

岩石の変形と電位発生挙動に関する研究

A study on the electrical potential of rocks during deformation

伊東孝*・アイダン・オメル**・赤木知之***

Takashi ITO, Ömer AYDAN and Tomoyuki AKAGI

The electrical resistivity variation of ground before and during earthquakes occurs, and they are used for the prediction of earthquakes. This study is a contribution to the understanding of the electric potential induced by the deformation of rocks. In experiments, the measurements of acoustic emissions together with electric potential measurements were also carried out in order to see how the so-called seismic electric signals are related to the occurrence and propagation of fractures in intact samples. This article describes the outcomes of this experimental study on electric potential variations during the deformation of rocks

Key Words : uniaxial compression test, electric potential, acoustic emissions

1. はじめに

近年、地盤の変形および破壊時に発生する電位抵抗および電位差の変化を用いて、地盤構造物の破壊予測を行なう手法が考えられてきている。著者らも、様々な岩石の破壊および変形試験を行い、電位差の変化の様子を観察してきた¹⁾。その結果、岩石の変形および破壊前に電位差の変化が現れることが明らかになった。

もともと、この手法は地震予知の分野で開発されてきたものであり、Sobolev²⁾らは地震時および地震発生前における地盤の電氣的抵抗および電位差の変化を用いて地震予知の研究を行っている。彼らは、南北および東西方向に設置した計測器を用いて、地盤の電位差や電気抵抗の計測を行っている。また、Varotsos³⁾らはこの方法を実際の地震予知に適用した。この方法は VAN 法として広く知られるようになったが、未だ妥当な物理モデルが確立されていないことより、Geller⁴⁾らはその適用性に疑問を投げかけている。Nitsan⁵⁾、Cress ら⁶⁾、Yamada ら⁷⁾は、地盤材料の破壊・変形時における電磁氣的特性の室内実験を行っている。彼らは、石英などの圧電鉱物を含む岩石において、岩石内部の応力の変化に伴って電位差や電磁波が生じると報告している。福井ら⁸⁾は、7 種類の岩石を用いて、電磁波の発生と岩石物性との関係を調べている。また、岩石中の間隙や亀裂内の水の流れによっても、電位差が発生すると指摘しているいくつかの研究がある。Tuman⁹⁾、Ishido and Mizutani¹⁰⁾、Jounaix and Pozzi¹¹⁾らは、電位差が岩石中に存在する水の流れに応じて発生し、その大きさは流速に比例するとしている。

岩石のクリープ破壊時間と疲労破壊時間を比較すると、荷重による力積はクリープ試験の方が大きいにもかかわらず、疲労破壊時間のほうが短いという結果が数多く報告されている。この原因として考えられることは、繰り返し荷重によるひずみ量の変化が、岩石の長期強度に何らかの影響を与えているということである。

本研究では、クリープ載荷および繰り返し載荷における岩石内部に発生する AE および電位差を計測することによって、電位差の発生と AE の発生の関係を明らかにし、さらに、微小ひずみの進展と電位差発生の関係を探ることを目的としている。

*正会員 博士(工学) 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科

**正会員 博士(工学) 東海大学海洋学部 海洋土木工学科

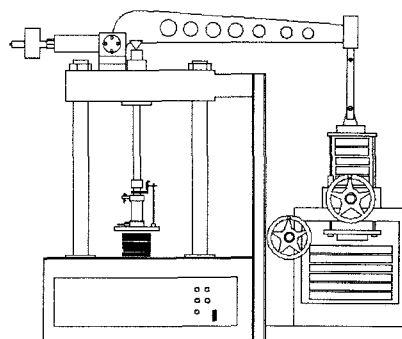
***正会員 工学博士 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科

2. 実験概要

2. 1 実験装置

本研究では、一軸圧縮クリープ試験および一軸圧縮繰り返し載荷試験を行った。実験装置の概要を図一1に示す。載荷方式はレバー式（倍率10倍）で、重錘により各試料に設定する応力を負荷する。この試験装置の最大の軸負荷荷重は約50kNである。この装置を室温 $20 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の恒温室内にセットし実験を行った。

一軸圧縮クリープ試験および繰り返し載荷試験では、載荷応力と変位を計測するとともに、変形に伴って発生する電位差は供試体上下部の側面に取りつけた輪状のはんだを介して、電位計測装置（入力抵抗値10G Ω 以上、入力インピーダンス10G $\Omega \pm 2\%$ 並列で150pF）で測定した。載荷板と電極の間にゴム板（絶縁体）を挟み供試体の絶縁状態を保っている。AEは、供試体側面に圧着させたセンサーにより計測を行った（図一2）。使用したAEセンサーの共振周波数は140kHzであり、システムの応答周波数は100から500kHzである。



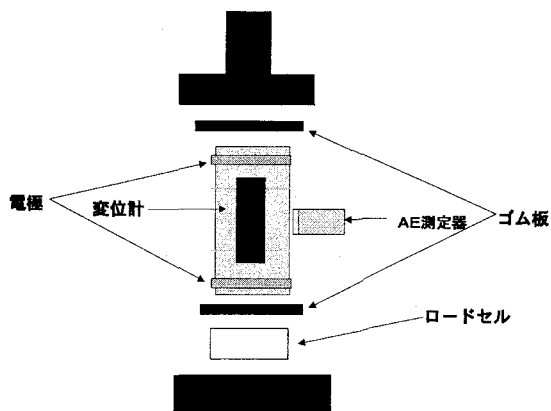
図一1：クリープ載荷装置

2. 2 実験に用いた試料

実験に用いた試料は大谷石である。供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱形に整形したものを用いた。大谷石の物理定数を表一1に示す。

表一1：大谷石の物理諸定数

単位体積重量(湿潤)	1.79	(g/cm ³)
一軸圧縮強度(湿潤)	25.0	(MPa)
引張強度(湿潤)	1.0	(MPa)
粘着力 c	3.4	(MPa)
内部摩擦角 ϕ	18.4	($^{\circ}$)
弾性係数 E	2.24	(GPa)
ポアソン比 ν	0.2	



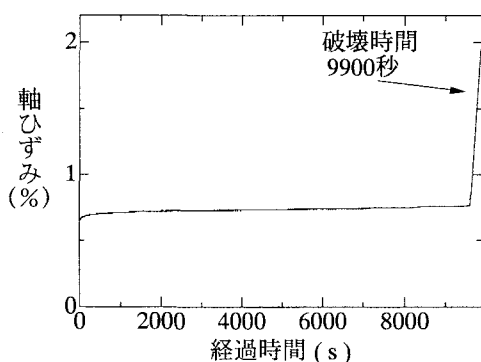
図一2：供試体と計測装置

3. 実験結果

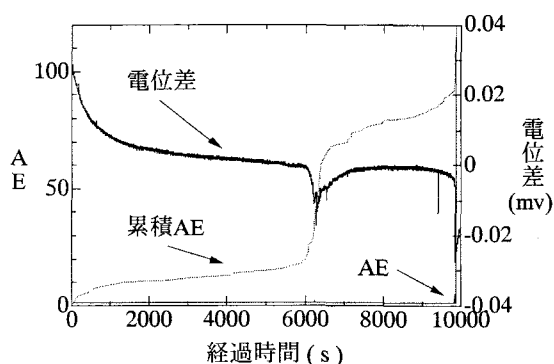
3. 1 一軸圧縮クリープ試験における電位差発生挙動

本研究で行ったクリープ試験は、大谷石を円柱状に整形した供試体を用いて行った。クリープ過程におけるAEと電位差の発生状況を観察することを目的とした試験であることより、クリープ荷重を一軸圧縮強度の約75%の18.75Mpaに設定して試験を行なった。計測したデータは時間と軸ひずみ、AEおよび電位差である。供試体の強度にばらつきが存在することから、同じクリープ荷重を載荷しても破壊時間は異なった結果が得られている。

図一3に破壊時間が約9900秒の試験結果を示す。(a)図は軸ひずみの経時変化を表したものであり、(b)図は、AEと電位差の発生状況を表したものである。荷重を増加させるときに軸ひずみが急激に変化すると同時に電位差にも変化が見られる。また、加速クリープ段階に入ると、AEの変化よりも早く電位差に大きな変化が現れていることが観察された。

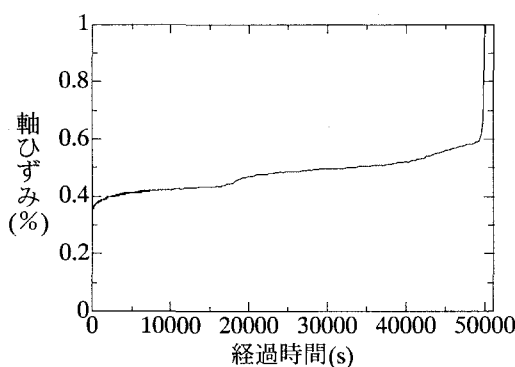


(a)

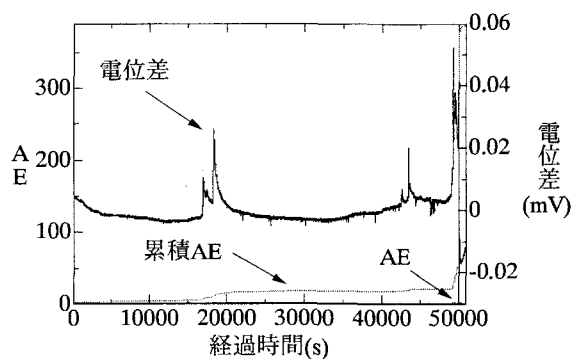


(b)

図一 3：一軸圧縮クリープ試験結果（破壊時間 9900 秒）



(a)



(b)

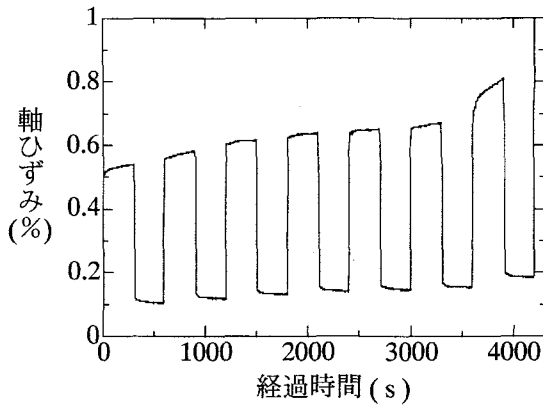
図一 4：一軸圧縮クリープ試験結果（破壊荷重 50000 秒）

(a)の軸ひずみには変化が見られないが、6000 秒を過ぎた時点で A E および電位差ともに大きな変化が見られるところがある。この現象は、A E が多く発生していることから、供試体内部の微小亀裂の進展であると考えられ、電位差も亀裂の発生に応じて変化を見せていることがわかった。

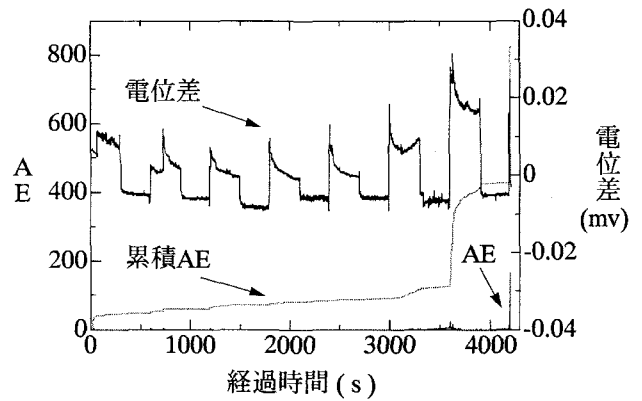
図一 4 には破壊時間が約 50000 秒の試験結果を示す。この結果でも、クリープ破壊直前に A E および電位差ともに大きな変化が見られるが、電位差の変化のほうが早く現れているのが観察される。この結果においては、18000 秒付近において軸ひずみの急変が見られる。この時点で、急速に供試体内部の亀裂が進展したものと考えられ、A E および電位差ともに変化が生じている。その後、45000 秒付近においても電位差の変化が見られ、亀裂の発生があったものと考えられる。さらに、加速クリープ段階になると、電位差は急激な変化を見せている。この結果からは、内部の亀裂の発生は電位差の変化から容易に予測することができることがわかる。

3. 2 一軸圧縮繰り返し試験における電位差発生挙動

繰り返し載荷試験の供試体も、クリープ試験と同じ円柱形に整形した大谷石を用いた。載荷方法は、クリープ荷重と同じ設定である一軸圧縮強度の約 75% の 18.75Mpa を繰り返し載荷した。載荷および除荷の時間はそれぞれ 5 分間とした。この繰り返し載荷を供試体が破壊するまで行なった。5 分間という除荷の時間があるにもかかわらず、クリープ試験よりも短い時間で破壊に至っている結果が多く得られた。図一 5 および図一 6 にそれぞれ 9 サイクルで破壊した結果と 13 サイクルで破壊した結果を示す。破壊時間で表現すると、それぞれ約 4400 秒および 6800 秒となる。

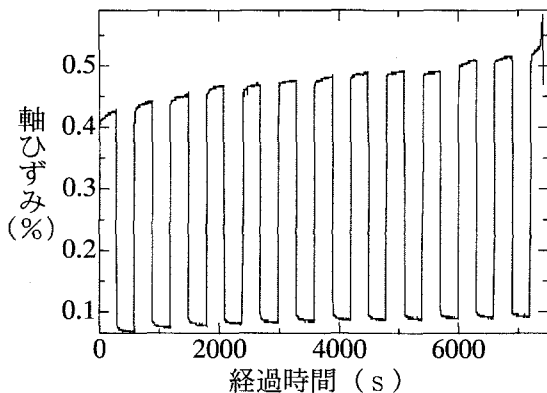


(a)

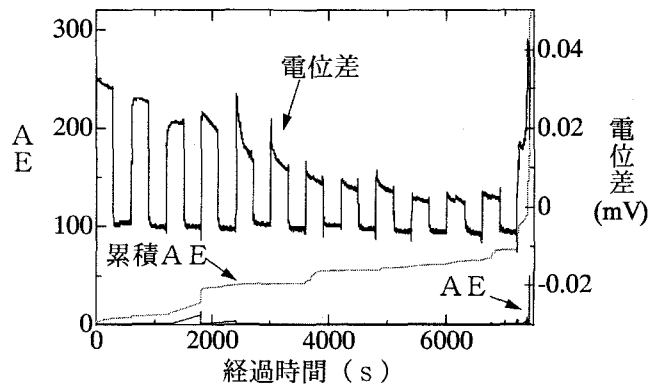


(b)

図一 5：一軸圧縮繰り返し載荷試験結果 (9 サイクル)



(a)



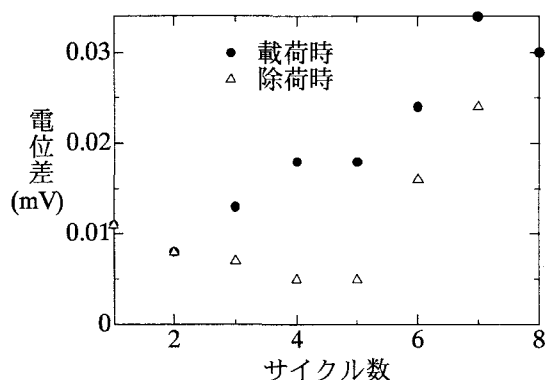
(b)

図一 6：一軸圧縮繰り返し載荷試験結果 (13 サイクル)

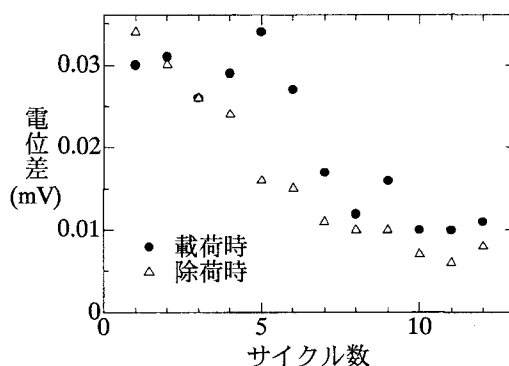
図一 5 (a) は経過時間と軸ひずみの関係を表したものであり、(b) は経過時間と電位差、A E および累積 A E の関係を表している。電位差は載荷時に発生し、除荷するとほぼ 0 の一定レベルに戻る傾向がある。載荷中の電位はクリープ試験で見られるように緩やかな変化を示している。軸ひずみの変化を見ると、6 サイクル目からひずみ速度が上昇傾向を示していることがわかる。電位差を見ると、やはり 6 サイクル目から載荷および除荷時に発生する電位差が上昇していることがわかる。一方、A E の発生状況は電位差より遅く 7 サイクル目から大きな変動が生じている。

図一 6 は 13 サイクルで破壊した結果である。(a) 図より、11 サイクル目からひずみ速度の上昇傾向が見られる。電位差の変化は 1 サイクル目から 10 サイクル目までは、載荷および除荷時に発生する電位差は徐々に減少している。そして、ひずみ速度が上昇傾向を示す 11 サイクル目から増加傾向に入っていることがわかる。しかしながら、図一 5 の結果と比較するとその変化は少ない。A E の変化は 4 サイクル目に多く発生しているのが観察されるが、大きな変化は最後の 13 サイクル目にはいつてから生じていることがわかる。

この結果でも、図一 5 と同様に除荷時にはほぼ 0 の一定電位に戻っており、また、載荷時にはクリープ試験時と同様の緩やかな変化を示している。載荷時および除荷時に発生している電位の大きさを載荷サイクルごとに求めプロットしたものを図一 7 および図一 8 に示す。



図一 7：載荷サイクルと発生電位差
(9 サイクル破壊時)



図一 8：載荷サイクルと発生電位差
(13 サイクル破壊時)

クリープ載荷時に発生する電位差は、載荷時に大きな電位差が発生するが、その後、徐々に減少してゆく。そして、加速クリープ段階に入ったところから大きな変化を見せている。繰り返し載荷の場合も同様の傾向がこれらの図から観察される。1 サイクル目から徐々に発生電位差は減少して行き、ある点から増加傾向に転じた後大きな変化を示して破壊に至るという傾向がうかがえる。

4. おわりに

本研究は、大谷石を用いた一軸圧縮クリープ試験および一軸圧縮繰り返し試験を行い、軸ひずみおよび変形過程に発生するAEおよび電位差を観測した。AEの計測は、載荷中の供試体内部に発生する微小亀裂の発生を知るためであり、亀裂の発生と電位差の発生に関連について検討を行なうためである。実験結果から明らかになった知見を以下に示す。

- 1) 加速クリープ段階に入ると、電位差は急激な変化を見せる。
- 2) AEの発生状況より、供試体内部に微小亀裂が発生したと考えられる時点では、かならず、電位差の顕著な変動が現れている。
- 3) 繰り返し載荷試験において、載荷時の変形速度が上昇傾向に転じる時点から、発生電位差も増加傾向に転じる傾向が見られた。
- 4) 電位差の発生傾向としては、1 サイクル目から徐々に減少していき、ある時点から増加傾向に転じた後、破壊に至る。
- 5) どの試験結果を見ても、AEの変化より電位差の変化の方が早く現れている。しかしながら、その変化が緩やかである。

参考文献

- 1) Aydan, Ö., T. Minato & M. Fukue 2001. An experimental study on the electrical potential of geomaterials during deformation and its implications in Geomechanics. 38th US Rock Mechanics Symposium, Washington, Vol.2, 1199-1206, 2001.
- 2) Sobolev, G.A. Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquakes. *Pure App. Geophys.*, 113,1/2, 229. 1975.
- 3) Varotsos, P., and Alexopolous, K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. *Tectonophysics*, 110, 73-98. 1984.
- 4) Geller, R. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275, 161.1997.

- 5) Nitsan, U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks. *Geophysical Res. Lett.*, 4, 333-336. 1977.
- 6) Cress, G.O., Brady, B.T. & Rowell, G.A. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 331-334. 1987.
- 7) Yamada, I., Masuda, K. & Mizutani, H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 57, 157-168. 1989.
- 8) 福井勝則・大久保誠介・寺嶋卓文：一軸圧縮試験における岩石からの電磁波の発生、資源と素材、Vol.117、pp.703-710,2001.
- 9) Tuman, V.S. Streaming potentials at very high differential pressures. *J. Appl. Phys.*, 34, 2014-2019. 1963.
- 10) Ishido, T. & Mizutani, H. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics. *J. Geophys. Res.*, 86(B3), 1763-1775. 1981.
- 11) Jounaix, L. & Pozzi, J.P. Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress: Consequences for electrotelluric anomalies prior to earthquakes. *J. Geophys. Res.* 100(B6), 10197-10209. 1995.