

幌延深地層研究計画における堆積軟岩を 対象とした初期地圧測定結果

INITIAL STRESS MEASUREMENTS ON SOFT SEDIMENTARY ROCK MASS OF HORONobe UNDERGROUND RESEARCH PROGRAM

山本 卓也*・松井 裕哉**

Takuya YAMAMOTO, Hiroya MATSUI

Initial stress measurements on soft sedimentary rock mass up to 500m depths by means of acoustic emission (AE) and hydraulic fracturing (HF) were carried out in Horonobe Underground Research Laboratory project. The magnitudes and orientations of principal horizontal stresses of AE were not always coincide with that of HF. As AE generation pattern was not consistent with the test specimens, the magnitude of initial stress was difficult to estimate. The orientations of maximum horizontal stresses estimated from HF and the observation of borehole breakout of boreholes were EW from 200 to 700m depths in the West of Omagari Fault which traverses the center of the research area.

Key Words: initial stress, sedimentary rock, field measurement

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターでは、北海道幌延町における幌延深地層研究計画の一環として、堆積軟岩を対象とした試験調査を平成 13 年度から行っている。

幌延深地層研究計画は、深地層の研究施設計画の一つとして、堆積岩を対象に地層処分技術に関する総合的な研究を行うものである。本計画は、地上からの調査研究段階（第 1 段階）、坑道を掘削しながら行う調査研究段階（第 2 段階）および坑道を利用して行う調査研究段階（第 3 段階）の 3 段階から成り、全体で 20 年程度の計画である。地上からの調査段階では、空中・地上物理探査、地質調査、試験調査等を実施し、地質構造や地下水の水理特性、地下水の地球化学特性、岩盤の力学特性に関する地表から地下深部までの体系的な実測データを取得する。このようなデータは、地質環境のモデル構築に用いられ、地下施設建設による地質環境の変化を予測するための解析が行われる。この解析結果を、第 2 段階で得られる坑道掘削時の実測データを用いて検証することにより、地表から地下深部までの調査技術やモデル化手法を確立することが、深地層研究計画の一つの目標である。

平成 13 年度の試験調査（深度 720m×2 本）は、幌延町内において主に研究所設置地区を選定することを主目的として行われた。また、平成 14 年度は、選定された研究所設置地区において、地区内に存在が想定されている大曲断層が地質環境に及ぼす影響を把握するための試験調査（深度 520m×3 本）が行われた。なお、試験調査では、試験孔掘削、岩芯採取・観察、物理検層、水理試験、地下水採水・分析、水圧破碎試験、掘削時のガス成分等の連続モニタリング、岩芯室内試験（基本物性、力学特性、熱特性、岩芯からの地下水・ガスの抽出・分析、鉱物試験、微化石分析、同位体比測定）が行われる。

本報は、これらの試験調査において地下深部での初期地圧を把握することを目的として実施した AE 法と水圧破碎法による初期地圧測定結果および断層が初期応力場に与える影響について検討した結果を報告するものである。

* 正会員 大成建設株式会社 札幌支店 幌延試験調査作業所

** 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

2. 調査地点の地質および岩石の物理・力学特性

(1) 試錐位置および試錐方法

平成 13 年度および 14 年度に実施した試錐孔 HDB-1, 2, 3, 4, 5 孔 (HDB は, Horonobe Deep Borehole の略称) の位置および地質柱状図を図-1 に示す。HDB-1 および 2 孔は深度 720m, 他は深度 520m である。いずれも三重管ワイヤーラインコアバレルを用い, 最終的な孔径を 6-1/4" (約 158mm), コア径を約 86mm とした。コアの採取率は 100% を目標とした。試錐に用いる掘削水として, できる限り地下水に与える影響が小さくなるように清水を当初使用したが, 掘削に伴い孔径が拡大し, 調査・試験ができない可能性があったことから, 途中からベントナイト泥水を使用して掘削を行った。

(2) 地質および物理・力学特性

HDB-1, 2, 3, 4, 5 孔の岩石は, 声間層とされる軟質な珪藻質泥岩および稚内層とされる硬質泥岩/硬質頁岩から成る。珪藻質泥岩と硬質泥岩/硬質頁岩の境界深度は, HDB-1 孔では 321.0m, HDB-2 孔では 56.69m, HDB-3 孔では 381.7m, HDB-4 孔で 128.3m, HDB-5 孔では 68.5m である。

珪藻質泥岩の単位体積重量は $14 \sim 16 \text{ kN/m}^3$, 空隙率は $60 \sim 70\%$, 弾性波速度は P 波速度が 1.8 km/sec 程度, S 波速度が 0.5 km/sec 程度, 静弾性係数 (E50) が 2 GPa 以下, 一軸圧縮強度は 5 MPa 程度, ポアソン比は $0.1 \sim 0.2$ の範囲に分布する。硬質泥岩/硬質頁岩の単位体積重量は $16 \sim 18 \text{ kN/m}^3$, 空隙率は $40 \sim 50\%$, 弾性波速度は P 波速度が $2.0 \sim 2.5 \text{ km/sec}$, S 波速度が $0.7 \sim 1.0 \text{ km/sec}$, ポアソン比は $0.15 \sim 0.45$ の範囲に分布する。力学特性は, 静弾性係数 (E50) が $1 \sim 4 \text{ GPa}$, 一軸圧縮強度が $5 \sim 25 \text{ MPa}$ のように急激かつ連続的に変化する。珪藻質泥岩から硬質泥岩/硬質頁岩へのこのような漸移帯が存在することが, 本地域の特徴の一つであると考えられる。

3. 初期地圧測定

(1) AE 法による初期地圧測定

堆積軟岩において, 岩芯を用いた初期地圧測定手法の適用性評価を目的として, AE 法による初期地圧測定を実施した。岩芯の採取深度は, HDB-1 孔: $309.70 \text{ m} \sim 310.62 \text{ m}$ および $468.00 \text{ m} \sim 468.80 \text{ m}$, HDB-2 孔: $297.20 \text{ m} \sim 298.00 \text{ m}$ および $592.12 \text{ m} \sim 594.00 \text{ m}$, HDB-3 孔: $439.10 \text{ m} \sim 439.71 \text{ m}$, HDB-5 孔: $381.00 \text{ m} \sim 381.60 \text{ m}$ である。試験にあたっては, 棒状でき裂のない岩芯を選定し, 三次元的な応力状態を評価するため, 鉛直 1 方向および水平 3~4 方向より岩芯をリボーリングすることにより供試体を作成した。供試体寸法は直径 30 mm , 高さ 60 mm とし, 各方向 3 本程度

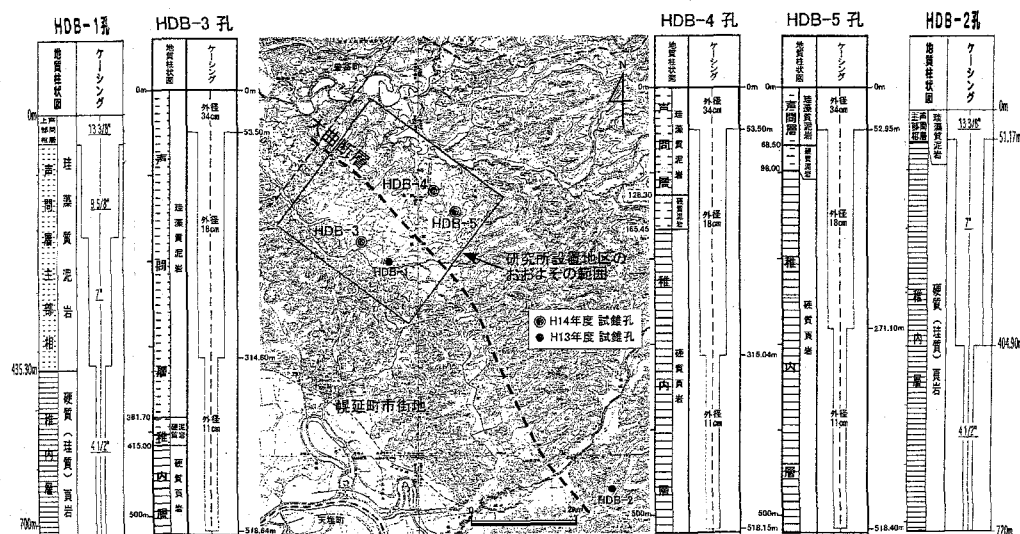


図-1 試錐位置図および地質柱状図

の供試体を作成し、試験に供している。グリスを塗布した AE センサを供試体の側面中央に直接設置し、AE 計測装置の設定をした後、載荷装置に供試体をセットし、破壊に至るまでの時間が 5~10 分程度となるような載荷速度で載荷を行った。なお、油圧源に起因するノイズや供試体端面でのノイズを除去するため、供試体と載荷板の間にスポンジを挟んだ。正常に試験が行われたと判断される試験データについて、AE イベント累積数と載荷応力の関係から載荷軸方向の初期地圧成分を求め、主応力の一方を鉛直方向であると仮定して初期地圧を算定した。

試験にあたり、カイザー効果の時間依存性（畑ほか，1995）を考慮して、岩芯採取から 3 日以内に試験を完了する仕様とした。堆積軟岩での測定実績（畑ほか，1999）を考慮して、あるしきい値を超えると一事象として計数するイベント計数法を用いた。AE 測定の各種設定を表-1 に示す。また、測定装置の概念図を図-2 に示す。

図-3，4 に測定結果の一例を示す。初期地圧の評価では、載荷中の AE イベント累積数の急増点が初期地圧に対応するとして評価を行った。今回の試験では、図-3 に示すような AE 急増点が明瞭で、比較的正確に初期地圧を求めることができる場合や、図-4 に示すような AE 急増点が不明瞭なため、正確に初期地圧を求めることが困難な場合があった。これ以外に、AE 急増点が全く認められず初期地圧が求められない場合もあった。そのため、AE 急増点が明瞭で、比較的正確に初期地圧を求めることができる場合を対象に、初期地圧の評価を行った。

表-2 に求められた各応力成分、主応力の大きさおよび方向を示す。HDB-3 孔については、EW (90°) 方向から採取した供試体で AE 急増点が認められなかった。これは、供試体の一軸圧縮強度が小さく、初期地圧と非常に近かったためと推定される。この結果、HDB-3 孔では主応力の算定ができなかった。

本測定では、カイザー効果に基づく AE 急増点が初期地圧に対応しているとして初期地圧を求めたが、全体的に AE 急増点が不明瞭な場合が多く、初期地圧の推定精度はあまり高くないと考えられる。しかし、表-2 での HDB-1 孔と HDB-5 孔の比較により、定性的には水平面内主応力には差が見られること、水平面内最大主応力方向は断層の西側に位置する HDB-1 孔と東側に位置する HDB-5 孔で異なる可能性があるという結果が得られた。

表-1 AE 測定の試験条件

孔名	HDB-1	HDB-3	HDB-5
プリアンプ増幅度 (dB)	40	40	40
メインアンプ増幅 (dB)	50	50	50
測定周波数 (Hz)	100-200	100-500	100-200
しきい値 VL (mV)	300-330	330	330
しきい値 VH (mV)	336-360	350	350

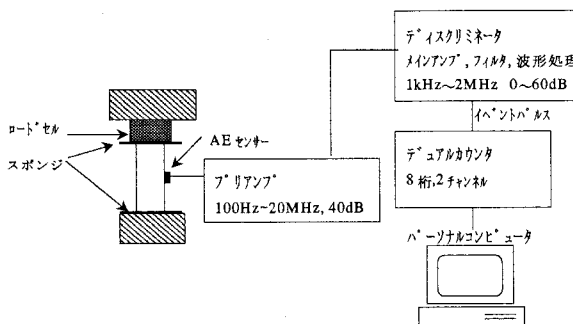


図-2 AE 測定装置の概念図

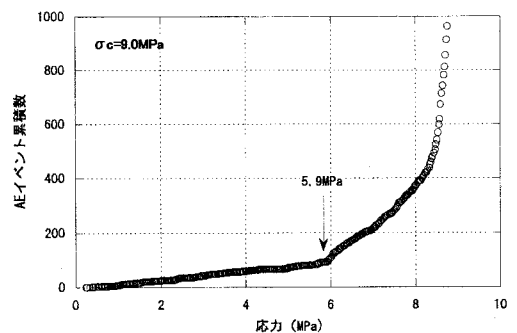


図-3 AE 測定結果 (HDB-5 孔: 45° 方向)

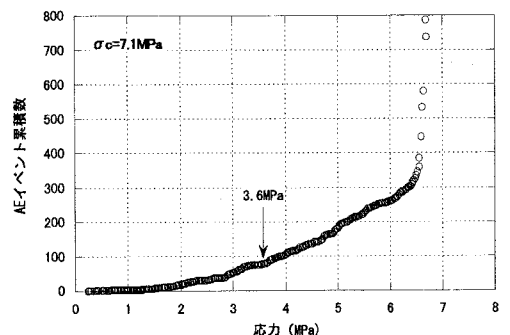


図-4 AE 測定結果 (HDB-5 孔: 鉛直方向)

表-2 AE 測定結果から求めた初期地圧の大きさと方向

試錐孔	深度 (m)	鉛直方向 初期地圧 (MPa)	水平面内地圧 (MPa)						
			0°	45°	90°	135°	最大	最小	方向(°)
HDB-1孔	309.70~310.62	2.7	—	2.4	1.8	3	3.6	1.7	N35.3E
HDB-1孔	468.00~468.80	4.4	—	3.9	4.6	2.9	4.7	2.1	N33.5E
HDB-2孔	297.20~298.00	3.7	4.2	4.5	4.8	—	4.8	4.2	N2.6W
HDB-2孔	592.12~594.00	6.4	—	2.8	7.9	5.8	8.2	0.3	N33.8W
HDB-3孔	439.10~439.71	7.9	6.1	—	—	13.5	—	—	—
HDB-5孔	381.00~381.60	4.8	3.2	13	11.7	5.6	12.1	2.8	N69.3E

(2) 水圧破碎法による初期地圧測定

研究対象である堆積軟岩の深度 500m 程度までの範囲の初期地圧を把握することを目的として、水圧破碎法による原位置測定を実施した。測定深度は、HDB-1 孔：381.0m および 585.0m、HDB-2 孔：281.9m および 535.5m、HDB-3 孔：263.5m および 392.5m、HDB-4 孔：254.2m および 359.0m、HDB-5 孔：249.8m および 377.5m である。この測定位置は、HDB-1 孔との結果の比較と地下施設の水平坑道展開深度(250m)を考慮しつつ、RQD の深度分布、キャリパー検層、孔内における孔壁画像検層 (EMI 検層) 結果からき裂が少なく孔壁が安定した地点と判断した場所である。

HDB-1 孔については、ワイヤライン方式の水圧破碎システムを用いて測定を行った。このシステムは、伊藤ほか (2001) の方法に従い、亀裂開口圧を精度良く求めるため、加圧系の体積が小さい水圧破碎システムとなっていたが、実際に原位置測定を行った結果、今回の対象岩盤では抑留の危険性が高いことと、泥水中での測定においてはシステムの改良が必要であること等の問題点が生じたため、HDB-3 孔以降の測定では、ロッド方式の水圧破碎システムを使用した。このシステムでは、掘削ロッドの先端に型取りパッカーおよび水圧破碎パッカーを装着し、ロッドを通じて注水および排水を行い、すべての圧力・流量測定を孔口で実施する点がワイヤライン方式と異なる。ロッド方式の水圧破碎システムの概念図を図-5 に示す。図-6 には、ほぼ同一深度 (深度 400m 程度) で実施した両システムによる測定結果を示しているが、主応力の大きさは異なっており、特に最大主応力の差が大きい。測定システムの違いもあり、この原因については特定できていない。

水圧破碎法による初期地圧測定の結果を表-3 に示す。HDB-1 孔および HDB-3 孔は大曲断層の西側に位置し、HDB-4 孔および HDB-5 孔は東側に位置することから、大曲断層の東西という視点から初期地圧測定結果について考察する。HDB-1 孔の深度 400m 付近のデータを除くと深度 250m 付近から 600m 付近まで最大・最小主応力値は線形的に増加していると思われる。

大曲断層の東側に位置する HDB-4 孔および HDB-5 孔は、図-7 に示すように、同一深度での最大・最小主応力の大きさが良く一致している。また、大曲断層西側と同様にいずれの深度においても、水平面内の最大主応力方向は良く一致しており、その方向は東西方向である。

(3) ボアホールブレイクアウトから得られる主応力の方向について

孔内検層のうち、孔壁画像検層 (EMI 検層) 結果から、ボアホールブレイクアウトと見られる孔壁の破壊現象が HDB-1 孔および HDB-2 孔で観察された。HDB-1 孔の深度 635.0m で観察され

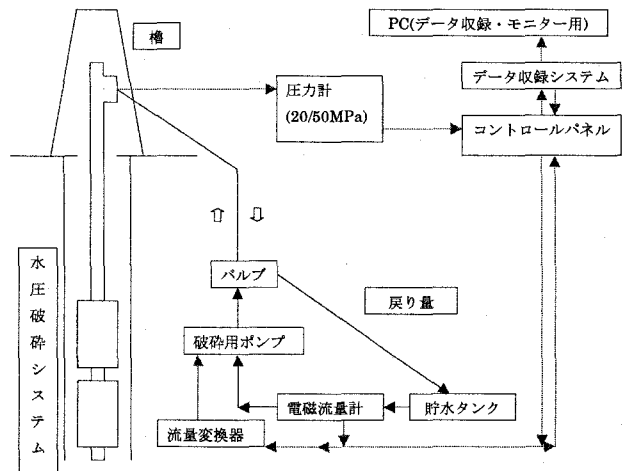
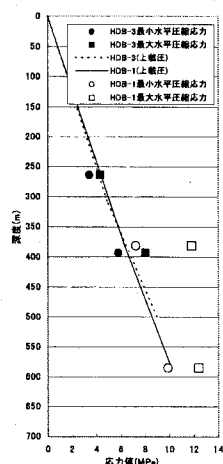


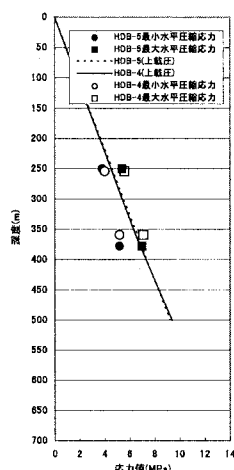
図-5 水圧破碎法測定装置の概念図

表－3 水圧破砕法による初期地圧測定結果から求めた初期地圧の大きさと方向

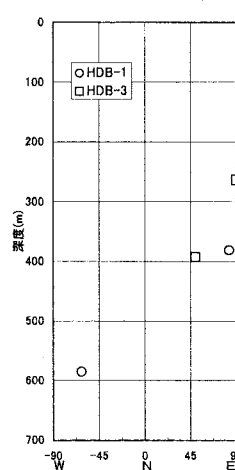
試錐孔	深度 (m)	鉛直方向 初期地圧 (MPa)	水平方向初期地圧		
			最大 (MPa)	最小 (MPa)	方向 (°)
HDB-1孔	381.0	6.32	11.80	7.23	N83E
	585.0	10.17	12.37	9.87	N62W
HDB-2孔	281.9	5.25	8.25	5.91	N40W
	535.5	10.08	13.94	8.43	N0.1W
HDB-3孔	263.5	4.20	4.30	3.40	N90E
	392.5	6.60	8.00	5.80	N50E
HDB-4孔	254.2	4.60	5.60	4.00	N62E
	359.0	6.50	7.10	5.20	N87E
HDB-5孔	249.8	4.70	5.40	3.80	N81W
	377.5	7.00	7.00	5.20	N76W



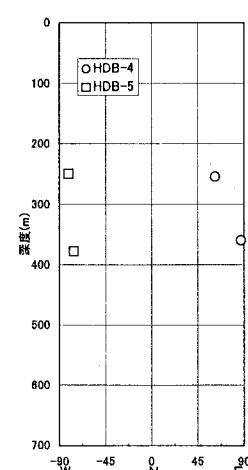
図－6 HDB-1 孔と HDB-3 孔の主応力の深度分布



図－7 HDB-4 孔と HDB-5 孔の主応力の深度分布



図－8 HDB-1 孔と HDB-3 孔の主応力方向



図－9 HDB-4 孔と HDB-5 孔の主応力方向

たボアホールテレヴィューの型取り結果および EMI 検層画像をそれぞれ図－10 および図－11 に例として示す。ここでは、ボアホールブレイクアウトの発生方向から孔軸に直交する水平面内の最大主応力方向について検討する。HDB-1 孔では、ボアホールブレイクアウトのき裂群は深度 500m 以深の領域でほぼ南北方向に集中して発生しているため、水平面内の最大主応力方向はほぼ東西方向と考えられる (図－11)。これに対し、HDB-2 孔では、水平面内のボアホールブレイクアウトの発生は、HDB-1 孔と同様深度 500m 以深であるが、その発生方向は深度の増加とともに東西方向から南北方向へ回転する。すなわち、最大主応力方向が南北から東西方向へ回転するような変化が見られた (図－12)。この要因については、現在検討中であるが、大曲断層西側の領域では、深度 500m 以深でも水平面内最大主応力方向は東西方向でほぼ一定していると考えられる。

4. まとめ

幌延深地層研究計画の試錐調査の一環として採取した堆積軟岩を対象とし、AE 法および水圧破砕法による初期地圧測定を行った。さらに、孔内検層により観察されたボアホールブレイクアウトの方向より水平面内の最大主応力方向等を推定した。その結果、以下の知見を得た。

1) AE 法については、カイザー効果の時間依存性を考慮して試験を実施したが、AE の発生パターンは一様では

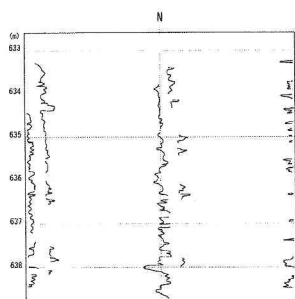


図-10 ボアホールブレイクアウトの型取り結果
(HDB-1 孔深度 635.0m)

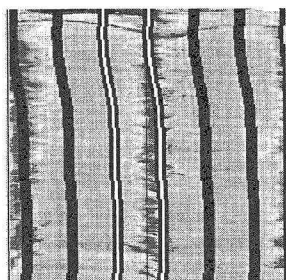


図-11 ボアホールブレイクアウトの EMI 画像

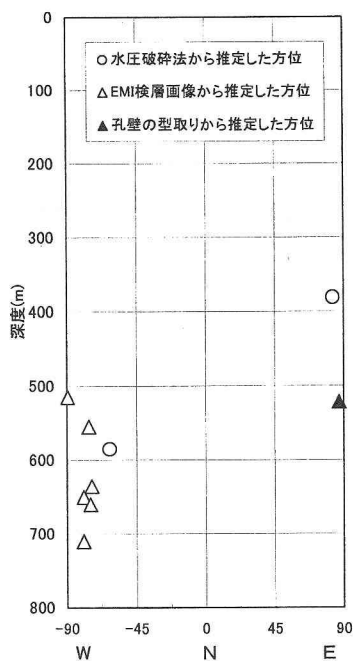


図-12 水圧破碎およびボアホールブレイクアウトから推定した HDB-1 孔の最大主応力方向

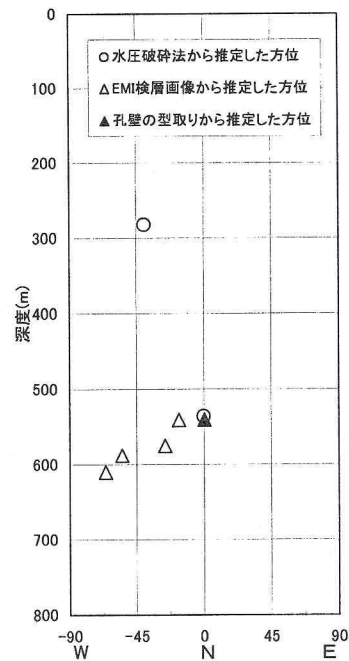


図-13 水圧破碎およびボアホールブレイクアウトから推定した HDB-2 孔の最大主応力方向

なく、応力値の設定が困難な場合があった。また、原位置応力が一軸圧縮強度に近い場合の同方法の適用については今後の課題である。

2) 水圧破碎法により測定された最大主応力の大きさとその方向は、AE 法と必ずしも一致しないが、現状では AE 法の測定結果の信頼性が低いと判断される。最大主応力の方向は、水圧破碎法では HDB-2 孔以外の測定結果ではほぼ東西方向と算定され、水平面内最大・最小主応力に差が見られることが分かった。

3) ボアホールブレイクアウトから推定された水平面内の最大主応力方向は、大曲断層を境に異なる傾向を示した。

4) 研究所設置地区においては、断層西側については、深度 200m 以深では水平面内最大主応力方向はほぼ東西方向で一定していると考えられる。断層東側は断層西側と比べ、応力値に大きな差はないが、最大主応力方向については傾向が異なっており、断層を挟んで応力場が若干異なる可能性がある。

5. おわりに

現在、幌延地点において進められている試錐調査においても、初期地圧測定を水圧破碎法により行う予定である。これらの結果も加えて研究所設置地区における初期応力状態に関する考察を進めて行く予定である。

参考文献：

- 畑 浩二, 道広一利, 吉岡尚也, 杉原弘造 (1995) : AE 法を利用した初期地圧測定とその適用例, 材料, Vol. 44, 502.
 畑 浩二, 大内 一 (1999) : 98SE-01 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定, サイクル機構技術資料, JNC TJ7400 99-001.
 伊藤高敏, 加藤春實, 林 一夫 (2001) : 水圧破碎試験における真のき裂開口圧測定による最大初期応力評価法とその実用化システムの開発, 2001 年西日本岩盤工学シンポジウム。