

豊田工業高等専門学校建設工学専攻	学生会員	橋本 久輝
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	小林 睦
琉球大学	正会員	赤木 知之

## 1. はじめに

岩石が変形および破壊する際、電磁波が発生し岩石内に電位差が生じることは、今日までに多くの研究者によって確認されている。地震を岩盤の破壊現象と考えた場合、これに伴って電気的な変化が発生するのであれば、地震予知の分野だけでなく、スケールは異なるものの、土木や鉱山の分野においても、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に確立されていないのが現状である。そこで、本研究では岩石の破壊現象と、AEおよび電位差の発生挙動との関連を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。载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。反対に载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。

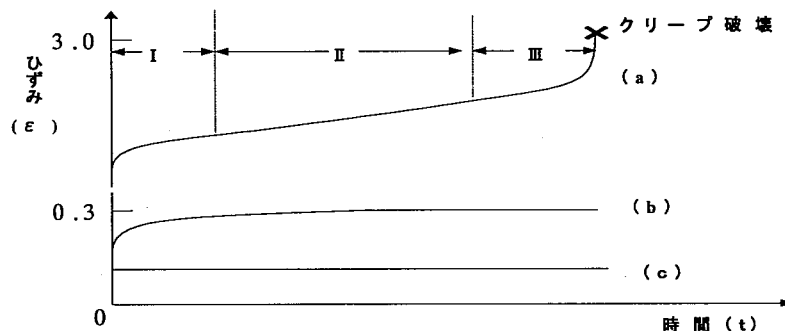


図1 一般的なクリープ曲線の例

## 2. 2 岩石の圧電効果

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。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。

## 3. 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。

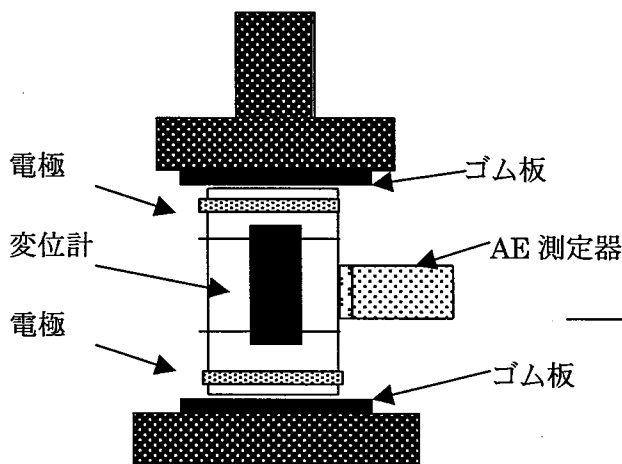
物体が破壊するという現象を考えると「瞬時に壊れる」などという表現も存在するが、実際の現象は微小なレベルの破壊がまずあり、それらが進行して最終的な破壊 (主破壊) に至る。このときの微小な破壊は、物体の内部で破壊現象が生じ、その際に蓄積されていたエネルギーの一部が波動となって開放される。特殊な材料を除いて固体材料は、第一義的には弾性体と考えることができるので物体表面で破壊の際に検出されるのは弾性波ということになる。

AEは「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」と定義することができる。

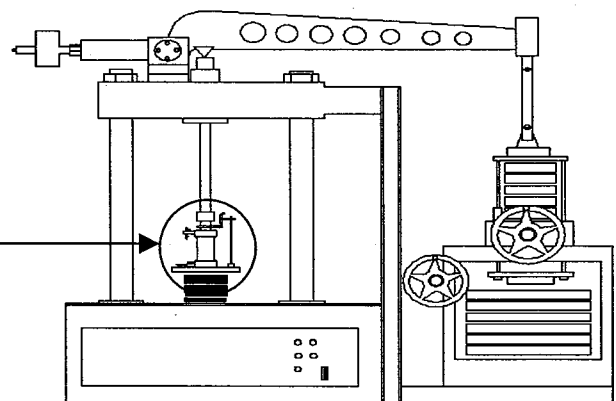
## 4. 試験方法

本研究では、応力・ひずみにおけるAEおよび電位差発生挙動を明らかにするために、一軸圧縮クリープ試験および繰り返し载荷試験を行った。

供試体の上下にはんだを取り付けることで、はんだが電極の役割となり、この電極により供試体の上下間の電位差を測定することができる。さらに、実験中にAEの測定を行った。これは、測定される電位が、変形に伴って蓄積される力学エネルギーと微小クラックによるエネルギー開放であることを明確にするために行うものである。図2に、試験時の供試体概略図を示す。



図—2 供試体概略図



図—3 一軸圧縮試験機

#### 4. 1 一軸圧縮クリープ試験

一軸圧縮クリープ試験とは、側圧を受けない供試体に長軸方向の一樣な圧縮荷重を一定に保った時、時間と共に増大するひずみの挙動を調べる方法である。載荷方式はレバー式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。図3に一軸圧縮試験機の概略図を示す。この試験装置の最大の軸負荷重は約25MPaである。

#### 4. 2 繰り返し載荷試験

繰り返し載荷試験とは、側圧を受けない供試体に長軸方向の一樣な圧縮荷重を一定時間保ち、その後除荷して一定時間保つ、その後再び圧縮荷重を載荷する。これを繰り返し行い、時間と共に増大するひずみの挙動を調べる方法である。

実際の岩盤に作用する繰り返し荷重としては、ダムの水位変動によるものや、圧縮空気による発電施設などが考えられる。その繰り返し荷重は1日以上間隔を置いて現れるものである。

今回の試験では繰り返しによるAEおよび電位差発生挙動に着目することから、周期を短くし、5分おきに載荷・除荷を繰り返した。

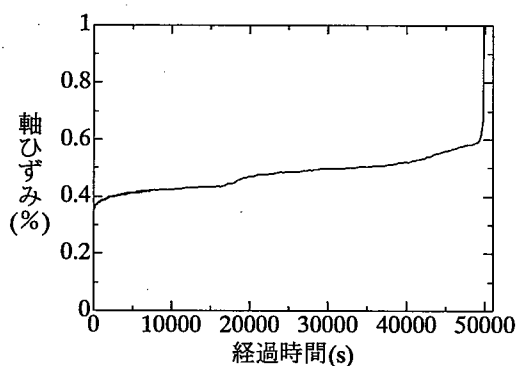
### 5. 使用材料

本研究では供試体に直径5cm、高さ10cmの円柱状に形成された大谷石を用いた。大谷石は、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である。石の重量が軽く、石質が軟らかいといった特徴がある。

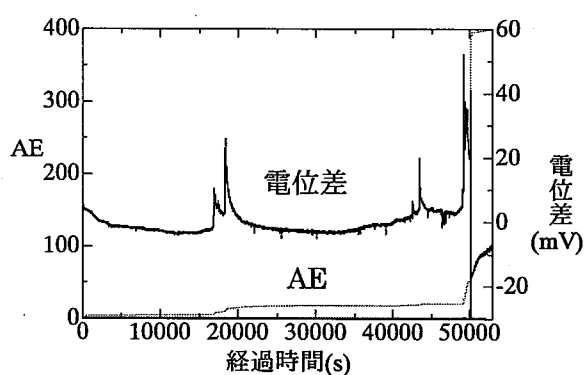
一軸圧縮試験を行った結果、最大圧縮応力は25MPaであることが分かった。クリープ荷重、繰り返し荷重は共に最大荷重の約75%である18.75MPaで試験を行った。

### 6. 実験結果

#### 6. 1 一軸圧縮クリープ試験結果



図—4 軸ひずみ—時間曲線

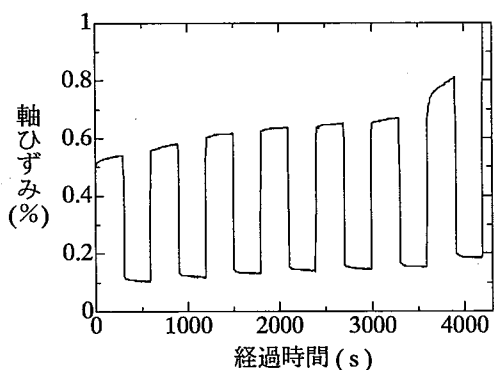


図—5 AEおよび電位差—時間曲線

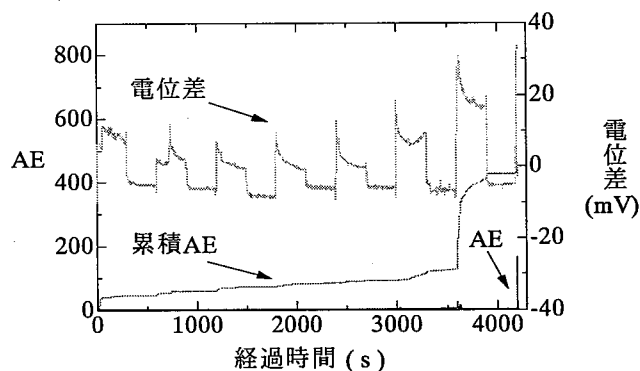
一軸圧縮クリープ試験では、初期荷重を18.75MPaとして試験を行った。図4は軸ひずみの時間変化を、図5はAEおよび電位差の時間変化を示すものである。

実験開始から約18000秒後に軸ひずみの上昇が見られる。この時点で、供試体内部に亀裂が発生したものと考えられる。それと同時に、AE、電位差ともに変化が生じていることがわかる。また、45000秒付近でも軸ひずみ、AE、電位差に変化が見られることから、内部亀裂が大きくなっていく様子が窺える。47000秒付近で軸ひずみ、AE、電位差が大きく上昇し、約49000秒で破壊したことがわかる。

## 6. 2 繰り返し荷重載荷試験結果



図一6 軸ひずみ-時間曲線



図一7 AEおよび電位差-時間曲線

繰り返し載荷試験では、載荷荷重を 18.75Mpa とし、1 サイクルを載荷時間 5 分+除荷時間 5 分として試験を行った。図 6 は軸ひずみの時間変化を、図 7 はAEおよび電位差の時間変化を示すものである。

電位差は載荷時に発生し、除荷時には、ほぼ 0 の一定レベルに戻ることがわかる。載荷中の電位差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、サイクル数を重ねるごとに徐々に上昇し、7 サイクル目で大きく上昇していることがわかる。また、AE、電位差ともに大きく上昇していることから、破壊の兆候であることが予想でき、8 サイクル目を載荷した時点で破壊したことがわかる。

## 7. まとめ

以上の試験結果より、クリープ試験、繰り返し載荷試験ともに、破壊に至る前に軸ひずみ、AE、電位差の 3 項目すべてが大きく上昇することがわかる。供試体によってはAE、電位差の変化を見せ始める時刻に違いがあるものの、AEによる破壊予測に比べ、電位差測定による破壊予測のほうが先行して顕著な変化が見られるため、電位差測定による破壊予測がより有効であるといえる。

また、供試体の強度に多少のばらつきがあるものの、同じ初期荷重をかけた場合、破壊時間はクリープ載荷よりも、繰り返し載荷の方が速い傾向があることがわかる。繰り返し荷重を受けると、供試体に微小な亀裂が生じていることが、AE、電位差の変化から窺い知れる。サイクル数を重ねることで、亀裂が増え、弱くなったと考えられる。

電磁波の異常な発生を観測することにより、岩盤構造物を破壊に至らしめる亀裂の不安定成長を把握できる可能性がある。岩盤構造物の破壊は瞬間的に発生するのではなく徐々に加速的に進行していくため、その初期段階の亀裂発展を把握できれば、被害が生じるまでに対策や避難が可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) アイダン・オメル：地盤材料の変形に伴う電位発生特性について，土木学会中部支部研究発表会，pp. 281-282, 2001.
- 2) 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.