

(68) 岩石内部の水の移動と弾性波速度との関係

— 細粒大理石の場合 —

高橋 学 西沢 修

小出 仁

工業技術院地質調査所

1 はじめに

近年、地熱開発や高・低レベル放射性廃棄物等の長期安定性の問題から、岩盤割れ目系における水の力学的挙動が大きくクローズアップされてきている。

自然の状態では、割れ目系に水が存在することは十分考えられるので、岩盤全体の挙動を把握するためには、割れ目系プラス水という規模で岩盤を把えなくてはならない。実際の割れ目系では個々のサイトや岩種について割れ目の開口幅、長さ、密度、走向、傾斜等は夫々異なった状態にあるものと考えられる。一方、室内実験においてはインタクトな岩石の透水係数の測定が、最近、行なわれている。透水係数の測定には、種々の方法が有るものの、測定精度の高いトランジェント・パルス法が多く採用されている(文献1参照)。これらの実験のほとんどは、常圧及び静水圧下における測定であり、供試体に対し大きな規模の亀裂を含まない場合の透水係数測定となっている。しかしながら、先に述べたように、より自然の割れ目系に近い状態で室内実験を行なう場合には、載荷状態にて供試体にある程度の亀裂を生じさせ、その状態での透水係数の測定を行なう必要があるだろう。

そこで、供試体に亀裂の入った状態で、亀裂の中を水が伝播するかどうか、そして、もし水が亀裂のなかを移動する場合、水のフロントがどのように移動するかをまず最初に把えることにした。このような問題を実験的に解明する為には、供試体内にstress-induced microcrackを一定方位に配列させるほうが問題をより単純化することができる。この条件は、筆者等が従来より行なっている真三軸圧縮試験機を用いることにより十分満たされる。そして、水の移動のモニターには弾性波速度を利用した。なお、この実験に先立ち、同大理石の最小主応力20 MPaにおける一般的な強度・変形特性に及ぼす中間主応力効果を把握するために、乾燥状態での実験を行なった。更に、中間、最小主応力方向のP波速度を調べた。これらの結果についても併せて述べることにする。

2 実験方法

供試体には山口県於福産細粒大理石を用いた。寸法は35x35x70mmである。図-1は供試体表面の展開図である。最小主応力面には3組の弾性波速度測定用の圧電素子(直径4mm、共振周波数2MHz)とクロス型のゲージ、及び最小主応力方向の変位量測定用変位計の為の銅箔が接着されている。中間主応力方向には、エンドピースに組込まれた1組の弾性波速度測定用の圧電素子が接着されている。上下エンドピースの間には、夫々加圧水を供試体面に均一に広げるための多孔スパーサーとボラスメタル(100ミクロンメッシュ)を挿入した。上下エンドピースには、封圧媒体の内圧への侵入を防ぐためにOリングによるシールを完全に行なった。

各主応力方向の歪及び軸荷重はHP-9845を介して東京測器社製TDS-301を用いてデータ集録した。クリープ設定は最大、中間、最小主応力を夫々200MPa、80MPa、20MPaとした。この応力下では、十分なグイレーションが生じている。

弾性波速度測定にはパルス透過法を用いた(文献2参照)。測定は定常クリープ時には、10分間に1回、加速クリープでは5分間に1回程度とした。

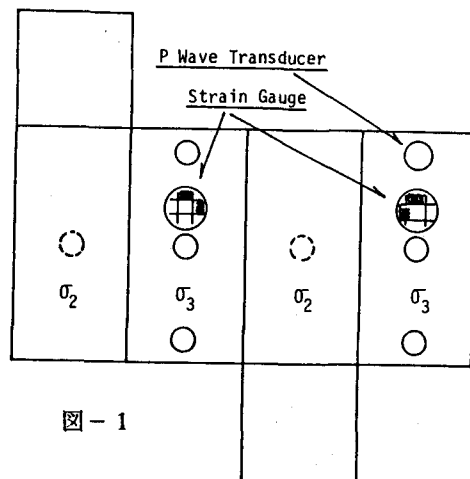


図-1

3 実験結果

3. 1 $\sigma_3 = 20$ MPa での細粒大理石の変形挙動

水注入試験を始める前に、乾燥状態の大理石の一般的な変形破壊特性を調べた。図-2は $\sigma_3 = 20$ MPa 一定の条件のもとでの中間主応力による差応力-軸歪曲線の変化を示したものである。 σ_2 の値は上部の数値で与えられる。 $\sigma_2 = \sigma_3 = 20$ MPa 通常の封圧下の圧縮試験では典型的な延性挙動を示す。圧力が増加するに伴い、最大強度は増加するが、急激な応力低下を伴うようになる。所謂、 σ_2 の増加に伴い、より脆性的になることがこの図より認められる(文献3参照)。このような σ_2 による脆性化挙動は、応力によって生じたクラックの σ_2 方向への強制的な配列によるものと考えられている。

3. 2 $\sigma_3 = 20$ MPa での細粒大理石のP波速度異方性。

図3および4は σ_2, σ_3 方向の歪と弾性波速度との関係を示したものである。歪と弾性波速度とは非常によく対応関係を示していることがわかる。 σ_3 方向の弾性波速度は、 σ_2 の影響をあまり受けないのに対し、 σ_2 方向の弾性波速度は、 σ_2 の増加と共に著しく減衰する。 σ_2 による歪およびVelocityの影響は σ_2 方向に特に著しいことが認められる。

3. 3 水を注入した場合の速度変化

図-5はクリープ設定と同時に水を注入した場合の各経路毎の弾性波速度の時間変化を示したものである。縦軸はクリープ設定時の経路毎の速度に対する変化を%表示したものである。同図中のイラストの矢印は弾性波の測定経路を示す。水を注入する場合、 σ_1 ピストン上部から10kg/cm²の圧力をかけ、供試体及びmicrocrackへの水の浸透を速めた。と同時に、 σ_1 ピストン下方部のバルブを開き排水状態とした。まず最初に経路毎の変化を比較してみよう。1の一番上部の経路では、測定開始直後から速度回復現象が表われ、その量は最大7%程度まで達している。3の最下方部の経路では測定開始後3.5時間してから速度の回復が始まり、その量は最大6%程度に達している。経路4と6に

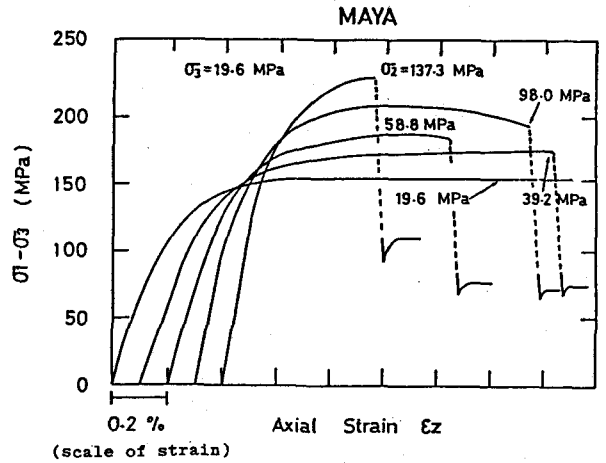


図-2

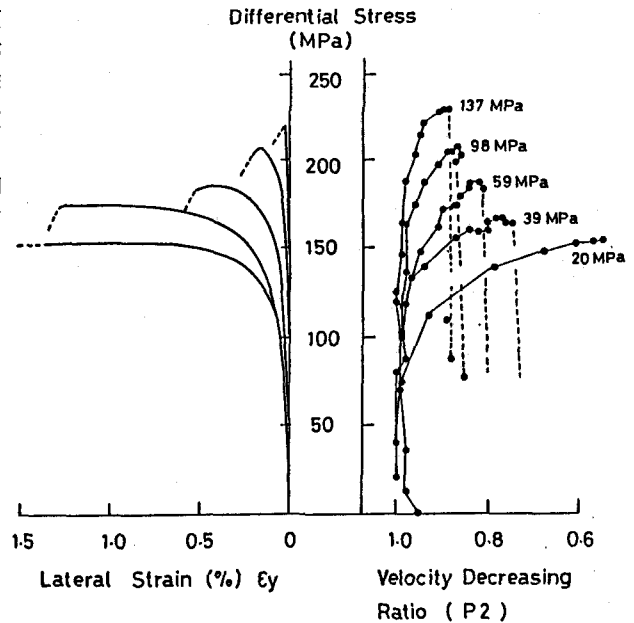


図-3

おいても速度回復に要する時間はほぼ同じである。2は供試体中央を通る経路であるが、1、2と比べると減少-増加-減少という小さなパターンの繰り返しにみえる。しかし、全体として見れば、わずかながら増加する傾向にある。他の経路に比べて、2の経路が複雑な傾向を示すことの理由については後で議論することにする。同じクリープ状態で水を注入しない場合の1、2、3そして σ_2 方向の経路に関する結果を図-6に示した。クリープ設定後、速度は数%減少するが、その後はほとんど変化しない。

4 考察及びまとめ

差応力-歪曲線の結果から明らかなように、 σ_2 の増加は σ_2 方向の歪を著しく減少させるが、 σ_3 方向にはあまり影響しない。と同時に、強度特性においては σ_2 の増加と共に最大強度が著しく増加する。更に、供試体内を伝播するP波速度の減少率は σ_2 方向に著しい変化をもたらす。このような σ_2 および σ_3 方向における dilatancy anisotropyやvelocity anisotropyはstress-induced microcrackの主応力方向における発生量の違いを考えることにより、良く説明することができる。つまり、 $\sigma_2 = \sigma_3$ の条件下では載荷軸面内でほぼ均一なmicrocrackの発生を見ることが出来るものの、 σ_2 の増加と共に σ_2 軸とcrack planeが直交するものは閉じるので、crack planeが σ_3 と直交するクラックが卓越する。従って、 σ_2 の増加と共に σ_2 軸に平行なクラックの定方位配列が促進される。この定方位配列が強度特性における σ_2 効果や脆性化をもたらすものと考えられる。以上の議論により、主応力が少しでも異なるということは、非常に大きな意味をもつことが良く理解できる。

stress-induced microcrackの増加はdilatancy crackの増加という具体的な現象となって表われる。クリープ時であっても、クラックはstress corrosion等により時間と共に増加するであろう。この状態に水が注入されると、クラ

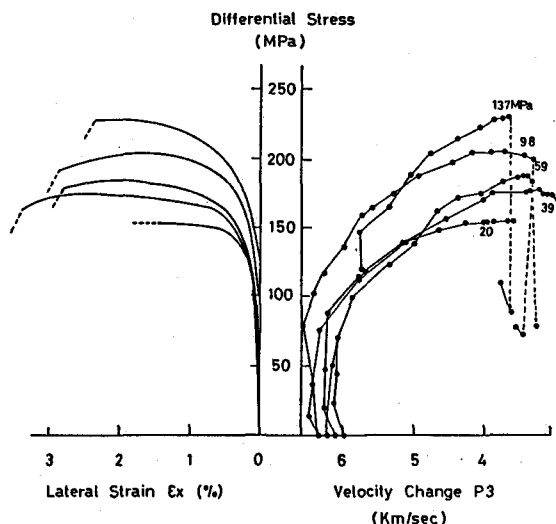


図-4

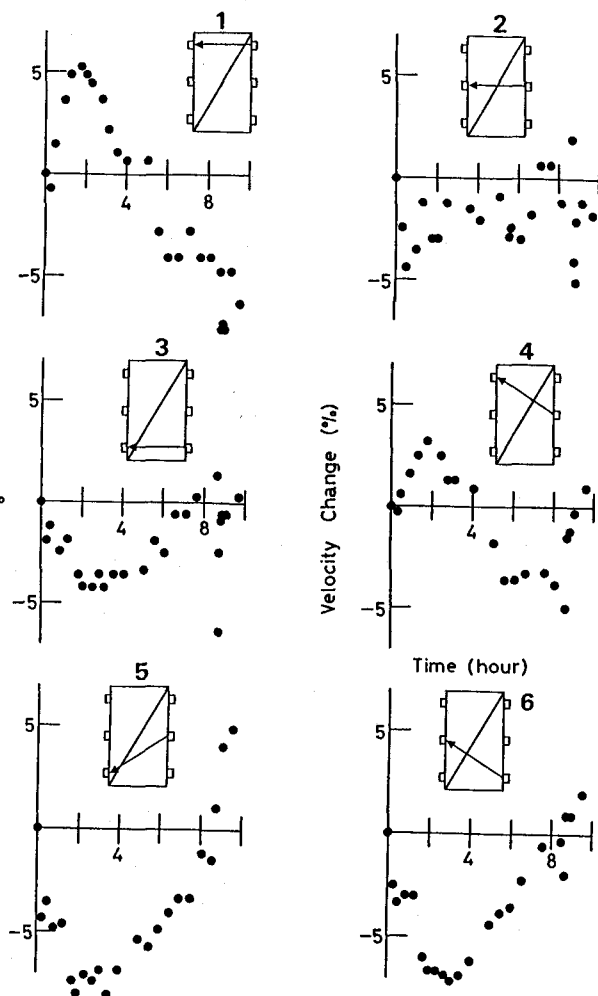


図-5

ックの内部には、ある程度水が充てんされる。しかし、その量、及びクラック全体の何割が満たされるのか？、供試体のどの部分のクラックにどれだけ充てんされるのかについての具体的な情報は現段階では得られていない。クラックに水が充てんされると、このクラックを横切る弾性波速度は速くなる。供試体中の水のフロントは加圧により、そして他の条件（クラック先端の負圧あるいは重力）により徐々に下降して行く。この過程が、たとえば、図-7の経路1、2、3に示される速度回復の時間差となって表われる。ちなみに、経路1、2における距離と速度回復の時間差から加圧水のフロントの浸透速度を計算して見ると0.004mm/secとなる。クリープ時の速度減少や速度回復が以上のようなクラックへの水の充てんとして考える場合、図-5の経路2の供試体中央については、クラックの新なる進展と水の充てんによる速度回復が常に繰り返して生じているのではないだろうか。供試体中央部は、その上下部よりクラック量が多くなることは、現在までに良く知られている事である。岩石試験におけるこのような制約も、経路2の速度変化を複雑にしている要因と考えられる。

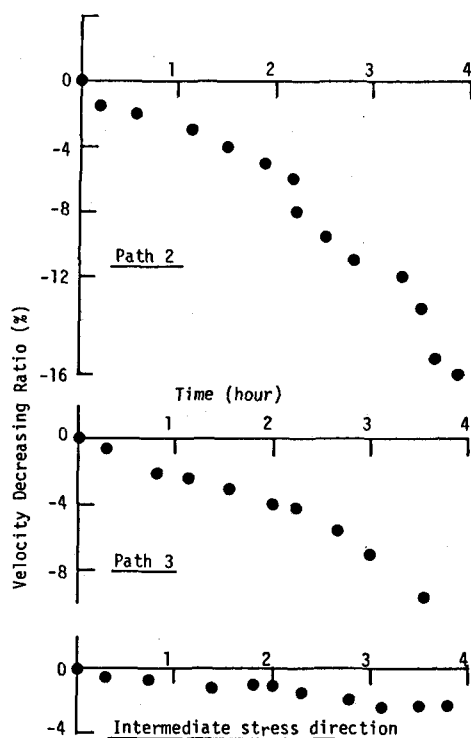


図-6

参考文献

- 1) トランジェント・パルス法による岩石の透水係数測定について
杉本・松木・遠藤 応用地質 26巻3号 P11-18
1985・
- 2) 真三軸応力下における岩石の弾性波速度の挙動
高橋・小出・西沢・他 第6回岩の力学国内シンポジウム
講演予稿集 P37-42 1984
- 3) 岩石内部の亀裂挙動に基づく破壊強度の予測
高橋・小出・他 第17回岩盤力学に関するシンポジウム
講演論文集 P51-55 1985

(68) Relation between water remove and elastic wave velocity in the rock specimen --in the case of fine grained marble --

Manabu Takahashi, Osamu Niahizawa, Hitoshi Koide

Geological Survey of Japan

Abstract

To investigate the water flow in the fine grained marble, we carried out true triaxial creep experiment. In this experiment, The three principal stresses are different from each other. We conducted the usual true triaxial experiment with the constant minimum principal stress of 20 MPa before water injection experiment. We measured the three principal strains and compressional wave velocity propagated minimum and intermediate stress direction on the specimen. On the properties of strength, brittleness is increased with increasing intermediate stress and maximum failure strength is increased with increase of intermediate stress. On deformational properties, the minimum principal strain is not changed for increase of intermediate stress and intermediate principal strain is decreased with increasing intermediate stress. As a result, dilatancy anisotropy and P wave velocity anisotropy are increased with increase of intermediate stress.

A concept of preferred oriented stress-induced microcrack can explain well these obtained results. That is, increase of the intermediate stress can close the microcrack whose flat plane is normal to the intermediate stress direction. Microcrack whose plane is normal to the minimum stress direction are dominant in the stressed specimen.

On the water injection experiment, we detected some interesting results. The existence of water in the stressed specimen increase elastic wave velocity propagated the intermediate and minimum stress direction. In addition, we can find the remove of water front in the specimen. Percentage of velocity recovery achieved the maximum 8% to the initial value.