

光ファイバ式 AE センサ(FOD)による硬岩と軟岩の破壊時 AE 特性

○藤井 宏和¹, 森 孝之², 斉藤 義弘¹
田仲 正弘¹, 町島 祐一¹

The AE characteristic in hard rock and soft rock specimens of compression failure
using optical type AE sensor (FOD)

Hirokazu Fujii¹, Takayuki Mori², Yoshihiro Saito¹
Masahiro Tanaka¹ and Yuichi Machijima¹

概 要

硬岩と軟岩供試体の破壊時の AE 特性を調べるために、光ファイバ式の AE センサ(FOD センサ)を用いて、花崗岩と凝灰岩の強度の異なる供試体の圧縮試験時の AE をそれぞれ測定した。本論文では硬岩と軟岩の破壊時に伴う AE 特性について報告する。

キーワード : *fiber-optic, AE, hard-rock, soft-rock, compression, failure*

1. はじめに

これまで、地下発電所等の大規模岩盤地下空洞の掘削時には、空洞の安定性や周辺岩盤のゆるみ領域を評価する試みとして AE モニタリングが適用されてきた^{1), 2)}。これらの岩盤空洞では花崗岩や古生層の堆積岩などのいわゆる「硬岩」が主流であった。しかし、今後、岩盤地下空洞の利用形態の多様化に伴い、固結度の低い堆積岩などの「軟岩」からなる岩盤においても大規模空洞の建設が進むものと考えられる。従来、軟岩においては AE 信号の伝播過程での距離減衰が大きいため、AE 計測の適用は敬遠され報告例は少ない。本報告では、このような状況を踏まえ軟岩の破壊時の AE 特性について調べるため、軟岩³⁾として位置付けられる凝灰岩（大谷石）の圧縮破壊時の AE を測定し、硬岩である花崗岩での AE 特性と比較することで、岩石破壊との関係を検討した。また、今後の岩盤構造物では地下深部化が進み、岩盤 AE 計測には AE センサの仕様として高感度、長期信頼性、防爆性が求められる。本論文では、これらの要求を満足する機能をもつ光ファイバ式 AE センサ⁴⁾を適用した。

2. 試験方法

試験に用いたセンサは防爆性や長距離伝送性に優れた光ファイバ式の AE センサであり、センサ素子部は図 1 に示すように光ファイバをらせん状に巻いたものである。

¹株式会社レーザック, 〒113-0033 東京都文京区本郷, LAZOC Inc., 3-40-9,Hongo, Bunkyo-ku,Tokyo,113-0033

²鹿島建設株式会社, 〒182-0036 東京都調布市飛田給, KAJIMA Corporation, 2-19-1Tobitakyu,Chofu,Tokyo,182-0036

このセンサは光のドップラー効果を利用した振動センサ(FOD: Fiber Optical Doppler)であり、素子部を測定対象物に固着することで対象物の伸縮に伴い素子部も連動して伸縮する。その際にファイバ内を透過するレーザー光の周波数も変調し、その変調量は伸縮の速度、すなわちひずみ速度と比例関係⁴⁾であることを利用したひずみ速度型のセンサとなる。また、このセンサは素子部のファイバ長が長くなると感度が高くなる特徴がある。

試験に用いた岩石は、硬岩として茨城県産の稲田花崗岩、軟岩として栃木県産の大谷石(凝灰岩)である。試験は花崗岩および大谷石ともに一軸圧縮試験を基本としたが、花崗岩では三軸圧縮試験も行った。試験は全て変位制御の载荷とし、载荷速度は0.05mm/minとした。

岩石供試体の寸法は、花崗岩は一軸試験用が25×25×75mmの角柱供試体、三軸試験用がφ50×100mmの円柱供試体、大谷石が100×100×200mmの角柱供試体である。図2と図3に供試体とセンサ配置図を示す。これらの図に示したように花崗岩ではセンサ素子長2m、大谷石では40mのものを用いている。これは供試体の大きさと花崗岩と大谷石と信号伝播過程の距離減衰の大きさを考慮して、軟岩用はセンサの感度が高くなるようにした。

AE測定の設定は、両者ともサンプリングが0.5μs、波形記録長が1kwords、フィルタは100kHz～500kHzのバンドパス型とした。また、大谷石では圧縮応力下での弾性波測定も実施した。図3および図4に示すように圧電素子型のAEセンサから電気的なパルス波を発信し、供試体の裏側に配置した光ファイバ式AEセンサで受信した弾性波波形を収録した。

3. 試験結果

図5は圧縮試験における各岩石における応力-ひずみ曲線図にAEの発生数と周波数変化を併せて示したものである。まず、同図上段(1)の花崗岩の一軸圧縮試験結果をみると、軸ひずみ

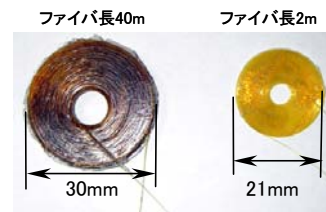


図1 光ファイバのセンサ部
(左:積層型ファイバ長40m 右:ファイバ長2m)

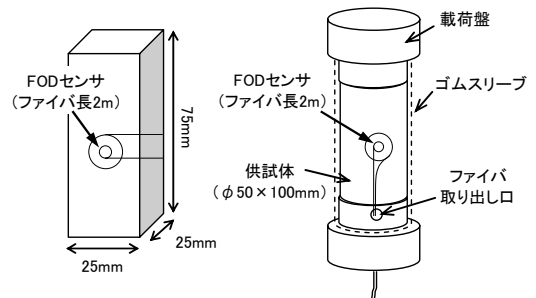


図2 硬岩(花崗岩)供試体とセンサ配置
(左:一軸载荷, 右:三軸载荷)

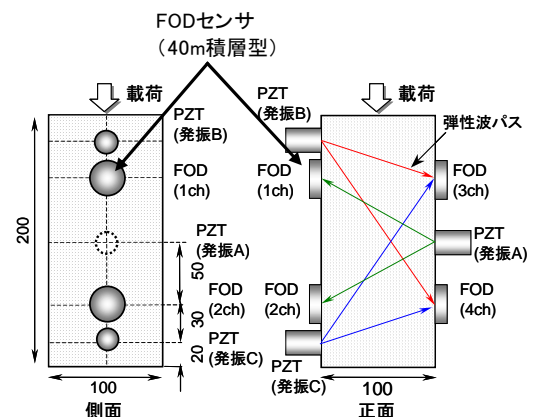


図3 軟岩(大谷石)供試体とセンサ配置

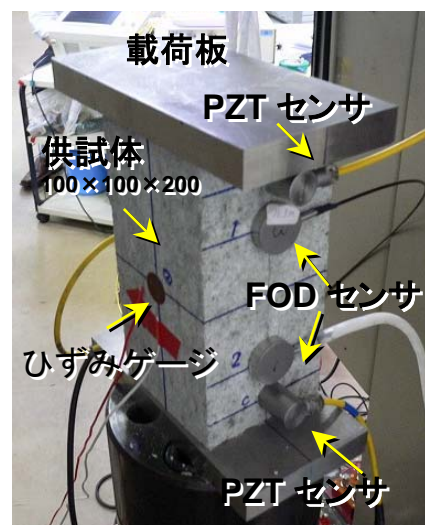


図4 大谷石の供試体

0.65%、軸応力 130MPa で脆性的に破壊している。AE は軸ひずみ 0.5%程度から発生し始め、破壊時で最大 180 個/秒程度と急増している。AE 波形の周波数は破壊前には 400kHz 程度であるが、破壊直前には 250～300kHz まで低下している。

次に、中段(2)の花崗岩の三軸圧縮試験の結果をみると、供試体は軸ひずみ 0.9%、軸差応力 290MPa で破壊し、その後残留状態を維持している。AE は軸ひずみ 0.3%から発生し始め、破壊時には急増するが、残留時にも同程度の AE 発生が継続している。周波数については破壊前に 300kHz 以上であったが、破壊近傍では 200kHz 程度と大きく低下し、残留時ではさらに 150kHz 程度と低下している。

最後に、下段(3)の大谷石の結果をみると、供試体は軸ひずみ 0.75%程度、軸応力が 12.6MPa で破壊している。AE は花崗岩と異なり载荷開始から発生し、軸ひずみ 0.6%付近から徐々に増加し、破壊時では 100 個/秒程度に達する。残留時では 180 個/秒以上（最大で 1800 個/秒に達した）と破壊時より多く発生している。周波数については载荷当初は 100kHz であったが、载荷の進行に伴って 150kHz まで上昇する傾向が伺われる。その後、破壊時には周波数は低下し、残留時に一定値の傾向を示す。

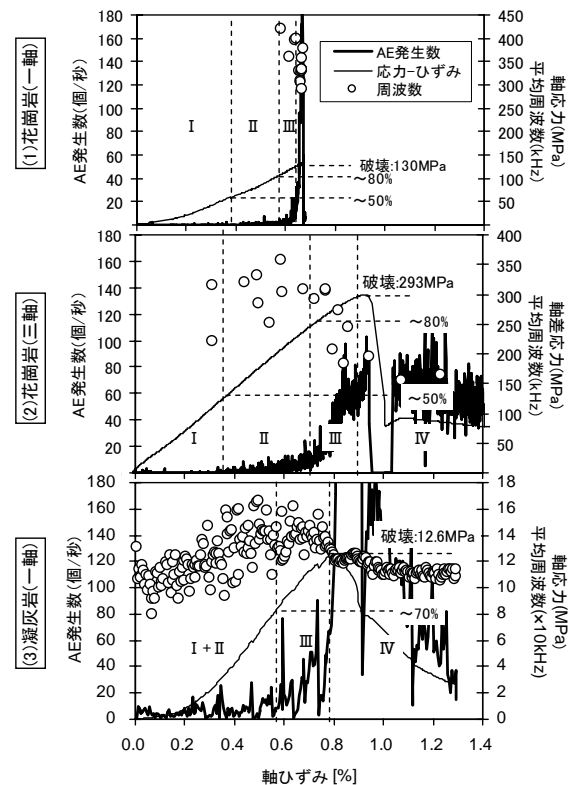


図5 各岩石の圧縮応力下でのAE発生状況

4. 硬岩と軟岩の AE 特性の比較と岩石破壊との関係

表 1 は、各試験における供試体の破壊状況を I～IV に区分したときの AE 特性を示したものである。同表から花崗岩の場合、一軸および三軸圧縮ともに、破壊直前で AE は急増し、周波数は、破壊前と比べて破壊時に大きく低下する傾向である。この花崗岩の AE 特性と岩石破壊との関係は、既存の研究⁵⁾を参考にすると、『载荷に伴い既存亀裂の進展あるいは新たな亀裂の発生に伴って AE が発生し、その周波数は比較的高い(II 期)。そして、さらに载荷が進み岩石が破壊に近づくとき進展した亀裂が連結してすべり面を形成すると、AE は急増するが、周波数は低下する(III 期)。そして、残留状態に入ると形成されたすべり面が滑動し AE は大量に発生し、周波数はさらに低下する(IV 期)』のように説明できる。

大谷石についても破壊前後では花崗岩と同様な挙動を示すことがわかったが、次の 3 点について両者の差異が認められた。①大谷石は载荷開始から AE が発生する。②AE 波形の周波数帯は、花崗岩では 150kHz～430kHz の範囲であったが、大谷石では 100～150 kHz であった。③大谷石の場合、AE の発生は破壊時より残留時の方が顕著である。

表1 各岩石のAE発生形態の特徴

		I		II		III		IV	
		I + II		III		IV		IV	
		AE発生数		周波数		AE発生数		周波数	
花崗岩 (硬岩)	一軸圧縮	ほとんど発生しない	-	数個~10個/秒程度	-	10個~180個/秒程度	300k~430kHz (破壊に近づくにつれて低下)	-	
	三軸圧縮 (側圧5MPa)	ほとんど発生しない	-	数個~10個/秒程度	250k~350kHz	10個~100個/秒程度	200k~300kHz (破壊に近づくにつれて低下)	80~100個/秒程度	150kHz
大谷石 (軟岩)	一軸圧縮	I + II		III		IV		IV	
		AE発生数		周波数		AE発生数		周波数	
		数個~20個/秒程度		100k~150kHz (上昇傾向)		40~80個/秒程度		最大1800個/秒程度	
						150k~120kHz (破壊に近づくにつれて低下)		110kHz程度	

ここで大谷石供試体において実施した弾性波測定の結果を図6に示す。同図には応力-ひずみ曲線に加え、弾性波の波形振幅を正規化し、その変化を示した。これによると、弾性波の振幅値は軸ひずみで0.6%程度の範囲で初期値よりも大きくなり、それ以降は小さくなっていることがわかる。これは载荷に伴い岩石内部の微小な空隙などが閉合するなど見かけ上緻密になった状態が想定できる。その後の応力レベルでは破壊前でも岩石内に微小破壊の発生やすべり面が形成され組織がルーズとなり振幅が低下したと思われる。

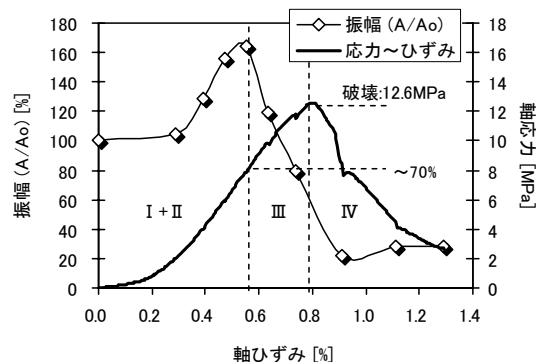


図6 大谷石の载荷に伴う波形振幅の変化

以上の結果から、軟岩である大谷石のAE特性として『载荷に伴い岩石内部の空隙が閉合し緻密になりAEは発生するもののその数は少なく、周波数は100~150kHz程度である(I+II期)。さらに载荷が進むとすべり面が形成され、破壊に近づくときAEの発生数は徐々に増え、周波数は低下する(III期)。そして残留状態になるとAEは顕著な発生となり周波数は低下傾向を示す(IV期)』と説明できる。

5. おわりに

光ファイバ式のAEセンサを用いて硬岩である花崗岩と軟岩である大谷石の供試体を用いて、破壊に伴うAE特性を測定した。その結果、両者のAE特性にはAE発生状況と周波数帯に差異があることがわかった。また、大谷石については弾性波測定を実施し、AE特性と岩石破壊の関係を明らかにした。今後はさらに固結度の低い軟岩においてデータを蓄積し、破壊に伴うAE特性の特徴を整理する予定である。

参考文献

- 1) 金川忠, 打田靖夫, 浦山克, 田仲正弘, 石田毅: AE波形の周波数変化に着目した空洞掘削時の岩盤挙動の推定, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.701~706, 1994
- 2) 田仲正弘, 金川忠, 小山俊博, 森孝之: 空洞掘削時のAE自動計測による岩盤安定性監視技術, 第22回西日本岩盤工学シンポジウム2000講演論文集, pp.47-52, 2000
- 3) (社)地盤工学会: 岩盤の工学的分類方法 (JGS 3811-2004)
- 4) Kageyama, K., Murayama, H., Ohsawa, I., Kanai, M., Motegi, T., Nagata, K., Machijima, Y., Matsumura, F.: Development of a new fiber-optic acoustic/vibration sensor, Proc. of International Workshop on Structural Health Monitoring 2003, pp.1150-1157, 2003.
- 5) 金川忠: 地下空洞におけるAcoustic Emissionの利用技術に関する研究, 京都大学学位申請論文, 1999