

岩質材料の変形に伴う電位発生に関する実験的研究

An experimental study on the electrical potential of geomaterials during fracturing and sliding

伊東孝*・アイダン・オメル**・赤木知之***・川本朧万****

Takashi ITO, Ömer AYDAN, Tomoyuki AKAGI and Toshikazu KAWAMOTO

The electrical resistivity and electrical potential variations of geomaterials before and during earthquakes occur, and they are used for the prediction of earthquakes. This study is a contribution to the understanding of the electric potential induced by the fracturing and sliding of geomaterials. 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 and to sliding of samples containing discontinuities. This article describes the outcomes of this experimental study on electric potential variations during the fracturing and sliding of geomaterials.

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

1. はじめに

地震時および発生前における地盤の電気的抵抗および電位差の変化を用いて Sobolev¹⁾らは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た。また、Varotsos²⁾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、Geller³⁾らはその適用性に疑問を投げかけている。Nitsan⁴⁾、Cress⁵⁾、Yamada⁶⁾らは、地盤材料の破壊・変形時における電磁気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⁷⁾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。Tuman⁸⁾、Ishido and Mizutani⁹⁾、Jounaix and Pozzi¹⁰⁾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。

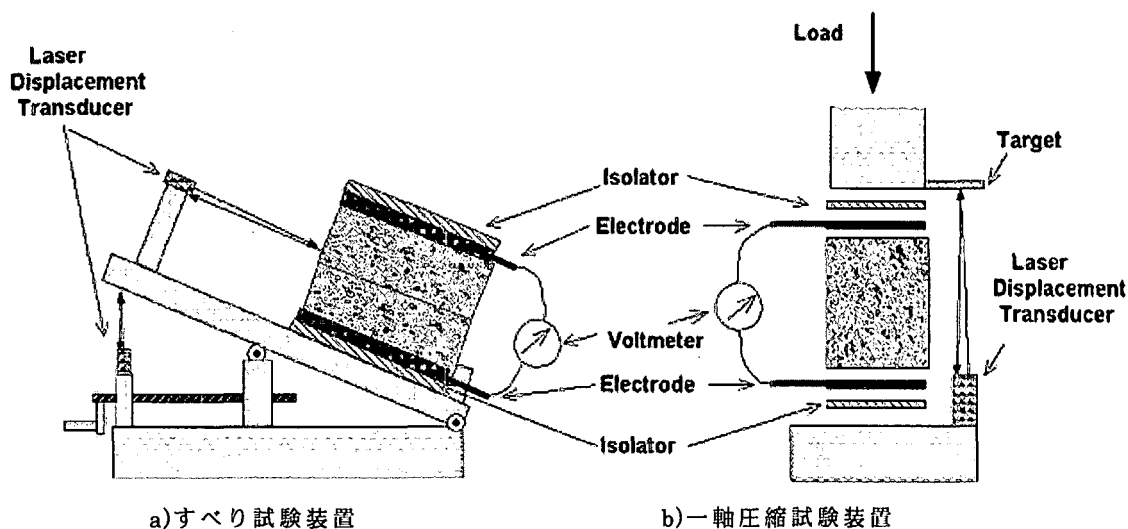
本研究の目的は、山はね現象のような突然起こる破壊を予測することにある。電位の一つの特徴は変位計測より明確に破壊現象を把握することができると思われ、山はね予測などに大変重要な計測手法になりうると位置付けることができる。本研究では、結晶から岩石までの様々な岩質材料を対象として、変形過程における電位差の変化に関する実験を行った。その結果、岩質材料の破壊とすべりによっても電位差の発生が見られることが明らかになった。破壊との関係を明確にする為に、AE の計測も行い、電位差のパルス的な増加 (SES) が岩石の破壊や不連続面の進展と密接な関係にあることを確認した。

*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

****正会員 工学博士 応用地質(株)



図－１：すべり試験装置および一軸圧縮試験の概要

2. 実験概要

2. 1 実験装置

本研究では、すべり試験と一軸圧縮試験およびクリープ試験を行った。実験装置の概要を図－１に示す。一軸圧縮試験およびクリープ試験では、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を供試体の上下にステンレス製のメッシュを電極として圧着し、電位計測装置（入力抵抗値 $10\text{G}\Omega$ 以上、入力インピーダンス $10\text{M}\Omega \pm 2\%$ 並列で 150pF ）で測定した。載荷板と電極の間に絶縁体を挟み供試体の絶縁状態を保っている。AE は、下部加圧版に設置したセンサーにより計測を行った。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。

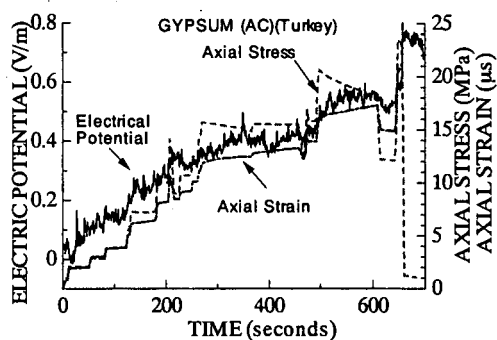
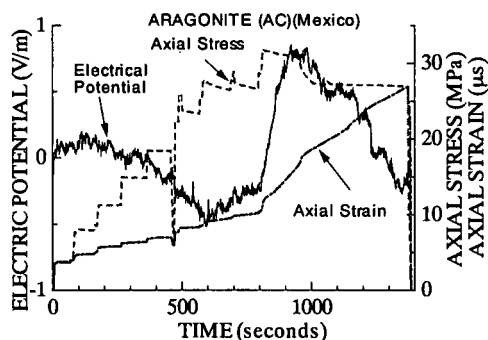
すべり試験は、図－１ a) に示すような木製の装置を用いて、既存の不連続面におけるすべりに対して発生する電位差の計測を行った。試料を載せる平板の傾斜は、備え付けのレバーを回転させて変化させることができる。電極は、重ねて置かれた二つのブロックの上下面に取り付け、さらに絶縁体で覆った。また、AE センサーは上部のブロックに取り付けた。変位はレーザー変位計（最大変位 100mm 、最小変位 0.01mm ）を用いて計測した。計測した変位は上部ブロックと下部ブロックの相対変位である。また、平板の傾斜を求めるために、図に示す位置でレーザー変位計を用いて平板の位置を計測した。

2. 2 実験に用いた試料

実験に用いた試料は鉱物結晶と岩石供試体である。一軸圧縮試験に供した結晶は、あられ石と石膏である。これらの結晶は整形を行わず自然の形状のまま実験を行った。岩石供試体は直径 5cm 、高さ 10cm の円柱形に整形したトルコ産の凝灰岩、および直径 3cm 、高さ 6cm の円柱状の稲田花崗岩である。すべり試験に用いた岩石は、流紋岩および稲田花崗岩である。1 辺約 $10\text{cm} \times$ 約 10cm 、高さ約 5cm の立方体ブロック 2 個を重ねて実験を行った。すべり面は、稲田花崗岩ではカットした滑らかな面、流紋岩では、採取されたままであり、数 mm 程の凹凸のある面である。クリープ試験に用いた岩石は著系 5cm 、高さ 10cm の円柱供試体である。今回の実験で用いた鉱物結晶および岩石供試体はすべて室内乾燥状態である。

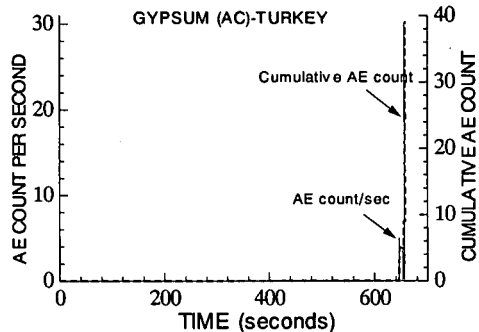
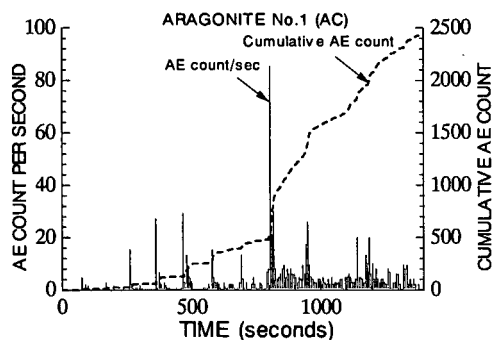
3. 実験結果

3. 1 一軸圧縮試験における電位差発生挙動



(a)電位・軸応力および軸ひずみ経時変化

(a)電位・軸応力および軸ひずみ経時変化



(b)単位時間当たり AE 発生数とその累積

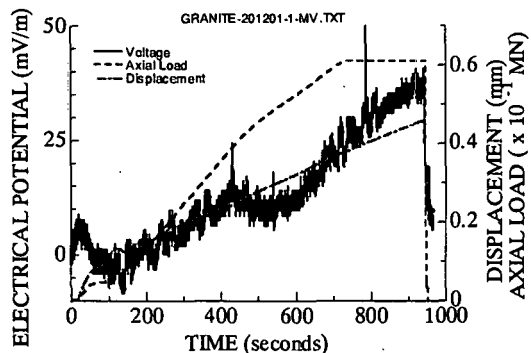
(b)単位時間当たり AE 発生数とその累積

図-2：あられ石（メキシコ産）の一軸試験における電位・AE 発生状況

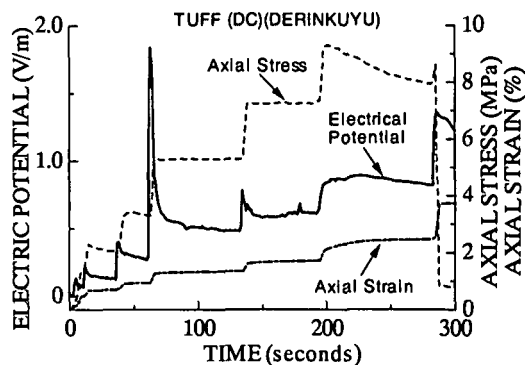
図-3：石膏（トルコ産）の一軸試験における電位・AE 発生状況

図-2 および図-3 に、メキシコ産のあられ石とトルコ産の石膏の結晶での実験結果を示す。これらの図において(a)は横軸に時間を、縦軸に電位差、軸応力および軸ひずみをとっている。(b)は、横軸に時間を、縦軸には1秒間あたりの発生 AE 数、およびそれらの累積数をそれぞれ取っている。最大強度に達する前に、応力は増加しているが一時的に電位差が下がる傾向が見られる。破壊直前には AE が急激に増加し、破壊予測が可能であるが、電位差のこのような現象を観察することで、破壊直前の予測が可能となる¹¹⁾。

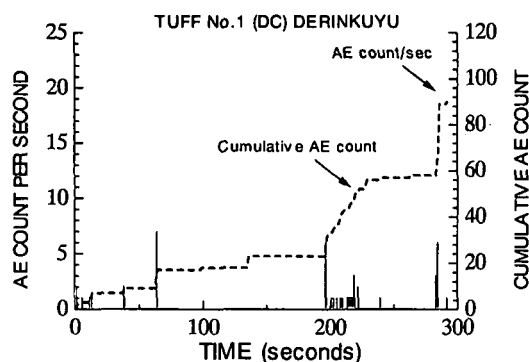
図-4 にトルコ産のデリンクユ（Derinkuyu）凝灰岩を用いた実験結果を示す。この凝灰岩は、流紋岩質であり石英の粒子を含んでいる。図-4 に見られるように、デリンクユ凝灰岩では、電位差発生挙動は荷重経路と密接に関係していることがわかる。特に、荷重増加時に非常に高い電位差が発生し、一方、その荷重を保持している間は減少傾向を示している。また、発生している電位のレベルが、荷重レベルが高くなるにつれて上がる傾向が見られる。ひずみ速度の観点からこの現象を見てみると、荷重増加時には高いひずみ速度が発生し、荷重を保持している間には、ひずみ速度は減少傾向になることより、電位差の発生は荷重によって生じるひずみ速度に密接に関係しているものと考えることができる。この実験結果でも、最大強度に達する前の電位差の落ち込みが小さいながらも観察されている。



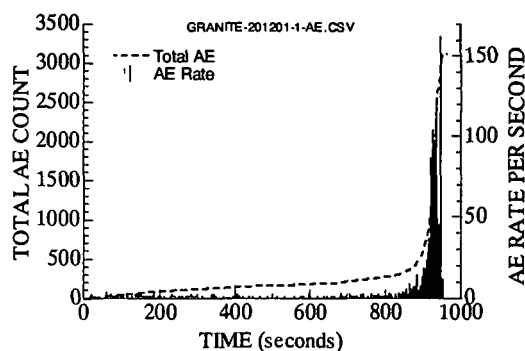
(a) 電位・軸応力および軸ひずみ経時変化



(a) 電位・軸応力および軸ひずみ経時変化



(b) 単位時間当たり AE 発生数とその累積
図一 4：デリンクユ凝灰岩（トルコ産）の一軸試験における電位差・AE 発生状況



(b) 単位時間当たり AE 発生数とその累積
図一 5：稲田花崗岩の一軸試験における電位差・AE 発生状況

図一 5 に稲田花崗岩の一軸圧縮試験結果を示す。この試料は石英や電気石などの圧電効果を持つ鉱物を多く含んでいる。この実験では、ある荷重レベルまで載荷速度を変化させながら載荷し、その後そのレベルで荷重を一定に保った。図より観察されることは、載荷速度が変化する時点で、電位差発生挙動に変化が見られることである。さらに、荷重を一定に保ったクリープ載荷時において、大きなパルス（SES）が生じており、AE がほぼ同時期に観測され始めている。ちょうど、この時点において実験時に供試体の側面から破片が剥がれ落ちている。また、応力が急激に減少しているクリープ破壊時には、先の実験結果と同様に電位差の減少傾向が見られる。

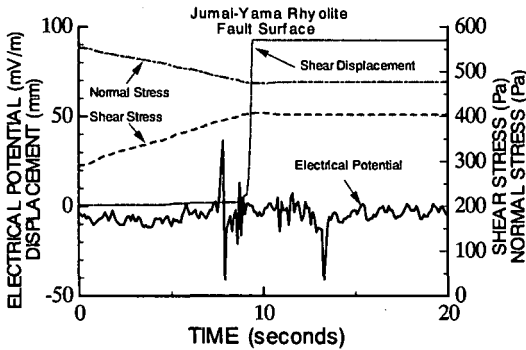
3. 2 すべり試験における電位差発生挙動

すべり試験は、二つの岩石ブロック間にすべりを起こさせ、すべり初めとその後の電位発生挙動を観察することを目的としている。供試体は稲田花崗岩、および十枚山断層（静岡）で採取した断層面を含む流紋岩である。

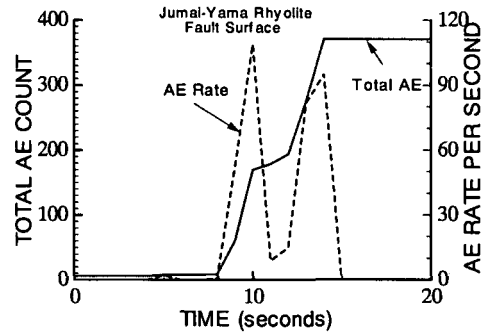
図一 6 に、稲田花崗岩を用いたすべり試験の結果を示す。この試験における底板の傾斜の調節は手動で行った。パルス（SES）は滑り始めの直前において観測された。さらに、底板の傾斜の調節を機械で行い、手動の約 10 分の 1 の速度で実験を行ったところ、手動で行った場合に発生した電

位差に対して約 10 分の 1 の電位差が発生したことが確認された。

図一 7 は流紋岩のすべり試験の結果である。この試験では、試料をカットし、その面で二つのブロックを重ね合わせて滑らせた。また、傾斜増加速度を機械式によって手動の 10 分の 1 に減らし、同様の実験を行ったところ、先の結果と同様に電気信号の発生も減少した。

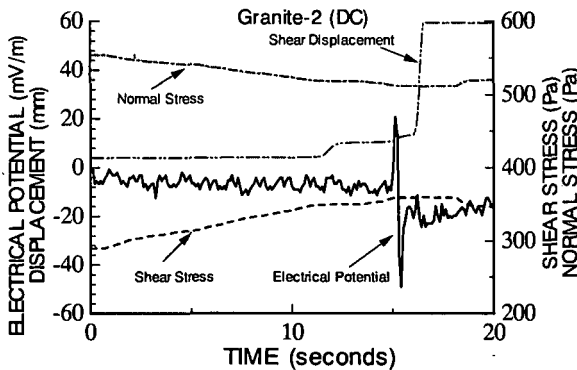


(a)電位・すべり変位、せん断および垂直応力の経時変化

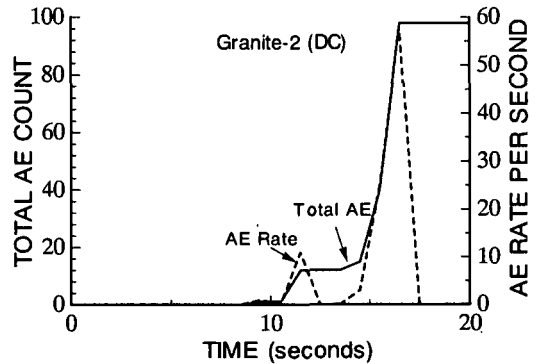


(b)単位時間当たり AE 発生数とその累積

図一 6：十枚山流紋岩のすべり試験結果



(a)電位・すべり変位、せん断および垂直応力の経時変化



(b)単位時間当たり AE 発生数とその累積

図一 7：稲田花崗岩のすべり試験結果

3. 3 クリープ試験における電位差発生挙動

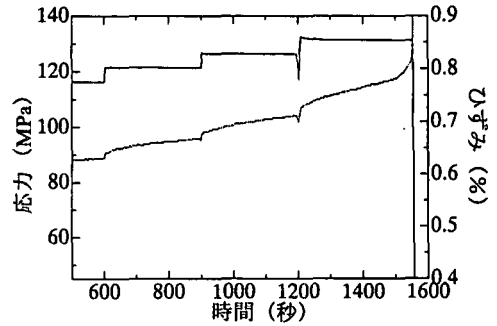
本研究で行ったクリープ試験は、大谷石を円柱状に整形した供試体を用いて行った。クリープ過程における AE と電位差の発生状況を観察することを目的とした試験であることより、時間短縮のためクリープ荷重を 5 分間隔で段階的に増加させ、最終的にクリープ破壊に至るまで载荷を行った。

図一 8 に試験結果を示す。(a)図はクリープ载荷応力と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。

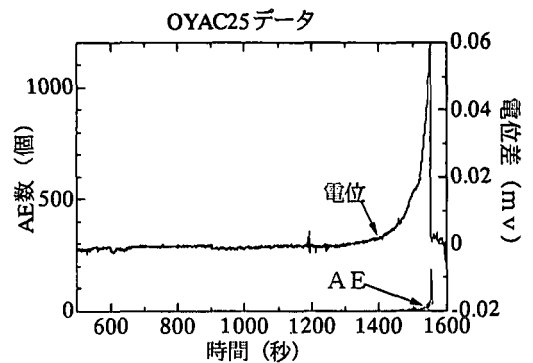
4. おわりに

本研究は、結晶から岩石までの地盤材料に対して、その破壊時やすべり変形時に発生する電位差の検討を行うことを目的とし、一軸圧縮試験とすべり試験を行った。実験結果から明らかになった知見を以下に示す。

- 1) 実験結果から、岩質材料の変形や破壊およびすべり変形時に電位差が発生することが明確になった。
- 2) 発生する電位差の大きさは、鉱物の圧電効果特性、および変形やすべりによって生じる運動量の大きさに依存する。
- 3) クリープ試験結果より AE の発生と電位差の発生には密接な関係が見られ、進行性破壊と電位差の発生の関連が見られた。また、電位差のほうが AE より早く変化を生じていることより、破壊予測に対する有利な点が見られた。



(a) クリープ載荷応力と軸ひずみ



(b) AE と電位差の発生状況

図-8：クリープ試験結果（大谷石）

参考文献

- 1) Sobolev, G.A. Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquakes. *Pure App. Geophys.*, 113,1/2, 229. 1975.
- 2) Varotsos, P., and Alexopolous, K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. *Tectonophysics*, 110, 73-98. 1984.
- 3) Geller, R. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275, 161.1997.
- 4) Nitsan, U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks. *Geophysical Res. Lett.*, 4, 333-336. 1977.
- 5) Cress, G.O., Brady, B.T. & Rowell, G.A. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Gephys. Res. Lett.*, 14,331-334. 1987.
- 6) Yamada, I., Masuda, K. & Mizutani, H. Elecetromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 57, 157-168. 1989.
- 7) 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.
- 8) Tuman, V.S. Streaming potentials at very high differential pressures. *J. Appl. Phys.*, 34, 2014-2019. 1963.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.