

10. 含水岩石の変形にもなる 電気伝導度と弾性波速度の変化

東大理学部 藤井直之・浜野洋三

1. はじめに

応力場のもとで結晶質岩石が脆性破壊に至る過程では、種々の物性変化が観測されている。とくに破壊強度の半分以上の応力下で、かつ、封圧が低い ($< 3 \text{ Kb}$) ときには、ダイラタンシーとして現われる割れ目体積の増加が、これら物性変化の主要因と考えられる。一方、地震の前兆現象の物理的要因としてダイラタンシーを考えることが広く受け入れられてきている (Nur [1]; Whitcomb et al. [2]; Sholz et al. [3])。しかし、報告されている種々の観測を理解する上で、基礎的な実験データはまだ不足している。

含水岩石の比抵抗の応力による変化は、これまでに種々の測定がなされてきた (Parkhomenko, [4]; Yamazaki [5]; Brace et al. [6]; Brace and Orange [7]; Brace [8])。常温附近 ($< 400^\circ \text{C}$) では、岩石自体の比抵抗が非常に大きい ($\geq 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$) ために、含水岩石の比抵抗を支配するのは空隙中に存在する少量の水であり、この水が導管や膜となってつくるネットワークの構造によって比抵抗値が決まると考えられている。岩石の変形にもなって現われるダイラタンシーは、期待される弾性的体積変化からのずれとして定義され (Brace et al. [9])、したがって、剪断応力によって生じる非線形の体積膨張である (e.g. Nur [10])。これは、岩石内に新たに生じた微小割れ目によるものと考えられ、比抵抗や弾性波速度などの物性変化を引き起こすのである。比抵抗の差応力による変化の実験は、水に十分飽和した岩石や room dry という条件でなされたものが多かった。しかし、新たに割れ目が生じる場合とか、水の液→気相変化の領域 (地熱・火山地域など) では、部分的に飽和した岩石の変化を考えることも重要である。

一方、差応力によって岩石内の空隙の形は異方的分布をするようになる。このような、Stress-induced anisotropy は、弾性波速度の異方性として多くの測定がなされ (Tocher [11]; Matsushima [12]; Nur and Simmons [13]; Thill [14]; Gupta [15]; Bonner [16]; Hadley [17])、割れ目の体積や分布および含水量との関連が議論されてきた。

岩石が破壊に至る過程で、割れ目の体積や形の分布などがどのように変化するかを知るためには、多くの情報量が必要である。この小論では、含水率が既知の花崗岩について、一軸圧縮における歪と比抵抗および、たて波速度の変化を同一試料について測定した結果について述べる。これだけで

は、上の問題に関して定量的説明ができるほど十分であるとは言えないが、微小割れ目の形や分布に関係する情報量を少しでも増加させて、より具体的なイメージを得ることを期待したのである。

2. 実験

実際に圧縮試験をする前に、含水率による比抵抗の変化を知っておく必要がある。第1図には、ここで対象とする Inada Granite について示してある。この花崗岩の空隙率は1.1%で、飽和時の比抵抗は 1.5×10^9 ohm \cdot cm である。飽和度が50%程のところ屈曲点があって、この点よりも水分が多いと、水は空隙の内壁を一樣にぬらすのに十分あり、比抵抗 (ρ) \propto (含水量; W) $^{-2}$ という関係になる。またこの点よりも水分が少ないと、いろいろな所で空隙の内壁をぬらしている水の膜が切れ、ネットワークが複雑に変化していき、 -2 という勾配よりもずっと急になる。もっとも、一樣にぬれた場合にこの勾配が -2 という値を持つかどうかは、空隙率やネットワークによって多少は変化する。第2図には、伊豆の青石という凝灰岩の例を示したが、この岩石では空隙率が約18%、屈曲点は5%飽和度で、勾配は -1 である。したがって、この飽和度が大きい方で得られた比抵抗-含水量(体積%)関係の勾配は、一つの岩石試料についての空隙のつくるネットワークの性質を現わしているものと考えられる。この意味でいわゆる Arches' law とは独立な、空隙の形状やネットワークに関するパラメータとなる可能性がある。

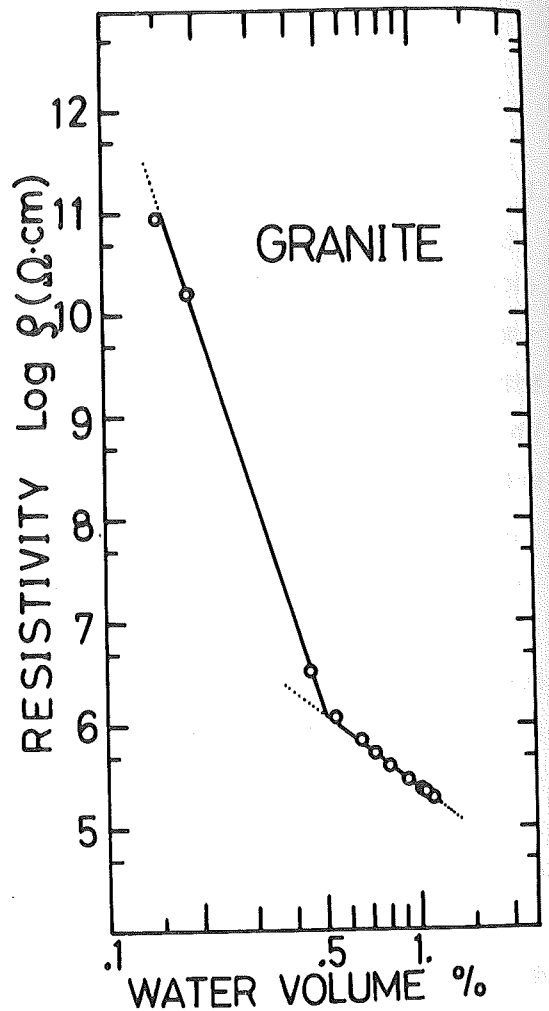


Fig.1 The variation of electrical resistivity with water content for Inada Granite at room temperature.

さて、実験に用いた試料は、飽和度が約50%位のときに、エポキシ系樹脂で表面をおおっ
てしまい、ストレインゲージと抵抗およびトランスデューサー用の電極を接着した。第3図に、
測定系の概念図を示した。一軸
圧縮によって期待される異方性
は、用いた試料が等方的であれ
ば軸対称であるから、直方体の
両側面は、歪と電極用にそれぞ
れ用いた。直方体のサイズは3
×3×5 cmで、5 cmの方向に軸
圧をかけた。この岩石 (Inada
Granite) は Mogi (18) によれ
ば、封圧1 barで約1.5 K bar
の圧縮強度を持つ。そこで、は
じめにこの強度の約半分の700
barsまで圧縮し、次に $\frac{3}{4}$ 程の
1.1 K bar まで圧縮してダイ
ラタンシーの効果を調べるこ
とにした。

比抵抗の測定は約2 Hzの交
流を用い、分極の影響が小さく
なるようにした。軸方向の電極
は3×3 cm、それに直角方向は
1.5×2 cm程の導電接着剤を試
料に直接接着した。表面伝導の
影響は実験誤差内で無視でき、
はじめの状態はほぼ等方的であ
ることも確かめられた。また、たて波速度は、2 MHzのセラミック振動子を、比抵抗用の電
極の中心に接着し、通常のパルス伝播法により測定した。

以上のようにして、第1・第2圧縮サイクルとも、軸方向とそれに直角な方向の2方向につい
て、歪と比抵抗とたて波速度を荷重の関数として測定し、岩石の変形によるこれらの物理量の變
化を調べた。

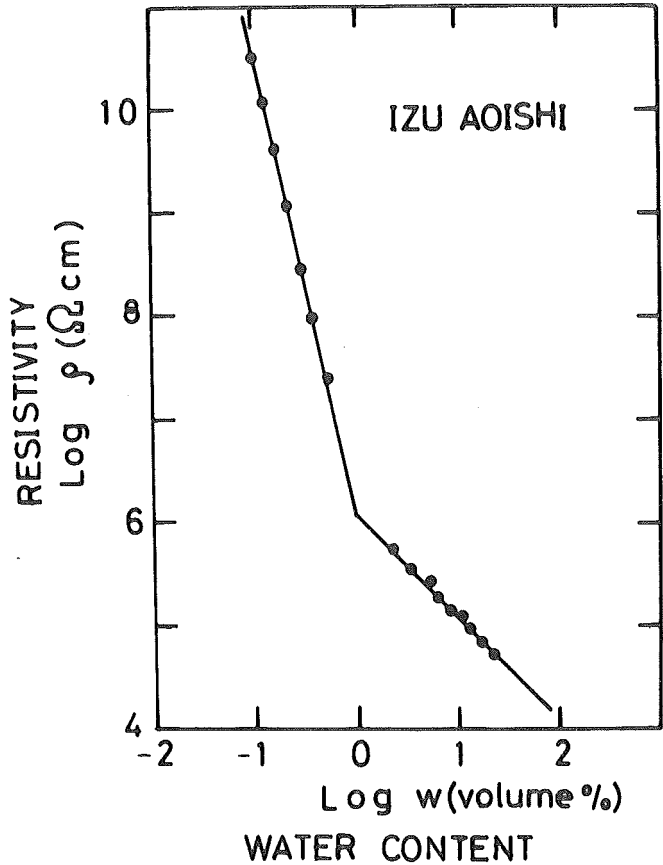


Fig. 2

The Variation of electrical resistivity with water content for Ao-ishi Tuff at room temperature.

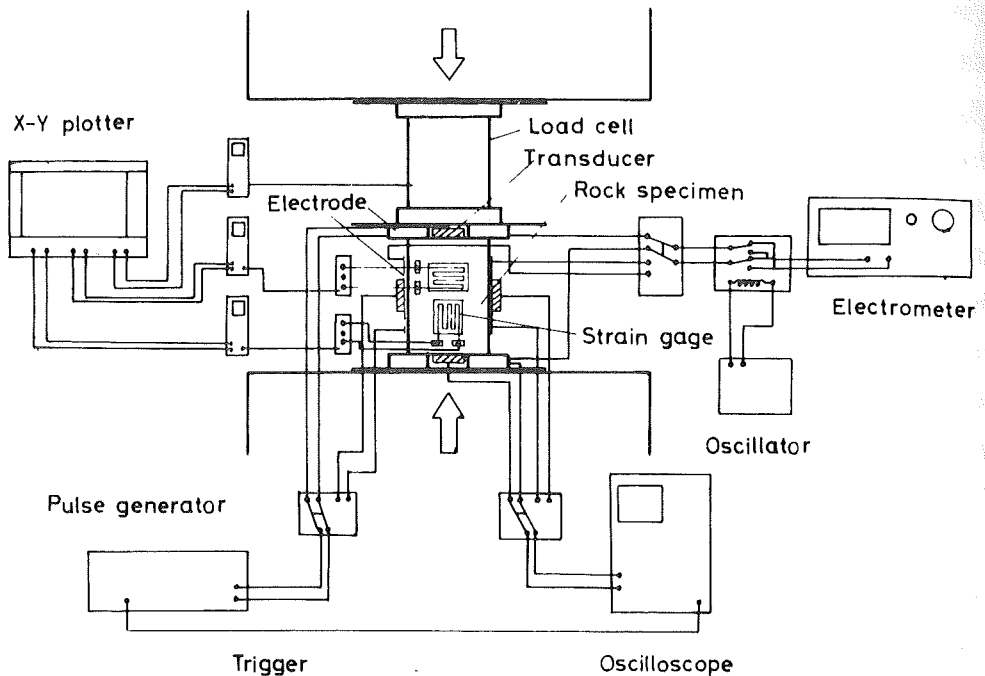


Fig. 3 Schematic diagram of showing simultaneous measurement on strain, resistivity and compressional wave velocity of a rock.

3. 結果と議論

圧縮方向の歪 (ϵ_{\parallel}) とそれに直角方向の歪 (ϵ_{\perp}) の記録から、体積歪は $\epsilon_{\parallel} + 2\epsilon_{\perp}$ として求められる。この体積歪と加えた応力の関係が第4図に示してある。実線は荷重の上昇時、点線は下降時の連続的な変化の跡である。また●、○、▲、△などの印のところでは、比抵抗とたて波速度を測定した。各印の間は5~10分間位で、平均的な体積歪速度 10^{-6} sec^{-1} である。第1サイクル(●と○印)では、体積歪の履歴は0.05%程度でほぼ弾性的な変化をしている。しかし第2サイクル(▲と△印)では、750 barsを越した所から次第に体積歪が正(つまり膨張)の方へ移行していく。この図から、第2サイクルでダイラタンシーが顕著になったことがわかる。新たに出来た空隙は最大0.25%程度で、永久歪としては0.1%程となっていることがわかる。はじめの空隙率は1.1%であったから、空隙が約1割増加したことになる。

第5図には比抵抗の変化をそれぞれの方向について示した。はじめの値は両方とも $(1.5 \pm 0.2) \times 10^6 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ であった。両方向とも比抵抗は見事に履歴現象を示している。つまり、はじめ応力を増していくと比抵抗は減少していくが、それを減じていくときは比抵抗がほとんど

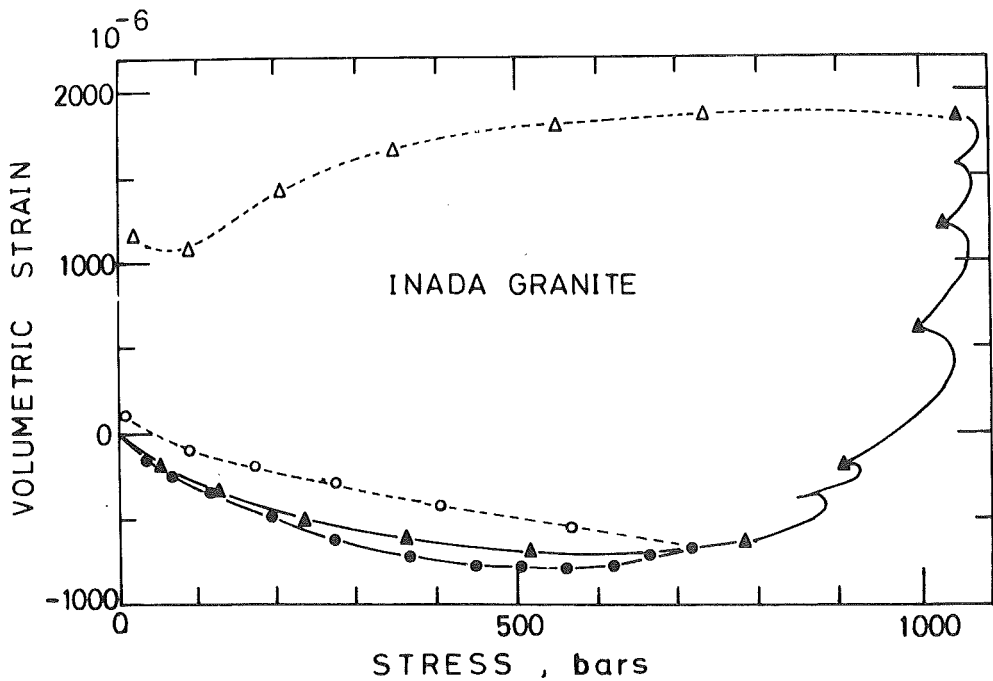


Fig.4 Volumetric strain versus uniaxial compression.

Closed circles and triangles indicate the sample-points for resistivity and velocity measurements in first and second increasing stress cycle respectively. Open ones are corresponded to decreasing stress cycle.

変化せず、2回目の応力増大時もほぼこれと同じ値をとる。しかし応力をさらに増すと、第1サイクルの応力増加時をそのまま延長するかのごとく比抵抗の減少がはじまる。第2サイクルの応力減少時も、やはり最高応力時の値を保ったまま一定の比抵抗値となる。あたかも応力を記憶しているようである。これは、一度空隙内表面が水にぬれると、水の膜は切れなくてそのまま保たれ、ネットワークが保存されると考えることにより説明される。しかし、比抵抗で観測している限り、はじめの応力増加時の減少は、体積歪の減少にともなってつぶれた空隙から押し出された水が、新たにネットワークを作ったことによると考えられるが、第2サイクルのダイヤタントな領域においても同じような割合で比抵抗が減少するということの量的な説明は難かしい。第2サイクルでは、新たに出来た割れ目に水が吸い込まれていってネットワークが生ずると考えられるからである。この意味で比抵抗変化にダイヤタンスーの影響が直接観察されたということとはできない。一方、比抵抗の

減少する割合には、応力による異方性がみられる。すなわち、軸方向の変化 (ρ/ρ_0) $_{\parallel}$ は、はじめの数 100 bars までは $0.26/Kb$ と急であり、(ρ/ρ_0) $_{\perp}$ とは対照的である。しかし、これより大きな応力では、(ρ/ρ_0) $_{\parallel}$ の方が (ρ/ρ_0) $_{\perp}$ に比べて小さな変化をしている。第 2 のサイクルが終ったあとは (ρ/ρ_0) $_{\parallel}$ がほぼ 0.72 なのに対して、(ρ/ρ_0) $_{\perp}$ は 0.64 となっている。もっともこの差は後で述べるたて波速度の異方性 (第 6 図) より小さい。

最後に、この研究で得られた歪、比抵抗、たて波速度の応力による変化をまとめて第 6 図に示す。圧縮軸方向の歪 (ϵ_{\parallel}) とたて波速度 ($V_{p\parallel}$) は全応力範囲にわたって、非常に良い可逆性を示している。一方、直角方向のたて波速度 ($V_{p\perp}$) は、ダイラタントな領域に入るとそれまで応力とともに速度が増してきたのが、やや減少に転じて、第 2 サイクルの応力下降時には、約 5% 程小さくなる。たて波速度が応力とともに増加することは、応力の小さい範囲 (約 400 bars) までは、Nur and Simmons (13) の結果と同じである。そして、応力による速度の異方的な増加は、応力軸に平行な法線を持つ扁平な割れ目がつぶれ、それに垂直な法線を持つ扁平な割れ目が開くことによってほぼ説明できる。第 6 図では、たて波速度のみ第 3 回目の応力上昇時の変化を測定した結果も示してある (図の星印)。×印は、信号が著しく弱くなった点を示しており、今回の実験では、Matsushima (12) をはじめ Hadley (17) までのように、破壊直前の大きなダイラタンシーに対応する速度の減少は、明確には見られなかった。しかし、たて波速度と ϵ_{\parallel} が、たいへん可

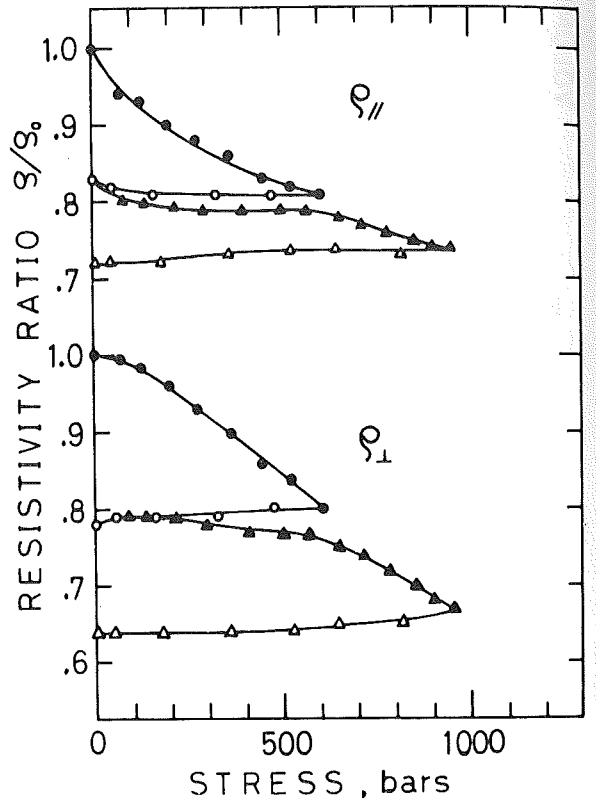


Fig. 5 Variation of resistivity ratio with uniaxial compression. ρ_{\parallel} and ρ_{\perp} indicate the resistivity parallel to and perpendicular to the compression axis, respectively.

逆的な変化を示すのに対して、比抵抗や ϵ_{11} は大きな履歴が現われることは、この図によく示されている。

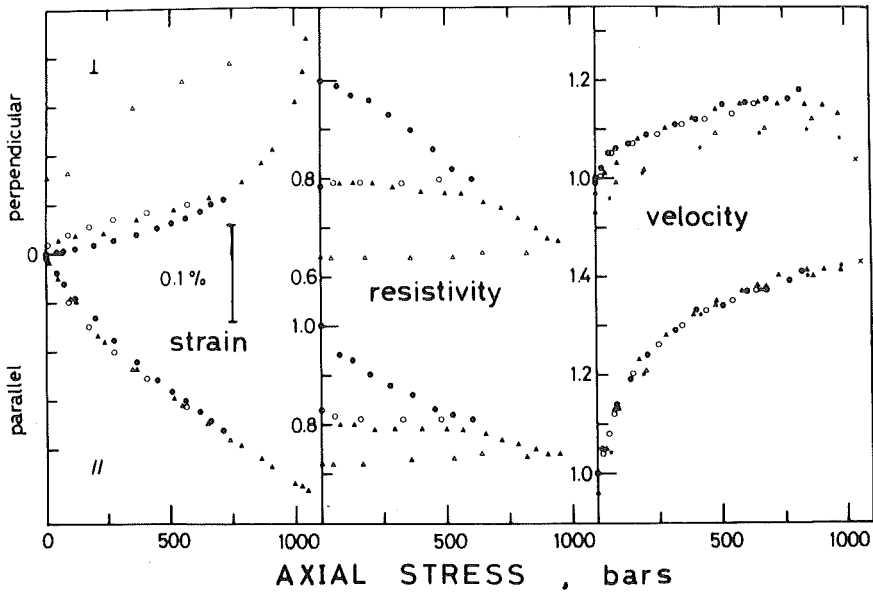


Fig. 6 Summary of variations of strain, resistivity and compressional wave velocity with uniaxial compression for both directions. symbols are the same as in Fig. 6.

4. 結 語

弾性波速度は、その伝播方向に平行な法線を持つ扁平な薄い割れ目によって大きく影響される (Walsh (19)) のに対し、比抵抗は内壁表面が水にぬれた割れ目 (もしくは空隙) がどのようなネットワークになっているかに、大きく左右される。また、この実験では、含水量が飽和に達していないので、その圧力は一気圧である。弾性波からみれば、dry の状態とほぼ同じ条件であるが、空隙内の水は岩石の変形にしたがって移動し、新たな割れ目が生じなくても、水の作るネットワークが変化すると考えられる。これが、水に飽和したまま岩石を変形させた時の比抵抗の変化 (Brace and Orange (7)) との大きな違いである。

以上のことを考えると、第6図に示された結果を定性的に説明することができる。つまり、第1サイクルでは、 $\epsilon_{//}$ 、 ϵ_{\perp} ともにほぼ弾性的に変化し、応力とともに体積歪は減少する。この減少によって、空隙内の水がある割れ目から押し出されて、他の割れ目に移動して新たな水のネットワークを作る。そのため、 $\rho_{//}$ と ρ_{\perp} は減少し、かつ最高応力に対応する値を保つままである。 $V_{p//}$ と $V_{p\perp}$ は、扁平な薄い割れ目が、応力に対して異方的に変形するために大きな異方性を示し、かつ、速度は応力とともに増大する。第2サイクルでは、第1サイクルの最高応力を越えてからダイラタンシーが顕著になるために、 $V_{p\perp}$ に5%程の減少が見られる。しかし $V_{p//}$ は実験誤差内で、その影響はみられない。 $\rho_{//}$ と ρ_{\perp} には多少異方性が現われるが、新たに出来た割れ目にも水が吸い込まれたり、既存の空隙に水が移動したりして、その変化は第1サイクルの応力上昇時と同じようになる。比抵抗の履歴は $\rho_{//}$ と ρ_{\perp} の両方とも第1サイクルと同じようである。このような変化の割合に関しては、現在のところ定量的な説明が困難である。

この実験では、歪の測定にストレインゲージを用いたため、試料の平均的な値しか観察できない。したがって、破壊直前に歪が局在してくると（破壊強度の8～9割、Spetzler and Maitin〔20〕）、測定値が不明確になる。そのため、破壊寸前の状態まで測定することができなかった。また、十分な飽和状態のまま（できれば空隙圧も制御して）の測定も、今後に残されている。

文 献

- (1) Nur, A. (1972)
Bull, Seismol. Soc. Amer. 62 1217-1222.
- (2) Whitcomb, J.H., J.D. Garmany, and D.L. Anderson
(1973), Science, 180 632-635.
- (3) Sholz, C.H., L.R. Sykes, and Y.P. Aggarwal (1973),
Science, 181 803-810.
- (4) Parkhomenko, E.I. (1967) Electrical Properties of
Rocks, Plenum Press, N.Y. 314 pp.
- (5) Yamazaki, Y (1965 and 1966)
Bull. Earthq. Res. Inst. 43, 783-802, and 44, 1553-1570
- (6) Brace, W.F., A.S. Orange, and T.R. Madden (1965),
J. Geophys. Res., 70 5669-5678
- (7) Brace, W.F. and A.S. Orange, (1968)
J. Geophys. Res. 73 1433-1445 and 5407-5420.
- (8) Brace, W.F. (1975)
Pure Appl. Geophys. 113 207-217.
- (9) Brace, W.F., B.W. Paulding, Jr., and C.H. Sholz (1966)
J. Geophys. Res. 71 3939-3953
- (10) Nur, A. (1975)
Pure Appl. Geophys. 113 197-206,
- (11) Tocher, D. (1957)
AGU Trans. 38 89

- (12) Matsushima, S. (1960)
Dis. Prev. Res. Inst., Bull. 32 , 2-8
- (13) Nur, A. and G. Simmons (1969)
J. Geophys. Res., 74 6667-6674
- (14) Thill, R.E. (1973), H.R. Hardy and R. Stefanko (eds.)
Proc. 14th Sympos. Rock Mech., Am. Soc. Civil Eng. N.Y.
- (15) Gupta, I.N. (1973)
J. Geophys. Res. 78 6936-6942.
- (16) Bonner, B. (1974)
Geophys. Res. Lett. 1 217-220.
- (17) Hadley, K. (1975)
Pure Appl. Geophys. 113 1-23.
- (18) Mogi, K. (1964)
Bull. Earthq. Res. Inst. 42 491-514.
- (19) Walsh, J.B. (1965)
J. Geophys. Res., 70. 381-389
- (20) Spetzler, H. and R.J. Martin III. (1974)
Nature, 252 30-31