

変形・破壊過程における亜炭廃坑周辺岩盤の 多重パラメータ応答

THE MULTI-PARAMETER RESPONSE OF ROCKS OF AN ABANDONED LIGNITE MINE DURING DEFORMATION AND FAILURE PROCESS

太田良巳*・中谷英史**・大洞光央***・アイダン オメル****
Yoshimi OHTA, Hideshi NAKATANI, Mitsuo DAIDOU, Ömer AYDAN

The seismic response and stability of areas situated above the abandoned lignite mines due to urbanization in recent years are of great concern in Japan (Aydin, 2004). Experimental studies showed that rocks exhibit distinct variations of electric potential, electrical resistivity, magnetic field and acoustic emissions during deformation and fracturing processes (Aydin et al. 2001, 2002, 2003). These parameters may be useful for assessing the stability of abandoned lignite mines in long-term as well as during earthquakes. This study describes the results of experiments on the multi-parameter responses such as electrical potential, electrical resistivity, magnetic field as well as conventional parameters such as displacement and load of rocks of an abandoned lignite mine during deformation and fracturing process. The rocks are basically non-piezoelectric. However, distinct variations of electric potential, electrical resistivity, magnetic field and acoustic emissions during deformation and fracturing processes were observed in tests.

Key Words: lignite, abandoned mine, electric potential, electric resistivity, rock, fracture, deformation

1. はじめに

東海地方には数多くの亜炭廃坑が存在し、それらは採掘終了から 40 年余りが経過しており、採掘跡は放置されたままになっている。そういった地域でも都市化が進んでいる。しかしながら、それらの地域では浅所陥没・地盤沈下などがしばしば発生し、2003 年宮城北部地震では亜炭採掘跡地で大きな被害が発生したことも報告されている (Aydin, 2004)。亜炭地域を構成する岩盤は堆積軟岩である。これらの岩盤は重力、地震、上載荷重の変化とクリープ荷重の影響とは別に含水の変化によって劣化する特徴を有している。そのため、岩盤の飽和・乾燥による性質の変化などを求めることも望ましい。しかし、このような実験的研究は行われていないのが現状であり、亜炭廃坑の安定性とその評価法の開発が求められている。そこで亜炭廃坑周辺岩盤の物理・力学特性の把握と力学特性の変化に対して変形・破壊過程における荷重、電位、変位、AE、電磁場などの多重パラメータ応答について試験・計測を行った。本論文で、変形・破壊過程における亜炭廃坑周辺岩盤の多重パラメータ応答について報告する。

* 東海大学 大学院 博士課程前期 海洋学研究科 海洋工学専攻

** 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科

*** 学生員 東海大学 大学院 博士課程後期 海洋学研究科 海洋工学専攻

**** 正会員 工博 東海大学 海洋学部 教授 海洋土木工学科

2. 亜炭廃坑の現状

亜炭坑では主に柱を残すことで、坑内の安定を確保する残柱方式という採掘法がとられている。採掘後の空洞内では、地下水や空気の流れなどによる材料の劣化といった時間の経過によって残柱の破壊または上部地盤の崩壊による地盤沈下や浅所陥没といった災害の発生が問題となっている。このような問題だけでなく地震などの動的な現象によって同様な破壊が発生し地盤沈下や浅所陥没といった問題が発生している。調査対象としている亜炭廃坑では採掘終了から約 40 年経過している。亜炭地域を構成する岩盤は堆積岩で、主に亜炭、砂岩、頁岩、泥岩、シルト岩で構成されている。天盤の落盤や残柱の破壊・亀裂の進展の様子、数箇所の水漏れ、岩盤盤の剥離現象が確認された。廃坑内で正断層も確認された。断層近辺では残柱の破壊および天盤の落盤が著しく発生している。廃坑周辺岩盤の乾湿の繰り返しサイクルに伴う力学特性の変化および残柱と天盤の岩盤に発生している亀裂の進展状況などの計測は廃坑の安定性評価に大変重要であると考えられる。

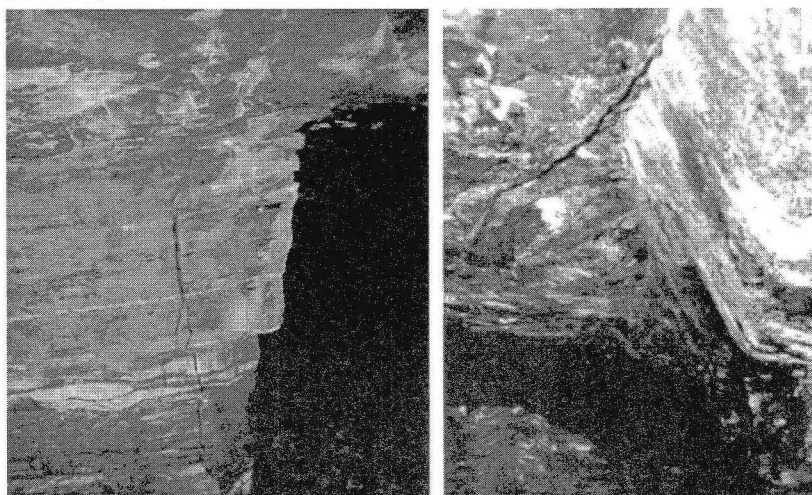


写真-1 残柱の亀裂（左図）正断層近辺で天盤の落下（右図）

3. 周辺岩盤の力学特性および AE・電位特性・電気抵抗・磁力

本研究では、亜炭廃坑の周辺岩盤に対して一軸圧縮実験を行った。亜炭廃坑地域より採取した岩石ブロックやボーリングコアより立方体もしくは円柱の供試体を作成し圧縮試験を行った。周辺岩盤から亜炭、砂岩と泥岩の供試体を作成した。実験の計測項目は荷重・変位計測と別に AE と自然電位あるいは電気抵抗、砂岩に対しては磁力の計測を実施した。供試体と計測器の関係を図-1 に示す。

AE は载荷中に発生する亀裂などによって発生する波によるもので、AE 計測はこのときある基準値を超える音波をパルスとしてカウントとするものである。また、Aydan ら (2001, 2002, 2003) の研究で明らかにされているように蓄積される力学エネルギーが亀裂に伴って発生する弾性波のみではなく、一部が電気エネルギーとして解放されることも考えられるため電位計測や磁力計測を行い破壊時の電位応答、磁力応答について考察する。砂岩の圧縮試験に用いた磁力計は自然磁場の X-Y-Z、3 成分を測定するフラックスゲート型磁力計である。図-1 に示したように X 軸は南北方向を指し、北が正となっている。同様に Y 軸は東西方向を指し、東を正にとっている。Z 軸は鉛直方向となっている。写真-2 に、砂岩供試体の一軸圧縮実験における破壊の様子を示す。図-2 から図-4 に実験結果の一例として砂岩供試体における一軸圧縮実験で得られた各パラメータの時間変化を示す。図-2、図-3 の結果において、荷重の増加に伴って AE、自然電位の変化が顕著である。AE や自然電位の大きな変化は破壊前に発生していることが大変重要である。図-4 に応力と磁力の関係を示す。図中の磁力は絶対値の変化を示している。この計測結果

より磁力は破壊に伴って放出されていることがわかる。図-6から図-9は変形破壊過程における亜炭および泥岩の供試体の各種パラメータの応答を示す。計測されている応答は基本的には砂岩の場合と同様である。砂岩の一軸圧縮強度は約2.3-7.0MPa、亜炭の一軸圧縮強度は約4.0-6.0MPa、泥岩の一軸圧縮強度は約1.0-1.5MPaである。これまでに得られた実験結果を表-1に示す。同様の実験を飽和状態の砂岩に対しても行うと試みたが水中で破壊してしまったため今回は行うことができなかった。このことより、亜炭廃坑の周辺岩盤、特に砂岩層は飽和の状況により非常にもろくなることが明らかになった。

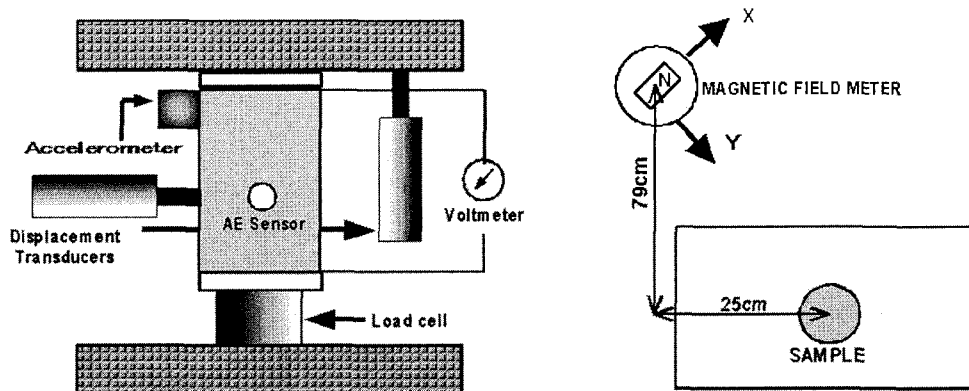


図-1 供試体と計測器の関係

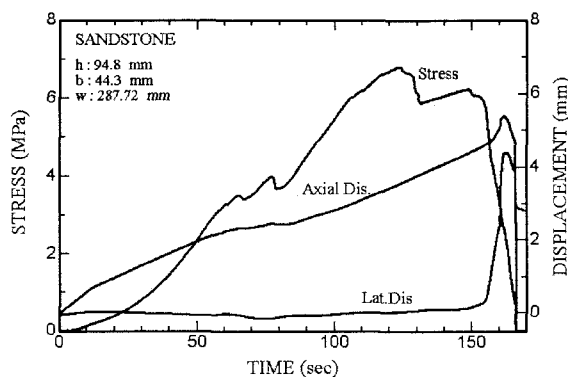


図-2 砂岩供試体における応力、変位の応答

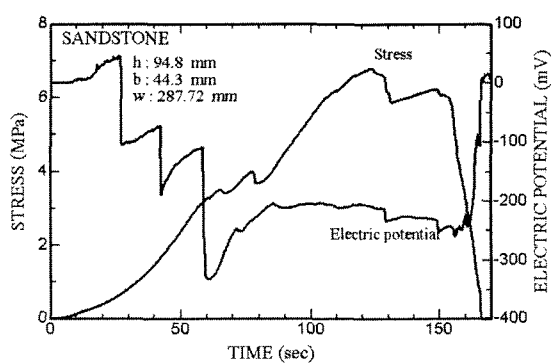


図-3 砂岩供試体における応力、自然電位の応答

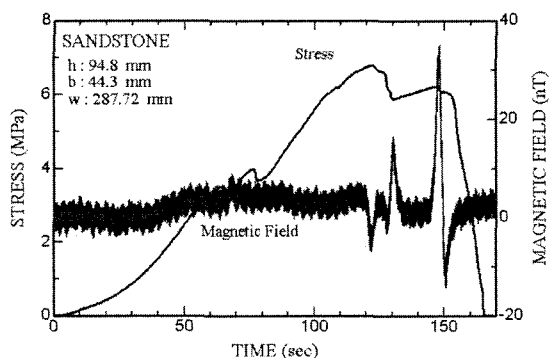


図-4 砂岩供試体における応力、磁力の応答

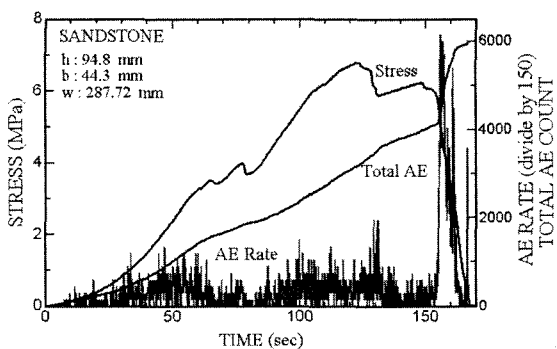


図-5 砂岩供試体における応力とAEの応答

表-1 各実験で得られた主な物性値

岩石	自然単位体積 重量 (kN/m ³)	含水比 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	弾性波速度 (km/s)	針貫入指数 (N/mm)
亜炭	10.6-14.4	12.6-27.2	4.0-6.0	100-186	1.57-2.26	22.2-33.3
砂岩	16.8-19.2	15.4	2.3-7.0	328-	1.91-2.67	
泥岩	14.2-14.9	9.5-13.3	0.96-1.5	38-150	1.26-1.54	

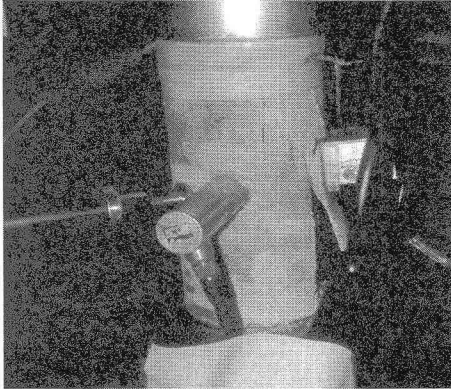


写真-2 圧縮実験による砂岩の破壊の様子

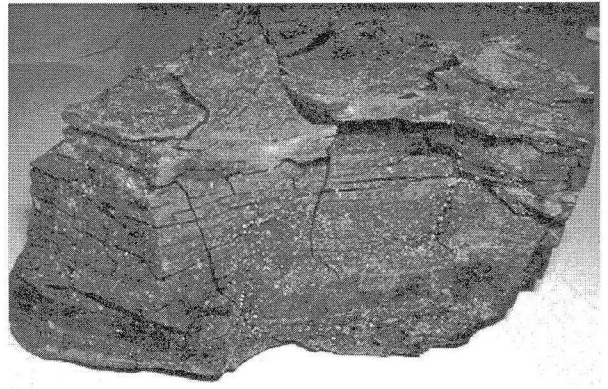


写真-3 乾燥による亜炭の亀裂の様子

写真-3 に示したように、乾燥によって亜炭に多数亀裂が発生している。これは亜炭層から供試体を採取する場合に、亜炭はもともと葉状構造を成しているため供試体の作成は困難である。

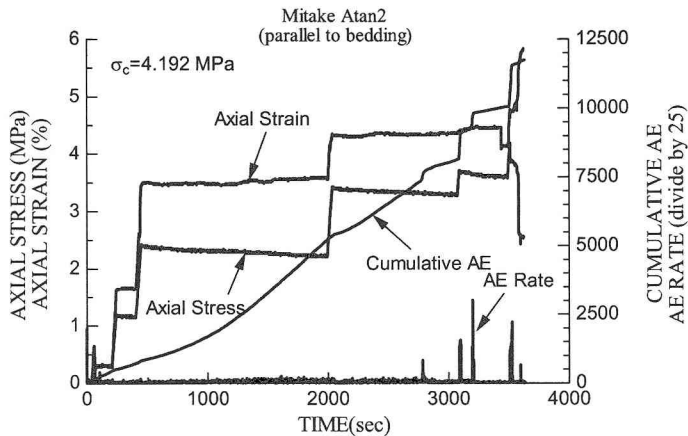


図-6 段階载荷における亜炭供試体の時間依存挙動

図-6 と図-7 は一軸圧縮実験で得られた亜炭供試体における各パラメータの時間変化を示す。図-6 に示した実験は、亜炭供試体に対して段階载荷を実施し、亜炭供試体の時間依存性挙動を検討した。応力レベルが大きくなるに連れて、時間依存性挙動が顕著に現れる。

図-7 に示す実験において、荷重の単調増加に伴って、AE および電気抵抗の変化を示している。亜炭供試体においても、砂岩供試体と同様で大変興味深いことは、電気抵抗および AE の大きな変化は破壊前に発生

していることである。図-8 に泥岩供試体における応力、AE、自然電位の応答を示す。泥岩供試体においても亜炭、砂岩と同じ現象が発生している。これらの三つの供試体による結果より、岩石の破壊の前兆現象として AE や自然電位および電気抵抗に変化が発生することが明らかになった。このことより AE や自然電位を現場で計測すれば、廃坑内の亀裂の進展状況の把握や破壊予知につながると考えられる。

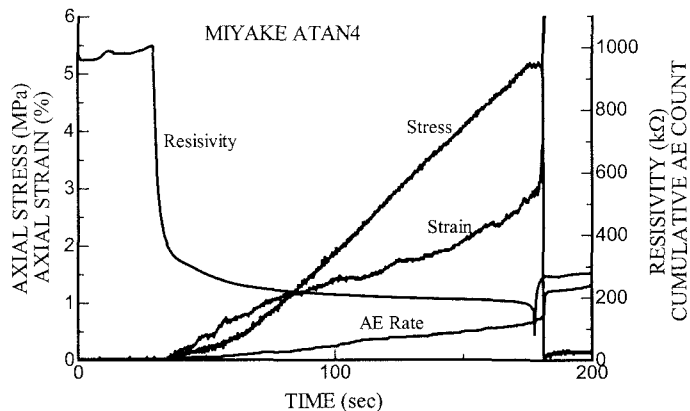


図-7 単調増加载荷に伴う亜炭供試体の応力、ひずみ、AE および電気

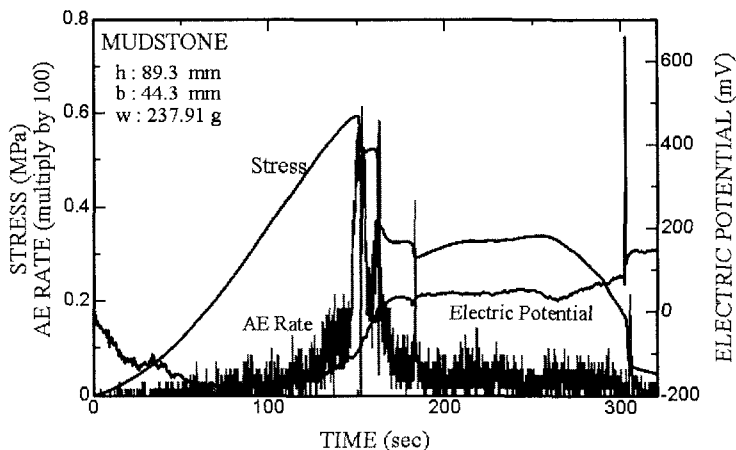


図-8 泥岩における応力、AE、自然電位の応答

が発生している。注目すべき点は、供試体の重量の変化は継続しているが AE や収縮変位、自然電位の変化は途中で落ち着いている点である。AE と収縮変位はほぼ同じ時間で変化を落ち着かせている。また、自然電位においても AE の応答が最大の反応を見せている時間まで大きな反応を見せているが、その後は変化が少ない。実験後の供試体を写真-5 に示す。飽和-乾燥のサイクルによって砂岩の供試体が発生している亀裂がかなり増大している。実験後の供試体は損傷が著しい状態であった。これらの結果より、岩石の強度は含水比に大きな影響を受けることが確認された。また、乾燥-飽和のサイクルによっても岩石の強度は著しく低下する (Aydan, 2003; Aydan & Ulusay, 2003)。

5. 考察とまとめ

本研究で紹介した実験結果をまとめると次のようになる。岩石が破壊する際に破壊の前兆現象として AE や自然電位が発生する。よって AE 計測や自然電位計測は現場計測においても有用であると思われる。また、破壊に伴い磁力が発生し、発生した磁力の方向と岩石の破壊に伴う破壊面の方向の間に密接な関係があると考えられる。亜炭廃坑周辺岩盤は飽和-乾燥のサイクルによって劣化し非常にもろくなる。また岩石の強度は含水比に依存し、含水比は大きくなると強度が低下する。

3 種類の供試体の強度を比べてみると、亜炭の圧縮強度は泥岩の圧縮強度の約 1.5-4.0 倍大きくなっている。砂岩の圧縮強度は亜炭の圧縮強度の約 2 倍大きい。表-1 より亜炭や泥岩の強度は含水比に大きく影響を受けることが明らかである。

4. 砂岩供試体の乾燥実験

写真-4 に砂岩供試体を飽和させた際に観察された破損状況を示す。飽和状態の砂岩供試体は水分を吸収することによって膨張し亀裂が拡大する。水分を多く吸着した砂岩は軟化し、写真-4 のように溶け出している。飽和状態で形を保った供試体に対して飽和-乾燥の繰り返し実験を行った。実験では砂岩供試体に対して多重パラメータ計測を行った。実験の計測項目は重量変化、変位、AE、自然電位の計測を行った。砂岩供試体に対する計測とは別に室温、湿度の計測を行っている。実験結果を図-9、図-10 に示す。図-9 と図-10 で供試体の重量の変化とともに収縮変位、AE、自然電位の変化

謝辞：本研究を進めるにあたって、研究、現場調査に多大なご支援、ご協力していただきました飛島建設(株)名古屋支店の杉浦乾郎氏、坂本典正氏、山田紀利氏に厚く感謝の意を表します。また、岩石の変形破壊過程における磁力の変化は東海大学地震予知センターが所有している磁力計で計測したものであり、そのセンターの関係者に厚く感謝の意を表します。

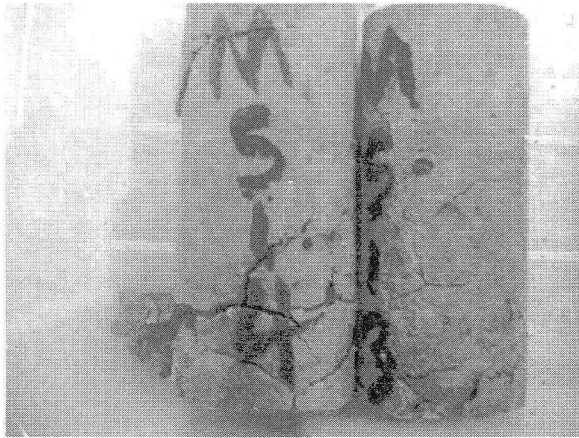


写真-4 飽和状態の砂岩の破損状況（水中）

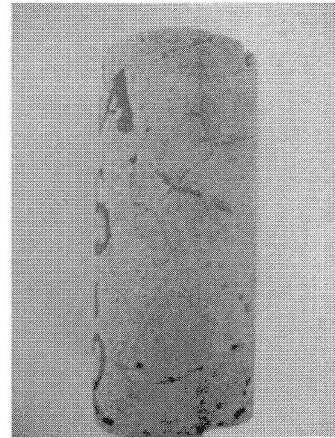


写真-5 飽和後に乾燥させた砂岩

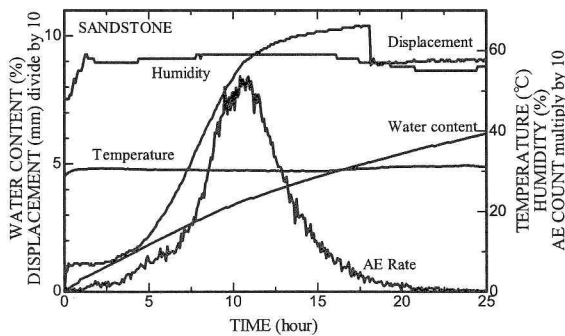


図-9 砂岩の乾燥における含水比、軸変位、AEの
応答

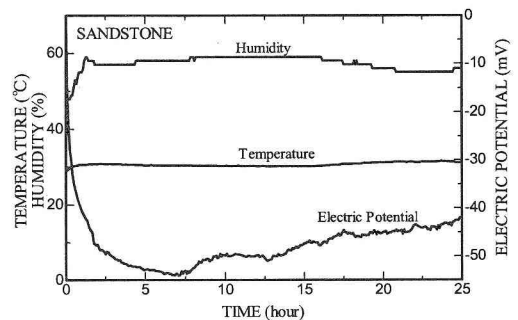


図-10 砂岩の乾燥における自然電位の応答

参考文献

- Aydan, Ö. (2003): The moisture migration characteristics of clay-bearing geo-materials and the variations of their physical and mechanical properties with water content. 2nd Asian Conference on Saturated Soils, UNSAT-ASIA 2003, 383-388.
- Aydan, Ö. (2004): Damage to abandoned lignite mines induced by 2003 Miyagi-Hokubu earthquakes and some considerations on its possible causes. J. of School of Marine Science and Technology, Vol. 2, No.1, 1-17.
- Aydan, Ö., Ulusay, R. (2003): Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. Engineering Geology, Vol. 69, 245-272.
- 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.
- Aydan, Ö., T. Ito, T. Akagi, H. Watanabe, H. Tano (2002). An experimental study on the electrical potential of geomaterials during fracturing and sliding. Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, Seoul, Korea, July, 211-218.
- Aydan, Ö., N. Tokashiki, T. Ito, T. Akagi, R. Ulusay, H.A. Bilgin 2003. An experimental study on the electrical potential of non-piezoelectric geomaterials during fracturing and sliding, 9th ISRM Congress, South Africa, 73-78.