

三軸圧縮試験による火山角礫岩の強度及び変形特性

吉中龍之進¹・長田昌彦²・五月女敦³・杉山弘泰⁴・浜野久美⁵

¹正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

²正会員 博士(工学) 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

³正会員 工修 電源開発(株) 建設部 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

⁴正会員 工修 電源開発(株) 建設部 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

⁵正会員 修士(工学) 水資源開発公団 徳山ダム建設所 (〒501-0619 岐阜県揖斐郡揖斐川町三輪 2310)

ダブルコアチューブにより採取された比較的乱れの小さい自然状態の火山角礫岩を用いて圧密非排水試験を実施し、力学的性質への礫含有率、供試体寸法および最大礫径の影響を検討した。その結果、礫含有率約40%以下の礫同士との接触が少ない状態において次のような結論を得た。20%以上の礫の混入により内部摩擦角が若干大きくなる傾向にあるが、礫混入の影響は比較的小さい。弾性係数は礫含有率によって大きく変化せず、Reuss の理論式に沿った傾向を示す。供試体寸法の影響は直径30cmまでの供試体では顕著に現われないが、大きな供試体では内部摩擦角が若干低下する傾向にある。また供試体直径と最大礫径の比が1~3程度であっても力学的特性に大きな影響を与えない。

Key Words : volcanic breccia, \overline{CU} test, percentage of clasts, strength and deformability, scale effect

1.はじめに

近年、長大橋や原子力発電所などの大型構造物基礎や多目的ダムなどの対象岩盤として、礫岩を代表とする不均質岩盤が利用されることが多くなっている。特に対象となる礫岩は、礫とマトリックスの力学的性質が大きく異なる場合が多く、その結果として礫岩全体としての強度・変形特性も非常に複雑になると考えられる。しかし礫岩材料はサンプリングの難しさともあわせて乱さない試料を用いて試験することが困難である。それを反映して人工礫混じり岩に関する実験的研究はいくつかあるものの、自然状態の礫岩を対象とした研究例は数少ないのが現状である。

小林ほか^{1)~3)}は人工的に作成した礫混じり軟岩を対象として三軸圧縮試験を実施し、力学的性質に与える礫含有率の影響や破壊基準等について検討しており、次のような結論を導いている。1)ひずみ軟化を示す低応力域での礫混じり軟岩の最大強度はそのマトリックスの強度より低下する。一方ひずみ硬化を示す高応力域では礫含有率に応じてマトリックスより強度が増加する。2)任意の礫含有率に対する強度はマトリックスの最大強度と残留強度および礫含有率から評価できる可能性がある。3)礫含有率40%以下の礫混じり軟岩の応力-ひずみ関係は基本的にマトリックスの変形特性に支配される。4)礫混じり軟岩の小さなひずみ領域での弾性係数は、礫含有率お

よび礫とマトリックスの各弾性係数とその比が支配的であり、それらの値から等価な弾性係数の評価が可能である。5)礫混じり軟岩のマトリックス各部の応力及びひずみ状態は礫の混入により著しく不均質となり、これが力学的性質に大きな影響を与えていることを数値解析により示している。しかしこれらは人工礫岩を用いた場合の結論であって、自然状態の礫岩にそのまま適用できる保証はない。

一方、近年自然状態の礫岩を用いた実験的研究が行われつつあり^{4)~6)}、岡田ほか^{6)~8)}はこれらのデータをもとに礫岩の強度をマトリックスの強度、礫とマトリックスの付着強度と剛性比、礫含有率によって表現しようと試みている。これらの研究のほとんどは一軸圧縮または低拘束圧下での三軸試験結果によるものであって、三軸圧縮条件における礫岩の力学的性質は系統的に調べられていないのが現状である。しかし、礫岩の形成に至るまでの地質学的な環境やその後の変遷を考慮すると、力学的性質の異なる礫とマトリックスの境界付近には上載荷重の変化などに伴って局所的に損傷を与えるほどのひずみが蓄積されている可能性があり、さらにそのような部分が風化などにより脆弱化が進行している可能性も否定できない。このような場合、試料の緩みが大きいと考えられる低拘束圧下における試験結果を用いて力学的性質を調べるだけでなく、三軸圧縮条件下での特性を系統的に調べる必要がある。

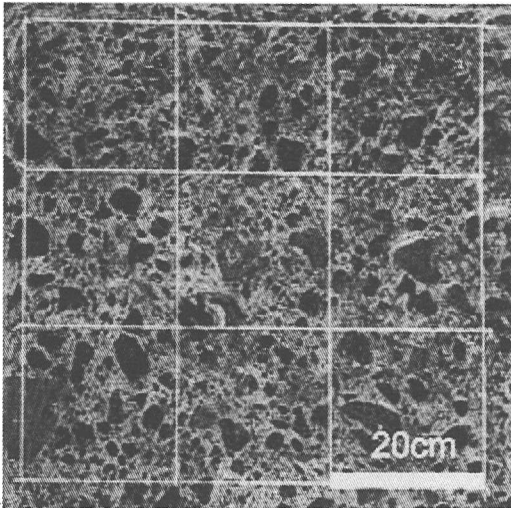


図-1 試験坑壁面における火山角礫岩

本論文では、グリーンタフ地域に属する地層から比較的乱れの小さい状態で自然状態の火山角礫岩を採取できたので、これを供試体として圧密非排水試験を実施し、先述した人工礫岩に対する結論が成り立つかどうか検討する。また直径 30cm までの寸法の異なる供試体を用いて実施した試験結果を比較検討することにより、火山角礫岩の強度・変形特性に与える供試体寸法と最大礫径の影響についても考察する。

2. 試料と試験方法

(1) 乱れの小さい試料のサンプリング

対象とした地層は東北地方のグリーンタフ地域に分布する新第三紀中新世後期の火山岩および火山砕屑岩 (7~13Ma) であり、下位から安山岩質溶岩、自破碎溶岩と考えられる火山角礫岩、および凝灰岩が一つの堆積ユニットを形成し、4つの堆積ユニットで一つの累層を構成している⁹⁾。

図-1はこの地層の中に掘削された試験坑壁面における火山角礫岩の写真である。写真の中で黒い部分が安山岩質溶岩の岩片から成る礫であり、その他の部分は凝灰岩質である。溶岩の一軸圧縮強度はおよそ 60MPa 前後であるのに対して凝灰岩では 10MPa 以下であり、ここで用いる火山角礫岩は強度の大きい溶岩岩片を礫として含み、マトリックスが軟質な凝灰岩である二相混合材料としてモデル化できると考えられる。

このように強度差のある複合地盤ではボーリングによるサンプリングが困難な場合が多い。本研究では試料採取時において比較的乱れの小さい¹⁰⁾とされるダブルチューブコアバレルを用いてサンプリングを実施し、直径は

そのまま供試体を作製した。またサンプリング時の掘削長は坑道床面から鉛直に 1m または 2m とし、コアドリルの固定には十分注意を払って試料の乱れを最小限に抑えている。なお試験坑は地下水面下に位置している。

火山角礫岩試料は、4つの堆積ユニットのうち上位2つの堆積ユニットから採取した。ここでは下位に位置する堆積ユニットから順にそれぞれ A 層、B 層と呼ぶこととする。A 層はボーリングの採取深度によって礫含有率が異なるのに対して、B 層は比較的礫含有率の変動が少ない。そこで A 層から採取した供試体は礫含有率の影響を調べるために、一方 B 層からの供試体は寸法効果を調べるために用いることとした。

また火山角礫岩を二相混合材料として評価するためには、構成要素である溶岩と凝灰岩の特性も合わせて詳細に調べる必要があるが、火山角礫岩中の礫およびマトリックスからはこれらの供試体を確保することができない。そこで火山角礫岩至近の溶岩と凝灰岩を同様なサンプリング方法で採取することにより、火山角礫岩中の礫とマトリックスと成因が等しく、類似した物性をもつ材料が得られるものと考えて、これらを構成要素の供試体とした。

(2) 供試体の作製

円柱供試体の寸法比は圧裂引張試験で直径 1 : 高さ 1 とし、圧縮試験では 1 : 2 とした。溶岩と凝灰岩は比較的均質であるため、供試体直径(D_0)を 5cm のみとした。一方、火山角礫岩は A 層から $D_0=5\text{cm}$ と 10cm の供試体を準備し、B 層からは $D_0=10\text{cm}$, 20cm, 30cm の供試体を準備した。供試体の端面は各供試体寸法に合わせて切断したままであるが、端面の平行度を確保するためおよび端面の抜け落ちをできる限りなくすために、供試体は試料回転クランプ内にセットし、試料を回転させながらダイヤモンドブレードカッターを用いて切断した。供試体は水浸させて真空状態で一日以上脱気したあと試験に用いた。

(3) 試料の物理的性質

溶岩、凝灰岩および火山角礫岩のマトリックスの物理的性質を表-1に示す。A 層および B 層の火山角礫岩のマトリックスの組成は若干異なっており、物性の違いは供試体整形時に特に顕著に現われた。すなわち A 層のマトリックスはパミスを多く含む凝灰質であり、容易に整形可能である。一方 B 層は砂質あるいはシルト質で、整形に際してマトリックスの脱落が顕著であった。凝灰岩は A 層の火山角礫岩と一連の地層であるため、凝灰岩の見かけは A 層のマトリックスと肉眼的にはほぼ同一のものと判断されるが、B 層のマトリックスとは明らかに異なっている。

表-1 試料の物理的性質

岩石名	岩石実質部分の密度 ρ_s (g/cm ³)	間隙率 n (%)	湿潤密度 ρ_w (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	吸水率 Q (%)
溶岩	2.711	18.3	2.352	2.216	6.2
凝灰岩	2.598	37.3	1.980	1.630	21.5
A層マトリックス	2.607	46.6	1.917	1.373	37.6
B層マトリックス	2.603	33.9	2.127	1.723	23.6

表-2 試験項目と試験条件

岩石の種類	試験の種類	供試体寸法 D_0 (cm)/ H_0 (cm)	負荷拘束圧 (MPa)	ひずみ計測法	備考
溶岩	圧裂引張試験	5/5			礫率 100%として取り扱う。 500kN ロードセル使用。
	一軸圧縮試験(UU)	5/10	0	外部変位計	
	三軸圧縮試験(CU)		0.5,1,2,4	LDT HST	
凝灰岩	圧裂引張試験	5/5			マトリックス 100%として取り扱う。 ただし参考値。
	一軸圧縮試験(UU)	5/10	0	外部変位計	
	三軸圧縮試験(CU)		0.5,1,2,4	LDT HST	
火山角礫岩 A層	圧裂引張試験	5/5,9.5/9.5			礫率 7.4%~49.8%の範囲。 一部の試験で拘束圧を 3.5MPa と している。
	一軸圧縮試験(UU)	5/10	0	外部変位計	
	三軸圧縮試験(CU)	9.5/20	0.5,1,2,4	LDT HST	
火山角礫岩 B層	圧裂引張試験	9.5/9.5			礫率 17.8%~38.2%の範囲。 20/30cm 供試体ではゴムスリーブ を使用(HST なし), また拘束圧 4MPa の試験は行っていない。
	一軸圧縮試験(UU)	9.5/20	0	外部変位計	
	三軸圧縮試験(CU)	20/40 30/60	0.5,1,2,4	LDT HST	

背圧はすべての圧縮試験で0.3MPaを負荷。

(4)試験項目と試験条件

試験項目と試験条件の一覧を表-2 に示す。供試体直径 20 および 30cm 供試体 (以後、「大型供試体」と呼ぶ) に対する試験条件はそれ以外のものと一部異なる。ここでは供試体直径 5 および 10cm (実際には 9.5cm であるが、以後「10cm 供試体」と呼ぶ) の試験方法を示し、大型供試体については 5 章「寸法の影響」において試験仕様の違いを述べることにする。

一軸圧縮試験では試料のサンプリング除荷に伴う緩みを考慮して、初期地圧状態に相当する等方圧 (0.3MPa) を載荷し圧密した後、この等方圧を除荷してから非排水状態 (UU試験相当と解釈する) でせん断した¹¹⁾。三軸圧縮試験では初期有効拘束圧を 0.5, 1, 2, 4MPa の 4 段階として、圧密非排水試験(CU試験)を実施した。背圧はすべての圧縮試験で 0.3MPa とした。

載荷には汎用載荷装置 (最大荷重 500kN ; ロードセル 50kN) を用い、軸ひずみが外部変位計で約 5%に達するところまで載荷した。すべての試験において載荷速度は外部変位計で 0.02%/min. とした。各試験条件において供試体数は 3 本を基本とした。ひずみの計測は、ピストンの変位を差動トランス型変位計を用いて計測したほか、局所変形測定装置である LDT¹²⁾と新たに開発した熱収縮チューブを利用した計測方法 (HST 法¹³⁾) を用いて局所

変形における縦横ひずみの計測を実現している。Hoque ほか¹⁴⁾に従い、LDT の長さは使用する供試体高さによって変えている。なお、LDT は熱収縮チューブのうえに接着剤を用いて固定している。

各供試体に対して圧縮試験前にエコーチップ反撥硬度試験と超音波速度測定を実施した。エコーチップ反撥硬度試験機は金属の硬度計測用に開発されたが、岩石にも適用されている¹⁵⁻¹⁷⁾。計測原理は次のように非常に簡単である。球形のテストチップを岩石表面に衝突させ、その初速度と反撥速度を計測し、エコーチップ値 (以後、「L 値」と呼ぶ) に換算する。この値は幅広い範囲の硬度に対して測定できるので、硬度差のある岩石間の比較をするにはよい指標となる。ここでは火山角礫岩中の礫とマトリックスの硬度を比較するのに都合がよい。そこでエコーチップ試験機にインパクトエネルギー 11Nmm の D 型インパクト装置を装着して、火山角礫岩供試体中の礫とマトリックスを場所を変えてそれぞれ 12 回ずつ計測した。超音波速度は 63kHz の P 波振動子と、33kHz の S 波振動子を用いて計測した。得られた P 波 S 波速度から弾性定数が求められる。このようにして求めた弾性係数を動的弾性係数(E_d)、ポアソン比を動的ポアソン比(ν_d) と呼ぶことにする。

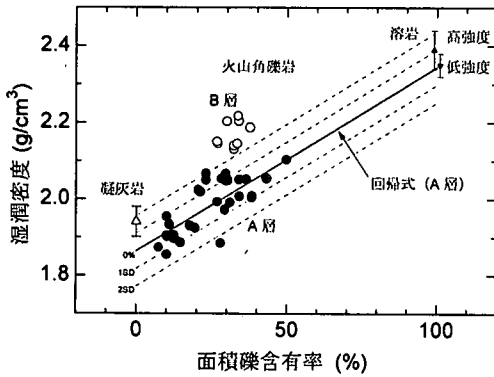


図-2 面積礫含有率と湿潤密度との関係

3. 礫含有率の評価と試料の基本的物性のパラツキ

(1) 礫含有率の評価

土質材料のように試料をふるい分けして粒度分布を把握することが困難であるため、自然状態の礫岩中の礫の体積含有率(これを「体積礫含有率」と呼ぶこととする)を求めることは容易ではない。そこで礫岩中の体積礫含有率は露頭や試料表面における礫の面積占有(これを「面積礫含有率」と呼ぶこととする)から推定することが一般的に行われている。

推定値の精度については、次の2つの評価方法が用いられている。一つは既知の体積礫含有率を有する領域内に切断面を設定し、その面上に現われる面積礫含有率と設定した体積礫含有率との差をバラツキとして表わしたもので、平均値と標準偏差(または変動係数)によって表わされる。もう一つは、ある領域内に含まれる体積礫含有率とその領域表面上の面積礫含有率との差をバラツキとして表わしたものである。前者の例として、小林・吉中¹⁾は礫径を一定とした数値シミュレーションから、2次元断面における面積礫含有率は礫径が供試体直径の1/10以下の場合、変動係数が20%程度の精度で体積礫含有率を推定でき、また礫径が供試体直径の1/5以下の場合30%程度であることを報告している。一方後者の例として、高橋ほか¹⁰⁾は実際のボーリングコアから作成した円柱供試体周面における面積礫含有率と粒度試験によって得られた体積礫含有率との比較を試みている。また和田ほか¹⁰⁾は人工礫岩供試体の展開写真を画像解析することにより推定値のバラツキに与える面積礫含有率の影響と礫径の影響を調べている。これらの結果から、単一粒径の場合、面積礫含有率は体積礫含有率が小さいほどバラツキが大きくなり、また同じ体積礫含有率では粒径が大きいときほどバラツキが大きいことがわかっている。

これらの研究例は単一粒径に対する結果であるが、Saotomeほか⁹⁾はここで報告する地層を対象として、試験

坑内の壁面から2次元な粒度分布を調べ、混合粒径の影響を考慮した評価を行っている。本研究ではこれとは別途に混合粒径からなる供試体周面における面積礫含有率と湿潤密度の関係から、体積礫含有率の推定精度を検討する。礫岩が礫とマトリックスから成る二相混合材料としてモデル化でき、礫とマトリックスのそれぞれの湿潤密度が一定であると仮定すると、体積礫含有率は火山角礫岩の密度に比例する。10cm供試体を用いた場合のこの関係を図-2に示す。一般に礫は2mm以上のものを指すが、供試体周面における2mm以上の礫を手作業で抽出することには多大な労力を要する。均等係数が10程度より小さい場合、供試体直径の1/5程度の礫径であれば粒度の影響は大きくないとされている²⁰⁾ので、5cm供試体に対しては1cm以下の粒度のものの影響は比較的小さいと考えられる。そこでここでは供試体周面に沿う礫の最大長さが1cm以上の粒子を礫として抽出することとした。

以後すべての供試体においてこの基準で礫を抽出する。図中には火山角礫岩(A層・B層)の湿潤密度と、端成分にあたる溶岩と凝灰岩の平均値と標準偏差を合わせて示してある。溶岩の値は後述するように、強度の高いグループと低いグループに分けて計算した結果である。図から面積礫含有率と湿潤密度はバラツキは大きいものの線形関係にあること、また最小二乗法で求めた面積礫含有率と湿潤密度の近似式を外挿した実線は溶岩のうち強度の低いグループの平均値とほぼ一致するが、凝灰岩の値よりはかなり小さな値となっていることがわかる。近似式を外挿した線が強度の低いグループの平均値とほぼ一致する理由は、礫のなかには溶岩に比べてクラックが多く発達しており⁹⁾、その分湿潤密度が小さくなっているためと考えられるが、今後確認を要する。またこの仮定のもとでは湿潤密度が真の体積礫含有率を与えるので、説明変量を湿潤密度、目的変量を面積礫含有率として単回帰分析を行うと、残差の標準偏差(SD)は7.44%、相関係数は0.78であった。図中の破線でこの残差の1SDと2SDを示した。これより面積礫含有率のバラツキは±15%程度であり、この精度で面積礫含有率はこの火山角礫岩の体積礫含有率を表現できると考えられる。本研究では特に断わらない限り、供試体周面における面積礫含有率を「礫率」と呼ぶことにする。

なお、B層の湿潤密度はA層に比べて明らかに大きな値を示しており、礫率の分布範囲が狭い。これは、B層マトリックスを構成する粒子に安山岩片を多く含み⁹⁾、礫の分布が均質であることに対応している。

(2) 試料物性のバラツキ

対象とした地層は層状に堆積しており、採取位置によって試料の物性が異なることが考えられる。火山角礫岩の力学的性質への礫率の影響を評価するうえでは、試験した供試体がある程度均質であると判断して良いかを確

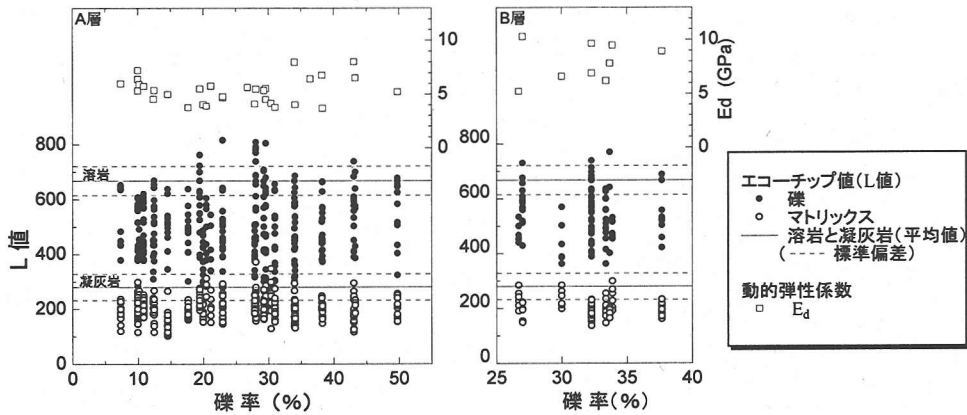


図-3 エコーチップ値(L値)および動的弾性係数と礫率の関係

認しておく必要がある。そこで試料物性値のバラツキを調べるために、各供試体についてエコーチップ値と超音波速度測定結果を比較することとした。

図-3 に各供試体から得られたL値と E_d を礫率で整理した結果を示す。図には、溶岩供試体及び凝灰岩供試体から得られたL値の平均値と標準偏差も合わせて示してある。図より全体として、L値はA層、B層ともに同じ程度の大きさとバラツキをもっており、採取位置によらずほぼ同様の物性を持っていることがわかる。 E_d は礫率によって系統的に変化していないが、A層よりもB層の方が若干大きい値を示していることがわかる。

細かく見ると、火山角礫岩中の礫のL値は溶岩の試験結果をほぼ上限として、A層では300~700の間に、B層では350~700の間に広く分布している。このようにL値の分布範囲が広がる要因はいくつか考えられる。一つは礫種の違いを反映していることであるが、火山角礫岩中に含まれる礫は見かけ上若干異なる様相を呈するものもあるが、ほとんどの礫は安山岩であることを考えると礫の組成による違いとは考えにくい。その他には、L値はテストチップが衝突する試料表面だけでなく、その背後の物性も合わせて表現している値であることが挙げられる。このことは Verwaal and Mulder¹⁹⁾の研究より、試料の厚さが変わることによってL値も系統的に変化することからも明らかである。今回の試料のように、礫の組成がほぼ同じであっても、礫が発泡した構造を持つ場合や礫自身に顕著な割れ目が含まれている場合、さらに礫がL値の小さいマトリックスに取り囲まれているような場合には、どの部分を打撃するかによってL値が小さく評価されることは十分に考えられる。従って、上述のように礫の値が溶岩の平均値をほぼ上限としてそれより小さい値を示していることは、溶岩と火山角礫岩中の礫は元々はほぼ同程度の物性を持っていたと解釈され、礫の物性値をほぼ溶岩の物性値で表現してもよいと考えられる。

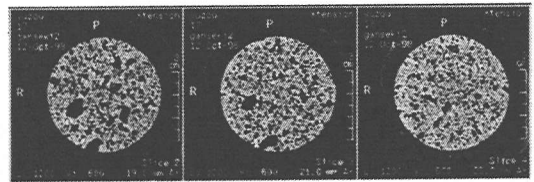


図-4 溶岩のX線CT画像(熊本大学尾原祐三氏撮影)

一方、火山角礫岩中のマトリックスのL値は、A層では肉眼的にはほぼ同一組成に見える凝灰岩の値を上限として、100~300の間に分布している。B層でも100~300の間に分布しているが、マトリックスの組成がA層とB層で異なっているため直接比較することはできない。A層のL値の分布に対する解釈は礫の場合と同じようには当てはめられない。仮に凝灰岩とマトリックスの物性がほぼ同じであるとすると、マトリックスの周辺にはL値の大きな礫が存在しているの、少なくとも凝灰岩の平均値以上に値が分布するはずだからである。図-2 から火山角礫岩の礫率 0%の湿潤密度が凝灰岩の湿潤密度より小さい値を示していることも考慮すると、組成上は良く似ているものの硬度からはマトリックスの方が弱く、表-1 において空隙比が大きいことに対応していると推定される。従ってここで用いた凝灰岩の物性値でマトリックスの物性値を表現することには無理があると考えられる。凝灰岩の試験結果はあくまでも参考値として考慮することにする。

4. 礫率の影響

火山角礫岩の力学的性質を礫とマトリックスから成る二相混合材料として評価することを目的として、はじめに安山岩質溶岩を礫、凝灰岩をマトリックスとモデル化

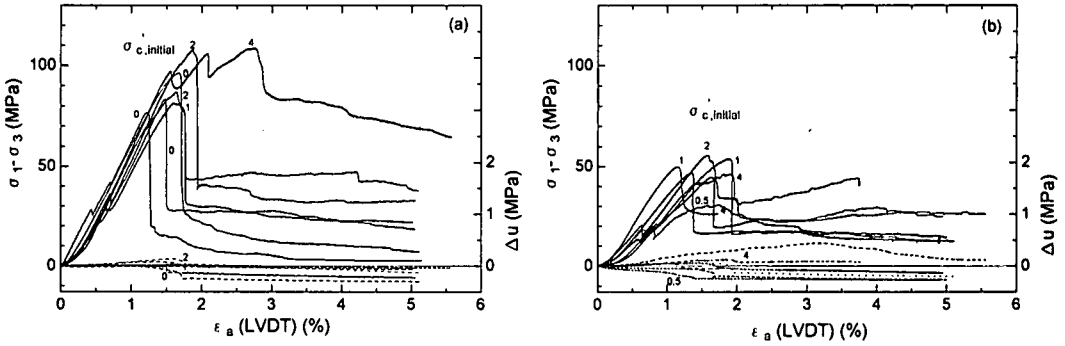


図-5 溶岩の応力・間隙水圧-ひずみ関係 (a)高い強度を示すグループ. (b)低い強度を示すグループ.

してそれぞれの物性を記載し、その後で対象とする火山角礫岩における礫率の影響について検討する。

(1) 礫とマトリックスの物性

a) 溶岩の力学的性質

ここで用いた溶岩の供試体サイズでの構造的な特徴は、マグマが固化する際に揮発性成分が分離することによって形成された発泡構造が顕著に見られることである。小さなものはほぼ円形断面の間隙であると考えればよいが、大きいものは直径 1cm 程度の楕円形であり、溶岩層に平行に扁平な形となっているものが多い。したがって全体としては溶岩の力学的性質に異方性等の影響をもたらす可能性もある。

図-4 に溶岩の X 線 CT 画像を示す。図は 5cm 供試体を円柱軸方向に 2mm ずつ高さを変えて順に撮影したものである。X 線 CT 画像は密度差を反映して濃淡が描かれるので、図では黒い部分が間隙を示している。左の図では 3 つの大きな間隙が存在するが、中央の図ではそのうち 1 つが消え、右の図では 3 つとも消滅していることがわかる。溶岩にはこのような発泡構造が多数観察され、これらはほとんど連結していない間隙となっている。試みに溶岩の透水係数を計測したが、透水係数は使用した透水試験装置の計測限界である 10^{-11} cm/s 以下であった。

溶岩の応力-ひずみ関係を図-5 に示す。溶岩は強度と弾性係数から、強度の高いグループ(図-5a)と低いグループ(図-5b)に分類される。しかし肉眼的には全く区別がつかない。応力-ひずみ曲線の特徴は、軸差応力が強度の高いグループで 30~40MPa、強度の低いグループで 10~20MPa の辺りで、一度低下することである。これは破壊後供試体の観察から、先に示した比較的大きく扁平な間隙が圧碎することが原因と考えられる。強度の違いで二つのグループに分かれる要因についても、供試体内に内包されるこのような間隙の分布が影響していると考えられる。その根拠は、図-2 に示したように、強度の高いグループと低いグループに分けて湿潤密度を計算すると、強度の高い方が大きな湿潤密度を有していることである。

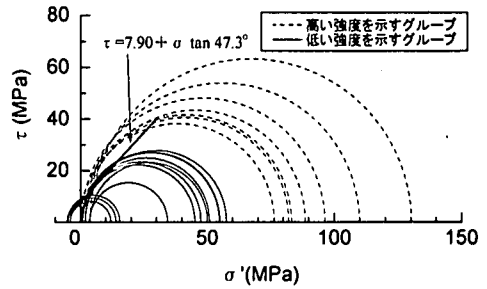


図-6 溶岩に対する破壊時のモール円 (有効応力表示)

安山岩そのものの密度は大きくは変化しないとすると、ここでの湿潤密度の差異は間隙率の違いによるものと考えられる。すなわち強度の小さい供試体の方が間隙率が大きいと推定される。火山角礫岩の礫率 100% のときの湿潤密度がこの強度が低いグループの平均値とほぼ等しいことを考えると、礫率の影響を二相混合材料として扱うときには強度の小さい方のグループの物性値で代表させた方がよさそうである。間隙水圧は破壊付近で減少することが確認できるが、絶対値としてはほとんど計測されていない。火山角礫岩中の礫は、このような大きな発泡構造を含んでいてもその配列方向はランダムなので、供試体全体として礫の力学的異方性的影響はさほど大きくないものと考えられる。

図-6 に有効応力表示による破壊時のモール円を示す。ここでは強度の低いグループと圧裂引張試験結果を用い、モール・クーロンの破壊基準を仮定して c' 、 ϕ' を求めている。これは強度の高いグループはこの破壊基準よりも大きな応力状態に耐えることができるので、すべてのデータを用いた場合よりも安全側の評価となるためである。 c' 、 ϕ' の値は後述する凝灰岩や火山角礫岩の値よりも著しく大きい。すなわち火山角礫岩が破壊するときの応力状態では、岩石内部の応力集中などを考慮しても礫には破壊が生じない場合が多いことが推定される。

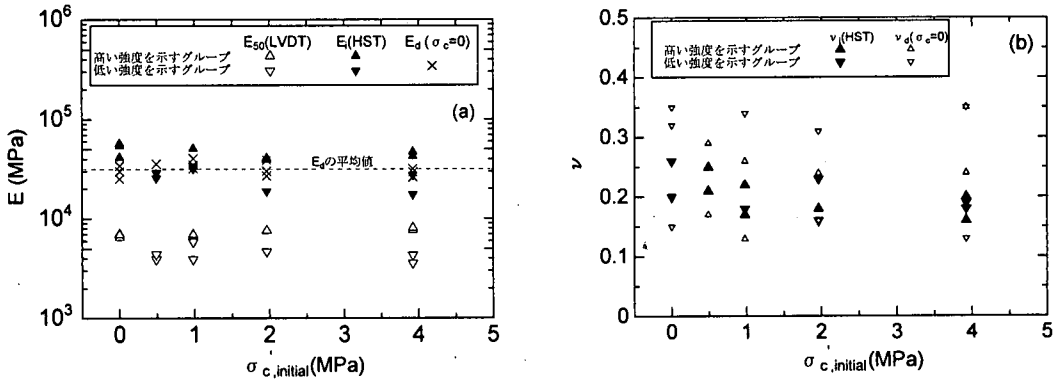


図-7 溶岩の変形特性。(a)弾性係数, (b)ポアソン比

表-3 供試体の平均的な力学的物性値 (平均値±標準偏差)

岩石名	E_{50} (GPa)	E_i (LDT) (GPa)	E_i (HST) (GPa)	E_d (GPa)	ν_i (HST)	ν_d	c' (MPa)	ϕ' ($^{\circ}$)
溶岩								
高強度	7.3 ± 0.5	60.0 ± 27.1	46.8 ± 6.7	31.1 ± 4.3	0.21 ± 0.04	0.26 ± 0.10		
低強度	4.7 ± 1.1	36.1 ± 24.4	26.1 ± 5.8	34.4 ± 7.7	0.19 ± 0.04	0.24 ± 0.07	7.90	47.3
凝灰岩								
0MPa	1.10 ± 0.08	4.39 ± 2.10	3.95 ± 0.65	8.2 ± 2.0	0.25 ± 0.11	0.15 ± 0.09	1.88	23.7
0.5MPa	1.23 ± 0.24	7.78 ± 4.31	3.40 ± 0.32	10.3 ± 2.3	0.19 ± 0.04	0.14 ± 0.08		
1MPa	1.16 ± 0.17	6.52 ± 3.10	3.98 ± 0.65	8.7 ± 4.0	0.23 ± 0.10	0.24 ± 0.07		
2MPa	1.36 ± 0.13	5.16 ± 1.68	3.90 ± 0.60	7.5 ± 2.6	0.14 ± 0.02	0.33 ± 0.10		
4MPa	1.35 ± 0.32	4.52 ± 0.82	4.48 ± 0.28	10.1 ± 1.2	0.19 ± 0.02	0.16 ± 0.16		

図-7 はひずみ計測方法ごとにまとめた弾性係数とポアソン比への拘束圧の影響を示しているが、適用した拘束圧領域ではほとんど影響しないことがわかる。また高い強度のグループの弾性係数は低い強度のグループの弾性係数よりも明らかに高い値を示すが、ポアソン比は系統的な変化を示さない。なお、LDTによる計測も実施したが、バラツキが大きかったため掲載していない。溶岩の平均的な力学的物性値を表-3に示す。ここで E_{50} は応力-ひずみ曲線の直線部の値を、また E_i と ν_i は局所計測結果をもとに 10^{-4} のひずみレベルまでの値を最小二乗法により近似した弾性係数とポアソン比である。凝灰岩および火山角礫岩についても同様の方法で E_{50} 、 E_i と ν_i を求めている。同表に示した凝灰岩に対する物性値も含めて、 E_i (LDT) に対する標準偏差は他の計測方法と比べて明らかに大きく、本研究で用いたチューブ上での計測ではLDTの接着方法など今後改良が必要であると考えられる。

b)凝灰岩の力学的性質

図-8 に外部変位計による凝灰岩の代表的な応力-ひずみ関係を示す。低拘束圧の領域ではひずみ軟化を示し、拘束圧が増加するにつれ徐々に応力降下量が少なくなることが特徴である。破壊応力は最大軸差応力とし、残留強度は外部変位計による軸ひずみが4%のときの軸差応力とした。破壊応力は図-9に示した最大せん断応力と平

均有効応力との関係から読み取れるように、拘束圧の増大に伴い増加する。また残留強度も平均有効応力に対して直線的に増加しており、一軸圧縮強度にほぼ等しい平均有効応力6MPa付近(点A)で破壊線と交わっている。

今回の試験では、ひずみ計測方法としてHST法を用いている。すなわち供試体には、熱収縮チューブが巻き付けられているため、破壊強度を求める際には特に問題とならないが¹³⁾、ひずみが大きくなるとチューブの拘束圧力が大きくなるため、特に残留強度の評価には注意が必要である。これは破壊強度までのひずみ挙動を求めるためにある程度犠牲にしてきた部分であるが、ここではその影響を検討することとする。チューブの拘束効果はひずみの大きさに比例して大きくなり、負荷した拘束圧には依存しないと考えられる。残留強度を決定したときのチューブ上の局所計測による縦横ひずみはともに2%程度(= ϵ_{θ})である。この値を用いてチューブの拘束圧力を概算すると、チューブに軸応力が作用しない場合次のように0.64MPa程度であると推定される。

$$\rho = \left(\frac{h}{r}\right) E_T \epsilon_{\theta}^T = \left(\frac{0.05[\text{cm}]}{2.5[\text{cm}]}\right) \times 1.6[\text{GPa}] \times 0.02 \quad (1)$$

$$\cong 0.64[\text{MPa}]$$

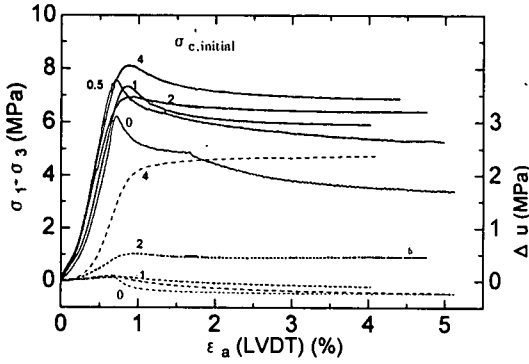


図-8 凝灰岩の代表的な応力・間隙水圧-ひずみ関係

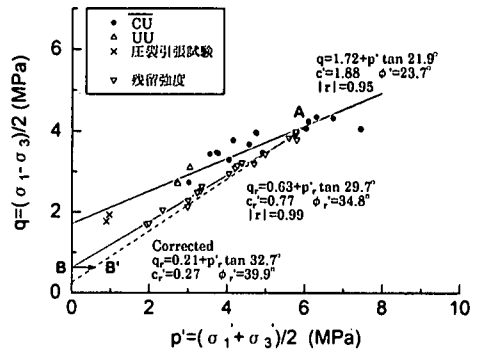


図-9 凝灰岩の p'-q 関係 (破壊時および残留状態)

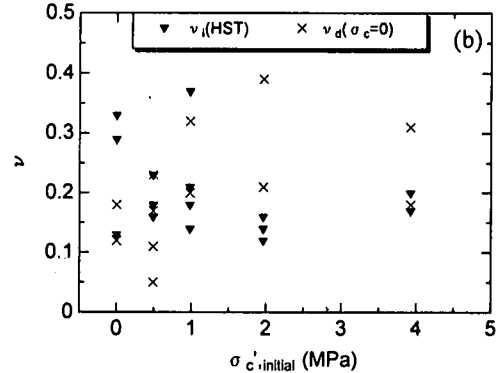
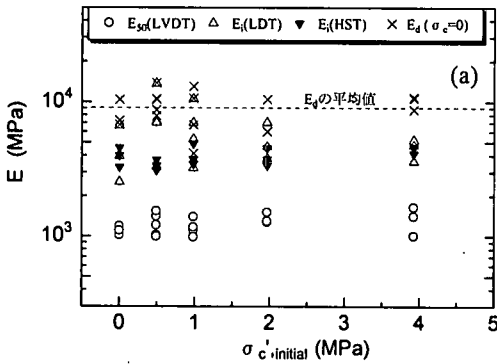


図-10 凝灰岩の変形特性。(a)弾性係数, (b)ポアソン比

ここで h はチューブの厚さ, r は供試体の半径, E_T はチューブのヤング率である。供試体が延性的に挙動する場合にはより小さい $\epsilon_{\sigma, T}$ で残留強度に至るため, 補正後の残留強度線も点 A を通ると考えられる。したがってチューブの拘束圧力を考慮した補正後の残留強度線は, 図中に示した破線のように, 平均有効応力がゼロの点 B をチューブの拘束圧力分だけ横軸に平行移動した点 B' と点 A を結ぶ線で近似できると考えられる。しかしこの解釈では見かけ上チューブの拘束圧力の効果が負荷した拘束圧に依存する形となるという矛盾を生じるが, 実際の残留強度はおそらく実線と破線の間に位置するものと考えられる。本研究では, 破線で示した残留強度線を用いて, 残留強度定数の変化傾向を比較することにするが, その絶対値に関しては参考程度にしておくことが望ましい。

各種のひずみ計測方法による凝灰岩の変形特性を図-10 にまとめて示した。またこのときの各拘束圧ごとの物性値の平均値と標準偏差を表-3 に示した。ただし超音波速度は圧縮試験前の無拘束状態で計測している。凝灰岩の弾性係数は, どの計測方法においても拘束圧によらずほぼ一定していることがわかる。弾性係数の絶対値は, E_a が最も大きく, LDT と HST による E_i の値が次に大き

く, 外部変位計による値は局所計測値の 1/3~1/7 の値となっている。溶岩に対しては E_i と E_a がほぼ同じ値として見積もられ, 凝灰岩では E_i が E_a よりも小さくなっていることを考慮すると, この差違は弾性係数におけるひずみレベル依存性のためであると考えられる。すなわち, 溶岩では 10^{-4} のひずみレベルまで一定の弾性係数を有するが, 凝灰岩では 10^{-4} のひずみレベルに至るまでに弾性係数が小さくなるためであると考えられる。ポアソン比としては無拘束状態の動的ポアソン比と HST 法による初期載荷部分のポアソン比を示した。若干バラツキはあるものの, 平均値ではどちらも 0.2 となっている。

(2)力学的性質への礫率の影響

火山角礫岩の力学的性質を論じる前に, 火山角礫岩供試体を礫率 (GC) に基づいて区分する。これは礫率そのものに測定誤差を含むので, 全体としての礫率の影響を評価するためである。ここでは表-4 に示すように, 火山角礫岩供試体を 4 つの礫率に区分した。これ以降, 礫率を区分して用いるときは, それぞれ礫率 10%, 20%, 30%, 40% と呼ぶこととする。礫率の影響は主として 10cm 供

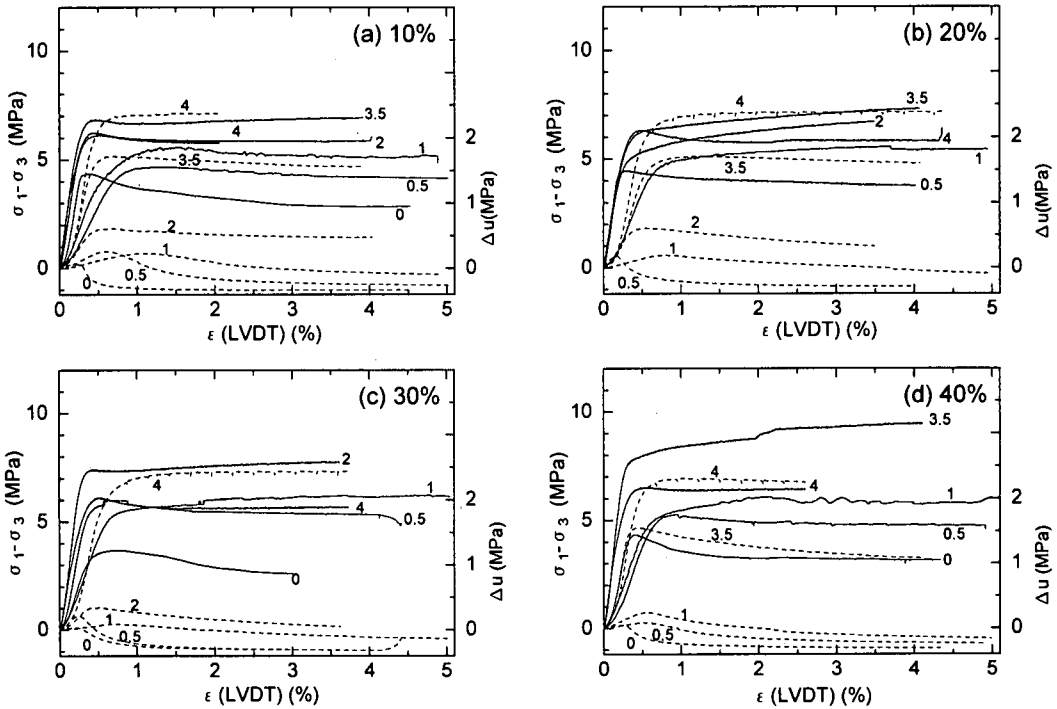


図-11 火山角礫岩A層の代表的な応力-間隙水圧-ひずみ関係(実線;応力,破線;間隙水圧, 図中の数字は初期有効拘束圧.)

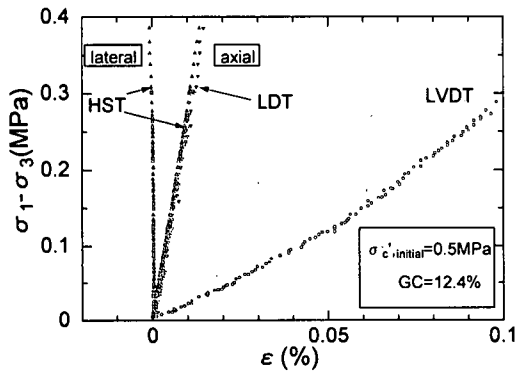


図-12 微小ひずみレベルにおける応力-ひずみ関係

表-4 礫率の区分

区分	礫率 (%)	拘束圧 (MPa)	区分	礫率 (%)	拘束圧 (MPa)
10%	7.4	0	30%	26.8	0.5
	10.0	0.5		27.9	4
	10.0	1		28.1	2
	10.0	2		29.3	2
	10.2	2		29.6	0.5
	10.9	3.5		29.6	0
	12.4	0.5		30.4	1
	12.5	4		31.1	4
	14.6	0		34.0	0
	17.7	4		34.1	0
20%	19.5	1	40%	36.4	3.5
	20.0	0.5		38.2	1
	20.5	2		38.3	4
	21.2	1		43.1	0
	23.0	2		43.3	0.5
	23.0	2		49.8	1

試体の試験結果について考察し, 5cm 供試体からのデータは参考までに示す。

a) 応力-ひずみ関係

A 層供試体の応力-ひずみ関係の全ひずみ領域における特徴を把握するために, 外部変位計による変位から求めた軸ひずみに対する礫率ごとの応力-ひずみ関係を図-11に示す。図から次のようなことが読み取れる。

- 1) 一軸圧縮強度はおおよそ 3.5~4.5MPa の範囲にあるが, 1MPa より大きな拘束圧条件では延性的に挙動し, それより小さい拘束圧下ではひずみ軟化するものが多い。

ひずみ硬化するものはあまり見られない。

- 2) 3.5MPa 以上の拘束圧条件では, 初期載荷段階の非線形性が弱く直線的であるが, それ以下の拘束圧状態では非線形性が強くバラツキが大きい。
- 3) 2 または 3.5MPa の拘束圧まで強度は増加する傾向にあるが, 4MPa の拘束圧状態ではすべての礫率で強度が低下し, 間隙水圧の上昇が顕著である。4MPa の拘束圧状態では変形様式がせん断面を形成する様式から, 樽型の変形様式に移行するためであると考えられる。

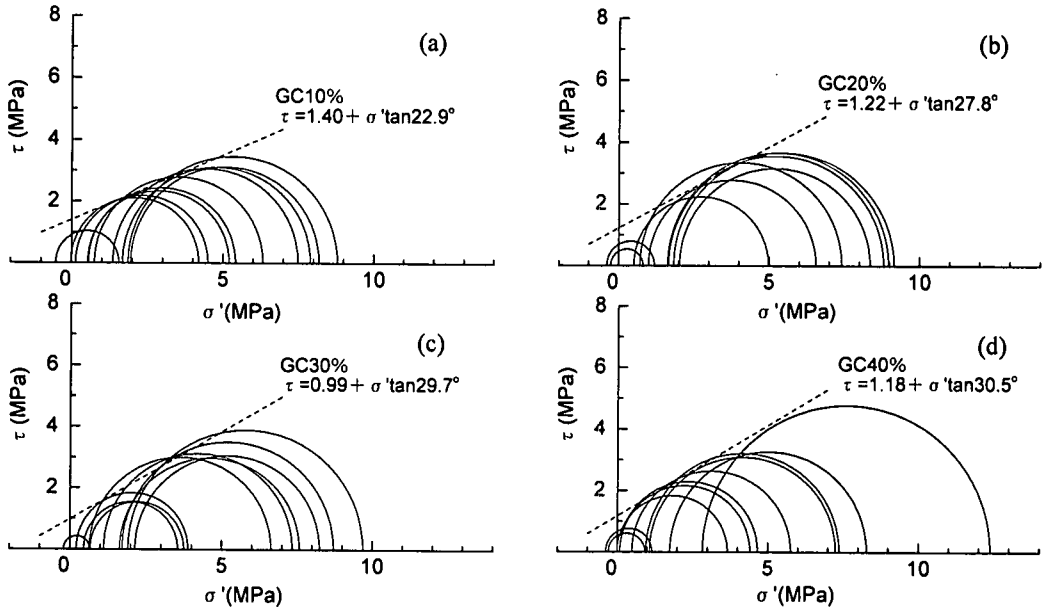


図-13 火山角礫岩 A 層(10cm)の破壊時のモール円(有効応力)

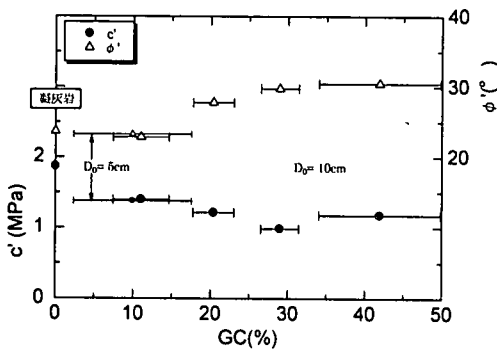


図-14 強度定数への薬率の影響

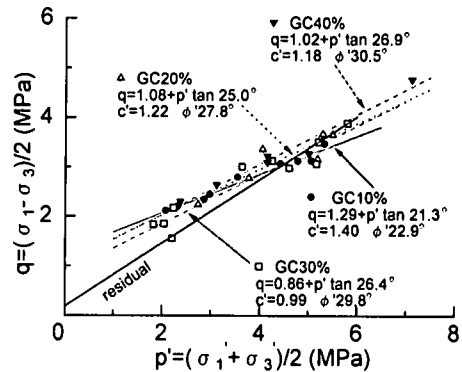


図-15 火山角礫岩 A 層における破壊時の p'-q 関係

4) これらの応力-ひずみ関係における薬率の影響は顕著ではなく、ほぼ同じ傾向を示している。

図-12 には微小ひずみレベルにおける応力-ひずみ関係の一例を示した。図より、 10^{-4} のひずみレベルでは LDT, HST とともに直線的に挙動しており、LVDT に見られる初期弾性係数の非線形性は観察されない。これは本研究で用いた供試体の乱れが比較的小さいことを示している。

b) 強度特性

図-13 に有効応力表示による破壊時のモール円を示す。図中には、後述する最大せん断応力と平均有効主応力の関係(図-15)から求めた c' 、 ϕ' の値を用いて描いたモール・クーロンの破壊基準を破線で示している。ただし c' 、 ϕ' を求める際に圧裂引張強度は考慮していない。図よりすべての薬率でモール・クーロンの破壊基準にほぼ従っ

表-5 試料の強度定数

薬率	c' (MPa)	ϕ' (°)	c' (MPa)	ϕ' (°)
10%	1.40	22.9	0.30	37.4
20%	1.22	27.8	0.13	41.1
30%	0.99	29.8	0.15	40.6
40%	1.18	30.5	0.32	40.3
平均			0.24	39.7
凝灰岩	1.88	23.7	0.27	39.9

注) 残留強度定数はチューブ拘束圧力を補正

ているとみなすことができる。特に、薬率 10% と 40% の供試体においてはよく一致しており、この二つを比較すると、薬率が大きいとき内部摩擦角が大きいことが明瞭にわかる。その他の薬率ではこれらの中間的な値となっている。なお、破壊強度および残留強度の決定方法は凝

灰岩の場合と同様である。

図-14に粘着力と内部摩擦角への礫率の影響をまとめた。図には凝灰岩と5cm 供試体のデータも含めている。また図中の横線は平均値を計算した礫率の範囲を示している。図より、粘着力については礫率の増加に伴い若干減少する傾向にあるが、減少幅は小さいことがわかる。また凝灰岩の粘着力は火山角礫岩と比較して大きな値となっており、上述した湿潤密度の違いと調和的である。一方、内部摩擦角については礫率20%以下の値は凝灰岩の値とほぼ等しく、20%を超えると大きくなっていくことがわかる。これらの強度定数に与える礫率の影響は、小林・吉中¹⁾の人工礫混じり岩に対する試験結果および Lindquist & Goodman²⁾のメラングジュのモデル実験結果と調和的である。また5cm 供試体から求めた強度定数も10cm 供試体から求めた値と非常に近い値を示しており、礫率が20%以下の範囲においては供試体寸法の影響は小さいと言える。

最大せん断応力と平均有効応力の関係を礫率ごとに分類して図-15に示す。上述したように礫率の増加に伴い内部摩擦角が増加し、内部摩擦角が低下する傾向にあるため、全体的に見るとバラツキの範囲内であり礫率による強度特性への影響は小さく見える。残留強度については、表-5に示すように、礫率に依って系統的に変化していないことがわかる。すべてのデータに対して平均的な残留強度定数を算出すると、凝灰岩の値とほぼ一致する。

このような火山角礫岩の強度特性への礫率の影響に対する原因を探る目的で、破壊後供試体を破断面に垂直でかつ、载荷軸を含む面で切断し内部構造を観察した。切断前に供試体には蛍光剤を添加した粘性の低い接着剤を真空吸引させ、これに熱を加えて固化させている²⁾。一軸圧縮破壊させた礫率43.1%の10cm 供試体の例を図-16に示す。左下から右中央にかけて巨視的な破断面が形成されており、破断面右下の大きな礫が飛び出すような形で変形が生じている様子がよくわかる。この礫の背後には変位に伴って形成されたと考えられる大きな間隙が観察されるほか、多くの礫にはほとんど割れ目が形成されていない。全体として破断面はマトリックスの中を礫を避けるように、または礫とマトリックスの境界を通るように形成されている。このように破断面が礫を避けるように形成されることが礫率の大きい場合に内部摩擦角が大きくなる原因として考えられ、また破断後の変位がマトリックスを中心に生じることが、凝灰岩と火山角礫岩の残留状態における強度定数がほぼ同じ値を有する原因として考えられる。

c)変形特性

供試体の変形特性に対する礫率の影響を、礫とマトリックスから成る二相混合材料の弾性問題として検討する。図-17に各種の弾性係数と礫率の関係を示す。図中には、実験値および二相混合材料の上下限値を与える Reuss と Voigt の式²⁾による計算結果(曲線)を合わせて示している。

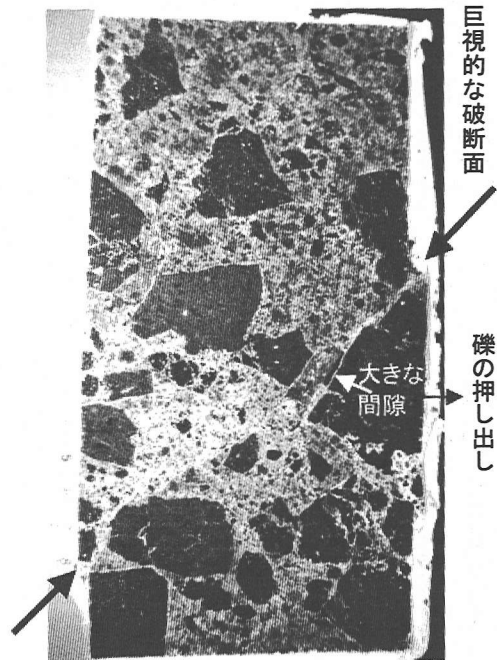


図-16 破壊後供試体の切断断面(供試体幅10cm)

ここで Reuss の式は、混合体内部の応力が一様であると仮定した場合の理論式であり、他方 Voigt の式はひずみが一様であると仮定した場合の理論式である。それぞれは礫とマトリックスの弾性係数を端成分とし礫率をパラメータとして、次式のような平均弾性係数 ($E_{Breccia}$) とし表わせる。

Reuss の式

$$E_{Breccia} = \frac{E_{Matrix} \times E_{Lava}}{GC \times E_{Matrix} + (1 - GC) \times E_{Lava}} \quad (2)$$

Voigt の式

$$E_{Breccia} = GC \times E_{Lava} + (1 - GC) \times E_{Matrix} \quad (3)$$

ここで、GCは礫率、 E_{Lava} 、 E_{Matrix} はそれぞれ礫とマトリックスの弾性係数である。図中において礫の弾性係数には強度の低いグループの溶岩の弾性係数の平均値を用いているが、マトリックスの弾性係数は確定できていないので礫率が小さいときの弾性係数を礫率0%まで外挿している。またひずみ計測方法ごとの弾性係数のバラツキを考慮し、礫の弾性係数にはそれぞれのひずみ計測方法で求めた弾性係数を用いている。参考までに凝灰岩の弾性係数を礫率0%の位置にプロットしている。

図-17(a)は無拘束状態での超音波速度から決定した E_d と礫率の関係を示している。図から、 E_d は試験に用いた供試体の礫率によらずほぼ一定した値を示しており、バラツキの程度もほとんど変化していないことがわかる。また礫率0%へ外挿した値はほぼ凝灰岩の E_d の最小値に

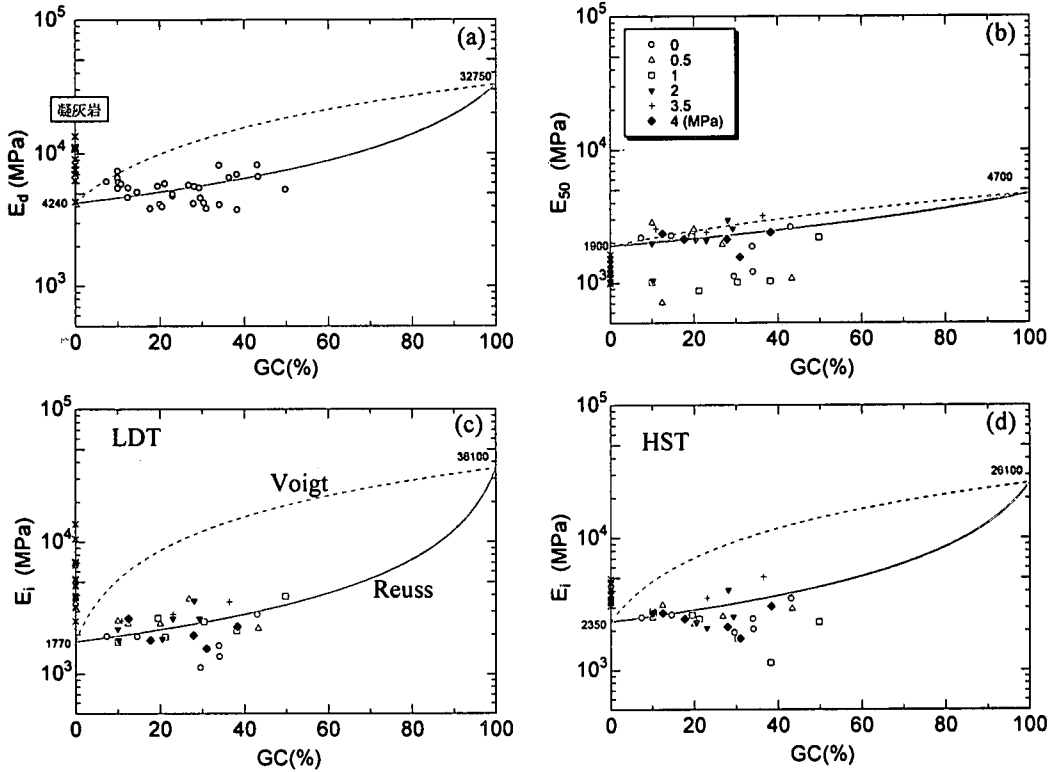


図-17 礫率と弾性係数の関係

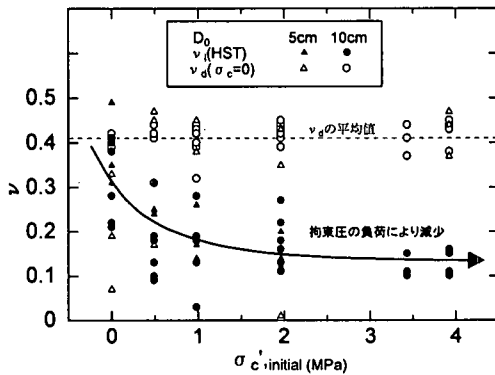


図-18 初期有効拘束圧とポアソン比の関係

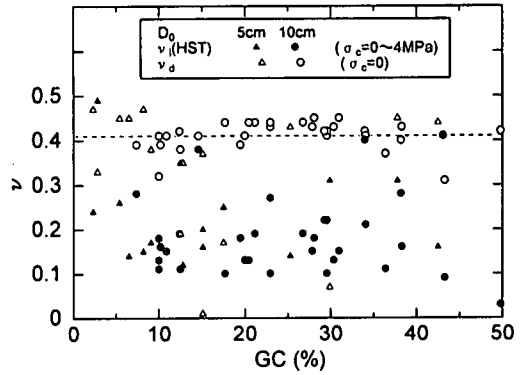


図-19 礫率とポアソン比の関係

近い。人工の礫混じり岩を用いた試験では、 E_d は下限値である Reuss の理論式におおよそ一致することが報告されている。ここではマトリックスの弾性係数が外挿値であるので理論式との対応はあまり意味をなさないが、礫率が約40%以下では弾性係数の変化が小さいという意味では、Reuss の理論式の傾向に近い。

図-17(b)は E_{50} と礫率の関係であり、初期有効拘束圧ごとにまとめている。図から低拘束圧下では E_{50} のバラツキが非常に大きい、2MPa 以上の拘束圧下では比較的

安定していることがわかる。図中の理論式はこの 2MPa 以上の弾性係数の外挿値を用いて描いている。理論式が他の図の傾向と大きく異なるのは礫の E_{50} が過小に評価されているためであり、外部変形を用いた計測では礫率の影響は適切に評価できないと考えられる。

図-17 (c)(d)は、それぞれ LDT, HST 法から求めた E_i に対する礫率の影響を示している。これら 2 つの計測方法による礫率に対する E_i の傾向は、礫率が小さい供試体では比較的 E_i のバラツキが小さいが、礫率が 20% を超

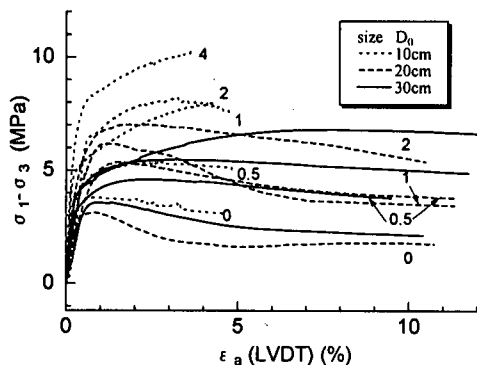


図-20 火山角礫岩B層の応力-ひずみ関係

えるあたりからバラツキが大きくなる点でよく一致している。この傾向は拘束圧が高くなることによってもあまり改善されない。これは礫率が大きくなることによって、局所変形の計測自身が難しくなること、および小林・吉中¹⁾が指摘するように、礫の混入により供試体内の応力場が非常に不均質になることに対応していると考えられる。またデータのバラツキはあるものの、全体として約40%以下の礫率では礫率によって弾性係数の変化が小さいという意味で、微小ひずみにおいても Reuss の理論式の傾向に近いと言える。

図-18 に初期有効拘束圧とポアソン比の関係、図-19 に礫率とポアソン比の関係を示す。これらの図には5cm および10cm 供試体の ν_d と、HST法による ν_i が示してある。 ν_d は供試体径によらずほぼ0.4程度の値を示すのに対して、 ν_i は拘束圧に依存している。すなわち拘束圧が0のとき ν_i は ν_d に近い値を示すが、拘束圧が大きくなると、0.1~0.2位まで小さくなっている。また図-19の礫率との関係を見ると、ポアソン比は礫率にあまり依存していないことがわかる。

5. 寸法の影響

供試体寸法および最大礫径が力学的性質に及ぼす影響をB層供試体を用いて検討する。B層供試体の礫率は18%と41%の供試体を1本ずつ含むが、その他の供試体では33±6%以内である。

(1) 応力-ひずみ関係

10cm 供試体は、A層供試体と同様の試験条件でせん断している。一方、大型供試体の試験条件は若干異なっているので、主だった相違点を説明しておく。最も大きな相違点は、大型供試体ではジャケット材料として熱収縮チューブではなく通常のゴムスリーブを用いていること

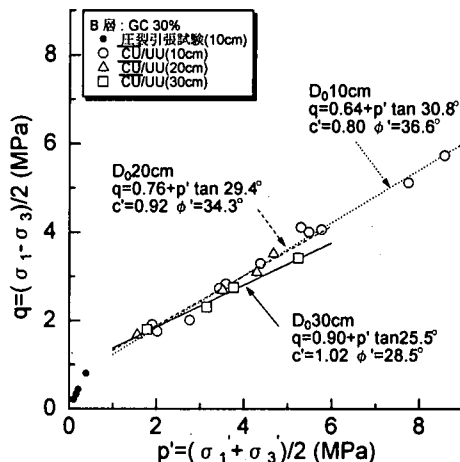


図-21 せん断強度特性への供試体寸法の影響

である。したがって軸変位は外部変位計とLDTを用いて計測し、半径方向変位を非接触型変位計により計測している。また最終変形量を10%程度まで取り、残留状態を確認している。

このようにして得られた供試体寸法の異なるB層供試体の代表的な応力-ひずみ関係を図-20に示す。B層供試体の特徴としては、0.5MPa程度の拘束圧を荷重した段階ではほぼ延性的に挙動するものが多く、2MPa以上の拘束圧ではほとんどの供試体でひずみ硬化することが挙げられる。また4MPaの拘束圧では、破壊強度の半分位の応力状態で降伏しているものもあり、この挙動は人工礫混じり岩のシルト質マトリックスの場合¹⁾と似ている。

(2) 強度特性への供試体寸法の影響

図-21に平均有効応力と最大せん断応力の関係を供試体寸法ごとに示した。破壊強度の決定方法はA層と同じであるが、大型供試体の残留強度については外部変位計による軸ひずみが10%のときの軸差応力とした。図には供試体寸法ごとに最小二乗法による近似式と、それらから計算した c' 、 ϕ' の値も示してある。最小二乗近似するときには圧裂試験結果は考慮していない。図よりB層供試体においても p' - q 関係はほぼ直線的な関係があること、さらに30cm 供試体では若干内部摩擦角が小さくなっていることがわかる。30cm 供試体で内部摩擦角が小さくなる要因としては、応力-ひずみ関係に見られるように、0.5MPa以上の拘束圧において降伏した後にはひずみ硬化する挙動を示すことに関連していると考えられる。すなわち、供試体寸法が大きくなることによって、供試体内部の不均質性が増すことによるものと考えられる。しかし全体としてはここで用いた寸法の範囲内では供試体寸法の影響は顕著でない。

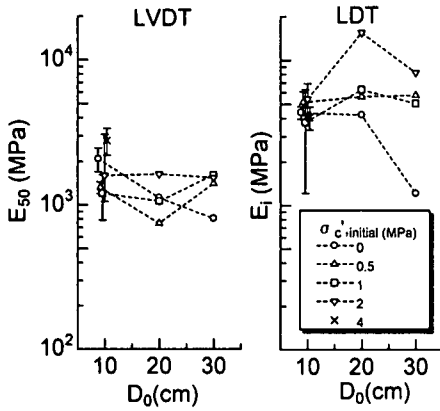


図-22 弾性係数と供試体寸法の関係

A・B層供試体の強度定数を比較すると、B層の方が粘着力が若干小さい値を示すが、差はわずかである。一方、内部摩擦角は同じ礫率に対して5°程度大きな値を示しており、明瞭に異なっている。このことは先述のように、A・B層供試体ではマトリックスの性質が異なることに対応しているものと考えられる。

(3)変形特性への供試体寸法の影響

供試体寸法が変形特性に及ぼす影響を検討するために、供試体直径に対して E_{50} とLDTによる E_i を、初期有効拘束圧ごとに示したものが図-22である。10cm供試体の弾性係数は平均値およびデータの最大値と最小値をエラーバーによって表している。なお、各エラーバーが見やすいように横軸の位置を若干変えてプロットしている。

図より、大型供試体の試験本数が少なくバラツキがあるために断言はできないが、どちらのひずみ計測法によっても供試体寸法が弾性係数に与える影響はこの寸法の範囲以内では明瞭ではない。各ひずみ計測法では外部計測よりも局所計測の弾性係数の方が2~3倍大きな値を示しており、供試体寸法が大きくなってもベディングエラー等の影響は避けられないことがわかる。また大型供試体では拘束圧が大きいものほど、弾性係数が大きくなる傾向にある。

(4)最大礫径の影響

供試体内に含まれる礫の大きさの強度特性への影響を調べるために、ここでは最大礫径(D_{max})に対する直径(D_0)の比(D_0/D_{max})に着目して試験結果を整理した。最大礫径は供試体周面に沿った礫の最大長さとした。したがって土質材料やコンクリートなどで用いられる粒径とは必ずしも対応しない。円柱供試体周面と礫が交差する相対的な位置や計測方向にも依存して実際の礫径とは異なる可

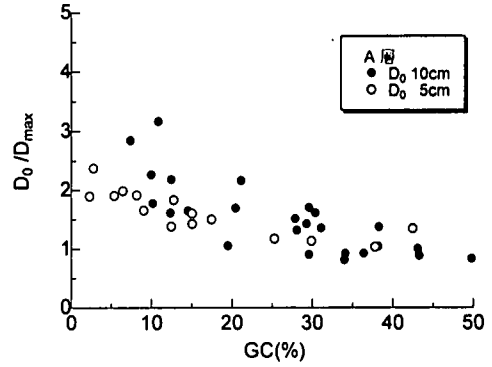


図-23 礫率と供試体直径/最大礫径比の関係

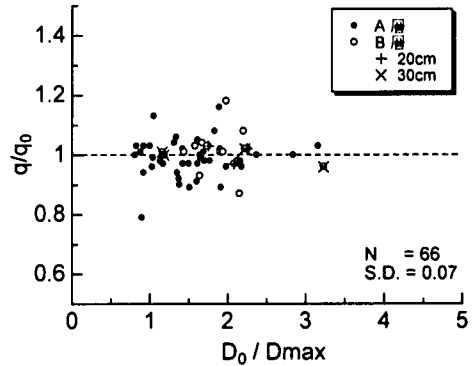


図-24 最大礫径がせん断強度に及ぼす影響

能性が高いので、結果を考察するときには十分に注意が必要である。

A層供試体のデータを利用して礫率と D_0/D_{max} の関係を調べたものが図-23である。図には5cmと10cm供試体のデータが示してある。どちらにおいても礫率が大きくなるほどこの比も小さくなっていることがわかる。このことは礫率が大きいほど大きい礫が含まれることを示しており、この比は礫率に対して独立な量ではないことを示唆している。また供試体寸法によってこの傾向があまり変化しないことは、供試体が大きくなるほど大きい礫を含んでいることを示している。このような供試体寸法と最大礫径の関係は今後さらに研究を進めていく必要がある。

小林³⁾は、動的弾性係数と D_0/D_{max} との関係を調べ、 D_0/D_{max} が5以上の場合については影響がないことを示している。しかし図に示したように、供試体における D_0/D_{max} の値は最大でも3程度であり、粒径の変化の著しい火山角礫岩などの礫岩では $D_0/D_{max} \geq 5$ という条件の試料を採取することは不可能に近いものと考えられる。川崎ほか⁴⁾もこの点を指摘するとともに、人工礫岩を用いて D_0/D_{max} が1~10程度の寸法効果を調べ、一軸圧縮強

度に変化がなかったことを報告している。

このようにいくつか問題はあつたものの、 D_0/D_{max} と最大せん断強度との関係を求めてみた。ここで最大せん断強度は拘束圧に大きく依存し、礫率と供試体寸法にも若干依存するため、これらの影響を排除した最大せん断強度の指標として、図-15と図-21に示した p' - q 関係の近似式からのずれとして表現することとした。すなわち次式の a と α をそれぞれの礫率区分と供試体寸法における定数として、個々の供試体の破壊時における平均有効応力を、

$$q_0 = a + p' \tan \alpha \quad (4)$$

に代入して q_0 を求め、実験的に計測された最大せん断強度をこの値で正規化したもの(q/q_0)を指標とする。この値と D_0/D_{max} の関係をプロットしたものが図-24である。図よりほとんどの点が1付近に散布しており、 D_0/D_{max} には依存していないと考えられる。細かく検討すると、大型供試体の値は10cm供試体と比較してずれが少なく、大型供試体を用いた方がデータのバラツキが少なくなることと対応している。また礫径の大きい、すなわち D_0/D_{max} の値が1に近い場合にも特にバラツキが大きくなる傾向も認められない。バラツキの大きいデータでも最大で2割程度であり、これらが特に礫率の大きい供試体であるという傾向も認められない。全体としては66個のデータに対して標準偏差で0.07となっている。以上より、この火山角礫岩のせん断強度に対する拘束圧の効果と礫率および寸法の影響を考慮すれば、強度特性をほぼ表現でき、特に最大礫径には大きな影響を受けていないと言える。

また弾性係数に与える最大礫径の影響も大きくないことが図-17(a)から推定できる。すなわち、図中のデータには D_0/D_{max} で1~3程度のデータが含まれるため、礫率の影響と最大礫径の影響が現われているはずであるが、図では礫率に対して同程度のバラツキの範囲内に入っており、最大礫径の影響は顕著ではない。実際に弾性係数と最大礫径の関係を図にしても結果は同じであった。

6. 結論

比較的乱れの小さい自然状態の火山角礫岩を用いて実施した圧密非排水試験を主体とした一連の試験結果から、礫含有率が約40%以下の火山角礫岩について、力学的性質への礫含有率、供試体寸法および最大礫径の影響を検討した。ここで用いた試料物性および試験条件の範囲内で次の結論を得た。

1) 火山角礫岩の強度・変形特性は、安山岩の角礫の間を充填する凝灰質マトリックスの力学的性質に基本的に依存する。

2) 礫含有率の増加に伴う力学的性質の変化は、弾性係数がReussの理論式に沿った形の変化となっており、また最大強度における有効応力表示の内部摩擦角は増加し、粘着力は低下する傾向にある。ただし、残留状態における内部摩擦角は礫含有率に依存することなくマトリックスの残留状態における内部摩擦角にほぼ一致する。

3) 供試体の大きさによる強度・変形特性への影響、すなわち寸法効果は顕著ではない。しかし、最大強度における有効応力表示の内部摩擦角は大きな供試体で若干低下する傾向があり、また強度・変形特性の試験値のバラツキは小さい寸法の供試体ほど大きい。

4) 最大礫径の影響は、供試体直径(D_0)と最大礫径(D_{max})の比が1~3程度と小さくても、火山角礫岩の力学的性質に大きな影響を与えない。

これらの結果は、マトリックスの力学的性質は異なるものの、小林・吉中¹⁾の人工礫混じり岩の結果と調和的である。ただし火山角礫岩はその堆積環境からも推定されるように、その他の堆積礫岩と比較して礫径があまり淘汰されていないほか、礫種が比較的均一であるなどの特徴を持っているので、一般の堆積礫岩への適用については注意が必要である。

今後の課題としては、礫岩の力学的性質が主にマトリックスの特性に大きく依存しているが、自然状態の礫岩においてマトリックスの物性を把握することは必ずしも容易ではない。従ってマトリックスの力学的性質を如何に精度良く求めるかを研究しておくことが重要である。

謝辞：埼玉大学工学部建設工学科岩盤研究室学生佐藤俊則君ならびに木之下聡君（現大成建設）には実験の手伝いを、また同土質研究室大学院生竹村岳貴人君には蛍光法について教示していただいた。また熊本大学工学部尾原祐三教授には試料のX線CT画像を撮影していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林隆志，吉中龍之進：礫混じり軟岩の強度・変形特性に関する研究，土木学会論文集，No.487/III-26, 31-40, 1994.
- 2) Kobayashi, T., Mimuro, T. and Yoshinaka, R.: Mechanical properties and failure mechanism of gravelly soft rocks, *Rock Foundation*, Yoshinaka, R. and Kikuchi, K. eds, Balkema, Rotterdam, pp.91-98, 1995
- 3) 小林隆志：礫混じり軟岩の力学的特性とその評価に関する研究，埼玉大学学位論文，216 p., 1995.
- 4) 川崎了，伊藤 洋，小泉和宏：礫岩コアの寸法効果とサンプリングによる乱れの評価，応用地質，Vol.39, No.4, pp.391-400, 1998.
- 5) 橋本徹，片川秀基，村上弘行：岩石の力学的性質に対する礫分の影響について，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，III-A340, pp.676-677, 1998.

- 6) 岡田哲実, 伊藤洋, 野崎隆司, 中村敏明: 人工礫岩の力学的特性に関する一考察, 第 34 回地盤工学研究発表会, F-6, pp.685-686, 1999.
- 7) 岡田哲実, 伊藤洋, 野崎隆司, 中村敏明: 礫岩の強度評価に関する一考察. 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, III-A333, pp.666-667, 1999.
- 8) 岡田哲実, 伊藤洋, 野崎隆司, 中村敏明: 礫と基質の付着強度に着目した礫岩の強度評価式の提案, 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.333-337, 2000.
- 9) Saotome, A., Yoshinaka, R., Osada, M. and Sugiyama, H.: Clast size distribution and constituent material properties of volcanic breccia, 投稿中.
- 10) 小高猛司, 早野公敏, 古関潤一, 龍岡文夫, 壺内達也, 松本正士: 堆積軟岩試料のサンプリングによる乱れの評価, 土と基礎, Vol.46, No.5, pp.367-370, 1998.
- 11) 例えば, 土木学会岩盤力学委員会編: 岩盤上の大型構造物基礎, 土木学会, pp.174-176, 1998.
- 12) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. and Sato, T.: A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.169-180, 1991.
- 13) 長田昌彦, 山辺正, 吉中龍之進, 浜野久美: 熱収縮チューブを利用した岩石のひずみ計測方法の検討, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.217-226, 1999.
- 14) Hoque, E., Tatsuoka, F. and Sato, T.: Measuring anisotropic elastic properties of sand using a large triaxial specimen, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.19, No.4, pp.411-420, 1996.
- 15) Verwaal, W. and Mulder, A.: Estimating rock strength with the Equotip hardness tester, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.30, No.6, pp.659-662, 1993.
- 16) Hack, H.R.G.K., Hingira, J. and Verwaal, W.: Determination of discontinuity wall strength by Equotip and Ball rebound tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.30, No.2, pp.151-155, 1993.
- 17) 片川秀基, 橋本徹, 平野秀次, 村上弘行: 天然の礫混じり岩石の力学的特性に及ぼす礫分の影響について, 第 19 回地盤・構造研究連絡会, B-3, pp.1-6, 1993.
- 18) 高橋康裕, 西野隆之, 入谷剛, 亀谷裕志: 面積法による礫分含有率の評価精度に関する研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, III-18, pp.36-37, 1995.
- 19) 和田弘, 西田和範, 亀谷裕志: ボーリングコアにおける礫分含有率評価手法の検討, 第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.341-345, 1995.
- 20) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説, 地盤工学会, pp.331-338, 1990.
- 21) Lindquist, E.S. and Goodman, R.E.: The strength and deformation properties of a physical model melange, *Proc. 1st NARMS*, Balkema, pp.843-850, 1994.
- 22) 西山孝, 楠田啓, 斎藤敏明: 蛍光法による岩石中の間隙の観察と評価に関する二, 三の考察, 応用地質, Vol.33, No.1, pp.17-22, 1992.
- 23) 例えば, 秋本俊一, 水谷仁編: 岩波講座 地球科学 2 地球の物質科学 I, 岩波書店, pp.69-81, 1978.

(2000.4.24 受付)

STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF UNDISTURBED VOLCANIC BRECCIA

Ryunoshin YOSHINAKA, Masahiko OSADA, Atsushi SAOTOME, Hiroyasu SUGIYAMA
and Kumi HAMANO

There have been very few experimental results on mechanical properties of natural volcanic breccia. A series of triaxial compression tests under undrained condition were performed to elucidate the effects of the percentage of clasts, specimen size and maximum clast size on its strength and deformation behavior. The results suggest that the effect of the percentage of clasts is small, even though the internal friction angle become large and the deformation become inhomogeneous when the percentage of clasts exceed 20%. As to the effect of the specimen size, the mechanical properties are not largely different between specimens of various diameters up to 30cm although the internal friction angle is slightly small for large specimens. Moreover no effect of the maximum clast size is recognized on mechanical properties.