

2. 研究所設置地区およびその周辺の地質

研究所設置地区およびその周辺は、図-2に示したように深度1000m程度までの範囲で声間層・稚内層と呼ばれる珪藻質泥岩・硬質頁岩と、その間に続成作用により珪藻質泥岩から硬質頁岩に遷移的に変化する層準で構成される。また、研究所設置地区中央部に大曲断層と呼ばれる東傾斜の逆断層の存在が推定されている(図-1)。珪藻質泥岩および硬質頁岩はいずれも珪藻を起源とする堆積岩であり、岩盤中には層理面と高角に交わる割れ目が発達した割れ目帯が存在している(図-2)¹⁾。この割れ目は岩盤の透水性と関連があることが推定されている¹⁾。

3. ボーリング調査の概要

ボーリング調査は、平成13年度から各年度3本程度行い、平成17年度までに研究所設置地区およびその周辺に計10孔のボーリング孔を配置している。各ボーリング孔は、調査終了後長期水圧・水質モニタリングシステムを挿入し、地下施設建設に伴う影響範囲を直接把握する役割を担う。力学的調査は、ボーリング調査全体の時間的・コスト的制約と調査対象岩盤が新第三紀堆積岩であることを踏まえ、調査開始時は以下の想定に基づき調査計画を策定した。

- ①結晶質岩と比較して、原位置に存在する割れ目が岩盤の物性に及ぼす影響は相対的に小さい。他方、深度方向の応力変化に依存し岩盤物性が変化する可能性がある。
- ②裸孔で放置した場合、時間経過とともに孔が縮小し原位置調査が困難になる。

①、②の想定から、本調査では、室内試験および力学物性に関連する物理検層結果(密度、弾性波速度など)から2次元的な力学物性分布を把握・評価することとした。室内試験は、最も安価に実施できる一軸圧縮試験を深度方向に多点で実施するとともに、数深度で三軸圧縮試験を行い、原位置岩盤の応力状態および坑道掘削時の

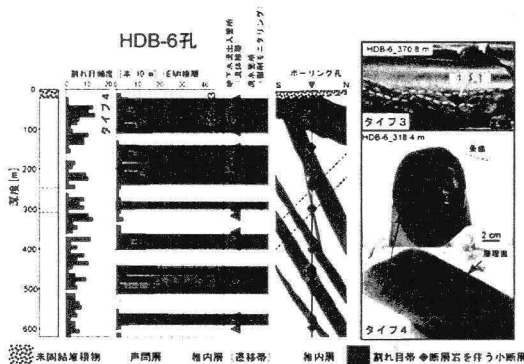


図-2 ボーリング調査により把握された割れ目帯の分布と総理面と高角に交わる割れ目(タイプ3)の例

応力再配分現象を念頭においた力学物性を調べることとした。応力状態は、新第三紀堆積岩における応力測定の実績²⁾や数100m深度における応力解放法による測定手法がないことから、水圧破壊法による応力測定を基本としたが、②の想定からコアを用いた方法(AE法)による応力測定の可能性³⁾についても検討した。以上の考え方は、全孔同一であり、各ボーリング孔の位置により以下の調査試験を付帯的に実施した。

- ・岩石の物理・力学物性の異方性試験(HDB-3孔)
- ・孔内載荷試験(HDB-6孔)

以降に示す一軸・三軸圧縮試験の静弾性係数 E_0 は供試体中央部にてひずみゲージで測定した値より求めている。

4. 調査結果の概要および研究所設置地区およびその周辺の力学特性に関する評価

(1) 調査対象岩盤の物理的・力学的物性と国内に分布する同時代の堆積岩との関係

文献⁴⁾に示される国内に分布する新第三紀堆積岩(泥質岩、凝灰岩)の物性と幌延の珪藻質泥岩・硬質頁岩のそれを比較した結果、珪藻質泥岩・硬質頁岩の物理・力学物性は、有効空隙率や吸水率は高めの値を示すが、第二次とりまとめの泥質岩・凝灰岩の物性分布の範囲内に収まっており、かつ最頻値や頻度分布もほぼ同じ傾向である¹⁾。従って、幌延の珪藻質泥岩、硬質頁岩の物理・力学物性は国内に分布する同時代の泥質岩、凝灰岩と比較して特異なものではないと言える。

(2) 地質・岩石物性と原位置岩盤物性との関係

図-3に、鉛直方向の岩相分布と室内試験で得られた岩石コアの各種物性値の分布の一例を示す。同図から、室内試験・物理検層から評価される力学物性分布と地質的な岩相分布はほぼ対応することがわかる。この結果は、調査対象岩盤の物理・力学物性分布が地質・地質構造に

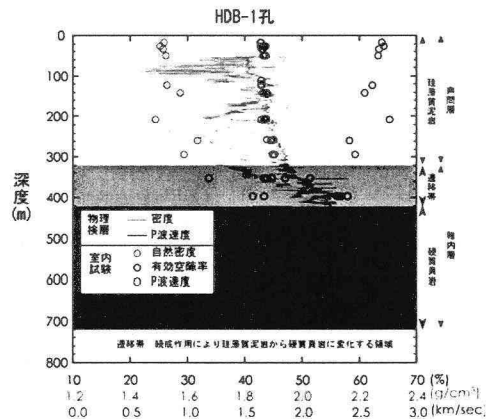


図-3 ボーリング調査結果による地質と室内試験で得られた各種物性値との比較

支配されていることを示すが、大きな物性変化が見られる層準の厚さは、地質学的な遷移帯の厚さよりも厚い傾向がある。また、この領域の物性変化は急激かつ連続的に生じており幌延の珪質岩盤の一つの大きな特徴である。

(3) 岩石物性と原位置岩盤物性との関係

図-4は、速度検層およびコア試験から得られた弾性波速度から算定した動弾性係数と一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験で得られた E_0 を比較したものである。深度300mまでの範囲に分布する珪藻質泥岩では、動弾性係数はコアの方が低い。他方、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験で得られた E_0 と比較すると E_0 とコアの動弾性係数はほぼ一致する。このことから、珪藻質泥岩層の速度検層で得られた弾性波速度は過大評価になっている可能性が高いと思われる。300mより深い深度に分布する硬質頁岩層では、コア試験で得られた一軸圧縮・三軸圧縮試験の E_0 とコア及び検層の動弾性係数が比較的一致している。越智⁹⁾は堆積軟岩のコア試験、検層の結果から評価される各種弾性係数は一致することを示したが、珪藻質泥岩の弾性波速度が過大評価になっているとすれば、幌延の珪質岩盤で見られる上述の特徴はそれらの知見と矛盾しない。

一方、原位置の割れ目が岩盤物性に与える影響は調査開始時は相対的に小さいと想定していた。図5に瑞浪市正馬様用地に掘削したMIU-2号孔における検層結果およびコア測定結果を比較した例⁹⁾を示す。一般に、結晶質岩のような硬岩では、図-5のように内在する亀裂特に開口亀裂の影響により原位置岩盤の弾性波速度はコアのそれよりも小さくなる。同図では、割れ目が少ない深度200～500m程度の範囲の弾性波速度が概ね5.2km/sec程度に対し、割れ目の影響で1km/sec程度（約20%程度）の速度の減少が見られる。一方、図-6はHDB-3, 6孔における検層と室内試験の比較結果であるが、速度変化の幅は2項で述べたタイプ3の割れ目が比較的集中する領域においても岩石コアの平均的な弾性波速度の10%程度にとどまっている。P波速度および密度は、ボーリング孔位置お

よび岩相によらず物理検層結果とコアの測定結果はよく一致しているが、S波速度については、特にHDB-1, 3孔の深度300m程度までの範囲で検層結果よりもコアの測定結果が低くなっている。前述した動弾性係数の差はこのS波速度の違いに起因している。コアの弾性波速度の応力依存性についても検討した⁹⁾が、これだけの大きな速度差は説明できず要因は現状では明らかでない。

さらに、岩盤の変形特性を直接把握する手段として孔内载荷試験を実施した。図-7に孔内载荷試験⁹⁾で得られた各载荷応力レベルにおける変形係数・弾性係数と室内試験及び検層結果から評価した各種弾性係数の比較を示す。孔内载荷試験から求めた変形係数・弾性係数のひずみレベルは0.5%よりも小さい範囲であり、室内試験の E_0 を求めたひずみレベルとほぼ同等である。孔内载荷試験で得られた低応力レベルの変形係数は、岩相の違いによらず一軸圧縮試験の E_0 に概ね対応する。珪藻質泥岩層では、割れ目の有無によらず孔内载荷試験の変形係数・弾性係数とも検層データから得られる動弾性係数の半分以上であるが、硬質頁岩層では応力レベルの増加につれ弾

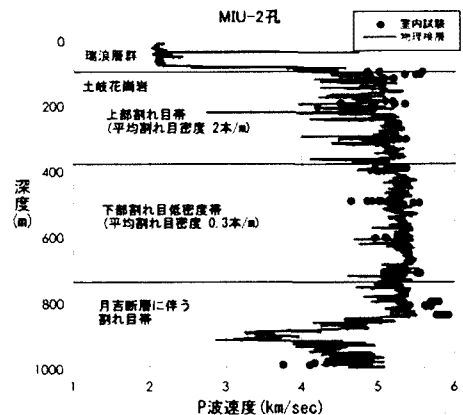


図-5 MIU-2 号孔における速度検層と室内試験より得られたP波速度の比較

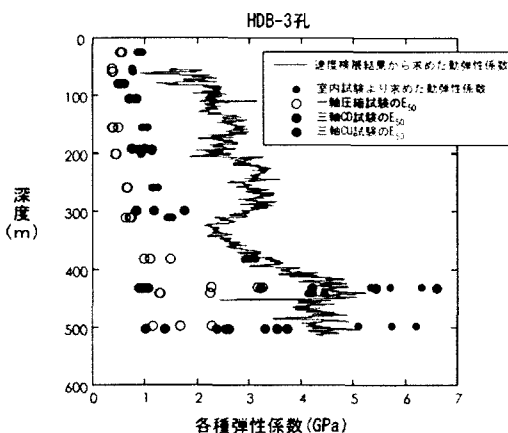


図-4 速度検層および室内試験で得られた各種弾性係数の比較

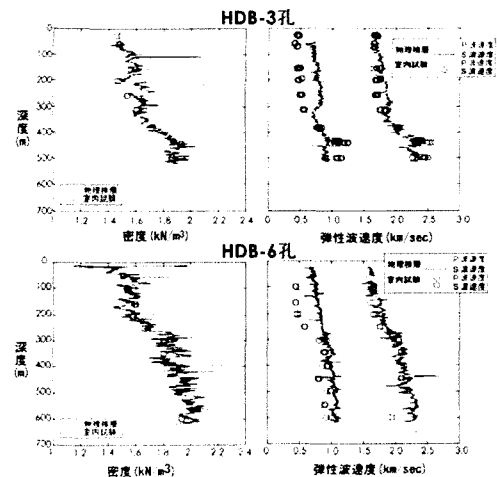


図-6 検層と室内試験から得られた密度・弾性波速度の比較

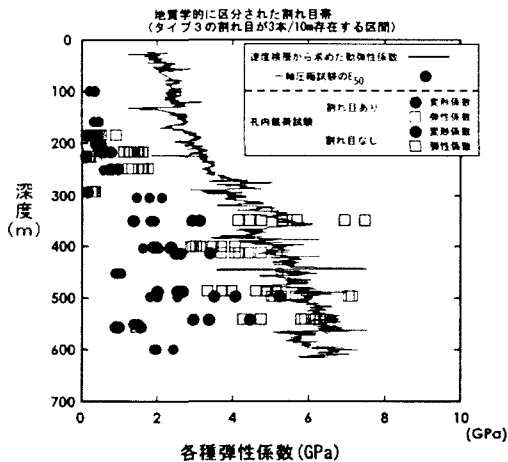


図-7 孔内載荷試験、検層および室内試験で得られた各種弾性係数の比較

性係数及び変形係数も動弾性係数に近づく傾向が見られる。さらに、珪藻質泥岩中では割れ目の有無により原位置岩盤の変形特性に差が生じているが、硬質頁岩層では両者の差は認められない。珪藻質泥岩の三軸圧縮試験では、空洞掘削時の応力集中を想定した拘束圧の範囲（推定破り圧の2倍程度）内で、応力ひずみ曲線がひずみ軟化型から弾完全塑性型に変化することが明らかになっており⁹⁾、割れ目のない部分も孔壁近傍の応力集中により岩盤が損傷あるいは塑性化し変形係数・弾性係数が著しく低下したと推察される。一方、硬質頁岩層は相対的に強度が高いため、孔壁近傍の岩盤も弾性状態にあり、載荷初期は一軸圧縮状態に近い挙動を示すものの変位が増加し応力レベルが上昇するにつれ、孔壁より奥側の三軸応力状態の岩盤の変形特性が現れたと考えられる。

以上の室内試験・検層および孔内載荷試験の評価から、珪質岩盤の変形特性は、岩相と応力レベルに依存して変化しており、割れ目の影響は相対的に小さいと考えられる。また、検層で得られる動弾性係数は、三軸応力状態下の原位置岩盤の変形特性と対応するものと解釈でき、孔壁近傍の岩盤の変形特性は一軸圧縮状態の岩石の変形特性と対応する。これらは、珪質岩盤は力学的に多孔質連続体として近似できることを示すと考えられ、幌延の珪質岩盤中の岩盤の力学物性に及ぼす割れ目の影響は小さいとした調査当初の想定は概ね妥当であったと思われる。

図-8 にHDB-1, 3, 6孔のコアで実施した三軸圧縮試験結果⁹⁾をまとめたものを示す。強度特性についても変形特性と同様の考え方が成り立つと思われる。CD試験時のピークと残留時の粘着力と内部摩擦角を見ると、粘着力に関しては50%程度減少しているものの、内部摩擦角は数°の差しかない。これは、強度が弱く岩石の構成粒子が細かいため、せん断面が形成されても面の凹凸が力学挙動にほとんど影響しないためと推定される。これは、建設予定の地下施設周辺岩盤中に、せん断面の形成を伴う破壊が生じた場合にも、支保工により内圧を受けた状

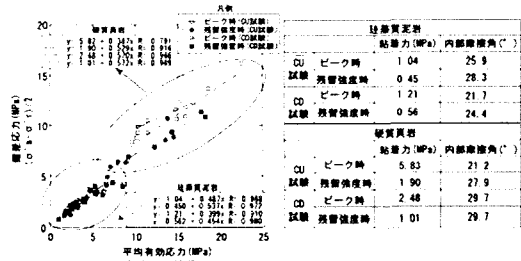


図-8 HDB-1, 3, 6 孔における三軸圧縮試験結果

態では岩盤としての透水性に生じる変化は結晶質岩と比べ小さくなることを示唆していると思われる。

(4) 地質・地質構造と岩石・岩盤物性との関連性に関する評価のまとめ

(1)～(3)の評価で得られた幌延の珪質岩盤の力学的な特徴は以下の通りである。

- ①調査対象の珪質岩盤は、国内の同時期の堆積軟岩と比べ力学的に特異なものではないと考えられる。
- ②深度方向の物性値分布の傾向は、珪藻質泥岩・硬質頁岩といった地質学的な岩相の違いと良く対応する。
- ③原位置岩盤の力学物性は原位置応力状態に依存しており、弾性状態では多孔質連続体として近似できるものと考えられる。破壊後の挙動については、珪藻質泥岩と硬質頁岩で異なってくる可能性があるが、ひずみ軟化を示す場合に見られるせん断面の形成による岩盤の初期物性は小さいと思われる。

5. 研究所設置地区およびその周辺の初期応力状態に関する評価

(1) 国内に分布する岩盤中の初期応力状態との比較

図-9 は、長がまとめた岩石の単位体積重量別の応力値の深度分布¹⁰⁾のうち、本地域の声間層・稚内層（20～22kN/m³）に近い岩盤における測定結果とHDB-1, 3, 6, 11

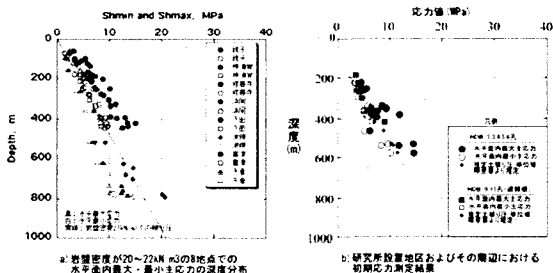


図-9 国内の数箇所の測定で得られた主応力値の深度分布と本測定結果との比較(左図：長(2002)¹⁰⁾を一部改変)

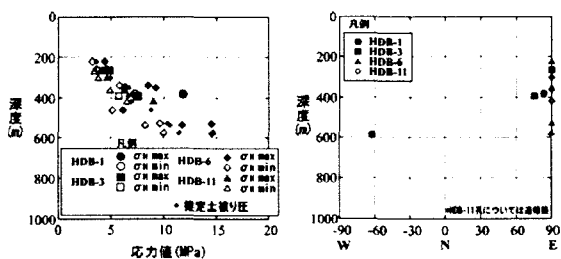


図-10 HDB-3, 6, 11 孔における初期応力測定結果
(断層西側領域)

孔で実施した測定結果を比較したものである。図 9 b) に示す本初期応力測定で得られた主応力値やその深度変化の傾向は、a) の国内のほぼ同等の単位体積重量の岩盤での結果とに類似していると言える。従って、研究所設置地区およびその周辺の初期応力状態は、国内に分布するほぼ同等の密度を有する岩盤中のそれと大きく異なる条件であると判断される。

(2) 地質・地質構造と初期応力状態との関係

図-10 に大曲断層西側の各孔の初期応力測定結果を示す。全体的には、水平面内最小主応力値は土被り圧に概ね等しく、最大主応力値は最小主応力の 1.5 倍程度の範囲内に分布する。水平面内最大主応力方向は、水压破砕法による測定結果およびEMIやBHIV検層から深度 300m より深い領域で断続的に見られるボアホールブレイクアウトの方位から、場所・岩相によらずほぼ東西方向であり深度方向にほとんど変化しない。断層東側では明瞭ではないが、断層西側の珪藻質泥岩中は等方応力状態に近く、稚内層である遷移帯および硬質頁岩層では最大・最小主応力比が急激に大きくなる傾向が見られる。これらの層は、珪藻質泥岩層に比べ岩盤剛性が高いため、既往の研究¹¹⁾での指摘のように岩盤剛性が高い所に応力が集中している可能性がある。

・ 研究所設置地区およびその周辺を対象とした岩盤力学概念モデル

(1) 岩盤物性の3次元分布

4. (1) に述べたように、研究所設置地区およびその周辺の岩盤を構成する珪質岩盤の岩相変化と物理・力学的な物性変化は遷移帯を除きほぼ一対一対応する。HDB-7 孔で見られる勇知層の砂岩以外において、3km 四方内の岩盤は珪藻質泥岩、遷移帯および硬質頁岩で構成されることが明らかになっている。図-11 はこれらの特徴を考慮し、各ボーリング孔での物性変化傾向を比較した結果である¹⁾。同図より、深度方向の密度や弾性波速度の変化は、地質構造に依存した形で深度1000m 程度までの範囲で3つのゾーンに区分でき、断層による鉛直変位の存在などを考慮して比較することで、3km 四方程度のエリア内の岩盤の力学的物性分布をボーリング孔の場所によ

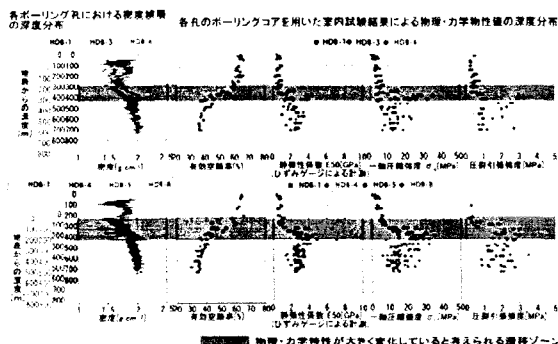


図-11 研究所設置地区およびその周辺における岩盤物性分布の比較

らず統一的に説明できることがわかる。

(2) 初期応力状態

5. (1), (2) に述べた研究所設置地区およびその周辺の初期応力場の特徴は以下のように整理できる。

- ・ 水平面内最大主応力方向は地表付近から深度1000m 程度までの範囲で変化せずほぼ東西方向である。
- ・ 水平面内最小主応力は、地表から深度1000m までの範囲で推定土被り圧以下である。
- ・ 水平面内最大主応力値は、最小主応力値の1.5倍程度の範囲内にある。
- ・ 珪藻質泥岩層中の応力状態は、硬質頁岩層中のそれに比べ水平面内では等方に近いと考えられる。

(3) 力学的概念モデル

(1), (2) に述べた岩盤物性・応力状態の特徴を示した研究所設置地区およびその周辺の力学的観点からの概念モデルを図-12 に示す¹⁾。珪質岩盤の力学物性には応力レベルに依存した変化があることから、各ゾーン内に程度の差はある程度の物性の深度依存性が存在すること、物性変化の特徴である連続的かつ急激な物性変化領域の存在をモデル上に表現した。また、原位置岩盤の物性分布は地質・地質構造の3次元分布とおおむね対応しかつ力学的には多孔質連続体と近似できることから、3次元地質構造モデルにより力学的な物性分布も表現できるものと仮定し、モデル上には3つのゾーンに対応する物性の特徴のみ記載した。

7. おわりに

今後、構築した概念モデルに基づき地下施設建設に伴う空洞周辺岩盤中の力学的影響予測を行う予定であるが、対象岩盤が地表から深度約1000m の範囲まで珪質岩のみが分布するきわめて物性的なコントラストが小さい岩盤であったため、適用した調査手法の中では、物理検層のようなボーリング孔全長に渡って連続データを取得できかつ解像度が高い方法をベースとした評価がモデル化の

上では極めて有効であることがわかった。

一方、堆積岩の大きな特徴である堆積構造に起因する力学的異方性は、その存在自体はAE法による応力測定時の一軸圧縮試験結果¹²⁾やHDB-3孔における異方性に関する室内試験結果¹³⁾で既に明らかになっており、鉛直方向に比べ水平方向の岩石強度が大きい傾向にあると思われる。しかし、岩石の力学的異方性の要因となるその内部構造については未だ不明な点が多く、異方性の要因を見出すにいたっていない。これらは、今後の課題である。

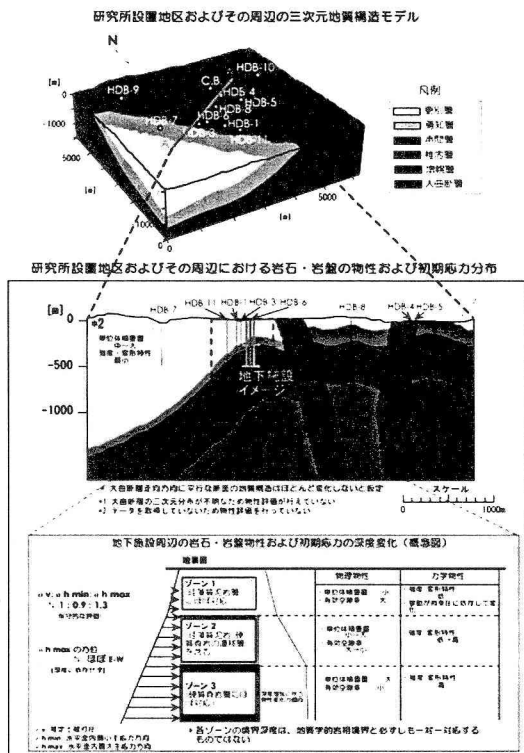


図-12 研究所設置地区およびその周辺の岩盤力学的概念モデル

参考文献

- 1) 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知識基盤の構築—平成17年度とりまとめ 分冊1 深地層の科学的研究, pp. 4-93~4-146, JNC TN1400 2005-014, 2005 (印刷中)。
- 2) 佐藤 他：深地層を対象とした力学的調査の現状, 原子力バックエンド研究 Vol. 4 No. 2, pp. 83~89, 1998.
- 3) 山本 他：珪質岩に対するAE法による初期地圧測定の実用性に関する検討, 第60回土木学会年次学術講演会講演要旨集, pp. 675~676, 2005.
- 4) 佐藤 他：文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集, 動燃事業団技術報告書, PNC TN7410 92-018, 1999.
- 5) 越知 他：原位置試験・室内試験・原位置挙動による堆積軟岩の変形特性, 材料 Vol. 44, No. 502, pp. 856~861, 1995.
- 6) 松井 他：MIU-2 号孔における力学特性調査結果及び月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル, JNC TN7420 2000-001, p. 30, 2000.
- 7) 小川 他：拘束圧下における幌延堆積岩の弾性波速度特性, 第59回土木学会年次学術講演会講演要旨集, pp. 865~866, 2004.
- 8) 丹生屋 他：孔内載荷試験による深部堆積岩の変形特性評価, 第40回地盤工学会発表講演集, pp. 559~560, 2005.
- 9) 松井 他：幌延地域の新第三紀堆積岩の力学特性, 第59回土木学会年次学術講演会講演要旨集, pp. 23-24, 2004.
- 10) 長 秋雄：高レベル放射性廃棄物地層処分深度の岩盤初期応力状態, 物理探査学会第107回学術講演会講演予稿集, pp. 118-121, 2002.
- 11) 石田 他：地殻応力測定結果に見られる岩盤の不均質性の影響, 地震第2号第40巻, pp. 329-339, 1987.
- 12) 中川 他：幌延泥岩を用いたAE法による地殻応力推定の試み, 平成15年度資源素材学会北海道支部春季講演会講演要旨集, pp. 33-34, 2003.
- 13) 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報告—平成14年度報告—, JNC TN1400 2003-004, p. 3-83, 2003.

GEOMECHANICAL CONCEPTUAL MODEL ON NEOCENE DIATOMACEOUS ROCK MASS BASED ON LABORATORY AND IN-SITU MEASUREMENT

Sumio NIUNOYA, Hiroya MATSUI

Japan Nuclear Cycle Development Institute is conducting the underground research laboratory project in Neocene diatomaceous rock in about 3×3 km area at Horonobe-cho, Hokkaido. This paper introduces the geomechanical conceptual model with feature of in-situ-stress state and distribution of mechanical properties estimated from results of laboratory and in-situ measurements. The distribution of the properties correspond with the geological structure and the existence of transition zone where the properties change occurs continuously and radically is specific feature. The directions of σ_h max are almost EW until 1000m depth and the magnitudes are within 1.5 times of σ_h min approximately.