

深部硬質堆積岩のコアを利用した AE 法, DR 法, DSCA 法による初期地圧評価

The initial rock stress appraisal with Acoustic Emission method, Deformation Rate method and Differential Strain Curve Analysis which utilize the core of the deep hard sedimentary rock

日比野悦久※ 南 将行※※ 原 雅人※※※ 小山俊博※※※ 新 孝一※※※※

Yoshihisa Hibino, Masayuki Minami, Masato Hara, Toshihiro Koyama and Koichi Shin

In this study, three core-based methods for rock stress measurement, namely Acoustic Emission(AE) method, Deformation Rate(DR) method and Differential Strain Curve Analysis(DSCA), have been selected up as the most probable options in the first stage of the site surveys, and applied to a hard sedimentary rock of 500m depth. Through the comparison of the results, the applicability of the three methods have been studied. For the very hard rock used in this study, DR method has been a little difficult because strain level is too small. Nonetheless, all the three methods gave the consistent result concerning the direction of the maximum stress, σ_1 .

Key Words: rock stress, hard sedimentary rock, acoustic emission method, deformation rate method, differential strain curve analysis

1. 概要

揚水発電所, 放射性廃棄物処分場等における地下施設の建設にあたっては, 地下空洞を合理的かつ安全に設計するために空洞掘削時の岩盤挙動を精度良く評価することが重要である。

空洞掘削時の岩盤挙動に影響を与える要素としては, 1.地質特性, 2.岩盤特性, 3.外力特性が挙げられるが, 外力特性として, 地山の初期地圧を把握することは不可欠である。

揚水発電所等の建設にあたっては, 従来は建設予定位置に調査坑を掘削し, 応力解放法等による原位置試験により初期地圧測定を行っている。ところが, 調査坑を掘削する以前の地点選定段階においては, 一般的に地表面から 200m 以深に計画される地下発電所建設予定箇所の正確な初期地圧の測定は困難である。

調査坑を設置せずに初期地圧を測定する技術の一つとして, 現在各研究機関等が中心となって進めているボーリングコアを利用する測定法がある。今回, 硬質堆積岩を対象に, コアを利用した初期地圧測定法のうち, AE (Acoustic Emission) 法, DR (Deformation Rate) 法, DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法による初期地圧測定¹⁾²⁾を実施するとともに, 各地圧測定法の適用性の確認を行った。

※ 正会員 東京電力(株)神流川水力建設所南相木工事事務所
※※ 正会員 東京電力(株)建設部土木・建築技術センター
※※※ 正会員 東電設計(株)第一土木本部地下環境技術部
※※※※ 正会員 工学博士(財)電力中央研究所我孫子研究所地圏環境部

2. 試験概要

2.1 岩盤および試料

試料採取箇所は、関東山地の北西部に位置する土
被り約 500mの地山深部に設置された調査坑内であ
り、秩父帯のジュラ紀オリストロームからなる地質
が分布する。調査坑内の地質は、砂岩、泥岩、チャ
ート、石灰岩、玄武岩質岩等である。平均的な一軸
圧縮強度は、150MPa 程度と非常に硬質な岩盤であ
る。

試験に用いた供試体の密度は $2.6 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ 、弾性波速度は $5.0 \sim 5.4 \text{ km/sec}$ で、AE・DR 法用供試体は砂岩優性混在岩を主体とし、方解石脈、石灰質脈を介在していた。DSCA 法用供試体は、泥岩優性混在岩部と砂岩優性混在岩部で、泥岩優性混在岩にて方解石脈、砂岩優性混在岩にて石灰質脈を介在していた（図-1 参照）。

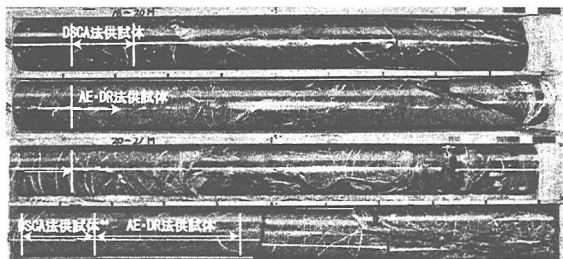


図-1 ボーリングコア写真

2.2 試験の概要

(1) 供試体の作製

①AE 法, DR 法

AE 法・DR 法は、一つの供試体から得られるデータは、1 方向の応力であるが、供試体作製方向の異なる供試体を組み合わせることにより、3 主応力の推定が可能である。供試体の寸法は、 $25 \times 25 \times 65 \text{ mm}$ とした。供試体の作製にあたっては、ボーリング孔軸方向を基準にした直交座標系を設定し、ボーリング孔軸方向を x 方向、 x 方向に直交する方向をそれぞれ y, z 方向とした。さらにそれぞれの平面内で軸に対し 45° の角度をなす方向を xy, yz, zx, yx 方向と呼ぶこととし、図-2 に示すとおり、計 7 方向より供試体を作製した。

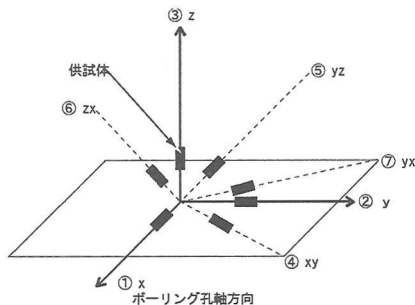


図-2 AE・DR法の供試体切り出し方向

②DSCA 法

DSCA 法は、一つの供試体から 3 主応力の推定が可能である。供試体の寸法は、40mm×40mm×40mm とし、試験に用いる供試体の作製方向は、図-3 に示すように、ボーリング孔軸方向を基準にした直交座標系を設定し、ボーリング孔軸方向を x 方向、 x 方向に直交する方向をそれぞれ y, z 方向とした。さらにそれぞれの平面内で軸に対し 45° の角度をなす方向を xy, yz, zx 方向と呼ぶこととした（図-3 参照）。

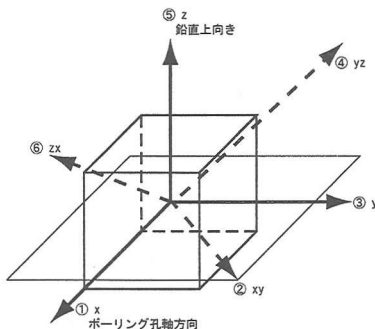


図-3 DSCA法の供試体切り出し方向

(2) 試験

① AE 法・DR 法

AE 法、DR 法は、ともに岩石試料により一軸圧縮試験機を用いた試験法であり、両試験法を同一供試体で実施しても、双方の結果には影響がなく、また結果のクロスチェックを行うことができるため、測定の精度・信頼性の向上が期待される。よって本試験では、同一供試体にて AE・DR 試験を併用して行うこととした。

供試体形状と測定システムの模式図を図-4 に示す。AE を測定するため、センサーを供試体側面の上下方向に直列に 3 個配置し、上下端面付近や載荷板から発生した音と、供試体中央部から発生した AE を区別できるようにした。なお、予備として、対面の中央部にセンサーを 1 個取り付けた。また、試料のひずみを測定するため、AE センサーが取り付けられていない 2 つの側面に、ひずみゲージを各面に並列に 2 枚ずつ接着した。

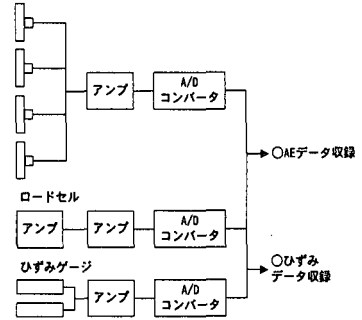
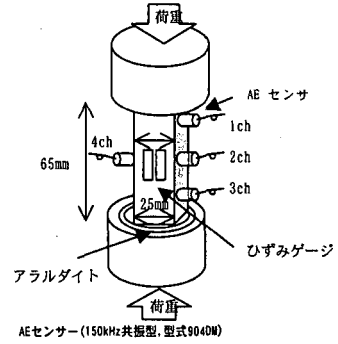


図-4 AE・DR 法測定システム模式図

② DSCA 法

DSCA 法の試験概要については、図-5 に示すとおり、供試体各面にひずみゲージを各面 3 枚、計 18 枚貼り、封圧時に油が供試体内部に浸透しないようシリコン樹脂で供試体全体をコーティングした。その後封圧荷荷を実施し、ひずみを測定し、動ひずみアンプ、AD 変換器を経由して、パソコンにデータを収録した。

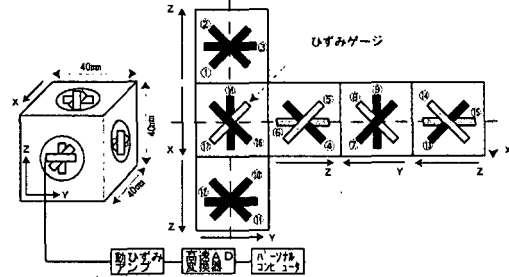


図-5 DSCA 法の測定システム模式図

3. 試験結果

3.1 AE・DR 法

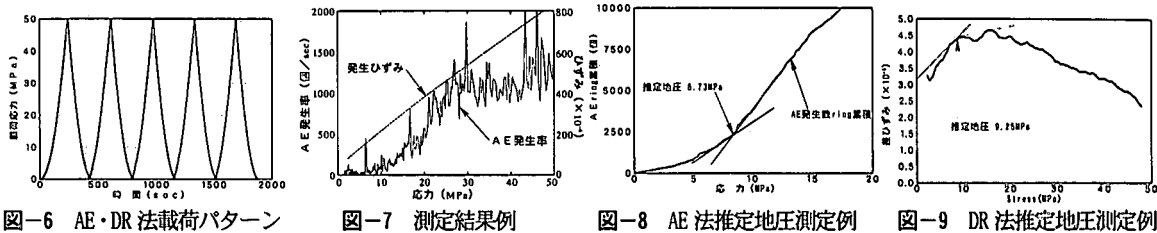
(1) 載荷方法および推定地圧決定方法

AE・DR 法による試験は、計 35 個 (7 方向×5 組) の供試体を用いて実施した。AE・DR 法における載荷方法は、一軸圧縮試験機を用いて載荷速度 0.1mm/min、最大荷重 50MPa として行った。AE・DR 法載荷パターンおよび AE 発生率および発生ひずみ測定例を図-6、7 に示す。

AE 法は、先行応力の範囲では、AE の発生が少ないというカイザー効果を利用するものである。推定地圧を求めるにあたっては、載荷に伴う AE を計測し、AE 発生数の経時変化を整理し、AE 発生数の急増点を目視により確認したうえで、急増点での載荷応力を初期地圧とした (図-8 矢印位置)。

DR 法は、先行応力の範囲で発生した岩石の微小な亀裂は応力に対して線形に挙動するがそれを超える荷重を受けると新たに亀裂が発生し、非線形な挙動が発生することを利用したものである。推定地圧を求めるにあたっては、応力-差ひずみ関係を求めた上で、載荷に伴う差ひずみの変化が増加傾向から、最初に維持

または減少傾向となった点（図-9 中、矢印位置）を目視により確認したうえで、その点での载荷応力を地圧とした。



(2) 試験結果

AE 法による载荷時の AE（リングダウン）累積数の測定結果は、図-10 に示すとおり、推定初期地圧について 6~11MPa の範囲内で確認された。一方 DR 法による载荷時の測定結果は図-11 に示すとおり、推定初期地圧について 7~20MPa の範囲内で確認された。AE・DR 法で得られたデータによる面内応力分布および測定結果を、図-12、13、および表-1 に示すが、zx 平面において、その他の平面と比較して傾向が大きく異なることが確認された。同一供試体にて試験を実施しているにも関わらず、AE 法と DR 法にて異なる傾向が確認されたことについては、本検討で用いた岩石供試体（弾性係数 10~60GPa）では、荷重の载荷に伴う発生ひずみが小さく、その結果、応力-差ひずみの関係を用いる DR 法では、正確な初期地圧が求めにくかった（現状のひずみ検出レベル：分解能 1/10 μ ストレイン程度）ことが影響しているものと考えられる。

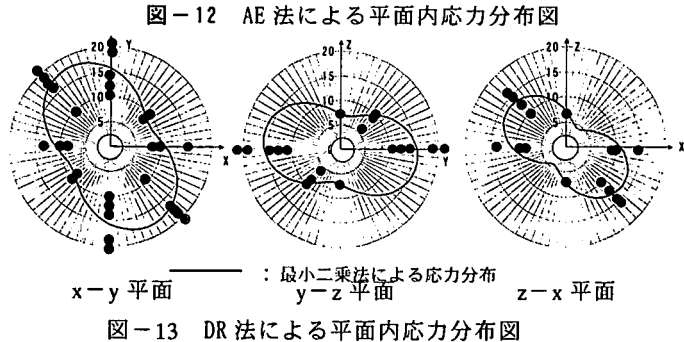
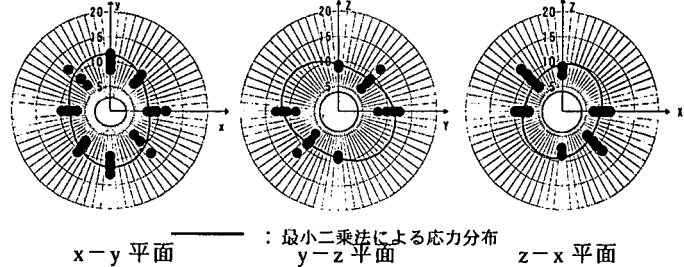
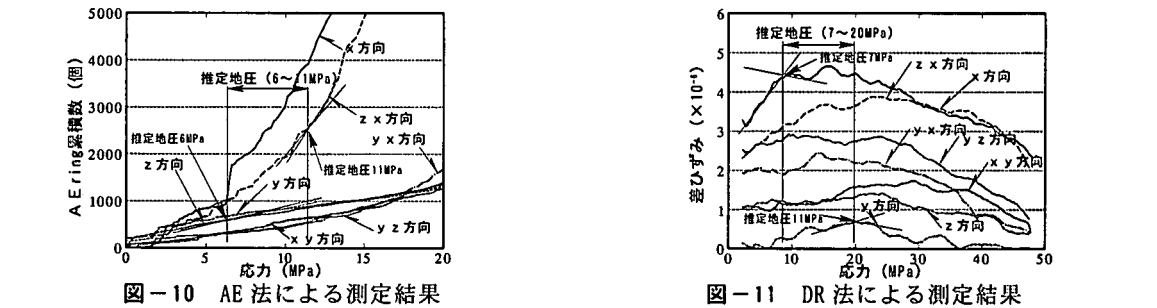


表-1 AE 法と DR 法による面内主応力

平面		$\sigma 1'$ (MPa)	$\sigma 2'$ (MPa)	θ ($^{\circ}$)
xy	AE 法	11.4	8.0	97.4
	DR 法	17.8	8.8	118.8
yz	AE 法	12.1	8.6	-27.7
	DR 法	16.0	6.8	-10.4
zx	AE 法	9.7	7.7	24.2
	DR 法	13.7	4.3	123.2

θ : それぞれ x から y 軸, y から z 軸, z から x 軸を正とする $\sigma 1'$ の角度

3.2 DSCA 法

(1) 載荷方法

DSCA 法による試験は、計 5 個の供試体を用いて実施した。DSCA 法試験における載荷方法は、手動ポンプにより加圧速度 2.5MPa/min で最大圧力 100MPa まで加圧し、その後加圧時と同じ速度で減圧し、供試体のひずみを測定した。載荷パターンを図-14 に示す。

(2) 試験結果

DSCA 法により得られた周圧とひずみの関係については、図-15 に示すとおりである。最大封圧下での発生ひずみは $500 \sim 1000 \times 10^{-6}$ 程度、ひずみと応力の比については $0.5 \sim 3 \times 10^{-5}$ 程度であった。応力解析により、主応力比および方向・傾斜を求めると表-2、図-16 に示すとおりとなる。主応力比については、 $1.00 : -0.32 \sim 0.66 : -2.43 \sim 0.30$ となり、泥岩優性混在岩を用いた供試体にて引張応力状態を示す結果となった。引張応力状態を示す結果となったことについては、供試体外観での変質等は確認されなかったことから、供試体採取前から既に存在する亀裂の影響を大きく受けていた可能性が考えられる。なお、最大主応力(σ_1)の方向については、各供試体とも、水平面内にて NW-SE 方向を示していたが、中間主応力(σ_2)、最小主応力(σ_3)の方向は、一定の傾向は確認されなかった。

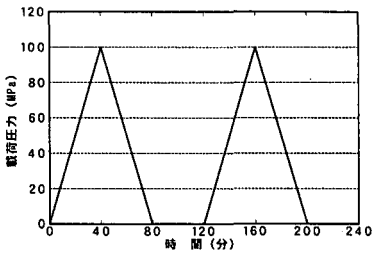


図-14 DSCA 法載荷パターン

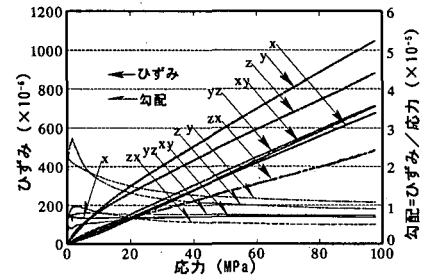


図-15 周圧-ひずみ線図

供試体 名称	主応力比			供試体 基質
	最大	中間	最小	
DS1	1.00	-0.32	-2.40	泥岩優 性混在 岩部
DS2	1.00	0.18	-0.24	砂岩優 性混在 岩部
DS3	1.00	-0.20	-2.43	砂岩優 性混在 岩部
DS4	1.00	0.49	0.27	砂岩優 性混在 岩部
DS5	1.00	0.66	0.30	砂岩優 性混在 岩部

表-2 主応力比

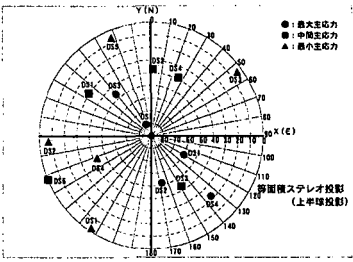


図-16 DSCA 法による主応力の方向

3.3 各試験法による主応力値

各試験結果より得られた主応力値を比較すると、図-17 に示すとおりである。ただし、DSCA 法では直接応力値を求めることができないことから、応力成分比と土被り圧にて応力値を算出した。

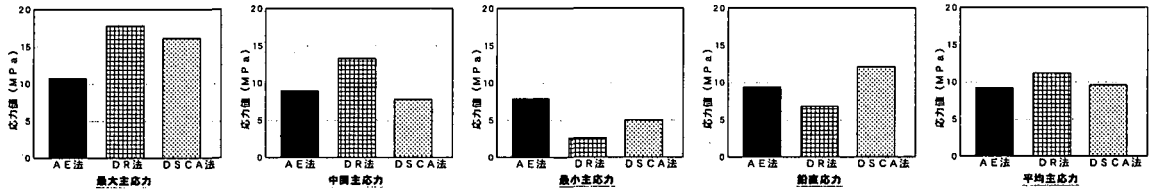


図-17 各試験法による主応力値

最大主応力については、AE 法と DR 法の間で最大 7 MPa の相違が認められた。また、鉛直応力については、DR 法では 7 MPa であり、土被り圧 (12MPa) に対して約 60% の測定値となった。一方、平均主応力については、AE 法、DR 法、DSCA 法それぞれの測定法にて概ね同程度の結果が得られた。

なお、同一供試体を使用した AE 法と DR 法の間には、明確な相関は認められなかった。

3.4 各試験法による主応力の方向

各試験法で得られた主応力の方向を比較すると、図-18 に示すとおりである。

図中、○印は最大主応力を示し、□は中間主応力を、△は最小主応力を示す。

最大主応力の方向は、各測定法とも概ね水平面内でNW-SE方向を示した。

最小主応力については、AE・DSCA 法にて $S70 \sim 80^{\circ} W$ 、北落ち傾斜を示したのに対し、DR 法にて $S20 \sim 40^{\circ} W$ 、南落ち傾斜を示した。

以上より、大規模地下空洞等の地点選定ならびに施設レイアウトの検討段階で重要となる最大主応力の方向は、各測定手法にて測定が可能であることが明らかとなった。

ただし、本検討で用いた供試体のように発生ひずみが小さい場合には DR 法より、AE 法や DSCA 法の適用性が高いものと考えられた。

4. まとめ

以上より、本測定結果から得られた結果は、次のとおりである。

- ① 大規模地下空洞等の地点選定ならびに施設レイアウトの検討段階で重要な要素となる最大主応力の方向については、AE 法、DR 法、DSCA 法それぞれの測定結果で、概ね同方向が測定された。
- ② 3 主応力の平均値である平均垂直応力については、AE 法、DR 法、DSCA 法それぞれの測定手法にて概ね同程度の結果が得られた。
- ③ 本検討で用いた岩石供試体（弾性係数 $10 \sim 60 GPa$ ）では、荷重の载荷に伴う発生ひずみが小さく、その結果、応力-差ひずみの関係を用いる DR 法では、正確な初期地圧が求めにくかった。よって、現状のひずみ検出レベル（分解能 $1/10 \mu$ ストレイン程度）を考慮すると、今回対象とした硬質堆積岩の場合には DR 法より、AE 法や DSCA 法の適用性が高いものと考えられた。

参考文献

1)新孝一「岩盤中の初期地圧を岩石試料を用いて推定する最近の研究動向」, 電力土木, No.266, p.100-106, 1996
2)菅原勝彦「岩盤応力測定に関する研究の動向」, 資源と素材, Vol.114, p.834-844, 1998

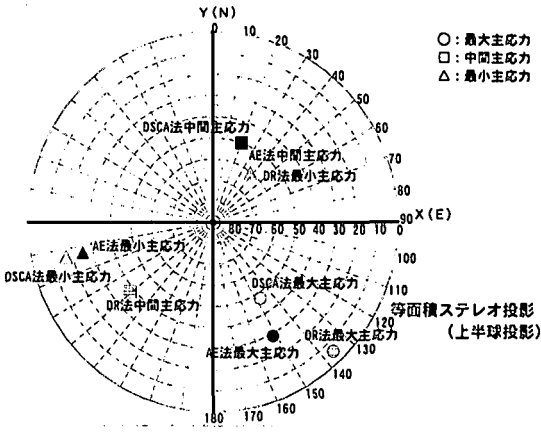


図-18 各試験法による主応力の方向