

再冠水試験中の止水壁の状態変化に関する検討

松井裕哉^{1*}・見掛信一郎¹・池田幸喜¹・筒江 純¹

¹ (国研) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター (〒509-0203 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)
*E-mail: matsui.hiroya@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構は、文部科学省・経済産業省・原子力規制委員会の第3期中長期目標に基づく研究開発を平成27年度から進めている。この一環として、岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所の深度500mに掘削した研究坑道終端部において、再冠水試験と称する坑道周辺の地質環境の回復状況を把握・評価するための原位置試験を行った。さらに、この試験のために構築した止水壁の内外に設置した圧力や変位に関する各種計測機器により、冠水前・中・後のそれらの変化をモニタリングした。本報では、それらの計測結果を基に、再冠水試験に伴う止水壁の状態変化を推定した結果を報告する。

Key Words : estimation, change of the condition, impervious plug, monitoring

1. はじめに

日本原子力研究開発機構は、文部科学省・経済産業省・原子力規制委員会の第3期中長期目標に基づく研究開発を平成27年度から進めている。この一環として、岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所では、深度500mに掘削した研究坑道終端部において、再冠水試験と称する坑道周辺の地質環境の回復状況を把握・評価するための原位置試験を進めている。この試験のため、研究坑道内に地下水圧力を保持するためのコンクリート壁（以下、止水壁と呼ぶ）を構築し、平成28年1月末から再冠水試験を実施した（図-1）。

本報告では、約1年9ヶ月に渡り実施した、止水壁の機能確認と再冠水試験およびその前後の各種計測結果等に基づき、止水壁の状態変化について推定した結果を述べる。

2. 止水壁に作用する外力である冠水坑道内の水圧変化

図-2は既報¹⁾で報告した止水壁の機能確認試験も含めた再冠水試験時の冠水坑道内の水圧変化と、その間の主要イベントの対比を行ったものである。主要イベントである冠水坑道内の一部排水・回復試験は、冠水坑道周辺の岩盤の透水不均質性の把握や初期状態からの透水性変化の有無を把握するため3回実施し、試験時の冠水坑道内の水圧低下量は、0.2~0.7MPa程度であった。

同図から、冠水坑道内の平均水圧が大きく変化したイベントは、3回の一部排水・回復試験以外にはないことがわかる。また、止水壁内の温度分布の変化は、水圧変化と関連性は認められなかったため、以降では、再冠水試験中および一部排水・回復試験時の水圧変動に生じた応力・変位計測結果の概要を示すこととした。なお、表-1は、計測に使用した機器の仕様の一覧である¹⁾。

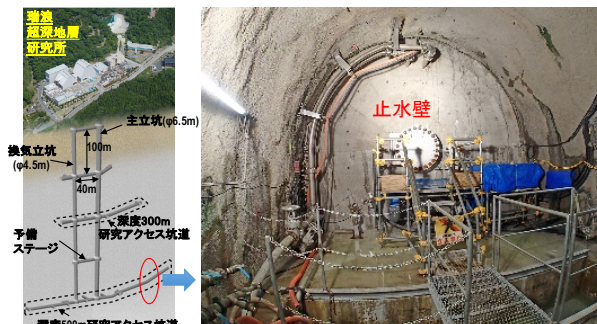


図-1 瑞浪超深地層研究所坑道レイアウトと構築した止水壁

表-1 止水壁計測に使用した機器一覧

計測項目	機器名称	製造元・形式	測定範囲	精度 (測定精度)	外観	機能	
						+	-
温度	ひずみゲージ 型温度計	東京測器 (KT110A)	-10~80℃	±0.3℃		上昇	下降 押し出し
表面変位	変位変換器	東京測器 (FDP-50A)	0~50mm	±0.5% RO (±0.3mm)		圧縮	引張
境界面 圧力	応力計	共和電業 (BR100-KBT)	10MPa	±1% RO (±0.1MPa)		圧縮	引張
コンク リート 応力	コンクリート 有効応力計	東機エルメス (GK-3GN-505)	36N/mm ²	±1% RO (±0.4MPa)		圧縮	引張
鉄筋応力	鉄筋応力計	東機エルメス (GRN)	SD345	±1% RO (±0.4MPa)		引張	圧縮
境界変位	継目計	東京測器 (KLB-10A)	10mm	±0.3% RO (±0.03mm)		開口	閉塞

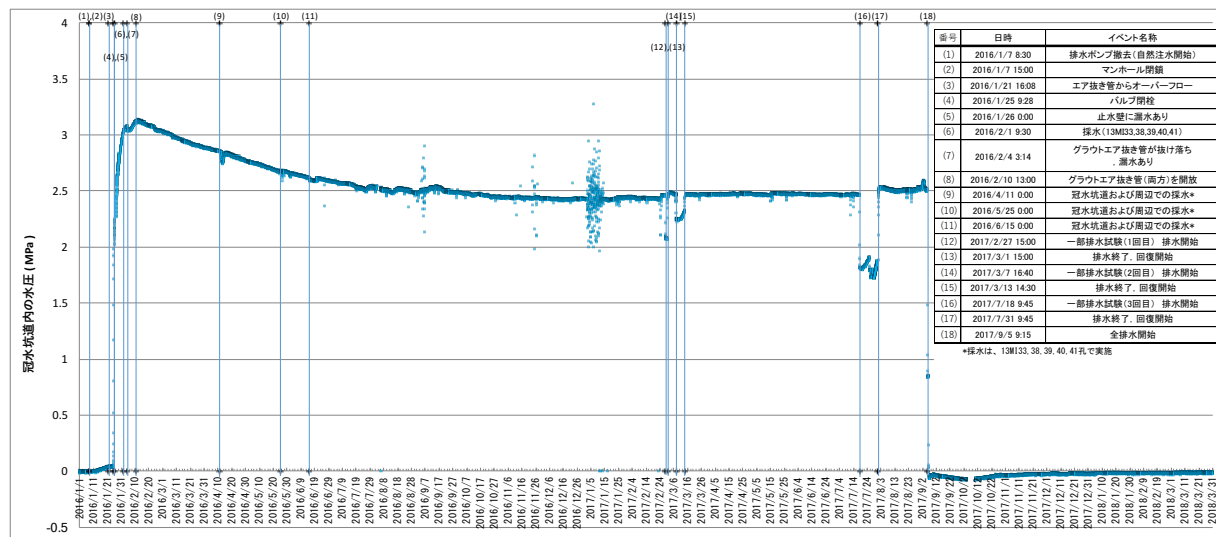


図-2 再冠水試験中の冠水坑道内の平均水圧変化と試験中の主要なイベントとの比較

3. 再冠水試験前中後の各種計測結果の概要

各種計測結果は、既報¹⁾と同様、1日毎のデータを用いて整理した。以降、測定結果の概要を述べる。

(1) 岩盤と止水壁境界部の変位・応力

a) 境界部の変位（継目計：8箇所）

継目計は、冠水坑道側の岩盤と止水壁の境界部変位の測定を目的として岩盤に拡張された切り欠き部分の上下

左右に設置した（図-3下段）。なお、既報で述べたように、冠水坑道の水圧上昇に伴い多くの継目計が計測限界（10mm）を超えたため、図-3下段には、冠水坑道からの全排水時まで安定した計測結果が得られたL2、L3及びL4のみを示している。計測結果の概要は以下の通り。

・再冠水試験に伴う冠水坑道内の水圧が3MPa付近に到達した時点では、場所によらず開口側に変位が生じ、最大1mm弱程度であった。3回の一部排水・回復試験時には、冠水坑道内水圧変化に対応し0.1mm程度の閉塞側

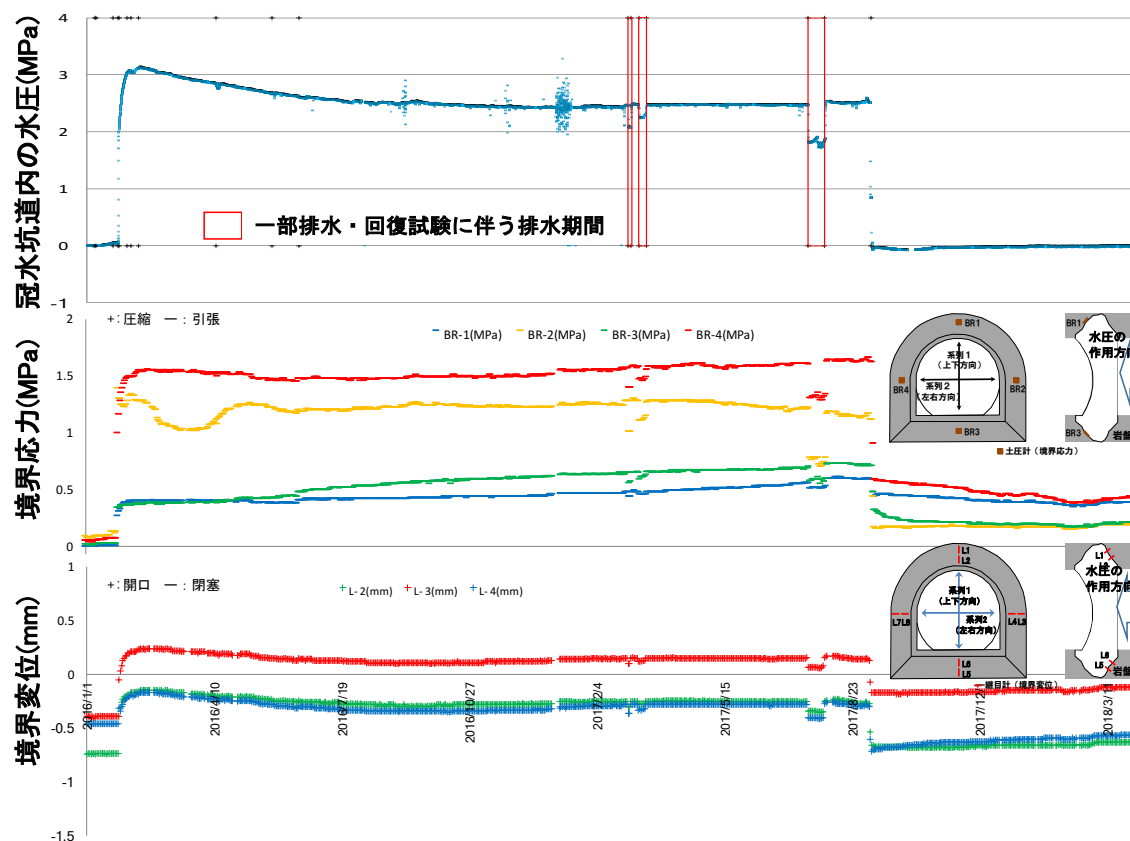


図-3 境界部の変位・応力変化

に変位が生じた。また、これらは、冠水坑道からの全排水に伴う水圧低下で概ね冠水前の状態に戻っている。

b) 境界部の応力（土圧計：4箇所）

斜坑側止水壁楔部分の上下左右に土圧計を設置し、冠水坑道側の水圧上昇により止水壁が斜坑側に押し込まれる際の圧力を計測した（図-3中段）。計測結果の概要は以下の通り。

- ・一部排水・回復試験では、全点で水圧低下に呼応し、岩盤への押し付け圧が低下した。変動量は第3回目の試験が最も大きく、BR2で1MPa程度であった。
- ・再冠水試験中は、0.5～1.5MPa程度の一定値で止水壁が岩盤に押し付けられる応力状態であった。全排水により、測定値は再冠水試験前の値に回復する傾向を示したが、最大0.5MPa程度の残留応力が生じている。

(2) 止水壁内部の応力変化

a) 躯体内コンクリート応力（有効応力計:12箇所）

冠水坑道側に水圧が作用した際、圧力上昇が想定された止水壁楔部分の上下左右及び躯体中央部付近の上下方向のコンクリート応力を測定した（図-4 中段）。計測結果の概要は以下の通りである。

- ・3回の一部排水・回復試験時には、ほとんどの計測点で圧縮応力が低下する変動が認められた。特に、K1, K5, K9, K10では、最大で1MPa程度の変動が生じた。
- ・再冠水試験中の長期的な変動傾向は、他の計測結果に比べ複雑であり、K1, K2, K5, K11は下に凸の変曲点を持つような応力変化を示した。このうち、K2, K5, K11はほぼ同時期(2016年4月末頃)から圧縮応力の低下が見られたが、最小値を示した時期は異なっており、K2, K11, K5の順であった。K1の応力低下は、最も遅く2016年の11月頃から生じた。これらの計測点では、冠水試験開始前と全排水終了後の値に大きな差が生じており、応力計設置場所あるいは近傍のコンクリート

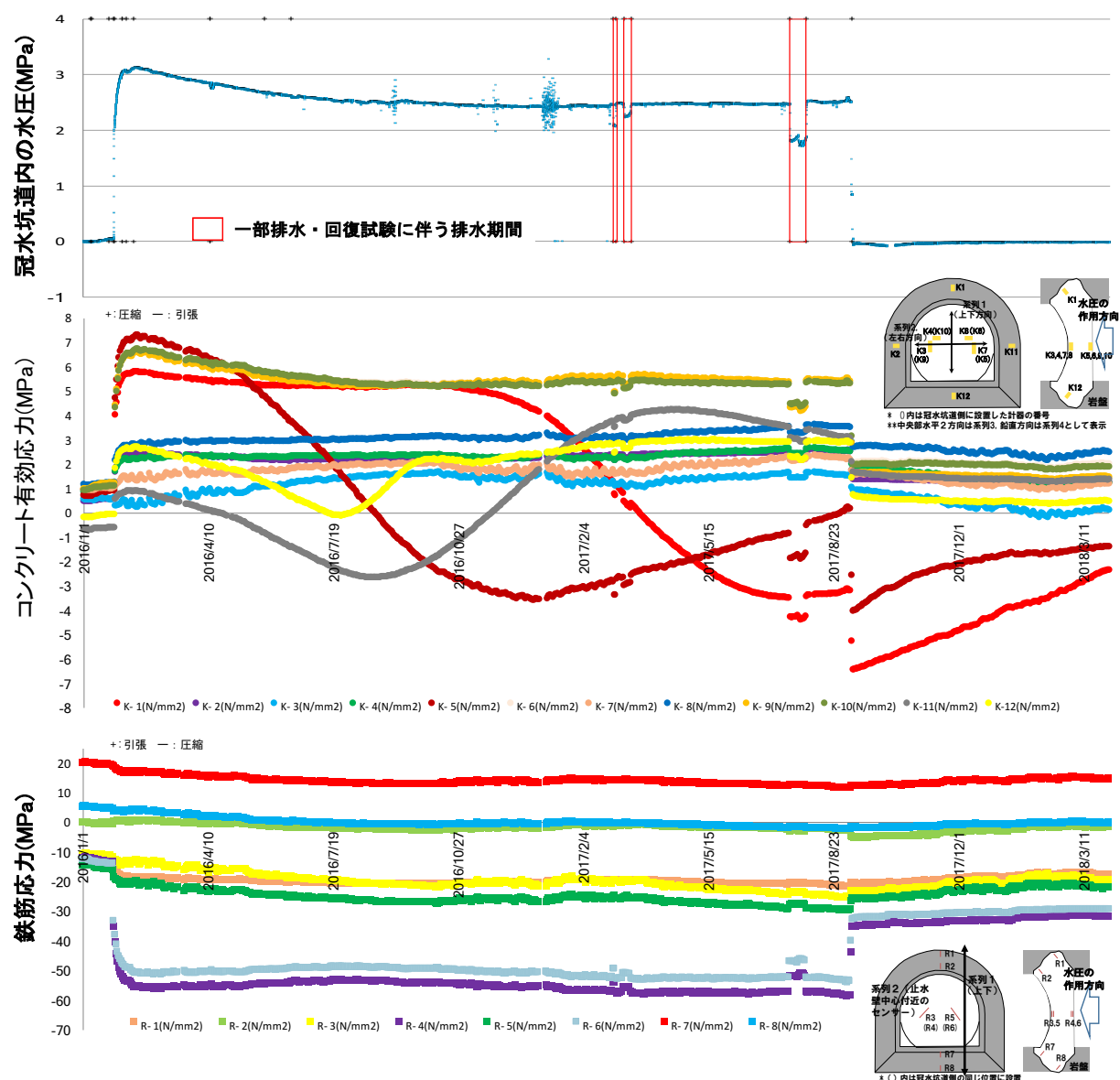


図-4 止水壁内部の応力（コンクリート、鉄筋）

の性状が大きく変化している可能性がある。

b) 躯体内に設置した鉄筋の応力（鉄筋計:8箇所）

冠水坑道側に水圧が作用した折に圧力上昇が想定された止水壁楔部分の上下及び躯体上下及び躯体中央部付近に配した鉄筋に作用する応力を測定した（図-4下段）。計測結果の概要は以下の通り。

- ・3回の一部排水・回復試験時には、最大で5MPa程度引張側への応力増加が認められる。この値はコンクリート有効応力の変化量の10倍程度であり、かつコンクリート応力では圧縮応力が減少する方向に変化している。既報¹⁾で述べたように、鉄筋とコンクリートの付着状況には大きな変化はないことが推察される。
- ・コンクリート有効応力とは異なり、一部排水・回復試験時の水圧低下以外で再冠水試験中の変動はほとんどなく、これらの試験時以外、作用外力の冠水坑道内の水圧が一定であったことと調和的である。一方、相対的に再冠水試験開始時の応力変動が大きかったR4とR6は、冠水前の初期値と全排水後の値の乖離が大きい。

(3) 躯体表面の変位（表面変位計:3箇所、斜坑側のみ）

斜坑側の止水壁上部と左右に測点を設け、壁表面の動きを計測した（図-5）。結果の概要は以下の通りである。

- ・一部排水・回復試験時の表面変位は、最も試験期間が長い3回目でも0.1mm程度の変化が見られ、左右の測点（M2とM3）で逆方向の変位が、天盤付近のM1は冠水坑道側への変位が見られた。
- ・再冠水試験期間中の長期的なトレンドを見ると、冠水坑道内の水圧はほぼ一定であるにも関わらず、2016年

の10月より、M1の変位は冠水坑道側に増加する傾向が見られる。なお、全排水後に、M2とM3の変位が時間経過とともに増大し、2017年10月頃にM1の変位が急激に増加したが、これらは全排水後の止水壁中央部マンホール蓋の開放作業等による影響であり、水圧変動や止水壁の状態変化と直接的な関連はない。

(4) 一部排水・回復試験時の止水壁及び境界部の変位・応力の応答について

冠水坑道内の水圧変化と止水壁及び境界部の変位・応力の応答を詳細に比較するため、5分ピッチの水圧データと1分ピッチの各種計測データを比較したものを図-6に示す。3回の一部排水・回復試験時の変化は、いずれも類似していたため、最も長期間実施した3回目の試験時の測定結果を例示した。同図は、各計測とも試験開始前の値で試験中・試験後の値を除しており、1になれば試験前と同じ状態に戻ったことを示している。

試験前後の変化としては、コンクリート有効応力の一部を除き、概ね試験前の値に戻っていること、試験中の水圧変化は1MPa程度であり、試験前の水圧（約2.4MPa）の半分程度であったが、止水壁の各種計測で得られた変化量も最大で初期値の0.5～1.5倍程度の値になっており、水圧変化の比率とほぼ同じであった。従って、止水壁の力学的な応答は、短期的な水圧変化に対しては弾性的と考えられる。

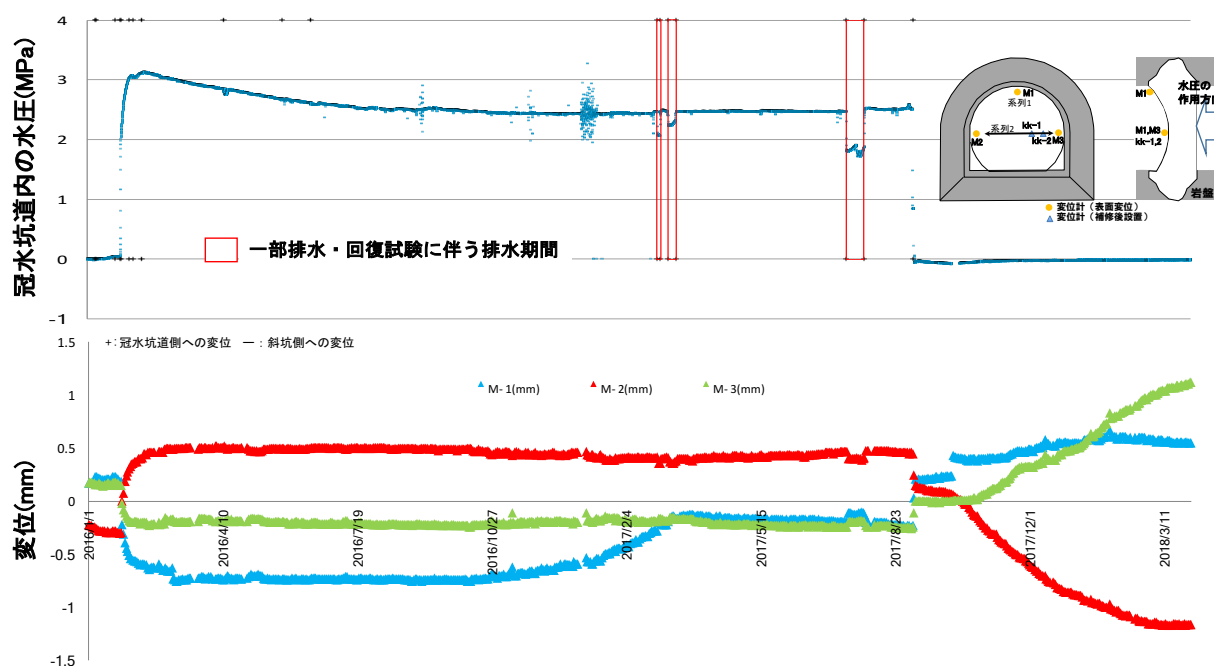


図-5 躯体表面の変位

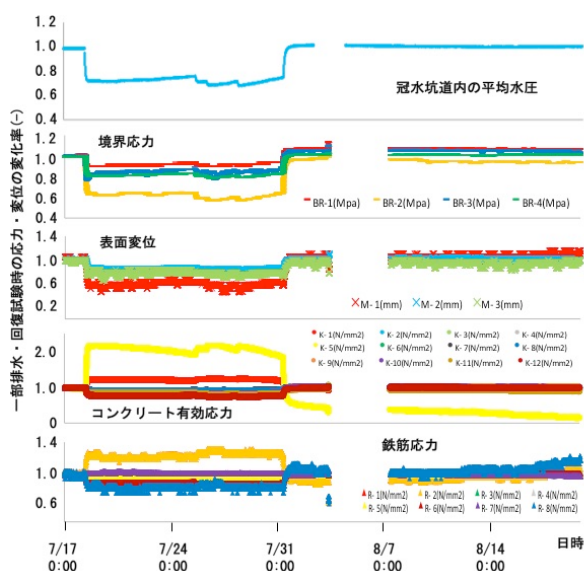


図-6 一部排水・回復試験（第3回）時の各種計測結果

4. 再冠水試験中の止水壁の状態変化に関する検討

既報¹⁾では、止水壁の機能確認試験までの結果に基づき、止水壁周辺の状態に関する図-7のような概念を提示した。今回の再冠水試験中および3回の一部排水・回復試験時の測定結果、全排水後の計測結果からも、境界変位や境界応力の変動は冠水坑道内の水圧変化と調和的であることから、同図の概念は概ね適切と考えられる。なお、既報の補修時作業として実施した防水塗装被膜は、全排水後の目視確認では変状が認められなかったことから、冠水坑道やその周辺岩盤の水圧を持った地下水は回り込んだ形で境界部に侵入していると考えられ、その部分を修正した。言い換えれば、岩盤と止水壁の境界面を充填するため実施したコンタクトグラウトは不十分であったことも示唆している。

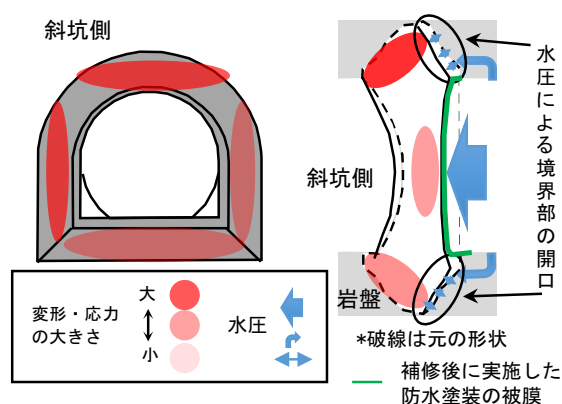


図-7 各種計測結果から推定される止水壁の状況

一方、コンクリート有効応力は、いくつかの測点で下に凸の曲線を描く特異な変化を示している。このような

変化は、通常考えられる計測機器自体の不具合では説明が困難であること、鉄筋応力にはこれに対応するような変化が生じておらずかつ冠水坑道内の水圧変動と調和的であることから、止水壁内部のコンクリート部分の変状が原因と考えられる。

図-8 の写真は、再冠水試験開始直後からの止水壁表面の変化を示している。前述したコンクリート有効応力の低下が最初に生じた頃は、止水壁面に現れているコンクリートからのカルシウムの析出と思われる白い場所はずかであったのに対し、全排水開始後の写真では、止水壁の左側には放射状に、止水壁に向かって右側と左下側の岩盤境界部および右側の脆弱部補修箇所近く（図-8 写真①）で、カルシウムの溶脱・固化と思われる白色物質が認められた。再冠水試験中、同図写真②に示す止水壁内計測装置のケーブルラインからは恒常的に湧水が生じ、全排水後は停止した事実から、冠水坑道やその周辺岩盤の地下水が躯体内部に流入する経路の存在は明らかである。また、既往の研究^{2,3)}では、地下水の進入経路上の水酸化カルシウムやC-S-H生成物の溶脱促進と、それによる空隙の増加や強度劣化の発生が指摘されている。



図-8 第2回目機能確認試験開始～終了直前までの止水壁及び近傍の状況写真

以上を総合すると、再冠水試験中に生じた止水壁内部の状態変化について以下のようなことが想定される。

- ・止水壁内部への定常的な地下水の流入経路の形成により、カルシウム等の溶脱が促進され、一部のコンクリート有効応力計設置部付近のコンクリートの強度変形特性が低下し、それによって応力値が減少。応力値の低下は時間とともに一定勾配で生じていることから、亀裂などの進展を示唆。
- ・亀裂の進展などがある程度広がったところで、地下水流入量が排水量を上回り、躯体内の地下水水圧が増加することで見かけ上計測している応力値が回復。

5. 同種の構造物を構築する場合の留意点

4.で再冠水試験中の止水壁の状態変化についての推定結果を示したが、この推定を正とした場合、今回の再冠水試験中の状態変化の主要因は、止水壁と岩盤境界部からもたらされた内部への地下水の長期間の流入となる。

図-9は、今回の止水壁構築の際に実施したコンタクトグラウトの注入仕様、概略の注入経路と結果を示したものである⁴⁾。今回のグラウトは、止水壁のエッジ部分に注入ラインを組み込み、躯体構築後に実施した。

グラウト注入前の通水試験では、1次注入の段階では、9箇所からの注入箇所に対し4箇所しか通水せずグラウト注入も4箇所のみ実施した。2次注入は、より面的に実施したものの、躯体上半部に注入箇所が集中していたため、他の岩盤と止水壁の境界面には地下水が侵入しうる経路が局所的に残存する状態であった可能性は高い。また、コンタクトグラウトの多数の注入ラインをエッジ部に集中配置したことと、エッジ部のコンクリート厚さが中央部に比して相対的に薄いため、エッジ部全体の強度変形特性が構造的に弱くなり、かつ打ち継ぎめの脆弱部の存在が複合し、岩盤との境界部から止水壁内に連続する水みちが生じたと推定される。ただし、エッジ部の不具合が生じた場合、それに対する対策はほぼ不可能といえる。

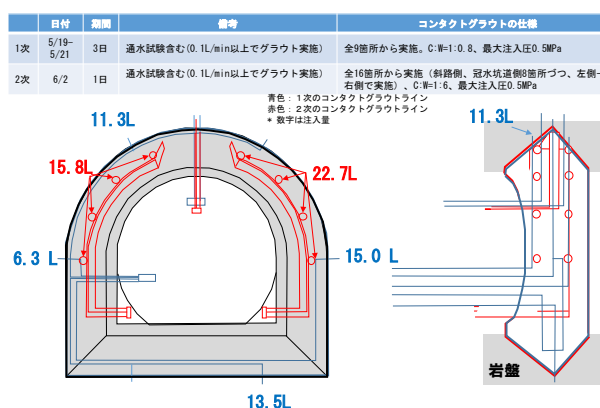


図-9 グラウト注入ライン等の配置（設計時）と注入結果

今回構築した止水壁は、岩盤との一体性を確保し長期間の水密性を担保する、長期間栓材としての機能を発揮する、高水圧下でも十分な構造安定性・ひび割れ抵抗性を保有する、といった3点を主たる性能目標として設計・施工したが、結果として、長期的にはそれらが不十分な構造物であったと考えられる。その主たる要因は、既報¹⁾で示した躯体構築時のコンクリート打設時のトラブルによる弱層部の形成や、コンタクトグラウトの効果が不十分であったことに起因すると推察される。

将来の地層処分場においては、同種の構造物に要求される性能はより厳しいと思われるが、今回の知見を踏まえると、躯体にコンクリートを用いる場合、その施工は相当注意深く行う必要があること、岩盤との境界部の処置方法の確立が非常に重要と思われる。また、同等の効果が得られる別の方法（例えば、EDZの部分に恒久的な止水性能を持つ材料を直接注入する等）の検討も、フィージビリティを高める上で重要と考えられる。

謝辞：止水壁の設計・構築及び計測は、（株）大林組及び大林・大成・安藤・間特定建設工事共同企業体に実施していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 松井裕哉, 見掛信一郎, 池田幸喜, 佐々木定雄：各種計測結果に基づく再冠水試験のため止水壁の機能評価, 第14回岩の力学国内シンポジウム講演集 講演番号002, 2017.
- 2) 坂井悦郎, 久田真, 杉山隆文：セメント・コンクリートからの微量成分の溶出と水和物の溶脱, コンクリート工学 Vol.41 No.12, pp.18～pp.22, 2003.
- 3) 辻本剛士, 木村定雄：トンネル覆工コンクリート中の水酸化カルシウムの溶脱に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, pp.329～pp.330, 2011.
- 4) 施設建設課：瑞浪超深地層研究所 研究坑道掘削工事(その6) 平成26年度、27年度工事記録, JAEA Review 2016-027, pp.56～pp.60, 2016.

ESTIMATION ON THE CHANGE OF THE CONDITUION OF THE IMPERVIOUS PLUG DURING GROUNDWATER RECOVERY EXPERIMENT

Hiroya MATSUI, Shinichiro MIKAKE, Koki IKEDA and Jun TSUTSUE

Japan Nuclear Energy Agency (JAEA) has been conducting the groundwater recovery experiment to develop a methodology to estimate the geological environment recovery after closure of the drift at GL-500m in Mizunami Underground Research Laboratory, Japan. For the experiment, an impervious concrete plug was constructed to maintain a recovered water pressure and its functions were assessed based on the monitoring results and interpretation of several kinds of measurements performed inside and outside of the plug during groundwater recovery test. This report summarized the change of the conditon of the plug due to groundwater recovery estimated based on the different kinds of monitoring data.