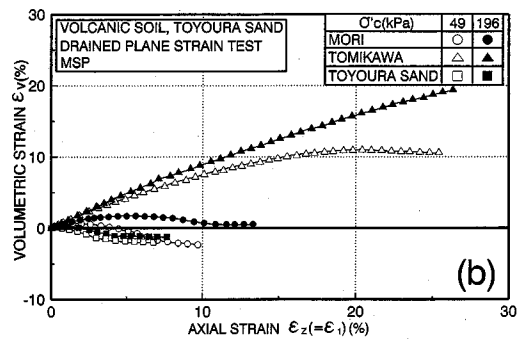
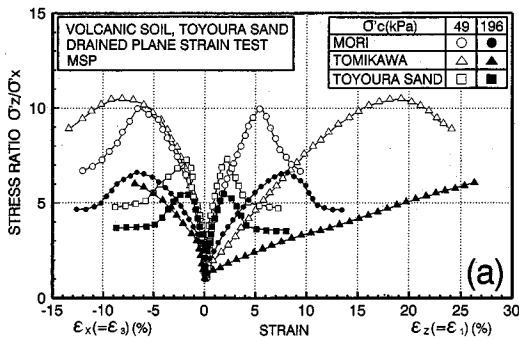


図-11 排水平面ひずみ試験から得た変形-強度特性の比較：(a) 主応力比-主ひずみ関係，(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

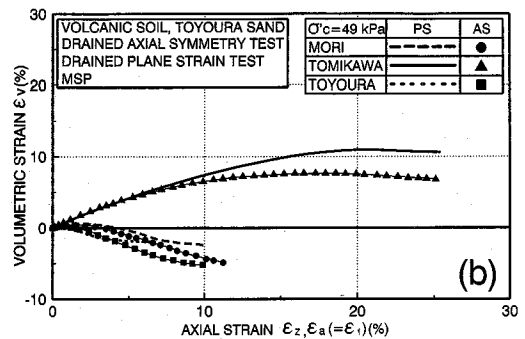
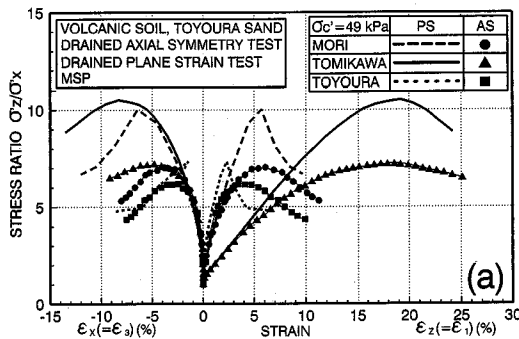


図-12 軸対称及び平面ひずみ応力条件下の変形-強度特性の比較：(a) 主応力比-主ひずみ関係，(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

ひずみ-ダイレイタンス-関係を、 $\sigma'_c=49$  kPa と 196 kPa の場合で比較している。どの火山灰土も豊浦砂よりもはるかに強い有効拘束圧依存性を示すのは、図-5, 6 で示した軸対称三軸試験結果と同様である。なお、有効拘束圧の増加による主応力比の低下は軸対称応力条件下よりもかなり著しくなっているようである。このことを明確に示すために、図-12 は  $\sigma'_c=49$  kPa における平面ひずみ挙動を、軸対称排水三軸圧縮試験 (D. AS 試験) の結果と直接比較したものである。クリーンな砂と同様に、D. AS 試験に比べ D. PS 試験において高い主応力比が与えられていることが図-12 (a) よりわかる。また図-12 (b) から、森火山灰土のダイレイタンス挙動は豊浦砂と類似しているものの、富川火山灰土では著しい体積収縮性を示すことが認められる。なお破壊ひずみの大きさは、変形条件の差によらずほぼ等しい値となるようである。

ここで、中間主応力の発生特性を把握するために、中間主応力係数  $b$  値 ( $=(\sigma'_y - \sigma'_x)/(\sigma'_z - \sigma'_x)$ ) と  $\epsilon_z(=\epsilon_l)$  の関係を調べてみた。図-13 (a), (b) は、排水及び非排水条件下の森、富川火山灰土及び豊浦砂の  $b$  値挙動を示している。豊浦砂の場合はせん断直後の段階から  $b$  値の急増が認められ、排水条件ではその後 0.27 ~

0.30 程度の値に落ち着くという従来の研究結果と同じ挙動になっている。森火山灰土では、 $b$  値の急増が若干遅れているが、ほぼ豊浦砂と類似した挙動にある。ただし  $b$  値は、豊浦砂よりもやや低めか同程度の値を示している。それに比べ、富川火山灰土の  $b$  値の発現は極めて遅れており、特に排水条件下でその傾向が強い。例えば、図-13 (a) に示されているように遅いものでは軸ひずみ  $\epsilon_z(=\epsilon_l)=10\%$  を越えるまで中間主応力  $\sigma'_y$  が発生しないものがある。またこの傾向は有効拘束圧が高くなるほど著しくなる。図示は省略したが、このことは他の火山灰土においても同じ傾向にあることが確認されている。この原因として、直観的にはまず供試体鉛直面と拘束板との間におけるベッディングエラーの存在が想定される。しかし図-13 (b) でも理解されるように、非排水条件下では排水条件下よりも小さい軸ひずみの段階で  $b$  値の急増が認められていることから、ベッディングエラーの影響というよりは後述の粒子破碎の影響と見なす方が合理的であるように思われる<sup>10)</sup>。なお、不攪乱しらすの排水平面ひずみ試験から、龍岡ら<sup>12)</sup>は豊浦砂よりしらすにおいて低い  $b$  値 ( $\approx 0.15$ ) が与えられるとしている。

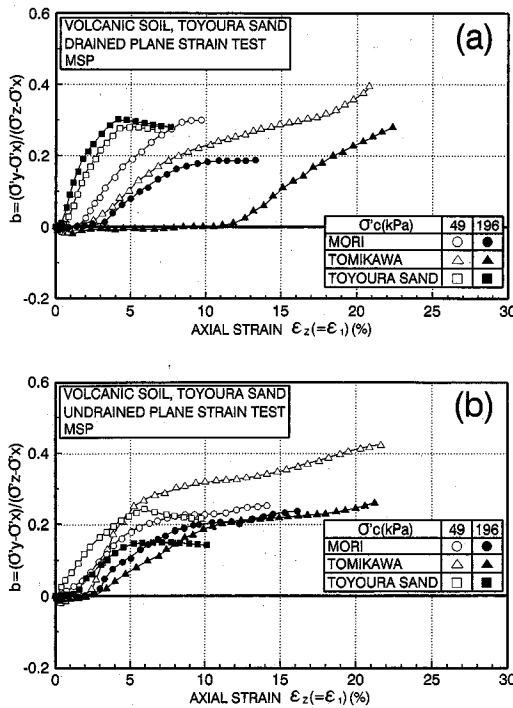


図-13 中間主応力発生特性：(a) 排水条件，(b) 非排水条件

### (3) せん断に伴う粒子破碎

前述のように同じ火山灰土といえども、その力学挙動には大きな差があることが示された。この理由を明らかにするためには構成粒子のせん断に伴う破碎性を議論しなければならない。一般に、火山性粗粒土は粒子自身が脆く、比較的低い圧力レベルでも破碎されやすい粒状体であると考えられていることから、その力学特性に及ぼす粒子破碎の影響は大きいと思われる。このような粒子破碎が粒状体の力学的性質に及ぼす影響を定量的に把握するためには、破碎の大きさを表す指標が必要である。そのため以前より、ふるい分けで粒度分布の変化を求めする方法や比表面積の増加量  $\Delta S$  を求める方法<sup>(13),(14)</sup> など多くの提案がなされている。このうち、前者の粒径加積曲線の変化に基づいた指標は、図-14 に示すような 15% 粒径の減少率 ( $D_{15}'/D_{15}$ )<sup>(15)</sup> や任意の粒径の増加量による手法 (例えば 0.25 mm)<sup>(16)</sup>、また破碎によって生じた細粒分含有率の増加量  $\Delta F_c$ <sup>(17)</sup> などが挙げられ、直観的に粒子破碎の程度を表現する便利な指標と考えられる。本研究では、細粒分含有率の増加量  $\Delta F_c$  により火山性粗粒土の粒子破碎の程度を評価しようと試みた。ここで 75  $\mu\text{m}$  以下の細粒分含有率の増加量  $\Delta F_c$  は、図-14 に示されているように、 $\Delta F_c = (F_c' - F_c)$  で求められる。

$\Delta F_c$  と他のパラメータとの相関を見てみるために、

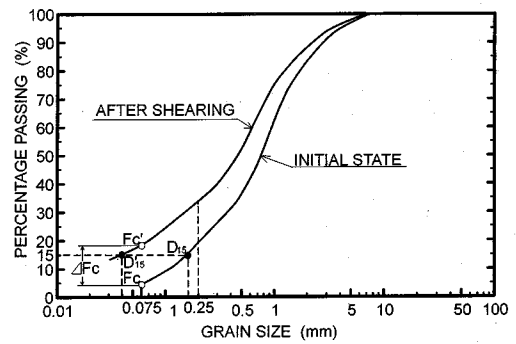


図-14 細粒分含有率の増加量  $\Delta F_c$  の定義

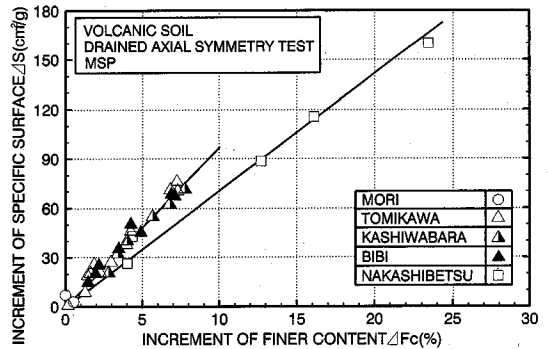
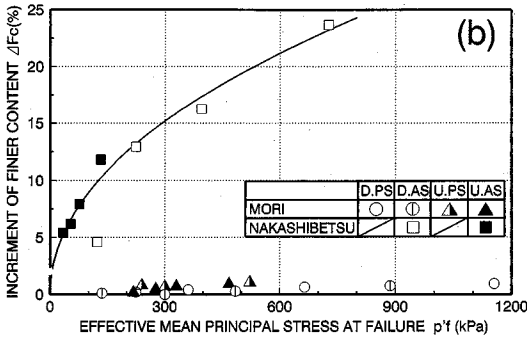
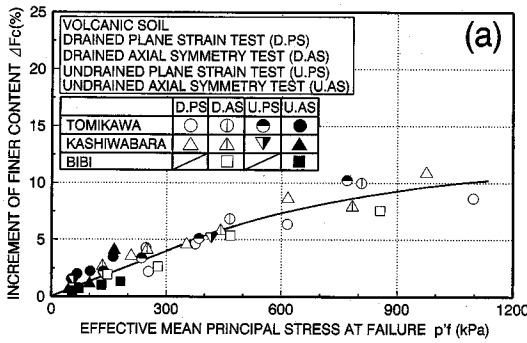


図-15 比表面積  $\Delta S$  と  $\Delta F_c$  の関係

ここでは  $\Delta S$  との対応関係を調べてみた。図-15 は、前述の各火山灰土の圧密排水三軸試験結果から得られたものである。なおこれらの火山灰土のうち、森火山灰土はその構成粒子が極めて硬いため、せん断によって生ずる破碎はほとんどない。一方、他の火山灰土ではかなりの粒子破碎が生じ、特に中標津火山灰土では顕著である。図から、支笏火山灰 (富川, 柏原, 美々) と摩周火山灰 (中標津) で異なる関係にある (主として構成粒子の比重の違いによるものである) もの、 $\Delta F_c$  による粒子破碎の定義と  $\Delta S$  によるその定義が良く対応していることが明らかである。このことから、 $\Delta F_c$  はこの程度の粒子破碎量の表現に十分対応できるように思われる。本研究では  $\Delta F_c$  の物理的意義をこれ以上追求することはしないが、 $\Delta F_c$  はふるい分け試験のみから定量化されることから非常に簡単に求まる値であること、細粒分の工学的意義が明確であることなどから、以下の考察では  $\Delta F_c$  を用いて議論していくこととする。

図-16 (a), (b) は、各火山灰土に対する排水三軸圧縮試験 (D.AS)、非排水三軸圧縮試験 (U.AS) 及び排水平面ひずみ試験 (D.PS)、非排水平面ひずみ試験 (U.PS) から求められた細粒分増加量  $\Delta F_c$  と破壊時の有効平均主応力  $p_f'$  との関係を表している。応力系や



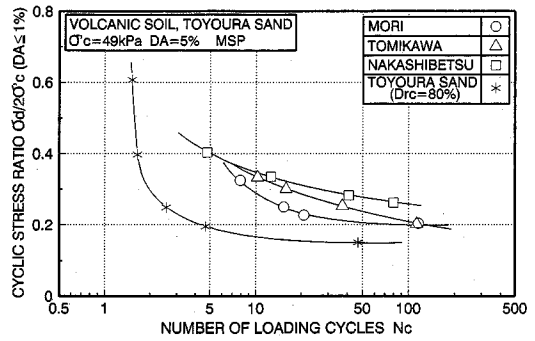
図—16  $\Delta F_c$ と破壊時の有効平均主応力  $p'_f$  の関係：(a) 支笏降下生成物（富川，柏原，美々火山灰土），(b) 森火山灰土と中標津火山灰土

排水条件の違いに関わらず、 $\Delta F_c - p'_f$  関係は噴出起源が同じであれば一義的關係で整理できるようである。なお、駒ヶ岳降下生成物（森火山灰土）は本研究の応力レベルではほとんど粒子破砕が生じていないのに対し、摩周降下生成物（中標津火山灰土）は顕著な構成粒子の破砕がもたらされていることから、極めて脆弱な粒子からなっていると考えて良い。また、せん断中に有効平均主応力が低減する非排水試験での粒子破砕量は、せん断の進行に伴って有効平均主応力が増加する排水試験よりも少なくなることが明らかである。

以上のことから、本研究が対象にした応力レベルにおいて次のように指摘できる。すなわち、せん断の進行に伴って有効平均主応力が増加する試験においては、構成粒子の破砕性を力学特性に及ぼす影響因子として着目しておくことが重要であるが、せん断中に有効応力が低減する試験では考慮する必要はないといえよう。

#### (4) 火山性粗粒土の繰返し非排水せん断挙動

図—17は、森，富川，中標津火山灰土と豊浦砂の  $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$  における繰返し非排水三軸試験結果を、両振幅軸ひずみ  $DA = 5\%$  が生ずるに必要な繰返し载荷回数  $N_c$  と両振幅軸ひずみ  $DA \leq 1\%$  までの平均繰返し応力比  $\sigma_a/2\sigma'_c (=SR)$  との関係として示している。各火山灰土



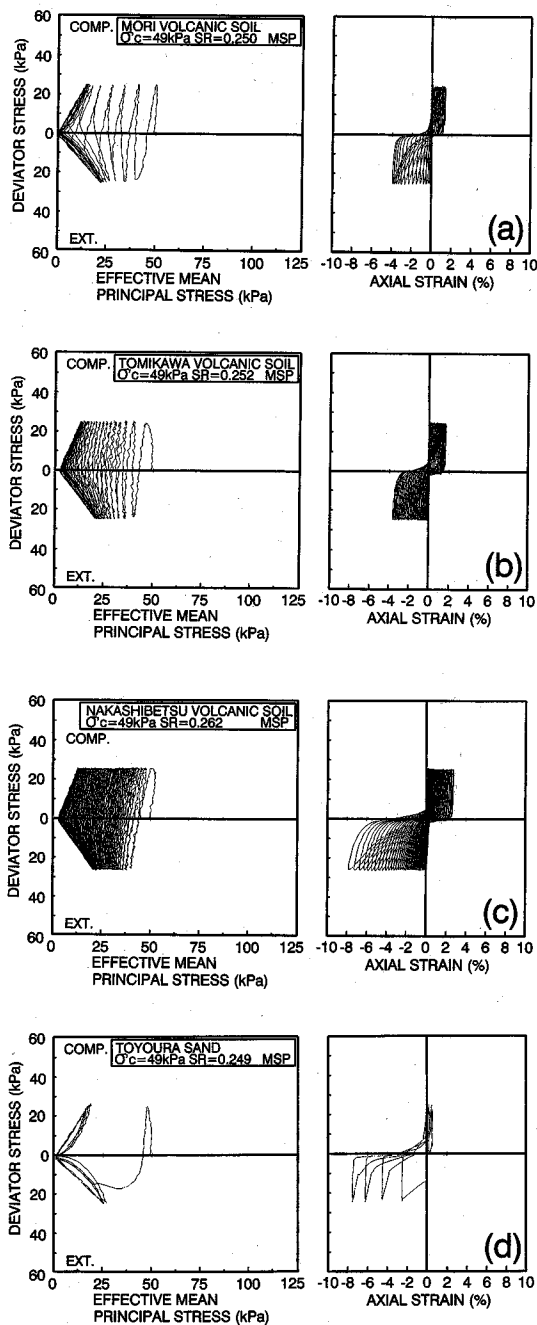
図—17 火山灰土と豊浦砂の繰返し非排水強度の比較

の圧密後の乾燥密度  $\rho_{ac}$  が異なるため直接比較することは困難であるが、その密度が原位置のそれに対応していることを考えると、ほぼ似たような関係になっていると見て良い。また、各火山灰土と豊浦砂 ( $D_{rc}=80\%$ ) の液状化強度値を比較すると、どの火山灰土の液状化強度も豊浦砂よりは高くなっているようである。ここで、写真—1に示したような中標津火山灰土の液状化の発生は、地盤条件等の情報が不足のため、本試験結果から厳密には推定できていない。しかし、火山灰地盤の液状化強度は、自然堆積砂地盤のそれと同程度かやや低いという結果も報告されている<sup>3),4)</sup>。

図—18は各火山灰土と豊浦砂の有効応力経路と応力一ひずみ関係を等しい繰返し応力比  $SR (=0.25)$  のもとで比較している。いずれの火山灰土の有効応力経路においても、通常の粒状体と同様繰返し载荷回数の増加に伴って徐々に有効平均主応力が減少し液状化に向かっていることが示されている。また変形挙動についても、圧縮側より伸張側への変形の卓越が見られることから、基本的に空中落下法で作製された豊浦砂のそれ<sup>8)</sup>と良く似ているといえる。このように液状化のメカニズムは豊浦砂のそれに類似しているが、破砕性の火山灰土では有効平均主応力が原点に到達しないという特徴的な挙動を示すことが図から明らかである。

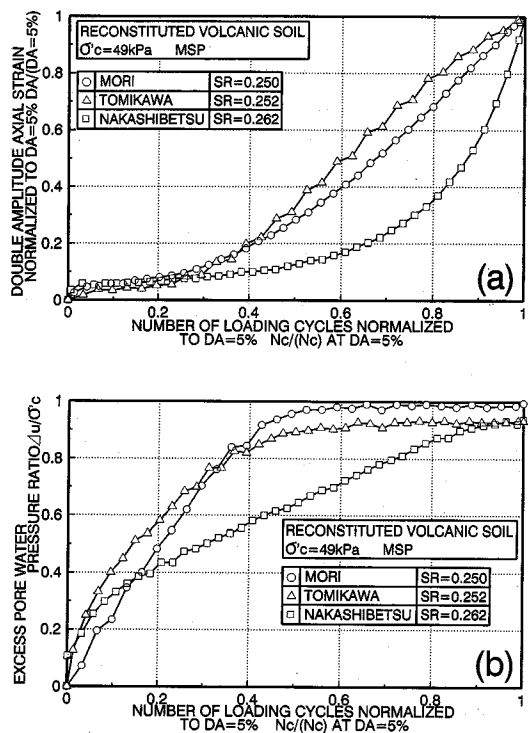
これらのことをより明確に示すために、発生両振幅軸ひずみ  $DA$  を  $DA = 5\%$  で正規化した値、ならびに発生間隙水圧  $\Delta u$  を初期有効拘束圧  $\sigma'_c$  で正規化した値と繰返し回数  $N_c$  を  $DA = 5\%$  に達したときの繰返し回数  $N_{c \text{ at } DA=5\%}$  で正規化した値との関係として図—19(a)、(b)に示した。なお比較は、同様に  $SR = 0.25$  のもとで行っている。各火山灰土の繰返し非排水せん断挙動は、基本的にはクリーンな砂のそれと同様に、繰返し回数の増加に伴って軸ひずみ、間隙水圧が累積する傾向にある。ただし、いずれの火山灰土も過剰間隙水圧比が1に達せず、その傾向は構成粒子が脆弱で粗粒であるほど顕著になるようである。一方、中標津火山灰土と他の火山灰土





図一八 代表的有効応力経路：(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

の間でその挙動に若干の差異が認められる。すなわち、森、富川火山灰土の軸ひずみ、間隙水圧発生挙動は比較的密な砂の挙動<sup>18),19)</sup>に類似しているが、中標津火山灰土はむしろ緩い砂の挙動<sup>18),19)</sup>に近いものとなっている。また、中標津火山灰土ではクリーンな砂と同様に  $DA=10\%$  に達するまで様な変形が観察されたのに対し、



図一十九 繰返し非排水せん断挙動：(a) 両振幅軸ひずみ，(b) 過剰間隙水圧

森、富川火山灰土はそれ以前に脆性的な破壊を起こしている。このような挙動差が、構成粒子そのものの性質に起因しているものなのかどうかについては、さらに詳しく調べてみる必要がある。なお、繰返し非排水せん断過程のみでもたらされる粒子破砕は、いずれの火山灰土でもほとんど認められていない<sup>6)</sup>。このことは、前述のような有効応力の増減が粒子破砕に及ぼす影響に関する考察が妥当であることを裏付けている。

#### (5) 不攪乱火山性粗粒土の力学挙動

本研究では、自然堆積火山灰地盤の力学挙動を調べるために、不攪乱試料の採取を行っている。具体的には図一3に示される森、柏原火山灰土に対するブロックサンプリングにより得られたBV、BH 供試体について三軸圧縮及び平面ひずみ試験を行い、両供試体の力学特性の比較を試みている。なおBV、BH 供試体はサンプリング時の採取条件や試料の品質及び試験条件が同じであるから、両者の相違点は三軸供試体の軸方向が自然堆積層の鉛直方向か水平方向かという点だけにある。

図一20は、 $\sigma'_c=49, 98 \text{ kPa}$ におけるBV 供試体とBH 供試体に対する非排水三軸圧縮試験から得た主応力比 ( $\sigma'_1/\sigma'_3$ ) と主ひずみ  $\epsilon_1, \epsilon_3$  との関係と比較している。BV 供試体は、BH 供試体に比べてはるかに変形しづら

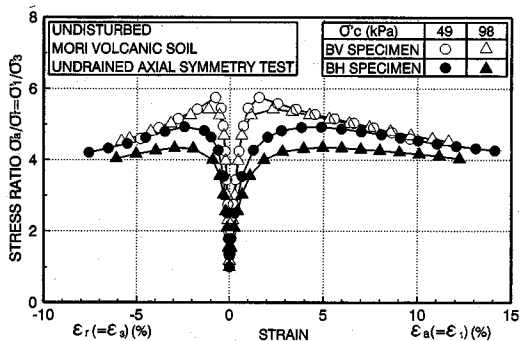


図-20 不攪乱森火山灰土の応力一ひずみ関係

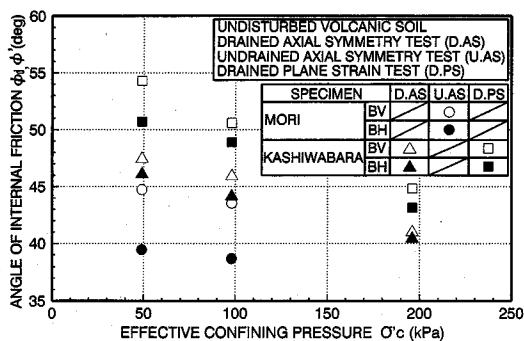


図-21 不攪乱火山灰土の強度異方性

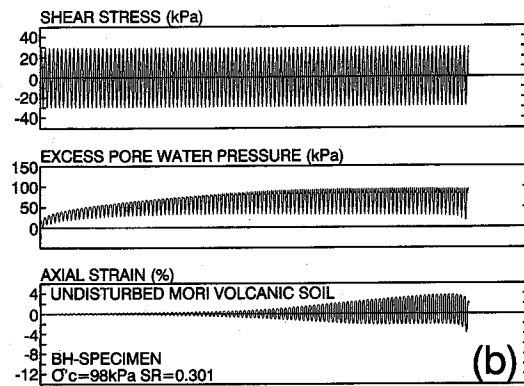
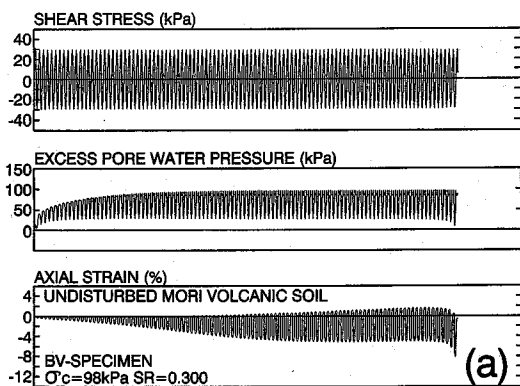


図-22 不攪乱森火山灰土の軸ひずみ、軸荷重、間隙水圧の時刻歴：(a) BV 供試体、(b) BH 供試体

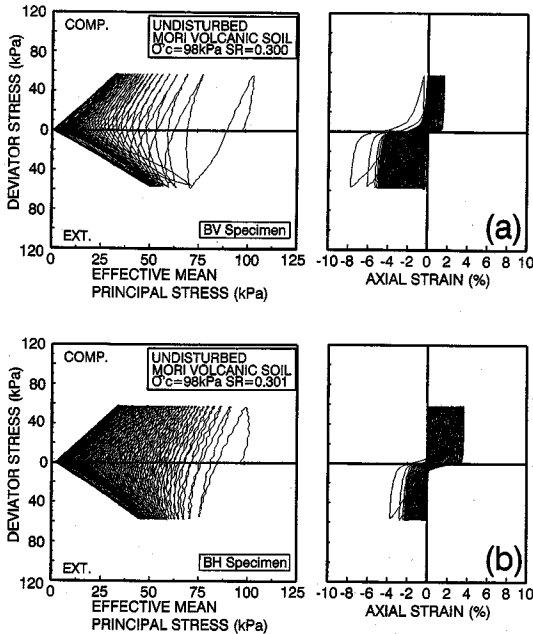
く、かつ高い応力比を与えていることが図より明らかである。このことは、いずれの拘束圧についてもいえるようである。このことから、本自然堆積地盤は等方的な応力状態になく、鉛直方向よりも水平方向に変形しやすいという異方的な堆積構造状態にあることが推定される。このような異方的力学挙動の特徴は三浦・土岐<sup>9)</sup>がすでに明らかにしている自然堆積砂地盤のそれと極めて良く対応するものである。

上記の森火山灰土の他に、破砕性の卓越する柏原火山灰土についても平面ひずみ試験 (D.PS) や軸対称試験 (D.AS) を行って得た結果を整理して、図-21 に示すような  $\phi$ 、 $\phi' - \sigma'_c$  関係を得た。図では応力系の違いによるせん断強度の差異が明確に現れているとともに、図-9 において認められた強い有効拘束圧依存性が不攪乱供試体についても存在していることがわかる。さらに、両供試体の強度の差異は、軸対称応力条件に比べ平面ひずみ条件においてより顕著であり、かつ豊浦砂のそれ<sup>9)</sup> よりもはるかに大きいものである。しらすに関して、春山・北村<sup>20)</sup> は同様の強度異方性の存在を報告している。

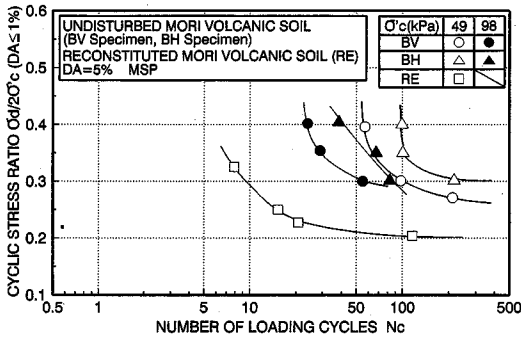
図-22 (a)、(b) は、森火山灰土の BV、BH 供試体について繰返し応力比  $SR=0.3$ 、 $\sigma'_c=98\text{kPa}$  のもとで行われた繰返し非排水せん断試験から得たタイムヒス

トリーを比較して示したものである。図において、両供試体の軸ひずみの発生状況に著しい相違がみられる。すなわち、BV 供試体では伸張応力条件下において軸ひずみの発生が卓越しているのに対し、BH 供試体では圧縮応力条件下において顕著となっている。また図-23 (a)、(b) に示される有効応力経路では、BV 供試体では伸張応力条件下において、BH 供試体では圧縮応力条件下でそれぞれ過剰間隙水圧が卓越して発生していることが明らかである。

図-24 は、 $\sigma'_c=49\text{kPa}$ 、 $98\text{kPa}$  について両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  が生じたときの繰返し載荷回数  $N_c$  と繰返し応力比  $SR$  との関係を示している。 $SR$  は  $DA=1\%$  になるまでの平均値をとっている。図で明らかのように、不攪乱試料の繰返し非排水強度は、再構成試料 (RE) のそれよりはるかに高い値を示している。この事実から、原位置の堆積過程にもたらされるセメンテーション効果や溶結作用の評価は極めて重要になると思われる。また有効拘束圧の増加に伴って両供試体の液化強度は低下する傾向にある。なお、所定の両振幅軸ひずみ  $DA$  を生ずるに必要な繰返し応力比は、常に BH 供試体の方が高い値となっている。このような挙動は自然堆積砂地盤においても全く同様に認められている<sup>9)</sup> ことから、火



図—23 不攪乱火山灰土の有効応力経路と応力—ひずみ関係  
：(a) BV 供試体，(b) BH 供試体



図—24 不攪乱，再構成森火山灰土の液状化強度

山性粗粒土の堆積過程にもたらされた構造異方性によるものと考えて良い。このことより，火山灰地盤では粒子配列構造の異方性に基づく強い力学特性の異方性が存在しているといえよう。また粒子間接点レベルで発揮される溶結作用やセメンテーション効果も重要な役割を担っていると考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では，北海道各地で採取した噴出起源の異なる数種類の火山性粗粒土に一連の排水・非排水三軸圧縮，平面ひずみ圧縮及び繰返し非排水三軸試験を実施し，それらの静的・動的力学特性を詳細に調べた。得られた結論は以下の通りである。

- (1) せん断中に有効平均主応力が増加する試験では，火山灰土の構成粒子の破碎が顕著となる。一方，繰返し非排水せん断過程で液状化に向かうような場合には，粒子の破碎はほとんど生じていない。なお，もたらされる粒子の破碎は細粒分の増加量  $\Delta F_c$  によってある程度評価できる。
- (2) 破碎性の卓越する火山灰土では，その応力—ひずみ—強度特性の有効拘束圧依存性は極めて高い。
- (3) 破碎の顕著な火山灰土では，特異なダイレイタンシー特性を示す。例えば，中標津火山灰土のような脆弱な粒子からなる火山灰土では，排水条件では極めて激しい体積収縮傾向を示すが，非排水条件での有効応力経路はせん断の進行とともに破壊線に沿って着実に有効応力が減少するという非常に緩い砂のそれに似た挙動を示している。
- (4) 不攪乱供試体と再構成供試体の強度差は，通常其自然堆積砂地盤でみられるものよりはるかに大きいことから，降下火山灰土の力学特性における粒子間接点での溶結作用ならびにセメンテーション効果は非常に重要であると指摘される。
- (5) 降下生成物で構成されている火山灰地盤の力学特性には，構成粒子の破碎の有無や応力系の相違に関わらず著しい異方性がみられる。またこの異方性の特徴は，基本的に自然堆積砂地盤で認められているものと一致することから，力学特性の異方性は堆積時にもたらされる構成粒子の配列構造の異方性に基づくものであるといえる。

謝辞：本研究を進めるにあたり，実験及びデータ整理に多大な協力を受けた元室蘭工業大学大学院生宮永 孝志氏（現 北海道電力（株）），加賀 学氏（現 日本道路公団），阿曾沼 剛氏ならびに貴重なご助言を頂いた磯崎真一氏（北海道開発コンサルタント（株））に心から感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 北海道火山灰命名委員会：北海道の火山灰，1982。
- 2) 柳澤栄司，安田進，吉田望，若松加寿江：住宅地の被害，1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書，土質工学会，pp.231-275，1994。
- 3) 三浦清一，三浦盛夫，齊藤和夫：北海道における地震災害，土と基礎，Vol.37，No.9，pp.59-64，1989。
- 4) Miura, S., Yagi, K. and Kawamura, S.: Liquefaction damage of sandy and volcanic grounds in the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake, *Proc. of Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri*, pp.193-196, 1995.
- 5) Tokimatsu, K., Suzuki, Y. and Tamura, S.: Preliminary report on geotechnical aspects of Hokkaido-Nansei-Oki

- Earthquake of July 12, 1993, *Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes, Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi*, pp.75-86, 1994.
- 6) 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, 土質工学会, pp. 229-236, 1995.
  - 7) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, 1990.
  - 8) 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.
  - 9) 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.
  - 10) Miura, S., Yagi, K. and Kawamura, S.: Deformation-strength anisotropy and particle crushing of volcanic coarse grained soils, *Proc. of The International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Hokkaido, Sapporo*, pp.329-334, 1995.
  - 11) 磯崎真一, 新田登: 火山灰土の強度・変形特性に関する実験的研究—密度, 構造, 供試体寸法の影響—, 土質工学会北海道支部技術報告集第 29 号, pp. 17-22, 1989.
  - 12) Tatsuoka, F., Nakamura, S., Huang, C-C. and Tani, K.: Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp. 35-54, 1990.
  - 13) 福本武明: 粒子破碎の程度を示す指標, 土と基礎, Vol. 29, No. 12, pp. 64-65, 1981.
  - 14) 三浦哲彦, 山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, No. 260, pp. 109-118, 1977.
  - 15) Lee, K. L. and Farhoomand, I.: Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.4, No.1, pp.68-86, 1967.
  - 16) Ueng, T-S., Tzou, Y-M. and Lee, C-J.: The effect of end restraint on volume change and particle breakage of sands in triaxial tests, *ASTM STP 977, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, pp.679-691, 1988.
  - 17) 三浦清一: 粒子破碎, 粒状体の力学, 土質工学会, pp. 117-120, 1993.
  - 18) Seed, H. B., Martin, P. P. and Lysmer, J.: Pore-water pressure changes during soil liquefaction, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.102, No.GT4, pp.323-346, 1976.
  - 19) 土岐祥介, 三浦清一, 八谷好高: 飽和砂の液状化特性におよぼすせん断履歴の影響, 第 14 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 589-592, 1979.
  - 20) Haruyama, M. and Kitamura, R.: Anisotropic deformation-strength properties of soft sedimentary rock 'Shirasu' originated from pyroclastic flows, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.84-94, 1984.

(1995.11.17 受付)

## STATIC AND CYCLIC SHEAR BEHAVIOR AND PARTICLE CRUSHING OF VOLCANIC COARSE GRAINED SOILS IN HOKKAIDO

Seiichi MIURA, Kazuyoshi YAGI and Shima KAWAMURA

A series of triaxial compression tests, plane strain tests and cyclic undrained triaxial tests on several volcanic coarse-grained soils were performed to understand the physics of the mechanical behavior of soils with particle crushing. Volcanic coarse-grained soils were taken from natural deposits, produced by fall deposition in Hokkaido, Japan. Test results showed that anisotropy in mechanical properties of volcanic soils is observed more clearly than that of clean sand. It was also found that the stress-strain-strength properties of granular materials are strongly influenced by their particle breakage, when the test is performed under stress system with the increase of effective mean principal stress.