

(39) A E 計測による岩盤空洞周辺のゆるみ域の評価

鹿島技術研究所 稲葉 武史
鹿島技術研究所 ○志水 俊仁
鹿島技術研究所 正会員 戸井田 克
鹿島技術研究所 正会員 青木 謙治

Monitoring of Loosened Zone around Rock Caverns by Measuring Acoustic Emission

Takeshi INABA, KAJIMA Technical Research Institute
Toshihito SHIMIZU, KAJIMA Technical Research Institute
Masaru TOIDA, KAJIMA Technical Research Institute
Kenji AOKI, KAJIMA Technical Research Institute

Abstract

Crude oil storage in large rock cavern is in progress in Japan today, and other plans are under way for underground storage of LPG, natural gas and compressed air. Construction of these rock caverns normally involves simultaneous excavation of multiple large caverns, so it is quite important to monitor the changes in the mechanical stability of the rock around the caverns during and after construction. Since the loosened zone around rock caverns which have resulted from the excavation of the caverns plays an important role on the stability of caverns, the distribution of loosened zone must be accurately monitored and the results should be reflected in the countermeasures to prevent the excessive propagation of the loosened zone.

The authors have carried out the laboratory and in situ experiment to investigate the failure mechanism of the rock around the caverns by monitoring AE (acoustic emission). The obtained results are as follows:

- (1) In the measurements by triaxial compression tests in laboratory, the m -value decreases with increase of loads and maintains the minimum value after failure.
- (2) Through the measurements during the construction of caverns, loosened zone detected by m -value propagates gradually from the walls of caverns to deep area.

1. はじめに

古くから多様な目的のために地下空間が利用されてきたが、最近では、社会的な要請に加え、技術の発達も伴い、従来のトンネル等に比べ非常に大規模な地下構造物が建設されている。通常、地下に新たに空洞を掘削すると応力の再配分などにより空洞の周辺岩盤にゆるみと呼ばれる領域が形成される。このゆるみは岩盤の本来の強度を失った状態にあると考えられるため、空洞の掘削中あるいは掘削後の安定性を確保するためには、周辺岩盤のゆるみ状況を正確に把握し、ゆるみが過大に進行しないよう対策を講じる必要がある。従来のゆるみの検知手法としては、岩盤の変位や弾性波速度の計測等が挙げられるが、これらの手法でゆるみの長期監視を行うと多大な費用や時間がかかるため、より簡便なゆるみ検知手法の開発が望まれている。そこで筆者らは岩石の変形・破壊に伴い発生する A E に注目し、これまでに室内・原位置試験及びトンネル掘削時の計測を実施し、A E パラメータの 1 つである m 値（発生する A E の振幅と発生頻度の比）が岩盤中のゆるみの発生・進展の検知に有用であるとの見通しを得た¹⁾。

今回は、これまでの検討結果に基づき、AE計測によるゆるみ評価の原位置への適用事例として、岩盤空洞掘削時の終時計測結果について検討した。この検討では、まず岩盤空洞地点を構成する岩石試料について室内試験を行い、AEの発生状況について評価し、この結果を基に原位置計測を行いゆるみ状況の評価を行った。

2. m値によるゆるみ評価

通常の物体の破壊は、応力集中による微小亀裂の発生→亀裂の成長・進展→亀裂の集中による破壊に大別できるであろう。その結果、これらの段階に応じて生じるAEの発生状況は異なり、AEの発生頻度あるいは卓越周波数や振幅などのAEパラメータに差が生じる。このAEの特徴を利用した既往実績は多く、従来から多くの分野で用いられている。

今回、筆者らがゆるみの評価に用いたAEパラメータの1つであるm値は、石本と飯田によって提案された地震動の最大振幅と発生頻度分布の関係を表すために用いた(1)式中の指数である²⁾。

$$n(A) dA = k A^{-m} dA \quad (1)$$

ここで、A：地震波の最大振幅

$n(A)$ ：A～A+dAに対応する発生頻度

k：定数

岩石試験片を用いた研究において、岩石の破壊時にm値が低下・反転するという既往実績は多い^{3) 4)}。また、礫部らは炭鉱での山鳴り予知の手段としてm値の解析を行い、大規模山鳴り時にm値が低下することを確認したこと⁵⁾などから、空洞掘削時に形成されるゆるみの評価手法としてm値を用いることは有効であると考えられる。m値によるゆるみの判定基準については、図-1の模式図に示すように、破壊前の比較的高いm値が低下・反転した時をゆるみと評価して検討を行った。

なお、m値の算出方法としては、宇津によって示された算出式を用いた⁶⁾。

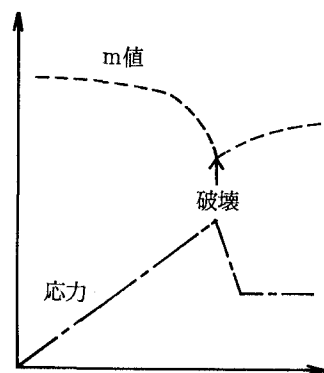


図-1 m値のゆるみの評価

$$m = 1 + \frac{n \cdot \log(e)}{\sum \{n_i \cdot \log(A_i)\} - n \cdot \log(A_m)} \quad (2)$$

ここで、n：1つのm値算出に用いるAEの総数

$\sum n_i \cdot \log A_i$ ：1つのm値を算出する対象とした全てのAEの振幅の対数の総和

A_m ：算出対象となるAEのうちの最小振幅値

e：自然対数の底、log：常用対数

3. 大規模空洞掘削時のA E計測結果

①室内3軸圧縮試験結果

岩盤空洞地点より得られた花崗閃緑岩を用いて室内3軸圧縮試験を実施した。加えた封圧は原位置で計測された初期地圧計測結果を参考に $\sigma_3 = 6\text{MPa}$ と $\sigma_3 = 12\text{MPa}$ の2通りとした。また、計測の対象としたA Eの周波数帯域は、これまでの予備試験結果より0.2~1.0 MHzとした。

図-2に室内試験結果の一例を示すが、負荷開始直後よりA Eが発生し、破壊直前で急増した。m値は、破壊前はばらつきはあるが高い値を示しており、荷重の増加に伴って低下する傾向が見られ、破壊時以降はほぼ一定の値を示した。表-1に室内試験のまとめとして破壊前、破壊後のm値を整理したが、破壊後のm値が封圧 $\sigma_3 = 6\text{MPa}$ 、 12MPa のいずれの場合においても約2.2を示したことから、この値が対象とする地点の岩石（花崗閃緑岩）が破壊したときに示すm値とし、以下に検討する原位置でのA E計測においては、A Eが頻繁に発生し、そのA Eのm値が約2.2以下でほぼ一定になった時点でゆるみと判定した。

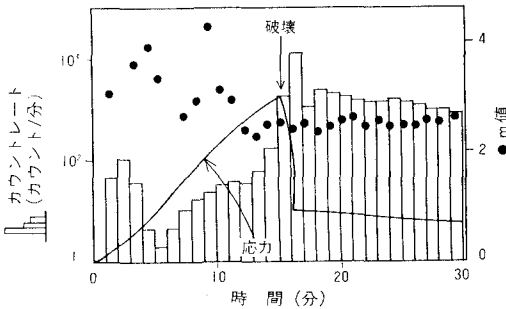


図-2 室内3軸圧縮試験時のA E計測結果

表-1 室内試験のまとめ

封 圧 (MPa)	No.	m 値	
		破 壊 前 (最大)	破 壊 後
6	1	3.9	2.2
	2	4.7	2.3
	3	4.3	2.2
	平 均	4.3	2.2
	4	4.8	2.2
12	5	3.9	2.2
	6	4.9	2.2
	平 均	4.5	2.2

②原位置A E計測状況

A E計測が実施された箇所は岩盤空洞建設地点であり、主に花崗閃緑岩から構成されており、被りは約150mである。A Eセンサーは図-3示すように空洞上部のトンネルから掘削された3本のボーリング孔中にそれぞれ4個、計12個埋設されており、空洞周辺岩盤から放出されたA Eを検知することができる。なお、計測の対象としたA Eの周波数帯域はこれまでの原位置計測と同様0.1~1.0 MHzとした。また、ボーリングコアの観察結果によると、埋設地点の岩盤は比較的亀裂が少なく堅硬であった。また、この空洞の掘削順序は、図-3中に示した丸数字の通りに実施した。

図-4は①及び②部分の掘削時に計測された測点A-IでのA E計測結果である。①掘削時にはカウントレートの急増、m値の低下は認められなかったが、②掘削時に掘削の進行と共にm値が低下する傾向が見られた。室内試験で荷

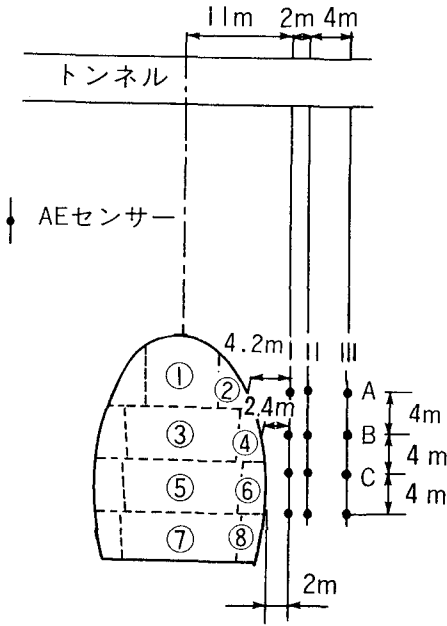


図-3 岩盤空洞における計測概念図

重の増加と共にm値が低下する結果が得られていることから、②掘削時点で測点A-I付近まで空洞掘削の影響によりゆるみが進行しつつあると考えられた。図-5は③掘削時の測点A-I、A-IIでの計測結果であるが、両測点共カウントレートはほとんど変化していないが、m値は測点A-Iですでにゆるみの基準値とした値(約2.2)で一定であった。これより、③掘削時にはすでに測点A-I付近までゆるみが進行していると考えられた。また、測点A-IIではm値はゆるみの基準値には達していないものの、掘削の進行に伴い低下する傾向が見られ、この段階で測点A-II付近までゆるみが進行しつつあると考えられた。図-6は④掘削時の測点A-I、A-II、A-IIIでの計測結果であるが、③掘削時にすでにゆるみに達したと考えられた測点A-Iではm値はゆるみの基準値で一定であった。また、測点A-IIでは切羽がAE計測地点を通過する前後でカウントレートが急激に増加し、それに伴いm値が低下しゆるみの基準値となったことから、④掘削時に測点A-II付近までゆるみが進行したと考えられる。また、測点A-IIIではm値のばらつきが大きいものの全体的にm値の低下が見られ、掘削の影響を受けゆるみが進行しつつあるものと推定された。他の計測点についても同様な結果が得られた。すなわち、当初m値は比較的高い値(約4.0)を示し、掘削の進行に伴い徐々に低下し、最終的に室内試験でゆるみの基準とした値(約2.2)で一定となった。図-7は今回のAE計測により評価したゆるみ状況を掘削ステップ毎にまとめたものであるが、掘削の進行に伴いゆる

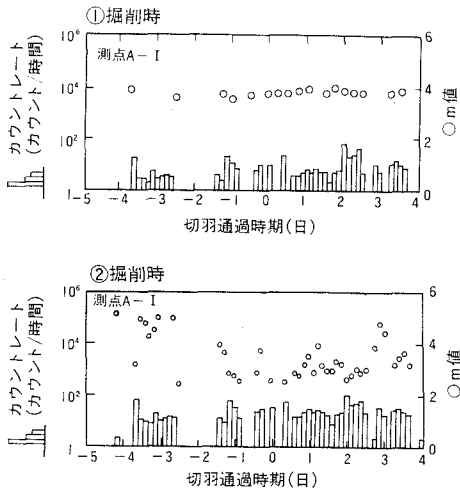


図-4 岩盤空洞掘削時のAE計測結果
(①, ②掘削時)

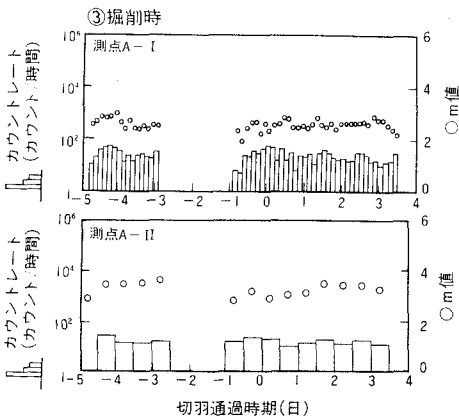


図-5 岩盤空洞掘削時のAE計測結果
(③掘削時)

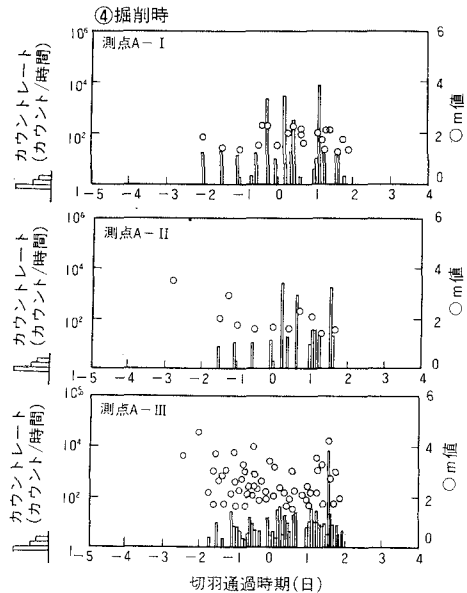


図-6 岩盤空洞掘削時のAE計測結果
(④掘削時)

みが空洞壁面から徐々に進行する様子が現れており、通常予想されるゆるみの進展状況と調和的であることから、A E計測によるゆるみの評価手法が有効であることがわかった。

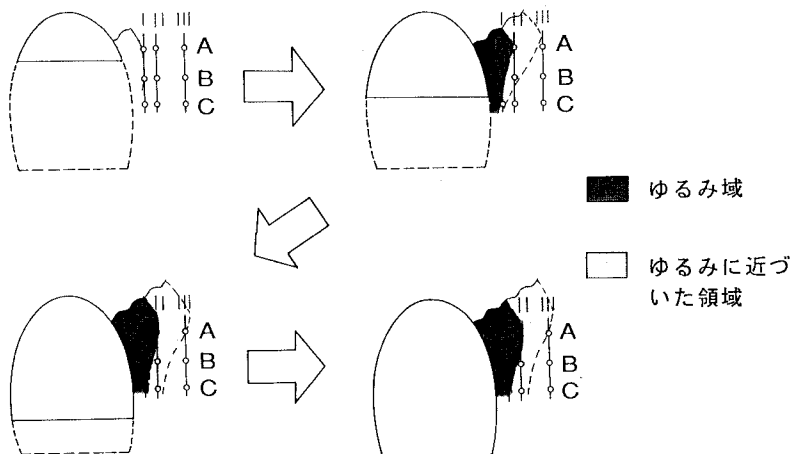


図-7 A E計測結果より推定されたゆるみ状況

4. おわりに

本報告ではA Eを用いたゆるみ評価手法の原位置への適用事例として、岩盤空洞掘削時のA E計測によるゆるみ評価を行った。その方法は、原位置より採取した試料を用いて室内3軸圧縮試験時のA E計測を行いゆるみの基準値を設定し、得られた基準値を用いて岩盤空洞掘削時のゆるみ評価を実施するものである。その結果、掘削の進行と共にゆるみが進行するという通常予想される結果が得られたことから、A E計測によるゆるみの評価手法が有効であると考えられた。

A E計測によるゆるみ評価手法は、A Eセンサーを一旦設置さえすれば、長期間、掘削の進行を中断することなくゆるみを監視することが可能な有効な手法である。今後、本手法の普及をはかるため、原位置において他のゆるみ評価手法との比較を含む実績の積み重ねが必要である。

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, pp.313~319, 1989.
- 2) Ishimoto, M. & Iida, k.; Observation sur les séismes enregistrés par le microsismographe construit dernièrement(a), BERI, vol. 17, pp. 443 ~478, 1939.
- 3) 山本清彦、楠瀬勤一郎、平澤朋郎；繰り返し軸応力下で岩石に発生する微小破壊のm値、地震2, 30, pp. 477~486, 1977.
- 4) 行竹英雄；封圧下における異方性岩石のA Eの発生様式、地震2, 35, pp. 223~235, 1982.
- 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年度春期研究業績発表講演会講演要旨集, pp. 47~48, 1981.
- 6) 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], pp. 37~40, 1966.