

微細亀裂を多く含む結晶質岩石の強度とダイレイタンスー

一 亀裂性岩盤のモデルとして一

埼玉大学 理工学部 ○吉中龍之進

埼玉大学 理工学部 小野寺 透

1. まえがき

節理などの亀裂が密に発達した岩盤の応力-歪関係は、原位置の岩盤三軸試験が容易でないこともあってまだ良く分っていない。本研究は、このような亀裂性岩盤の応力-歪関係の基礎データを与える目的で行なったものでモデル材料には、新鮮で均質な花こう岩を加熱によって結晶間の組織を弛めたものを用いた。

花こう岩は石英、長石、雲母を主成分とする完晶質岩石であるので、このようにしてえた供試体は多方向の亀裂を多数含む岩盤の性質を示唆するものと思われる。Rosengren 他は大理石を材料に同じ目的の一連の研究を行っている。なを実験に際しては川島由生雄、白井道明（49年度卒業）の両君の多大の協力をえた。ここに厚く感謝の意を表する。

2. 供試体の作成および研究方法

使用した岩石は愛媛県越智郡産の“大島御影”と呼ばれる良質の花こう岩である。石切場には、ほぼ水平およびそれと直交2方向の節理系があり、これらは石目の方向と一致している。この内、水平方向が最も割り易い石目である。試料はブロック状岩石を定方位で採取した。ブロックから方向別にコアリングし、直径50mm長さ約100mmに成形した。成形した岩石を電気マッフル炉で、昇温率100~140℃/時で加熱する。1000℃の加熱では段階的に温度を上げ2~3日で最高温度にした。冷却は110℃に降温して後、さらに徐々に常温まで下げた。この加熱操作は、何回かの予備実験で均質な供試体がえられることを確認して定めたもので、この結果自然状態で間隙率が約0.6%の岩石を加熱温度の高さに応じて約7%まで連続的に弛めることができた。

供試体の力学的性質の測定は主に飽和させた岩石の排水三軸圧縮試験で求めた。供試体の歪の測定は長さの方向にダイヤルゲージによる全歪、及びゲージ長さ6mmのワイヤーストレンゲージを併用、円周方向は同ストレンゲージ、体積の全歪量は供試体の吸排水量で測定した。全軸歪をダイヤルゲージで求める場合、測定量には加圧ピストン、ペDESTALなど供試体以外の変形量が入るので結果の解析ではこれらを除去した。ストレンゲージは“塑性ゲージ”を用いた。供試体の歪速さは約1%/時である。なお側圧は等方、液圧で最大406kg/cm²とした。

一軸圧縮試験ではゲージ長20mmのワイヤーストレンゲージ4枚を併用した。

3. 供試体の一般的性質

加熱処理で岩石内部に生じた変化を薄片を用いて偏光顕微鏡で観察した。これによると微細亀裂の拡大が顕著で複雑な形状をもつ亀裂の間隙は多くの部分でopen crackの状態にある。加熱前の岩石にも微細な亀裂があるがこれらは連続性が乏しくかつclosedである。この他、1000℃の加熱では黒雲母の多くが酸化鉄に変化している。

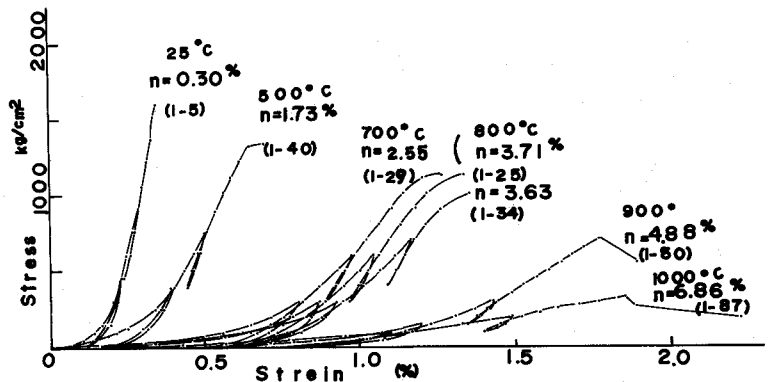


図1 熱処理温度の増大にもなう一軸圧縮応力下での応力-歪関係（n：間隙率、飽和試料による）

岩石の異方性は熱処理しない場合に顕著に現われ、加熱処理した試料では消えている。すなわち最も発達した石目に平行および直角方向に破断面が生ずる場合の圧裂引張強度の比は、加熱しない場合が $72 \text{ (kg/cm}^2\text{)}/99 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 、 500°C で処理した場合が $63 \text{ (kg/cm}^2\text{)}/55 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 、 1000°C の場合が $8 \text{ (kg/cm}^2\text{)}/6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ である。試験値はいずれも 3 個の平均値である。

間隙率の増大に伴う応力-歪関係の変化は図 1 のように、処理前の性質が順次拡大すると同時に強度の低下が著しい。各供試体での共通の特徴は、初期変形の高い圧縮性と全区間でのヒステリシスで、完品質ないしひび割れ岩石の特徴が良く現われている。 1000°C 処理の供試体の変形係数は初期部分で 8200 kg/cm^2 直線部分で 53100 kg/cm^2 である。

4. 応力-軸歪・体積歪関係

最も弛んだ供試体（間隙率約 7%）の応力-歪関係は図 2 のようである。応力-軸歪 ϵ_1 は拘束圧により変形係数が著しく増大する。しかし破壊歪はほぼ一定である。破壊歪は間隙量ないし弛みに支配される量である（図 1）。応力の増大に伴って岩石内部に生ずる組織変化の状態は応力-体積 v 曲線、 ϵ_1-v 曲線に明瞭である。 ϵ_1 が直線性を示している区間の大部分は内部破壊が進んだ体積膨張（ $dv > 0$ ）の過程にあること、したがって見掛け上の弾性変形区間は ϵ_1 の初期変形とそれに続く立上り曲線の間の僅かな部分に限られ、また ϵ_1 の直線性および最大応力を発生する領域は体積膨張が密接に関係していることが分る。

変形過程における体積変化を Dilatancy rate D （ $1 - dv/d\epsilon_1$ ）で表わし主応力差との関係を求めると図 3 をうる。差応力が体積変化と重要な関係にあることは明らかで、最大応力附近で D の変化が特に大きい。周知のように拘束圧下における粒状体の変形においても常に D の変化（ $D < 2$ ）を伴うが、密度が高い岩石はさらに高い D の値をとることが分る。破壊時の dilatancy rate を D_f とすると、 D_f は破壊時の主応力比 $R_f = \sigma_1'/\sigma_3'$ と図 4 の関係があり R_f の低下（ σ_3' の増大）にしたがい D_f は 6.5 から 1.0 附近まで直線的に低下している。

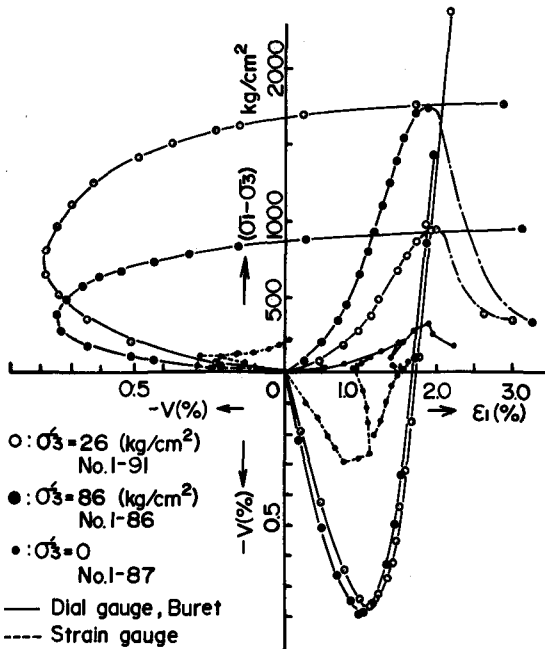


図 2 最も弛んだ供試体の応力-歪曲線（ 1000°C 熱処理）

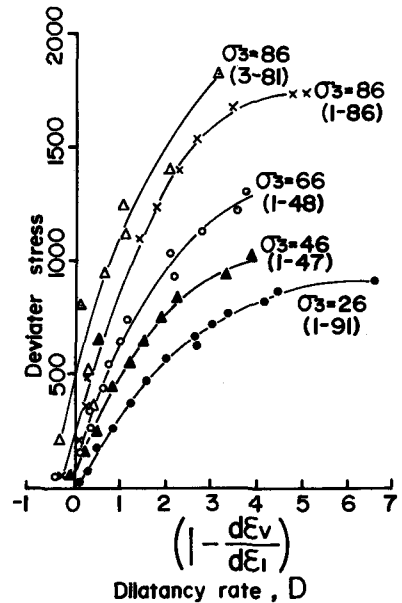


図 3 側圧を受ける供試体の差応力に伴う dilatancy rate（ 1000°C 熱処理）

与えた側圧の最大は 406 kg/cm^2 、供試体の一軸圧縮強度は $290 \sim 360 \text{ kg/cm}^2$ で図4の破壊時の dilatancy rate D_f は供試体からの水の吸・排水量から求めたものである。

一方、ヒビ割れの少ない引張強度が非常に高い岩石（熱処理をしない岩石）は、変形の全過程で dilatancy rate の変化を伴っているが、拘束圧力が約 100 kg/cm^2 以下の領域では変化が少なく、 D は2以下であった。したがって、弛んだ、ひび割れ性の材料は変形の全過程で結晶粒の破断が生じると同時に、分離面間のすべりや破碎粒子の回転が生じ、これらが材料の変形性に非弾性的性質を与えたものと考えることができる。

特に体積の変化率（ポアソン比の変化）は通常の弾性・塑性材料と極めて異った性質となり、その値は応力レベルおよび応力履歴によって変化し、一義的に定まるものではない。岩石が、引張強度の高いぜい性材料から亀裂が卓越した塑性材料に変化するに従いがい、“ポアソン比”が増大する性質があることは、風化に伴う岩石の変化にも明らかである。

図5は自然の風化花こう岩の一軸圧縮応力下における縦歪と横歪の比を、各応力レベルごとに示したものである。ポアソン比の変化は風化が進んだ、すなわち内部亀裂が増大した岩石ほど顕著であり、このことは先に図2にみた内部破壊の進行に伴う正のダイレイタンスの発生をいみするものである。間隙率が7～8%までの花こう岩の風化は、主に内部の亀裂密度の増加によることは先に報告した通りである。

5 破壊強度に関する性質

熱処理によって最も弛ませた供試体の三軸圧縮応力下における破壊強度と平均主応力との関係を求めこれを図6に示した。なお、表示では図6の縦・横軸とも一軸圧縮強さで割り、無次元化してある。また図には比較のために新鮮な岩石の試験値も加えた。

三軸圧縮応力下における強度測定は、これらの資料の他にも中間段階で熱処理した供試体についても行なっているが試験結果は図6の分布線上にほぼ重なり、したがって強度特性は間隙率の広い範囲に亘って図6の傾向をもつことが分った。

平均主応力 p' が一軸圧縮強度の4倍以上になる高圧の領域では図6のカーブが折れる傾向にあるが、それ以下は、ほぼ直線関係にあると見なすことができる。すなわち、 $p'/\sigma_c \leq 4$ の範囲では、モールの破壊包絡線で与えられる内部摩擦角 ϕ' が、亀裂の多少にかかわらず、ほぼ一定（ $60 \sim 64^\circ$ ）であって、 p'/σ_c が4～8で ϕ' が約

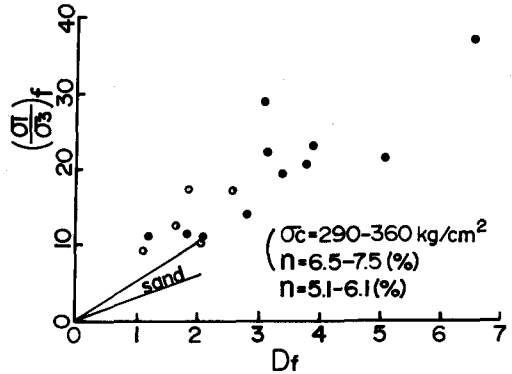


図4 破壊時の主応力比と破壊時の dilatancy rate の関係（ 1000°C 熱処理供試体）

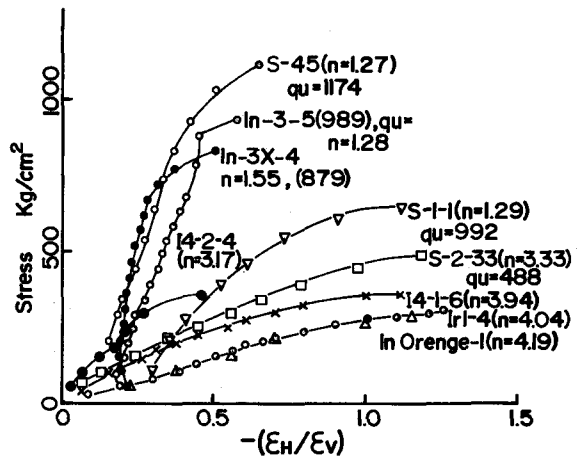


図5 自然の風化花こう岩の一軸圧縮下における応力と（横歪／縦歪）の関係

50°、したがって応力の広い範囲に互って ϕ' が高く、間隙の増大による強度低下は主として粘着力成分の低下であることを意味している。

事実、各弛み段階ごとのモールの破壊包絡線から求めた粘着力と一軸圧縮強度の比は、間隙率が0.5%から7.5%に増大しても、ほぼ1/10の一定値となっている。図7はこれを示している。岩石固体の引張強度 σ_t と粘着力 c の関係は $c = 2 \sigma_t$ (Griffith 理論、修正Griffith理論) 引張強度と一軸圧縮強度 σ_c は $\sigma_c = 8 \sigma_t$ (Griffith) $\sim 15 \sigma_t$ (修正Griffith, $\mu = 1.7$)であることが知られている。図7に示すように間隙率が約1%まではこの関係がなり立つが、6%以上では、 $c \approx 5.5 \sigma_t$ であり、したがってこのような亀裂性材料の強度関係は、一般の固体材料とは非常に異なったものであり、粘着力の成分には引張強度のみならず、ひび割れ分離面間の固体の噛み合わせによるせん断強さが、その主要部分を構成することが分る。

6 まとめ

均質で新鮮な花こう岩を加熱処理によって組織を弛め、これを亀裂岩石のモデル材料としてその応力-歪関係、強度特性を求めた。その結果この種の材料は、変形の全過程でのダイレイタンスーが著しく、強度とも密接な関係があること、また、亀裂性材料は内部摩擦角の変化が少なく、粘着力成分は亀裂間の噛み合わせが重要な成分をなしていることが分った。

参考文献

- 1 Rosengren and Jeager (1968), The mechanical properties of an interlocked low-porosity aggregate, *Geotechnique*, 18, 317-326
- 2 Onodera, Yoshinaka and Oda (1974), Weathering and its relation to mechanical properties of granite, *Advances in Rock Mechanics*, Vol. II, P71-78, ISRM.
- 3 Jeager and Cook (1969), *Fundamentals of Rock Mechanics*, Methuen.

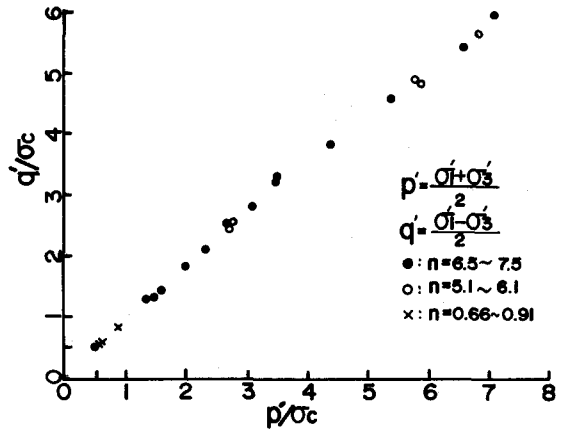


図6 亀裂性岩石の強度特性 (σ_c : 一軸圧縮強度, σ_t' : 破壊最大主応力、 n : 間隙率%)

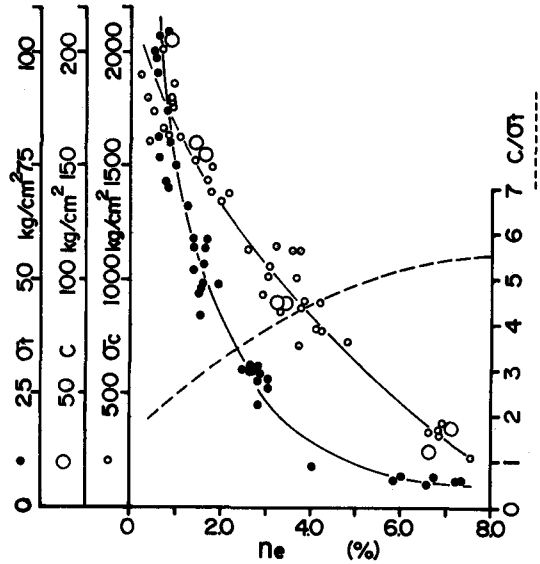


図7 間隙率と強度 (σ_t : 引張強度、 c : 粘着力、 σ_c : 一軸圧縮強度、 n : 間隙率(%))、熱処理温度: 常温 $\sim$ 1000°C)

Strength and dilatancy of artificially granulated granite

— As a model of fissured rock mass —

Saitama University

Ryunoshin Yoshinaka and Toru Onodera

Abstract

In order to know the deformation behaviour and its relation to the strength of fissured rock-mass, triaxial compression tests were performed with the specimens of granulated granite, which prepared by a technique of heat treatment up to a thousand degrees centigrade from homogeneous fresh granite.

Specimens used were in size of about 50 mm in diameter, 100 mm in length, and their porosities varied from 0.5 % of untreated granite to 7 %, according to treated temperature. Tests were performed under; (1) drained condition with saturated specimens, (2) strain rate of about one % per an hour, and (3) hydrostatic confining pressure up to 406 kg/cm^2 .

The results of this study show that: (1) Stress-strain behaviour under uniaxial loading resembles to the deformation curves of loosened rock-mass, shown in Fig. 1. (2) The lateral and volumetric deformation expresses a continuous dilation in whole deformation process, in the analogous manner as dense granular materials, shown Figs. 2 and 3, but the magnitude of dilation is basically different from those materials as shown in Figs. 3 and 4, and modulus of deformation increases remarkably with confining pressure as shown in Fig. 2. (3) The maximum deviator stresses and mean normal stresses normalized, divided by unconfined compressive strength show a linear relationship shown in Fig. 6, for wide range of stress and porosity (0.3 % - 7 %), this means that the reduction of internal friction angle due to loosening fabrics of granite or rock mass is rather little, and main reduction takes place in cohesive strength. The changes of tensile strength, cohesive strength and unconfined compressive strength due to increasing in porosity are shown in Fig. 7.