

一軸圧縮試験における岩石からの電磁波の発生

Electromagnetic Wave Emission in Uniaxial Compression Testing

福井 勝則* ・大久保 誠介** ・寺嶋 卓文***

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO and Takafumi TERASHIMA

In this study electromagnetic wave from rocks was measured with a radio interference measuring apparatus during uniaxial compression testing under several kinds of stress-strain conditions.

It was found that Inada Granite, Honkomatsu Andesite and Kuzuu Dolomite emit electromagnetic wave during the uniaxial compression testing under constant strain rate of 10^{-4}s^{-1} . Under the same condition, electromagnetic wave cannot be detected for Sanjome Andesite, Akiyoshi Marble, Kimachi Sandstone and Mortar.

Most electromagnetic wave emission events were occurred with sudden decrease of stress. By analysis on results of the uniaxial compression testing under constant strain rate, it was found that electromagnetic wave emission is associated with cracking.

Key Words: rock, uniaxial compression testing, electromagnetic wave, cracking, post-failure region

1. はじめに

過去において岩石の電気的性質に関して研究・報告された例はいくつかみられるが、その多くは原位置における岩盤を対象としたもので、目的を地震の予知においている¹⁾。例えば、VAN 法などのように岩盤の電気的変化を測定することにより地震の予知を行おうとする研究が盛んである²⁾。地震は岩盤の破壊現象と考えられ、これに伴って電気的な変化が発生するのであれば、その応用として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、坑道や斜面の崩壊の予知に応用できる可能性がある。

岩石試料を用い電気的性質に関する研究を行った例もいくつかみられるが、その多くは岩石の導電率や誘電率の議論にとどまっており、岩石力学的な見地から電気的な特性を研究した例はほとんどみられない。これは従来、岩石の電気的特性を研究する目的が、岩石の導電率や誘電率などを利用した地殻の物理探査への応用に留まっていたためであろう。

著者らは、坑道や斜面などの岩盤構造物の崩壊予知への応用を考え、岩石力学的見地から電気的特性を調べる一連の研究を開始した。まず既報で静的³⁾および動的⁴⁾に载荷した岩石の圧電現象に関して検討を行い、応力の変化によって、電荷の発生がみられることを示した。

本研究では岩石の破壊過程における電磁波の発生を調べることを目的とし、一軸圧縮荷重下で岩種や载荷条件を変化させ、破壊過程における電磁波の発生を観測する実験した結果について述べる。

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

*** 東京大学大学院修士課程 工学系研究科地球システム工学専攻

2. 実験装置及び試料岩石

今回使用した実験装置の概略図を図-1に示す。載荷装置として1500 kN サーボコントロール試験機(MTS 社製)を用いた。発生した電磁波の測定には、図-2に示すような自作のコイル状ループアンテナ(直径7 cm, 高さ8 cmの亚克力製の円筒に100回銅線を巻きつけたもの)を使用した。アンテナで受信された電磁波は、妨害波強度測定器(協立電子工業社製 KNM-2401 型)に取りこまれ、特定の周波数帯における電界強度に変換し、その経時変化をオシロスコープに取りこんだ。妨害波強度測定器は、一種の周波数同調型高周波電圧計であり、本研究では電磁波の測定する帯域として、アンテナの特性や実験室の雑音環境、将来における原位置での計測などを考慮して500 kHz に定めた。500 kHz の周波数帯域においては、妨害波強度測定器の過渡応答特性は規格で定められており、帯域幅は9kHz, 検波時定数は充電時定数1 ms, 放電時定数160 ms, 機械的時定数160 ms であり、検波効率は0.970である。

本研究で使用した試料は、稲田花崗岩、三城目安山岩、本小松安山岩、秋芳大理石、葛生ドロマイト、来待砂岩、モルタルの7種である。試験片の寸法はφ25 mm×高さ50 mm であり、端面の平行度は±0.02 mm 以内である。また、試験片は整形後実験室に2週間以上放置された気乾状態のものを使用した。実験は、温度が $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, 湿度が $70 \pm 15\%$ に保たれた実験室において行った。実験を行う前に、実験室内の雑音の電界強度を測定した結果500kHzの周波数帯域において、雑音レベルは65 ~ 68 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ であった。

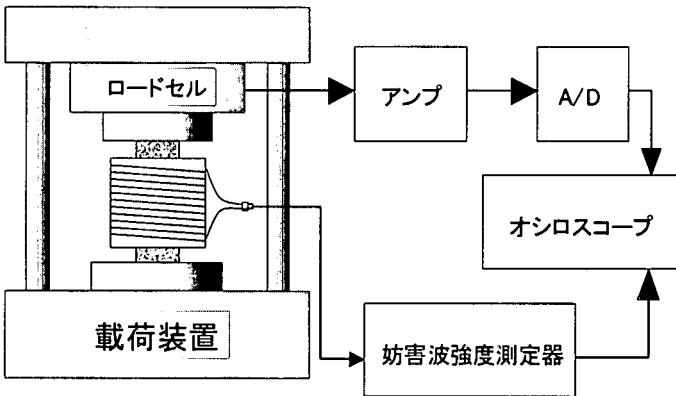


図-1 実験装置の概略図

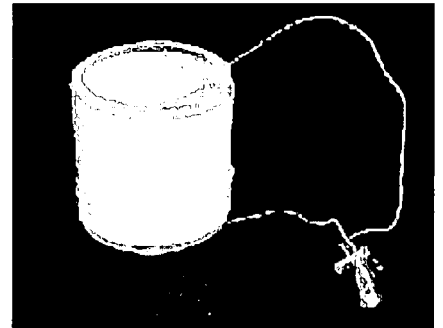


図-2 ループアンテナ

3. 岩種の影響

本章では、岩石の種類による電磁波の発生状況を調べるために、 10^{-4} s^{-1} の定歪速度で一軸圧縮試験を行った結果を述べる。

図-3に稲田花崗岩を用いた結果の一例を示す。図-3(a)を見ると載荷開始から応力がピーク強度にいたるまで、雑音レベル以上の電界強度は観測されていない。その後、ピーク強度を過ぎ、急激に応力が低下する際に電磁波が観測されているのがわかる。ピーク強度を過ぎて完全に破壊した後では、載荷し続けても電磁波は観測されなかった。図-3(a)の拡大図である図-3(b)を見ると、この試験片では、ピーク強度に達した直後の220 MPaから170 MPaまで応力が急激に低下し、それにあわせて、電界強度に1回目のピーク(81 dB)が見られる。その後、一旦応力低下が緩やかになって、応力が160 MPaに達したあたりから、ほぼ0 MPaに達するまで、再度急激に応力が低下しており、そのとき、電界強度は最も大きな値(87 dB)が観測された。電界強度の立ち上がりに関しては、応力が低下し始めるところと一致しているように見受けられる。しかし、電界強度がピークとなる時期と、応力低下が最も激しい時期とは、必ずしも一致していない。

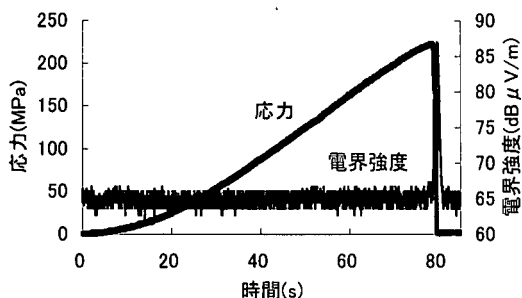


図-3 (a) 応力と電界強度の経時変化 (稲田花崗岩)

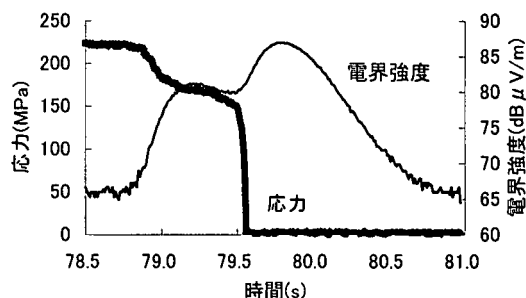


図-3 (b) 図-3(a)のピーク強度付近の拡大図

図-4に本小松安山岩、図-5に葛生ドロマイトの実験結果のピーク強度付近を拡大した図である。稲田花崗岩の実験結果同様、载荷開始から応力がピーク強度に達するより以前では、雑音レベルより大きい電界強度は観測されなかった。ピーク強度に達した後、急激に応力が低下する際に電磁波が観測された。また、それ以降では载荷し続けても電磁波は観測されなかった。

他方、秋芳大理石、来待砂岩、三城目安山岩およびモルタルでは、载荷開始から終了まで雑音レベルを超えるような電界強度の変化は見られなかった。

以上のように、電磁波が観測されたのは、稲田花崗岩、本小松安山岩、葛生ドロマイトの3種類であった。この3種の岩石には、電磁波発生の確認ができなかった秋芳大理石、来待砂岩、三城目安山岩およびモルタルの4種類に比べ、脆性的な特性を示す硬岩であるという共通点が見られる。今回の結果から類推すると脆性的な硬岩では電磁波が発生しやすいのではないかと考えている。

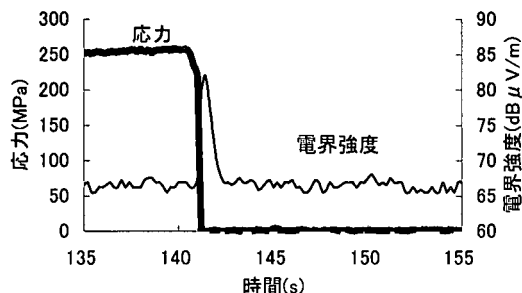


図-4 応力と電界強度の経時変化 (本小松安山岩)

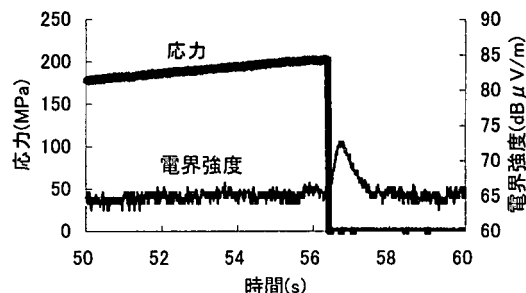


図-5 応力と電界強度の経時変化 (葛生ドロマイト)

4. 実験条件の影響

本章では稲田花崗岩を用い、実験条件を変化させた場合の電磁波の発生状況を調べた結果について述べる。

(1) 歪速度

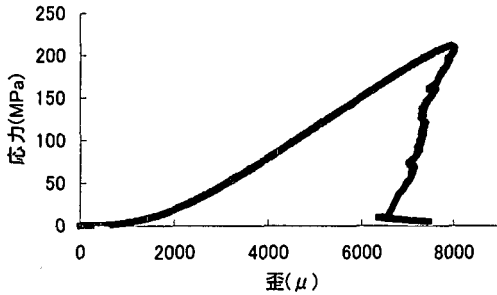
歪速度を 10^{-5} s^{-1} と1桁遅くし、稲田花崗岩を用いた結果を図-6に示す。歪速度が 10^{-4} s^{-1} の時と同様に、破壊過程において電磁波が観測されている。図-6を見ると、载荷開始から約730秒後において電磁波が観測されており、そのときには耳で聞こえる亀裂音したが、特に急激な応力の低下は見られなかった。その他の電磁波の観測されるところでは、歪速度 10^{-4} s^{-1} と同様に、電磁波の発生にあわせて応力の急激な低下が見られた。また、電界強度の大きさに関しては、歪速度 10^{-5} s^{-1} と 10^{-4} s^{-1} で大きな変化は見られなかった。以上のように、歪速度が変化しても、電磁波は同程度発生することがわかった。

(2) 応力帰還試験

次式で示される、応力帰還制御⁵⁾によって試験を行った。

$$\varepsilon - \alpha \frac{\sigma}{E} = C \cdot t$$

$C=10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $\alpha=0.6$ としたときの稲田花崗岩の応力-歪線図を図-7(a)に、電界強度と応力の経時変化を図-7(b)に示す。図からピーク強度以降、徐々に破壊が進行している過程において、電界強度の変化が観測されており、電磁波が断続的に発生し続けている様子がうかがえる。



(a) 応力-歪線図

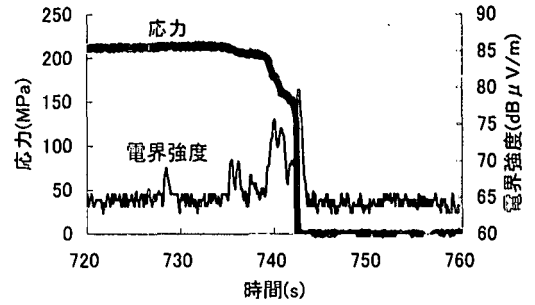
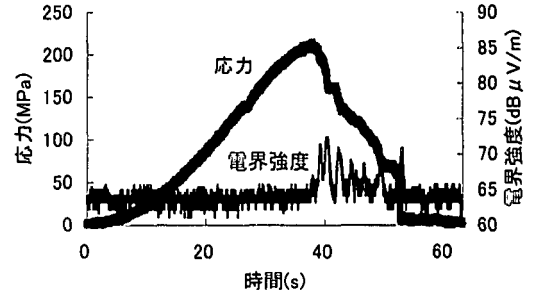


図-6 応力と電界強度の経時変化
(稲田花崗岩, 歪速度 10^{-5} s^{-1})



(b) 応力と電界強度の経時変化

図-7 稲田花崗岩の結果 ($C=10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $\alpha=0.6$)

次に、 C を 10^{-5} s^{-1} とした場合の結果を電界強度と応力の経時変化を図-8に示す。図では、ピーク強度以降の数力所で電磁波が発生しており、しかも電界強度の変化が観測できたときには、応力の急激な低下が見られている。このように、制御方法を変化させても、電磁波を観測することができた。

(3) 端面の影響

端面を整形していない稲田花崗岩について、 10^{-4} s^{-1} の定歪速度で一軸圧縮試験を行った。図-9は、 $\alpha=0.6$ の場合の、荷重及び電界強度の経時変化である。載荷開始から6秒後の応力が35 MPaに達したあたりで、最初の電磁波が観測された。このときには、耳では聞き聞こえる程度の亀裂音がした。また、図からピーク強度に達した直前でも電磁波が観測されるのがわかる。ピーク強度に達した後、端面を整形した試験片で実験を行ったときと同様に、荷重が急激に下がるところで最も強い電磁波が観測された。以上のように、ピーク強度以降でなくとも、微小破壊時にも電磁波の発生がみられることがわかった。

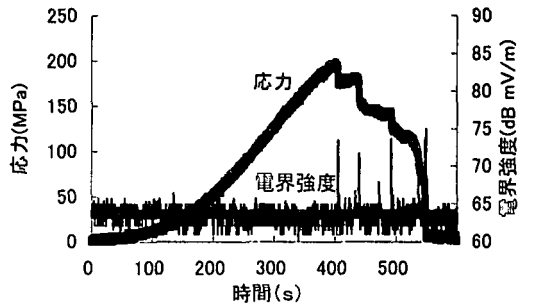


図-8 応力と電界強度の経時変化
(稲田花崗岩, $C=10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $\alpha=0.6$)

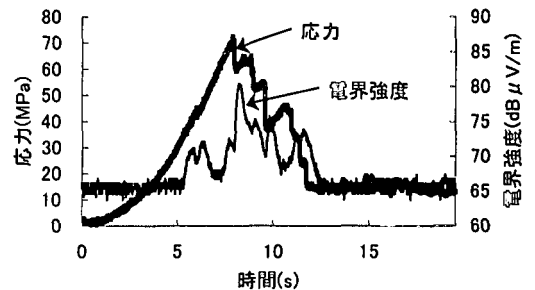


図-9 応力と電界強度の経時変化
(稲田花崗岩, 端面非整形)

5. 考察およびまとめ

本研究で述べた結果をまとめると次のようになる。脆性的な岩石である稲田花崗岩、本小松安山岩、葛生ドロマイトの3種において、ピーク強度以降で応力の急激な低下が見られた時に電磁波が観測された。応力の低下が見られないときでも、耳で聞こえる程度の亀裂音が生じた。その他の岩石では、雑音レベルを超えるような電界強度の変化は観測できなかった。次に稲田花崗岩を用い、実験条件（歪速度、制御方法、端面の仕上げ）の影響を調べたが、実験条件を変化させても電磁波の発生を確認することができた。

花崗岩を用いた実験において、 $\alpha=0$ のときの、発生した電磁波の電界強度とその時の応力低下量の関係を図-10に示す。図ではばらつきは大きいものの、応力低下量が大きくなるほど、電界強度が大きくなっている傾向が見られる。一軸圧縮試験での応力の低下量は生成された亀裂の進展長さに強く影響を受けることを考えると、本研究で観測した電磁波は亀裂の不安定成長によって発生した可能性が高いと類推できる。このように考えると、亀裂が不安定成長しやすい脆性岩石で電磁波の観測ができたことや、応力が低下なくとも亀裂音が生じた場合には、電磁波が発生することを説明することができる。

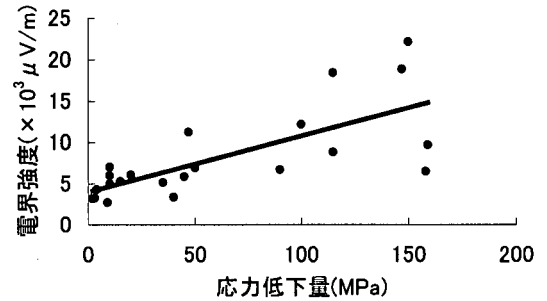


図-10 応力低下量と電界強度の関係
(稲田花崗岩)

以上の結果から、原位置においても亀裂の不安定成長が生じた場合には、電磁波が発生しているのではないかと考えることができる。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。なお、岩盤構造物の崩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進展を把握できれば、実被害が生じるまでに対策や避難が可能であると考える。また、AEセンサーなどのように岩盤に直接設置しなければならない観測装置に比べ、電磁波は非接触型であるアンテナで観測できるため、設置が容易であり、費用的にも安価ですむことも予想される。ただし、周りの雑音レベルの中でどの程度の大きさの電磁波が発生しているかなどの点に関しては今後、定量的に検討を進めていく必要を感じる。

今回は、電磁波の発生機構に関して述べなかったが、亀裂面で発生した電荷や圧電現象などの機構が考えられ、その点は室内試験などを追加して検討を進めるつもりである。

参考文献

- 1) 例えば Gokhberg, M. B., Morgounov, V. A., Yoshino, T. and Tomizawa, I.: Experimental Measurement of Electromagnetic Emissions Possibly Related to Earthquakes in Japan, Journal of Geophysical Research Letters, Vol.87, p7824~7828 (1982)
- 2) 深尾良夫・石橋克彦編：阪神・淡路大震災と地震の予測, p.206-211, (1996), 岩波書店
- 3) 前野沢郎・大久保誠介・福井勝則：一軸圧縮荷重下における岩石の圧電性(第2報), 資源・素材学会春季大会講演要旨集, Vol. I, p.113(1998)
- 4) 福井勝則・大久保誠介・齋藤貴英：岩石の圧電性に関する基礎研究, 資源・素材学会秋季大会講演要旨集, p.1(1996)
- 5) Okubo S. and Nishimatsu Y.: Uniaxial Compression Testing Using a Linear Combination of Stress and Strain as the Control Variable, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol.22, No.5, p.323~330 (1985)