

大深度地下におけるAE法・DRA法を用いた初期地圧測定

Study on Estimating the Initial Stress at the Great Depth by AE and DRA methods

○畑 浩二*・松井裕哉**・佐藤稔紀**

Koji HATA, Hiroya MATSUI and Toshinori SATO

It is quite important to estimate the initial stresses for reasonable design and construction of underground rock cavern at great depth. AE (Acoustic Emission) and DRA (Deformation Rate Analysis) are measurement methods that be able to examine in the laboratory, and advantage of these methods is to measure a initial stress easily.

In this investigation, it was estimated that the vertical initial stress in rock cored from borehole with 1000m depth by AE method and DRA method. The purpose of this investigation is to examine applicability of AE and DRA method for the stress measurement at the great depth. The result can be summarized as follows, (1)AE and DRA method could be applicable for the vertical initial stress measurement at great depth, and (2)It was made clear that the relationship between the vertical initial stress (σ_v) and overburden (H) is $\sigma_v=0.027 \times H$ in Toki granite.

1.はじめに

近年、地中構造物の大型化・大深度化に伴い、それらのより合理的な設計・施工が望まれてきている。このような状況の中で、各種の地盤物性を施工前に把握することは極めて重要である。しかし、設計外力となる初期地圧に関しては、特殊な場合を除いて測定されないのが現状である。一般的には、鉛直方向初期地圧は土被り圧にはほぼ等しい傾向にあると考えられているため、土被りと岩石の単位体積重量から初期地圧を推定している。しかし、実際に初期地圧を測定してみると、土被り厚や地形などから推察される大きさや方向と異なる場合が少なくない。そのため、実際の地盤条件を考慮した合理的な地下構造物の設計・施工を実施するためには、対象となる場所の初期地圧を測定し、正しく評価することが必要である。初期地圧の測定方法は、原位置試験法と室内試験法の2つに大別される。原位置試験法の代表的なものには、応力解放法と水圧破砕法がある。一方、室内試験の代表的なものにはアコースティック・エミッション法 (Acoustic Emission、以下AE法と略す)^{1),2)}や変形率変化法 (Deformation Rate Analysis、以下DRA法と略す)³⁾がある。AE法やDRA法は原位置試験法に比較して、試料が採取できれば手軽に実施できる利点を有している。

本論文では、大深度地下の初期地圧測定法としてAE法やDRA法の適用性を検討することを目的に、地表から深度1000mまで掘削したボーリング孔から採取したコアを利用した鉛直方向の初期地圧測定を実施したので、その結果について述べる。

2.測定原理

2.1 AE法

AEとは、固体材料が外力を受けたことによって、マイクロクラックなどの微小破壊の発生に伴い内部に蓄えられたエネルギーの一部が音響パルスとなって伝播する現象である。地山の初期地圧は、主に岩盤の自重によって生じるが、これに地形、地質構造、プレートテクトニクス、地熱などの影響が加わった履歴応

* 正会員 (株)大林組 技術研究所

** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

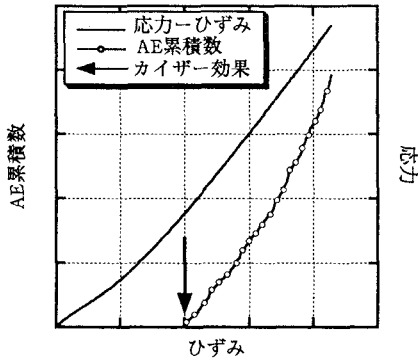


図-1 カイザー効果の概念

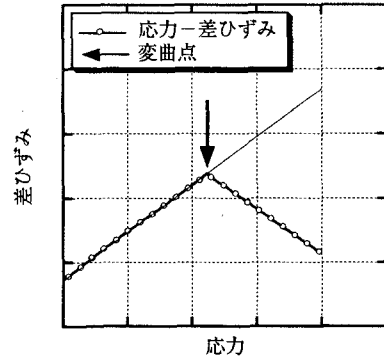


図-2 応力と差ひずみの関係の概念

力であると考えられる。Kaiser⁴⁾は金属材料を利用した一軸圧縮試験によって履歴荷重を受けた材料に載荷する際、先行荷重値を越えるまではほとんどAEが発生しないことを明らかにした。これがカイザー効果と称される現象である。カイザー効果を利用し初期地圧を測定するAE法は金川ら¹⁾によって提案され、その後、種々な基礎的検討⁵⁾²⁾が実施されている。カイザー効果の概念を図-1に示す。

2.2 DRA法

DRA法は山本ら³⁾によって提案された初期地圧測定法である。この方法は、岩石の一軸圧縮時の力学的挙動によって先行応力を測定する方法である。その原理は、岩石の応力-ひずみ関係の非線形性、すなわち先行応力を境にして岩石の変形率が変わることに着目したもので、以下の二つの仮定に基づいている。

- ①すでに生成されたクラックは低い応力から安定にすべり、応力に対してひずみは線形性を呈する。
- ②先行応力を越えた応力では、新たなすべり破壊が生ずるため差ひずみは非線形性を呈する。

具体的には、1回目の載荷によるひずみを $\varepsilon_1(\sigma)$ 、2回目を $\varepsilon_2(\sigma)$ とすると、(1)式で示される差ひずみ $\Delta\varepsilon(\sigma)$ は新たなクラックの生成開始応力で線形性を失うことになり、線形性を失った時の応力値を初期地圧と評価する。DRA法の原理の概念を図-2に示す。

$$\Delta\varepsilon(\sigma) = \varepsilon_2(\sigma) - \varepsilon_1(\sigma) \quad (1)$$

3. 測定装置

使用した測定装置は図-3に示すようにAE法とDRA法が併用できるシステムとなっている。AE法による計測では、トランスデューサで受信したAEをプリアンプで増幅し、ディスクリミネータで弁別した後、発生個数をカウンタで計数する。トランスデューサは共振周波数140kHzのPZT（ジルコン酸チタン酸鉛磁器振動子）であり、円柱供試体中央部に鋼製アタッチメントを介して接着する。トランスデューサの周波数応答特性を勘案し、100kHz～200kHzのバンドパスフィルタを用いた。AE信号の計数には、1つのAE信号波形を包絡線検波し計数するイベント計数法を用いた。AE計測では微小な弾性波動を取り扱う関係上、環境雑音の除去が極めて重要になる。本計測では、載荷板と供試体の接触部から発生する雑音を独立気泡を有したスポンジパッドを載荷板と供試体端面の間に挿入することにより除去している。一方、DRA法による計測については、載荷時におけるひずみの線形性と非線形性に着目することから、ひずみゲージを供試体側面の直交する4箇所に貼付し用いた。載荷重は5tロードセルを用いて計測した。

4. 測定方法および測定条件

岩石試料採取地点は岐阜県瑞浪市の正馬様洞用地内に位置する。表層から約90mは凝灰質砂岩やシルト岩などの堆積岩に覆われているが、それ以深は基盤岩である花崗岩が続いている。本研究で使用する試料は、

鉛直方向のボーリングコア（直径約6.3cm）である。このコアの軸方向から直径30mm、細長比1：2の円柱状に供試体を整形し、AE法およびDRA法による初期地圧測定に供した。

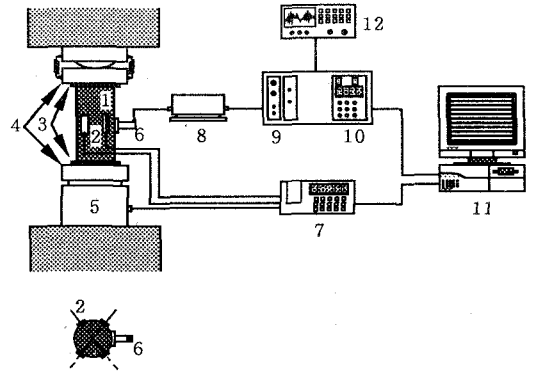
整形した供試体側面にひずみゲージを4箇所それぞれが対角の位置になるように、さらにトランスデューサを1個取り付け、荷重制御により5回の繰返し载荷を行い、荷重、ひずみおよび発生するAEを測定した。DRA法では差ひずみを求めることになるが、生じるひずみが微小であることから4枚のひずみゲージ出力の合算を载荷時のひずみ成分 $\epsilon(\sigma)$ とした。繰返し荷重値は採取コアの土被り圧の1.5～2倍程度とし、载荷速度は約5MPa/min.とした。図-4に载荷パターンを示す。

AE法では連続的なAEの発生し始めるポイントをカイザー効果と評価しているため、対象岩石に適したしきい値と感度の条件を決定しておくことが必要になる。そこで、深度99mと197mで採取した花崗岩を用いてしきい値と感度の組合せ条件を選定する予備試験^{6),7)}を行い、試験対象の花崗岩で測定上最適となるしきい値と感度を設定した。なお、カイザー効果には時間依存性^{2),5)}が認められていることから、岩石採取後は5日以内に試験を完了するものとした。

5. 測定結果とその評価

AE法による初期地圧測定結果の一例を図-5に示す。図は、深度504mの供試体を用いた結果であり、単調载荷時の応力-ひずみ-AE累積数の関係を示したものである。図中の点線で示すように、ある応力を境にして連続的なAEが発生することから明瞭にカイザー効果が確認できた。畑らの評価方法^{2),5)}によれば、この供試体の鉛直方向初期地圧は13.89MPaと評価される。

一方、DRA法による初期地圧測定結果の一例を図-6、7に示す。両図共に、AE法と同様深度504mの供試体を用いた結果であり、応力-差ひずみの関係を示したものである。5回の繰返し载荷において、差ひずみは10通り計算できる。その内、図-6は4回目と2回目の载荷時の差ひずみで、図-7は5回目と1回目の载荷時の差ひずみである。差ひずみ分布を最小二乗法で回帰し、図-2のように非線形性が明瞭になった場合（山本ら³⁾の評価方法）のみ点線で初期地圧を示した。図-6は初期地圧を評価できた例であり、図-7は評価できなかった例である。この供試体では、10通りの差



- | | |
|-------------|----------------|
| 1. 岩石供試体 | 7. ひずみ測定器 |
| 2. ひずみゲージ | 8. プリアンプ |
| 3. スポンジパッド | 9. ディスクリミネータ |
| 4. 载荷板 | 10. カウンタ |
| 5. ロードセル | 11. マイクロコンピュータ |
| 6. トランスジューサ | 12. オシロスコープ |

図-3 AE法とDRA法の併用計測システム

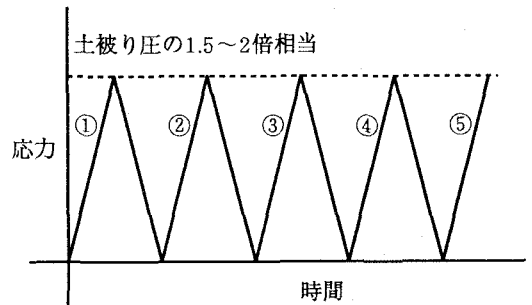


図-4 繰返し载荷パターン

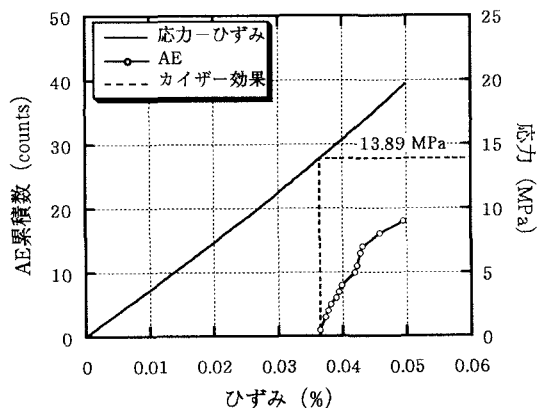


図-5 AE法による初期地圧測定結果の一例

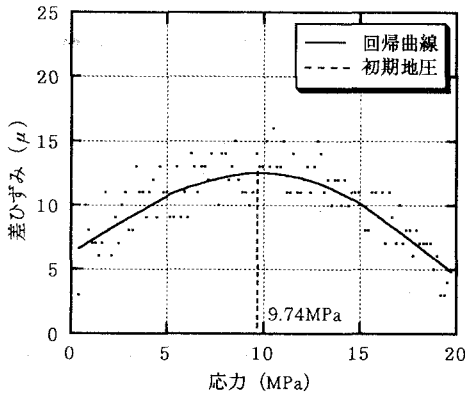


図-6 DRA法による初期地圧測定結果の一例

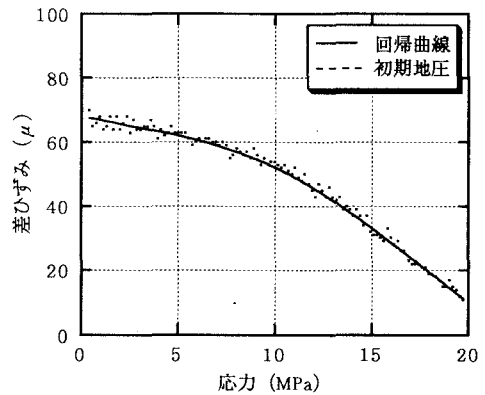


図-7 DRA法による初期地圧測定結果の一例

ひずみ計算の内、6通りの組合せから初期地圧を評価でき、8.83~11.25MPaの範囲にあると判断された。

試験は深度196m~990mまでの10深度について実施した。得られた測定結果を深度毎にまとめたものが表-1である。それぞれの深度における測定値は統計処理⁶⁾し、危険率5%で平均値と変動係数を示した。また、土被り圧を花崗岩の単位体積重量(25.6kN/m³)と採取深度から推定した。

AE法では、全ての試験体において明瞭なカイザー効果が確認され、初期地圧を評価することができた。測定値のバラツキは深度990mを除いて比較的小さくなった。10深度の内、590m、896mおよび990mの3深度では土被り圧の1/2~1/5と小さくなり、深度分布から大きくはずれる結果になった。これら深度以外では土被り圧にほぼ等しくなり、一般的に言われる傾向と矛盾しない結果を得た。

一方、DRA法では、10通りの差ひずみ計算の内、載荷1回目のデータを利用した場合では図-2のように上に凸型の曲線が得られずほとんど例外なく初期地圧は評価できなかった。さらに、他の組合せについても理想的な上に凸型の曲線が得られなかったり、差ひずみ分布にバラツキが多い特徴を呈した。組合せによっては初期地圧を評価できたが、「載荷何回目と何回目との応力-差ひずみから初期地圧を評価できる」という知見は得られず、評価できた初期地圧のバラツキもAE法に比べて大きかった。初期地圧の深度分布は深度674mまでは土被り圧と10~20%程度の違いであったが、深度799m以深では土被り圧の約1/2と小さくなった。本測定においては、多くの場合、初期地圧を評価可能な差ひずみ分布が得られなかったことや差ひずみ分布にバラツキが多かったことを勘案すると、評価された応力値は信頼性が高いとは言えない。

採取したコア全長の観察から、AE法で土被り圧より小さく評価された3深度前後には相対的にき裂が多く存在するとともに、き裂面の軟質化が確認されている。また、今回AE法、DRA法による測定を行うためコアを採取したボーリング孔から離間250mの地点にある深度1000mのボーリング孔を利用して水圧破碎法による初期地圧測定が行われた。この測定では、水平面内の応力分布の深度変化を把握することを目的に、

表-1 AE法とDRA法の結果比較

深度 (m)	供試 体数 (本)	AE法		DRA法		土被り圧* (MPa)
		平均値 (MPa)	変動係数 (%)	平均値 (MPa)	変動係数 (%)	
196	3	5.09	5.77	8.06	28.75	5.02
297	4	6.65	5.07	9.34	16.39	7.60
409	7	9.83	7.77	11.10	25.17	10.47
504	4	13.73	6.34	10.17	8.41	12.90
590	4	9.98	7.38	16.09	20.77	15.10
674	3	17.24	3.37	15.83	34.19	17.25
799	3	23.04	3.83	13.99	16.22	20.45
896	3	13.55	6.21	11.01	25.88	22.94
932	4	26.28	2.71	12.27	12.68	23.86
990	5	4.87	14.86	13.24	13.78	25.34

* 単位体積重量25.6kN/m³と深度から推定

地表から約50mピッチで20箇所の測定を実施し、AE法で得られた初期地圧の変化を呈する近傍で応力環境の不連続性や特異な応力値が確認されている⁹⁾。また、対象岩石を用いてカイザー効果の時間依存性を調べ、AE法から得られた応力値の信頼性を確認している¹⁰⁾。これらの知見から、AE法によって深度1000mまで鉛直方向の初期地圧を測定することが可能であると判断されるとともに、AE法で土被り圧より小さく評価された3深度近傍では、地殻変動等による局所的な応力変化があった可能性があると考えられる。

測定結果を採取深度との関係で整理したものが図-8である。図中、●印でAE法の結果を、◇印でDRA法の結果を示した。また、土被り圧を点線で示した。測定結果のバラツキが少ないことから、AE法の結果（深度590m、896m、990mを除外）を用いて、深度との相関性を直線回帰したところ、(2)式のような関係（実線部）を得た。式中 σ_v は鉛直方向の初期地圧成分を、Hは土被りを示す。

$$\sigma_v = 0.027 \times H \quad (2)$$

6. おわりに

AE法やDRA法が大深度地下の初期地圧測定法としての適用性について検討することを目的に、地表から深度1000mまで掘削したボーリング孔から採取したコア（10深度）を利用した鉛直方向の初期地圧測定を行った。その結果、AE法からは3深度で土被り圧の1/2~1/5と小さくなった以外はほぼ土被り圧相当の初期地圧を得られ、深度1000mまでの鉛直方向の初期地圧を同手法で計測できることを確認した。一方、DRA法では差ひずみ分布のバラツキが大きく、「载荷何回目と何回目との応力-差ひずみから初期地圧を評価できる」という知見は得られなかった。コアの全長観察、近接ボーリング孔における水圧破砕法による初期地圧測定結果等から、今回の測定においてはAE法による結果の方が信頼性が高いものと判断された。

参考文献

- 1) 金川 忠、林 正夫、仲佐博裕：岩石における初期地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み、土木学会論文報告集、第258号、pp.63、1977.
- 2) 畑 浩二：AEによる初期地圧計測の実例Ⅱ、一現場技術者のための— AE技術の応用、pp.388、1994.
- 3) 山本清彦、桑原保人、平澤朋郎：変形率変化を用いた先行応力の推定、地震学会講演予稿集、No.1、pp.245、1983.
- 4) J.Kaiser：Untersuchungen uber das auftreten gerauschen beim zugversuch, Archiv fur das Eisenhüttenwesen, Vol.24, pp.43, 1953.
- 5) 畑 浩二、道廣一利、吉岡尚也、杉原弘造：AE法を利用した初期地圧測定とその適用例、材料、特集岩石力学、第44巻、第502号、pp.885、1995
- 6) TM-2孔のコアを用いたAE法による初期応力測定、動力炉・核燃料開発事業団、PNC TJ7201 98-001、1998.
- 7) MIU-1孔のコアを用いた地圧計測、動力炉・核燃料開発事業団、JNC TJ7440 98-003、1998.
- 8) 日本材料学会、建設材料実験、pp.33、1978.
- 9) AN-1号孔及びMIU-1号孔における力学特性調査結果、核燃料サイクル開発機構、JNC TN7420 99-004、1999.
- 10) 土岐花崗岩を対象としたAE法のカイザー効果時間依存性の調査、核燃料サイクル開発機構、JNC TJ7420 99-012、1999.

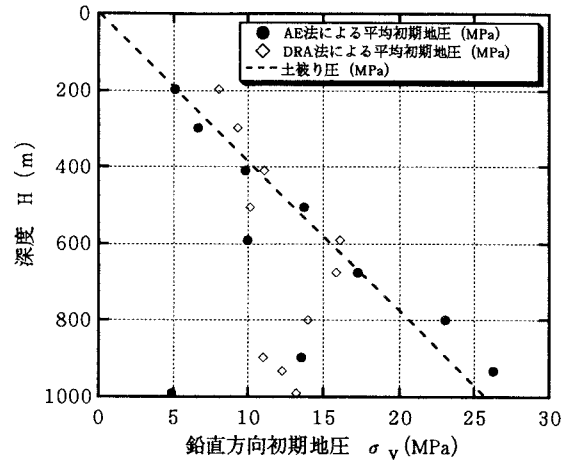


図-8 初期地圧測定結果の深度分布