

(4) 深地層の研究施設計画に関する 第2期中期計画取りまとめ案について

②個別の成果の取りまとめ案について － d. 岩盤力学 －

地層処分研究開発部門

東濃地科学研究ユニット

幌延深地層研究ユニット

A1) 取りまとめの着眼点（岩盤力学分野）

A1) 地質環境の初期状態の理解:

地上から初期応力状態及び岩盤力学特性を把握するための調査・解析

- 着目した地質環境の特性とプロセス
 - 応力場
 - 岩盤の物理・力学特性
 - 地温勾配分布
 - 岩盤の熱特性
- 達成目標
 - 力学的に好ましい環境条件の領域を判断できる

成果ダイジェスト メッセージ（岩盤力学）

A1) 地質環境の初期状態の理解：

地上から初期応力状態及び岩盤力学特性を把握するための調査・モデル化・解析事例を提示

- 地上からのボーリング孔を用いた原位置応力測定(水圧破碎法)やボアホールブレイクアウト, コアを用いた応力測定(DSCA法など)の適用により, 地下施設の設計や掘削影響領域の推定に必要なレベルで地下深部の初期応力状態を推定可能
- 個別技術の適用性の確認(例えば水圧破碎法)
- 原位置で得られた初期応力を入力値とし, 有限要素法等による逆解析手法を用いて広域応力場を推定する方法を開発
- 物理・力学特性の深度分布を把握し, 岩盤力学モデルを構築・更新。第1段階の施設設計時のデータを比較し, その適切性を評価

【共通事項・相違点】

- 硬岩と軟岩 → 適用できる手法が限定
- このような条件を除けば, ほとんど全ての岩種に適用できる汎用的な技術

成果ダイジェストA1) 地質環境の初期状態の理解

一岩盤の初期応力状態及び岩盤力学特性を把握するための調査技術一

地上および地下からの調査段階では、原位置での測定、コアを用いた測定、数値解析などの併用により、処分場の施設スケールの初期応力状態や岩盤物性を評価することが可能

(瑞浪)

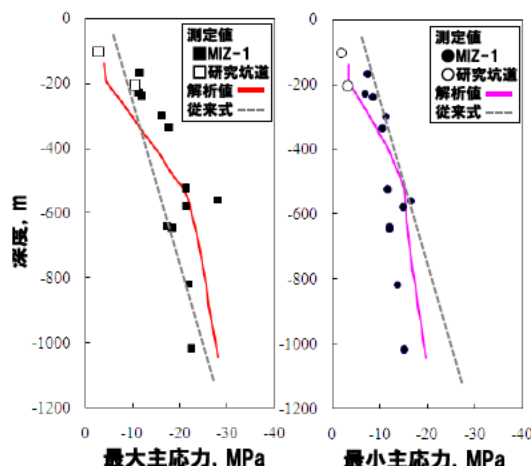


図1 実測値と解析結果の比較

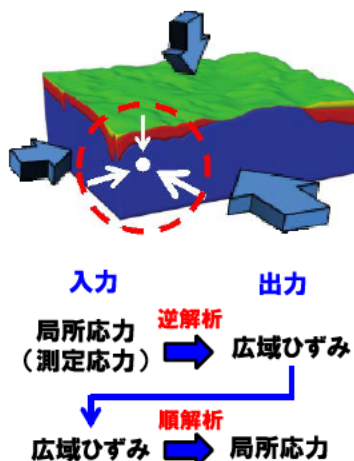


図2 広域応力場の推定方法

- 地上からのボーリング孔を用いた原位置応力測定(水圧破碎法), コアを用いた応力測定(DSCA法など)の適用により, 地下施設の設計や掘削影響領域の推定に必要なレベルで地下深部の初期応力状態を推定可能
- 水圧破碎法は, 流量を孔内で計測できる高剛性型の装置を適用して, 再開口圧を明瞭に識別することが重要
- 原位置で得られた初期応力を入力値とし, 有限要素法等による逆解析手法を用いて広域応力場を推定する方法を開発し, その適用性を確認

(幌延)

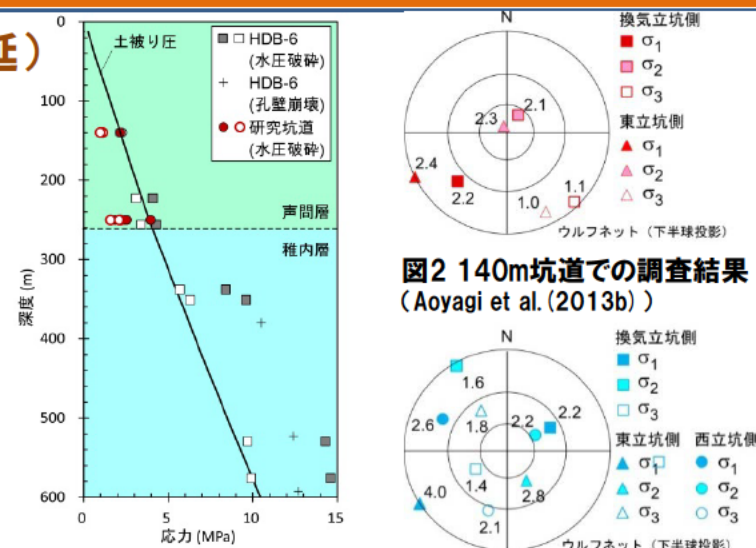


図1 地上からの調査結果と坑道内での調査結果の比較 (after Aoyagi et al. (2013b))

図2 140m坑道での調査結果 (Aoyagi et al. (2013b))

図3 250m坑道での調査結果 (Aoyagi et al. (2013b))

- 地上からのボーリング孔を用いた水圧破碎法および孔壁のボアホールブレイクアウトに基づく解析により, 地下施設の設計や掘削影響領域の推定に必要なレベルでの地下深部の初期応力状態を推定可能
- 堆積軟岩の場合, 水圧破碎法に用いる測定方式(ワイヤーライン方式またはロード方式)の選定は, ボーリング孔の自立性に基づいて判断することが重要
- 測定深度の選定においては, 地質構造モデルと岩盤物性分布に基づくことが重要

原位置での初期応力や岩盤物性を評価する際の留意点に関する知見の蓄積, 精密調査段階で実施する処分場設計などに利用可能な情報として整理

成果ダイジェストA1) 地質環境の初期状態の理解

一岩盤の初期応力状態及び岩盤力学特性を把握するための調査技術一

地上および地下からの調査段階では、原位置での測定、コアを用いた測定、数値解析などの併用により、処分場の施設スケールの初期応力状態や岩盤物性を評価することが可能

(瑞浪)

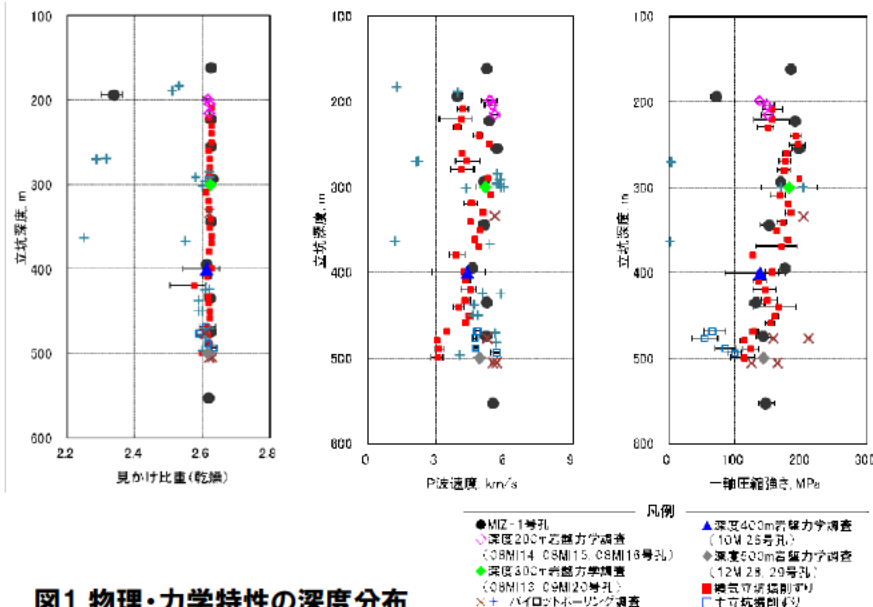


図1 物理・力学特性の深度分布

- 第2段階で得られた物理・力学特性は、第1段階のMIZUHO-1号孔のデータと概ね整合的であり、地質状況に対応した物性値となっていることが示唆
- 岩盤力学モデルで更新。また、第2次取りまとめにおいて検討された岩盤物性の統計量と第1段階調査と第2段階調査で得られた土岐花崗岩の岩盤物性の統計量との対比を実施しその相違点と類似点を整理

(幌延)

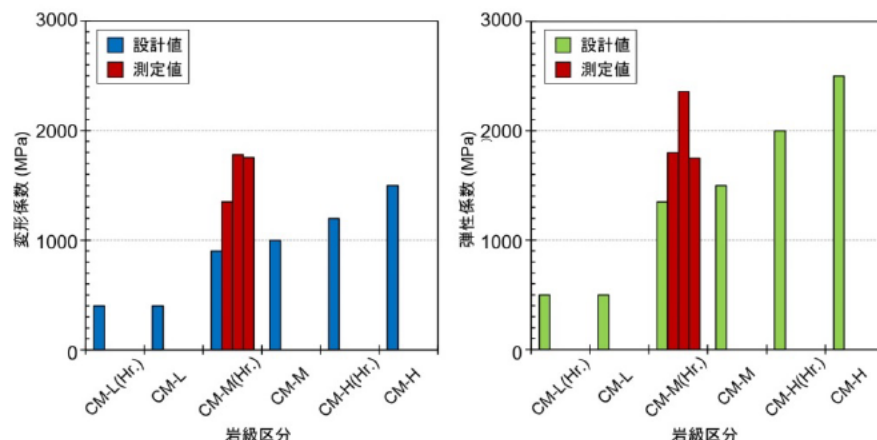


図1 平板載荷試験の結果(350m調査坑道)

- 平板載荷試験結果、地上からのボーリング調査結果と概ね同程度あるいはやや大きい値。地下施設の設計の観点からは、地上からのボーリング調査に基づく岩盤の変形特性の予測は概ね適当
- ロックせん断試験の結果も、概ね事前に予測した岩盤の破壊規準の範囲にあり、地下施設の設計の観点からは、事前予測の基準線は概ね適切

原位置での初期応力や岩盤物性を評価する際の留意点に関する知見の蓄積、精密調査段階で実施する処分場設計などに利用可能な情報として整理

A2) A3) 取りまとめの着眼点（岩盤力学分野）

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

施設建設・作業時のEDZ(掘削損傷領域・応力再配分領域)を推定する調査・解析

- 着目した地質環境の特性とプロセス
 - EDZの幅・特性
- 達成目標
 - 坑道掘削に支障がないことを判断できる

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

長期的な岩盤力学特性の変化の評価・解析

- 着目した地質環境の特性とプロセス
 - EDZを予測する手法
 - 岩盤の長期挙動を予測する手法
- 達成目標
 - 処分ピットの掘削, 廃棄体定置等に支障がないことを判断できる

成果ダイジェスト メッセージ（岩盤力学）

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

施設建設・作業時のEDZ(掘削損傷領域・応力再配分領域)を推定する調査・解析の事例を提示

- 掘削方式や施工方法ごとにEDZ(掘削損傷領域)の幅を推定
- EDZの評価に際しては、天然割れ目の取扱いとEDZ割れ目の評価が重要
- EDZの時間依存的挙動に関する事例を提示

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

長期的な岩盤力学特性の変化の評価・解析事例の提示

- クリープ試験, 溶解試験, 押し込み試験などにより, 岩盤の長期挙動を推定するための基礎データを取得し, 構成方程式により推定する事例を提示

成果ダイジェストA2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解 —地下施設建設・操業に伴う掘削影響領域の評価・解析技術—

施設建設に伴う掘削影響領域は坑道周辺での計測と数値解析により推定可能

(瑞浪)

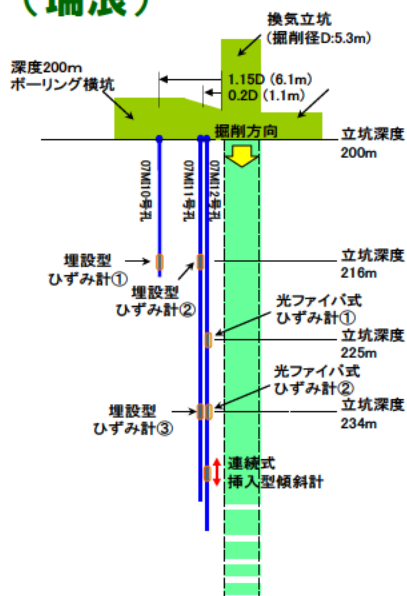


図1 立坑掘削に伴うひずみ計測

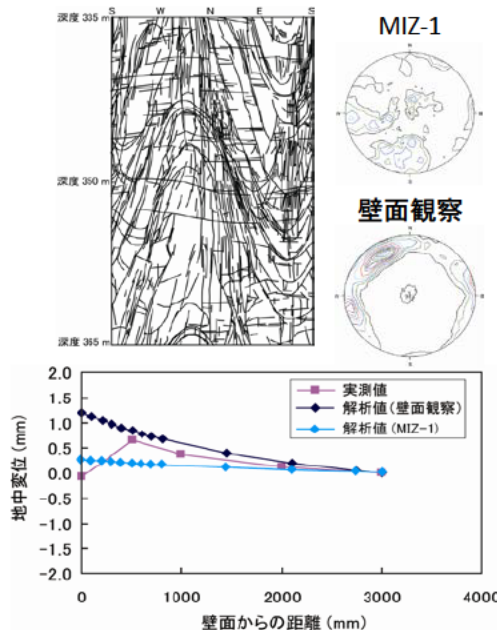


図2 解析値と実測値の比較

- 立坑掘削によって生じるひずみは、弾性解析によって得られるオーダーと概ね一致。掘削影響領域の範囲は立坑壁面から1m以内と推定
- クラックテンソル理論を用いた等価連続体解析を実施する場合、地上からの調査で推定するクラックテンソルは、高角度割れ目の推定などが困難であり、岩盤変位や応力を過小に評価してしまうことに注意が必要

(幌延)

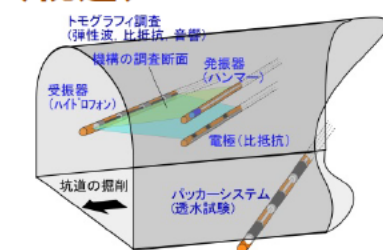


図1 坑道での掘削影響領域調査

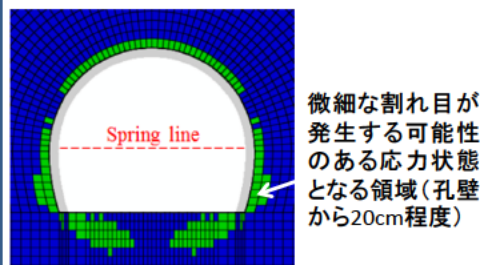


図3 坑道周辺岩盤内応力の解析結果 (Aoyagi et al. (2013a))

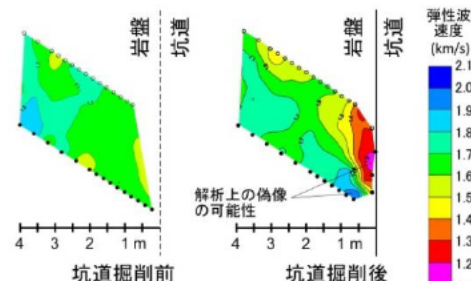


図2 弾性波トモグラフィ結果 (Aoyagi et al. (2013a))

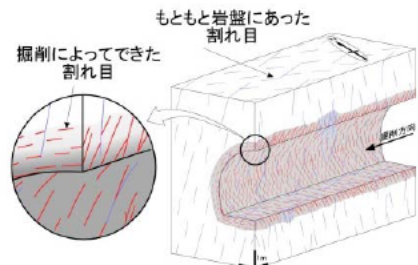


図4 坑道周辺の割れ目分布の概念モデル (Tokiwa et al. (2013))

- 坑道掘削によって生じる弾性波速度が明瞭に低下する領域は、側壁にて約1m以内。速度低下の主な要因は、掘削に伴う割れ目の発生・再動によると推定
- 掘削影響領域の評価においては、もともと岩盤中に分布する天然割れ目とともにEDZ割れ目を調査することが重要
- 掘削影響領域の掘削後の継時変動はほとんどない

坑道閉鎖(グラウト・プラグ)仕様の決定や安全評価に資する情報の蓄積

成果ダイジェストA3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解 —長期的な岩盤力学特性の変化の評価・解析技術—

処分で想定している超長期スケールでの岩盤の力学挙動の推定を実施

(瑞浪)

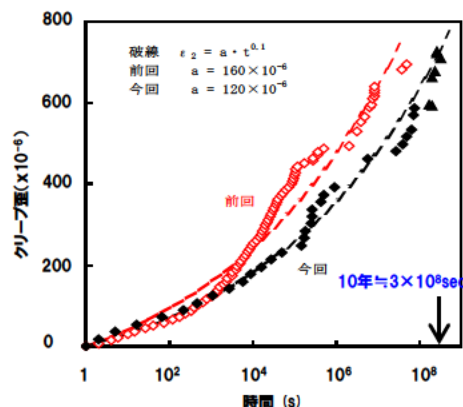


図1 田下凝灰岩の長期クリープ試験

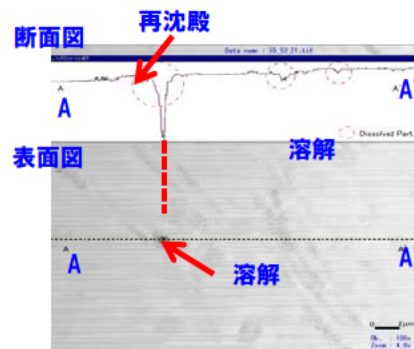


図2 石英の圧力溶解現象の観察

- 田下凝灰岩の10年を超す長期クリープ試験などを実施し、岩石の長期挙動の把握や坑道の力学的な超長期挙動を解析的に検討するための基礎データを取得
- 花崗岩の一軸圧縮試験を行い、顕微鏡による微視的観察や石英の圧力溶解現象を評価するための化学分析結果から、花崗岩のマイクロクラック進展などを評価
- 土岐花崗岩の坑道周辺の超長期挙動を予測

(幌延)

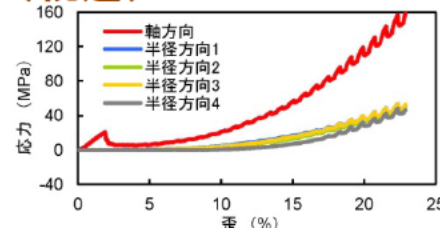


図1 岩石の押し込み試験結果
(原子力機構(2013))

表1 押し込み試験中のnの値の変化
(原子力機構(2013))

載荷方向と層理面との関係	押し込み最大応力 (MPa)	ピーク強度でのn (平均値)	押し込み試験中のn (平均値)		
			歪10%	歪15%	歪20%
平行	40	34	37	-	-
	80	33	34	40	-
	160	35	35	37	30
垂直	40	41	40	-	-
	80	40	37	36	-
	160	36	36	38	32

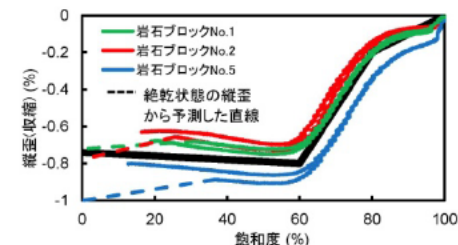


図2 乾燥収縮試験結果
(原子力機構(2013))

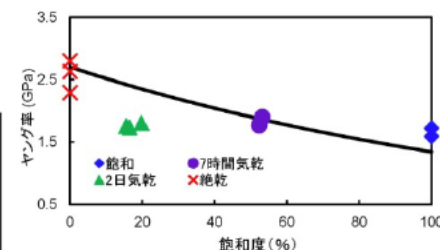


図3 飽和度とヤング率の関係
(原子力機構(2013))

- 稚内層珪質泥岩の強度回復特性に関する試験を実施し、同特性に及ぼす時間依存及び層理面の影響についてのデータを蓄積、構成式の改良案を提示
- 岩石試料を用いて乾燥収縮試験を実施し、変形量と飽和度、層理の関係を検討するためのデータを取得併せて、含水状態を変化させて強度試験を実施し、変形係数・強度と飽和度の関係が指数関数で表現できることを確認

施設閉鎖時後の岩盤力学的な特性の変化幅(変形や破壊現象)を把握する上での基礎データの取得を実施

まとめ（岩盤力学）

A1) 地質環境の初期状態の理解

- 地上および地下からの調査段階では、原位置での測定、コアを用いた測定、数値解析などの併用により、処分場の施設スケールの初期応力状態や岩盤物性を評価する事例を提示 → **概ね完了**

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

- 施設建設に伴う掘削影響領域は坑道周辺での計測と数値解析により推定する事例を提示 → **実施中**

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解

- 超長期スケールでの岩盤の力学挙動の推定を実施 → **実施中**

必須の実施項目

瑞浪	幌延
EDZ連成挙動の理解(再冠水・埋戻し)	坑道閉鎖時のEDZ挙動の理解
地震時のEDZ挙動の理解	EDZのセルフシーリング挙動の理解
地質学的時間スケールにおける初期応力状態・EDZの長期変動幅の推定	

(参考資料)

論文・学会発表リスト(岩盤力学分野)

【瑞浪】

- 木村直樹, 松木浩二, 中間茂雄, 佐藤稔紀: 不均一岩体の広域応力場評価法, 資源と素材, Vol.119, No.10,11, pp.655-662 (2003).
- Matsuki, K., Nakama, S., Sato, T.: Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.46, No.1, pp.31-50 (2009).
- G. Li, Y. Mizuta, T. Ishida, H. Li, S. Nakama, T. Sato: Stress field determination from local stress measurements by numerical modelling, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 46, 138-147 (2009).
- Yoshitaka NARA, Sang Ho CHO, Takaya YOSHIZAKI, Katsuhiko KANEKO, Toshinori SATO, Shigeo NAKAMA, Hiroya MATSUI: Estimation of three-dimensional stress distribution and elastic moduli in rock mass of the Tono area, International Journal of the JCRM, Vol.7, No.1, 1-9 (2011).
- Tanno, T., Hirano, T. and Matsui, H.: Development of Method for Evaluation of Three Dimensional Distribution of in situ Stress State and Preliminary Estimation of Applicability, Rock Stress and Earthquakes, Xie (ed.), Taylor & Francis Group, London, pp.521-526 (2010).
- T. Sato, T. Tanno, R. Hikima, H. Sanada and H. Kato: In situ stress measurement in the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings on the 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, pp.353-358 (2013).
- 松井裕哉, 平野 亨: 超深地層研究所計画 第2段階の力学調査結果に基づく岩盤力学概念モデルの妥当性評価, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.48-53 (2010).
- 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 加藤春實: 水圧破碎法による初期応力データの品質について-花崗岩における実測結果に基づく高剛性装置の適用性と最大主応力値の評価-, Journal of MMIJ, Vol.128, No.7, pp.449-454 (2012).
- 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 加藤春實: 円錐孔底ひずみ法とコアディスキングについて-土岐花崗岩における湧水孔での測定結果を例にして-, Journal of MMIJ, Vol.129, No.2,3, pp.59-64 (2013).
- H. Sanada, R. Hikima, T. Tanno and T. Sato: Application of differential strain curve analysis to the Toki Granite at the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 59, pp.50-56 (2012).

【幌延】

- 近藤桂二, 津坂仁和, 稲垣大介, 杉田裕, 加藤春實, 丹生屋純夫: “幌延深地層研究所における珪藻質泥岩を対象とした水圧破碎法による初期地圧の測定”, 第13回岩の力学シンポジウム講演論文集, pp.583-588 (2013).
- K. Tsusaka, D. Inagaki, S. Niunoya, M. Jo: “An investigation on mechanical properties of in-situ rock mass at the Horonobe Underground Research Laboratory”, Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium (2014). (submitted).
- 山本卓也, 松井裕哉, 堀内康光, 富永英治: “幌延深地層研究計画における堆積軟岩の熱特性について”, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.153-158 (2005).

個別研究成果における達成度(岩盤力学分野)

反映先	達成目標	必要な研究開発項目	具体的成果(ノウハウなどの一例)	達成度
サイト選定に関する意思決定	力学的に好ましい環境条件の領域を判断できる	地上から岩盤の初期応力状態を理解するための調査技術	➤ 地上からのボーリング孔を用いた原位置応力測定(水圧破碎法)やボアホールブレイクアウト、コアを用いた応力測定(DSCA法など)の適用により、地下施設の設計や掘削影響領域の推定に必要なレベルで地下深部の初期応力状態を推定可能 ➤ 測定深度の選定においては、地質構造モデルと岩盤物性分布に基づくことが重要	○
		個別技術(初期応力測定手法)の適用性の評価	➤ 流量を孔内で計測できる高剛性型の装置を適用して、再開口圧を明瞭に識別することが重要 ➤ 堆積軟岩の場合、水圧破碎法に用いる測定方式(ワイヤーライン方式またはロード方式)の選定は、ボーリング孔の自立性に基づいて判断することが重要	○
		地上から岩盤の初期応力の3次元分布を推定するための解析手法	➤ 原位置で得られた初期応力を入力値とし有限要素法等による逆解析手法を用いて広域応力場を推定する方法を開発	○

個別研究成果における達成度(岩盤力学分野)

反映先	達成目標	必要な研究開発項目	具体的成果(ノウハウなどの一例)	達成度
建設に関する意思決定	坑道掘削に支障がないことを判断できる	EDZを予測する手法	➢ 掘削方式や施工方法ごとにEDZ(掘削損傷領域)の幅を推定 ➢ EDZの評価に際しては、天然割れ目の取扱いとEDZ割れ目の評価が重要 ➢ EDZの時間依存的挙動に関する事例を提示	△
処分開始に関する意思決定	処分ピットの掘削、廃棄体定置等に支障がないことを判断できる	EDZを予測する手法 岩盤の長期挙動を予測する手法	➢ クリープ試験、溶解試験、押し込み試験などにより、岩盤の長期挙動を推定するための基礎データを取得し、構成方程式により推定する事例を提示	△

次の研究計画において対象とすべき課題

反映先	達成目標	必要な研究開発項目	課題	重要度
埋戻しに関する意思決定	坑道閉鎖(グラウト・プラグ)仕様が決定できる	EDZを計測する手法	➤ 熱応力負荷等による破壊現象のモデル化, 計測事例の提示 ➤ EDZの連成挙動の理解 ➤ 坑道閉鎖(埋戻し)時のEDZの挙動の把握, 推定方法の高度化	○
廃棄体定置終了・最終閉鎖に関する意思決定	施設閉鎖後の岩盤力学挙動を予測できる	岩盤の長期挙動の予測・評価手法	➤ 施設閉鎖後の地質学的時間スケールにおける岩盤の初期応力状態, EDZの長期変動幅の推定 ➤ 地震時のEDZの挙動の理解 ➤ EDZのセルフシーリングのメカニズムの評価とモデル化	○