

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設における 回収可能性維持による処分坑道の 力学的影響評価

多田 浩幸^{1*}・郷家 光男²・戸栗 智仁²・石井 智子³・高本 尚彦⁴・今井 政孝⁵

¹清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

²清水建設株式会社 土木総本部土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)

³公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター (〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号)

⁴公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 現：清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

⁵公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 現：株式会社ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部 (〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町二丁目 272-3)

*E-mail: tada_h@shimz.co.jp

本研究では、最終処分施設の閉鎖までの間の定置した廃棄体の搬出の可能性、すなわち「回収可能性」を維持した場合の坑道安定性への影響とバリア機能への影響に関する評価技術を整備することを目的とした処分坑道への力学的影響の評価方法の検討を実施した。回収可能性維持期間中の周辺岩盤の変形による坑道安定性を、時間依存性の考慮が可能な解析手法を用いて評価した。解析には周辺岩盤や支保工の状態や機能の時間変化（支保工の場合は劣化）を考慮した。解析結果から、坑道安定性の保持可能な期間に関する評価方法を検討した。

Key Words : high level radioactive waste, retrievability, stability of drift, creep

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の回収可能性に関して、平成27年5月22日に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」¹⁾において、実施主体は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するものとされており、国及び関係研究機関は、最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化することが求められている。

原子力環境整備促進・資金管理センターは、高レベル放射性廃棄物の地層処分における回収可能性の維持に関して、回収可能性維持期間における作業環境の安全性や閉鎖後の長期的安全性に与える影響等を検討している。本研究では、地層処分場のサイト選定時に回収可能性を一定の期間維持した場合の影響を解析的に評価することを目的として、処分坑道への力学的影響の評価方法を検

討した。

2. 力学的影響の解析的評価方法

力学的影響評価は、既往の検討²⁾で示されている処分場の設計案に基づき、岩盤や支保工などの各材料の構成モデルを設定した力学解析により行った。力学解析は回収可能性の維持による安全性への影響を定量的に評価できる条件で行った。すなわち、回収可能性維持期間や坑道の開放状態を考慮したときの、回収可能性維持期間における作業環境の安全性および閉鎖後の長期安全性に与える影響について、時間依存性を考慮することができる解析手法により評価した。坑道の安定性に関する解析的評価は、岩盤や支保工などの材料ごとに、一般的に用いられている安定性の評価指標を用いて行い、指標に基づく判定により、坑道安定性の保持期間を検討した。評価指標については、岩盤では最大せん断ひずみ、支保工では応力度を用いた。

力学的影響評価では、回収可能性維持期間中の周辺岩

盤の長期的変形による坑道安定性を評価することにした。その際、坑道安定性に影響を与える要因として、岩盤のクリープ変形、支保工を構成するセメント系材料の溶脱による劣化、埋戻し材・緩衝材の飽和に伴う力学特性の変化を抽出し、これらの現象を考慮することにした。

3. 解析フローと解析条件

(1) 力学的影響評価の解析フロー

第2次取りまとめ³⁾では、緩衝材、岩盤の安定性に影響を与える可能性のある種々の現象に対して、経時変化や相互作用の程度を把握するための解析を行い、長期構造力学安定性の検討、評価が実施されている。

第2次取りまとめの検討結果および西村ら⁴⁾の既往研究を参考にして、岩盤、支保工、緩衝材、オーバーバック、埋戻し材の各要素で想定される現象を整理し、図-1に示すような力学的影響評価の解析フローを設定した。力学的影響評価は、坑道掘削解析、処分孔掘削解析、長期力学解析の手順で行った。長期力学解析では、 $t=0y$ において掘削により再配分された応力状態を、初期応力状態とする。したがって、長期力学解析の実施に先立って、人工バリア定置前の坑道および処分孔の掘削解析を実施し、得られた応力状態を長期力学解析における初期応力状態とした。長期力学解析では、処分坑道および処分孔の掘削後から周辺岩盤のクリープ変形が始まるものとし、それが続くものとした。

(2) 掘削解析

長期力学解析における初期応力状態を設定するために、人工バリア定置前の処分坑道および処分孔の掘削解析を実施した。掘削解析は、第2次取りまとめで実施された方法に従い、Mohr-Coulombの破壊規準に従う完全弾塑性モデルを採用し、横置き方式の処分坑道においては2次元解析にて、縦置き方式の処分坑道においては3次元解析にて検討を行った。

処分坑道の仕様については、Yamamotoら²⁾の設計例の参考値に基づいて設定した。岩盤物性は、表-1に示す値を用い、検討深度は深成岩が1,000m、新第三紀堆積岩が500mとした。深成岩は、基本的に、肌落ち防止などの作業安全性の観点から吹付けコンクリートの施工が必要となるが、構造部材としては考えないこととし、解析においては考慮しない（解析は無支保とする）こととした。新第三紀堆積岩は、吹付けコンクリートの厚さを200mm、鋼製支保工をH-154×151×8×12とし、材質はHT590とした。また、鋼製支保工の設置間隔はL=1.0mとした。吹付けコンクリートの物性値を表-2に示す。新第三紀堆積岩における解析は表-3に示す解析手順で行った。

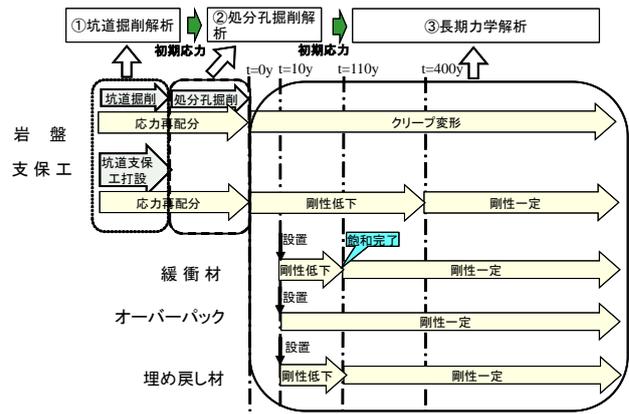


図-1 力学的影響評価の解析フロー
(西村ら⁴⁾の既往研究に加筆・修正)

表-1 岩盤の解析用物性値

	単位	深成岩	新第三紀堆積岩
一軸圧縮強度	MPa	115.0	15.0
引張強度	MPa	8.0	2.1
弾性係数	MPa	37000.0	3500.0
粘着力	MPa	15.0	3.0
内部摩擦角	deg	45.0	28.0
ポアソン比	-	0.25	0.3
飽和密度	Mgm ⁻³	2.67	2.20
処分深度	m	1000.0	500.0
側圧係数	-	1.00	1.07

表-2 吹付けコンクリートの物性値

項目	物性値
設計基準強度	36MPa
単位体積重量	23.0kN/m ³
弾性係数 (若材齢)	4,800MPa
弾性係数 (28日強度)	29,600MPa
ポアソン比	0.20

表-3 新第三紀堆積岩の解析手順

	横置き方式	縦置き方式
STEP 1	処分坑道掘削 (掘削解放率 65%)	処分坑道掘削 (掘削解放率 65%)
STEP 2	支保工の設置	支保工の設置 ※吹付けコンクリートの弾性係数は 4,800MPa
STEP 3	処分坑道掘削 (掘削解放率 100%)	処分坑道掘削 (掘削解放率 100%)
STEP 4		処分孔掘削 (掘削解放率 100%) ※吹付けコンクリートの弾性係数は 29,600MPa

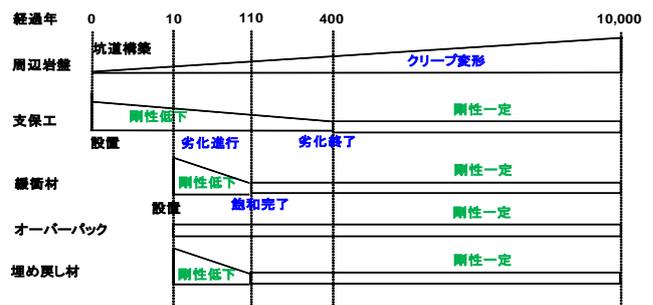


図-2 事象と経時変化の概念

(3) 長期力学解析

本研究で考慮した事象と経時変化の概念を図-2に示す。解析対象期間は、坑道掘削後10,000年間とした。

岩盤の長期の変形挙動を解析するためには、時間依存性の挙動や粘弾性的な挙動を考慮することが必要となる。本検討では、第2次取りまとめの岩盤クリープ解析において使用されている大久保ら⁹⁾が考案したコンプライアンス可変型モデルを用いた。

支保工の劣化については、コンクリートの溶脱特性を考慮し、設置直後から始まるものとした。吹付けコンクリートの溶脱については、既往の研究⁹⁾を参考にして溶脱速度を $t=0.5\text{mm/y}$ と設定した。この結果、厚さ200mmの吹付けコンクリートの場合、200/0.5=400年で溶脱が完了することになる。溶脱完了後の吹付けコンクリートのヤング率については、既往の研究⁹⁾と同様に、初期ヤング率の1/10になるものとした。溶脱完了後のポアソン比は、既往の研究⁷⁾を参考にして、0.45になるものと仮定した。コンクリートの弾性係数とポアソン比の経時変化を図-3に示す。ここで、支保工は、吹付けコンクリートと鋼製支保工で構成され、両者とも同様な剛性低下を示すものと仮定した。

緩衝材、オーバーバック、埋戻し材は、処分坑道構築後10年後に同時に設置するものとした。設置直後から緩衝材と埋戻し材の再冠水が始まり、100年間で飽和が完了するものと仮定した。飽和に伴う力学特性の変化については、飽和が完了するまで、ヤング率が一律低下することで表した。緩衝材の物性値の経時変化を図-4に示す。物性値は第2次取りまとめの検討を参考にして設定した。なお、緩衝材の膨潤圧はここでは考慮しなかった。埋戻し材は、現時点では明確な仕様が定まっていないことから、緩衝材と同様の弾性体としてモデル化した。

オーバーバックは、直径820mmの円形で弾性体としてモデル化した。第2次取りまとめより、弾性係数は $E_s=2.1 \times 10^5$ (MPa)、ポアソン比は $\nu_s=0.3$ と設定し、腐食の影響は考慮せず、物性値は一定値をとると仮定した。

前述の掘削解析から得られた初期応力状態を用いて、処分坑道および処分孔の長期力学解析を実施した。上述したように、岩盤をコンプライアンス可変型モデル、支保工、緩衝材、オーバーバック、埋戻し材を弾性体とし、物性の経時変化を考慮にいたる有限要素法による解析コードにより、2次元平面ひずみモデルの解析を実施した。

解析ケースとしては、岩盤条件、坑道断面（縦置き方式、横置き方式）、回収可能性維持期間における坑道開放状態オプション（緩衝材を設置した状態、処分坑道まで埋め戻した状態）を組合せて、8ケースを設定した。

処分坑道および処分坑道内部の各材料の形状、寸法の例として、深成岩・横置き方式と新第三紀堆積岩・横置き方式の場合を図-5に示す。また、深成岩・横置き方式と

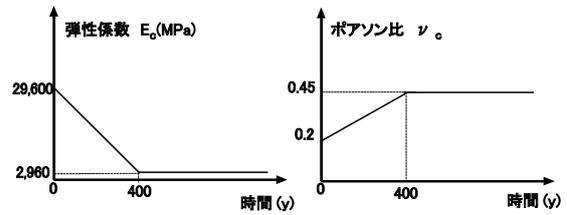


図-3 コンクリートの弾性係数とポアソン比の経時変化

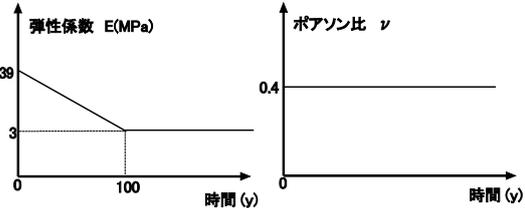


図-4 緩衝材の物性値の経時変化

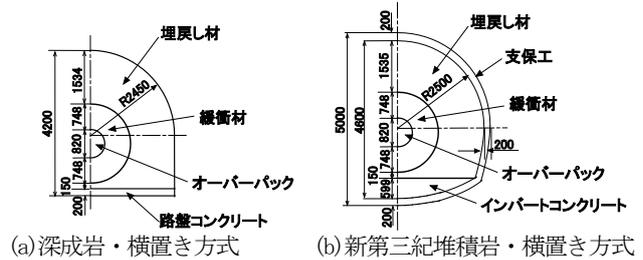
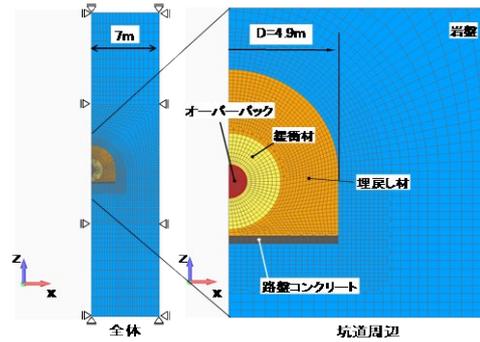
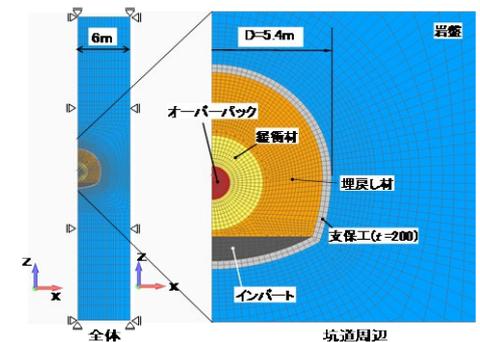


図-5 処分坑道内部の各材料の形状、寸法の例



(a) 深成岩・横置き方式



(b) 新第三紀堆積岩・横置き方式

図-6 解析モデルの例

表-4 クリープ解析用物性値

物性区分 (略称)	深成岩	新第三紀堆積岩
n_0	30	20
m	20	5

新第三紀堆積岩・横置き方式の場合の解析モデルの例を図-6に示す。本検討では、表-1で示した岩盤の解析用物性値に加え、クリープ挙動を表現するために、表-4に

示すクリープ解析用物性値を用いた。 m_0 はひずみ速度と一軸圧縮強度との関係を表す値、 m は強度破壊後の応力-ひずみ関係を表す値であり、岩種ごとの粘性挙動および破壊後の挙動を決定する重要な定数である。ここでは、第2次取りまとめの検討結果に基づき、深成岩、新第三紀堆積岩それぞれの m_0 、 m を設定した。なお、破壊規準は掘削解析と同様のMohr-Coulombの破壊規準を用いた。

4. 解析結果と坑道安定性の保持期間の検討

紙面の都合上、全ケースの解析結果は示せないため、ここでは、「深成岩・横置き方式・処分坑道まで埋戻し」（以降、深成岩・横置き）と「新第三紀堆積岩・横置き方式・処分坑道まで埋戻し」（以降、堆積岩・横置き）の2ケースにおける長期力学解析の結果を示す。

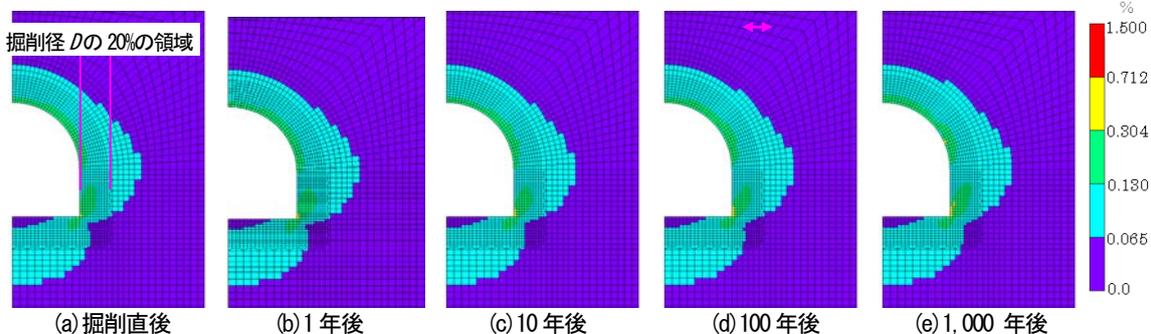


図-7 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布（深成岩・横置き）

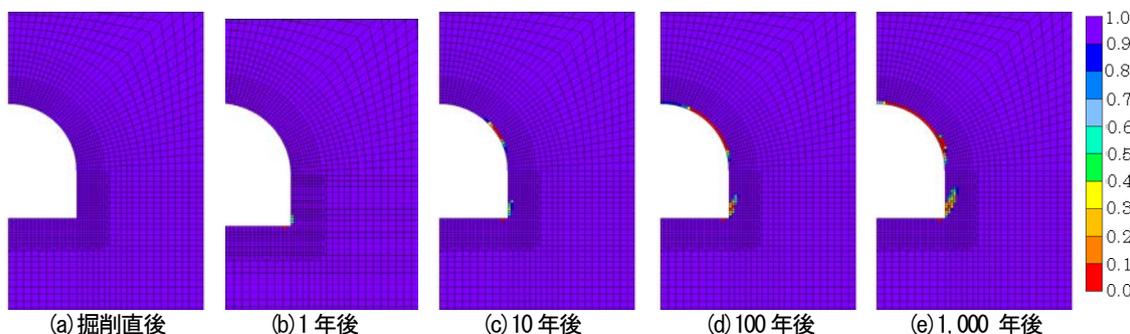


図-8 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布（深成岩・横置き）

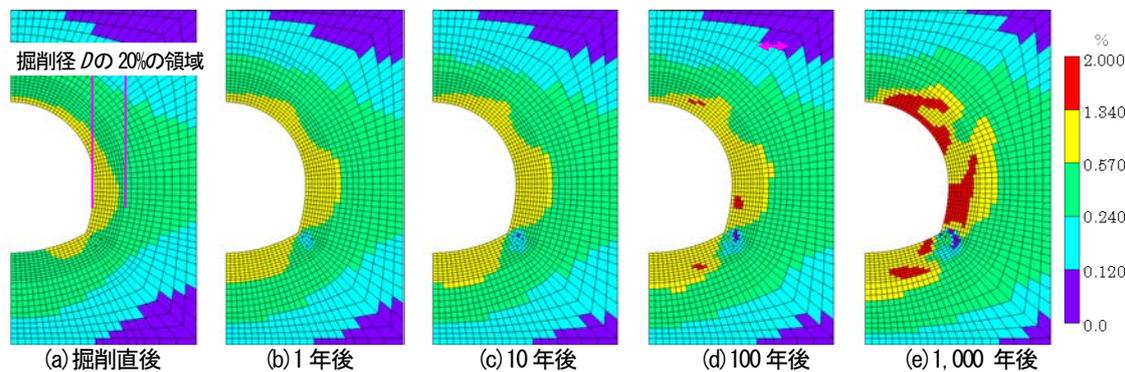


図-9 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布（堆積岩・横置き）

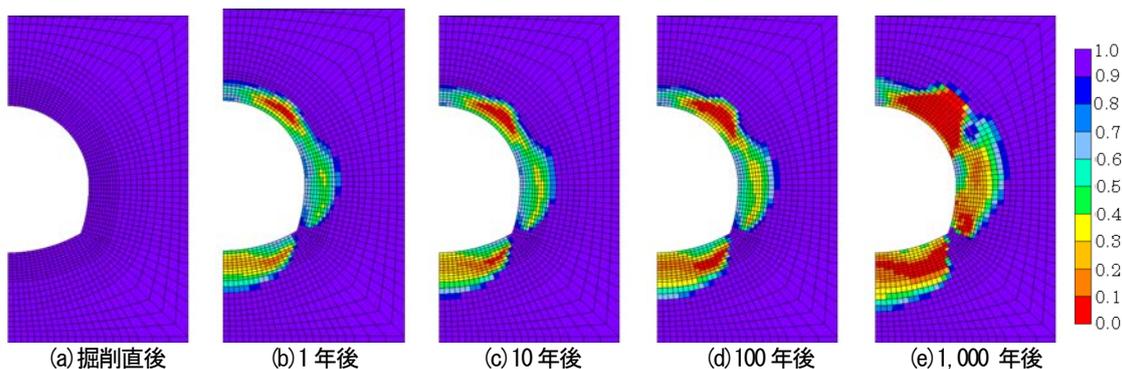


図-10 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布（堆積岩・横置き）

(1) 深成岩・横置きケースの解析結果

深成岩・横置きケースの解析結果として、処分坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布を図-7に、弾性係数の変化を図-8に示す。弾性係数の変化の値は、弾性係数Eを初期弾性係数E₀で除した値とした。

周辺岩盤の長期安定性の評価については、坑道構築時の評価基準として、文献⁹⁾を参考に、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみの平均を超過する領域が坑道掘削径Dの20%以下であることと、文献⁹⁾から、深成岩の限界せん断ひずみの平均を0.304%と設定した。

最大せん断ひずみ $\gamma_{max}=0.304\%$ 超過領域は、掘削直後、脚部の1要素に発生するのみで、その後も、脚部近傍で僅かに広がる程度で、1万年後においても壁面から30cmの範囲に留まり、坑道掘削径Dの20%以下の範囲にとどまっている。

図-8より、周辺岩盤は脚部の壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下するが、その他の領域では10年後に肩部で、千年後に天端で低下域が生じた。特に、脚部に弾性係数の低下領域が集中し、1万年後においては壁面から60cm程度まで広がった。

以上より、深成岩では掘削時に生じた最大せん断ひずみ $\gamma_{max}=0.304\%$ 超過領域は、掘削直後から1万年後までの間、坑道掘削径Dの20%以下を満足する結果となり、1万年後においても坑道の力学的安定性は確保される。

(2) 堆積岩・横置きケースの解析結果

堆積岩・横置きケースの解析結果として、処分坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布を図-9に、弾性係数の変化を図-10に示す。文献⁹⁾から新第三紀堆積岩の限界せん断ひずみの平均は0.570%と設定した。

最大せん断ひずみ $\gamma_{max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径Dの20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1年後に側部で坑道掘削径Dの20%を超え、1万年後には坑道掘削径Dの30%の領域まで拡大する。

図-10より、周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の10~20%程度まで低下したことがわかった。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、肩部の岩盤深部では弾性係数は初期値の1/10まで低下した。

最大せん断ひずみ $\gamma_{max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径の20%の領域以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1年後に側部で坑道掘削径の20%の領域を超え、1万年後には坑道掘削径の30%の領域まで拡大した。

(3) 堆積岩・横置きケースの坑道安定性の保持期間

上記(2)の堆積岩・横置きケースの結果を基に周辺岩

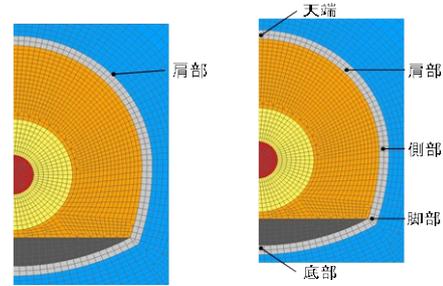


図-11 堆積岩・横置きケースの着目要素

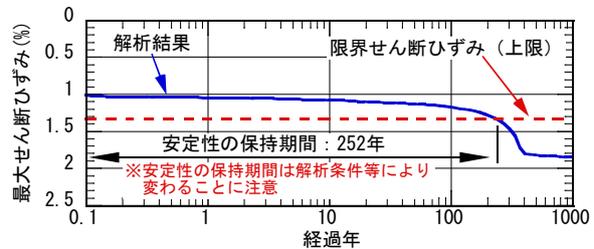


図-12 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化

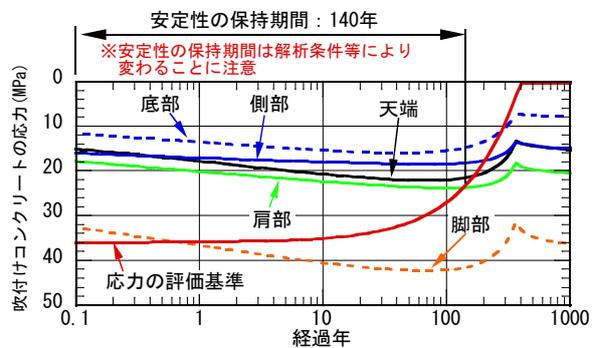


図-13 吹付けコンクリート応力の経時変化

盤の長期安定性の評価について検討した。

図-9を見ると、坑道構築時は評価基準を満たしているが、側部において1年後までに、 $\gamma_{max}=0.570\%$ 超過領域が坑道掘削径Dの20%の領域を超えていることが分かった。ただし、坑道構築時の評価基準は安全裕度を見込んだものであると考えられることから、この数値を基に長期安定性を評価することは適切でないと考えた。そこで、長期安定性の限界値としては、限界ひずみの上限の1.340%⁹⁾を設定した。図-9より、 $\gamma_{max}=1.340\%$ 超過領域が坑道掘削径Dの20%を超えるのは、1,000年後から1万年後の間となることが分かった。しかしながら、1,000年後の時点では、 $\gamma_{max}=1.340\%$ 超過領域は坑道の肩部と側部に発生していて、坑道掘削径Dの20%の境界まで達していた。特に肩部はヤング率の低下が著しかったことから、肩部の周辺岩盤が最初に不安定化する箇所であると考えた。そこで、壁面近傍で最大せん断ひずみが1.340%を超える肩部の要素に着目して、安定性の保持期間を検討した。着目した肩部の要素を図-11(a)に示す。この着目要素の最大せん断ひずみの経時変化を図-12に示す。この図より、周辺岩盤の最大せん断ひずみで評価した場合の坑道安定性の保持期間は252年となった。

次に、支保工応力度による長期安定性の評価につい

て検討した。吹付けコンクリートについては、断面形状の変化点を考慮して、図-11(b)に示すような天端、肩部、側部、脚部、底部の五箇所の要素に着目した。吹付けコンクリートの応力度と応力の評価基準の経時変化を図-13に示す。吹付けコンクリートの応力度の評価基準は、設計基準強度が400年後、初期値の1/100になると仮定し、線形補間による強度低下を考慮した値とした。図-13によると、応力が集中しやすい脚部を除くと、坑道構築後140年後に肩部で最初に評価基準を超えた。この結果から、支保工応力度で評価した場合の坑道安定性の保持期間は140年となった。

5. おわりに

本研究では、回収可能性維持期間中の坑道の安定性に影響を与える要因を考慮した解析手法、および一般的に使用されている評価基準に基づいた坑道安定性の評価方法を検討し、結果を例示した。その結果、深成岩は、1万年後も坑道の安定性の評価基準を上回り、新第三紀堆積岩は、140年～250年程度で評価基準を下回ると算出された。ただし、坑道安定性の保持期間の算出結果は、解析条件等により大きく変わることには注意を要する。

今後の課題としては、支保工、緩衝材および埋戻し材の構成モデルや物性値の設定方法等が挙げられる。吹付けコンクリートについては、坑道周辺の水理環境の変遷を考慮したより適切なセメントの溶脱現象の評価やそれに伴う力学特性変化のモデル化に関する検討が必要である。また、緩衝材および埋戻し材の物性変化についても飽和状態の変化に伴う物性データの取得や評価モデルの構築に関する検討が必要であると考えられる。

本研究は、経済産業省からの委託研究「平成28年度地層処分技術調査等事業（可逆性・回収可能性調査・技術

高度開発）」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成27年5月22日閣議決定），経済産業省ホームページ <http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>
- 2) Yamamoto, Y. et al.: Repository Design in Safety Case Development, *Proceedings of the 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference*, 2017.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，1999.
- 4) 西村蘭果，棚井憲治，高治一彦，重野善政，下河内隆文：ニアフィールドの長期力学的解析手法の構築，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-004，2007.
- 5) 大久保誠介，金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション，資源と素材，Vol.109, No.3, pp.209-214，1993.
- 6) 山本修一，佐藤伸，武内邦文，佐々木規行：トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析，土木学会第63回年次学術講演会，CS05-47, pp261-262，2008.
- 7) 奥津一夫，森川誠司，広中良和，前田宗宏，新保弘，畔柳幹雄，田部井和人，佐原史浩，村上武志，青山裕司：ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究IV（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書），JNC TJ8400 2005-012，2005.
- 8) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008.
- 9) 櫻井春輔，足立紀尚：都市トンネルにおける NATM，鹿島出版会，1988.
- 10) 櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集／III-27, pp.185-188，1994.

MECHANICAL INFLUENCE EVALUATION OF DISPOSAL DRIFT BY MAINTAINING RETRIEVABILITY IN GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY OF HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE

Hiroyuki TADA, Mitsuo GHOKE, Satohito TOGURI, Tomoko ISHII,
Naohiko TAKAMOTO, Masataka IMAI

The authors have been investigating the safety of the working environment before closing in the geological disposal of high-level radioactive waste and the influence on the long-term safety after closing. In order to develop an evaluation technique on the influence on the drift stability and the influence on the barrier function when maintaining retrievability, the method of evaluating the mechanical influence on the disposal drift was studied. In the mechanical influence evaluation, the drift stability due to the long-term deformation of the surrounding rock during the retrievability maintaining period was evaluated using an analysis method that can take time-dependent consideration.