

岩石のクリープ変形過程における電位発生挙動に関する研究

豊田工業高等専門学校建設工学専攻 学生会員 牛山 拓郎
豊田工業高等専門学校 正会員 伊東 孝
豊田工業高等専門学校 正会員 赤木 知之
東海大学海洋土木工学科 正会員 アイダン・オメル

1. はじめに

岩石が破壊、変形する際に、電磁波が発生し岩石内に電流が流れ、電位差が生じることが多くの研究者によって確認されている。この研究は地震予知の分野で研究が進められてきた。地震は岩盤の破壊現象と考えられ、これに伴って電氣的な変化が発生するのであれば、その応用として土木や鉱山の分野において、坑道や斜面の破壊の予知に応用できる可能性がある。しかし、トンネルや地下空洞などに代表される岩盤構造物の安定性を評価する有効な手法は未だ確立されていない。そこで本研究では岩石の破壊現象と電位差の発生挙動およびAE発生挙動との関連を一軸圧縮クリープ試験により実験的に解明することを目的とする。

2. 岩石の破壊と電位発生

2.1 岩石のクリープ特性

岩石などの材料に応力を加えるとひずみが生じる。一定の応力値を持続的に加えた場合、このひずみが時間の経過と共に進行して行く現象をクリープと呼ぶ。有効応力が一定で圧密が進行する二次圧密もクリープの一種である。また、ひずみが一定で時間が経つにつれて応力が減少していくことを応力緩和という。

クリープ曲線の例を図1に示す。載荷応力の大きさが一軸圧縮強度に近いほど図1の(a)のような挙動を示す。このような状態では、時間の経過とともにひずみは増し破壊に至る。これをクリープ破壊という。反対に載荷応力が一軸圧縮強度よりも小さくなるほど曲線(b)のような挙動を示す。クリープひずみは生じるが時間が経つにつれ停止する。低応力レベルでは、ある程度時間が経つにつれひずみの進行は収束する。このように破壊が起こらないがクリープが生じる応力の最高値をクリープ限度という。また曲線(a)においては、応力を加えた瞬間に一定のひずみ、瞬間ひずみを発生し、時間と共にひずみは増加するが、ひずみ速度は減少してゆく。これを遷移クリープ(一次クリープ)という。その後、ひずみ速度が一定となる定常クリープ(二次クリープ)の区間を経て、ひずみ速度が増大し破壊に至る加速クリープ(三次クリープ)を示す。

また、(c)のような状態ではクリープは生じない。このようにクリープが生じない応力の限界を下限降伏値という。そして(a)と(b)の境の応力を上限降伏値という。

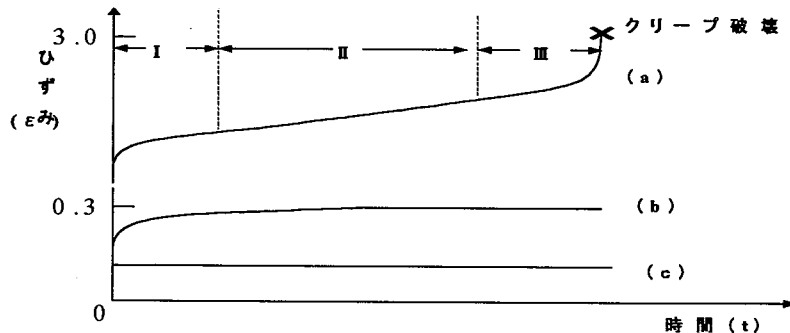


図1 一般的なクリープ曲線の例

Prediction of failure using the electrical potential of geomaterials during deformation
Takurou Ushiyama, Takashi Ito, Tomoyuki Akagi (Toyota College of Technology)
Ömer Aydan (Tokai University)

2.2 岩石の圧電効果

(1) 圧電効果とは

岩石には圧電効果が現れるものがある。圧電効果 (Piezoelectric Effect) とは、「結晶体に応力を加えたときに、特定の結晶面の間に電位差があらわれる現象」のことである。逆に、結晶の特定の面に電場を加えると、結晶にはひずみが生じる。これを逆圧電効果と言っている。ピエール・キュリーとジャック・キュリーが1980年に電気石でこの現象を発見した。

また、結晶性の強い岩石に圧力が加わると、電荷が発生しやすい。結晶性の強い岩石とは、地殻深部で生成されたマグマが冷えるプロセスで、析出温度の差によって選択的に結晶化するか、水脈・沈殿などによって選択的に結晶化する可能性のある岩石であり、いわゆる鉱物がそれに相当するが、そのなかでもペグマタイトと呼ばれる花崗岩鉱脈が代表的なもので、金・銀・銅・亜鉛など電気的特性の強い金属鉱脈が多い。マグマが地表に噴出してしまうと急激に冷えるため組成がランダムになり、電気的特性の強い岩石はできにくいと思われる。

岩石の内部に圧電効果が発生する理由として様々な説が挙げられるが、ここでは摩擦対電荷説、電荷分離説、圧電現象説を説明する。

- ・ 摩擦対電荷説……対抗する亀裂面間の摩擦すべりによって電荷の分布が不均等となり、亀裂の両面の電氣的つり合いが崩れるため圧電効果が起きる。
- ・ 電荷分離説……亀裂が形成される際に、電荷が対向する亀裂表面上に不均等に分離されて電氣的つり合いがくずれ、双極子モーメントが変化するため圧電効果が起きる。
- ・ 圧電現象説……亀裂の進展によって岩石の内部に応力変化が生じ石英のような圧電鉱物を多く含む岩石では、その応力変化による電圧変化に伴って圧電効果が起きる。

(2) 圧電効果のメカニズム

圧電効果は、電気石・チタン酸バリウムのような結晶性物質でみられる。結晶の構造をなす単位格子が非対称性をもつ結晶でおこり、結晶がひずみをうけると、単位格子でイオンが変位し、電気分極が生じる。結晶構造は周期性があるので、単位格子の分極は積みかさなって結晶全体のある面の間に電位差を生じるようになる。外から結晶に電場をくわえたとき、単位格子の中のプラスイオンとマイナスイオンの中心が平衡位置から変位し、伸び縮みの変形やすべり変形が発生する。(図2)

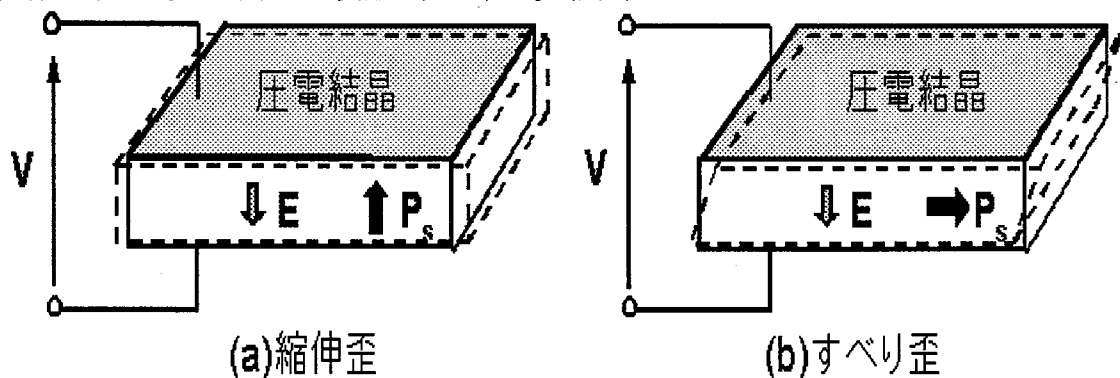


図2 圧電効果の伸縮歪変形とすべり変形

3. AE

3.1 AEとは

樹木が折れたりする際に「ミシミシ」という音が聞こえるのは、よく経験することである。AE (アコー

スティック・エミッション) とは、「音響の放出」であり、物体が破壊したり変形したりすることによって放出する音のことである。

物体が破壊するという現象を考えると「瞬時に壊れる」などという表現も存在するが、実際の現象は微小なレベルの破壊がまずあり、それらが進行して最終的な破壊（主破壊）に至る。このときの微小な破壊は、物体の内部で破壊現象が生じ、その際に蓄積されていたエネルギーの一部が波動となって開放される。破壊音として人間の耳に聞かれるのは、この時に空気中に伝わった音波である。しかし、物体内を伝播している波動を物体表面で検出した方が感度が良いのは明らかである。特殊な材料を除いて固体材料は、第一義的には弾性体と考えることができるので物体表面で破壊の際に検出されるのは弾性波ということになる。

以上のことからAEは次のように定義することができる。

「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー開放過程によって発生する弾性波動現象」

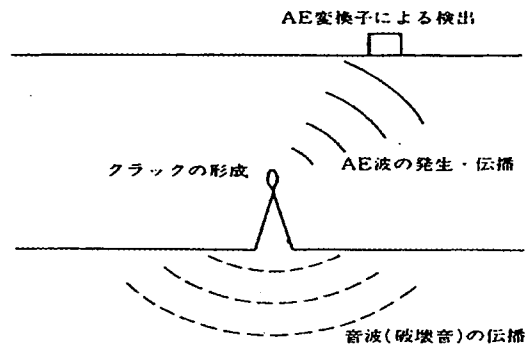


図3 AEの発生・伝播・検出

私達は、普段耳に聞こえるものを音と呼んでいるが、正確には音は、「気体、液体、固体の中を伝わる弾性振動の波」と定義されている。一般に私達の耳は、この内気体の中を伝わる音波を音として聞いている。またその振動数は、約16[Hz]~30[Hz]くらいの範囲である。したがって、私達には普段聞くことのできない音も存在する。「Acoustic」という言葉から想像されるこの「音」は「弾性波」であって常に人間の耳で聞くことが出来るわけではない。可聴音である「音」は、通常20Hz~20,000Hz程度の周波数であるが図4のように一般にアコースティック・エミッション法で扱うのは、より高い周波数の弾性波(1kHz~2kHz)であることが多い。この方法はAEを観測することによって固体内部の変化を検地する方法であり、通常の方法では検出できない現象を調べることができる非破壊検査方法の一つである。

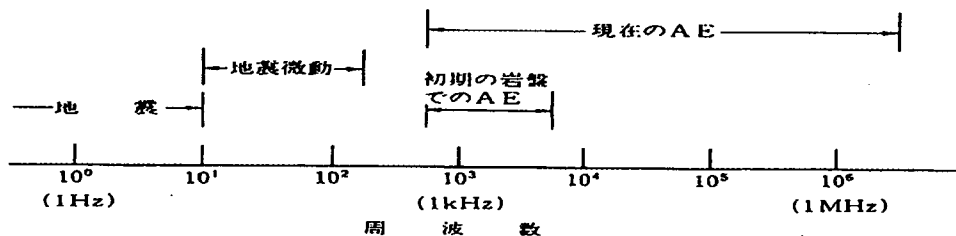


図4 AE計測と検出周波数³⁾

4. 実験装置

本研究で用いた実験装置はAE測定装置・電位測定装置・ひずみおよび応力測定装置の3種を使用した。AE測定装置は、NF回路ブロック製の装置である。AEを測定するセンサーがあり、そこから四角い箱のA

ンプで信号が増幅され計測装置へ入力されるものである。

電位測定装置は、アジレント社製の装置である。供試体の上下付近に固定した電極間の電位差を計測することができる。

ひずみ測定器は MTS 社製のもので 1/100mm まで計測できるものを使用した。また、応力は最大 50KN の容量の東京測器社製のロードセルを使用して計測を行った。これらのデータは東京測器社製のデータロガーで A/D 変換されパソコンにデータが送られるようになっている。

クリープ試験機は、圓井製作所製のクリープ試験装置を使用した。最大荷重は 50KN である。(図 5)

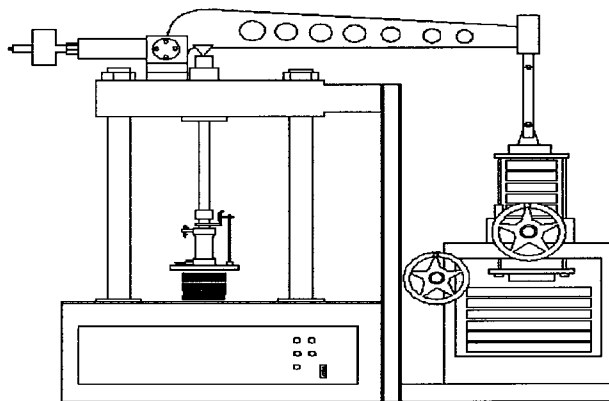


図 5 一軸圧縮クリープ試験機

5. 使用材料

本研究では供試体に大谷石を用いた。大谷石の特性を以下に示す。

大谷石・・・栃木県宇都宮市大谷町付近一帯から採掘される、流紋岩質角礫凝灰岩の総称。重量が軽く、石質がやわらかいため、加工が容易なのが特徴である。両端面を円滑に成形した $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱形供試体を使用した。

6. 実験方法

本研究では、応力・ひずみに伴う電位を明らかにするために一軸圧縮クリープ試験を行った。力学試験において、その強度特性を左右する要因は数多くある。例えば、端面が長軸方向に対して垂直をなしていないと荷重が偏心を起こし、実際の破壊荷重よりも小さい荷重で破壊し、供試体の軸ひずみも一様でなくなる。さらに、載荷速度が速いと一般に見かけの圧縮強さが増加することは、岩石の時間依存特性を考慮すれば説明のつく現象である。本研究においては以上のことに注意して実験を行い、さらに電位に関して以下のことに注意し実験を行った。

6.1 電位に関する留意事項

1. 岩石が変形する際に発生する微小な電位差を正確に計測するために、実験室や載荷装置から発生する電流や電磁波の影響を極力避ける。
2. 載荷装置には電気を使わないクリープ載荷装置を用いた。
3. 試験機から流れる電流の絶縁にはゴム板を用いた。

6.2 一軸圧縮クリープ試験

応力を長時間一定に保った時に、時間の経過とともにひずみが増大する現象をクリープという。また、供試体を一定の温度に保持し、側圧を受けない供試体の長軸方向に一様な圧縮荷重を一定に保ち、時間と共に

変化するひずみの挙動を調べる方法を一軸圧縮クリープ試験という。そして、試験中の軸ひずみを計測して、横軸に時間、縦軸に軸ひずみをとると曲線が描ける。この曲線をクリープ曲線という。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クリープ応力を負荷することができる。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 $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ の恒温室内にセットし実験を行った

7. 実験結果および考察

(1) 結果 1 (大谷石)

結果 1 は初期荷重を 20kN (10MPa) とし、その後段階的に 5 分毎に 1kN (0.5MPa) 荷重を増やす方法で行った大谷石の結果である。(図 6, 図 7)

図 6 に電位差-AE-時間曲線、図 7 に応力-ひずみ-時間曲線を示す。図 6 の薄い実線は電位差、破線は累積カウント数、濃い実線は単位時間あたりのカウント数を示しているが、時間軸に比べてカウント値が小さいため隠れてしまっている。図 7 の実線はひずみ、破線は応力を示す。各図に、破壊時刻の線を示してある。ここでいう破壊時刻とは、応力が急激に減少するところを破壊時刻とした。破壊の時間は、載荷開始後 2778 秒であった。

まず電位差に関してみると、1370 秒（破壊 180 秒前）付近まではそれほど変化を見せていないが、それ以降は徐々に増加する傾向があった。数値的には、1370 秒で $1.27 \times 10^{-3} \text{mV}$ 、そして 1420 秒（破壊 130 秒前）では $3019 \times 10^{-3} \text{mV}$ 、1450 秒では $4.29 \times 10^{-3} \text{mV}$ 、破壊時においては（1554 秒） $2.22 \times 10^{-3} \text{mV}$ であった。

AE は、図 6 の AE カウントのグラフからも見て取れるが 1500 秒あたり（破壊 50 秒前）まではほぼ横ばいであるが、1532 秒（破壊 20 秒前）からは 1 秒間に 10 個前後、1543 秒（破壊 10 秒前）からは 1 秒間に 20 個前後、そして、1554 秒（破壊時）では 1 秒間に 106 個発生している。

ひずみは、荷重載荷時で 0.3%、そして 300 秒が経過した付近で 0.6%、1000 秒で 0.7%、1530 秒 0.8%、1554 秒（破壊時）で 0.83% にまで達した。

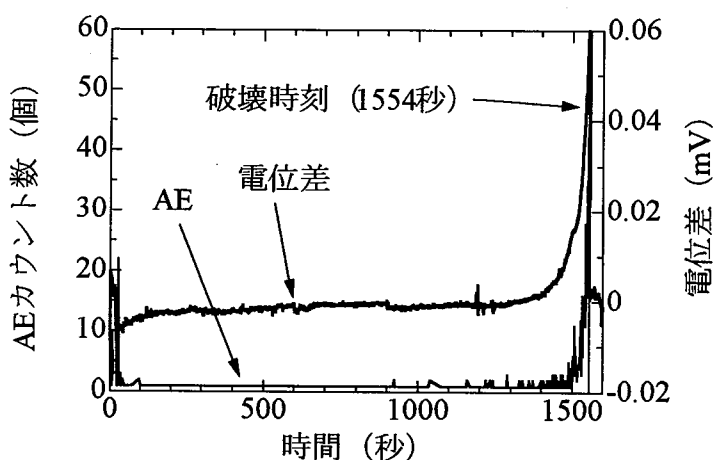


図 6 電位差-AE-時間曲線 (大谷石)

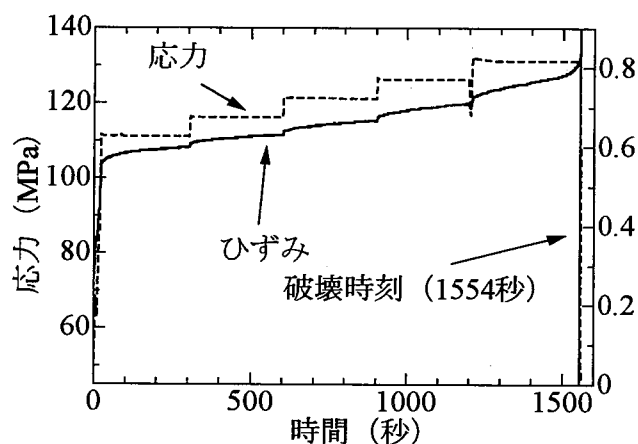


図 7 応力-ひずみ-時間曲線 (大谷石)

(2) 結果 2 (大谷石)

この実験結果は、初期荷重 27.4kN (13.7MPa) で行った一軸圧縮クリープ試験の結果である。図 8 に電位差-AE-時間曲線、図 9 に応力-ひずみ-時間曲線を示す。図 8 の実線は電位差、破線は AE カウント数を示している。図 9 の実線はひずみ、破線は応力を示す。各図に、破壊時刻の線を示してある。破壊の時間は、載荷開始後 61200 秒であった。

電位差の変化は図 8 より 60800 秒（破壊 400 秒前）から徐々に変化する傾向があることがわかる。この実

験においては、ほかの実験とは異なり電位差が一度減少してから増加するという変化をみせた。数値で表すと60800秒（破壊400秒前）で $1.07 \times 10^{-4} \text{mV}$ 、60950秒（破壊250秒前）で $-9.27 \times 10^{-4} \text{mV}$ 、61200秒（破壊時） $2.95 \times 10^{-4} \text{mV}$ 、そして破壊したあと61495秒で $9.32 \times 10^{-4} \text{mV}$ であった。

AEに関しては58000秒（破壊3000秒前）付近では500秒間に10個前後、61000秒（破壊200秒前）付近で10秒間に3個前後、61120秒（破壊80秒前）付近で1秒間に3個前後、61135秒（破壊65秒前）付近で1秒間に20個前後、61140秒（破壊60秒前）付近で1秒間に130発生している。

ひずみは、荷重載荷時で0.505%あり22000秒で0.51%、51600秒で0.52%、破壊時では0.67%であった。

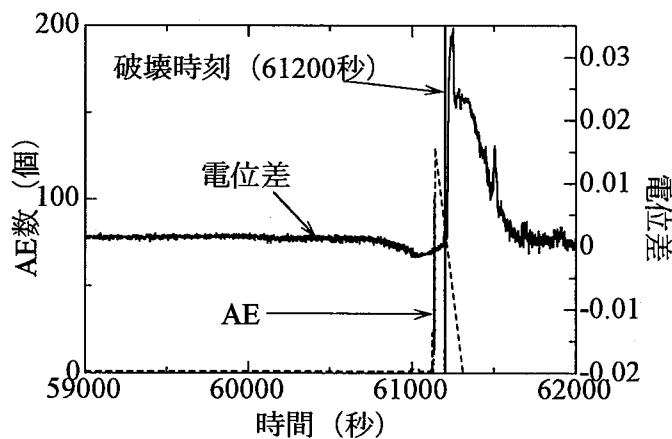


図8 電位差-AE-時間曲線（大谷石2）

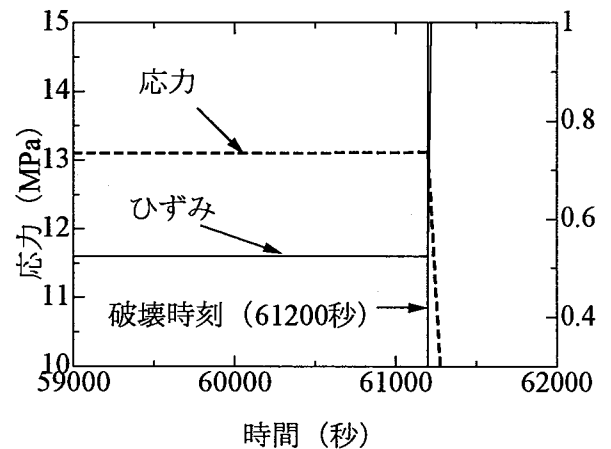


図9 応力-ひずみ-時間曲線（大谷石2）

(3) 考察

結果1では、電位差は破壊180秒前から顕著な変化をみせ、AEは破壊20秒前から顕著な変化をみせている。また結果2では、電位差は破壊前400秒付近から変化をみせ、AEは破壊65秒前付近から顕著な変化をみせた。以上の実験結果より電位差およびAEは、供試体の破壊前から変化を示すことが分かる。これらの結果は、本研究の目的である破壊予測に利用できる可能性を示している。特に、電位の変化がAE発生より先行して現れていることは、電位差の測定による破壊予測がより有効であると大きな期待が持たれるところである。また、電位差が先行して変化を見せずAEとほぼ同時刻に変化をみせたとしても、AE発生挙動による破壊予測よりも電位差発生挙動による破壊予測のほうが経済的であるため有効である。しかし、電位差が破壊の予兆らしき変化を見せ始める時間には供試体によりばらつきが存在する。また電車や工場など地下には電氣的ノイズが多いため、現場に導入するには、その電位差の変化が破壊予測におけるシグナルかどうか判断しづらい点が問題点となるだろう。

参考文献

- 1) 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, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp141-145, 2001.
- 2) 丹羽 義次, 大津 政康: アコースティック・エミッションの特性と理論 pp4, 1988.
- 3) 瀬川 治伸: 岩石のクリープ変形過程におけるAEの発生挙動について

豊田工業高等専門学校 平成9年度

- 4) 佐藤 潤: 岩石の変位に伴う電位差発生特性を用いた破壊予測

豊田工業高等専門学校建設工学専攻 平成14年度