幌延地域に分布する珪質岩に対する幾つかの 岩盤応力測定法の適用性と推定された応力状態*

真田 祐幸¹ 丹生屋 純夫²
松井 裕哉³ 藤井 義明⁴

Applicability of Initial Stress Measurement Methods to Horonobe Siliceous Rocks and Initial Stress State around Horonobe Underground Research Laboratory

Hiroyuki SANADA^a, Sumio NIUNOYA^b, Hiroya MATSUI^c and Yoshiaki FUJII^d

- a. Sedimentary Environment Engineering Group, Horonobe Underground Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency (Corresponding author E-mail: sanada.hiroyuki@jaea.go.jp / FAX: 01632-5-2344)
- b. Obayashi Corporation
- c. Crystalline Environment Engineering Group, Tono Geoscientific Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
- d. Division of Solid Waste, Resources and Geoenvironmental Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Understanding initial stress condition in deep underground is important for such construction as rock cavern for geological disposal of HLW and underground power plant. Neogene sedimentary rock is widely distributed in Japan. There are only a few studies of initial stress measurement in Neogene sedimentary rock mass in Japan due to difficulty of measurement. Evaluation of initial stress condition around Horonobe Underground Research Laboratory Project was carried out in order to understand initial stress condition and applicability of AE, DSCA and hydraulic fracturing (HF) methods to Neogene sedimentary rock. Initial stress values obtained from AE method is smaller than overburden pressure due to time dependency of Kaizer effect. It would be difficult to use AE method as initial stress measurement method for Horonobe Siliceous rocks. Principal stress values by DSCA are similar to those by HF tests. Directions of maximum horizontal principal stresses are approximately in E-W and corresponded to HF results.

In HF, rod type and wire-line type systems were compared. Workability of rod type was much better than wire-line type. However, re-opening pressure were not able to be precisely measured in case of rod type system due to the large compliance of the packers and rods. Horizontal maximum and minimum principal stresses increase linearly in HF results. Deviatoric stress is acting at shallow depth. Initial stress condition approaches hydrostatic condition with depth. Direction of maximum horizontal principal stress was in E-W direction which was similar to tectonic movement around Horonobe URL by triangular surveying.

KEY WORDS: Geological Disposal, Hydraulic Fracturing, AE, DSCA, Horonobe Underground Research Laboratory Project

1. 緒 言

わが国には、新第三紀や第四紀などの年代の若い堆積岩が広く分布しており、これらが地下構造物（高レベル放射性廃棄物の地

層処分場など）の母岩となるケースが多い。地下深部は、地表からの土被りや造構作用による初期地圧と呼ばれる応力場の下にある。初期地圧は、構造物の短期・長期的な力学的安定性と密接な関係があり、支保形態ならびに空洞の形状・寸法を決定する重要な因子となる。したがって、構造物の設計段階で対象とする岩盤内に分布する初期応力状態を把握することが要求される。地下深部に作用する初期応力状態の一般的な傾向は、斎藤、Brown、Lindner などによって報告されている¹⁻³⁾が、わが国の地盤は、地質学的な変動が活発な環境下に晒されているため、岩盤の堆積過程において加わった圧密やプレートの運動などによる造構作用が加わり複雑な応力状態になっている。そのため、地下深部に作用する初期地圧の正確な状態を知るには、直接測定する以外に方法はない。そして、力学的な性状が比較的安定している硬質な岩

*2009年3月13日受付 2009年9月16日受理

1. 普通会員（独）日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット 堆積岩工学技術開発グループ
2. (株)大林組 技術本部 原子力本部 原子力環境技術部 第三課（研究当時、(独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット 堆積岩工学技術開発グループ）
3. (独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究所 結晶質岩工学技術開発グループ サブグループリーダー
4. 普通会員 北海道大学大学院 工学研究科 環境循環システム専攻 教授 [著者連絡先] FAX: 01632-5-2344

E-mail: sanada.hiroyuki@jaea.go.jp

キーワード：地層処分、水圧破壊法、AE法、DSCA法、幌延深地層研究計画

Fig.1 Geological map in the Horonobe area (after Ishii et al., 2006), showing locations of the boreholes. Plate boundaries and directions of plate migration in location map of the left upper are from Wei and Seno (1998).

盤内に施工される地下発電所、地下石油備蓄基地やLPG地下備蓄施設などの地下構造物では初期地圧の計測事例が多いが、軟弱な堆積岩を対象にした場合は、硬質な岩盤と比較して高い計測技術が要求されることから⁴⁾、初期地圧の計測事例はそれほど多くない⁵⁻⁷⁾。また、わが国では、使用済み燃料の再処理過程から生じる高レベル放射性廃棄物を地下300m以深に埋設処分する「地層処分」が計画されている。現在、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として、結晶質岩や堆積岩を対象にし、地下研究施設の建設を伴う研究プロジェクトを日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が進めている。処分事業は、わが国の法令上300m以深に設けられることになっており、初期地圧は、処分場のアクセス坑道・処分パネルに含まれる坑道の周辺岩盤の安定性や最適な幾何学配置を検討する上で、重要な要素の一つとなる。処分事業ならびに処分システムの信頼性向上と実現可能性を確認する上で、実際の地質環境に対する処分システム（サイト特性調査を含む）の適用性の確認を進めることが必要となる。

初期地圧の計測方法は、主に、応力解放法や水圧破砕法などのボーリング孔を利用した原位置での計測と、AE法、DSCA法、DRA法などのボーリング孔から採取したコアを利用した計測（コア法と呼ばれる）とに大別される。応力解放法の実施は、深部に位置する調査坑道などからの水平孔を利用した計測がほとんどであり、地表からの計測は技術的な困難さからほとんどなされていない⁸⁾。原位置での計測のうち、地表から地下深部の応力状態を把握するための手法としては、水圧破砕法が最も有望視されている。水圧破砕法は、現在までに国内外の数多くの原位置で計測が実施されてきた。水圧破砕計測によって取得される重要なデータの一つであるき裂開口圧は、加圧区間内に注入する流体の圧力を増加させる過程において、圧力-時間曲線の挙動が線形挙動から非線形挙動に移行する圧力とみなされる。しかしながら、既往の研究によって、測定されるき裂開口圧は水圧破砕の加圧システムの剛性と密接な関係があることや、き裂面の凹凸によりき裂の開口以前に加圧区間内に生じたき裂を通じて流体が浸透するため、従来の試験・解析手法の適用性を再考する必要性が生じてきた⁹⁾。また、硬質な岩盤とは違って、軟弱な大深度岩盤を対象に初期地圧を計測する場合、対象としている岩盤の性状と作用している外力に依存するが、試験孔周囲に発生する孔壁破壊（ボア

ホールブレイクアウト）などにより、孔壁が崩壊し原位置計測ができなくなる恐れがある。そのような場合でも応力状態を把握するために、原位置計測以外のオプションを用意しておくことが要求される。オプションの一つにコア法が考えられるが、コア採取から試験までの時間と算出される岩盤応力値との関係や応力記憶の保持時間などが種々の岩石で異なるため、計測対象とする種々の岩石に対して同方法の適用性を検討することが必要である。

本研究では、特に高レベル放射性廃棄物の地層処分に代表される地下構造物の合理的な設計・施工への寄与を主たる目的とし、北海道北部に位置する幌延町を一種のケーススタディとして取り扱い、幌延地域に分布する新第三紀の珪質岩に対して幾つかの岩盤応力測定法を適用し、その適用性を検討した。そして、その結果と深層ボーリング調査で実施したBHTV結果や計測エリア内に作用する造構作用から北海道幌延地域に作用する初期応力状態について議論した。これらの結果は、将来実施する処分事業の設計・施工や信頼性向上に反映可能になることに加え、処分場周囲のサイト特性調査を合理的に信頼性を持った形で進める上で有力な情報になると思われる。以下にその内容について論述する。

2. 研究対象とした地域の地質構造

研究対象としたサイトは北海道の北部に位置する幌延町である。ここでは、使用済み核燃料の再処理過程で発生する高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する研究開発を原子力機構が進めている。この研究開発は幌延深地層研究計画と呼ばれ、実際の処分事業で必要となる地質環境の調査・評価技術、処分場の設計技術あるいは性能評価技術などを実際の地質環境に対し適用し、それらの信頼性を向上することを目的としている。

Fig.1に地下研究施設周辺の地質図を示す^{10, 11)}。図に示すHDB (Horonobe Deep Borehole) とは、幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階で掘削された深層ボーリング孔の名称を意味している。当該地域は、中部中新統の増幌層を不整合におおって、稚内層、声間層、勇知層、更別層がそれぞれ整合漸移関係で累重している¹²⁾。地下研究施設周辺の岩盤は、珪藻を起源とした珪藻質泥岩の声間層が上位層に、珪質泥岩の稚内層が下位層に分布している。両層の境界付近には、珪藻質泥岩から珪質泥岩へと遷移的に変化する領域（遷移帯）が存在していることがわかっている。勇知層は細粒砂岩から構成され層理に乏しく軟質な岩相を呈し、更別層は礫岩、砂岩、シルト岩の不規則な互層から構成される¹²⁾。主な研究対象地層は声間層、稚内層であり、その工学的な特徴は、声間層は一軸圧縮強さ約5MPa以下、有効空隙率60%程度、稚内層は一軸圧縮強さ約20MPa以下、有効空隙率30%程度を示し、多孔質かつ軟弱であることがあげられる¹³⁾。また、泥岩ではあるものの粘土鉱物は少ないことから、耐スレーキング性指数は高く、膨潤圧は小さくいわゆる膨潤性地山ではない¹³⁾。そして、地下水位は地表面に近く原位置岩盤はほぼ含水飽和状態にある。

また、Fig.1に示すように研究所設置地区を二分する形で北北西—南南東走向の断層（大曲断層）の存在が推定されている¹⁴⁾。

3. AE法

AE法は、カイザー効果（ある応力を経験した材料を、再載荷した際、応力が先行値を越えるとAcoustic Emissionと呼ばれる弾性波が生じる現象）を利用し、室内載荷試験時のAE発生数の変化から初期地圧を算出する方法である。既往の研究により、カイザー効果の成立とコア採取からの経過時間との間には密接な関係があるとされている¹⁵⁾。そこで、本試験に先立ち、幌延地域に

Fig.2 Test equipment of initial stress measurement by AE method.

Fig.3 Stress pattern of preliminary test.

Fig.4 Relationship between cumulative number of AE event and axial stress in preliminary test.

分布する珪質岩（声間層、稚内層の両岩石）に対するカイザー効果の適用の見通しを確認する目的で、カイザー効果の時間依存性に関する予備試験を行った。

試験の模式図を Fig. 2 に示す。供試体は、直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱形とした。AE センサー（NF, AE-903N, 350 kHz 共振）は含水飽和状態の供試体の側面にシリコングリスを塗布しビニールテープにて取り付けた。また、供試体の上下にスポンジを敷くことで試験機からの振動を AE として検出しないよう心がけた。AE 信号はプリアンプ（NF, 9913）で 40 dB、ディスクリミネーター（NF, AE9922, HPF 100 kHz, LPF 500 kHz）で 50 dB 増幅した。そして AE のしきい値を V_L 300 mV, V_H 350 mV に設定し、包絡線検波によるイベント計数法で検出された AE を、デュアルカウンタ（NF, AE-932）でカウントし、パーソナルコンピュータで記録するシステムとした。

予備試験では、Fig. 3 に示すように 5 サイクルの繰返し载荷で応力履歴を供試体を与え、その後、軸圧を昇圧させて先行応力と

Table 1 Prestress and delay time.
(UCS means uniaxial compressive strength)

Case	Prestress	Delay time
Case I	UCS×40%	8 hours
Case II	UCS×40%	7 days
Case III	UCS×60%	1 hour
Case IV	UCS×60%	8 hours

AE の急増点との関連を調べた。なお、使用したコアは HDB-1 孔の深度 300 m 地点のコア（声間層）である。試験は、材料試験機のプロテンの変位速度を一定として試験を行った。その結果を Fig. 4 に示す。载荷初期に若干の AE が発生するが、先行応力以内ではほぼ変動は見られない。そして、軸圧が先行応力付近を超えたあたりから AE の増加が生じ AE イベント累積数が急増することがわかる。AE が急増する応力値と先行载荷により記憶させた応力値とは概ね一致し、除荷時間をほとんど置かない今回のケースでは、カイザー効果は成立していると解釈できる。

次に、先行応力载荷後からの経過時間がカイザー効果の成立に与える影響を把握するために、一軸圧縮強さの 40% と 60% の载荷圧を約 70 時間加えた後、任意の時間静置後に再び軸圧を昇圧させ AE の発生数を調べた。予備試験の载荷圧と静置時間を Table 1 に示す。なお、使用した供試体は、HDB-3 孔の深度 100 m 付近（声間層にあたる）のコアである。

結果を Fig. 5 に示す。静置時間を比較的長く置いた Case I, II, IV のケースでは、先行応力付近でも AE イベント累積数の明瞭な変化はほとんど見られない。軸圧を昇圧させた場合、その応力-ひずみの曲線形状は、線形～非線形～ひずみ軟化と変化する。石橋は、弾性域内で先行応力を除過した場合、カイザー効果に成立が見られるが、高い軸圧を载荷し応力-ひずみの曲線形状が軟化域に近づくにつれ、発生するカイザー効果は徐々に不明瞭になることを指摘している¹⁶⁾。Case I, II, IV のケースは、载荷圧が一軸圧縮強さの 40%, 60% と設定した。過去に実施した力学試験¹⁷⁾によると、珪質泥岩（稚内層）の応力-ひずみ曲線は、降伏圧近傍でもダイレタンスーのようなものは生じていない。しかし、珪藻質泥岩（声間層）は、降伏点以前でダイレタンスーを生じているように見受けられる。今回実施した AE 法の試験は、材料試験機のスロークの変位しか計測できていないため、応力レベルの増大によるダイレタンスーの発生については、確かな情報を取得することが難しいが、既往の調査によると今回設定した応力レベルは弾性状態に近いと思われる。そのため、岩石内部の応力の記憶機構に影響したカイザー効果が不明瞭になった要因としては、载荷圧以上に、先行応力の除荷からの静置時間が長かったことが挙げられる。一方、Case III のように静置時間が短い場合には、先行応力後の 3.5 MPa 付近で AE イベント累積数が微増している。しかしながら、1 時間程度の経過時間であっても、先行応力载荷直後に昇圧させた Fig. 4 と比較して AE イベント累積数の増加が不明瞭であり、幌延地域に分布する珪質岩の場合、カイザー効果に静置時間が与える影響は顕著である。ただし、上記の考察については、その他の要因（供試体軸方向の直応力以外の応力成分の影響、ボーリング時の応力集中の影響、応力解放による緩みの影響、原位置岩盤と実験室の温度差による影響等）も今後検討する必要があると考えている。

コア採取から試験までの時間を極力短くするために、本試験では全ての試料はコア回収時から 2 日以内に試験を実施することに

Fig.5 Result of preliminary test.

Fig.6 Example of stress-cumulative number of AE event curve in AE method (HDB-3 GL-439 m).

Fig.7 Result of initial stress measurement by AE method.

し、声問層の供試体として HDB-1 孔の 310 m、椎内層の供試体として HDB-1 孔の 468 m、HDB-2 孔の 297 m、592 m、HDB-3 孔の 439 m、HDB-5 孔の 381 m の深度のボーリングコアから直径 30 mm、高さ 60 mm の円柱供試体を作製した。供試体の軸方向は、鉛直方向と水平方向とし、水平方向に関しては、主応力を算定できるように可能な限り 0° 、 45° 、 90° 、 135° の方向の供試体を作成し、含水飽和状態で試験を実施した。

初期地圧の解析には、AE 急増点が明瞭な試料 (Fig. 6) のみを採用し AE 急増点が認められない試料や不明瞭な試料は除外した。

Fig. 7 に本計測で評価された初期地圧と深度の関係について示す。図には、AE 測定から算出された鉛直応力、水平面内最大主

応力、水平面内最小主応力、密度検層から算出した HDB-6 孔の土被り圧を示す。300 m 近傍での応力値は土被り圧に近く、等方的な応力状態に近い。そして、深部に進むにつれて応力値が増加するが、ばらつきが大きく原位置の応力状態を定量的に示しているようにはみえない。

4. DSCA 法

原位置から採取した岩石試料内では応力解放に伴いき裂が開くと考えられる。開口したき裂を含んだ岩石試料に静水圧を作用させると、き裂閉口に伴うひずみは、横軸を静水圧、縦軸をひずみとし、高静水圧下における弾性変形を表す静水圧-ひずみ線図を静水圧 0 まで外挿したときの y 切片に現れる。このひずみ量

Fig.8 Schematic figure showing triaxial setup and strain gage pattern of DSCA test.

が、直ひずみ方向に原位置で作用していた直応力と比例すると仮定して地山の主応力比を求める方法が DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法と呼ばれている。本章では、幌延地域に分布する珪質岩（声間層、稚内層）に対し実施した DSCA 試験について述べる。

試験には、HDB-11 孔から得られた深度 424 m（声間層）と 672 m（稚内層）付近のコアを用いた。通常、DSCA 法では含水飽和させない被覆した立方体の岩石供試体を作製し、静水圧を作用させ、直交する 3 つの面でそれぞれ 3 ～ 4 方向、合計 9 ～ 12 方向のひずみを計測し、き裂に起因するひずみテンソルを分析することで初期地圧状態を推定する。

しかしながら、当該岩石の物性は水分変化で変化すると考えられたため、原位置を模擬して含水飽和状態で試験を行うことにした。含水飽和状態の岩石を非排水状態で圧縮すると、間隙水圧が上昇し適切な有効応力を得ることができないので、直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱型供試体を用い排水状態で試験を行うことにした。

9 本のひずみゲージの配置と試験装置を Fig. 8 に示す。各ひずみゲージ方向の x , y , z 軸に対する方向余弦を l , m , n とすれば、あるひずみゲージ方向の直応力 σ_S と三次元応力成分 σ の関係は以下のようになる。

$$\sigma_S = l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y + n^2 \sigma_z + 2lm\tau_{xy} + 2mn\tau_{yz} + 2nl\tau_{zx} \quad (1)$$

9 つのひずみゲージ方向についてまとめると

$$\sigma_S = A\sigma \quad (2)$$

ここで、 A は 9 行 6 列の行列、

$$\sigma_S = \{\sigma_{a1} \ \sigma_{b1} \ \sigma_{c1} \ \sigma_{a2} \ \sigma_{b2} \ \sigma_{c2} \ \sigma_{a3} \ \sigma_{b3} \ \sigma_{c3}\}^T \quad (3)$$

$$\sigma = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}\}^T$$

である。

Table 2 に接着したひずみゲージの方向余弦を示す。これによると、ひずみゲージは独立な 6 方向以上の 7 方向に接着されているので三次元応力を求めることができる。重みなし最小二乗法を用いれば三次元応力は以下のように表すことができる。

$$\sigma = (A^T A)^{-1} A^T \sigma_S \quad (4)$$

供試体側面の曲率を考慮し、有効長 2 mm の短いひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージを水平に貼付すると最も曲率が大きくなるがその場合でも中心角は約 4° であり、ひずみゲージが曲率を持つことによる誤差は小さい。なお、供試体の方位は HDB-11 孔で実施した BHTV 検層結果で得られた割れ目の走向傾

Table 2 Direction cosine of strain gage.

Strain gage	l	m	n
a1	0	0	1
b1	0.612	0.353	0.707
c1	-0.612	-0.353	0.707
a2	0	0	1
b2	0	-0.707	0.707
c2	0	0.707	0.707
a3	0	0	1
b3	-0.612	0.354	0.707
c3	0.612	-0.354	0.707

Fig.9 Example of hydrostatic pressure-strain curve obtained for the specimen at GL-424 m.

斜方向に基づき同定した。ひずみゲージを貼付した供試体をポラスメタルを介して排水用の小孔を有するエンドピースに取り付け、熱収縮チューブで被覆し、超小型三軸ベッセルに挿入し、その後封圧を 1 MPa づつ上げ、5 分後のひずみを記録することを繰り返した。

Fig. 9 に封圧 - ひずみ線図の一例を示す。低い封圧下では、非線形な挙動を示し、封圧の上昇とともに線形的にひずみが増加する。その後、再び非線形的にひずみが増加している場合があるが、これは空隙破壊によるものと考えている¹⁸⁾。線形挙動を示す領域で直線近似し、 y 切片を求めた。各方向の y 切片から三次元ひずみテンソルを求め、鉛直方向の直ひずみ成分で除することで正規化し、これに有効土被り圧を乗じて応力テンソルに変換し有効初期地圧と見なした。得られた初期地圧（全応力）の下半球投影図、水平面内主応力値と方位を Fig. 10 に示す。深度 424 m から取得したコアの試験結果では最大主応力の値とその方向は、近傍で実施した水圧破碎試験結果と比較的類似した結果が得られた。その他については一定の傾向が見て取れないが、主応力軸はボーリング軸に対して一致せず若干の傾きを示している。水平面内主応力は概ね東西方向であり、主応力値などと比較すると概ねばらつきは少ない。

5. 水圧破碎法

水圧破碎法は、ボーリング孔内の計測対象エリアにパッカーを挿入し、二つのパッカーで閉塞された区間内で流体の圧入量をコントロールして水圧を作用させ、岩盤の破碎等を行い、得られた諸計測値から初期地圧を算出する方法である。本方法において造成したき裂を再開口させるときのパッカーで閉塞された区間の圧

Fig.10 Results of DSCA test.

力 P の変化は, (5) 式で与えられる⁹⁾。ここで, Q は閉塞区間に流入される流量, dV_c はき裂が開く際の流体体積の変化, C は流量計や加圧区間までの配管を含む加圧システムのコンプライアンスを示す。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q}{\frac{dV_c}{dP} + C} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この式から, 加圧区間内の圧力には加圧システムのコンプライアンスの値が大きく影響している。水圧破碎試験では掘削用のロッドを加圧配管として使用するが, その場合, 加圧システムのコンプライアンスが大きくなることから, き裂開口圧を精度良く検出することが難しくなる。そのため, 本研究は同和工営社製のコンプライアンスの小さいワイヤライントップの水圧破碎システムを採用することにした。本システムは樹脂製高圧ホース, ワイヤラインおよびストラドルパッカー (同和工営社製, 耐圧 20 MPa) から構成されている。ストラドルパッカーには, パッカーエレメントへの加圧から加圧区間への加圧へと流路を切り替えるためのプッシュプルバルブ, 孔内水圧, 圧入流量を測定するための圧力変換機 (共和電業社製, PGM-500KD, 測定範囲 49.03 MPa), 小型流量計 (Japan Flow Control Co., MF30, 測定範囲 500 cc/min) を設置し, 地表には, 孔内水圧と圧入流量を記録するためのパーソナルコンピュータを配置した。

孔壁が安定した箇所を試験区間に選定するため, ボーリングコアの鑑定, RQD, キャリパーおよび EMI 検層の結果を参考にし, HDB-1 孔の深度 381 m (声間層), 585 m (稚内層), HDB-2 孔の深度 282 m (稚内層), 536 m (稚内層) を試験区間とし実施した。試験中, パッカーエレメントの破裂・抑留やバルブが作動しにくくなる現象が頻発した。この原因は, 孔内水として泥水を使用し

たことや時間経過に伴い孔壁付近の変状が大きくなったことや抑留時のパッカーエレメントの回収に伴う引張力が不足したことなどが原因として考えられる。孔壁の変状の大きい堆積軟岩の場合, このシステムのような孔壁とのクリアランスが小さい装置を使用すると, 装置の抑留が今後も起こる可能性が十分考えられた。検層や初期地圧測定後のボーリング孔には地下研究施設の建設に伴う周辺への水理環境に与える影響を確認するためのモニタリング装置を設置することから, HDB-1, 2 孔以降の初期地圧の計測では, HDB-1, 2 孔で使用したワイヤライントップの水圧破碎システムの採用は断念し, 通常のロッドタイプの水圧破碎システムを採用することとした。

Fig. 11 に水圧破碎前の孔壁のインプレッションパッカーによる型取りの結果を示す。この孔壁の損傷は加圧に伴う損傷ではなくボーリングの掘削に伴う応力集中による破壊, すなわちボアホールブレイクアウトであると考えた。そこで, ボアホールブレイクアウトの情報を使用した初期地圧の算出を試みた。

ブレイクアウトを利用した解析に必要なブレイクアウトの挟み角幅はインプレッションパッカーの型取りより, 深度方向 1 cm 毎のボアホールブレイクアウトの挟み角の平均値を算出した。主応力の一つがボーリング孔軸に平行であると仮定すると, 水平面内最大主応力 S_H は岩石の一軸圧縮強さ C , ブレイクアウトの挟み角 $2\phi_b$, 水平面内最小主応力 S_h , 間隙水圧 P_0 を用い, (6) 式で表現される¹⁹⁾。

$$S_H = b_W - S_h m_W \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, b_W , m_W は (7) 式ならびに (8) 式で表される。

$$b_W = \frac{C + 2P_0}{1 - 2\cos(\pi - 2\phi_b)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Fig.11 Example of borehole wall impression (HDB-1).

Fig.12 Relationship between shut-in and reopening pressure.

$$m_w = \frac{1 + 2\cos(\pi - 2\phi_b)}{1 - 2\cos(\pi - 2\phi_b)} \quad (8)$$

岩石の一軸圧縮強さ C は、ブレイクアウトが生じた領域の岩石コアを使用し、水平面内最小主応力 S_h については、その領域で計測を行っていないため、付近で実施した水圧破碎試験で得られた最小主応力を線形補完した。 P_0 については、ボーリング孔を利用した間隙水圧計測により、当地域に分布する岩盤内の間隙水圧は地表からの水頭とほぼ等しいと予想されるため、深度相当の水頭を間隙水圧として与え解析を行った。

Fig. 12 にき裂開口圧とき裂閉口圧の関係を示す。ロッドタイプの水圧破碎システムの計測データ (HDB-3, 4, 5, 6, 9, 11) は、き裂閉口圧がき裂開口圧の値と非常に近い。このことは、(5) 式で示したようにロッドタイプの水圧破碎システムは、掘削ロッドを流体を圧入する導管に使用しているため、コンプライアンスがワイヤライントタイプのシステムと比べ大きく、圧力-時間曲線が線形から非線形に変わる応力、すなわちき裂開口圧を精度良く読み取れなかったと考えられる。そのため、本論文の水圧破碎試験結果では HDB-1, 2 孔以外で得られた水圧破碎の応力値は、除外して記載することにする。ただし、最大主応力の方位については、方位の測定結果が水圧破碎システムのコンプライアンスに依存しないと考えられるため、HDB-1, 2 孔以外の測定結果も記載している。

水圧破碎試験結果を Fig. 13 に示す。(a) は、深度と水平面内最

(a) Relationship between initial stress and depth.

(b) Ratio of principal stress.

(c) Direction of maximum horizontal principal stress.

Fig.13 Results of hydraulic fracturing.

大・最小主応力と密度検層結果から算出した土被り圧との関係を、(b) は、深度と鉛直土被り圧に対する水平面内最大・最小主応力の比との関係を、(c) は、最大主応力の方位を示している。(a) より、最大主応力、最小主応力ともに深度が増加するにつれて線形的に応力値が増大する。そして、(b) よりデータ数は少ないが深部では最大主応力値が減少し、比較的等方的な応力状態に近づく。また (c) より主応力方向については研究所設置地区内においては全てのデータがほぼ東西方向に卓越している。ただし、研究所設置地区から約 6 km 南方にある HDB-2 孔については研究所設置地区の応力状態と異なり主応力が南北方向に卓越していることがわかる。

ボアホールブレイクアウトの情報から算出した結果を Fig. 14 (a) ~ (c) に示す。最小主応力値については水圧破碎データを外挿して用いた。(a), (b) より最大主応力値については水圧破碎試験

(a) Relationship between initial stress and depth

(b) Ratio of principal stress

(c) Direction of maximum horizontal principal stress

Fig.14 Results of borehole breakout method.

と比較してやや小さいが、それ以外では水圧破碎試験結果と類似している。(c)より主応力方向については、研究所設置地区内の結果ではほぼ東西方向に卓越し、研究所設置地区外のHDB-2孔では南北方向に卓越しており、水圧破碎試験結果と似た傾向を示す。上記の結果から、ボアホールブレイクアウトから算出した初期地圧は、水圧破碎試験より若干小さな値が示されたものの、応力値・方向ともに補助的に適用可能な手法と思われる。

水圧破碎試験ならびにボアホールブレイクアウトの情報から算出した応力結果より、深度によってその程度は異なるが、当該地域の初期応力は、若干の偏圧状態にあり、その程度は土被り圧と最大主応力との比がおおよそ2倍までの範囲内にあるといえる。

6. 考 察

幌延地域に分布する新第三紀堆積岩に対するAE法、DSCA法、

水圧破碎法の適用性について整理し、これらの方法で得られた結果に基づいて研究所設置地区内の応力状態について考察するとともに、計測エリア内に作用する造構作用や深層ボーリング調査で実施したBHTV結果との対比から、推定された初期応力状態の妥当性について検討する。

6・1 幌延地域に分布する珪質岩へのAE法、DSCA法、水圧破碎法の適用性

ここでは、先に示した結果から推定される新第三紀堆積岩に対するAE法、DSCA法、水圧破碎法の適用性について述べる。AE法については、既往の研究で、応力解放から試験までの経過時間や、高い応力レベル下での岩石の内部構造の損傷で、カイザー効果が不明瞭になることが指摘されている。本論文で示したように一軸圧縮強さの40%程度の先行応力を載荷させ、その後経過時間を置かず速やかに軸圧を加えた場合には、先行応力付近でAE発生数は増大した。しかし、載荷後の経過時間が1時間ほどの状態で先行応力付近のAE発生数の増分が不明瞭になったように、当該地域の珪質岩に対しては、AEの発生挙動にコア採取からの経過時間が大きく影響すると考えられる。したがって、当該地域の珪質岩に対してAE法を適用する場合、コア採取後速やかに試験を行う必要があるが、コアの採取、コア観察、試験機関までの運送、試験準備などの実務上の制約条件が加わることを考えると、原位置岩盤の初期地圧の定量的な評価には、相当に工夫した試験フローが必要である。そして、今回の研究では十分な検討を行うことができなかったが、今後検討すべき事項としては、供試体軸方向の直応力以外の応力成分の影響、ボーリング時の応力集中の影響、応力解放による緩みの影響、コア採取による温度変化による影響等が挙げられる。

一般的にコア法の場合、岩石内部に記憶されている応力履歴に対するコア採取からの経過時間の影響が大きい、DSCA法の場合は経過時間の影響をそれほど受けないといわれている(ただし、物理的・化学的な風化を考慮すると早期に実施することが望ましい)²⁰⁾。大深度を対象とした通常の水圧破碎試験の場合、主応力軸は鉛直土被り圧に等しいと仮定され、ボーリング孔軸に対して水平面方向の主応力状態しか算出することができないが、DSCA法では、1つのコアを用いて三次元的な応力状態を算出できる。DSCA法を当該珪質岩に対して適用したところ、試験点数は少ないが少なくとも比較的硬質な稚内層の岩石においては、水平面内の最大主応力の方向はほぼ東西方向を向いており、原位置計測結果とほぼ整合的であった。しかし、応力比については水圧破碎法やボアホールブレイクアウトの観測結果から求めた応力値と比較して大きい。地下深部の初期地圧の一般的な傾向について既往の検討結果¹⁾によると、平均水平地圧 σ_{Hav} 、鉛直方向の直応力 σ_z 、測定深度 h との関係は、

$$\frac{\sigma_{Hav}}{\sigma_z} = \frac{155}{h} + 0.65 \quad (9)$$

で近似されている。高レベル放射性廃棄物の地層処分事業における法令上定められた深度300mを(9)式に代入すると、おおよそ1.2を示す。原位置に作用している造構作用や地山の不均質性を加味すると、地下深部に作用している応力状態を定式化する上で多少のバラツキはあるとは考えられるが、今回実施したDSCA法の応力比と地下深部に作用している初期応力の一般的な傾向とは差がある。これらの要因として、コア採取による応力解放と内在する弱面の方向性や密度、間隙水圧の変化などが考えられるが、これらの関係についての基礎的な検討は十分であるとはいえない。

Fig.15 Result of borehole breakout taken from BHTV logging.

い。したがって、これらの検討やその他の各種コア法に関する検討は、今後原子力機構が実施する坑道内での調査においても継続すべき課題と考えている。

水圧破碎法については、加圧システムのコンプライアンスの小さいワイヤライントイプの水圧破碎システムと掘削配管を加圧配管として使用したロッドタイプの二つのタイプの水圧破碎システムを使用し、作業性や適用性の検討を実施した。作業性については、本研究の対象岩盤が軟弱な新第三紀の堆積岩であり孔壁の変状が大きいこと、ボーリング孔内には清水と比較し粘性の大きい泥水が充填されていること、ワイヤライントイプの水圧破碎システムは高い精度で計測を行うため孔壁とのクリアランスが小さい

Fig.16 Strain in Japan obtained from triangular surveying²¹⁾.

ことなどから、ワイヤライントイプの水圧破碎システムについてはパッカーエレメントの破裂・抑留やバルブが作動しにくくなる現象が頻発し、ロッドタイプの計測システムと比較して高度な作業が要求される結果となった。一方、適用性については、ロッドタイプのシステムの場合、パッカーならびに配管系のコンプライアンスが大きくなるため、き裂開口圧を精度良く読みとることが困難であった。そのため、測定精度という点では、ワイヤライントイプの水圧破碎システムを採用すべきであるが、孔壁の変状が大きい堆積軟岩の場合は、孔壁とのクリアランスに裕度を設けたシステムを開発することが望ましいといえる。

6・2 幌延地域の応力状態と造構作用との関係

水圧破碎法ならびにブレイクアウト法から算出された初期地圧測定結果によると、主応力値は深度の増大とともに線形的に増大することがわかった。水平面主応力は、深部では等方的な応力状態に近づくが、いずれも偏圧状態下にある。そのため、当地域の応力状態は地下深部に作用している土盛り圧以外に造構作用などの影響を受け複雑な応力下にあるといえる。主応力方向については、研究所設置地区内の深層ボーリング孔 (HDB-1, 3, 4, 5, 6, 9, 11) の水圧破碎試験結果によるとほぼ東西方向を示していることがわかった。一方、北進地域に存在する研究所設置地区から約 6 km 南方の上幌延地域に存在する HDB-2 孔の水圧破碎試験結果によると、最大主応力方向がほぼ南北方向を示しており、北進地域の応力状態と異なっている。Fig. 15 に HDB-6, 9, 10, 11, 先行ボーリングの BHTV 調査結果から判断されたボアホールブレイクアウトの発生方位、HDB-6 と先行ボーリングのボアホールブレイクアウトと深度、BHTV から算出した先行ボーリングの 2 次元と 3 次元の孔壁の形状復元結果を示す。試験孔によって発生頻度の違いはあるものの、深度方向に断続的に孔壁の破壊が生じており、その領域は南北方向に集中的に発生している。このことからこれらのボーリング孔周辺に作用している水平面内最大主応力は概ね東西方向と推定できる。

上記に示した幌延地域で計測した初期地圧測定結果と当地域に作用する造構作用との対応関係を検討するために、Fig. 16 に 1974 年に発表された最近 60 年間の測量結果から求めた測地学的な水平ひずみの変化を示す²¹⁾。今回、研究対象とした北海道北部は、大域的に 1×10^{-7} /年のひずみ速度で地表が圧縮を受けており、その方向は概ね東西方向にある。また、幌延地域の西部に発達する褶曲構造は、微小地震のメカニズム解、海域の音波探査断面および陸域の反射法地震探査断面に基づくと、東西圧縮の造構作用により発達したと考えられている²²⁾。これらの造構作用は、今回実施した初期地圧測定結果と概ね調和的な傾向を示して

おり、当地域の初期地圧状態は造構作用の影響を反映し、大局的には東西方向の偏圧環境下に晒されていると推定できる。

7. 結 言

本研究では、特に高レベル放射性廃棄物の地層処分に代表される地下構造物の合理的な設計・施工への寄与を主たる目的とし、北海道北部に位置する幌延町を一種のケーススタディとして取り扱い、幌延地域に分布する新第三紀の珪質岩に対して初期地圧に関する室内試験や原位置試験を行い、その適用性を検討した。そして、その結果に加え深層ボーリング調査で実施した BHTV 結果や計測エリア内に作用する造構作用から北海道幌延地域に作用する初期応力状態について議論した。本研究で得られた主な知見は以下のものである。

- 1) AE 法により得られた初期地圧は土被り圧より低い値を示した。これは予備試験で得られたようにカイザー効果の時間依存性の問題やボーリングコア採取時の応力解放により生じた微細き裂の影響などが原因として考えられ、珪質岩に対する AE 法の適用性については今後の検討課題としたい。
- 2) DSCA 法については、深度 600 m 台の一部の供試体を除いては原位置試験の結果と類似した結果が得られた。また、最大主応力の方位については概ね東西方向を示しており、データ数は少ないものの AE 法と比較し原位置試験と整合的な結果となった。
- 3) 水圧破碎法において、作業性という観点からは、掘管を圧力配管に使用するロッドタイプの水圧破碎システムの方が、ワイヤラインタイプの水圧破碎システムと比較し抑留等のリスクが少ないが、前者のシステムはパッカーや掘管の剛性の影響から精度良くき裂開口圧を測定することが困難であった。
- 4) 水圧破碎試験結果によると、最大主応力、最小主応力ともに深度の増大とともに線形的に増大していた。また、最大主応力と土被り圧の深度分布から、初期地圧は浅部では偏圧環境にあるが、深部では相対的に等方的な応力状態に近づくといえる。主応力方向は、ほぼ東西方向を向いており当地域に作用する造構作用と調和的であった。

原子力発電環境整備機構によると、処分事業は地上からの概要調査、地下坑道を利用した精密調査と段階的な調査を経て進められることになっている。幌延深地層研究計画においても、地上からの調査で得られた初期地圧測定結果の妥当性の確認や更新を行うために、坑道内での初期地圧計測を継続して行うこととして

いる。今回、新第三紀堆積岩に対して幾つかのコア法の適用性を検討したが、坑道内での調査においても継続して検討する必要があると考えている。

謝辞 本原稿は、幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階ならびに現在実施している坑道掘削時の調査研究段階で実施された試錐調査結果の内、特に力学調査に特化した内容を取りまとめたものである。試錐調査業務に携わって頂いた多数の所内外の関係各位に深く感謝する。原稿の作成作業の際は、幌延深地層研究ユニットの中司昇ユニット長、堆積岩工学技術開発グループの畑中耕一郎グループリーダー、杉田裕チームリーダー、山崎雅直氏（現在、東京電力）に適切な閲読をいただいた。ここに深く感謝申し上げる。

References

- 1) T. Saito, T. Ishida, M. Terada and Y. Tanaka : Proc. of JSCE , **394/III-9** (1988) , pp. 71-78.
- 2) Brown, E.T. and Hoek, E. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abstr. , **15** (1978) , 211-215.
- 3) Linder, E.N. and Halpern, J.A. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. , **15** (1978) , 183-203.
- 4) H. N. Ghimire, Y. Ishijima, T. Sugawara and S. Nakama: Journal of MMIJ , **120** (2004) , 32-38.
- 5) T.Kanagawa, M.Hayashi and Y.Kitahara : Denryokucyukenkuyujyo Hokoku , **377003** (1978) , 1-31.
- 6) H. N. Ghimire , Y. Ishijima , T. Sugawara , H. Matsui and S. Nakama: Journal of MMIJ , **120** (2004) , 545-554.
- 7) T.Sato , H.Matsui and K.Sugihara : Jour. of Nuclear Fuel Cycle and Environment, **4** (1998), 83-89.
- 8) K.Sakaguchi , H.Yoshida , M.Minami , M.Hara , Y.Suzuki and K.Matsuki: Journal of MMIJ , **122** (2006) , 338-344.
- 9) T.Ito , K.Evans , K.Kawai and K.Hayashi : Int. J. of Rock Mech. and Min. science , **36** (1999) , 811-826.
- 10) E.Ishii K.Yasue, T.Tanaka, R.Tsukuwi, K.Matsuo, K.Sugiyama and S.Matsuo: Jour. Geol. soc. Japan, **112** (2006), 301-314.
- 11) D.Wei, T.Seno, Flower, M., Chung, S.L., Lo, C.H. and Lee, T.Y. (Eds.): Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, Geodynamics Series 27, American Geophysical Union, Washington, DC, USA, pp. 337-346.
- 12) H.Fukasawa: Jour. Geol. soc. Japan, **91** (1985), 833-849.
- 13) S.Niunoya and H.Matsui : Proc. of the 35th Symposium on Rock mech. , **35** (2006) , 177-182.
- 14) I.Eiichi, Y.Kenichi, O.Hiroto, F.Akira, H.Takeshi and N.Mitsuhiro : Jour. Geol. soc. Japan, **6** (2008) , 286-299.
- 15) K.Hata , K.Michihiro , H.Yoshioka and K.Sugihara: J. Soc. Mat. Sci. Japan , **44** (1995) , 885-890.
- 16) K. Ishibashi , K. Konagai , Y. Mitara and Y. Matsumoto: Proc. of JSCE , **364** (1985) , pp. 23-30.
- 17) H.Matsui and Y.Takuya: Proc. JSCE Annual Meeting (2004), CSI-012.
- 18) H.Sanada , H.Matsui and Y.Fujii : Proceedings of the ISRM-Sponsored International Symposium on Rock Mechanics: "Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods" SINOROCK2009 (2009), CD-ROM.
- 19) Japan Nuclear Cycle Development Institute : Japan Nuclear Cycle Development Technical Report , JNC TN1400 2002-010 (2002) , 7-27-7-29.
- 20) Y.Oikawa and T.Yamaguchi: Proc.MMIJ Annual Meeting (2000), pp. 67-70.
- 21) Nihon-Sokuchi-Gakkai : *Sokuchi-Gaku-no-Gaikan* (Nihon-Sokuchi-Gakkai , Tokyo , 1974), p. 511.
- 22) Japan Nuclear Cycle Development Institute : Japan Nuclear Cycle Development Technical Report , JNC TN1400 2005-014(2005) , 13-17.