

# 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

三浦清一<sup>1</sup>・八木一善<sup>2</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)

火山性粗粒土は、その構成粒子が多孔質で脆弱なため比較的低い圧力レベルでも粒子破碎しやすい粒状体である。従って、このような火山灰質粒状体の通常の工学範囲にある圧密圧力やせん断力下での粒子破碎特性を明らかにすることは地盤工学上重要である。本研究では、北海道各地から採取された 4 種類の降下火山灰について一連の室内試験を実施し、任意の応力経路下の圧密とせん断過程でもたらされる粒子破碎を詳細に調べた。試験結果から、火山灰質粒状体の粒子破碎は圧密経路およびせん断経路に強く依存するが、細粒分の変化としてとらえた粒子破碎量は有効平均主応力と有効応力比のみの関数で表現できることが示されている。

**Key Words :** volcanic coarse-grained soil, particle breakage, granular material, effective stress, laboratory test

## 1. ま え が き

一般に、火山性粗粒土、しらす、まさ土などの多孔質で脆弱な粒子あるいは粗大粒子からなる土質材料は、比較的低い圧力レベルでも無視できないほどの粒子破碎が生じることが知られている<sup>1),2),3)</sup>。一方高圧下においては、砂や礫でも程度の差こそあれ粒子破碎が生じる。このため、以前より砂や礫のせん断・圧縮に伴う粒子破碎の評価やその定量化法について研究が進められている<sup>4),5),6),7),8),9)</sup>。特に、三浦ら<sup>10),11),12)</sup>は豊浦標準砂の高圧下でもたらされる粒子破碎を調べ、その力学的性質の粒子破碎の依存性を明らかにするとともに、破碎の定量化法として構成粒子の表面積の変化にもとづくエネルギー的考察が有効であることを示している。また、カーボネイト系の砂は、上記のような材料とはその生成過程を基本的に異にするが、多孔質性で粒子破碎が生じやすいとされている<sup>13)</sup>。このような粒状体の応力-ひずみ-ダイレイタンス特性は、基本的に構成粒子間の接触、すなわち粒子間の摩擦法則に支配されているのだから、構成粒子が破碎すればその粒状体は破碎前の特性を失うことになる。特に構成粒子が脆弱な火山性粗粒土のような火山灰質粒状体では、粒子の破碎に伴う形状変化とともに粒子配列構造の変化が顕著になることから、粒子破碎は通常の工学範囲における圧力レベルでの圧縮・せん断特性に大きく影響することが考えられる。

このように、通常の圧力レベルにおける火山灰質粒

状体の粒子破碎特性とその評価ならびに力学特性に及ぼす影響についての研究は重要であるにもかかわらず、今までになされた研究は極めて限定されている。そこで、筆者らはいくつかの北海道火山性粗粒土について一連の静的せん断および繰返し非排水せん断試験を実施し、せん断下の粒子破碎特性の実態と定量化法について調べてきた。その結果、火山灰質粒状体のせん断によってもたらされる粒子破碎はせん断時の有効応力の変化と密接な関係にあり、粒子破碎がその静的力学特性に及ぼす影響は決して無視できるものではないことがわかった<sup>14)</sup>。また圧密過程でもたらされる粒子破碎は繰返し非排水せん断強さに影響を与えるが、有効応力の低減する繰返し非排水せん断過程のみに着目すると脆弱な粒子から構成される火山灰質粒状体であっても構成粒子の破碎はほとんど無視できる、などの事実が明らかにされている<sup>15)</sup>。

このような背景から、本研究では北海道各地から採取された 4 種類の火山灰質粒状体についてさらに一次元圧密試験、等方圧密試験、三軸圧縮および平面ひずみ試験を実施し、各火山灰質粒状体の圧密・せん断過程でもたらされる粒子破碎の形態やその特性について調べた。本文では、特に粒子破碎の応力経路依存性が明確にされている。

## 2. 火山灰試料の物理特性

本研究で用いた火山灰質粒状体は、北海道各地の自

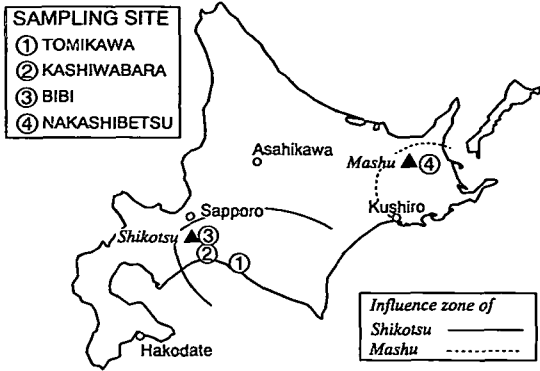


図-1 試料採取地点

表-1 物理的性質

SAMPLE NAME	$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	$\rho_d$ in-situ ( $g/cm^3$ )	D50 (mm)	Uc	Fc (%)
① TOMIKAWA	2.22	0.41~0.58	1.25	3.05	1.07
② KASHIWABARA	2.38	0.48~0.57	1.08	2.79	1.03
③ BIBI	2.29	0.62~0.68	1.38	3.75	1.83
④ NAKASHIBETSU	2.46	0.34~0.45	4.60	5.11	1.83
⑤ TOYOURA SAND	2.64	—	0.18	1.60	0

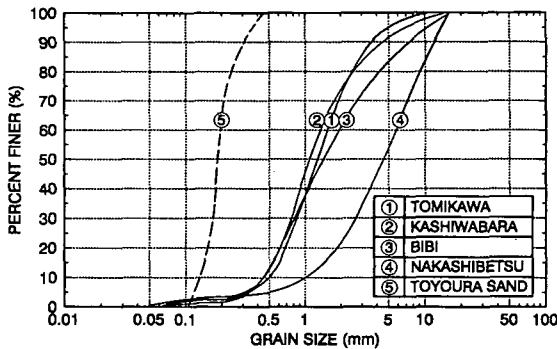


図-2 粒径加積曲線

然堆積地盤から採取した4種類の降下火山灰である。それぞれの採取位置と噴出起源を図-1に示す。門別町富川(①富川火山灰土(TOMIKAWA VOLCANIC SOIL)), 苫小牧市柏原(②柏原火山灰土(KASHIWABARA VOLCANIC SOIL))および千歳市美々(③美々火山灰土(BIBI VOLCANIC SOIL))で採取した火山灰土は、支笏カルデラを噴出源とする支笏第一テフラ(Spta-1)に属している。その噴出年代は、3.1~3.4万年前と推定されている。また、道東の中標津町武佐(④中標津火山灰土(NAKASHIBETSU VOLCANIC SOIL))で採取した摩周火山噴出物(Ma-1)は1.1~1.3万年前に噴出したも

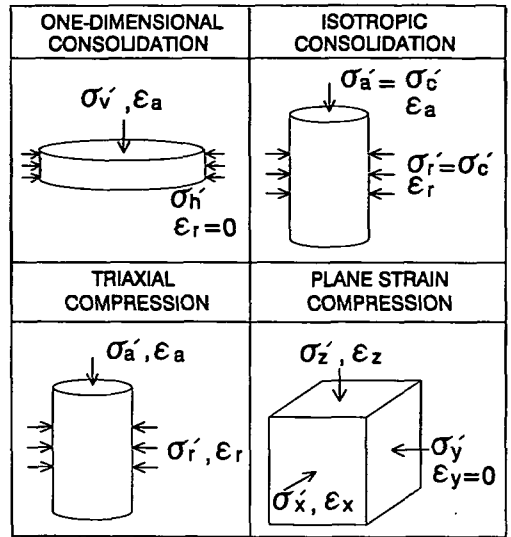


図-3 試験のタイプと応力-ひずみパラメータ

のである。これらの火山灰土試料は、いずれも土被り厚約1~2mの切土面から採取されている。

各火山灰土の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-2にそれぞれ豊浦標準砂(⑤TOYOURA SAND)のデータと比較して示す。噴出源を等しくする①富川、②柏原、③美々火山灰土は類似した粒度分布を示しているが、④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。また、いずれの火山灰土も細粒分(75 $\mu$ m以下)含有率 $F_c$ は2%以下と少ない。なお、採取した試料には構成粒子として極めて多くの軽石と火山ガラスが含まれている。これらの軽石は非常に多孔質であって、粒子内間隙の占める割合が大きいいため、各火山灰土の原位置乾燥密度 $\rho_{d\text{ in-situ}}$ が低い値をとる主因となっている。

### 3. 試験方法

本研究では、図-3に示すような応力条件下での粒子破砕性を調べている。以下に、各試験方法について簡単に述べる。

#### ①一次元圧密試験(One-Dimensional Consolidation Test)

供試体は、表-1に示される原位置密度 $\rho_{d\text{ in-situ}}$ を得るよう30cmの高さに設置した漏斗から圧密リング内に乾燥試料を空中落下させることにより再構成した。供試体の密度は、目標値に対して $\pm 5\%$ の範囲内にある。なお、圧密リングの寸法は直径60mm、高さ20mmである。供試体を24時間浸水飽和させた後に、図-4に示す2種類の圧密試験を行った。まず、地盤工学会基準<sup>16)</sup>に

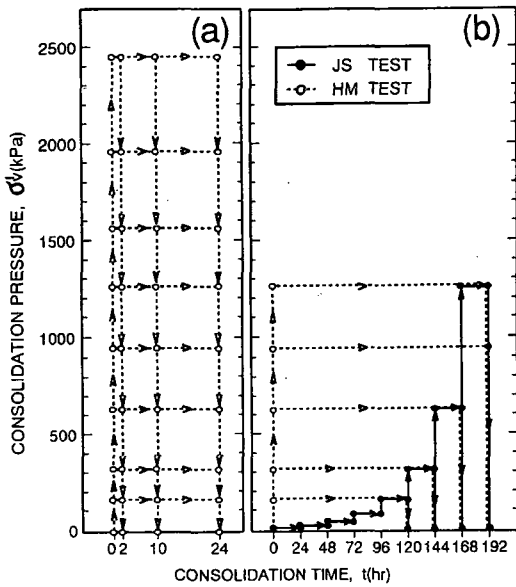


図-4 一次元圧密試験(JS試験, HM試験)の応力-時間経路

従って所定の最終圧密圧力  $\sigma'_c (=156.8 \sim 1254.4 \text{ kPa})$  まで段階的に載荷し、その後 9.8kPa まで除荷して 24 時間膨張させた試験、いわゆる標準圧密試験 (JS TEST と略、図-4 (b) ● → 参照) を実施した。また、任意の圧密圧力  $\sigma'_c$ 、圧密時間  $t$  で載荷した後に 9.8kPa まで除荷し、その後 24 時間膨張させた試験 (HM TEST と略、図-4 (a), (b) ○ → 参照) を行っている。なお HM 試験では、JS 試験に対応した圧密圧力に加え、さらに高い圧力域 ( $\sigma'_c = 1568 \sim 2450 \text{ kPa}$ ) での試験が実施された (図-4 (a) 参照)。このための高圧載荷は、三軸試験装置を改良して行われている。

#### ② 等方圧密試験 (Isotropic Consolidation Test)

全ての供試体 ( $\phi = 70 \text{ mm}$ ,  $H = 170 \text{ mm}$ ) は、上述の目標密度になるように多重ふるい落下法<sup>17)</sup> (MSP法、ふるい目の大きさ 20mm, 7層) で再構成した。この方法により、富川、柏原、美々火山灰土ではほぼ満足できる均一な供試体を得ている。しかし、中標津火山灰土では粗粒子が集中して堆積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のみが本試験で採用されている。供試体を三軸セル内に設置し、二酸化炭素、脱気水を通した後に 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  $B$  は確実に 0.96 以上の値を得ている。引続き、所定の圧密時間 ( $t = 2$  あるいは 24hr)、有効拘束圧 ( $\sigma'_c = 49 \sim 392 \text{ kPa}$ ) のもとで等方圧密試験を行った。ここで、各火山灰土の圧密による体積ひずみの変化率は、圧密時間 24hr 以内で  $1.0 \times 10^{-4} \%$  以下となっていた。このことから、圧密はほぼ完了したとみなしている。なお、粗粒材料を対象としているためにメンブ

レン貫入の影響は小さくない<sup>18)</sup> と考えられるが、これに対する補正は今回行っていない。

#### ③ 三軸圧縮試験 (Triaxial Compression Test)

供試体の作成および飽和の方法は②と同様である。供試体を所定の有効拘束圧  $\sigma'_c (=49 \sim 392 \text{ kPa})$  で等方圧密 ( $t = 2 \sim 24 \text{ hr}$ ) した後に、排水あるいは非排水条件のもとで側圧一定・ひずみ制御 ( $\dot{\epsilon}_a = 0.20\%/\text{min}$ ) のせん断試験を行った。以下では、これらの試験はそれぞれ D.AS および U.AS と略称で示されている。

#### ④ 平面ひずみ圧縮試験 (Plane Strain Compression Test)

供試体の作成および飽和の方法は②と同様である。幅 80mm、奥行き 50mm、高さ 100mm の角柱供試体を有する平面ひずみ試験装置<sup>19)</sup> によって一連の試験を行った。所定の  $\sigma'_c (=49 \sim 392 \text{ kPa})$  のもとで所定の時間 ( $t = 2 \sim 24 \text{ hr}$ ) 等方圧密を与え、引続き、排水あるいは非排水条件のもとで側圧一定・ひずみ制御 ( $\dot{\epsilon}_z = 0.20\%/\text{min}$ ) のせん断試験 (それぞれ D.PS, U.PS と略) を行った。

以上の試験が終了した後は、ふるい分析を行って試験前後の粒度変化を調べている。ここで、ふるい分析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動ふるい装置は使用しなかった。すなわち、十分な時間をかけて所定の回数 (例えば  $75 \mu\text{m}$  ふるいなら 120 回) 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。

図-3 の応力-ひずみパラメータにより、各試験での有効平均主応力  $p'$  やせん断応力  $q$  等を次のように定義している。

#### ・ 一次元圧密試験

$$p' = p'_c = (\sigma'_c + 2\sigma'_h) / 3 = (\sigma'_c + 2K_0\sigma'_c) / 3 = 2\sigma'_c / 3 \quad (1)$$

$$q = |\sigma'_c - \sigma'_h| = |\sigma'_c - K_0\sigma'_c| = 0.5\sigma'_c \quad (2)$$

(ここでは静止土圧係数  $K_0$  は直接測定されていないので、 $\phi = 30^\circ$  と仮定し Jaky 式から  $K_0 = 0.5$  としている。)

#### ・ 等方圧密試験, 三軸圧縮試験

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

$$q = |\sigma'_a - \sigma'_r| \quad (4)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_1, \sigma'_r = \sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma'_c \quad (5)$$

#### ・ 平面ひずみ圧縮試験

$$p' = (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) / 3 \quad (6)$$

$$q = (((\sigma'_x - \sigma'_y)^2 + (\sigma'_y - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_x)^2) / 2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\sigma'_x = \sigma'_3 = \sigma'_c, \sigma'_y = \sigma'_2, \sigma'_z = \sigma'_1 \quad (8)$$

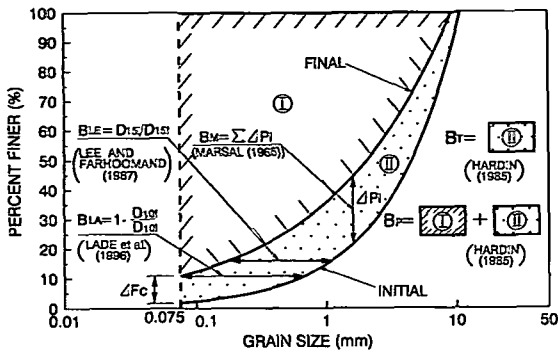


図-5 粒子破碎指標の定義

#### 4. 試験結果と考察

##### (1) 粒子破碎指標

###### a) 従来の研究

せん断による粒子破碎の大きさを量的に表現しようと試みた多くの研究は、①せん断前後の粒度組成の変化(粒径加積曲線の変化)あるいは②せん断前後の粒子表面積(比表面積)の変化を定量化することによっている。

ここで、粒度組成の変化を基本にして提案されている代表的な粒子破碎指標を図-5にまとめて示している。Marsalの破碎率 $B_M$ <sup>4)</sup>は、ふるい分け試験において試料の各残留率のせん断試験前後の変化を求め、それらの値の和をもって表現されている。この値は広く用いられてきたが、その物理的意味は不明確であり、かつ初期の粒度が異なる試料の粒子破碎を比較するのは適当ではないとされている<sup>6), 12), 20)</sup>。また、砂のような粒径の範囲が狭い試料では、1~2種類のふるいで $B_M$ を算出することになるため、その値にはばらつきが生じやすいと指摘されている<sup>9)</sup>。このことは、粗粒材料の大型共通試験の結果からも明らかである<sup>21)</sup>。このように、 $B_M$ の求め方が複雑なわりにはその実用的なメリットが限られているといえよう。

一方、ある単一の粒径の破碎前後の変化や単一のふるいに残留する質量の変化に着目した粒子破碎指標の提案もみられる。たとえば、Lee and Farhoomand<sup>5)</sup>は15%粒径 $D_{15}$ の変化に基づく粒子破碎率 $B_{LE}(=D_{15f}/D_{15i})$ を、Lade et al.<sup>9)</sup>は10%粒径 $D_{10}$ の変化に基づく粒子破碎率 $B_{LA}(=1-D_{10f}/D_{10i})$ を、また三浦ら<sup>14), 15)</sup>は細粒分(75 μm)の変化量 $\Delta F_c(=F_{ef}-F_{ei})$ を採用し、その工学的有用性を議論している。いずれも極めて簡単に求まる量であるが、 $D_{15}$ はフィルダムのドレン材やフィルター材の設計の基準粒径であること、 $D_{10}$ は透水係数の推定に用いられるパラメータであること、また $F_c$ は細粒土分の液状化強度値に及ぼす影響の定量化法

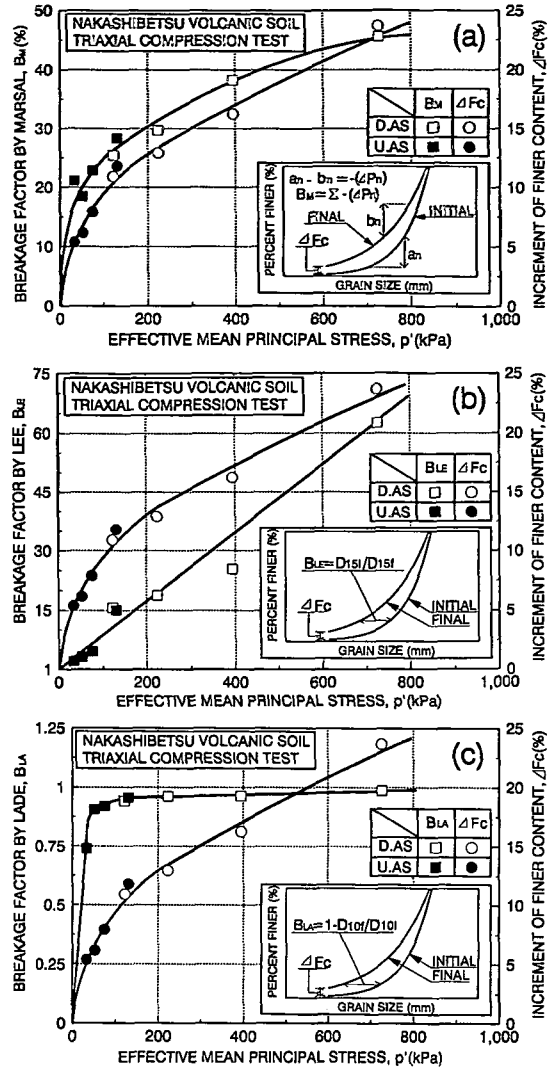


図-6 各粒子破碎指標と有効平均主応力の関係: (a)  $B_M-p$  の関係, (b)  $B_{LE}-p$  関係, (c)  $B_{LA}-p$  関係

等の工学的問題に頻繁に用いられるパラメータであること、などがその採用理由に挙げられている。

図-6は、これらの指標の関連を中標津火山灰土の排水、非排水三軸圧縮試験( $\sigma'_c=49, 98, 196, 392\text{kPa}$ )について示している。いずれの指標値も平均主応力が増えれば確実に増加する傾向を示している。なお、 $B_{LA}$ を除いた他の3つの指標( $B_M, B_{LE}, \Delta F_c$ )は似たような挙動を呈示しているようであり、本火山性粗粒土についてはこれらの指標値間に本質的な差異はないといえよう。

上述した単一粒径のみに基づくパラメータとは異なり、粒度組成の変化を全粒径分布の変化としてとらえ

た粒子破碎指標をHardin<sup>7)</sup>が提案している。彼は図-5に模式的に示すように、75 $\mu$ m(細粒分)を最小粒径とする範囲で破碎前後の粒径加積曲線の面積変化として求められる2つの異なる量 $B_p$ ,  $B_T$ を定義している。これらの値の比 $B_r = B_T / B_p$ に基づいて粒状材料の破碎が論じられている。福本<sup>6)</sup>も指摘しているように、この値のもつ物理的意味は不明であるが、個々の粒径で評価される値であるため測定誤差は小さく安定したパラメータと思われる。

一方、粒子破碎をせん断前後の表面積(あるいは比表面積)の変化としてとらえる研究が、福本<sup>22)</sup>、三浦ら<sup>12)</sup>によって試みられている。福本<sup>22)</sup>は、粒子破碎前後における試料の比表面積の比の対数をもって粒子破碎量 $S.I.$ を定義し、 $S.I.$ と試料粒度の加積通過率との関係を明らかにした。三浦ら<sup>12)</sup>は、“粉碎に要するエネルギーは材料の表面積の増加に正比例する”というRittingerの粉碎則に基づき、高圧下の砂のせん断による粒子破碎量を試料の表面積の増加 $\Delta S$ によって評価した。この表面積の変化 $\Delta S$ と試料に貯えられるエネルギーの増分 $\Delta W$ の比( $\Delta S / \Delta W$ )がせん断下における粒子破碎特性を表す指標として有効であることを明らかにしている。

本研究で対象としているような低圧下で粒子破碎が生じる火山性粗粒土では、比表面積 $S_w$ の増加 $\Delta S_w$ と $\Delta F_c$ がどのような関係にあるか調べてみた。図-7(a)に今回実施した一次元圧密試験および等方圧密試験結果から得た $\Delta F_c$ と $\Delta S_w$ の関係を、図-7(b)には排水三軸圧縮試験から得たその関係を示した。なお、比表面積 $S_w$ とその増加量 $\Delta S_w$ は次式で定義されている<sup>23), 24)</sup>。

$$S_w = (\mu \sum y_i / d_i) / (\rho_s \sum y_i) \quad (9)$$

$$\Delta S_w = S_{wr} - S_{wo} \quad (10)$$

ここで、 $S_w$ : 単位重量当たりの比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )、 $\mu$ : 形状係数、 $\rho_s$ : 土粒子の比重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $y_i$ : あるふるい径間の残留率(%),  $d_i$ : あるふるい径間の算術平均径( $\text{cm}$ )、 $S_{wo}$ : 初期状態の比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )、 $S_{wr}$ : 試験後の比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )である。なお、形状係数 $\mu$ は一般的に用いられる値である6とした。また、比表面積の測定法としては空気透過法などの手法があるが、粗粒土を用いた本研究ではふるい分析による結果により比表面積を算定しているため、計算上の粒子の最小径は5 $\mu$ m(シルト分の最小径)とみなした。

図-7(a), (b)では、支笏降下火山灰(富川, 柏原, 美々火山灰土)と摩周降下火山灰(中標津火山灰土)とで異なる関係(主として粒子の比重の違いによる)にあるものの、試験方法の違いや応力レベルに関わらず圧密と

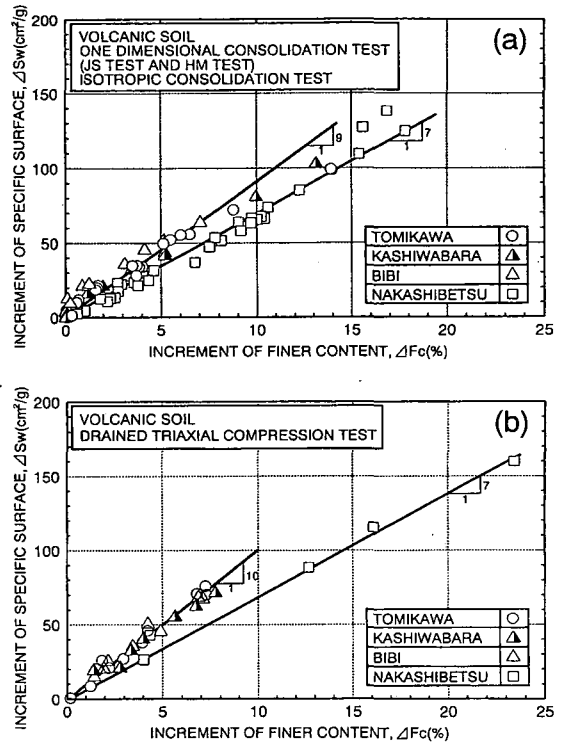


図-7  $\Delta F_c$ と $\Delta S_w$ の関係: (a)一次元圧密試験と等方圧密試験, (b)排水三軸圧縮試験

せん断による $\Delta F_c$ と $\Delta S_w$ はほぼ類似した線形関係にあることが示されている。このことは、石井<sup>20)</sup>が指摘した $\Delta S_w$ が細粒分に対して敏感な指標であるという事実と符合している。

以上から、本研究が対象としているような圧力範囲にある火山性粗粒土の粒子破碎を評価する場合、 $\Delta S_w$ と良好な正の相関性があり、かつ最も簡単に求まりその工学的意味が明確な $\Delta F_c$ も有効な指標として利用できるのではないかと考えた。そこで、以下では $\Delta F_c$ に基づいて火山性粗粒土の粒子破碎を論じていくことにする。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。

#### b) 粒子破碎の形態

写真-1は、対象とした火山灰土のなかで最も粗粒で脆弱な中標津火山灰土について、試験前、等方圧密試験( $\alpha = 392 \text{ kPa}$ )後および排水三軸圧縮試験後の粒子形状の変化を各粒径区分で比較している。巨視的には、試験前は微小空隙を内包するアンギュラーな粒子が多いが、等方圧密およびせん断後は各粒径区分でやや丸みを帯びた粒子が多くなるようである。この傾向は、他の火山灰土や砂<sup>5), 10)</sup>の破碎前後の粒子形状からも認めら





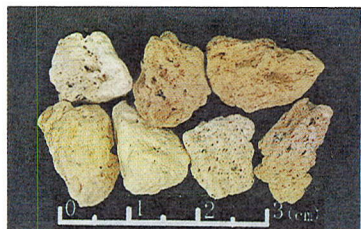
①試験前 全粒径



①等方圧密後 全粒径



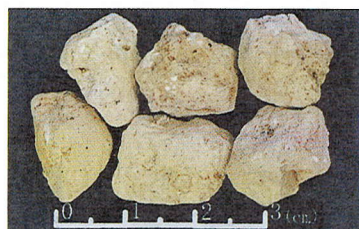
①せん断後 全粒径



②試験前 75%粒径 (約9.5mm)



②等方圧密後 (粒径約9.5mm)



②せん断後 (粒径約9.5mm)



③試験前 50%粒径 (約4.75mm)



③等方圧密後 (粒径約4.75mm)



③せん断後 (粒径約4.75mm)



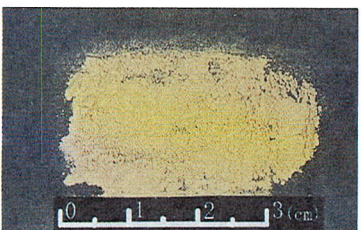
④試験前 25%粒径 (約2.0mm)



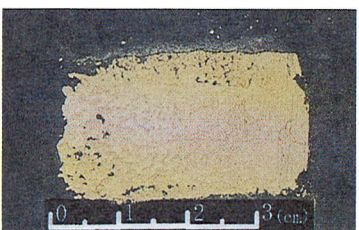
④等方圧密後 (粒径約2.0mm)



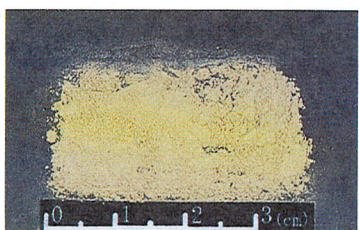
④せん断後 (粒径約2.0mm)



⑤試験前 細粒分 (75 μm以下)



⑤等方圧密後 細粒分 (75 μm以下)



⑤せん断後 細粒分 (75 μm以下)

写真-1 中標津火山灰土の圧密、せん断による粒子形状の変化

表-2 圧密，せん断による細粒分含有率  $\Delta F_c$  の増加

SAMPLE NAME	Consolidation		Shearing	
	$\Delta F_c$ (%)	$p_c$ (kPa)	$\Delta F_c$ (%)	$p'_r$ (kPa)
① TOMIKAWA	0.29	392	9.99	807.39
② KASHIWABARA	0.78	392	7.86	783.73
③ BIBI	0.23	392	7.54	855.52
④ NAKASHIBETSU	2.94	392	23.67	726.86

れるようである。

粒子形状の変化を定量化する方法は過去にいくつか提案されている。例えば、写真-1における粒子(50%粒径)を対象に吉村ら<sup>25)</sup>の凹凸係数  $FU$  を調べてみた。試験前の  $FU$  値は 0.815。等方圧密後では  $FU=0.850$ ，せん断後では  $FU=0.816$  とほとんど差異は認められなかった。それぞれ初期状態の異なる各試験後の粒子形状の変化を直接比較することはかなり困難のようである。粒子破碎によってもたらされる多様な粒子形状を统一的に説明する指標が望まれる。

なお、ここで示されているような  $\Delta F_c$  が圧密・せん断の各過程でどのような発生割合になっているのかを表-2に一例として示した。表には各火山灰土の等方圧密 ( $\sigma'_c=392\text{kPa}$ ) 後とせん断(側圧一定排水三軸圧縮試験)後における  $\Delta F_c$  をそれぞれ圧密時、破壊時の有効平均主応力値とともに示した。いずれの火山灰土も細粒分増加のほとんどがせん断過程においてもたらされていることが理解できよう。

## (2) 一次元圧密による粒子破碎

図-8は、富川、中標津火山灰土について行ったJS試験(いわゆる標準圧密試験)の代表的な  $e-\log \sigma'_v-\Delta F_c$  関係(最終圧密圧力  $\sigma'_v$  は 1254.4kPaである)をプロットしている。図では両火山灰土の圧縮性が明瞭に異なり、中標津火山灰土の圧縮性が極めて高いことが示されている。また、中標津火山灰土の  $e-\log \sigma'_v$  曲線から求めた圧密降伏応力  $\sigma'_{ve}$ <sup>16)</sup> は約 110kPaであるが、圧密圧力がこの降伏応力を越えると  $\Delta F_c$  が急増しているようである。このことから、中標津火山灰土の一次元圧密による粒子破碎はかなり低い圧力レベルから進行するものの、圧密圧力が降伏応力を越えると飛躍的に構成粒子の破碎が進行することがわかる。一方、富川火山灰土では  $e-\log \sigma'_v$  曲線の直線部が明確には現れず、降伏応力は決定されていないが、曲線の変曲点付近から粒子破碎が増加しているように見える。このような事実は、他の材料で、特に高圧下において認められている。

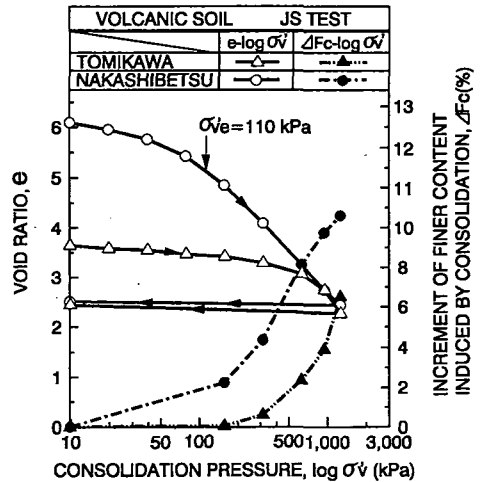


図-8 標準圧密試験における  $e-\log \sigma'_v-\Delta F_c$  関係

例えば、三浦ら<sup>26)</sup>は風化花崗岩などの粗粒材の  $e-\log \sigma'_v$  曲線は折点を有する直線で表され、その折点は粒子破碎に起因する降伏応力(980~2940kPa)であることを示した。鬼塚ら<sup>2)</sup>は、静的に締固めたまさ土に対する圧密試験結果から、圧密降伏応力  $\sigma'_{ve}$  (=150kPa) を境に粒子破碎量が急増する傾向にあることを述べている。また、日下部ら<sup>27)</sup>が求めた不攪乱スコリアの降伏点は 2842~4900kPaの範囲にあり、各火山灰土よりもはるかに高い値を示すようである。

図-9(a)は、各火山灰土のJS試験、HM試験(圧密時間  $t=2, 10, 24\text{hr}$ )での発生軸ひずみ  $\epsilon_a$  と圧密時の有効平均主応力  $p_c$  の関係を示している。この図から圧密時間が 24hr 以内における各火山灰土の  $\epsilon_a-p_c$  関係は、圧密試験法の相違や圧密時間の違いによらない関係にあることがわかる。また、図-8と同様中標津火山灰土の圧縮性は他の火山灰土よりもかなり高いことが示されている。例えば、図-9(a)の中標津火山灰土の  $p_c=418\text{kPa}$  での発生軸ひずみは、他の火山灰土に比べて約 2 倍程度の値となる。図-9(b)では、圧密時間 24hr 以内におけるJS試験とHM試験の  $\Delta F_c-p_c$  関係を示した。ここでも、圧密時間の相違やJS試験とHM試験の載荷方法の差異による  $\Delta F_c$  の変化はほとんど認められず、圧密時の平均主応力に対して一義的な関係となる。また、図-9(a)と同様に富川、柏原火山灰土の  $\Delta F_c-p_c$  関係にはほとんど差がないようである。また、各火山灰土の  $\Delta F_c$  値の大小関係が  $\epsilon_a$  の場合と同様であることから、火山性粗粒土の一次元圧密による粒子破碎は軸ひずみの変化と密接に関連しているものと考えられる。このことは、三浦ら<sup>12)</sup>の示した豊浦砂の高圧下のせん断で生ずる粒子破碎量が軸ひずみの大きさと密接な関係にあるとする事実を支持するものである。

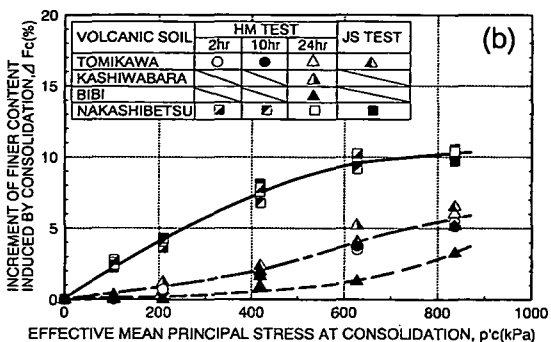
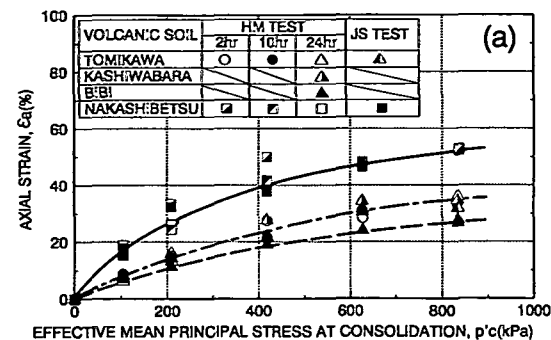


図-9 一次元圧密による発生軸ひずみと細粒分増加量：  
(a)  $\epsilon_a - p'_c$  関係, (b)  $\Delta F_c - p'_c$  関係

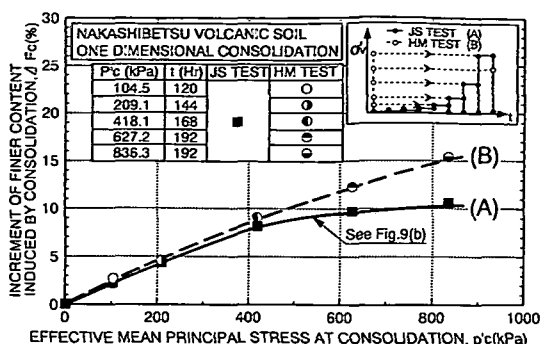


図-10 異なる圧密応力-時間経路での発生  $\Delta F_c$  の比較

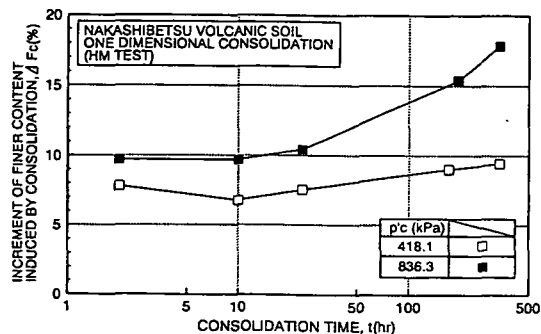


図-11 HM試験による細粒分増加量と圧密時間の関係

以上のように、ある圧密時間での火山灰質粒状体の圧密による粒子破砕量と沈下量が有効平均主応力によって定量的に評価することができる。

図-10は、JS試験による粒子破砕量(A)と、各試験の最終圧密圧力および全圧密時間( $t=120\sim 192$ hr)に対応したHM試験(図-10挿入図参照)の粒子破砕量(B)を比較したものである。図-9(b)では、JS試験による粒子破砕量が同じ圧密圧力でのHM試験(圧密時間24hr以内)結果とほぼ一致することが示された。一方、図-10では $p'_c=400$ kPa付近( $\sigma'_v=600$ kPa)から経路(A)と経路(B)における $\Delta F_c$ に差が生じ、圧密圧力すなわち有効平均主応力が大きくなるほど経路(B)の粒子破砕量が増加することが示されている。この比較は、 $\Delta F_c$ の発生が応力-時間経路の違いによって異なることを表している。なお、図-11ではHM試験で得られた $\Delta F_c$ と圧密時間( $t=2\sim 336$ hr)の関係を示した。図より、中標津火山灰土の一次元圧密過程において特に24hr以降顕著な粒子破砕の時間依存性が認められる。また、粒子破砕量は有効平均主応力が高くなるほど増加する様子が良く理解される。以上のことから、一次元圧密条件での粒子破砕量は与えた最大の圧密圧力と載荷時間によって決定されるものと考えられる。

上述の事実、合理的な粒子破砕現象の力学的評価

や任意の圧密経路下での破砕を伴う地盤の沈下の推定法の構築に一つの手掛かりを与えるように思われる。

次に、JS試験で載荷される圧密圧力よりもさらに高い圧力域での軸ひずみと粒子破砕挙動を調べるため、圧密圧力 $\sigma'_v=1568\sim 2450$ kPaにおけるHM試験を行った。図-12(a)、(b)は、図-9(a)、(b)にこれらの高圧力域で得た軸ひずみおよび粒子破砕量の実測値をプロットしたものである。図-12(b)における中標津火山灰土の $\Delta F_c - p'_c$ 関係では、 $p'_c=900$ kPaを越えた時点で $\Delta F_c$ が飛躍的に増加し、 $p'_c=1000$ kPaにおいて $\Delta F_c$ は約30%となるがそれ以上の圧力において細粒分の増加はほとんど進行していないことが伺える。富川、柏原火山灰土では中標津火山灰土のような急変を示してはいないが、 $p'_c=900$ kPaを越えた時点で $\Delta F_c$ は新たな増加傾向を示し、 $p'_c=1300$ kPaにて収束する傾向にある。また、美々火山灰土の $\Delta F_c$ は緩やかに漸増し、 $p'_c=1300$ kPaにおいても破砕は増加し続けるかのような挙動を示している。一方、図-12(a)に示す各火山灰土の $\epsilon_a - p'_c$ 関係では、 $p'_c=900$ kPa以上の圧力域における軸ひずみ挙動に大きな変化は生じていない。すなわち構成粒子が脆弱な火山灰土では、ある圧力レベルにおいて細粒分の増加量 $\Delta F_c$ が急増しその後 $\Delta F_c$ の増加傾向は収束に至



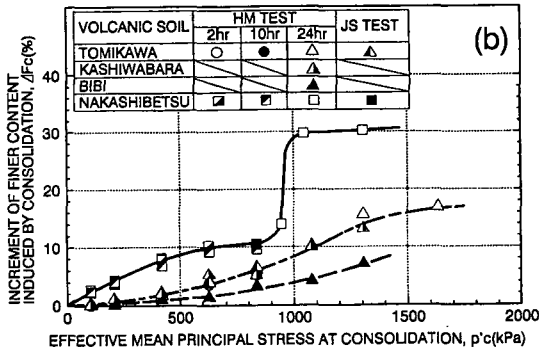
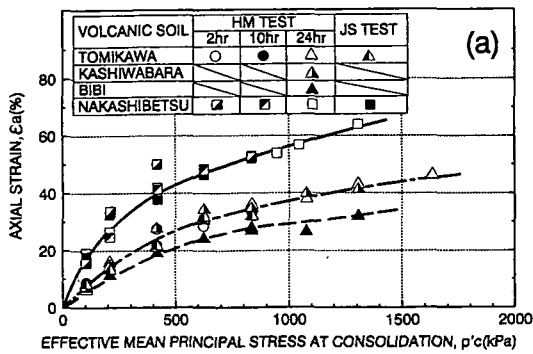


図-12 高圧下の一次元圧密による軸ひずみと細粒分増加量: (a)  $\epsilon_a - p'_c$  関係, (b)  $\Delta F_c - p'_c$  関係

るようであるが、この時発生する軸ひずみの急増はみられない(間隙の大きな変化はない)。このことから、粒子間接点で誘発されるすべりに起因する微小な粒子の破碎や尖ったかどなどの消失がかなり進行していることが予想される。

### (3) 等方圧密による粒子破碎特性

図-13(a), (b)は、圧密時間 2hr および 24hr における等方圧密試験(有効拘束圧  $\sigma'_c = 49, 98, 196, 392 \text{ kPa}$ )で求められた軸ひずみ  $\epsilon_a$ 、細粒分増加量  $\Delta F_c$  と有効平均主応力  $p'_c (= \sigma'_c)$  の関係を示している。これらの図では、一次元圧密の場合と同様に、発生軸ひずみおよび粒子破碎量には圧密時間 24hr 以内でほとんど差異が生じていないことが示されている。また、支笏降下生成物(富川、柏原、美々火山灰土)と比較して、摩周降下生成物(中標津火山灰土)の粒子破碎量が卓越する結果となっている。ここで、一次元圧密過程でもたらされる  $\epsilon_a$ 、 $\Delta F_c$  と比較すると、等方圧密過程でのそれらはかなり小さな値となっていることに注目したい。このような一次元圧密と等方圧密過程で生ずる粒子破碎量の違いは、後述するように両者の圧密過程での応力経路の相違に起因している。

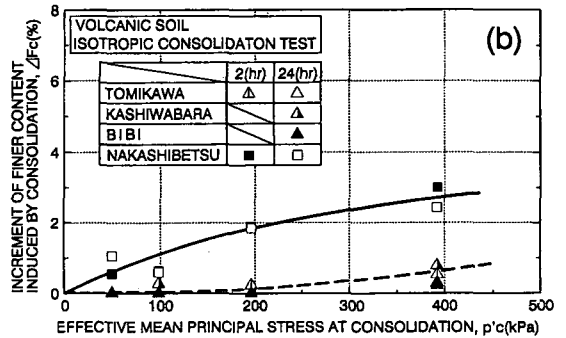
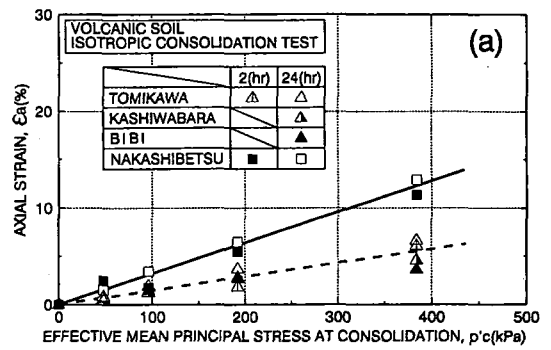


図-13 等方圧密による発生軸ひずみと粒子破碎挙動: (a)  $\epsilon_a - p'_c$  関係, (b)  $\Delta F_c - p'_c$  関係

### (4) せん断による粒子破碎特性

図-14(a), (b)は、排水、非排水三軸圧縮試験(D.A.S, U.A.S試験)および排水、非排水平面ひずみ試験(D.P.S, U.P.S試験)から得た  $\Delta F_c$  と有効平均主応力  $p'_c$  との関係を示している。また図中には、比較のために一次元圧密試験(1-Dと略)と等方圧密試験(ISOと略)によって得られた関係も加筆して示している。なお、各せん断試験では破壊時の有効平均主応力で結果が整理されている。図から明らかなように、応力系や排水条件の違いに関わらず、せん断による  $\Delta F_c - p'_c$  関係は各火山灰土ごとの一義的な関係として表現できることが注目される。また各火山灰土のせん断による  $\Delta F_c - p'_c$  関係を比較すると、圧密試験結果と同様に、極めて脆弱な粒子で構成されている中標津火山灰土で卓越した粒子破碎がもたらされていることがわかる。なお、火山性粗粒土のせん断過程でもたらされる粒子破碎は圧密過程よりもはるかに著しいことも明瞭に示されている。

両図から、せん断中に有効平均主応力の低減する非排水試験での粒子破碎量は、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いこと<sup>14)</sup>が確認される。このことの原因を明確に説明するために、ここでは中標津火山灰土に対する非排水三軸圧縮試験から得られた有効応力経路を図-15に示す。図で明らか

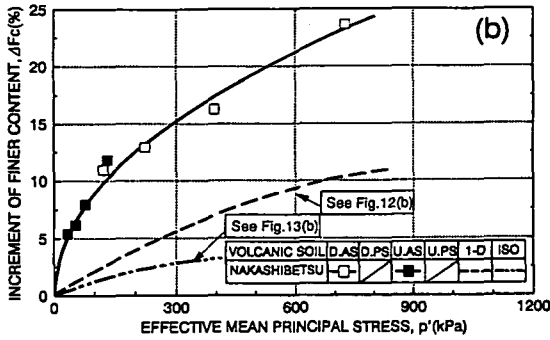
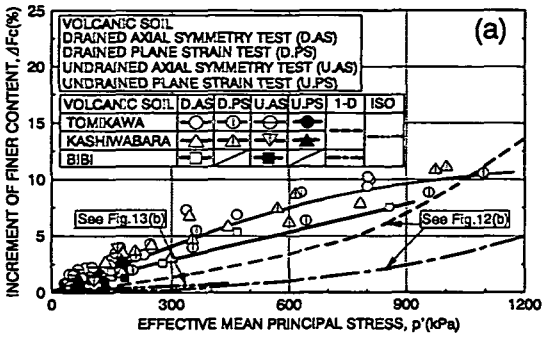


図-14 三軸圧縮，平面ひずみ試験による  $\Delta F_c - p'$  関係：(a) 富川，柏原，美々火山灰土，(b) 中標津火山灰土

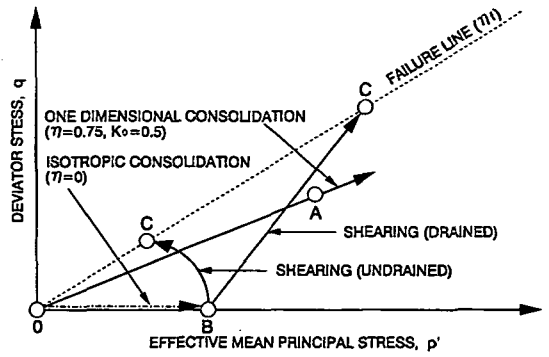


図-15 中標津火山灰土の有効応力経路

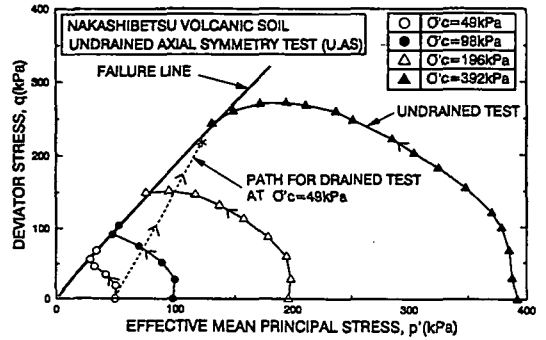


図-16 各試験の応力経路の比較

なように，非排水試験ではせん断開始と同時に著しい過剰間隙水圧が発生し，破壊時の有効平均主応力は初期有効拘束圧よりもはるかに小さな値となっている．なお，図中に比較として描かれている排水条件での  $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$  に対する応力経路(破線で表示)は， $\sigma'_c = 392 \text{ kPa}$  の非排水試験の破壊点に近いところで破壊することを示している．したがって，せん断過程においては両者の試験はほぼ同じ  $\Delta F_c$  を与えることになるが，図-14(b)はこのことを明らかに示す結果となっている．このことより，せん断過程で生ずる粒子破砕量は排水条件よりも非排水条件において確実に少なくなることが容易に理解できる．またこのことは，繰返し非排水せん断過程(液状化に至る過程)でもたらされる粒子破砕が液状化強さに及ぼす影響は無視できるとする実験結果<sup>15)</sup>を支持した結果となっている．

ここで明らかにしてきたことは，火山灰質粒状体の変形-強度-破砕特性の圧密とせん断経路依存性をそれぞれ明確にすることによってその定量化を試みようとするのが工学的に有効であることを示唆している．そのためには，次に述べるように粒子破砕特性に及ぼす応力経路の影響を詳細に評価する必要がある．

#### (5) 粒子破砕特性に及ぼす応力経路の影響

図-16に，各圧密試験とせん断試験における有効応力経路の概略図を示した．一次元圧密試験の経路はO→A，等方圧密およびせん断試験の経路は，それぞれO→B，O→B→Cで表されている．なお，一次元圧密試験では有効平均主応力が作用すると同時にせん断応力が作用し，所定の有効応力比  $\eta (= q/p')$  をもつ経路 ( $K_0 = 0.5$  では  $\eta = 0.75$ ) になるとしている．また，等方圧密試験では  $\eta = 0$  であり，せん断試験の破壊時では  $\eta_r$  となる．したがって，本研究が対象とした各試験では図-16に示すような任意の応力経路を歩むことになるので，それぞれ異なる粒子破砕がもたらされるのは当然である．

以下では，これらの応力経路の違いによる粒子破砕特性の変化について考察する．

各種のせん断試験における破壊時の有効平均主応力  $p'$  とせん断応力  $q_r$  の関係を示したのが図-17(a)，(b)である．なお，図に示した各火山灰土の破壊時軸ひずみ  $\epsilon_{ax}$  の一例(排水・非排水三軸圧縮試験)を表-3に示す．図-17から有効平均主応力  $p' = 49, 98, 196, 392 \text{ kPa}$  について，各火山灰土の破壊時有効応力比  $\eta_r$  を求め，それぞれ  $p'$  をパラメータとした  $\Delta F_c$  と  $\eta$  の関係として整理したのが図-18(a)，(b)，(c)である．図中には，等

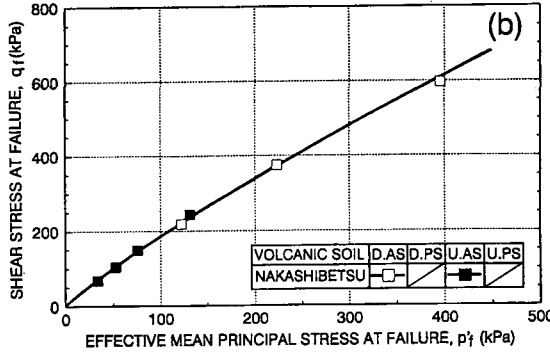
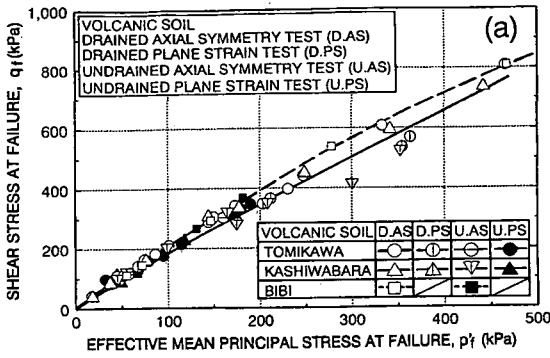


図-17 各せん断試験における破壊時の $q_f-p'_f$ 関係: (a) 富川, 柏原, 美々火山灰土, (b) 中標津火山灰土

表-3 排水・非排水三軸圧縮試験での破壊時軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ (%)  
排水三軸圧縮試験(D.A.S)

$\sigma'_c$ (kPa)	49	98	196	392
① TOMIKAWA	16.6	23.2	28.8	29.7
② KASHIWABARA	14.3	20.1	27.1	23.9
③ BIBI	12.6	18.1	23.3	27.4
④ NAKASHIBETSU	27.1	31.1	32.7	35.0

非排水三軸圧縮試験(U.A.S)

$\sigma'_c$ (kPa)	49	98	196	392
① TOMIKAWA	6.1	5.8	6.4	6.8
② KASHIWABARA	5.6	4.6	6.5	7.6
③ BIBI	7.1	6.0	6.8	6.4
④ NAKASHIBETSU	7.1	7.8	7.6	7.1

方圧密試験および一次元圧密試験の結果も併せて示している。これらの図では、いずれの火山灰土においても有効平均主応力と有効応力比の増加にともなって $\Delta F_c$ が増加する傾向が明解に描かれている。また、図-16に示された各試験時の応力経路の違いが $\Delta F_c$ の発生特性に及ぼす影響を統一的に表している。なお、図-18に示した各火山灰土の $\Delta F_c-p'-\eta$ 関係は、次式によ

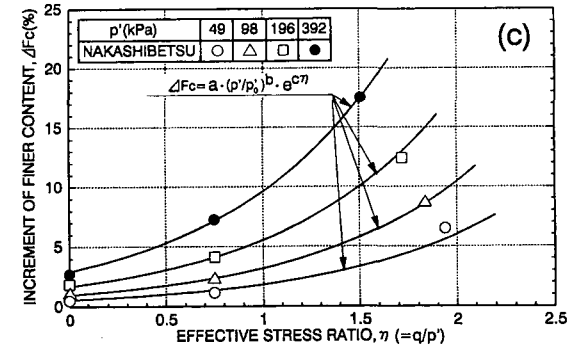
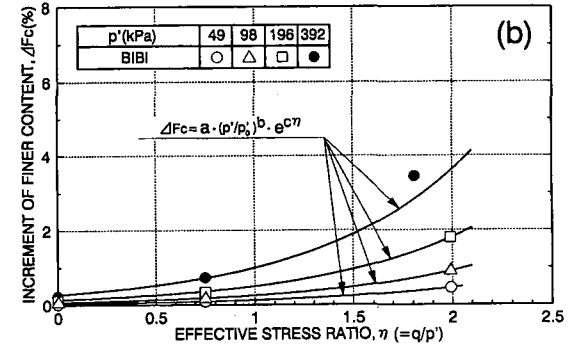
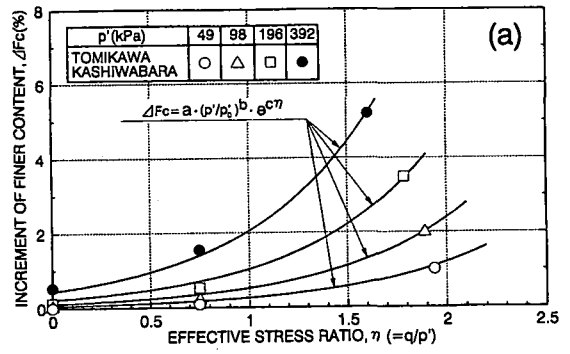


図-18 各火山灰土の $\Delta F_c$ と $\eta$ の関係: (a) 富川, 柏原火山灰土, (b) 美々火山灰土, (c) 中標津火山灰土 (等方圧密:  $\eta=0$ , 一次元圧密:  $\eta=0.75$ , 他は排水・非排水三軸圧縮試験によるデータ)

て表現することができる。

$$\Delta F_c = a \cdot (p'/p'_0)^b \cdot e^{c\eta} \quad (11)$$

ここで、 $p'_0$ は単位圧力(=1kPa)である。また、 $a$ ,  $b$ ,  $c$ は表-4に示す定数であって、それぞれ $a$ は等方圧密( $p'_0$ )での $\Delta F_c$ を、 $b$ は $p'$ 、 $c$ は $\eta$ の貢献度を表現している。

以上のように、圧密過程を有効平均主応力の変化として、またせん断過程を有効応力比の変化としてとらえることにより、火山灰質粒状体の任意の圧密・せん断過程でもたらされる細粒分の増加量 $\Delta F_c$ を定量的に

表-4 各火山灰土の定数

SAMPLE NAME	$a (\times 10^{-3})$	$b$	$c$
① TOMIKAWA	1.12	1.000	1.541
② KASHIWABARA	1.12	1.000	1.541
③ BIBI	0.69	1.000	1.298
④ NAKASHIBETSU	25.10	0.797	1.188

表現できることがわかる。また、圧密で生ずる破砕とせん断でもたらされる破砕とをそれぞれ単純に重ね合わせて評価できることから、火山灰質粒状体が受ける応力経路が与えられれば、粒子破砕量としての  $\Delta F_c$  が推定可能であるということになる。ただし、式(11)では破壊後に進行するような粒子破砕は考慮されていない。

## 5. ま と め

本研究では、北海道各地から採取した火山性粗粒土について一連の圧密、せん断試験を実施し、任意の圧密・せん断過程でもたらされる粒子破砕特性を詳細に調べた。それらの試験結果と考察から、以下の結論が得られた。

- 1) 高压下の地盤材料の場合と同様、一次元圧密過程では圧密圧力の増加にともなって粒子破砕が着実に増加していくが、特に構成粒子が脆弱な火山灰質粒状体では圧密降伏応力を越えると粒子破砕が急増する傾向にある。
- 2) 等方圧密でもたらされる  $\Delta F_c$  は一次元圧密(異方圧密)のそれよりもはるかに少ない。すなわち、圧密経路の違いは異なった粒子破砕を生じさせることを示している。
- 3) 圧密過程で生ずる粒子破砕は24hr以内では圧密時間の違いの影響を受けないようであるが、ある応力レベル以上では明確な時間依存性が見られた。このことから圧密時に生ずる粒子破砕は、高い等方圧力下の砂の挙動と同じように、最大圧密圧力とその載荷時間によって決められると言える。
- 4) 図-12や図-14で示されたように、火山灰質粒状体の圧密およびせん断過程で生ずる細粒分増加量  $\Delta F_c$  は、本研究が対象とした有効拘束圧の範囲( $\sigma'_c = 49 \sim 392 \text{ kPa}$ )においてそれぞれ有効平均主応力と一義的な関係にある。
- 5) 火山灰質粒状体の細粒分増加量  $\Delta F_c$  は、圧密・せん断過程での応力経路に強く依存する。このような  $\Delta F_c$  の応力経路依存性は、有効平均主応力  $p'$  と有効

応力比  $\eta$  のみによる指数関数式によって表わすことができる。

謝辞：本研究では、実験およびデータ整理において室蘭工業大学大学院のフセイン・マウレット(現基礎地盤コンサルタンツ㈱)、中田 隆文、左近 利秋、笠井 隆治、各君の協力を得た。また、室蘭工業大学川村 志麻氏には貴重なご意見を頂いた。末筆ながら、記して深甚なる感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 三浦清一：粒子破砕、粒状体の力学、土質工学会、pp.117-120, 1993.
- 2) 鬼塚克忠、吉武茂樹：破砕性まさ土の低圧条件下におけるせん断特性、土木学会論文集、No.400/III-10, pp.141-150, 1988.
- 3) 岡林巧、兵動正幸、安福規之、村田秀一：乱した一次しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動、土木学会論文集、No.499/III-28, pp.97-106, 1994.
- 4) Marsal, R. J.: Soil properties-shear strength and consolidation, *Proc. 6th Int. Conf., SMFE*, Vol. III, pp.310-316, 1965.
- 5) Lee, K. L. and Farhoomand, I.: Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. IV, No.1, pp.68-86, 1967.
- 6) 福本武明：粒子破砕の程度を示す指標、土と基礎、Vol.29, No.12, pp.64-65, 1981.
- 7) Hardin, B. O.: Crushing of soil particles, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.GT10, pp.1177-1192, 1985.
- 8) Fukumoto, T.: Particle breakage characteristics of granular soils, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, pp.26-40, 1992.
- 9) Lade, P. V., Yamamuro, J. A. and Bopp, P. A.: Significance of particle crushing in granular materials, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.GT4, pp.309-316, 1996.
- 10) 三浦哲彦、山内豊聡：高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について、土木学会論文報告集、No.193, pp.69-79, 1971.
- 11) 三浦哲彦、山内豊聡：高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について、土木学会論文報告集、No.203, pp.45-52, 1972.
- 12) 三浦哲彦、山内豊聡：砂のせん断特性に及ぼす粒子破砕の影響、土木学会論文報告集、No.260, pp.109-118, 1977.
- 13) 田中邦博、安福規之、村田秀一、兵動正幸：カーボネイト砂の力学特性とその砂中の杭の周面摩擦力特性、土木学会論文集、No.523/III-32, pp.99-109, 1995.
- 14) 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砕、土木学会論文集、No.547/III-36, pp.159-170, 1996.
- 15) 三浦清一、八木一善、川村志麻：破砕性粗粒火山灰土の

- 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.
- 16) 土質工学会：土質試験の方法と解説，1990.
- 17) 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.
- 18) Miura, S and Kawamura, K.: A procedure minimizing membrane penetration effects in undrained triaxial test, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.4, pp.119-126, 1996.
- 19) 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, Balkema, A. A.*, pp.329-334, 1994.
- 20) 石井武美：粒子破碎の表示尺度のもつ物理的意義，土質工学会論文報告集，Vol.29，No.4，pp.155-164，1989.
- 21) 粗粒材料の変形と強度，土質工学会，1986.
- 22) 福本武明：締めめたマサ土の密度に関する粒子破碎の影響，土質工学会論文報告集，Vol.12，No.3，pp.55-63，1972.
- 23) 粉体工学ハンドブック，朝倉書店，pp.42-80，1967.
- 24) 北郷繁，神谷光彦：火山灰土の粒子破碎と強度との関係についての実験的研究，第10回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp.181-184，1975.
- 25) 吉村優治，小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法，土木学会論文集，No.463/Ⅲ-22，pp.95-103，1993.
- 26) 三浦哲彦，村田秀一，安福規之，赤司六哉：粗粒材の材料定数と応力ひずみ特性，土と基礎，Vol.33，No.6，pp.13-18，1985.
- 27) 日下部治，前田良刀，大内正敏，萩原敏行：不攪乱スコリアの強度・変形特性と攪乱の影響，土木学会論文集，No.439/Ⅲ-17，pp.69-78，1991.

(1996. 6. 14 受付)

## PARTICLE BREAKAGE OF VOLCANIC COARSE - GRAINED SOILS AND ITS EVALUATION

Seiichi MIURA and Kazuyoshi YAGI

In order to investigate the particle breakage properties of volcanic coarse-grained soils appeared at consolidation and shearing, a series of one-dimensional and isotropic consolidation tests, triaxial compression test and plane strain test were performed on four kinds of Hokkaido volcanic soils. Experimental results showed that there is a unique relationship between increment of finer content  $\Delta F_c$  produced by particle breakage and effective mean principal stress. It was also shown that the particle breakage characteristics of volcanic soils depend strongly on the effective stress path during consolidation and shearing.  $\Delta F_c$  induced in arbitrary stress paths can be estimated only by effective mean principal stress and effective stress ratio.