

人工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)

北陸地方の新第三紀火山岩類に属する凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩を模擬すべく、礫とマトリックスとの力学的性質の差異が小さな領域を対象とした人工の礫混じり岩石を作成し、一軸圧縮試験を実施して、礫率と岩石の力学的性質との関係を調べた。この結果、礫率の増加に伴い、一軸圧縮強度、破壊ひずみ、限界ひずみにはいずれも低下傾向が認められた。これらの結果は、一軸圧縮強度などの力学的性質と礫率との明瞭な相関性が認められなかった上述の天然の礫混じり岩石とは異なる結果であり、天然の礫混じり岩石については、礫率のみならず力学的性質に関与する要因は多く、それらを含めた検討の必要性を示唆しているものと考えられる。

Key Words : artificial gravelly rock, gravel content, stress-strain relationship, equotip hardness tester, unconfined compression strength, breccia

1. はじめに

強度、変形性が異な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、大嶺・落合¹⁾は混合体の応力-ひずみ関係について、Voigt, Reuss 以降の従来の研究をまとめている。しかし、土木分野における主要な材料のひとつである岩石、基礎岩盤を構成する天然の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、たとえば礫なら礫に関わるどのような性質が力学的性質に影響してい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²⁾。その理由としては、礫混じり岩石・岩盤の場合、礫や岩塊の形態や存在量、ならびにそれらの物理的性質および力学的性質を把握することが難しいためと考えられる。

最近、礫混じり岩石の強度、変形性と礫含有率(本文中では以下礫率と呼ぶ)との関係について、人工材料や数値解析を用いた研究が報告されている。小林^{3)~6)}、小林・吉中⁷⁾、Kobayashi et al⁸⁾によれば、礫混じり岩石の強度がマトリックス部の最大強度と残留強度および礫率で評価できる可能性などが述べられている。礫が混じることによる強度低下のメカニズムについて、彼らは、FEM解析の結果から礫・マトリックス境界の応力集中に着目している。応力集中では礫の形状と礫とマトリックスの力学的性質の差異、特に強度比、弾性係数比が重要であり、礫とマトリッ

クスとの強度比、弾性係数比が大きい場合に応力集中の効果が現れやすいとしている。また、桜井他⁹⁾は、不均一性岩盤の限界ひずみを検討するにあたり、硬材、軟材といった異なる力学的性質を有する2種類の材料から不均一材料を人工的に作成して室内試験を行った結果、不均一材料の限界ひずみは、一軸圧縮状態においてはそれを構成する各々の均一材料の限界ひずみよりもかなり小さくなるケースがあるとしている。

一方、コンクリートの分野においては、母材モルタルに対する骨材の力学的性質や骨材の混入量がコンクリートの破壊の進行、強度に与える影響について、いくつかの研究がある。Buyukozturk et al¹⁰⁾、Liu et al¹¹⁾は、圧縮試験を用いてモデルコンクリートにおける破壊の進行を調べ、コンクリートの最大耐力に至る過程で、まずボンドクラックが発生し、ついでモルタルクラックの発生、そしてボンドクラックとモルタルクラックが連結し、これらのクラックが載荷軸方向に連続して試験体が分離することにより破壊に至ることを明らかにした。モルタルクラックの形成に先行してボンドクラックが形成されることは、礫混じり岩石においては、礫の存在が岩石の破壊挙動、強度の発現に大きく影響することを示唆する。ボンドクラックが生じる理由について Wischers・Lusche¹²⁾は、円柱状および角柱状骨材を使用したモデルコンクリートで圧縮試験を行って、骨材の形状および骨材間隔によって応力集中係数が著しく異なることを示した。これは、骨材の形状や骨材

の混入率が応力集中に関与する可能性、換言すれば礫混じり岩石の強度に礫の形状と礫率が関与する可能性を示唆する。小阪他¹³⁾は母材と骨材の付着強度に着目し、それが破壊挙動にどのように関わっているのかを、円柱状骨材を1個埋め込んだモデルコンクリートの圧縮試験を行って調べた。この結果、骨材強度の如何によらずまずボンドクラックが発生し、その後クラックの進展、破壊に至る過程にはモルタルと骨材の強度の大小が関与していることを示した。また、彼らは、球形モデル骨材を作成し、これがランダムに混入した円柱形試験体の一軸圧縮試験を行い、骨材の品質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響についても調査している。これによれば、骨材の強度によらず骨材が混入すると母材モルタルの強度に対しコンクリートの強度は小さくなることを示した。

以上の検討はいずれも理想化された人工材料であり、天然の岩石についてその実態が調査され、検討がなされた例としては川崎他^{14), 15), 16)}、橋本他¹⁷⁾、片川他²⁾が挙げられる。川崎他¹⁴⁾、川崎他^{15), 16)}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岩含有率が15%以下のものについて、礫含有率の増加に伴って q_c/q_u の減少傾向、S波速度の増加の傾向を報告している。

橋本他^{17), 18)}および片川他²⁾は、礫混じり岩石について礫の性質、礫の分布を把握するための基礎的研究を行うとともに、これを天然の礫混じり岩石に適用して、礫率と岩石の力学的挙動についての既往の知見の適用可能性について検証を行った。これらにおいて用いられた天然の礫混じり岩石は、我が国では比較的分布が多いと思われる新第三紀の凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩である。この結果、礫率と一軸圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数との相関関係は認められず、礫率の増加に伴い礫とマトリックスとの境界での応力集中により岩石強度がマトリックスの強度を下回るとする既往の研究の結果とは異なる。この原因について彼らは、彼らが用いた天然の礫混じり岩石においては、礫とマトリックスとの境界における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2つの事柄を可能性としてあげることができるとしている。第一は、彼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な材料で、かつ礫、マトリックスとも d 値分布からみて力学的性質のパラツキが大きいと考えられる岩石であったことである。第二は、礫がさまざまな大きさの角礫で、既往の研究で用いられた大きさが規定された亜円礫とは異なっていること、かつ礫とマトリックスの境界が凹凸に富んで入り組み礫とマトリックスが漸移するものも一部に認められることである。

本研究は彼らがあげた第一の可能性について検討を行ったものである。ここでは上述の天然の岩石を模擬して、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

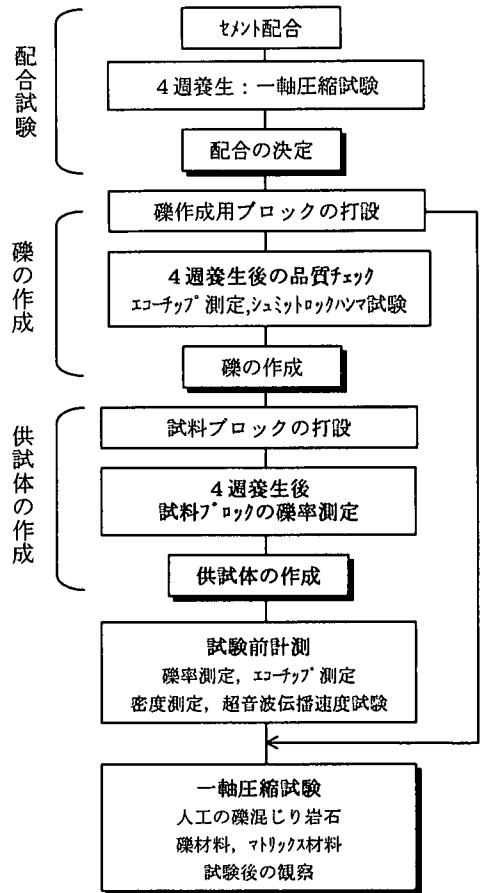


図-1 試験のフロー

人工の礫混じり岩石を作成し、超音波伝播速度試験、一軸圧縮試験を実施して礫率と岩石の力学的性質との関係を調査した。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、結果が意味するところについて若干の考察を行う。

2. 人工岩石試験

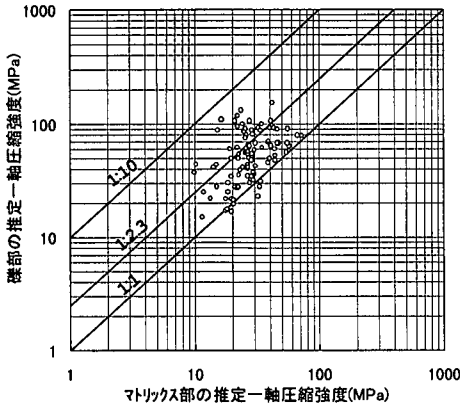
(1) 試験の概要

礫混じり岩石の強度、変形性と礫率との関係を調べるため、天然の礫混じり岩石を模擬すべく礫とマトリックスからなる人工岩石を作成し、一軸圧縮試験を実施した。試験のフローを図-1に示す。

人工岩石は、礫、マトリックスともセメントと水に珪藻土を加えた混合材料を用い、力学的性質について橋本他¹⁷⁾、片川他²⁾が調査した北陸地方の新第三紀中新世の凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩を模擬すべく作成した。礫については4種類を作成した。礫は事前に礫作成用ブロックとして打設、養生した後、所定のサイズ、形状に成形して作成しておき、これを所定の体積礫率0%、20%、40%、60%で配合し、30cm×30cm×30cmのサイズに打設した。これらの

表一 模擬する自然岩の物理試験結果

岩種		凝灰角礫岩	角礫岩状安山岩	安山岩溶岩
個数		35	75	123
密度 (g/cm ³)	平均値	2.27	2.31	2.68
	変動係数	3.2%	4.3%	1.9%
含水率 (%)	平均値	13.40	12.17	1.34
	変動係数	26.4%	18.3%	41.7%
有効間隙率 (%)	平均値	26.66	24.95	3.53
	変動係数	18.5%	13.7%	38.8%



図一 自然岩のマトリックス部と礫部の推定一軸圧縮強度

試料ブロックは、打設後4週時に表面の礫の分布状態を観察した。その後、コアリングによりφ100mm×200mmの円柱状供試体3本を得た。供試体は水中養生したのち、周面と上下面の礫の分布状態を観察し、各種試験前計測ならびに一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験の実施中、実施後には供試体表面の観察を行った。観察は亀裂と礫との位置関係について、試験中には亀裂の発達過程を、試験後には礫やマトリックスの分布に占める亀裂の位置関係などについて行い、スケッチを作成した。

(2) 人工岩石の作成

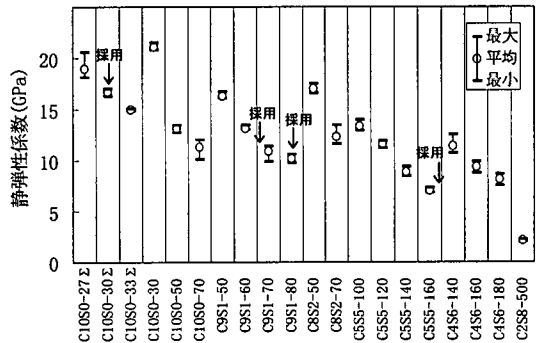
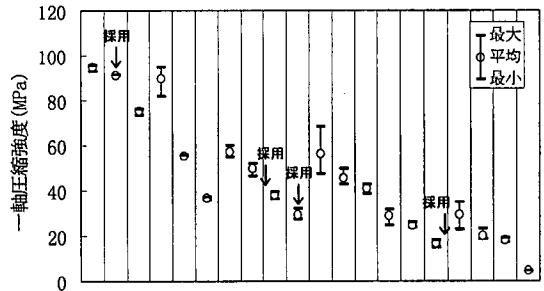
a) 配合試験

人工岩石は、礫、マトリックスともセメントと水に珪藻土を加えた混合材料を用いた。

橋本他¹⁷⁾、片川他²⁾の新第三紀中新世の凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩は、ポーラスな凝灰岩のマトリックス中に安山岩質の角礫を含んでいる。物理試験の結果を表一に示す。

角礫は安山岩溶岩に近いものからマトリックスの凝灰岩に類似したものまで礫種1から礫種4の4種類が識別されており、その形状はさまざまである。このうち、礫種4については色調、組織ともマトリックスのそれと大差ないものが多く、他の礫種と比べると、礫とマトリックスとの境界はしばしば不明瞭で複雑に入り組んでいる。

これらの礫種およびマトリックスについて示されたエコーチップ測定結果の平均値と橋本他¹⁸⁾が求めたLd値-q u関係から推定したそれぞれの一軸圧縮強度を図一2



注)例C10S0-30Σ:

(重量比でセメント:珪藻土=10:0, W/C=30%, Σ:Σ5000を添加)

図一 配合と試験結果一覧

表一 マトリックスおよび礫材料のセメント配合

種類	目標強度 (MPa)	セメント量 (重量比)	珪藻土量 (重量比)	W/C (%)
マトリックス				
礫種A	14.7	5	5	165
礫種B	29.4	9	1	80
礫種C	44.1	9	1	65
礫種D	98.1	10	0	30

注) 98.1MPaの配合には添加剤としてΣ5000を使用。

に示す。これによれば、一軸圧縮強度コントラストは平均1:2.3, 最大でも1:10未満である。また、弾性係数についても同様な傾向である。なお礫率はφ5cm, 長さ10cmの円柱状供試体の周面礫率として60%程度以下がほとんどである。

これらのことから人工岩石は、ひとつのマトリックス材料に対し礫材料として強度、変形性が異なる礫種Aから礫種Dの4種類を設定し、各礫種毎にマトリックス材料と混合して0%, 20%, 40%, 60%の4つの体積率率について試料を作成することとした。

マトリックスと各礫種についての目標とする品質は打設後4週の一軸圧縮強度で、マトリックスを14.7MPa, 礫種Aを14.7MPa, 礫種Bを29.4MPa, 礫種Cを44.1MPa, 礫種Dを98.1MPaと設定し、配合の検討を行った。検討に用いた配合と材料試験の結果を図一3に、この結果に基づいて設定した各部材の配合を表一に示す。

b) 礫の作成

凝灰角礫岩中、角礫岩状安山岩中の礫は角礫である。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いる。こうした角礫を人工的に作成することは難しく、ここでは従来の研究で多く用いられていた球に対するものとして単純化し、立方体を用いることにした。礫の大きさは、供試体径の1/5以下が望ましいとされており、一軸圧縮試験を行う供試体が $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ であることから一辺を2cmの立方体とした。礫は上述した礫種A～礫種Dの4種類の配合で $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の立方体で礫作成用ブロックを打設した。4週養生後ダイヤモンドカッタを用いて礫を切り出した。切り出した礫は、サンダを用いて礫表面の粗度を粗くするとともに角とりを行った。また、礫作成用ブロック打設時に、別途 $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱状供試体を作成し、人工の礫混じり岩石と同時に一軸圧縮試験を行い、人工の礫混じり岩石に含まれる礫材料の強度・変形特性を把握した。

c) 供試体の作成

礫種A～礫種Dのそれぞれの礫種について、マトリックス用配合のセメント・珪藻土・水混合材料中に0%、20%、40%、60%所定の体積礫率で礫を混入し、十分な攪拌を行って $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の立方体で試料ブロックを打設した。試料ブロック打設から4週後、一軸圧縮試験で強度などを確認したのち、左右両面をそれぞれ5cm程度カットし、これらの面に直交して水平方向に $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の供試体を、3本抜き取った。このうち、礫率0%の供試体については、人工の礫混じり岩石に含まれるマトリックス材料の強度・変形特性として把握した。

(3) 計測・観察

計測は、礫作成用ブロックについて4週強度などの確認後にエコーチップ測定、シュミットロックハンマ試験を行った。試料ブロックについては、4週養生後に礫率測定、超音波伝播速度試験を、試料ブロックから抜き出した供試体については礫率測定、エコーチップ測定、密度測定、超音波伝播速度試験を実施した後、一軸圧縮試験に供した。観察は試料ブロック表面および試験前の供試体表面について礫の賦存状態について行うとともに、試験中、試験後の供試体について亀裂の発達状況、亀裂の分布を観察、スケッチした。

a) 礫率測定

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もつ球状礫の体積比を推定する方法として、小林⁹⁾、小林・吉中⁷⁾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、礫径との関係で最小限必要な調査対象の広がりについて、礫率に対する面積含有率のパラツキ

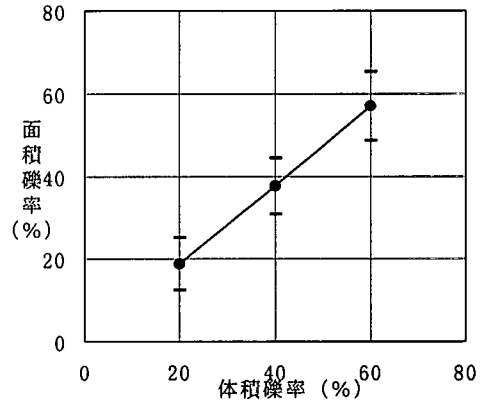


図-4 体積礫率と計測による面積礫率の関係

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以下にできるとしている。一方、ボーリングコアや円柱状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を算出する方法、(b)ボーリングコア表面に測線を設け、測線全長に占める礫の長さの割合を算出する方法、(c)ボーリングコア表面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などが考えられる。

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。同様の方法は橋本他¹⁷⁾、片川他²⁾においても周面礫率として礫率の指標に用いられている。本論文では、体積礫率として管理された試料ブロックおよびこれから切り出す円柱状供試体を用いたことから、これら試料の表面計測から得られる礫率と実際の体積礫率との関係をも調査した。礫率測定は試料ブロックについては小林⁹⁾、小林・吉中⁷⁾の面積含有率(以下面積礫率という)を、円柱状供試体については川崎他¹⁰⁾、橋本他¹⁷⁾と同様に周面礫率を採用し、それぞれについて体積礫率との対応関係を調べた。面積礫率は、試料ブロックの上面と2つの側面について、それぞれの面積に占める礫部分の面積の割合を、周面礫率は礫の分布について供試体周面の展開図を作成し、供試体周面の面積に占める礫の面積の割合を算出した。

試料ブロックそれぞれについて上面と側面について測定した面積礫率について、既知の体積礫率との関係を図-4に示す。3面の平均値でみると、面積礫率はほぼ体積礫率に近い値を示している。上面面積礫率については体積礫率20%に対して14.9%、40%に対して33.2%、60%に対して50.1%と体積礫率よりも5~10%程度小さい。側面面積礫率については体積礫率20%に対し20.9%、40%に対して40.1%、60%に対して60.4%と体積礫率とほぼ同じ値となっている。これは礫混入後試料ブロックの固化が進

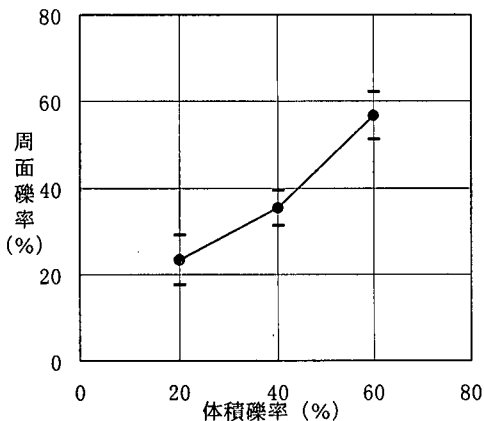


図-5 体積礫率と計測による周面礫率の関係

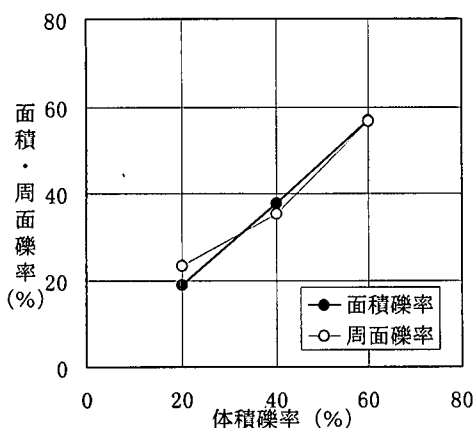


図-6 体積礫率と計測による礫率の比較

むまでの間に進行した礫の沈降によるものと考えられる。一方、体積礫率に対し面積礫率のバラツキは、体積礫率20%で±6.4%、40%で±6.8%、60%で±8.3%である。

供試体について測定した周面礫率について、既知の体積礫率との関係を図-5に示す。周面礫率はほぼ体積礫率に20%に対し23.3%、40%に対して35.2%、60%に対して56.6%となっている。また、体積礫率に対し、周面礫率のバラツキはほぼ体積礫率20%で±5.8%、40%で±4.1%、60%で±5.5%である。

図-6に周面礫率と側面積礫率の平均値を比較した。礫率20%を除き両者はほぼ一致している。礫率20%では、周面礫率は体積礫率に比べやや大きめの値を示すようであるが、面積礫率および周面礫率はほぼ変動係数0.3以下で体積礫率を評価できることが実際の人工モデルで確認することができた。

b) エコーチップ測定

礫作成用ブロックならびに供試体については礫、マトリックスそれぞれの力学的性質とバラツキの程度を調査するため、エコーチップ測定¹⁰⁾を実施した。なお、マトリックスや礫種Aなどの人工岩石について予備的に実施した

表-3 マトリックスと礫のLd値のバラツキ

礫種区分	礫作成用ブロックのLd値	φ10cm 供試体		マトリックス供試体
		礫部Ld値	マトリックスLd値	
礫種A	336 (12)	323 (24)	268 (28)	257(25)
礫種B	330 (11)	321 (27)	300 (40)	332(31)
礫種C	368 (28)	364 (39)	296 (41)	286(14)
礫種D	539 (20)	505 (49)	266 (48)	254(18)

注) ()内の値は標準偏差を示す。なお、礫作成用ブロックの測定数は18データ、φ10cmの供試体は各54データ、マトリックス供試体は18データである。

測定の結果、打撃に伴って打撃点にくぼみが生じ、試験器先端のテストチップが試験面を打撃しない現象が認められた。そのため一回目の値を品質のチェックに用いる値とした。

礫種毎に、礫作成用ブロックで実施したエコーチップLd値とφ10cm 供試体におけるマトリックス部および礫部とのLd値の平均値とバラツキを表-3にまとめた。

φ10cm 供試体に含まれる礫およびマトリックスは、それぞれ礫作成用ブロックおよびマトリックス供試体とほぼ同程度のLd値およびバラツキを示しており、礫混じり岩石に含まれる礫およびマトリックス個々の物性にほとんど差異はないものと考えられる。

c) 密度測定、超音波伝播速度試験

供試体については、同一礫種、同一礫率の供試体間における礫分布の偏りの程度を調査するため、また供試体の動的変形特性を把握するため超音波伝播速度試験と密度測定(ノギス法)を実施した。試験、測定は水中養生後、一軸圧縮試験の前に実施した。試験結果を表-4に示す。

供試体は水中養生した後一軸圧縮試験に供するが、この間、観察、各種計測、超音波伝播速度試験を行うほか、一軸圧縮試験用のひずみゲージの貼付作業と機械への設置作業を行うので、供試体を空気中に取り出してからの物性変化を湿潤密度、超音波伝播速度試験によるP波速度、S波速度について調査した。この結果を図-7に示す。

それぞれ、時間の経過に伴って顕著な変化はないが、湿潤密度に若干の低下傾向があり、空気中に取り出して一軸圧縮試験に供するまでの時間を2時間とした。

d) 一軸圧縮試験

人工的に作成した4種類の礫種それぞれについて、体積礫率0%、20%、40%、60%でマトリックス中に混入して作成した試料ブロック16個から円柱供試体として各3個を切り出した48供試体について、各種試験前測定を実施した後に一軸圧縮試験を実施した。試験はひずみ制御で、荷重速度は0.1%/minである。一軸圧縮試験にあたり、ひずみ測定には、供試体全体の挙動と礫の存在による局所的な挙動との関連性を調査するとともに、礫混じり岩石の一軸圧縮試験に適した方法を探る目的で外部変位計、ひずみゲージ、LDTを併用した。これらの配置を模式的に図-

表-4 物理試験結果一覧表

薬率(%)	薬種A				薬種B				薬種C				薬種D			
	0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
密度	1.51	1.53	1.54	1.56	1.58	1.61	1.63	1.65	1.57	1.62	1.67	1.71	1.51	1.70	1.76	1.95
P波速度	2.67	2.49	2.54	2.62	2.84	3.00	2.69	2.71	2.82	2.76	2.73	2.82	2.62	3.12	3.08	3.60
S波速度	1.22	1.13	1.12	1.19	1.38	1.50	1.29	1.32	1.33	1.29	1.33	1.34	1.20	1.56	1.60	1.70

注) 密度: g/cm³, P波, S波速度: km/s

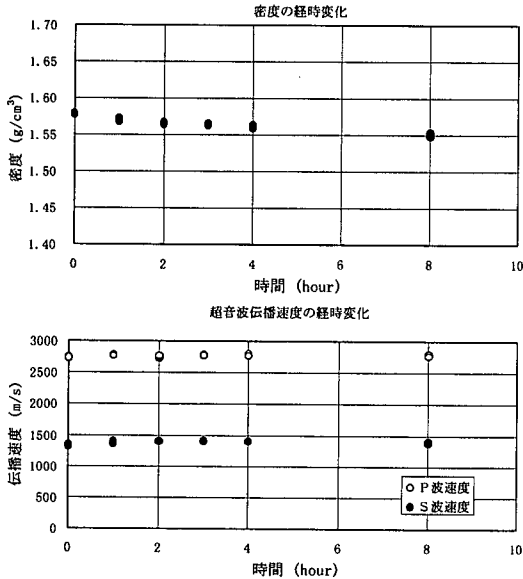
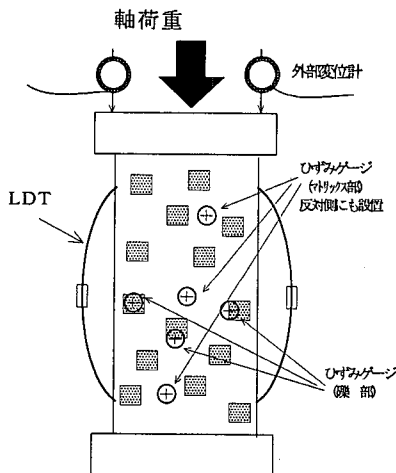


図-7 水中養生状態から空中に放置した状態における湿潤密度, P波速度, S波速度の変化(薬率0%)



供試体端面は, コアカッターで切断後, カーボラダム#180で研磨した。

図-8 ひずみゲージおよびLDTの配置模式図

8に示す。変位計, ひずみゲージ, LDTの仕様は表-5に示す。

変位計は供試体上面の左右2箇所に配置した。LDTは供試体の中心軸に対称となる1対を配置した。ひずみ

表-5 使用したひずみ計の主な仕様

計器名	仕様
外部変位計	測定範囲: 0~20mm 分解能: 0.001 [mm/digit]
ひずみゲージ	測定範囲: 0~5mm 分解能: 1.0×10 ⁻⁶ [strain/digit]
LDT	測定範囲: 0~160mm 分解能 4×10 ⁻⁴ [mm/digit] (ε=0%) 2×10 ⁻³ [mm/digit] (ε=1%)

表-6 薬とマトリックスの強度比および静弾性係数比

区分	薬種	マトリックス材料	薬材料	比
一軸圧縮強度 (Mpa)	薬種A	16.9(14.7)	14.9(14.7)	0.9 (1)
	薬種B	30.7(14.7)	26.3(29.4)	0.9 (2)
	薬種C	18.7(14.7)	41.8(44.1)	2.2 (3)
	薬種D	18.2(14.7)	89.9(98.1)	4.9(6.6)
静弾性係数 (Gpa)	薬種A	6.3	7.2	1.1
	薬種B	8.5	6.6	0.8
	薬種C	7.7	8.2	1.1
	薬種D	6.1	16.3	2.7

注) () 内の値は目標値。マトリックス材料は, 薬率0%の供試体各3試料の平均値。薬材料は, 各2試料の平均値。

ゲージは薬, マトリックスおよび薬・マトリックス境界での挙動と供試体全体の挙動とを調査するため, 細かく配置した。薬, 薬・マトリックス境界については, 供試体中程の代表的な薬を選定し, 薬中央, 薬上下境界部, 薬左右境界部の3箇所設置した。マトリックスについても表面と裏面それぞれ供試体の中程, 上下方各1箇所, 3箇所設置した。1供試体あたりのひずみゲージ設置箇所は9箇所である。

薬種毎に作成したマトリックスの力学的性質と薬とマトリックスの強度比および静弾性係数比を表-6に示す。作成されたマトリックス材料は, 薬種Bで30.7MPaと想定以上の強い強度が発現したが, 薬種A, 薬種C, 薬種Dでは目標強度を若干上回る程度であり, 設定した強度比を若干下回る結果となった。薬材料については, 概ね目標強度に近い値となった。結果として, 強度比で薬種A, 薬種Bで0.9, 薬種Cで2.2, 薬種Dで4.9の試験条件となった。

3. 人工岩石試験の結果

(1) ひずみ測定法間での静弾性係数の比較

体積薬率0%, 20%, 40%, 60%で作成した供試体の応力-ひずみ曲線のうち, 薬種A~薬種Dの各薬種における代表例を図-9に示す。図中で応力-ひずみ曲線は, 外部変位計, LDT, およびひずみゲージそれぞれについてのもを示している。これに用いたひずみゲージは, 供試体の上部, 中部, 下部においてマトリックスに貼付したものである。これらの配置については図-8に示している。

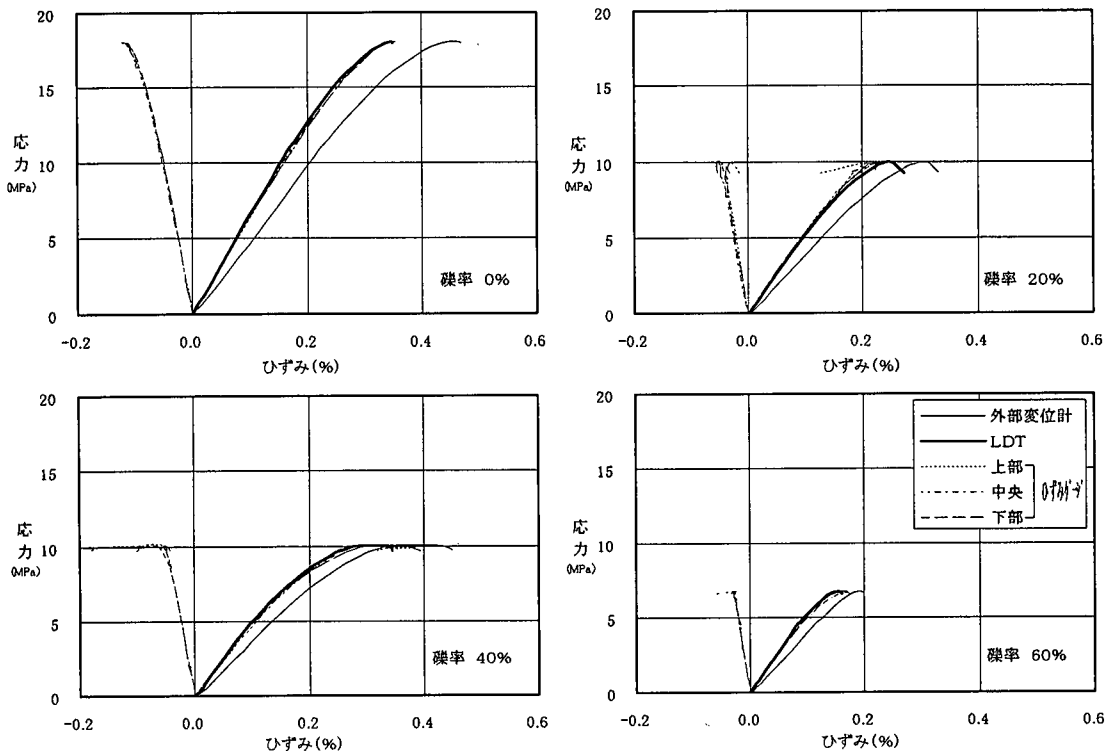


図-9 (1) 礫種A 供試体の応力～ひずみ曲線

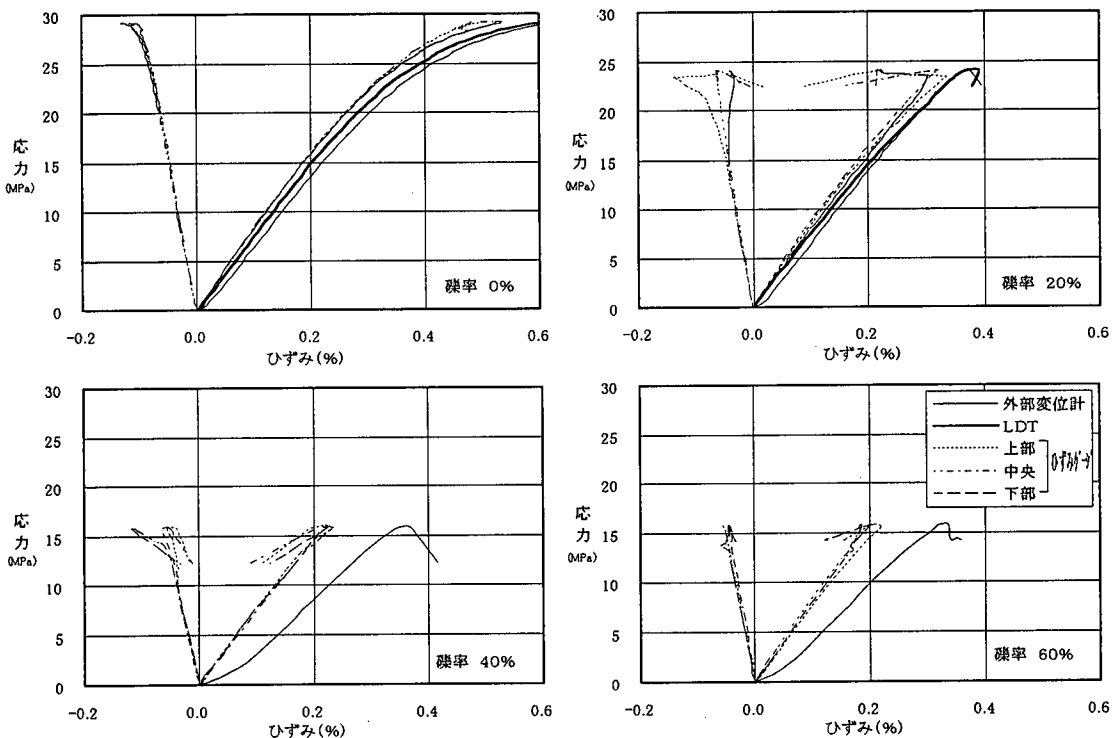


図-9 (2) 礫種B 供試体の応力～ひずみ曲線

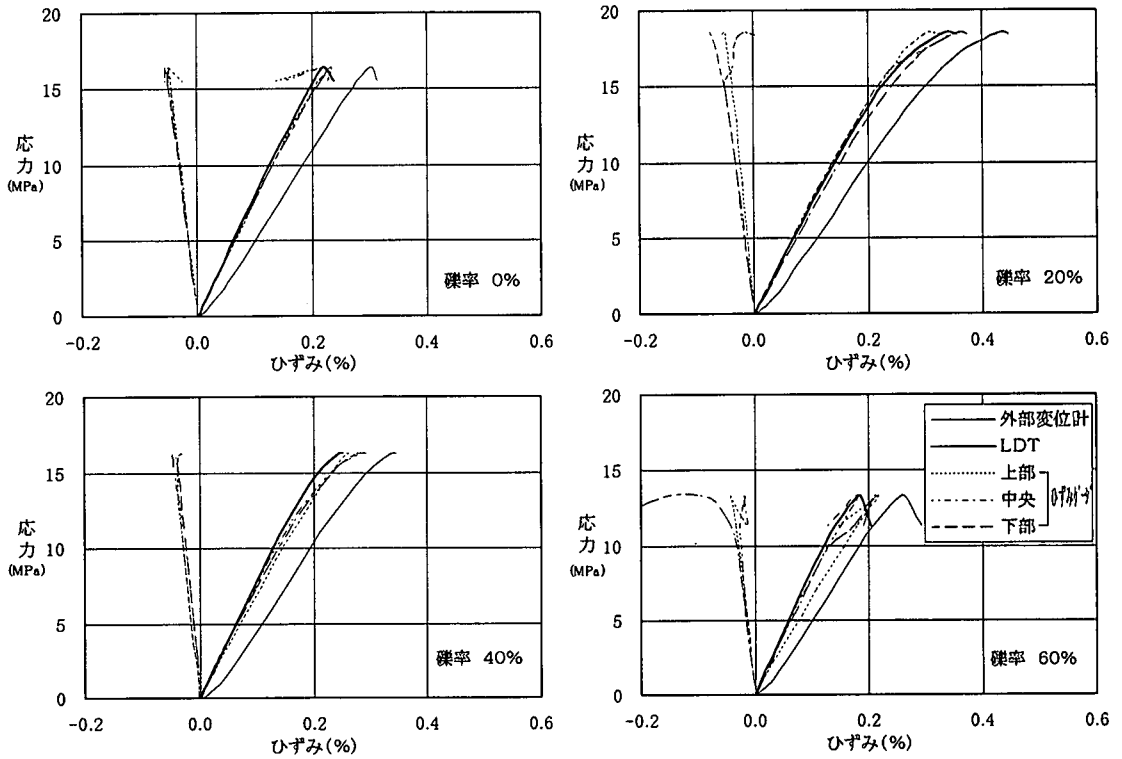


図-9 (3) 礫種C供試体の応力～ひずみ曲線

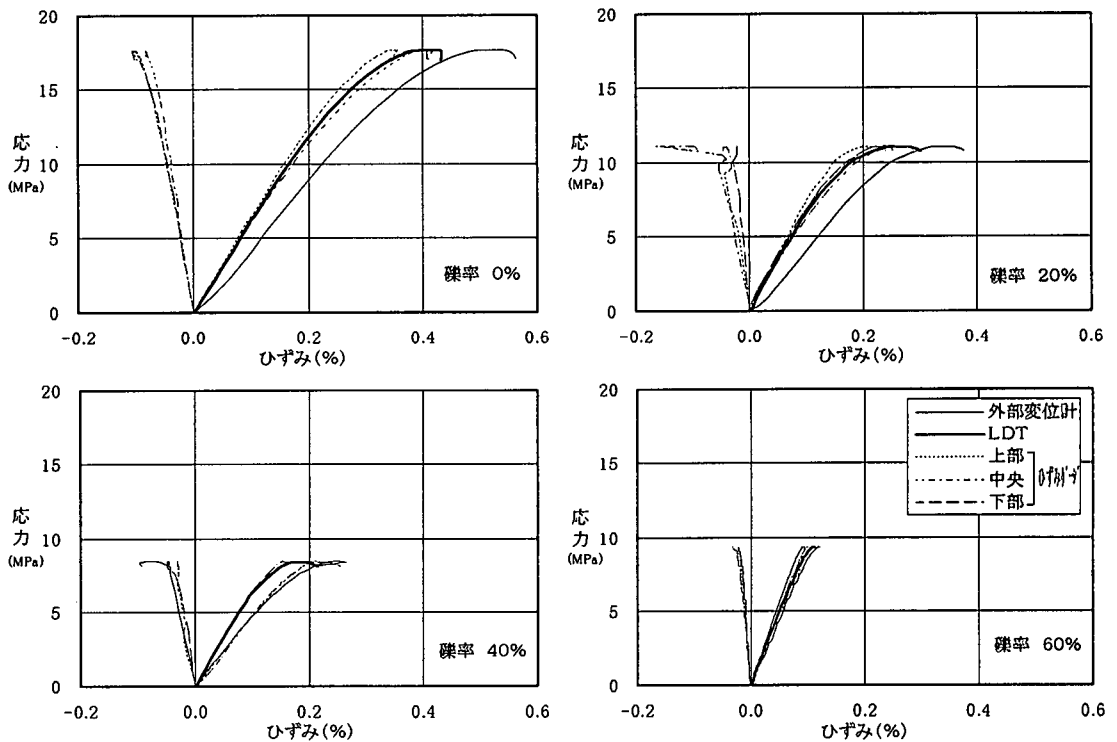


図-9 (4) 礫種D供試体の応力～ひずみ曲線

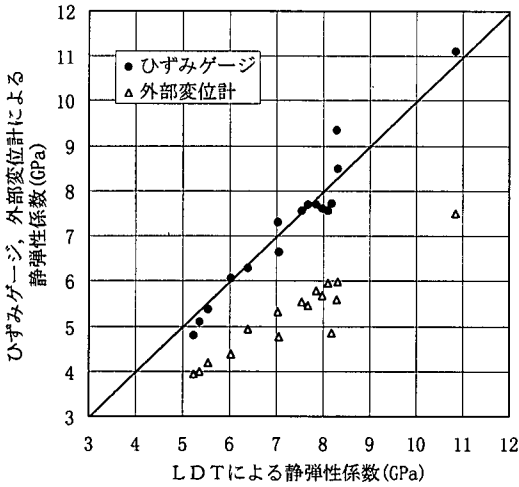


図-10 各種ひずみ計による静弾性係数の比較

また、図-10には静弾性係数についてLDTによる静弾性係数とひずみゲージ、外部変位計による静弾性係数との比較結果を示す。図-9および図-10によると、LDTとひずみゲージでの結果はほぼ一致しているが、これらは外部変位計による結果とは異なっている。外部変位計は前二者に比べて同一応力でのひずみが大きい。また、供試体の上部、中央、下部それぞれのマトリックスのひずみはLDTで示される供試体全体のひずみとほぼ同様の挙動を示している。

(2) 薬率—軸圧縮強度、弾性係数、破壊ひずみ、限界ひずみ

正規化強度と薬率との関係を図-11に、正規化静弾性係数と薬率との関係を図-12に示す。ここにおいて正規化とは、薬率0%での一軸圧縮強度や静弾性係数の平均値を1とし、各薬率での一軸圧縮強度や静弾性係数をこれとの比で表現したものである。このほか薬率と破壊ひずみとの関係を図-13に、薬率と限界ひずみとの関係を図-14に、超音波伝播速度試験から求まるP波速度、S波速度から算出した正規化動弾性係数と薬率との関係を図-15に示す。ここで限界ひずみは桜井¹⁰⁾による。

図-11では、いずれの薬種においても薬率の増加に伴う一軸圧縮強度の低下が認められる。薬種Cの試料では、薬率20%まで微減、薬率40%、60%で低下傾向は大となる。薬率60%での強度の低下は当初の70%である。薬種A、薬種Dの試料では、一軸圧縮強度は薬率20%まで急速に低下し、薬率40%、60%ではほぼ一様ないし微減である。薬種Bの試料の変化は両者に対し中間的で、薬率の増加にともないほぼ一様に強度が低下している。薬率40%と60%間で低下傾向はやや小さくなっている。

図-12では、物性コントラストがほとんどない薬種A～薬種Cの試料では、薬率の増加に伴い、静弾性係数に特定

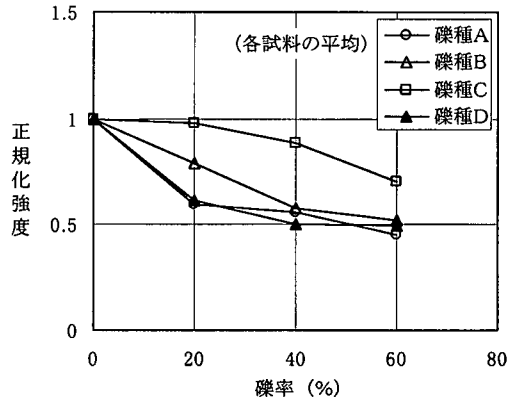
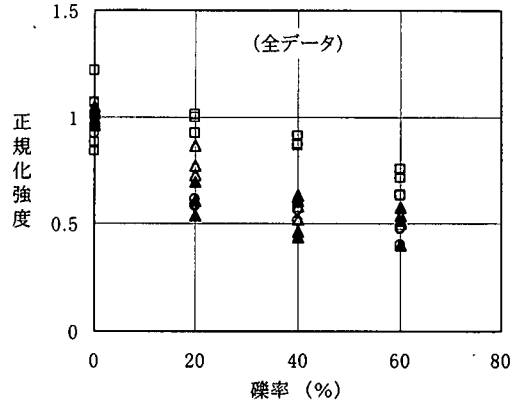


図-11 正規化強度と薬率の関係

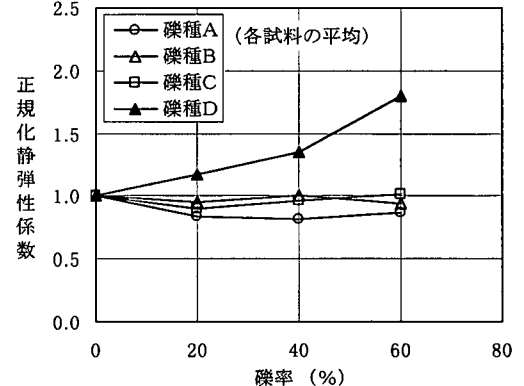
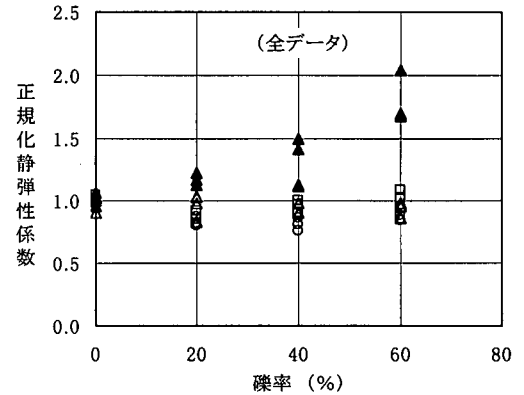


図-12 正規化静弾性係数と薬率の関係

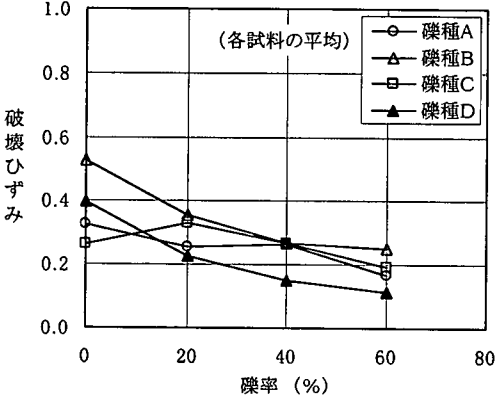
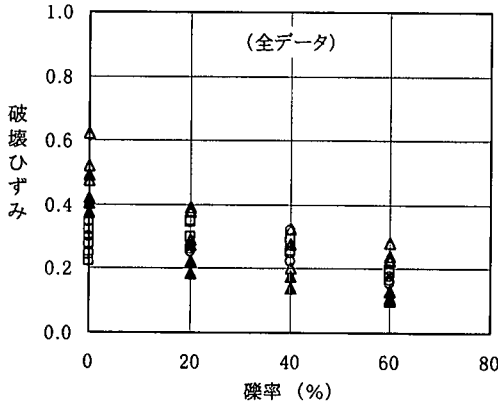


図-13 破壊ひずみと薬率の関係

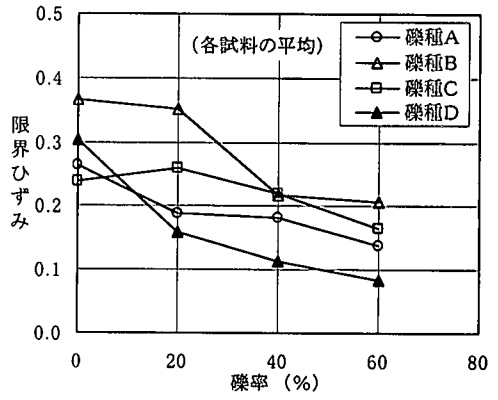
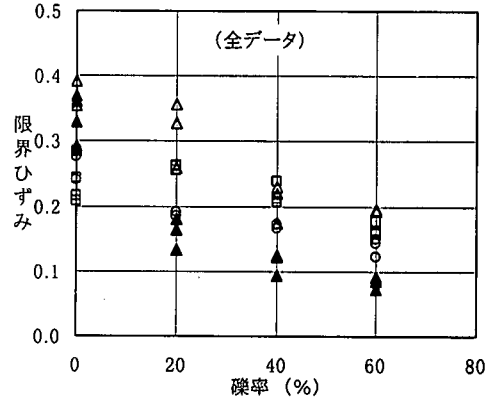


図-14 限界ひずみと薬率の関係

の変化傾向は認められない。物性コントラストが大きい薬種Dでは、薬率の増加に伴って静弾性係数の増加傾向は顕著となり増加率も大きくなる。

図-13では、LDTによる破壊ひずみを比較する(薬種Bの試料については試験中にLDTが外れたものがあることから、供試体中央に貼付したひずみゲージの値を用いた)と、大きな傾向として薬率の増加に伴って破壊ひずみは減少する。しかし、減少の仕方は一様ではなく、試料毎に異なっている。限界ひずみも同様に、図-14では、大きな傾向として薬率の増加に伴って減少する。

図-15では、静弾性係数と同様、薬種Dの試料においては薬率の増加とともに増加傾向が見られるが、薬種Dの試料を除くいずれの薬種の試料においても動弾性係数に大きな変化は認められない。

(3) 試験中の亀裂の発達と一軸圧縮強度、静弾性係数

供試体表面における亀裂の分布状況について薬種A～薬種Dの試料のスケッチの例を図-16に示す。図中にはひずみゲージの位置もあわせて示している。図からは、薬率によらず、薬種Aの試料では薬種Dの試料に比べ薬を切る亀裂の分布が目につく。薬とマトリックスの強度比、静弾性係数比と供試体表面の薬の全数に対する破断した割合との関係を図-17に示す。図より、薬とマトリックスの

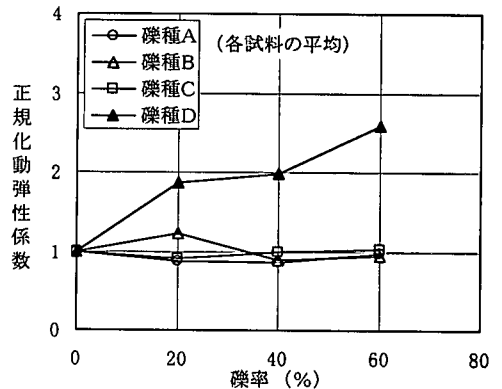
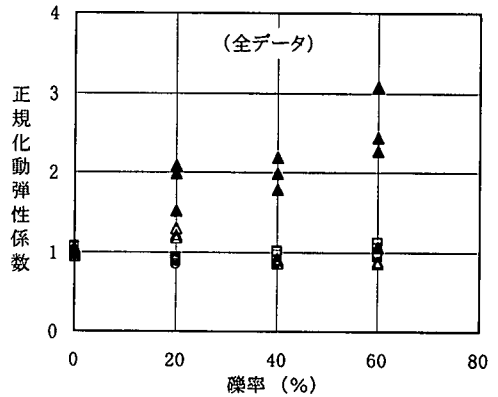


図-15 正規化動弾性係数と薬率の関係

強度比、静弾性係数比が大きいほど、礫が破断する割合は小さくなる傾向が認められる。これは礫とマトリックスとの力学的性質の差異が大きいほど礫とマトリックス境界で破断する機会が多くなるため、破壊が礫とマトリックス境界を選んで進行するためと考えられる。

図-18には、礫率と礫の破断個数割合および礫の破断長さとの関係を示す。礫の破断個数割合は礫種Dを除き、礫率が大きくなるにつれ減少する傾向にある。また、全体としては礫率が大きくなると礫の破断長さは大きくなる傾向が認められるが、各礫種によって異なるパターンを示している。

4. 考察

片川他²⁾は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、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ず、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がマトリックスの強度を下回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。この原因は用いた岩石にあり、応力集中を阻害したり緩和する方向に作用する何らかの要因があると考えた。こうした要因として、第一は用いた岩石が礫とマトリックスの力学的性質のコントラストが小さく、かつ礫、マトリックスとも力学的性質のパラツキが大きいこと、第二は礫が角礫で、かつ礫とマトリックスの境界が凹凸に富んで入り組んでおり、マトリックスと礫が漸移するものも一部に認められることをあげている。これらのうち本研究においては、第一の要因のうち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ことによる影響を検討するため、礫とマトリックスとの力学的性質のコントラストについて橋本他¹⁷⁾および片川他²⁾が用いた天然の礫混じり岩石のそれを模倣した人工岩石を作成し、周面礫率の測定、エコーチップ測定を実施したのち超音波伝播速度試験、一軸圧縮試験を実施した。この結果、礫とマトリックスとの力学的性質のコントラストの大小によらず礫率の増加に伴う一軸圧縮強度の低下傾向が認められた。この一軸圧縮強度の低下傾向は、小林⁶⁾、小林・吉中⁷⁾などのように、必ず20%以上で顕著に認められるという様なものではなく、20%までの間で低下し、20%以上で低下の度合いが小さくなるものがある。また、こうした違いに礫とマトリックスとの力学的性質の差異は効いていないようである。例えば一軸圧縮強度比がほぼ1:0.9の礫種Aの試料と1:4.9の礫種Dの試料が同じような低下傾向を示しているのに対し、一軸圧縮強度比が同じ1:0.9でも礫種Bの試料と礫種Aの試料

とは異なっている。この点についてはマトリックスの強度と礫率から任意の礫率における強度を評価する小林⁶⁾、小林・吉中⁷⁾の方法の適用を検討するのに重要な問題であり、現状ではデータが少ないことから、今後のデータの充実を待ちたい。

一方、破壊過程で供試体表面に形成される亀裂をみると、亀裂と礫との位置関係に礫とマトリックスとの力学的性質の差異の大小に対応した違いが見られる。強度低下傾向が同じ場合でも破壊の進行に違いがあったことが推測される。一軸圧縮強度比が1:0.9の礫種Aの試料と1:4.9の礫種Dの試料についてみると、礫種Aの試料にはBuyukozturk et al¹⁰⁾、Liu et al¹¹⁾のモルタルクラック（以下ではマトリックスクラックと呼ぶ）、ボンドクラックのほかには礫中の亀裂が目立つが、礫種Dの試料ではボンドクラックとマトリックスクラックは見られるが礫中の亀裂は稀である（図-16、図-17、図-18参照）。

一軸圧縮試験の過程における各クラックまたは亀裂の形成とそれら相互の関係については、供試体表面の変化を目視観察するとともに、礫種Aと礫種Dの試料については、一方向からのみであるが、ビデオ撮影による観察を行った。クラックの発生から破壊までは比較的短時間に進行すること、また破壊が必ずしもゲージを貼付した部分で生じていないことから、クラックや亀裂の発生順序、相互の関係は必ずしも明瞭ではないが、礫とマトリックスとの境界で形成されたクラックがマトリックス部分に伸展する様子が見られる供試体もあった。これを供試体表面の各部位に貼付したひずみゲージで、クラック発生直前の応力集中度合いとひずみ蓄積状況の違いの有無と程度として見てみる。図-19には礫種Aの試料と礫種Dの試料でそれぞれ礫率20%の供試体について、供試体中央付近のマトリックス部分、礫部分、および礫とマトリックスとの境界部分に貼付したひずみゲージのひずみ変化を横軸を載荷時間にして示した。これによれば、礫種Dの試料については、礫とマトリックスとの境界の破壊や降伏が供試体全体やマトリックスの破壊に先行して生じている可能性を示す挙動が見られる。このことは、試験後の供試体表面のスケッチ（図-16参照）において礫とマトリックスとの境界のクラックが多く認められることと調和的である。礫種Aの試料でも礫とマトリックスとの境界での破壊が供試体全体やマトリックスの破壊に先行して生じている可能性を示すデータが得られている。試験後の供試体表面のスケッチ（図-16参照）には礫とマトリックスとの境界でのクラックは目立たないが、礫種Bの試料をもあわせてマトリックスとの力学的性質の差異が一軸圧縮強度比1:0.9の場合でも強度低下が起こっていることを考慮すると（図-11参照）、礫とマトリックスとの境界が不連続面として潜在していること自体に礫混入の意義の一つがあることを示唆していると考えられる。

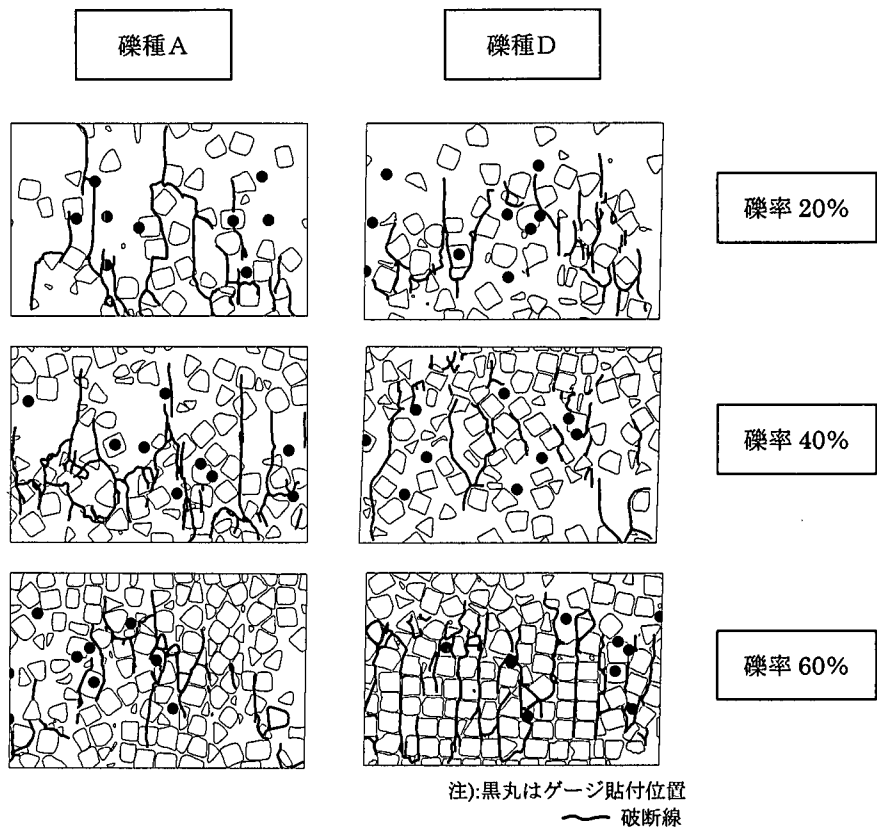


図-16 一軸圧縮試験後の供試体表面の亀裂分布状況

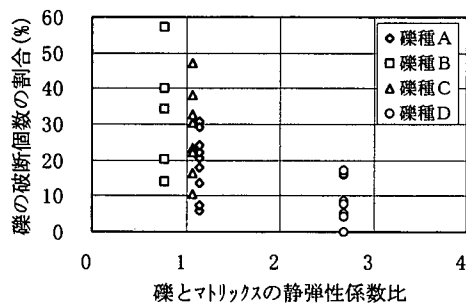
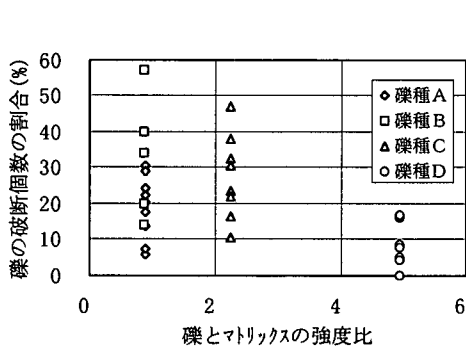


図-17 礫の破断個数の割合と礫のマトリックスの強度比、静弾性係数比の関係

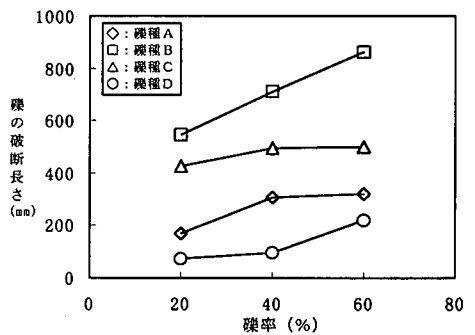
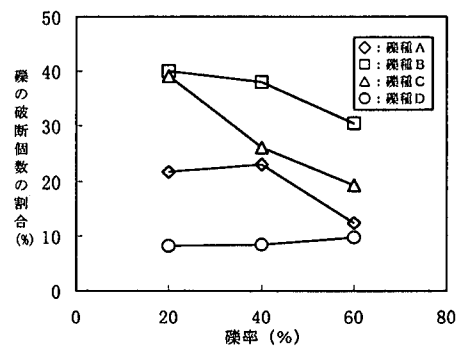


図-18 礫率と礫の破断個数、破断長さの関係

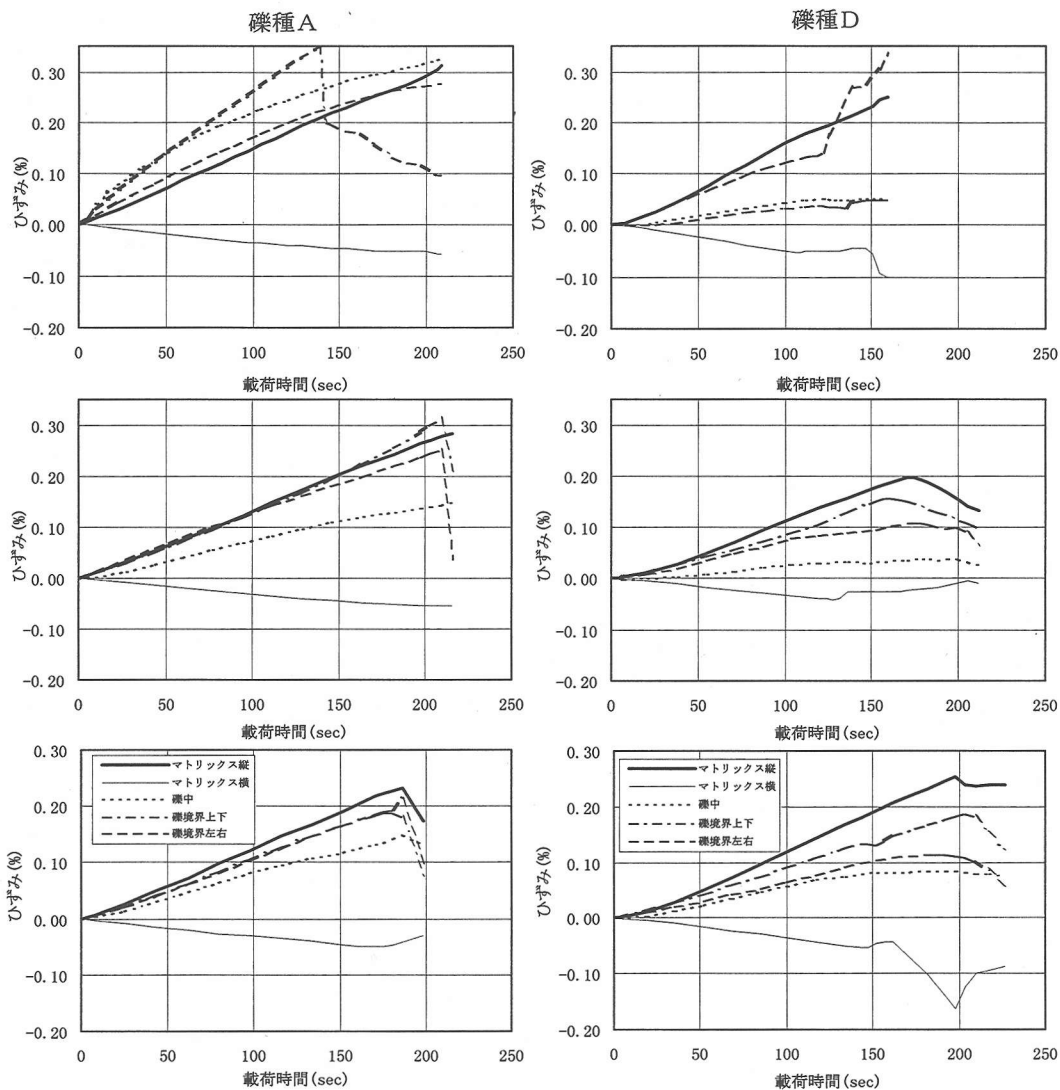


図-19 礫率20%供試体の時間-ひずみ曲線(礫種A, 礫種D)

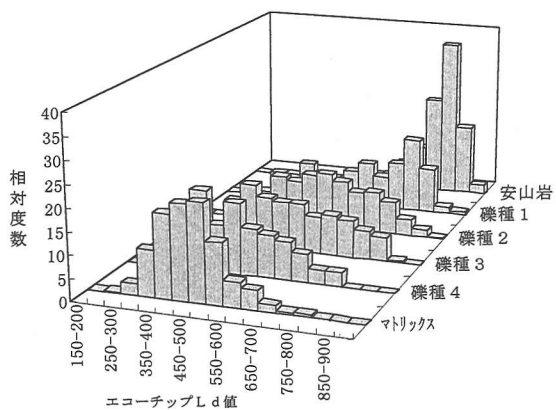


図-20 天然の岩石の礫とマトリックスのLd値のバラツキ

表-7 天然材料の一軸圧縮強度比, 静弾性係数比

区分	Ld値	礫種1	礫種2	礫種3	礫種4
一軸圧縮強度比	-1σ	2.1	1.8	1.5	1.0
	平均値	2.7	2.1	1.9	1.3
	+1σ	3.1	2.3	2.2	1.5
静弾性係数比	-1σ	2.2	1.8	1.5	1.0
	平均値	2.8	2.2	2.0	1.3
	+1σ	3.3	2.4	2.3	1.5

既述のように橋本他¹⁷⁾、片川他²⁾が用いた天然の岩石では、礫率の増加に伴う一軸圧縮強度の低下傾向は認められていない。以上の結論は、その原因と考えられる事柄のうち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ことが関与している可能性については否定的であることを示している。従って可能性としては、礫やマトリックスの力学的性質自体のバラツキが大きいこと、礫のバラツキや形状が残る。前者の礫やマトリックスの力学的性質自体のバラツキが大きいことについては、ポーリングコアや岩石片の力学的性質の簡易的な指標であるエコーチップ測定によるLd値¹³⁾で表すと図-20となる。これらの値を橋本他¹⁸⁾の一軸圧縮強度-Ld値関係、静弾性係数-Ld値関係でみると、一軸圧縮強度比、静弾性係数比としてのバラツキは表-7となり、礫やマトリックスの力学的性質が一意に管理されている人工の岩石とは大きく異なっている。しかし、今回の結果についての考察のひとつとして、マトリックスに対する礫の力学的性質の如何によらず礫の混入自体に強度低下の原因があることが示唆されるのであるから、橋本他¹⁷⁾、片川他²⁾の結果を礫やマトリックスの力学的性質のバラツキが大きいことによって説明することはできないと思われる。残る可能性は礫の大きさのバラツキや礫の形状である。礫の形状について小林⁴⁾は垂円礫に近いものであったとしている。今回の検討でも礫は天然の岩石中では角礫であることに配慮して立方体を用い、サンダによって表面の粗度をあげているものの、一辺を2cmに規定し角とりを行っている。一方、片川他²⁾の天然の岩石では礫は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、礫種によっては一部にマトリックス部分と漸移するものも存在するとされている。彼らによれば、礫の大きさのバラツキや形状上の特徴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としている。

以上のことから、現段階においては、人工岩石についての成果を天然岩石に適用するに際しては、礫径が一様で礫形に不整形がないもの、つまりこれまで用いられた人工岩石のそれに近いものを除けば、天然岩石についての研究事例が少ない現時点においては、その適用には注意を要するものと思われる。なお、礫混じり岩石やこれから構成される岩盤を実際に地盤に利用する場合、その力学的性質は、岩石、岩盤物性に影響する地質要素を用いた適切な岩盤分類に基づき、解析的検討も含めて、具体的に岩石試験、岩盤試験を実施して求めることが基本となることに変わりはないであろう。

5. まとめ

礫混じり岩石について、北陸地方の新第三紀火山岩類に属する凝灰角礫岩、角礫岩状安山岩を模擬して、礫とマトリックスとの力学的性質の差異が小さな領域について人工の礫混じり岩石を作成した。人工の礫混じり岩石は、マトリックスを同一材料とし、一軸圧縮強度が異なる4つの礫種を対象として4種類を作成した。礫、マトリックスともセメント、珪藻土、水の混合材料を用い、所定の一軸圧縮強度が得られるように配合を設定した。出来上がった岩石における礫とマトリックスの一軸圧縮強度比は、礫種Aが1:0.9、礫種Bが1:0.9、礫種Cが1:2.2、礫種Dが1:4.9である。これらの岩石について実施した一軸圧縮試験の結果、一軸圧縮強度、静弾性係数、破壊ひずみ、限界ひずみなどの力学的性質と礫率との関係について次の結果が得られた。

- (1) 一軸圧縮強度については、礫を混入すると岩石の強度がマトリックスのそれを下回り、その際の強度低下の度合いは礫率の増加に伴って大きくなることが判明した。
- (2) 礫率の増加に伴う一軸圧縮強度の低下の度合いは、礫とマトリックスとの力学的性質の差異の大小によらない。圧縮-破壊過程での強度低下では、礫とマトリックスとの境界面の存在が重要であり、マトリックスクラックに先行してこの部分にボンドクラックを生じることが原因と考えられる。
- (3) 礫率の増加に伴う強度低下の傾向としては一様な傾向は得られなかったが、試料数が少ないことから、今後のデータの充実が望まれる。
- (4) 礫率の増加に伴い、礫とマトリックスとの力学的性質の差異がほとんどない礫種A~礫種Cの岩石では静弾性係数に特定の変化傾向は認められない。差異が比較的大きい礫種Dの岩石では静弾性係数の増加傾向は顕著となり、増加率も大きくなる。この傾向は動弾性係数でも同様である。
- (5) 礫率の増加に伴い、破壊ひずみ、限界ひずみは大局的には減少する。しかし、減少の仕方は一様ではなく、岩石毎に異なる。

以上のほか、本研究の過程において、供試体表面での計測による礫率すなわち面積礫率、周面礫率は実礫率（体積礫率）との間で良好な対応関係を有することが明らかになった。

なお、本研究のモデルとなった天然の岩石において礫率の増加に伴う強度低下の傾向が認められなかった原因については、礫とマトリックスとの力学的性質の差異によらないことが判明した。そのため、片川他²⁾によれば、礫径のバラツキと礫形による効果の可能性が残ることになる。

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) 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.
- 2) 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性質に及ぼす礫分の影響について, 土木学会論文集, No. 659/III-52, pp. 77-86, 2000.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Kobayashi, T., Mimuro, T. and Yoshinaka, R.: Mechanical properties and failure mechanism of gravelly soft rocks, Rock Foundation, Yoshinaka & Kikuchi (eds), 1995.
- 9) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 土田 晃, 小池信司, 篠田知堅, 芥川真一：不均質性岩盤の限界ひずみについて, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp. 185-190, 1996.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 小阪義夫, 谷川恭雄, 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集, 第371号, pp. 93-100, 1982.

(1999. 7. 2 受付)

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

Hideki KATAGAWA, Toru HASHIMOTO, Syuji HIRANO and Hiroyuki MURAKAMI

We authors made a few types of artificial gravelly rock, which had relatively lower contrast in mechanical properties between gravel and matrix, similar to one of breccia-type andesite and tuff breccia from Neogene volcanic gravelly rocks in Hokuriku district. We used the unconfined compression test, and investigated the relationships between gravel content and mechanical properties of them. As the result of this investigation, for example, larger the gravel content, smaller the uni-axial strength, the failure strain and the limit strain. These are different from the result about the natural gravelly rocks mentioned above, which have no relationship between gravel content and mechanical properties of rocks for example uni-axial strength. It might suggest the necessity of investigation not only about gravel content but about another factors from the natural gravelly rocks.