

(53) 礫混じり軟岩の強度・変形特性

埼玉大学 正会員 吉中 龍之進
東電設計 正会員 ○ 小林 隆志
埼玉大学 正会員 瀬戸 亥一郎

Mechanical Properties of Gravelly Soft Rocks

Ryunoshin YOSHINAKA, Saitama University
Takashi KOBAYASHI, Tokyo Electric Power Service Co., Ltd
Ichiro SETO, Saitama University

Abstract

This paper describes the effect of gravel contents on mechanical properties of gravelly rocks. Specimens tests are prepared artificially using marble for hard gravel and welded tuff for soft gravel. From uniaxial/triaxial compression tests and elastic wave velocity test, the followings are obtained ; ① strength relations shows the nonlinear, which can be well expressed by power function, ② deformational behaviors under shearing, fundamentally depend on the properties of matrix material, but elastic behavior of that rock seems to follow the elastic / elasto-plastic constitutive relations for multiphase composite material.

1. まえがき

我国では、凝灰角礫岩、堆積性礫岩、含礫砂岩等の礫を含む地盤を対象とする土木構造物が数多く建設されている。特に、火山国である我国では、凝灰角礫岩を代表とする火山砕屑岩類の分布範囲が広いため、今後の建設においてもしばしば基盤として利用される事が予想される。

このような地盤においては、一般的に礫質部（硬質部）と基質部（軟質部）の力学的性質が大きく異なるため、マスとしての基盤の力学的性質に、礫と基質の力学的性質の比が大きく影響を与えることが予想される。しかし、含まれる礫が構造物の大きさに比べ同等若しくは大きい場合には個々の礫を詳細な地質調査を実施することによって決定論的に分布や力学的性質を取り扱うことが可能であるが、小さい場合には個々の礫あるいは基質部の性質を決定論的に取り扱うことは現実的ではなく、また、不可能でもある。

したがって、このような地盤では礫質部と基質部とを包括した地盤としてその性質を評価せざるを得ない。さらに、従来実施されている室内試験または原位置試験では、試験に用いられる供試体が局所的であるため、不均質地盤の評価としては不十分であると推察される。そのため上記のような地盤においては、礫質部と基質部とを包括した地盤としての力学的性質を把握する手法の開発が重要な課題となっている。

このような現状に鑑み不均質地盤の評価方法開発のため、礫岩を対象として研究を実施している。本文はその基礎的な実験と若干の考察を述べたものである。

2. 実験の概要

礫混じり地盤からの不攪乱試料の採取は非常に困難であることから、今回、大理石および凝灰岩の礫と自然材料を混合したマトリックスからなる人工供試体を作成し、強度・変形特性に関する実験を行った。

人工供試体による実験の項目および条件は表-1および2のとおりである。また、本実験で用いた礫の性質は表-3、マトリックスの配合は表-4のとおりである。供試体の寸法は原則的に $\phi 10\text{cm} \times H20\text{cm}$ のものを使用した。

表-1 実験項目

項 目	試 験 条 件
静的 三軸圧縮試験	圧密非排水、歪制御 歪速度 0.005 %/min 最大軸歪 8%を目標
一軸圧縮試験	歪速度 0.03or0.005 %/min
圧裂試験	歪速度 0.03 %/min
超音波速度試験	P波速度、S波速度

表-3 礫および基質部の性質

岩石名	乾燥密度 (g/cm^3)	一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	静弾性係数 (kgf/cm^2)
大理石	2.73	600	700,000
凝灰岩	1.80	90	12,000
マトリックス	0.94	30	7,500

表-2 静的三軸圧縮試験項目

礫 種		基質	大理石		凝灰岩	
含礫率 (%)		0	20	40	20	100
シリーズ名		MAT	M-20	M-40	T-20	T100
拘束圧	0.5kgf/cm ²			○		
	1	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○
	10	○	○	○	○	○
	35	○	○	○	○	○

背圧: 0 kgf/cm^2

表-4 マトリックスの配合表

配合 (重量比)					
水	セメント	大谷石粉	材リ	W/C	K/K+M
1.85	1.00	1.47	0.63	1.85	0.30

3. 実験結果および考察

(1) 強度特性

礫が大理石の場合の一軸圧縮強度と静弾性係数との関係は図-1のとおりで、また、図中の実線は、一般的な堆積軟岩の分布範囲を示している。

これによれば今回作成した人工軟岩は一般的な堆積軟岩の性質をもつものと考えられる。

大理石の礫を40%含む供試体(M-40)と礫を含まないマトリックスのみの供試体(MAT)の三軸圧縮試験結果を、平均有効主応力(σ'_m)と最大せん断応力(τ_m)で示した強度特性は図-2のとおりである。図中の(ϕd)_p、(ϕd)_rおよび(Cd)_p、(Cd)_rは、参考までに最小自乗法で求めた値である。

これによれば、破壊包絡線は顕著な非線形を示している。次の節で述べるとおり、拘束圧が約 5.0 kgf/cm^2 以下ではひずみ軟化、それ以上では顕著なひずみ硬化を示し、降伏応力は拘束圧が高くなるに従い逆に低下している。ひずみ硬化する場合の最大強度は、軸差応力がほぼ一定値に漸近する軸ひずみ約 8%とした。

大理石、凝灰岩を礫とする各シリーズの両対数で表した強度関係は、図-3、4のとおりである。両図の σ'_m 、 τ_m はマトリックスの一軸圧縮強度で無次元化している。また、最大強度を実線で示し、残留強度は

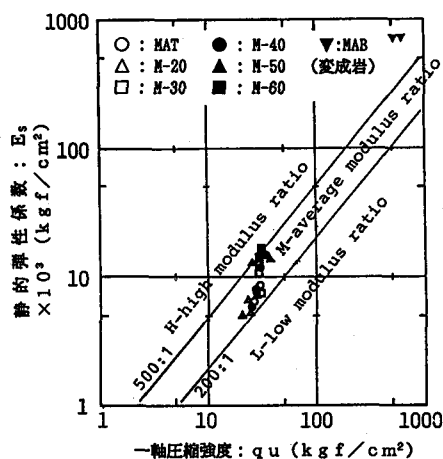
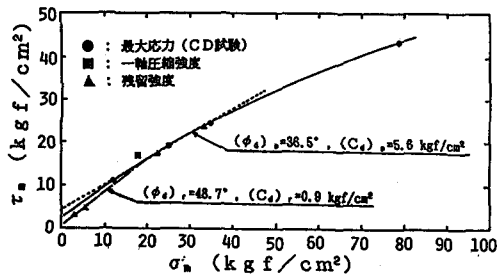


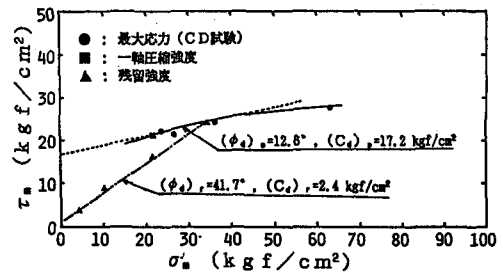
図-1 一軸圧縮強度と弾性係数との関係

試験値でプロットしてある。図-3の一点鎖線はJ.C. Jaeger²⁾による粒状化させた大理石の最大強度、鎖線はインタクトな大理石の強度関係である。

各図から、最大応力と残留応力とも“べき関数型破壊基準”が良く適合することが判る。これから、①含礫率により最大強度関係が変化すること、②含礫率40%以上では強度線の勾配が表す強度増加率に礫の含有率の影響がないこと、③含礫率40%以下の残留強度には礫の影響が少ないこと等が指摘される。



(a) : M-40シリーズ



(b) : MATシリーズ

図-2 平均有効主応力と最大せん断強度の関係

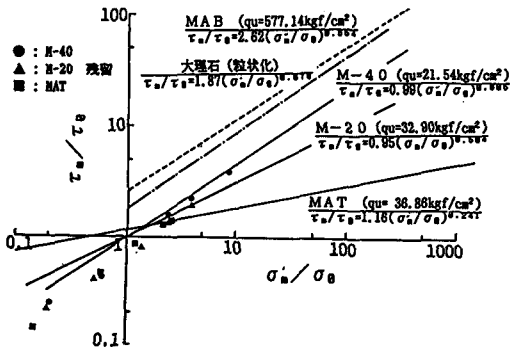


図-3 大理石を礫とする各シリーズのべき関数強度基準の適用

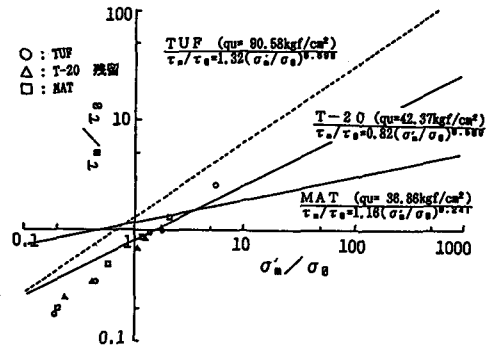


図-4 凝灰岩を礫とする各シリーズのべき関数強度基準の適用

(2) 変形特性

マトリックスのみ(MAT)および大理石の含礫率40%(M-40)の三軸圧縮試験から求めた軸差応力-軸ひずみ-体積ひずみ関係は図-5、6のとおりである。

これより、①側圧の増大に伴うひずみ軟化からひずみ硬化型への移行、②初期の直線的変形部分の側圧に対する非依存性、③側圧の増大に伴う降伏応力の低下、等が特徴的である。この変形特性は MAT、M-40とも同様であることから、含礫率40%程度までの変形特性は基本的にマトリックスに依存すると考えられる。

含礫率の増加に伴う弾性係数の増加は、静的よりも動的試験結果の方が増加傾向がより顕著に現れている。礫を大理石とした場合の含礫率と一軸圧縮試験による静弾性係数の関係を図-7に、また、含礫率と静的せん断弾性 μ の関係を図-8に示す。ここで、○は一軸、●は三軸試験結果であり、 μ はマトリックスの μ_0 で正規化している。含礫率と超音波速度から求めた動せん断弾性係数の関係は図-9に示すとおりである。

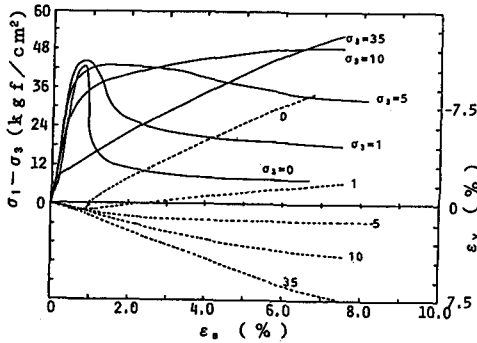


図-5 応力-ひずみ-体積ひずみ曲線 (MAT)

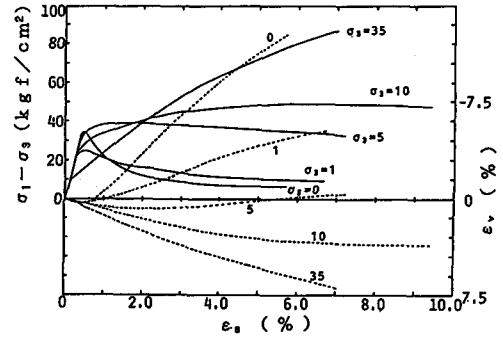


図-6 応力-ひずみ-体積ひずみ曲線 (M-40)

4. 変形特性に関する考察

均質なマトリックス中に異なる弾性の含有物を含む時、全体の平均（等価）弾性係数の推定方法は固体物性の分野で研究され、種々の理論式が提案されている。ここでは、まず実験結果と数種の理論式^{3) 4)}の関係を検討した。図-8、9は、円礫とマトリックスとの2相系とした場合の理論曲線を5本描いた。礫とマトリックスの弾性係数は図中のとおりで、弾性係数比は静的で84.6、動的で31.2である。

各図のとおり、静的試験値は理論式の下限線に近い。実験値が理論の下限より小さいものがあるが、これはデータのばらつきや礫周囲に生じる局部的大変形によるものと考えられる。また、動的試験値と理論値との比較では実験値はHashinらの下限値をか Reussの式に近いことが判る。

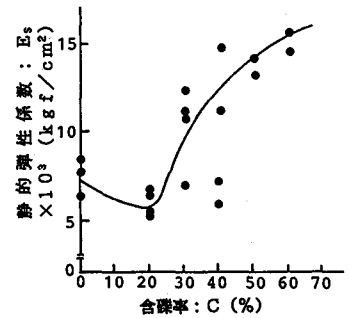


図-7 含礫率と静的弾性係数の関係

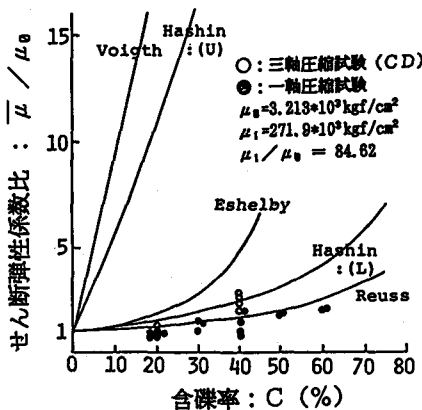


図-8 含礫率とせん断弾性係数の関係 (静的)

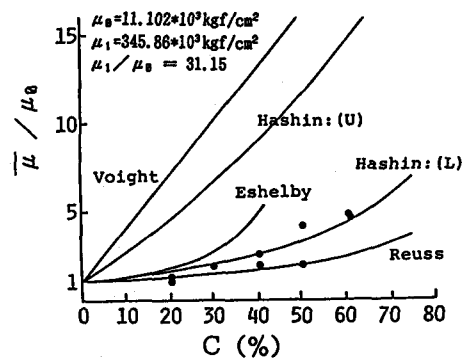


図-9 含礫率とせん断弾性係数の関係 (動的)

供試体内の応力とひずみの状態を、FEMで検討した。解析条件は表-5のとおりで、物性値には静的試験から得た値を用いた。供試体内の各点応力ベクトルおよび最大主応力のコンターを図-10(a)(b)に示す。

図から、最大主応力の方向に列ぶ礫を主に応力が伝達されていること、これらの礫および礫間のマトリックスに高い応力集中が発生し、マトリックス部はひずみレベルがより高いことが判る。これら応力・ひずみ

の特徴が礫混じり材料の変形性を支配することを予想させる。また、軸方向の変位量から算出した弾性係数は、13,500kgf/cm² であり一軸圧縮試験から得られた弾性係数10,000~12,000kgf/cm² と概ね一致する。

表－5 解析条件

物性値	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	含礫率
礫	700,000	0.2	30%
マトリックス	7,500	0.35	
接点数: 111 要素数: 114 平面ひずみ状態			
拘束条件: X、Y軸は軸方向のみ可動			
応力: 鉛直50kgf/cm ² 、側方 5kgf/cm ²			

5. 結 論

本研究に用いた礫混じり軟岩について次の結論を得た。

(1) 強度特性

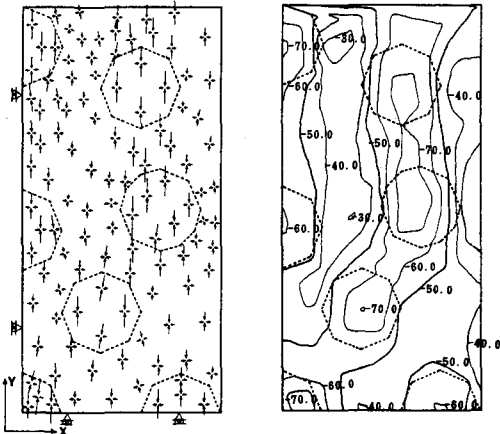
- ① 最大強度の破壊包絡線は非線形を示し、べき関数型破壊基準が良く適合する。
- ② 基準式に含まれる各係数は、含礫率とともに変化する。
- ③ 礫の体積含礫率40%以下では残留強度に礫の影響は少ない。
- ④ 含礫率が20%程度でひずみ軟化傾向を示す低拘束領域では、礫混じり軟岩の強度がマトリックスの強度より低下する場合がある。

(2) 変形特性

- ① 含礫率40%程度までの礫混じり軟岩の応力－ひずみ曲線は、マトリックスの応力－ひずみ曲線に基本的に支配される。
- ② 初期の直線的変形部分の弾性係数は、同一含礫率であれば拘束圧依存性は認められない。
- ③ 上記の弾性係数は、礫、マトリックスの弾性係数および含礫率に支配される。
- ④ 拘束圧の増加にともなって降伏応力は低下する。
- ⑤ 礫混じり軟岩の変形特性は、複合材料の等価弾性係数を求める理論から概略の推定が可能である。実験値は、種々の推定式の下限值に近いものである。
- ⑥ FEM解析結果によれば、応力は最大主応力方向に列ぶ礫に沿って主に伝達すること、これら礫間のマトリックスに応力集中が発生していること、また、解析から得た供試体の弾性係数は概ね実験結果と整合する。

6. 参考文献

1) 江刺靖行, 礫混じり地盤, 土と基礎, 31-2(301), 1983
2) Rosengren, K.G. and Jeager, J.C., The mechanical behavior of low porosity interlocked aggregate, Geotechnique, vol. 18, 317-326, 1968.
3) Z.Hashin and S.Shtrikman, A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials, J. Mech. Phys. Solids., vol. 11, 127-140, 1963.
4) T.Mura, Micromechanics of defects in solids, 2nd revised ed., 421-439, 1987.
5) 吉中・小林・瀬戸, 礫混じり軟岩の力学的性質に関する実験的研究(その1), (その2), 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 1991



(a) 応力ベクトル (b) 最大主応力コンター
図－10(a), (b) FEM解析結果