

天然の礫混じり岩石の力学的性質に及ぼす 礫分の影響について

片川秀基¹・橋本 徹²・平野秀次³・村上弘行⁴

¹正会員 北陸電力株式会社 原子力土木部 (〒930-8686 富山市牛島町 15-1)

²正会員 北陸電力株式会社 志賀原子力発電所建設所 (〒925-0161 石川県羽咋郡志賀町字赤住 1)

³北陸電力株式会社 原子力土木部 (〒930-8686 富山市牛島町 15-1)

⁴応用地質株式会社 北信越支社 営業企画部 (〒950-0864 新潟市紫竹 7-27-35)

北陸地方に分布する新第三紀中新世の凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩のボーリングコアを用い、岩石の力学的性質に及ぼす礫の力学的性質、礫率の影響について検討した。これらの岩石は、礫とマトリックスの力学的性質のコントラストが比較的小さな岩石である。検討の結果は次のとおりである。

- (1) 周面礫率と一軸圧縮強度(q_u)、静弾性係数(E_{50})および動弾性係数との間に相関性は認められなかった。
- (2) 一軸圧縮試験での破壊形態には礫とマトリックスの境界での応力集中の影響を示唆する部分もあるが、その分布は局部的で、礫とマトリックスとの境界での応力集中が供試体の破壊に大きく影響しているとは考えがたい。

Key Words : *equotip hardness tester, gravel content, unconfined compression strength, E_{50} -modulus, breccia*

1. はじめに

岩盤の工学的性質は、これを構成する intact な岩石材料の性質と割れ目の分布や性質に大きく依存する。近年は特に割れ目について、工学的な取り扱い方から基礎的な記載上の扱い方まで、多彩な研究が多数報告されてきた。一方、intact な岩石部分については、これが重要な位置を占める軟岩、中硬岩においてさえ、岩石中の組織・構造に由来すると思われる不均一性は、力学的性質におけるバラツキとして取り扱われ、バラツキの扱い方、評価についての研究、バラツキを低減するためのサンプリングや試験方法についての研究が主としてなされてきたように思われる。しかし、力学的性質にこの不均一性に起因する規則性があるとすれば、不均一性を適切に記載し、力学的性質のバラツキとの対応を明らかにすることは、特に軟岩、中硬岩を地盤材料として工学的に利用するうえで有用である。こうした不均一性を有する軟岩あるいは中硬岩からなる地盤は、我が国においては比較的広範囲に分布する。いわゆるグリーンタフ地域と呼ばれる新第三紀の火山岩地帯が典型的な例であり、角礫岩状安山岩、凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩などの礫混じり岩石や岩塊混じりの岩盤（以下では「礫混じり岩石」と一括して扱う）はそのひとつである。これらは凝灰質で細粒なマトリックス中に、マトリックスとは明瞭な境界を有する。

強度、変形性を異にする材料が混合して形成される混合体の力学特性を如何に力学的、数学的に表現すべきかは興味深い問題である。例えば、混合体の応力-ひずみ関係に関する Voigt¹⁾、Reuss²⁾ 以来の研究については大嶺・落合³⁾ の中でまとめられている。一方、混合体の代表的なもののひとつである礫混じり岩石については、力学的性質の大小がそもそもどのような要因に支配されているのか、例えば礫なら礫に関わるどのような性質が岩石の力学的性質に影響するのかが十分に解明されているわけではないように思われる。コンクリートや人工の礫混じり岩石などについてなされた研究の中には、礫の混入が礫とマトリックスとの境界での応力集中として強度、変形性に関与し、最大強度は礫の混入量（以下礫率と呼ぶ）に応じてマトリックスのそれを下回るとするものがある^{4)~13)}。一方、逆に礫の混入量の増加に伴ってマトリックスのみの強度より増加するとの結果もある^{14), 15)}。しかし、こうした成果を天然の礫混じり岩石で検証した例は少ない。それは、礫の分布、礫やマトリックスの性質を把握する適当な方法がなかったため、それらが力学的性質に及ぼす影響について十分な調査手段を持たなかったことによるのであろう。川崎他¹⁶⁾、川崎他^{17), 18)}は礫混じり岩石とは異なるが、礫岩コアにおける礫含有率の計測方法を比較検討するとともに、礫間のセメンテーション物質である方解石含有率が 15% 以下のものについて、礫含有率の増加に伴う q_c/q_u の減少傾向、

表-1 岩石材料の物理試験結果

岩種		凝灰角礫岩	角礫岩状安山岩	安山岩溶岩
個数		33	69	123
密度 (g/cm ³)	平均値	2.27	2.31	2.68
	標準偏差	0.10	0.07	0.05
吸水率 (%)	平均値	13.57	12.13	1.34
	標準偏差	3.53	2.16	0.56
有効間隙率 (%)	平均値	26.92	24.87	3.53
	標準偏差	3.47	3.36	1.37
P波速度 (km/s)	平均値	3.86	3.96	5.53
	標準偏差	0.54	0.37	0.25
S波速度 (km/s)	平均値	1.94	2.01	2.98
	標準偏差	0.27	0.24	0.18

S波速度の増加傾向を報告している。筆者らは、礫の性質を簡易に把握する方法としてエコーチップ硬さ試験器の岩石材料への適用を検討するとともに(橋本他¹⁹⁾、礫の分布を簡易に把握する方法について検討を行ってきた。今回、これらの手法を天然の礫混じり岩石に適用し、岩石の力学的性質に及ぼす礫の性質や礫の分布の影響を調査した。本論文ではこの内容と結果について報告を行うとともに、結果の意味するところについて若干の考察を行う。なお、この内容の一部については橋本他²⁰⁾により発表されている。

2. 試験方法

(1) 検討に用いた材料

この論文で用いたのは、北陸地方の新第三系に属する凝灰角礫岩と角礫岩状安山岩のボーリングコアで、直径5cm、高さ10cmの円柱状供試体である。ボーリングを実施した地点の周辺は、両岩種とこれらに挟在する安山岩溶岩からなり、これらはほぼ水平な地質構造をなしている。岩石はごく表層の風化帯を除けば新鮮で、温泉変質など二次的劣化現象は認められない。凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩および安山岩溶岩の物理試験の結果を表-1に示す。凝灰角礫岩と角礫岩状安山岩は、自然状態の密度、吸水率、有効間隙率ともほぼ同様の値を示しており、安山岩溶岩のそれとは明瞭に異なっている。安山岩溶岩が均質かつ緻密な岩石であるのに対し、凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩は比較的多孔質な凝灰質のマトリックス中に安山岩質の角礫を含んでいる。凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩に含まれる角礫は、表面が凹凸に富み、マトリックスとの境界が複雑に入り組んでおり、マトリックスに類似したものから安山岩溶岩が幾分多孔質になったようなものまでさまざまである。しかし、ここでは形状、色調、発泡の度合いについて肉眼的に簡易に識別できる次の礫種1～礫種4の4つに区分した。

礫種1：灰・暗灰色の色調を示す礫で、発泡の度合

いは低く、比較的緻密な岩質から見かけ上安山岩溶岩に近い外観を呈する。

礫種2：灰・暗灰色の色調を示し、色調からは礫種1に類似するが、比較的淡い。礫種1とは発泡の度合いが異なり、総じて多孔質である。

礫種3：発泡の度合いがしばしばマトリックスのそれに類似し、多孔質である。赤褐・暗赤褐色の色調によりマトリックスとは明瞭に区別される。

礫種4：発泡の度合いがマトリックスと同程度で、色調もマトリックスとは漸移的である。

礫種4については色調、組織ともマトリックスのそれと差がないものが多く、マトリックスとの間で境界が識別可能なものを礫として抽出したものである。他の礫種と比べると、マトリックスと礫との境界はしばしば不明瞭で複雑に入り組んでおり、むしろマトリックスの一部をなしているともみることのできる部分も見られる。礫種3の一部にもそうしたものが認められる。供試体に占める礫種の出現率は、礫種1が4%、礫種2が67%、礫種3が13%、礫種4が5%、その他混合礫種が11%である。

(2) 礫率の算出方法

任意の断面から間接的に内部の幾何学的な組織を推定する方法はステレオロジと呼ばれている。正方形断面を対象として、内部に含有される一様な径を持つ球状礫の体積比(以下体積礫率と呼ぶ)を推定する方法として、小林⁹⁾、小林・吉中¹²⁾は、任意の正方形断面に対する礫の面積比を面積含有率として用いている。その際、礫径との関係で最低限必要な調査対象の広がりについて、面積含有率の体積礫率に対するパラツキの度合いで検討し、一辺の長さL、礫径DとしたときL/Dが5以上であれば変動係数が0.3以下に、10以上であれば変動係数が0.2以下にできている。一方、ボーリングコアや円柱供試体における礫率の評価方法としては(a)ボーリングコア全周に占める礫の面積の割合を算出する方法、(b)ボーリングコアに測線を設け、その測線全長に占める礫の長さの割合を算出する方法、(c)ボーリングコアに一定間隔に測点を設け、全測点数に占める礫の測点数の割合を算出する方法等が考えられる。川崎他¹⁰⁾は、天然の礫岩を用いて、ボーリングコア側面の展開図に対する礫部分の面積比を礫分含有率として、これを土質試験として通常行われる室内粒度試験で求めた礫の含有率と比較し、同等ないし若干過小評価気味になるとしている。筆者らが実施した人工岩石での検討でも同様の結果が得られたことから、本論文では(a)の方法を採用することとし、これによる礫率を周面礫率と呼ぶこととする。周面礫率の算出方法を図-1に示

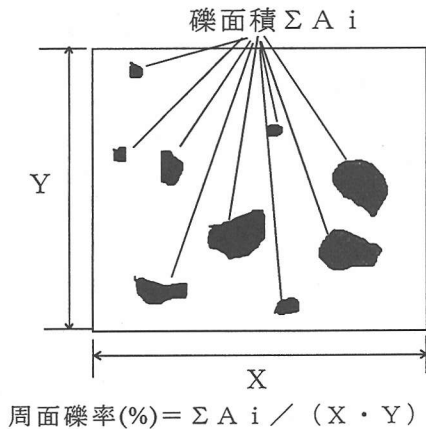


図-1 周面礫率の算出方法

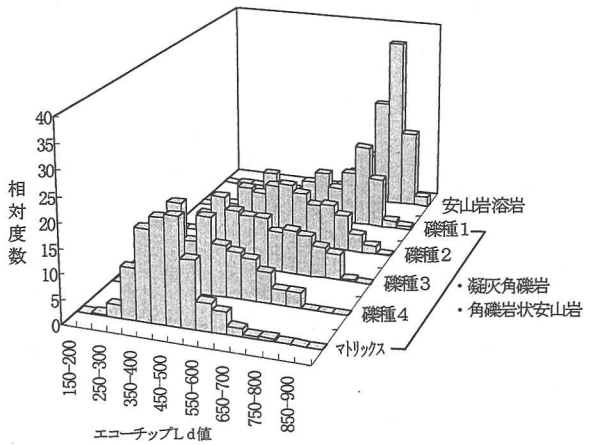


図-2 礫種毎のLd値ヒストグラム

す。周面礫率の具体的な求め方としては、供試体側面に透明なセロハンを巻きつけ礫をスケッチし、これを画像処理することで算出する方法を採用した。

(3) 試験方法

試験方法は、まず、一軸圧縮試験用の供試体について、試験前に供試体側面の展開図を作成して礫の分布状況をスケッチし、礫種区分および周面礫率の算出を行った。供試体に占める礫の大きさについて定説はない。小林・吉中¹²⁾は立方体を供試体として、一辺の長さに対する礫径の比が1/5以下であれば彼らの含有礫率の変動係数が0.3以下になるとしている。本文ではこれを参考にした。即ち供試体は、ボーリングコアの中から、礫について定規をあてて測定した最大径と最小径との平均が供試体径の1/5以下となるように選定した。しかし、礫が角礫で扁平な形状を有するものもあり、礫径を内接する球の直径や外接する球のそれと定義することが適当でない場合もあることから、実際には大きさについて明確に限定することが難しい。

次に、供試体における礫とマトリックスのそれぞれについて力学的性質の指標として硬さに着目し、橋本他²⁰⁾がボーリングコアや岩石中の微小部分への適用を対象として岩石の一軸圧縮強度と静弾性係数との関係を検討したエコーチップ硬さ試験器を用いて反発硬度試験（以下エコーチップ測定と称する）を実施し、Ld値を測定した。Ld値は硬さの指標であり、岩石や岩片表面を打撃した際の打撃速度に対する反発速度の比を1000倍した値で、橋本他²⁰⁾によれば、一軸圧縮強度および静弾性係数と良好な相関性を有しており、一軸圧縮強度、静弾性係数の指標として扱うことができる。測定は、礫部においては円柱状供試体の上下面および側面に分布する比較的大きな礫を対象に、マトリックス部においては、同様に比較的大きなマトリックス部を対象に、礫率に応じて5～10箇所程度測定した。測定結果はそれぞれ礫部Ld値、マトリックス部Ld値とし

て整理した。

この後、供試体は超音波伝播速度試験を実施したのち、側面のほぼ中央にコアの伸びの方向とこれと直交する方向に直交型のひずみゲージ（長さ3cm）を貼り付け一軸圧縮試験に供した。試験の結果、一軸圧縮試験の荷重-ひずみ量曲線において破壊ひずみにより一軸圧縮強度を求め、破壊ひずみの50%での割線弾性係数を静弾性係数とした。また、超音波伝播速度試験で得られたP波速度、S波速度から動弾性係数を算出した。一軸圧縮試験後には破断面のスケッチを行い、破壊の特徴として破断面が礫やマトリックスに対してどのような位置を占めているか、その規模、方向性を含めて観察を行った。なお、エコーチップ測定は安山岩溶岩についても実施した。

3. 試験結果

(1) 礫とマトリックスの力学的性質の定量化

a) 礫種毎の硬さ評価

礫種毎の礫部Ld値のヒストグラムを図-2に示す。なお、図中にはマトリックス部Ld値および当地点の中で最も硬質な安山岩溶岩のLd値もあわせて示す。

この図から、マトリックスおよび各礫種のLd値にはバラツキはあるものの、それぞれ異なる分布傾向が認められる。マトリックスや肉眼的に比較的マトリックスに近い礫種4から安山岩溶岩に似た礫種1へとLd値は大きくなる傾向があり、これらの平均値はマトリックスで約450、礫種4で約490、礫種3で約550、礫種2で約570、礫種1で約620である。なお、これらを安山岩溶岩と比較すると、安山岩溶岩のLd値は平均約790と最も硬質な礫種1よりも大きく、かつ、そのバラツキもマトリックスや礫種1～4に比べて小さい。

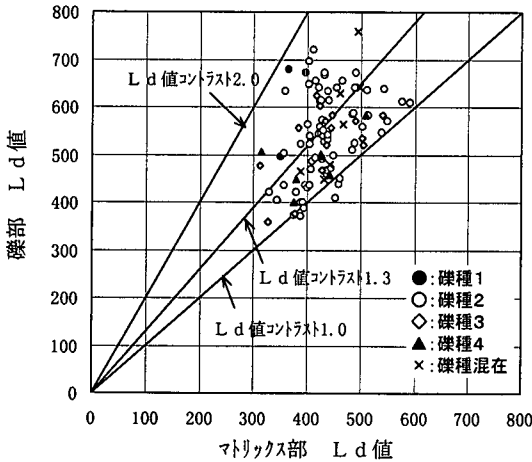


図-3 供試体におけるマトリックス部Ld値と礫部Ld値の関係

b) 礫部Ld値とマトリックス部Ld値の比較

同一の供試体における礫部Ld値とマトリックス部Ld値の関係を図-3に示す。この図から、礫の硬さはマトリックスと同程度または硬質であり、マトリックス部Ld値に対する礫部Ld値の比（以下、Ld値コントラストという）としてみると、平均的には1.3倍程度、最大でも2倍以下である。

c) 礫、マトリックスの物性評価

橋本他²⁰⁾によるLd値と一軸圧縮強度および静弾性係数との関係から礫、マトリックスの物性の推定を試みる。同一供試体の礫部の推定一軸圧縮強度とマトリックス部の推定一軸圧縮強度との関係を図-4に、同じく礫部の推定静弾性係数とマトリックス部の推定静弾性係数との関係を図-5に示す。これより、同一供試体におけるマトリックス部と礫部の一軸圧縮強度の比は、平均で1:2.3程度、最大でも1:10未満、静弾性係数の比は、平均で1:2.5程度、最大でも1:10未満と推定できる。

(2) 周面礫率と岩石の力学的性質との関係

周面礫率と一軸圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数との関係について、全データの場合および比較的硬質な礫種1、2と比較的軟質な礫種3、4に分けた場合について、それぞれ図-6、図-7および図-8に示す。なお、図中において各データは平均礫径（周面礫率を礫の個数で除し礫径を求めたもの）で分けて示している。これらの図から、周面礫率と一軸圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数との間に明瞭な相関は見られない。また、平均礫径で分けてみても特に顕著な傾向は見られない。

周面礫率の異なる供試体の応力-ひずみ曲線の例を図-9に、平均礫径の異なる供試体の応力-ひずみ曲線の例を図-10に示す。

また、周面礫率の他に、礫の破断長さ、マトリックス部Ld値、礫部Ld値、Ld値コントラストを指標にそれら

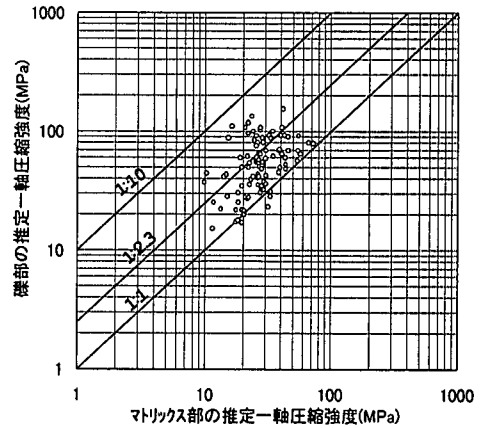


図-4 同一供試体の礫部とマトリックス部の一軸圧縮強度の関係

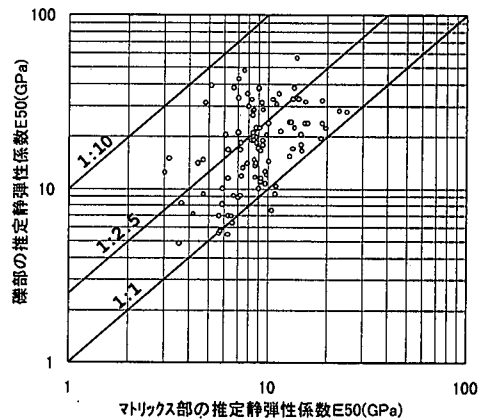


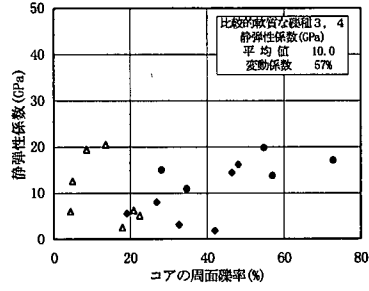
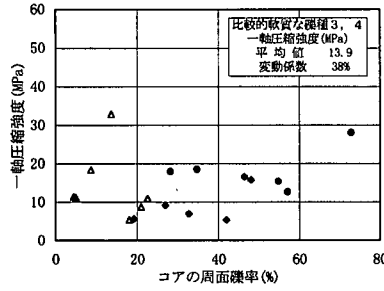
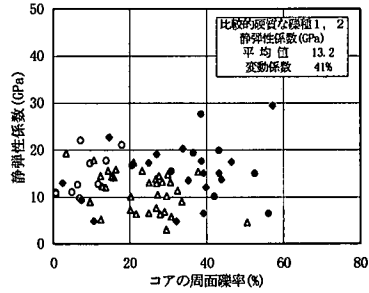
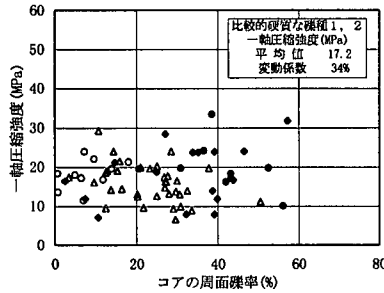
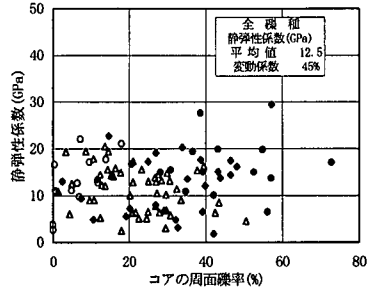
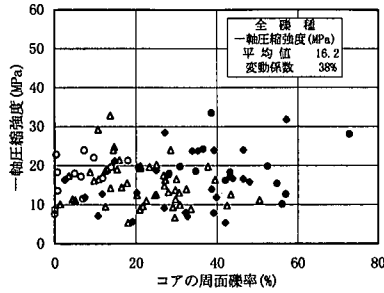
図-5 同一供試体の礫部とマトリックス部の静弾性係数の関係

が試験結果に与える影響について相関分析を実施した。その結果を表-2、図-11、図-12および図-13に示す。相関分析の結果、一軸圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数の全ての力学的性質と弱いながらも正の相関を有するのは、マトリックス部Ld値、礫部Ld値、礫の破断長さである。

(3) 破断形態による検討

一軸圧縮試験時の破断形態について、礫に対する破断面の位置、分布状況から次の4つに区分した。I. 破断面が主にマトリックスを切る場合、II. 破断面がマトリックスと礫の境界を切る場合、III. 破断面がマトリックスと礫を切る場合、IV. 破断面が主に礫を切る場合の4つである。各タイプの出現率はIタイプが約45%、IIタイプが約10%、IIIタイプが約35%、IVタイプが約10%である。図-14にそれぞれの破断形態の例を展開図に示す。図-15に破断形態毎の周面礫率の分布を示す。

破断形態の分布は周面礫率が低い場合には、主にマトリックスを切るIタイプが多く、礫率の増加に伴い破断形態はIタイプからIIタイプ、あるいはIタイプからIIIタイプ、



凡例
 記号 機種
 ○: 10mm以下
 △: 10~20mm
 ●: 20~30mm
 ●: 30mm以上

凡例
 記号 機種
 ○: 10mm以下
 △: 10~20mm
 ●: 20~30mm
 ●: 30mm以上

図-6 供試体の周面積率と一軸圧縮強度との関係

図-7 供試体の周面積率と静弾性係数との関係

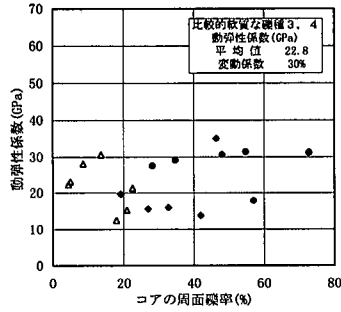
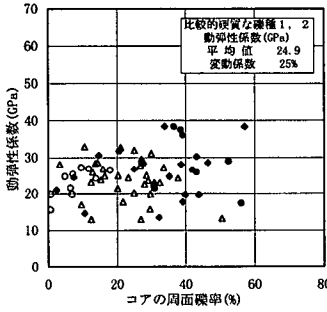
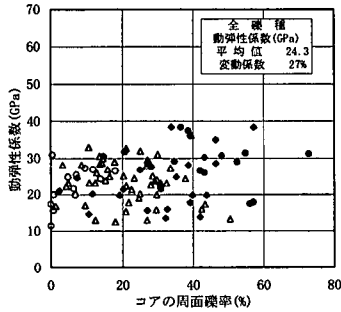


図-8 供試体の周面積率と動弾性係数との関係

凡例
 ○: 機種10mm以下 △: 機種10~20mm
 ●: 機種20~30mm ●: 機種30mm以上

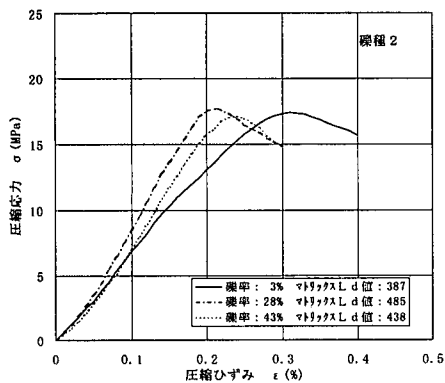


図-9 応力-ひずみ曲線 (異なる周面積率)

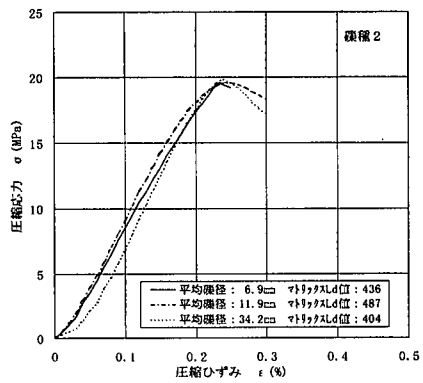


図-10 応力-ひずみ曲線 (異なる平均粒径)

表-2 相関分析結果一覧

	周面 礫率	礫の破 断長さ	マトリクス 部L d 値	礫部 L d値	L d値 コントラスト
一軸圧縮強度 (MPa)	×	○ (0.269)	○ (0.319)	○ (0.419)	×
静弾性係数 (GPa)	×	○ (0.224)	○ (0.240)	○ (0.470)	×
動弾性係数 (GPa)	○ (0.204)	○ (0.224)	○ (0.349)	○ (0.583)	○ (0.344)
周面礫率 (%)	—	○ (0.665)	×	×	×
礫の破断長さ (mm)	—	—	×	×	×
マトリクス部L d値	—	—	—	○ (0.428)	○ (-0.318)
礫部L d値	—	—	—	—	○ (0.714)

()内の数値は相関係数

○:有意水準5% ($n=102$; 0.194) で有意な相関性を持つ。

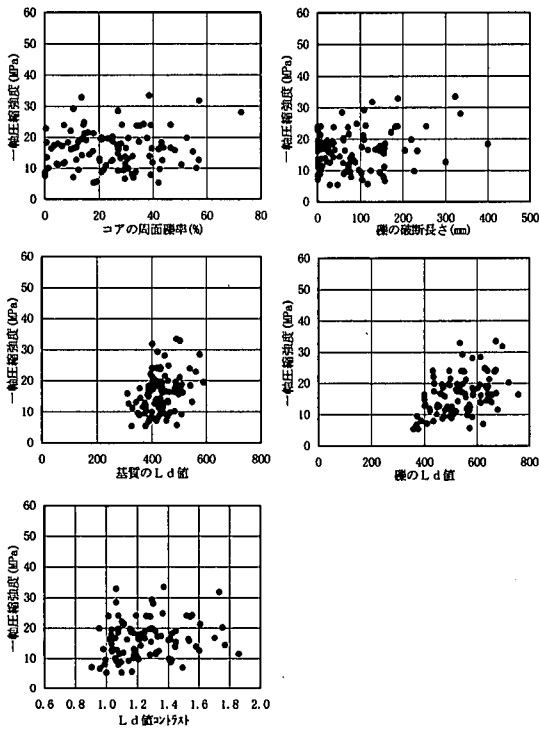


図-11 礫率, L d 値, 礫の破断長さ等と一軸圧縮強度の関係

さらに主に礫を切るIVタイプへと推移するものと考えられる。すなわち、礫種のいかんにかかわらず礫率が下げれば破断はマトリクス中でおこるIタイプとなり、特に当岩石材料のようにマトリクス部と礫部の静弾性係数に差がない場合には、礫率が高くなれば礫を切るIVタイプの出現率が高くなるのは容易に推察される。従って、礫と破断面の位置関係を考える上で重要となってくるのは、15%~40%の同様の周面礫率で出現するIIタイプとIIIタイプの差異と考えられる。

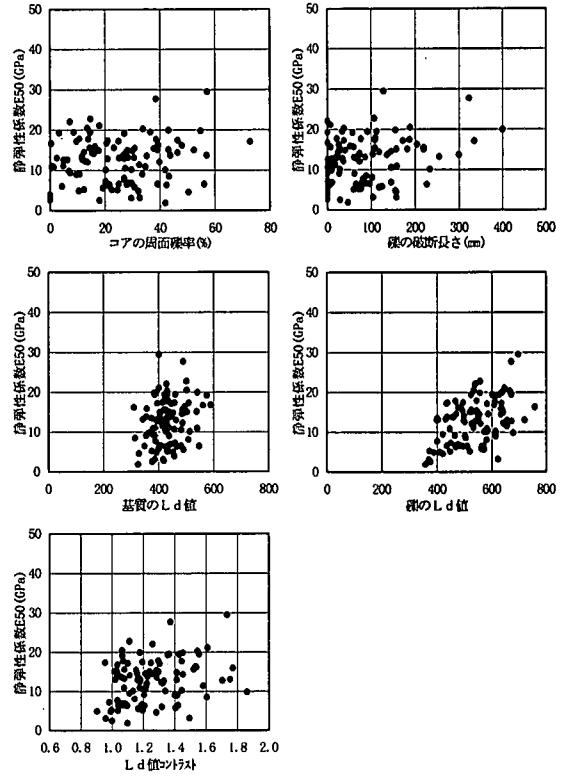


図-12 礫率, L d 値, 礫の破断長さ等と静弾性係数の関係

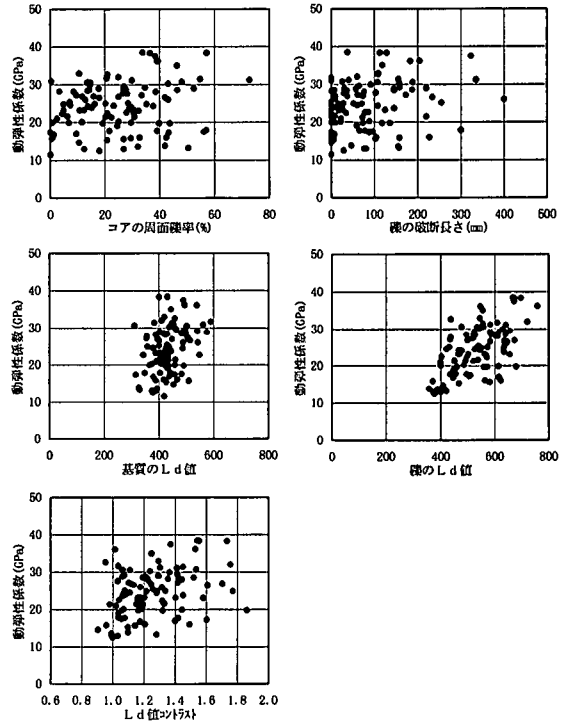


図-13 礫率, L d 値, 礫の破断長さ等と動弾性係数の関係

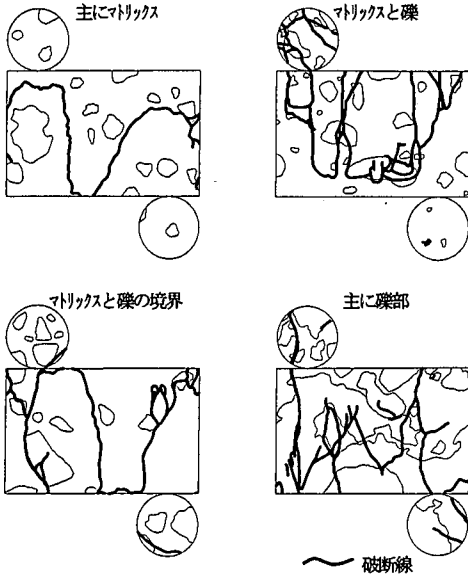


図-14 破断形態毎の破断例

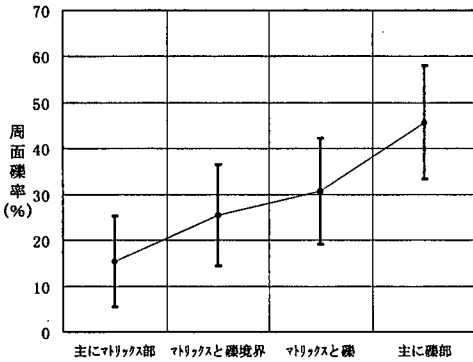


図-15 破断形態毎の周面礫率の分布

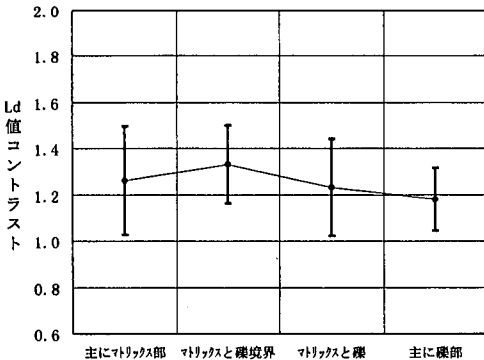


図-16 破断形態毎のLd値コントラストの分布

IIタイプとIIIタイプの違いについては、含まれる礫の硬軟が関与すると考えられ、これを破断形態とLd値コントラストとの関係として捉えてみた。図-16に破断形態毎のLd値コントラストの分布を示す。IIタイプのLd値コン

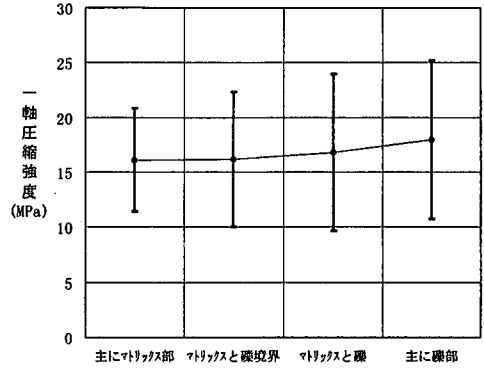


図-17 破断形態毎の一軸圧縮強度の分布

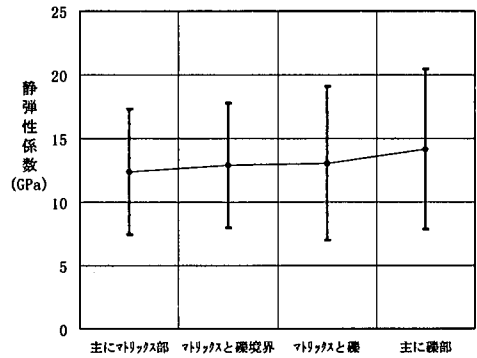


図-18 破断形態毎の静弾性係数の分布

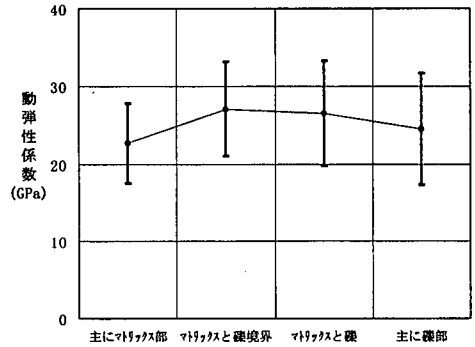


図-19 破断形態毎の動弾性係数の分布

トラストに着目してみると、Ld値コントラストの分布は、平均値が約1.3、標準偏差の下限値が約1.2と他の破断形態、特にIIIタイプの平均値約1.2、標準偏差の下限値約1.0に比べ高めの値を示している。このことは、IIタイプの破断面の形成に、礫とマトリクスとの物性差による応力集中が生じた可能性を示唆しているものと思われる。

しかしながら、図-17、図-18および図-19に破断形態毎の一軸圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数の分布に示すように、供試体の力学的性質である一軸圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数には、破断形態毎の有意な差はみられない。このことは、IIタイプにおける応力集中の発

生は局部的であり、供試体の破壊に影響するものではないことを示している。

4. 考察

天然の礫混じり岩石として、北陸地方に分布する新第三紀中新世の凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩のボーリングコアを用い、岩石の力学的性質に及ぼす礫率の影響について検討した。

検討にあたり、含有する礫種については形状、色調、発泡の度合いについて肉眼的に識別できる礫種1～4に区分した。礫率にはほぼ実礫率に対応すると考えられる周面礫率を用いた。ボーリングコアから作成した供試体は、まず周面礫率の測定を行い、超音波伝播速度試験、礫とマトリックスの力学的性質の把握にエコーチップ測定を行った後、一軸圧縮試験に供した。

試験の結果、超音波伝播速度試験と一軸圧縮試験の結果、周面礫率と一軸圧縮強度、静弾性係数(E50)および動弾性係数との間に相関は認められなかった。これらの結果は、礫種、礫径の違いによらない(図-6および図-7)。礫率の増加により一軸圧縮強度がマトリックスの強度を下回るとした小林¹⁰⁾、小林・吉中¹²⁾、Kobaya-shi et al¹³⁾の結果、さらには逆にマトリックスの強度よりも増加するとした桜井他¹⁴⁾、岡田他¹⁵⁾の結果とも異なるように見える。後2者については粒度分布が連続的に変化する礫岩が対象であり、マトリックス中に礫が混入する小林¹⁰⁾、小林・吉中¹²⁾、Kobayashi et al¹³⁾および筆者らの礫混じり岩石とは異なっていることから、ここでは前3者について考察することとする。

小林¹⁰⁾、小林・吉中¹²⁾、Kobayashi et al¹³⁾は礫率の増加に伴うマトリックスに対する岩石の強度低下の要因を礫とマトリックス境界での応力集中としている。筆者らは、用いた岩石の力学的性質に関わる要因を検討する目的で、供試体表面に現れる破断面の発生部位を観察するとともに、周面礫率、礫部分の破断長さ、マトリックス部Ld値、礫部Ld値、およびマトリックス部と礫部とのLd値コントラストを指標に、それらが一軸圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数に与える影響の有無と程度について相関分析を実施した。マトリックス部Ld値、礫部Ld値、およびマトリックス部と礫部とのLd値コントラストを選定したのは、既往の研究によれば、礫とマトリックス部との力学的性質特に変形性のコントラストの大小が、岩石中の応力集中の有無と程度として力学的性質の発現に関与していると考えられているためである。

相関分析の結果、一軸圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数と正の相関を有するのは礫部分の破断長さ、マトリックス部Ld値、礫部Ld値であった。マトリックス部と礫部とのLd値コントラストについて正の相関が認められたの

は動弾性係数のみであった(表-2)。しかし、礫やマトリックスに対する破断面の位置が一軸圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数、周面礫率、マトリックス部と礫部とのLd値に与える影響と程度について検討した結果、破断面がマトリックスと礫との境界に位置して応力集中の効果を反映していると考えられるのはLd値コントラストが幾分高めのもの(図-16)で、一軸圧縮強度が小さい傾向(図-17)、動弾性係数が大きい傾向(図-19)を見ることができる。こうした傾向は上述の既往の研究のそれと一致するが、その現れは顕著とは言い難く、筆者らが用いた岩石の力学的性質の要因としては実用的には無視できる程度のものである。

このように既往の研究と筆者らの試験結果との違いを生じるに至った理由、すなわち礫とマトリックス間の応力集中とその結果を相殺するような要因を見出すためには、既往の研究に用いた材料と筆者らの検討で用いた岩石との違いを検討する必要がある。

まずあげられるのは既往の研究で用いられた岩石は人工岩石であり、礫とマトリックスの力学的性質が一定に管理されている点である。これに対して、筆者が用いた天然の岩石はLd値でみると礫、マトリックスとも力学的性質にはそれぞれかなりのバラツキが見られる(図-2)。また応力集中の有無と程度に関係するのはマトリックスと礫との力学的性質のコントラストであるが、既往の研究では小林⁹⁾が一軸圧縮強度比で1:16および1:36、静弾性係数比で1:27および1:43、小林・吉中¹²⁾が一軸圧縮強度比で1:14、静弾性係数比で1:27、動弾性係数比で1:29である。これに対し、筆者らが用いた岩石では一軸圧縮強度比が平均で1:2.3程度、最大でも1:10未満(図-4)、静弾性係数比が平均で1:2.5程度、最大でも1:10未満(図-5)と推定でき、既往の文献に比べるとかなり小さい。かつこれに上述の礫とマトリックスそれぞれの力学的性質に想定されるバラツキを考慮すると、全体として礫とマトリックスの力学的性質のコントラストが小さい中でさらにさまざまなコントラストの部分が混在することとなり、これが応力集中を起りにくくしている可能性が考えられる。

次に考えられるのは礫の大きさのバラツキと礫の形状である。礫の形状について小林⁹⁾は亜円礫に近いものであったとしている。これに対し筆者らの岩石は礫を取り出して計測することが困難な天然岩石であるが、コア表面での現れ方の例(図-14)で見るとさまざまな大きさの角礫であり、かつマトリックスとの境界が凹凸に富み入り組んでおり、礫種3や礫種4の一部にはマトリックス部分と漸移している見える部分もある。こうした形状上の特徴は、岩石中では、礫とマトリックスとの境界付近における応力集中やその進展を阻害する方向に作用する可能性が考えられる。

5. まとめ

北陸地方に分布する新第三紀中新世の凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩のボーリングコアを用いて超音波伝播速度試験、一軸圧縮試験を実施し、岩石の力学的性質に及ぼす礫率の影響について検討した。この結果、次の事項が判明した。

- (1) 礫種および礫径の如何によらず一軸圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数と周面礫率には相関関係が認められなかった。
- (2) この結果は礫率の増加に伴って、礫とマトリックス境界での応力集中の効果により、岩石強度はマトリックスの強度を下回る、とする人工岩石についての既往の研究の結果とは異なっている。
- (3) この原因は筆者らが用いた岩石にあり、応力集中を阻害したり緩和する方向に作用すると考えられる次の事柄による可能性をあげることができる。
 - a) 筆者らが用いた岩石は礫とマトリックスの力学的性質のコントラストが小さい材で、かつ礫、マトリックスとも L_d 値分布からみて力学的性質のパラッキが大きいと考えられる岩石であった。
 - b) 礫がさまざまな大きさの角礫で、かつ礫とマトリックスの境界が凹凸に富み入り組んでおり、マトリックスと礫が漸移するものも一部に認められる。

謝辞：本研究を進めるに当たり、埼玉大学工学部の吉中龍之進教授には、計画の当初から本文のまとめに至るまで、懇切な指導をいただきました。電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部の伊藤洋氏、野崎隆司氏、岡田哲実氏および大阪大学工学部の川崎了氏には貴重な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Voigt, W. : Über die Beziehung zwischen den beiden Elastizitätsconstanten isotroper Körper, Annalen der Physik und Chemie, vol. 38, pp. 573-587, 1889.
- 2) Reuss, A. : Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, vol. 9, pp. 49-58, 1929.
- 3) 大嶺 聖, 落合英俊 : 二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No. 448/III-19, pp. 121-130, 1992.
- 4) Buyukozturk, O., Nilson, A. H. and Slate, F. O. : Stress-Strain Response and Fracture of a Concrete Model in Biaxial Loading, Jour. of ACI, Vol. 68, pp. 590-599, Aug. 1971.
- 5) Liu, T. C. Y., Nilson, A. H. and Slate, F. O. : Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression, Jour. of ACI, Vol. 69, pp. 291-295, May 1972.
- 6) Wischers, V. G. and Lusche, M. : Einfluss der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton, Beton, pp. 343-347, Aug. 1972., pp. 397-403, Sept. 1972.
- 7) 小阪義夫, 谷川英雄, 太田福男 : コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響 第1報 : モデル解析法による検討, 日本建築学会論文報告集, 第228号, pp. 1-11, 1972.
- 8) 小林隆志 : 軟岩地下空間の開発における地質工学的研究 (その2) - 礫混じりの軟岩の強度・変形特性について -, 東電設計技術研究誌, No. 6, pp. 148-155, 1991.
- 9) 小林隆志 : 礫混じり軟岩の工学的性質に関する研究 (その3) - マトリックスの性質が及ぼす影響について -, 東電設計技術研究誌, No. 7, pp. 149-156, 1992.
- 10) 小林隆志 : 礫混じり軟岩の工学的性質に関する研究 (その4) - 礫の含有量と強度特性の関係について -, 東電設計技術研究誌, No. 8, pp. 130-135, 1993.
- 11) 小林隆志 : 礫混じり軟岩の工学的性質に関する研究 (その5) - 礫径による強度特性への影響および強度特性の推定方法 -, 東電設計技術研究誌, No. 9, pp. 109-115, 1994.
- 12) 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, pp. 31-40, 1994.
- 13) Kobayashi, T., Mimuro, T. and Yoshinaka, R. : Mechanical properties and failure mechanism of gravelly soft rocks, Rock Foundation, Yoshinaka & Kikuchi (eds), 1995.
- 14) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 土田 晃, 小池信司, 篠田知堅, 芥川真一 : 不均質性岩盤の境界ひずみについて, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp. 185-190, 1996.
- 15) 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, 第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1999.
- 16) 川崎 了, 中川加明一郎, 江藤芳武, 野崎明人 : 礫岩の力学特性-室内試験による礫岩コアの品質評価-, 電力中央研究所報告, 研究報告 U97048, 1997.
- 17) 川崎 了, 中川加明一郎, 江藤芳武, 野崎明人, 小泉和広 : 方解石含有率に着目した大深度堆積礫岩の物性に関する検討, 応用地質, 第38巻, 第5号, pp. 252-264, 1997.
- 18) 川崎 了, 中川加明一郎, 江藤芳武, 野崎明人, 小泉和広 : 室内試験による大深度礫岩コアの品質評価, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 77-87, 1999.
- 19) 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, 第53回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 676-677, 1998.
- 20) 橋本 徹, 片川秀基, 村上弘行 : エコーチップ硬さ試験器による岩石材料の物性評価の試み, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1231-1232, 1998.

(1999. 7. 2 受付)

THE INFLUENCE OF THE GRAVEL CONTENT TO THE MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL GRAVELLY ROCK

Hideki KATAGAWA, Toru HASHIMOTO, Syuji HIRANO and Hiroyuki MURAKAMI

We authors investigated the effects of mechanical properties of gravel and gravel content to the mechanical properties of gravelly rock, using boring-cores from breccia-type andesite and tuff breccia, Neogene volcanic gravelly rocks in Hokuriku district, which have relatively lower contrast in mechanical properties between gravel and matrix. The result are as follow:

- (1) No relationship was recognized between gravel content measured around core sample and mechanical properties of rock as q_u , E_{50} and modulus of dynamic elasticity.
- (2) As for the mode of rock failure, in a little case the stress concentration effect was recognized at the boundary between gravel and matrix. But, in most of cases, we were not able to recognize the stress concentration effect between them.