

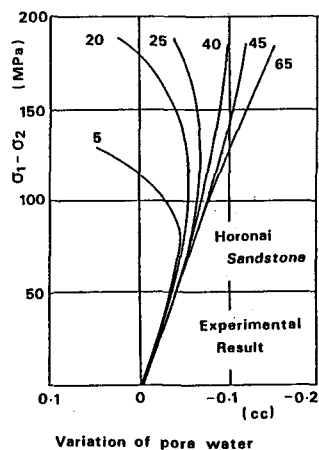
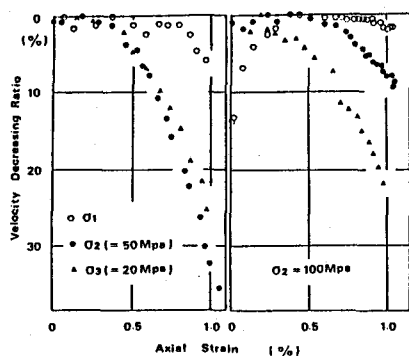
1. 諸 言

近年、岩盤内構造物の大規模化、大深度化に伴ない、その安全性の評価に対し厳密さが要求されるようになってきた。特に原子力関連施設や地下貯蔵施設では、岩盤の力学的安定のみならず、周辺環境に及ぼす影響の大きさから地下水の流れも評価の対象となる場合も多数見うけられる。このような施設では、岩盤の応力状態や強度・変形特性に加え、地下水圧や、地下水の流路となる岩盤内の不連続面の分布状況など岩盤の水理学的性質をも十分に把握しておかなければならない。一方、この地下水圧や不連続面の分布と岩盤の力学的な性質は、多くの場合密接な関係にある。例えば、岩盤内の不連続面それ自体が力学的に形成されることが多いことや、高い圧力下では不連続面が閉塞し、透水性の低下や地下水圧の上昇をもたらす場合があることなどが挙げられる。このような岩盤の力学的性質と水理学的性質との関連で特に興味を引くのは、岩石のダイラタンシーである。このダイラタンシーは、圧縮応力下でありながら偏差応力の増加に伴って非弾性的な体積の膨張が生ずる現象で、クラックを多数含む材料の特徴的な挙動である。岩石が示すダイラタンシーについては、古くから数多くの研究が成されており、載荷の過程におけるクラックの進展が体積の膨張を生ぜしめると解釈されている。最近では、図-1に示すごとく、排水条件下の飽和した岩石でダイラタンシーに伴ない水の流入が生ずることや、図-2に示すように、特に最小圧縮応力方向で岩石の弾性波速度が低下することも明らかになってきた。このことは、とりも直さず偏差応力の付加により岩石内部のクラックが開くことを示しており、このようなクラックの開きが水圧変化に寄与することや、新しく不連続面を形成するという意味で岩盤内の不連続面分布に強く影響を及ぼすことは想像に易い。従って、先に述べた岩盤の力学、水理学的特性を評価する上で、岩石のダイラタンシーを理解しておくことは、大きな意義を持つと考えられる。

筆者らは、このような観点から、岩石のダイラタンシー特性と、これが原因で生ずる様々な現象、例えば透水性や地下水圧の変化などについて研究を進めているが、本報告では、この研究の一環として行なった乾燥岩石の三軸圧縮試験結果を紹介する。この実験は、ダイラタンシーが生ずる過程での岩石内部の微視的な変化を調べることを目的とし、岩石の変形特性に加え、AE並びに弾性波速度を計測対象とした。

2. 実験装置及び実験条件

実験には、周圧型三軸圧縮試験装置を用いた。載荷・計測システムの概略をFig-aに示す。本装置は、封圧100MPa、軸力200t、間隙水圧50MPaの載荷能力を有し、またセル内の油を直接加熱するとによって常温～200℃の温度条件下で実験が可能である。セル内には最大42点のひずみゲージ、AEセンサ、温度センサなどを装着することができ、これらの計測及びモニタは、16bit型コンピュー

図-1 軸差応力と間隙水量変化⁽¹⁾図-2 弾性波速度の異方性⁽²⁾

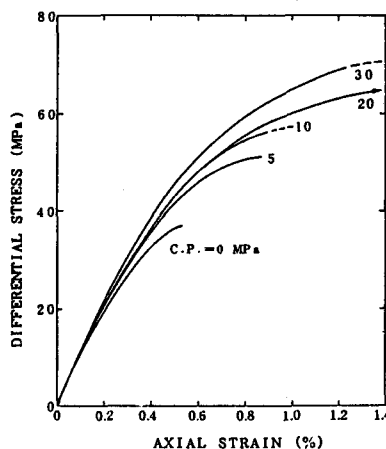


図- 3 軸差応力と軸ひずみ

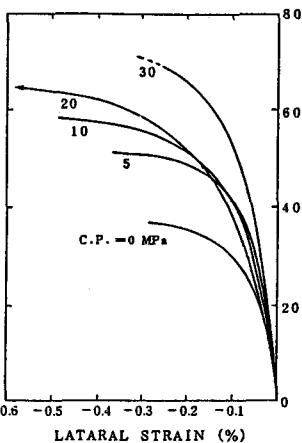


図- 4 軸差応力と横ひずみ

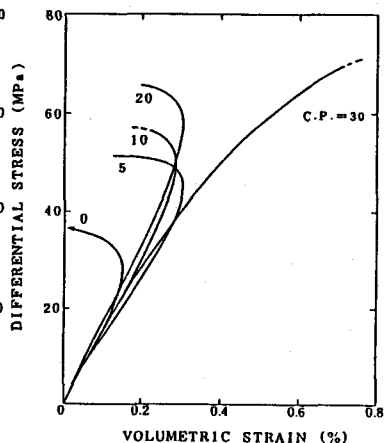


図- 5 軸差応力と体積ひずみ

タ 4 台によって行なわれる。

本実験は、乾燥させた来待砂岩を用い、室温状態で封圧を 0~30 MPa まで変化させ、偏差応力下での変形特性及び A E ・弾性波速度特性を調べた。なお、弾性波速度の計測は、Fig-a に示すごとく円柱供試体（直径 5 cm、高さ 10 cm）の軸方向及び直径方向に貼付した一対の A E センサの片方に一定時間毎にパルスを送ることによって行なった。この A E センサは、A E の計数にも同時に用いた。また岩石の変形は 3 対のクロスゲージを岩石表面に直接貼付することにより計測した。

3. 実験結果

実験結果を図-3~13 に示す。本実験では、岩石が最大の軸差応力を示す点までの挙動に注目した。

3.1 岩石のダイラタンシーについて

図-3 は供試岩石の軸応力-軸ひずみ線図である。本岩石は一軸破断強度が約 40 MPa と比較的硬い部類に属し、封圧に伴って強度が増加する。封圧が変化しても応力-ひずみ線図の傾きは一樣で、ばらつきが小さい。図-5 は軸応力-体積ひずみ線図で、軸差応力の増加に伴ない非弾性的な体積膨張（ダイラタンシー）が生じていることがわかる。ダイラタンシーは封圧の増加とともに生じにくくなっており、封圧 30 MPa では、逆に体積の収縮が生じているように見える。これらの傾向は、既往の実験結果と同様であり、本岩石が比較的硬い岩石の典型的な挙動を示していると言える。

3.2 弾性波速度特性について

本実験結果の内、最も特徴的な性質を示しているのが弾性波速度の変化である。図-6 及び図-7 に示すように軸差応力の増加に伴ない軸方向の弾性波速度は増加を続け、直径方向の弾性波速度は減少する。（図では封圧載荷後の弾性波速度で結果を正規化した。）また、軸方向の弾性波速度は加えた軸差応力に対しほぼ直線的に増

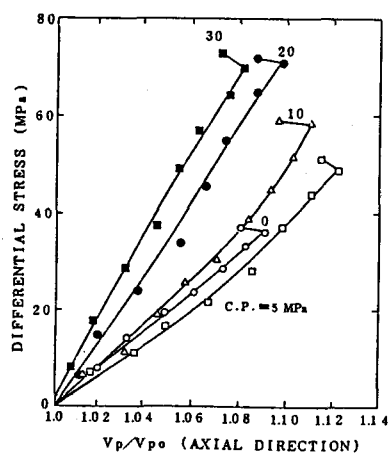


図- 6 軸差応力と軸方向弾性波速度

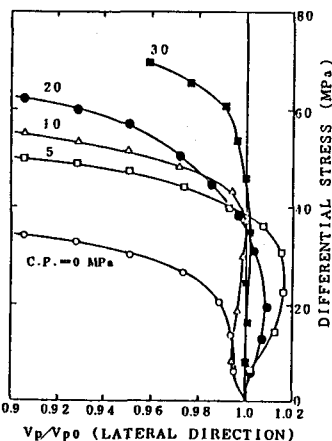


図- 7 軸差応力と直径方向弾性波速度

加するのに対し、直径方向の弾性波速度は、ある点から急激に減少を開始する傾向にある。これらの傾向は封圧の増加とともに鎮静化する。このような弾性波速度の異方性に対しては、図-2に示した実験例などと併せ考えることにより次のような解釈を与えることができる。即ち、軸差応力の付加に伴ない軸方向にはクラックの閉口や空隙への粒子の落ち込みが除々に生じ弾性波速度が増加するが、この変化は緩慢である。また封圧によりこれと同様の変化が岩石内部で生ずるため、封圧の増加に伴ない新たなクラックの閉口などが生じにくくなり弾性波速度の増加は低減する。一方、軸差応力の増加に伴ない軸方向へのクラックの進展及び直径方向へのクラックの開口が生じ、直径方向の弾性波速度は著しく減少する。封圧の増加によりこのようなクラックの進展、開口は抑制され、弾性波速度の減少度合は軸差応力に対し小さくなる。筆者らは、理論的にクラックの進展が最大圧縮応力方向に生じ易いことを見出し、この実験結果はこの仮説と整合性を有している。

3.3 ダイラタンシーと弾性波速度

先に述べたようなクラックの開口は横ひずみの増加に寄与し、みかけの体積膨張を生じさせる。図-8は、体積ひずみと直径方向弾性波速度の関係を示しているが、体積ひずみが膨張傾向を示すと期を同じくして直径方向弾性波速度の低下が生じている。直径方向のひずみと弾性波速度の遅れもよい相関を示しており、ここでも直径方向へのクラックの開口ないしは軸方向へのクラックの進展が生じていることがうかがえる。ただし、封圧が高まるにつれ同じひずみ量でありながら弾性波速度の遅れが小さくなっており、直径方向のひずみには、クラックの開口以外の成分、例えばクラックのすべりや粒子の転位などに起因するひずみが含まれていることがわかる。体積ひずみにはこのような成分が含まれていないと考えることができ、体積ひずみの変化と弾性波速度の遅れの様子は、体積の減少を続ける封圧 30MPa の場合を除いて封圧にかかわらず様である。

3.4 ダイラタンシーとAE

図-11に示すごとく軸差応力の増加に伴ないAEも活発に発生する。これは、既往の研究により得られているように岩石内部で微少な破壊が全体破壊に先立って生じていることを示している。AEが活発となる点は封圧の増加に伴ない上昇し岩石の変形挙動が安定化してゆくことを示している。このAEと体積ひずみの関係を調べたものが図-12である。ここでも体積ひずみが膨張傾向を呈するとほぼ同時にAEが活発に生ずるようになるように見受けられるが、封圧が高くなると体積ひずみがさほど膨張傾向を示さないにもかかわらずAEがよく生じていることもわかる。さらに、直径方向の弾性波速度の変化とAE個数を比べてみれば、封圧が高くなると弾性波速度の低下がさほど生じないにもかかわらずAEは活発に生じていることがわかる。これらを総合すると、AEは、体積ひずみの膨張

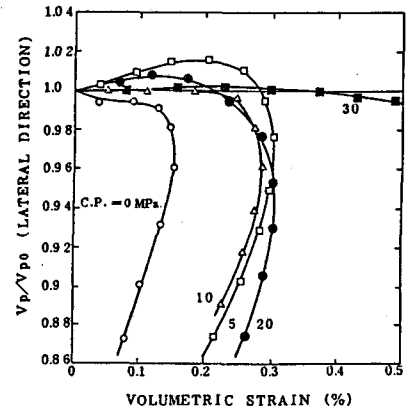


図-8 直径方向弾性波速度と体積ひずみ

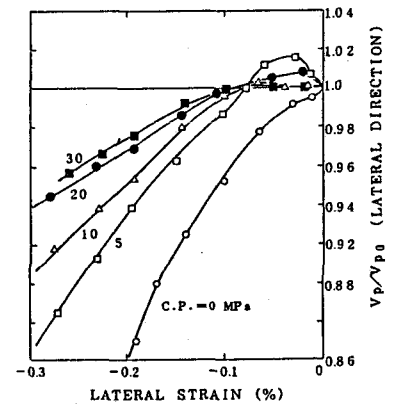


図-9 直径方向弾性波速度と横ひずみ

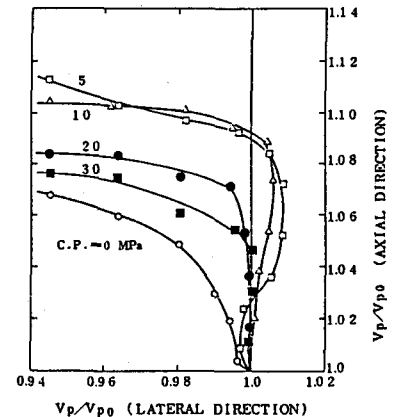


図-10 軸方向と直径方向の弾性波速度

に寄与するようなクラックの進展や開口によってのみ生じているのではなく、クラック面でのすべりや粒子の転位などによっても生じ、従って、A E計測は岩石内部で生じている非弾性的な変形挙動の全体を捉えていると言えよう。逆に単にA E計測のみからは、内部のクラックが開口しているのかあるいは滑動しているのかを明瞭に区別することができず、A E計測により岩石内部の微視的な変化を知るためには、波形の分析や弾性波速度計測の併用などを心がけなければならないと考えられる。

4. 結 言

本報告では、岩盤の力学、水理学的性質に大きな影響を及ぼすと考えられる岩石のダイラタンシー特性を、乾燥した岩石を用いて調べた結果を示した。これにより

- i) ダイラタンシーに伴う弾性波速度の異方性から、最大圧縮応力方向へのクラックの進展及び開口がダイラタンシーを生じさせている可能性が高い。
- ii) 封圧の増加によりこのようなクラックの進展が抑制されダイラタンシー量は低下する。
- iii) A Eの計測からは、封圧の増加によりクラックの開口を伴う進展に代わって、すべりや転位など体積変化にさほど寄与しない微少破壊が中心的に生ずるようになる。

ことが明らかとなった。

本実験は乾燥岩石を用いたが、ダイラタンシーを生ずるような場合、飽和させた岩石では

- i) 非排水条件下での間隙水圧の減少
- ii) 排水条件下での水の流入
- iii) 軸方向の透水性の増大

などが、ダイラタンシーがクラックの開口を伴っている以上生ずる可能性がある。今後、今回の実験で得られた結果を再吟味するとともに、ダイラタンシーが引き起こすと考えられる上記の現象などについてさらに検討を進める予定である。

(参考文献)

- (1) 後藤, 他 “岩石の変形過程に伴う間隙水量変化”, 日本鉱業会春季大会, 1982
- (2) 高橋, 他 “真三軸応力下における岩石の弾性波速度の挙動”, 第6回岩の力学国内シンポジウム, 1984
- (3) 茂木, 他 “三軸圧縮応力下の岩石の変形, 破壊” 第5回岩の力学国内シンポジウム, 1977
- (4) 里, 他 “岩石のダイラタンシーに関する一考察” 第6回岩の力学国内シンポジウム, 1984

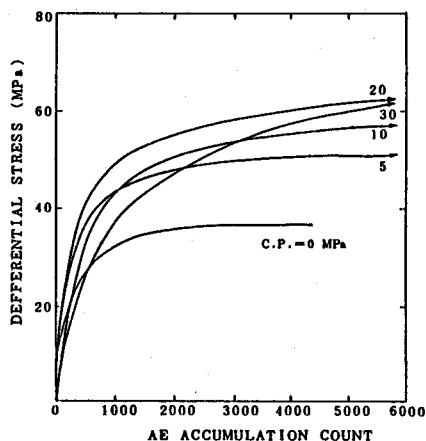


図-11 軸差応力とA E累積数

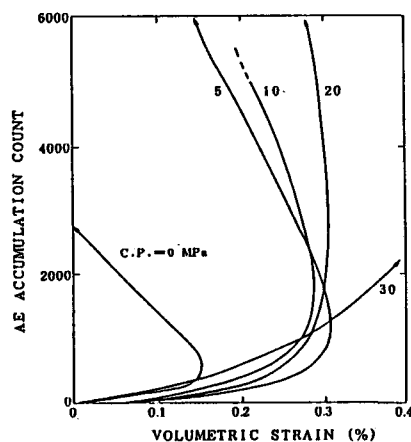


図-12 A E累積数と体積ひずみ

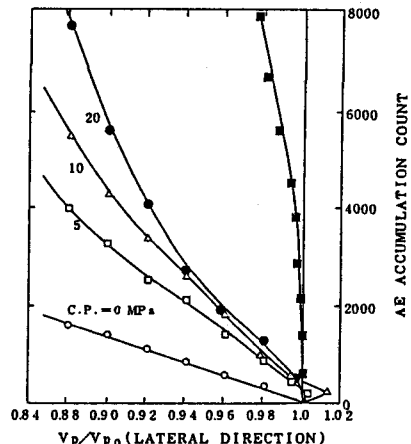


図-13 A E累積数と直径方向弾性波速度

(69) An Experimental Study on Rock Dilatancy

by

M. Sato and T. Aoki

(Taisei Corporation)

Summary

Rock dilatancy prior to macroscopic failure is interpreted as the consequence of accumulation of crack propagation and opening. It is easy to imagine that such propagation of cracks induces changing of rock permeability, pore pressure and water flow, even though rock structure seems to be stable. Therefore the mechanism and behavior of crack propagation must be understood when evaluating rock hydraulic or hydro-mechanical properties of underground structure, as well as rock mechanical properties.

From this point of view, triaxial compressive tests of rock specimen (kimachi sandstone, $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$) are carried out for the purpose of examining the relationship between rock dilatancy and microscopic behavior of cracks in detail.

Confining pressure is varied from 0 to 30MPa. Strain, acoustic emission count and elastic wave velocities in the axial and lateral directions are measured under deviatoric stress condition.

Following characteristics are obtained by the series of tests.

- i) Micro-crack propagation occurs in the direction of maximum compressive stress along with increasing deviatoric stress, and cracks open in the direction of minimum compressive stress.
- ii) Crack openings produce inelastic volume change (dilatancy) of rock. Such tendency decreases with increasing confining pressure.
- iii) Another types of failure continue to occur though confining pressure increases, and these failures produce inelastic deviatoric strain.

By these experiments, the microscopic behavior of rock under compressive stress is partly but clearly shown. We are planing, for the next step, experiments which make hydro-mechanical effect of crack propagation clear, for example pore water pressure or permeability change under the deviatoric stress condition.

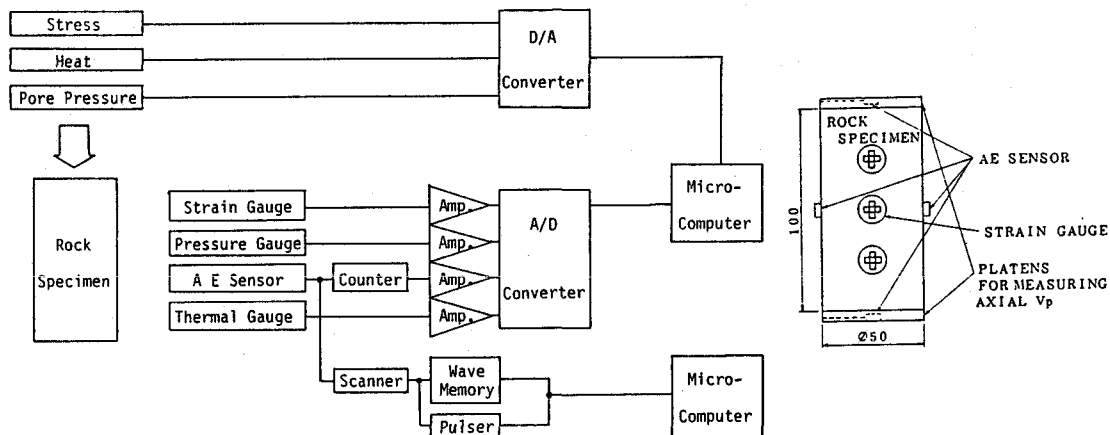


Fig-a Schematic Diagram of Test System and Rock Specimen