

新第三紀珪質岩における原位置AE計測 の適用性に関する基礎的検討

Basic study on the measurements of AE behavior in Neogene siliceous rocks

丹生屋純夫¹・水戸義忠²・青木謙治³・松井裕哉¹
Sumio Niunoya, Yoshitada Mito, Kenji Aoki and Hiroya Matsui

¹正会員 核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター 深地層研究グループ
(〒098-3207 北海道天塩郡幌延町宮園町1-8)

E-mail:niunoya.sumio@jnc.go.jp

²正会員 工博 助手 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
(〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 教授 同上
(同上)

To understand the size and state of Excavated Damage Zone (EDZ) accurately is one of the key issues in the technological development to for geological disposal of High-Level Radioactive Waste (HLW).

There are a few cases to measure Acoustic Emission(AE) in sedimentary soft rocks because of the difficulty to acknowledge a few AE waves with small energy.

In this study, the authors made a series of laboratory tests including tri-axial test using the stiff and servo-controlled testing machine, to clarify the possibility to measure AE waves in Neogene siliceous rocks in Horonobe, Hokkaido, Japan. As the results, it is found that the predominant AE frequency shows the highest performance of three parameters (AE counts, m-value and predominant AE frequency) that are examined in this study, to understand the state of rock failure process.

Key Words : AE, EDZ, sedimentary rocks, High stiffness tri-axial test, distinguished frequency

1. 背景と目的

一般に高地圧下で空洞を掘削した場合、周辺岩盤において応力再配分の過程で新規亀裂の発生や既存の微小亀裂の開口・進展によって、EDZ (Excavated Damage Zone: 掘削影響領域)が発生する。高レベル放射性廃棄物の地層処分技術において、このEDZの進展状況を精度良く評価することは、地層処分の安全評価における地質環境モデルの構築及び処分施設の設計・計測管理上の重要な課題の一つとなっている。この評価手法の一つとしてAE (Acoustic Emission: 岩盤微小破壊音)を直接計測し、EDZを評価する試みが国内外で注目され、結晶質岩に関してはその有用性が報告されている^{1),2)}。しかしながら、堆積軟岩では原位置計測の困難さ

(AE発生数が少ない、エネルギーが小さく到達距離が短いなど)から、これまで本手法を適用した事例は少ないと思われる。

核燃料サイクル開発機構は、北海道幌延町において高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術基盤の確立を目指し、堆積岩を対象とした地下施設の建設を伴うプロジェクト(幌延深地層研究計画)を進めている。本研究では、新第三紀珪質岩のボーリングコアを用いてAE発生特性を分析・評価することにより基礎的な知見を得ると共に、空洞掘削に伴うEDZの進展状況を予測する解析モデル及び解析手法の構築作業を進めている。さらに、将来、本プロジェクトで掘削される地下施設における原位置試験への適用を念頭に置いた原位置計測システムの検討を行なうことになっている。

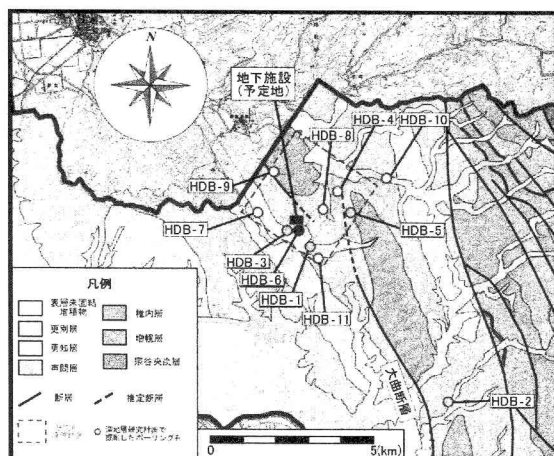


図-1 ボーリング孔位置と周辺地質

本報告は、これまでのボーリング調査で取得した岩石コアを用いて実施したAEに関する基礎的な室内試験結果を踏まえ、新たに高剛性三軸圧縮試験によるAE計測を実施し、結晶質岩におけるEDZ評価に有効であるAE計測の脆弱な堆積岩への有用性を検討したものである。

2. コア採取箇所周辺の地質状況

核燃料サイクル開発機構が進めている幌延深地層研究計画では、平成16年度までに深度500m～1,000m程度のボーリング孔を合計11本掘削し、各種調査試験から得られるデータを用い調査対象岩盤の地質環境の予測を試みている³⁾。

図-1に主な調査研究の対象範囲である研究所設置地区（幌延町北進地区）とボーリング孔の位置を示す。調査対象の岩盤は、声間層及び珪藻質泥岩と呼ばれる珪藻を起源とする新第三紀堆積岩で、続成作用の程度の違いを反映し声間層は珪藻質泥岩、珪藻質泥岩は硬質頁岩と区分している。また、両層の境界付近には珪藻質泥岩から硬質頁岩へ遷移的に変化する領域が存在する。

高剛性三軸圧縮試験に用いたコアは、施設建設予定地に最も近接するHDB-6孔より採取した。なお、表-1に、HDB-1～HDB-8孔までの調査で得られた珪藻質泥岩、硬質頁岩及び遷移帯の物理・力学物性値の分布を示す。表中の一軸圧縮強度は、一般的に軟岩の目安値とされる20MPaよりも小さいものが多く、力学的には軟岩として分類される岩石と考えられる。

表-1 周辺地質の物理・力学特性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	空隙率 (%)	弾性波速度		一軸圧縮強度 (MPa)
			P(km/s)	S(km/s)	
声間層 (珪藻質泥岩)	14.0～15.5	60.0～65.0	1.65程度	0.45程度	2.5～5.0
遷移帯 (珪藻質泥岩/硬質頁岩)	15.5～18.0	40.0～60.0	1.65～2.00	0.45～0.90	5.0～35.0
珪藻質泥岩 (硬質頁岩)	18.0～19.5	30.0～40.0	2.00～2.20	0.90～1.00	5.0～25.0

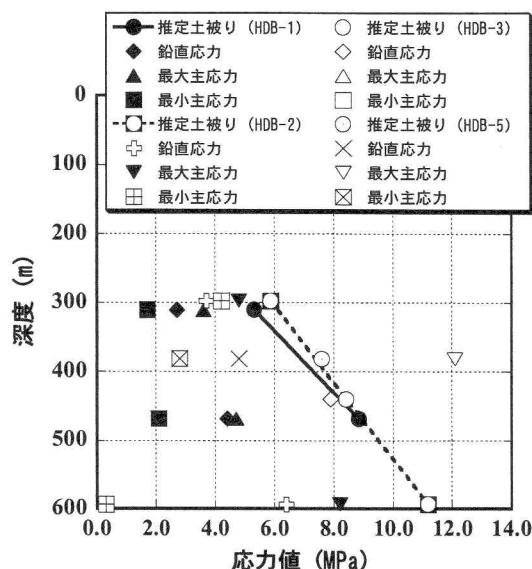


図-2 HDB-1,2,3,5 孔における AE 計測結果

3. 試験・計測方法

(1) 既往試験による試験方法の検討

高剛性三軸圧縮試験によるAE計測の前に、基礎実験としてHDB-1,2,3,5孔のボーリングコアを用いた一軸圧縮試験によるAE計測を行なっている。この計測結果から鉛直応力を算出すると、図-2に示すように単位体積重量から推定される土被り圧の6割～8割と小さい値を示した。

計測結果より得られた鉛直応力が推定土被り圧より明らかに低い値を示した原因としてカイザー効果の時間依存性及び拘束圧の影響が考えられた。拘束圧の影響を考慮するため今回の試験においては、三軸圧縮応力下においてAE計測を実施することとした。

(2) 高剛性三軸圧縮試験

岩石材料のような脆性材料の破壊強度点付近及び以後の応力-ひずみ関係を正確に計測するためには、載荷に伴う試験機の弾性変形を極力抑えて、供試体破壊後の試験機の変形回復がもたらす供試体の急激な損傷を防がなければならない。そのために、試験機は高い剛性が求められる。今回使用する高剛性三

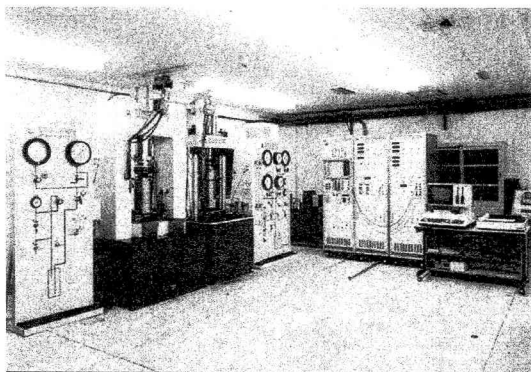


図-3 高剛性三軸圧縮試験機

軸圧縮試験機（図-3参照）は、载荷フレームを一体構造として断面積を大きくすると共に、载荷ピストンを短くし弾性係数の大きな特殊合金を用いることによって、ISRM指針（1,000～2,000t/cm）に適合する1,500t/cmの剛性を確保している。

(3) AE パラメータ

本研究は、空洞掘削時の EDZ の把握を主目的としているため、AE 計測で得られるいくつかのパラメータのうち、AE 発生数、卓越周波数及び m 値に着目した。

AE 発生数は、亀裂の発生に伴って離散的に発生する AE を個数として計数したものである。一般にはカウントと呼ばれ、発生総数はトータルカウント、ある時間間隔での発生頻度はカウントレートと名づけられている。

一般に高周波の弾性波は、低周波のものより距離減衰が大きい。岩盤に応力が集中すると、岩盤の構造が緻密となることに加えて、発生する AE の振幅が増大することから、比較的高周波の AE であってもセンサーが捉えることは可能となり、計測される AE に高周波のものが増加する。岩盤が破壊に至ると、発生する AE の振幅は小さくなり、さらに微小亀裂により高周波の AE が高い割合で遮断されることから低周波の AE が卓越するものと考えられる。したがって、AE センサが受振した AE 波の卓越周波数帯域を捉えることにより、岩盤の破壊の進展状況を把握することができると考えられる。

m 値とは、AE 波の継続時間中において計測された振幅の最大値である。しかしながら、AE の伝播経路を考慮した場合、AE センサーから遠い位置での岩盤の大規模な破壊現象と、センサー近くの小規模な破壊現象ではどちらが大きな最大振幅を有するかについては不明なことが多く、個々の AE の最大振幅自身には物理的意味が乏しいとされている。し

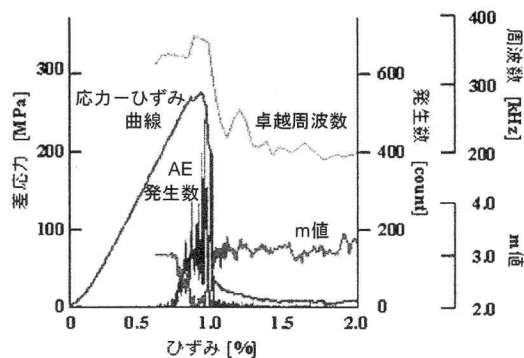


図-4 三軸圧縮試験による AE 計測

たがって、AE の最大振幅を扱う場合、個々の AE の最大振幅ではなく、どのような振幅の現象がどのように発生するかという振幅の分布をパラメータとして扱うことが必要である。このような視点から、石本・飯田らは地震の最大振幅と発生頻度の関係を示す定数 m 値を導入した⁴⁾。m 値の低下と破壊の関係は、これまでも山はね予知の手段としての適用例があり、これらの実績に表されるように、m 値は他のパラメータよりも定量的な評価が可能なパラメータであると考えられる^{5), 6)}。

(4) 三軸圧縮試験における各 AE パラメータの変化

青木らは、大深度に掘削される地下発電所空洞のボーリングコアから採取した供試体を用いて高剛性三軸圧縮試験を行なった⁷⁾。その試験において、岩石の破壊以前の挙動を含めた応力-ひずみ曲線を得ると同時に、载荷開始から試験終了まで継続的に AE 計測を行い、(3)で述べた 3 つの AE パラメータの変化を整理した。図-4 にその代表的な試験結果の例を示す。

破壊前については、载荷開始直後において AE の発生は見られないが、その後、岩石の破壊に近づくにつれて AE の発生が認められ、次第に頻度は増加していく。ただし、ひずみが 0.8% 程度までの段階では AE は発生しているものの、卓越周波数や m 値には大きな変化が見られず、岩石は破壊までに余裕ある状態であると推察できる。

破壊直前になると、AE の発生数が急増し、高周波の AE の増加や m 値の急激な低下といった大きな変化が見られる。破壊直前にある岩石には極めて大きな応力が集中しているため、周波数に関しては応力集中により岩石の構造が緻密となり、発生した AE のうち高周波のものであっても遮断されることなく計測されることが考えられる。m 値に関しては応力集中状態にある岩石には大規模のエネルギーが蓄積

されていることから、発生する AE の振幅が大規模なものになったため低下したと考えられる。

岩石の破壊直後には発生数が収束に向かっていているが、その過程において、低周波の AE の卓越及び m 値の反転現象が確認された。これは、岩石に破壊面が形成されたことにより、集中した応力が急激に開放されたため、卓越周波数及び m 値が載荷前のレベルへ戻ったものであるためと考えられる。残留強度の状態では AE の発生は微少であり、卓越周波数、m 値にも変化がみられないことから、岩石の破壊過程が終結していることがわかる。

このような検討結果から、注目した 3 種の AE パラメータ (AE 発生数、卓越周波数及び m 値) が、岩石の応力状態の変化に伴う破壊現象を鋭敏に捉えていることが確認された。したがって、今回の堆積軟岩に対する AE 計測の有用性検討に関しても、これらのパラメータについてデータを整理する。

(5) AE 計測条件

軟岩類では距離減衰が大きいいため、硬岩類での載荷試験と比べ AE 計測は難しいと考えられる。そこで、室内試験における AE 計測条件 (AE センサー、フィルター、増幅度、しきい値) の設定を過去の事例を参考にして検討を行った。

a) AE センサの設定

一般に軟岩類では距離減衰などの影響により、硬岩類より低い周波数を計測対象とすると推測されるが、試験装置周辺のノイズ環境を考慮すると、それでも 100kHz 以上が対象となる。軟岩類の試験でも、硬岩類の試験と同様に岩石破壊過程を AE の発生状況だけの推定ではなく、周波数変化などを加味して破壊過程を精度よく推定する必要がある。

したがって、軟岩類での AE 計測を対象とする本研究において使用する AE センサーは、硬岩類で用いているセンサーと同様に、広帯域型で周波数特性は 100kHz~1MHz をカバーできるものを選定した (図-5 参照)。

b) フィルターの選定

フィルターの設定は、硬岩類と同様に 100kHz~1MHz のバンドパスとした。

c) アンプによる増幅度の設定

従来の硬岩類の AE 計測での増幅率はプリアンプ 40dB とメインアンプ 20dB の計 60dB 程度で行なっているが、本研究では、硬岩類での計測条件より感度を高めることとし、基本的に 80dB とする。

d) しきい値

しきい値の設定は、岩石から発生する AE を出来

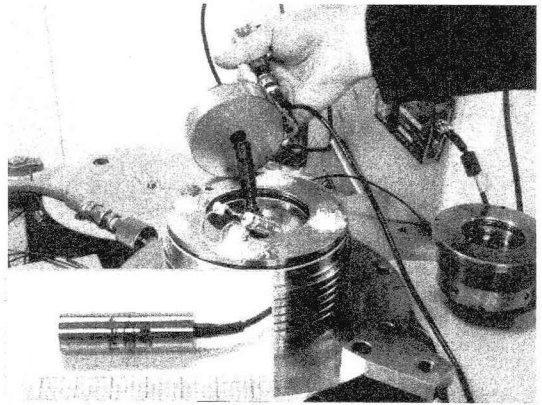


図-5 AE センサーの設置

るだけ多く検知できるように基本的にバックグラウンドノイズより若干高めの値とする。また、その値はアンプ増幅率によっても異なるため、試験時に増幅率などの計測条件を設定してからバックグラウンドを計測して、しきい値を設定した。例えば、硬岩類の試料を用いた室内試験時でのしきい値は、増幅度が 60dB の場合で 0.5V 程度に設定している。なお、AE 計測装置における AE 波形のフルスケールは波形増幅 (Vp-p) で 10V である。

4. 試験結果及び考察

表-5 に試験条件および試験結果を示す。また、図-6 に試験中の AE 計測結果の一例を示す。なお、三軸圧縮試験は空洞掘削直後の空洞周辺における急激な応力変化を仮想した非圧密非排水条件 (UU 試験) として実施した。

三軸圧縮試験に使用した供試体で測定した単位体積重量、弾性波速度の物性値は、声問層、稚内層とも表-1 で示したこれまで得られている幌延周辺地域の岩石物性とほぼ一致している。

空洞周辺の岩盤では、AE は初期応力状態から低下した応力過程において発生することから、三軸試験における側圧条件は、空洞壁面を意識した一軸応力状態に近い状態をはじめとして、推定した初期地圧から低い応力レベルを設定した。試験用のコアを採取したボーリング孔で実施した水圧破碎試験の結果、稚内層 (深度 400m 程度) の初期地圧は 6MPa、声問層 (深度 250m) の初期地圧は 4MPa と推定されており、設定する側圧はこれを目安とした。

三軸圧縮試験における計測の結果、新第三紀珪質岩における各 AE パラメータの変化について以下のような結果が得られた。

表-5 高剛性三軸圧縮試験結果

試験番号	採取深度 (m)	地層名	岩相	単位体 積重量 γ (kN/m ³)	弾性波 速度 Vp(km/sec)	ピーク点(MPa)		
						軸圧 σ_1	側圧 σ_3	差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$
4K03	204.45~204.70	声間層	珪藻質泥岩	15.40	1.61	9.24	1.00	8.25
4K04	280.00~280.37	声間層	珪藻質泥岩	18.14	1.81	13.30	1.07	12.23
4W01	378.50~379.00	稚内層	硬質頁岩	17.85	2.09	20.60	0.58	20.01
4W03	439.00~439.29	稚内層	硬質頁岩	18.14	2.09	22.07	2.00	20.07
4W04	462.63~462.84	稚内層	硬質頁岩	18.44	2.07	41.82	5.95	35.87
4W05	462.84~463.00	稚内層	硬質頁岩	18.53	2.14	21.48	0.54	20.94
4W06	439.00~439.29	稚内層	硬質頁岩	17.55	2.28	55.52	5.98	49.55
4W07	420.79~421.00	稚内層	硬質頁岩	18.73	2.21	27.58	2.04	25.54

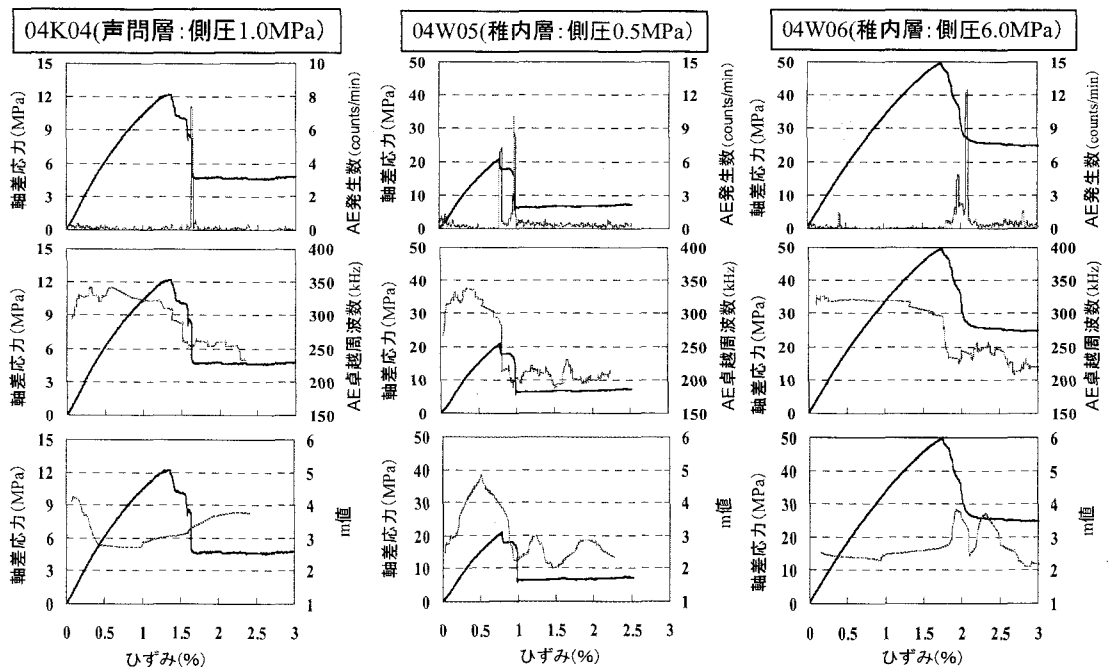


図-6 高剛性三軸圧縮試験による AE 計測結果

(実線: 軸差応力, 点線: AE パラメータ)

① いずれの拘束圧においても、AE の発生数（計測された数）自体は硬岩類に比べ極端に少ない。また、応力-ひずみ曲線に従ってその変化を見ると、ピーク応力まではごく僅かしか発生していない。AE の発生は、ピーク応力以降に顕著に増加し始め、残留応力付近で最大となり、その後はほとんど発生しなくなる。このような変化は、载荷の初期から徐々に AE が発生する硬岩類における変化とは異なっており、応力集中の

位置を正確に捉えることは難しいと思われるが、残留応力の検知には有効である。

② 卓越周波数は降伏応力からピーク応力に達するまでに低下し始め、残留応力に達するまでには低下が終了し一定のレベルに落ち着く。この変化はいずれの拘束圧においても顕著に見られた。これは、軟質な岩石の内部では、微小亀裂の形成・進展の影響により特に高周波の AE が顕著に減衰し、センサーに到達しにくくなった

ためと考えられる。一般に不均質な微細亀裂やヘキ開などの不連続面を多数含んでいる硬岩類と比較すると、軟岩類は均質性が高いため、複雑な破壊現象が生じにくく、卓越 AE 周波数は、亀裂の増加に伴う高周波 AE の減衰の影響をよく反映するものと考えられる。したがって、このパラメータは堆積軟岩において応力変化の評価に有効であると推察される。

- ③ m 値に関しては、結晶質岩などの硬岩類の場合と同様に降伏応力付近から低下し、残留応力付近で反転するという変化が多くの場合において確認された。一般的には m 値は数十個の AE から一つの値を算出するため、発生数自体少ない堆積軟岩においては、精度が低くなる可能性がある。

この室内試験結果より、岩石の破壊過程と AE の挙動を、3つのパラメータ（AE発生数、卓越周波数及びm値）に着目して整理した。結果、以下の知見が得られた。

- ・ 降伏応力付近において目立った AE の発生は無いものの、周波数及びm値の低下が起り始める。特に周波数については明瞭である。
- ・ ピーク応力に達すると、AE発生数が急増し、周波数の低下も顕著になる。その後、降伏応力に達すると、AE発生数は急減し、周波数は一定値を取り、m値の反転が生じる。
- ・ これらの AE パラメータの挙動について、拘束圧の違いによる顕著な差異は認められなかった。

5. まとめ

第三紀珪質岩のような脆弱な堆積岩においては、特に卓越周波数が岩石内部の応力変化や破壊現象を鋭敏に捉えていることが確認された。また、卓越周波数を中心として、AE発生数やm値を組み合わせることにより、降伏から破壊までの推移を把握するような計測システムを構築することができる可能性が示唆された。なお、今回用いた供試体には30～45°の傾斜角を有する層理が存在していた。そして図-7に示すように大半の供試体において層理の最大傾斜角方向と同じ向きに60°程度の破壊面が形成されたことから、層理が破壊モードに強く影響を及ぼ

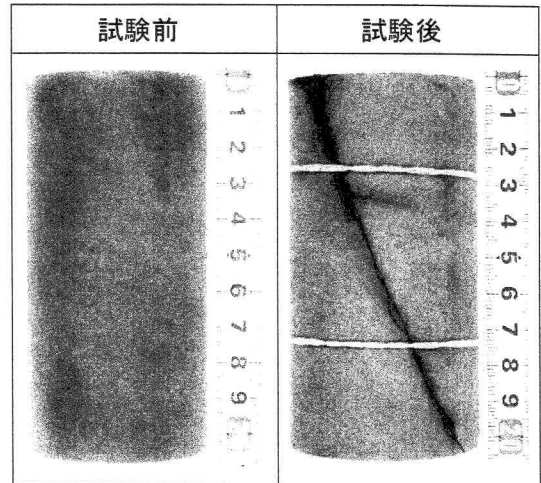


図-7 三軸圧縮試験前後の供試体の状況
(試験番号 4W04 稚内層：側圧 6.0MPa)

したものと考えられる。この後、これらの AE パラメータの挙動と破壊現象との関連性をシミュレーションにおいて検討する際は、この堆積構造に起因する異方性を考慮する必要がある。

6. 参考文献

- 1) 畑 浩二・松井裕哉・木山英郎・木梨秀雄：AE法を利用した地下空洞掘削影響領域評価に関する研究，土木学会論文集No.715/Ⅲ-60, pp.251-262, 2002.
- 2) 石田 毅，金川 忠，佐々木 俊二，浦沢 義彦：AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験，土木学会論文集，No.376/Ⅲ-6, pp.141-149, 1986.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発，2004.
- 4) M.Ishimoto and K.Iida : Observation sur les séismes enregistrés par le microsismographe construit dernièrement (a), BERI, 17, pp.447-478, 1939.
- 5) 尾上 守夫，山口 楠雄，仲佐 博裕，佐野 謙一，磯野 英二，渡辺 哲夫：アコースティックエミッションの基礎と応用，コロナ社，1976.
- 6) 大津 政康：AE計測システム，現場技術者のための AE 技術の応用（勝山 邦久 編），アイビーシー社，pp59-71, 1994.
- 7) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori, T. Maejima : Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and PFC simulation, Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, pp.73-83, 2004.