アコースティック・エミッションを用いた 岩盤空洞の安定性評価技術*

青 木 謙 治¹ 戸 井 田 克² 腰 塚 憲 一³

[UDC 624. 121. 38]

The Stability Monitoring of Rock Caverns by Acoustic Emission Measurements

by Kenji AOKI¹, Masaru TOIDA¹ and Kenichi KOSHIZUKA¹

1. Kajima Institute of Construction Technology, Chofu, Tokyo 182

The behavior of the loosened zone around rock caverns plays an important role in the mechanical stability of rock pillars during construction and after completion. The authors have carried out the laboratory and in situ experiments to investigate the failure mechanism of the rock around the caverns and the monitoring technique of the occurrence and progress of loosened zones by acoustic emission (AE) measurements.

This paper describes the results of these experiments and discusses the available procedures to predict the initiation of the loosening of the rock mass by the indicators "count rate (the rate of occurrence of AE per minute or hour)", "AE energy (the square of amplitude of AE)" and "m-value" (the ratio of amplitude to count rate of AE).

- (1) As the results of comparison between AE measurements by laboratory triaxial test and in situ rock shear test, the loosening of the rock mass is considered to be strongly affected by the presence of pre-existing fractures.
- (2) As the results of AE measurements by in situ rock shear test and during tunnel excavation, it is clarified that the decrease ratio of m-value and the increase ratios of count rate and AE energy for the heavily jointed rock mass show smaller figures than those of the intact rock mass.
- (3) The decrease ratio of m-value and the increase ratios of count rate and AE energy could be appropriate indicators for the determination of the criteria for the judgement of occurrence of loosening based on the relationship between three AE parameters mentioned above and the seismic wave velocity.

KEY WORDS: Acoustic Emission, Rock Cavern, Loosened Zone, Monitoring Technique, Seismic Measurement

1. は じ め に

近年、我が国では、原油の岩盤内貯蔵が実現しつつあり、さらに、将来的なLPG、天然ガス、圧縮空気等の岩盤内地下貯蔵の計画も具体化しつつある。これらの岩盤空洞の利用に際しては、併設された空洞群に気体・液体を長期間にわたって貯蔵する機能が要求される。従って、既存のトンネルや地下発電所空洞よりも、建設時や完成後における力学的安定性の確保に対する必要性が極めて大きい。とりわけ、併設空洞間の岩盤ビラー中に発生・進展する緩み域は、岩盤が有している本来の強度を失った状態にあると考えられるので、その分布状況を精度良く把握し、計画時に評価した緩み域の分布状況との対比を行うことが重要である。そし

て、対比の結果、補強工が不十分と判断された場合には、緩みを過大に進展させないための対策に、緩み域の把握結果を迅速に反映させることが重要である。

筆者らは、緩み域の発生・進展の検知手法として、岩石の破壊に伴って発生するアコースティック・エミッション（微小破壊音、AE）を用いたモニタリング手法に着目し、これまでに室内および原位置での計測結果に基づく研究を実施し、以下のような成果を得ている。

① AEパラメータとして、発生するAEの振幅と頻度の比として表わされるm値が、岩石および岩盤の破壊時に低下・反転現象を示すことを確認した。そして、これらの結果に基づいて、後述する既存のAEパラメータであるカウント・レートやAEエネルギーと共にm値を利用して、岩盤中の緩みの発生・進展の検知が可能との見通しを得た¹⁾。

② 岩石および岩盤が破壊する時のm値の低下度合いは、岩盤中のクラックの分布状況に影響を受けることを確認した。具体的には、岩盤中に既存クラックが多いほど、破壊前のm値は小さく、破壊時のm値低下量も小さいことが予測された²⁾。

* 1991年1月29日受付 5月2日受理 第8回岩の力学国内シンポジウムにて一部発表

1. 正会員 工博 鹿島建設技術研究所第1研究部

2. 正会員 鹿島建設技術研究所第1研究部

3. 鹿島建設技術研究所 第1研究部

キーワード：アコースティック・エミッション、岩盤空洞、緩み域、監視技術、弾性波測定

今回は、以上の結果を踏まえ、カウント・レート、AEエネルギーおよびm値を用いた岩盤の緩み判定規準、すなわち、緩みの発生・進展を判定するために有用な前述の3つのAEパラメータの判定規準値に関する検討を行った。

規準値に関する検討に際しては、計測対象地点の地圧条件等の影響を解明した上で、具体的な規準値を設定することが必要と考えられるが、今回は岩盤が破壊状態に至る際のAEパラメータの変化量の把握に主眼を置いた基礎検討を行った。その結果、同一岩種（流紋岩）での室内・原位置計測結果の対比・解析からある程度、汎用性があると考えられる規準値の設定に関する知見が得られたので、その検討結果を報告する。

2. 緩みの発生機構について

一般的に、硬岩を対象とした場合に、岩盤中の緩み発生機構は以下の2つに大別できると考えられる。

- ① 主に新規クラックの発生・進展に起因するケース
- ② 新規クラックは発生するが、既存クラックの開口、進展が主体となるケース

従って、緩み発生・進展の際のAEパラメータの変化状況を知るためには、それぞれのケースにおけるAEパラメータの特性を調べる必要がある。そこで、上記①のケースについては、既存クラックのない、岩石コアによる室内試験時のAE計測結果を対象とし、②のケースについては、クラックが存在する原位置での岩盤試験時のAE計測結果を検討対象とした。しかし、実際の空洞周辺岩盤の緩み発生状況は、これら①、②のケースが混在していることが予想されるため、最終的にトンネル掘削時のAE計測結果も併せて総合的な検討を行った。ただし、緩み発生・進展時のAEパラメータの変化状況を定量的に評価するために、室内岩石試験時、原位置岩盤試験時およびトンネル掘削時のAE計測結果は、同じ周波数特性を持つ計測機器を用いて同一岩種（流紋岩）を対象として実施した。そして、これらの計測結果から緩み発生・進展時のAEパラメータの変化状況を調べ、緩み判定のための規準値の設定方法について検討した。

3. AEパラメータにおける緩み判定の考え方

筆者らが、岩盤の緩み進展検知に対して有用な指標と考えているAEパラメータは、“カウント・レート”、“AEエネルギー”および“m値”の3つであり、これらのAEパラメータの定義の内容と、以下に示す検討に用いた各パラメータごとの緩み判定の考え方を概説する。

3.1 カウント・レート

カウント・レートとは、図1に示すように、あるしきい値を越えた振幅を持つAEの発生数を単位時間（1分間、1時間）当たり

$$AE \text{ Energy} = \left[\sum_{i=1}^n (A_i)^2 \right]$$

A_i : Maximum Amplitude of AE Wave
 n : Number of AE per minute (hour)

Fig. 1 Definition of AE energy.

Fig. 2 Definition of indicators for judgement of loosening.

に集計した値として定義される。この際のしきい値は、室内・原位置計測時共にAEが発生していない時のノイズ・レベルを参考にして設定した。

カウント・レートは、AEパラメータの中では特に、資源分野における既往の研究実績が豊富であり、岩石の破壊に際してカウント・レートが増加するという、ある程度普遍的な研究実績が数多く見受けられる。従って、筆者らは今回の緩み判定規準の検討に際しては、図2の模式図中に示すように、岩盤の破壊時のカウント・レートの増加度合いを定量的に表わすための“カウント・レート増加率”を式(1)によって定義し、検討に用いた。

$$\frac{C2 - C1}{C1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $C1$ 、 $C2$ は、それぞれ破壊前、破壊時のカウント・レートである。

3.2 AEエネルギー

AEエネルギーとは、図1に示すようにカウント・レートとして集計した個々のAE波形の最大振幅を2乗し、これらの単位時間（1分間、1時間）当たり平均した値として定義される。AEエネルギーは、地震工学分野で地震のマグニチュードの推定にも利用されているように、破壊の規模・エネルギーをより定量的に表わす指標として適していると考え、今回の検討に用いた。

また、AEエネルギーは、鋼材を用いた構造物・部材を対象とした完成後の健全性評価分野での実績があり³⁾、これらの構造物・部材の破壊時にAEエネルギーが急増することに着目した具体的な規準値の設定事例もある。従って、筆者らはこれらの事例も参考にして、今回の緩み判定規準の検討に際して、前述のカウント・レートの場合と同様の考え方に基づいて、図2の模式図中に示すような、岩盤の破壊時のAEエネルギーの増加度合いを表わす“AEエネルギー増加率”を式(2)によって定義し、検討に用いた。

$$\frac{E2 - E1}{E1} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $E1$ 、 $E2$ は、それぞれ破壊前、破壊時のAEエネルギーである。

3.3 m値

m値は、本来石本と飯田⁴⁾によって示された地震動の最大振幅とその発生頻度分布の関係を表わす式(8)中の指数である。

$$n(A) dA = KA^{-m} dA \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $n(A)$ は最大振幅 A から $A + dA$ までの地震の発生度数、 K は定数である。 m 値の低下と破壊の関係については、これまでも炭鉱での山ハネ予知の手段としての適用例⁵⁾があり、これらの実績を勘案した上で、今回の緩み検知に関する検討に用いることにした。

m 値を算出する方法としては、最小二乗法と最尤法が一般的に知られているが、後者の最尤法を用いて算出した m 値は、試験材料の構造の不均質性との対応が良いとの既往の研究実績が有る⁶⁾。従って、今回の検討では、以下に示す宇津⁷⁾が導いた最尤法に基づく m 値の算出式を用いた。

$$m = 1 + \frac{n \cdot \log e}{\sum n_i \cdot \log A_i - n \cdot \log A_m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 n は 1 つの m 値算出に用いる A E の総数、 $\sum n_i \cdot \log A_i$ は、1 つの m 値を算出する対象としたすべての A E の振幅の対数の総和、 A_m は、これらの算出対象となる A E のうちの最小振幅値、 e は自然対数の底で、 $\log$ は常用対数を示す。また、上述の n が m 値の算出ごとに大幅に異なると、 m 値の相互評価ができなくなるため、本検討では常に 50～100 個の A E データを用いて 1 つの m 値を算出した。

また、緩み検知のための m 値の規準値に関する検討に際しては、図 2 の模式図中に示すように、岩盤の破壊時の m 値の低下度合いを表わす“ m 値低下率”を式(5)によって定義し、検討に用いた。

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 m_1 、 m_2 は、それぞれ破壊前、破壊時の m 値である。

4. 検 討 結 果

本章では、緩み発生・進展時における上述の 3 つの A E パラメータの変化状況を岩盤中のクラックの分布状況に着目して整理、評価した結果について述べる。検討に際しては、ボーリング孔中の A E センサの埋設地点のクラックの分布状況を把握することが必要と考えられる。しかし、ポアホール・テレビ観察等によって、その都度、A E センサの埋設位置のクラック分布状況を調査することは、費用や手間の点で実用的ではないと考えられる。従って、筆者らは、クラックの分布状況との対応が良好な物理特性について検討した結果、既往の実績が豊富であり、かつ A E 計測装置を利用した原位置計測によって算出することが可能な弾性波速度、特に P 波速度が原位置岩盤のクラック分布状況の代用特性として望ましいと判断し、室内・原位置での A E 計測時にセンサの設置地点近傍の岩石・岩盤の弾性波速度測定を行った。

4.1 新規クラックが発生・進展する場合（岩石試験）

Fig. 3 An example of AE measurement by triaxial test.

室内岩石試験は、剛性三軸圧縮試験装置を用いて実施し、側圧は別途実施された原位置での初期地圧測定結果を参考に $\sigma_3 = 5$ MPa と $\sigma_3 = 10$ MPa の 2 通りとした。なお、A E センサの計測周波数帯域は、予備試験結果を参考に A E の発生が最も多い帯域の 0.2～1.0 MHz とした。また、剛性三軸圧縮試験用コアを用いて超音波速度測定を実施した結果、平均的な弾性波速度値は、4.6 km/sec であった。

図 3 は、A E 計測結果の一例であり、破壊直前に A E が急激に発生し、これに伴ってカウント・レートおよび A E エネルギーの急増ならびに m 値の低下が認められ、他の供試体についても同様の結果が得られている。表 1 は、破壊前および破壊時の A E 発生状況を整理・比較したものである。これらより $\sigma_3 = 5$ MPa と $\sigma_3 = 10$ MPa のいずれの場合も各々の A E パラメータの変化傾向は、ほぼ同様であることが分かる。ただし、側圧が小さい方がどのパラメータについても変化率が小さい傾向が見られ、緩み域の発生・進展時の A E パラメータの変動状況と地圧条件との間に関連があると予想される。

4.2 既存クラックが開口・進展する場合（岩盤試験）

本節では、3 つの A E パラメータと既存クラックの開口・進展との関連について検討するため、既存クラックの少ない岩盤と多い岩盤の 2 地点での原位置岩盤せん断試験時の A E 計測結果を検討対象とした。原位置岩盤せん断試験は岩石試験のコアを採取した坑道で実施し、岩盤試験の破壊時鉛直応力 σ_n は、約 5 MPa であった。計測に際しては、図 4 に示すように、載荷点から約 70 cm

Table 1 Results of AE measurement by triaxial test.

Confining Pressure (MPa)	No.	Count rate (count/min)			AE energy (m volt ²)			m-value		
		Pre-failure	Failure	Increase ratio	Pre-failure	Failure	Increase ratio	Pre-failure	Failure	Decrease ratio
5	1	4	1,088	271	17.8	23.6	27	2.74	2.14	0.22
	2	3	1,363	453	22.4	25.9	16	2.24	2.01	0.10
	3	3	201	66	19.7	28.4	44	2.36	1.96	0.17
	mean	3	880	292	20.0	25.6	28	2.45	2.04	0.16
10	4	2	2,233	1,120	16.8	25.3	51	2.61	2.08	0.20
	5	2	775	386	17.8	30.2	70	2.93	1.91	0.35
	6	2	2,739	1,370	20.0	25.9	30	2.69	2.05	0.24
	mean	2	1,920	959	18.2	27.1	49	2.74	2.01	0.26

Fig. 4 Schematic view of AE measurement by in situ shear test.

Fig. 5 Examples of AE measurement by in situ shear test.

Table 2 Results of AE measurement by in situ shear test.

Type	P-Wave velocity (km/sec)	Count rate (count/min)			AE energy (m volt ²)			m-value		
		Pre-failure	Failure	Increase ratio	Pre-failure	Failure	Increase ratio	Pre-failure	Failure	Decrease ratio
Intact	4.00	5	150	29	1,250	8,000	5.4	2.74	2.18	0.20
Heavily jointed	2.60	30	600	19	1,500	6,500	3.3	2.45	2.10	0.14

離れた地点でA E計測を行い、計測した周波数帯域は、岩石試験同様0.2～1.0 MHzとしたが、0.2～0.5 MHzの周波数成分を持つA Eが最も多く観測された。

また、岩盤試験実施前に、発、受振用の2個の圧電素子型加速度計（共振周波数10 kHz）を直接岩盤に石膏で固定し、試験用岩盤の弾性波速度を測定した。その結果、既存クラックの少ない岩盤では、4.0 km/sec、クラックの多い岩盤では、3.3 km/secという結果が得られた。

図5中には、既存クラックの少ない場合と、既存クラックの多い場合のA E計測結果を併せて示した。いずれの場合も、図3の岩石試験時のA E計測結果と同様なA Eパラメータの変化がみられるが、その状況は岩石試験時と異なる。すなわち、岩石試験時のA E計測結果に比べて、岩盤せん断試験時には破壊前からA Eが漸増的に発生し、破壊時のカウント・レートおよびA Eエネルギーの増加率、ならびにm値低下率は小さい。また、この傾向は表2に整理した破壊に伴う3つのA Eパラメータの変化からも既存クラックが多いほど、より顕著であることが分かる。

以上のように、岩石試験時および原位置岩盤試験時のA E計測結果の対比から、3つのA Eパラメータと緩みの発生機構との関連について調べた。その結果、岩盤には既存クラックが存在するため、クラックのない岩石コアの破壊よりも、かなり前からA Eが発生し、これに伴ってA Eパラメータに変化が生じるが、破壊に至るまでの間の3つのA Eパラメータの変動量は小さいこと、および岩盤中のクラックが多いほど、この傾向が著しいことが確かめられた。

4.3 実際の空洞における緩みの発生・進展

岩石試験および岩盤試験の結果に基づき、トンネル掘削時にA E計測を実施し、実際の空洞掘削に伴う緩み域の形成と3つのA Eパラメータの変動状況との関係を検討した。なお、トンネル掘

削地点は、岩盤試験の実施地点と同一サイト内の坑道であり、流紋岩から構成されている。検討に用いたデータは、図6および表3に示すように、クラックの少ない・多い2地点におけるトンネル天端から、50 cm、150 cmの位置にあらかじめ埋設したA Eセンサの経時計測結果であり、両地点のクラック分布状況も合わせて表中に示した。なお、クラックの多い地点のトンネル天端から150 cm地点については、ボーリング・コア観察結果より幅20 cm程度の破碎帯の存在が確認できたため、トンネル掘削前からすでに、緩み発生に近い状態に至っていたと判断される。

計測した周波数帯域は、岩石・岩盤試験同様、0.2～1.0 MHzとしたが、0.2～0.5 MHzの周波数成分を持つA Eが最も多く、0.5 MHz以上の周波数成分はほとんど観測されなかった。検討対象とした4地点は、A Eの経時計測の結果からいずれもカウント・レートおよびA Eエネルギーの増加現象ならびにm値の低下現象が認められたこと、ならびにA E計測地点で併行して実施された岩盤変位計測とトンネル掘削後の弾性波速度測定の結果を総合的に判断して、トンネル掘削に伴って緩んだ領域の岩盤と見なした。

なお、A E計測データ中にはトンネル掘削に伴う発破・ロックボルト削孔およびズリ出し作業の振動が計測結果に混入していることが考えられる。従って、筆者らが別途検討中⁸⁾のカウント・レート、最小二乗法によって算出したm値のパラッキおよびA Eの周波数分布の3つの指標の組み合わせによるノイズ除去手法を適用して、これらの坑内作業時の計測データを解析時に除外した。

図7および表3は、切羽進行に伴う2地点での緩み発生前後のA E計測結果を示したものである。実際の空洞周辺岩盤では、新規クラックの発生・進展と既存クラックの開口・進展が混在した状態で緩みが生ずると予測される。従って、明確な結論は出し難いが、室内岩石試験結果と原位置岩盤試験結果との対比、ならび

Fig. 6 Schematic view of AE measurement during tunnel excavation.

Fig. 7 Examples of AE measurement during tunnel excavation.

Table 3 Results of AE measurement during tunnel excavation.

Type	P-Wave velocity (km/sec)	Distance from vault (m)	Count rate (count/hour)			AE energy (m volt ²)			m-value		
			Pre-failure	Failure	Increase ratio	Pre-failure	Failure	Increase ratio	Pre-failure	Failure	Decrease ratio
Intact	4.3	0.5	1	120	119	0.1	1.0	9.0	2.85	1.95	0.32
	4.3	1.5	1	150	149	0.1	0.9	8.0	2.93	2.00	0.32
Heavily jointed	3.3	0.5	1	80	79	1.5	6.0	3.0	2.56	1.95	0.24
	1.4	1.5	8	200	24	2,000	10,000	4.0	2.00	1.60	0.20

に岩盤試験においてみられたような、緩み発生に伴う3つのAEパラメータの変化状況が岩盤中の既存クラックの分布状況と関連が有ることが分かる。すなわち、実際の空洞周辺岩盤で緩みが発生・進展する際に、既存クラックが少なく、新規クラックの発生・進展が主体になる場合は、カウント・レート、AEエネルギーおよびm値の変化率が大きい。これに対し、既存クラックの開口・進展が主体となる場合は、破壊時にこれら3つのAEパラメータはあまり変化しない。

以上の結果に基づき、岩盤中の既存クラックの分布状況を表わす弾性波速度値と破壊に至るまでの3つのAEパラメータの変動

状況との関係を整理したものが図8である。これらのデータは、空洞壁面から150cm程度までの岩盤の緩み域で発生する0.2~1.0 MHzという周波数帯域のAEを対象としたものであるが、緩み発生前からのカウント・レートおよびAEエネルギーの増加率ならびにm値低下率は、岩盤中のクラックが多いほど小さい傾向がみられる。ただし、他サイトについては岩種や地圧条件が異なるために、図8のようなAEパラメータの規準値を設定するための検討を別途行う必要がある。そして、実際にAEパラメータの規準値を設定して、緩み発生・進展の監視を行う際には、図8に示すように岩盤中の既存クラックの多少によって岩盤の破壊時の変化

Fig. 8 Relationship between P-wave velocity and AE parameters.

率が異なるため、原位置計測に先立って室内岩石試験時にA E計測を行うことにより、それぞれのA Eパラメータごとに変化率を把握しておくと共に、A Eセンサ埋設地点の弾性波(P波)速度を事前に計測して既存クラックの分布状況を把握することが有効と考えられる。

5. お わ り に

本報文では、室内岩石試験および原位置岩盤試験ならびにトンネル掘削時のA E計測結果から、カウント・レート、A Eエネルギーおよびm値という3つのA Eパラメータの変動状況と、緩み発生との関連について総合的な検討を行った結果、以下のことが分かった。

① 緩み発生の検知に有用なA Eパラメータの変動現象は、緩みの発生機構の違いと密接な関連がみられる。すなわち、既存クラックが多く存在し、クラックの開口・進展が主体となる場合、緩みに伴うA Eパラメータの変動量は、既存クラックが少ない場合に比べて小さくなる。

② A Eセンサを埋設する岩盤における既存クラックの分布状況は、弾性波速度を用いてより定量的に評価できるので、原位置A E計測に先立って室内岩石試験時のA E計測と、室内・原位置での弾性波速度測定を行うことによって、原位置岩盤の緩み発生を予測するために上述の3つのA Eパラメータの規準値を設定できる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) Aoki, K., Toida, M. & Koshizuka, K.: In situ investigation of loosened zone around deep underground openings by acoustic emission monitoring technique. Proceedings of ISRM-SPE International Symposium, Rock at Great Depth, 313~319, (1989)
- 2) Aoki, K., Toida, M. & Koshizuka, K.: The behaviour of the loosened zone around rock caverns monitored by acoustic emission. Proceedings of ISRM International Symposium, Dynamic and Static Considerations, 23~28, (1990)
- 3) (社)日本非破壊検査協会: 高張力鋼を用いた球形タンクのアコースティック・エミッション試験方法と試験結果の等級分類方法, NDIS 2412-80, (1980)
- 4) Ishimoto, M. & Iida, K.: Observation sur les seismes enregistres par le microsismographe construit dernièrement(a), BERI, Vol.17, 443~478, (1939)
- 5) 磯部俊郎ほか: 山鳴り予知の基礎的研究, 日本鉱業会昭和56年度春季研究業績発表講演会講演要旨集, 47~48, (1981)
- 6) Mogi, K.: Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena, BERI Vol.40, 125~173, (1962)
- 7) Utsu, T.: A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups, Journal of Physics of the Earth, 14 [No.2], 37~40, (1966)
- 8) 戸井田 克・腰塚憲一・青木謙治: 空洞掘削時の微小破壊音(A E)モニタリングにおけるノイズ除去方法について, 土木学会第45回年次学術講演会講演予稿集, 1090~1091, (1990)
- 9) 青木謙治・戸井田 克・腰塚憲一: A E計測による岩盤空洞掘削時の安定性監視技術について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 133~138, (1990)