

立坑の冠水・排水時の湧水量・水圧観測データを用いた水理地質構造モデルの構築

熊本 創^{1*}・下茂 道人¹・三枝 博光²・大山 卓也²

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

*E-mail: sou@ce.taisei.co.jp

日本原子力研究開発機構では、岐阜県瑞浪市において、主に結晶質岩を対象とした深地層の研究施設の建設を進めている。施設建設に当たっては、坑内湧水量や周辺への水圧応答など、建設に伴うデータ取得を行っている。また、掘削途中(深度約180m地点)では、排水処理方法の改善のため、掘削及び排水を停止し、坑内は一時的に冠水され、その後、再排水された。この一連の坑内水位変動は、大規模な回復・揚水試験と考えられ、これに伴う水圧応答データは、周辺の水理地質構造や透水性評価に非常に有効なデータである。本稿では、筆者等がこれまでに構築してきた水理地質構造モデルによる、この掘削～冠水～再排水時の湧水量や水圧応答データの再現性確認及びそれに基づくモデル更新の結果について述べる。

Key Words : inflow volume, pressure response, hydrogeological model, model calibration

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と呼ぶ)では、深地層の研究施設の建設(深度1000mの立坑2本及び水平坑道)に伴う地下水流動場への影響予測のための水理地質構造モデルの構築を進めている。モデル構築に際しては、「繰り返しアプローチ」に基づき、調査の進展に伴う情報量の増加に応じて順次モデルを更新することとしている¹⁾。筆者らは、これまでに、地表からの探査やボーリング調査などの、主に超深地層研究所計画¹⁾における地表からの調査予測研究段階(以下、第1段階)からの調査データに基づいた水理地質構造モデルの構築、ならびに更新を進めてきた^{2),3),4)}。現在は、立坑の掘削が進められており、立坑への湧水量や、周辺観測孔への水圧応答データなどの掘削に伴う観測データがモニタリングされている。今回は、これまでに構築してきたモデルによる地下水流動解析により、深度約180mまでの立坑掘削と、同深度で実施された立坑内の冠水ならびに再排水時に観測された周辺観測孔への水圧応答データや湧水量データの再現性を確認するとともに、再現性向上のための課題抽出、ならびにモデルの見直しを行った。この立坑内の冠水は、立坑の掘削深度が約180mに達した際、排水先河川において、フッ素とホウ素の濃度が排水基準以内であったものの環境基準を超過したため、立坑掘削及

び排水を停止したことによって生じたものである。このため、立坑内の水位が上昇し、一時的には深度約50mまで冠水した。その後、フッ素とホウ素を除去する設備を排水プラントに付加し、再排水及び立坑の再掘削を開始している。

本稿では、立坑掘削～冠水～再排水時の湧水量や水圧応答データを用いたモデル更新の概要について述べる。

2. 解析領域の概要

解析領域は、一つの深部地下水流動系を包含する約9km×9kmの領域⁵⁾である(図-1)。領域の北及び西側境界は、最大標高620mの尾根線からなり、東及び南側境界は、北東から南西、東西方向に流れる土岐川を境界とする。領域中央部には、北東から南西方向に日吉川が流下する。なお、深度方向は、標高2kmまでとした⁵⁾。

図-2に解析領域の地質平面図⁶⁾を示す。当地域の地質は、基盤をなす白亜紀後期の花崗岩(土岐花崗岩)を新第三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)が不整合で覆い、さらにその上位に固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層(瀬戸層群)が不整合で覆っている。また、瑞浪層群は、下位より土岐夾炭層、明世累層、本郷累層、及び生俵累層に区分される。花崗岩は、浅部に30°以下の低角度傾斜

を有する割れ目が卓越する領域（上部割れ目帯）とその下位の比較的割れ目密度が低い領域（下部割れ目低密度帯）が分布する。さらに、上部割れ目帯中には、低角度の割れ目が集中しているゾーン（低角度割れ目集中帯）が存在する。当領域内には、主要な不連続構造として、月吉断層（走向：東西、傾斜：約70～80° 南傾斜）の他、第1段階の調査により、47本の断層が確認、推定されている。

また、解析領域には、複数の調査ボーリング孔が存在し、各孔にはパッカーにより複数区間の間隙水圧を計測する長期モニタリング装置が設置されている。

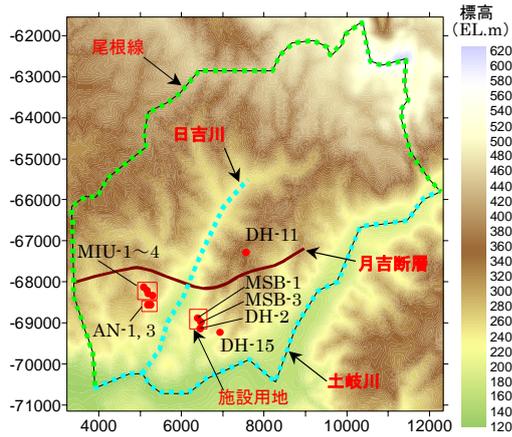


図-1 解析対象領域



図-2 解析領域周辺の地質図（糸魚川，1980⁶）に加筆）

3. 既存モデルの概要

図-3に、これまでに構築してきた水理地質構造モデル（以下、既存モデルと呼ぶ）の基礎となった地質構造モデルを示す。既存モデルは、主に、施設建設前に実施した地上からの調査データと、一部、施設建設の過程で取得されたデータに基づいて、構築、更新してきたものである。解析領域のうち、施設近傍においては、超深地層研究所計画において詳細な調査データを取得している。本モデルでは、施設近傍のより詳細な水理地質情報を反映できるように、解析領域を施設スケール領域（約2km四方）とその外側の広域スケール領域に分け、施設スケール領域では、立坑などの施設構造を反映した他、地層構造をより細かく区分し、メッシュ分割も詳細化した。また、解析領域に分布する断層は、広域スケール領域については、月吉断層の他、それと同等のスケールを有する5つの断層（トレース長3km以上の断層）を反映した。施設スケール領域では、これまでのモデル更新の過程で、施設近傍の水理場に影響すると判断された5つの小規模断層³⁾、及び施設建設の過程で確認された立坑と交差する5つの小規模断層及び変質帯⁴⁾をモデル化した。なお、上記の5つの小規模断層と変質帯は、比較的透水性が低く、特に主立坑側に集中して分布する。

表-1に、既存モデルの物性値の一覧を示す。物性値は、基本的にボーリング孔を利用した原位置水理試験結果に基づいて設定したが、一部、これまでのモデルキャリブレーションの過程で見直しを行った^{2),3)}。特に、土岐夾炭累層（基底礫）の透水性については、当初のモデルでは、同地層を均質と仮定し、原位置水理試験結果の平均的な物性値を一律に設定していたが、深度約180mまでの立坑掘削時の湧水量データを用いたモデルキャリブレーションにおいて、2本の立坑間に存在する遮水性を有する断層

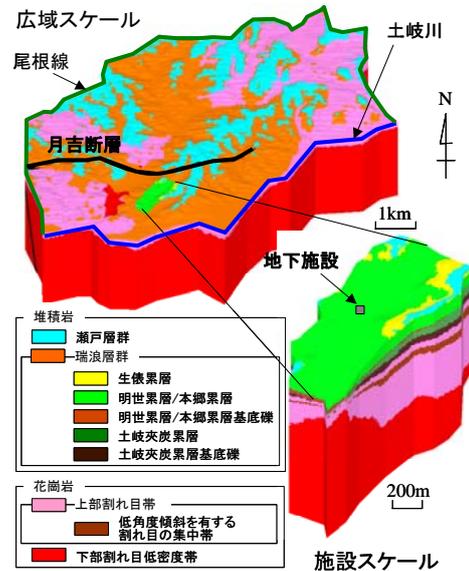


図-3 地質構造モデル

表-1 既存モデルの物性値一覧

地質・地質構造要素		基本モデル		
		水平方向 透水係数 K(m/s)	鉛直方向 透水係数 K(m/s)	比貯留係数 Ss(1/m)
堆積岩	瀬戸層群	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
	瑞浪層群	8.8E-08	8.8E-10	1.0E-06
	生俣系層	3.2E-09	3.2E-11	1.0E-06
	明世累層／本郷累層(本体)	4.0E-08	4.0E-08	1.0E-06
	明世累層／本郷累層(基底礫)	1.7E-07	1.7E-07	1.0E-06
	土岐夾炭累層(本体)	3.5E-08	3.5E-08	1.0E-06
	土岐夾炭累層(基底礫)	7.5E-08	7.5E-08	1.0E-06
花崗岩	上部割れ目帯(UHFD)	2.2E-07	2.2E-07	1.0E-06
	低角度割れ目帯(LAFZ)	1.1E-06	1.1E-06	1.0E-06
	下部割れ目帯低密度帯(LSFD)	3.2E-08	3.2E-08	5.0E-07
不連続構造	月吉断層の主要部	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-06
	月吉断層に伴う割れ目帯	4.2E-07	4.2E-07	1.0E-06
	IF_SB3_15_2	9.2E-06	9.2E-06	1.0E-07
	IF_SB3_13_2	2.4E-07	2.4E-07	1.0E-07
	IF_SB3_02_2	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
	IF_SB3_02	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
	IF_SB0_01	2.0E-07	1.0E-11	1.0E-07
	F14660	2.7E-08	2.7E-08	1.0E-07
	F13440	2.7E-08	2.7E-08	1.0E-07
	F14494	2.7E-08	2.7E-08	1.0E-07
	06MI02_1	2.8E-09	2.8E-09	1.0E-07
	06MI02_2	4.6E-09	4.6E-09	1.0E-07
	トレース長3km以上の断層	5.6E-06	1.0E-11	1.0E-07

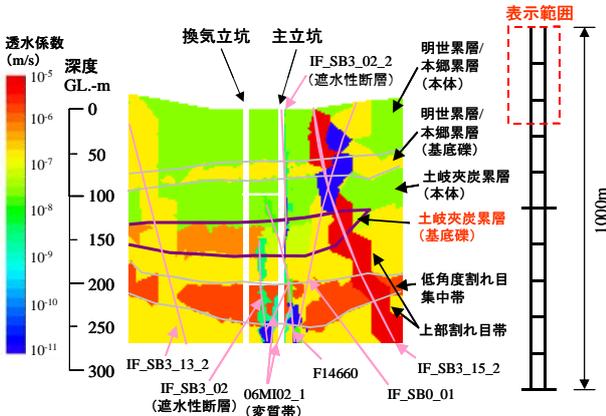


図-4 立坑近傍の透水係数分布 (立坑を通る断面図) を境に、主立坑側と換気立坑側で異なる透水性を有すると仮定した(図-4)⁴⁾。断層については、断層の面内方向と直交方向で異なる透水性を与えることにより、断層の透水異方性をモデル化した。なお、既存モデルは、これまでに実施したモデルキャリブレーション^{2),3),4)}により、施設建設前の自然状態における広域的な定常水頭分布、ならびに原位置水理試験時のボーリング孔間の水圧応答や立坑掘削時の湧水量変化などの非定常挙動を概略的に再現可能なモデルとなっている。

4. 立坑掘削～冠水～再排水時の水圧応答データ

図-5に、深度約180mまでの立坑掘削、ならびに同深度で実施した立坑の冠水・再排水に伴う施設近傍の観測孔の水圧応答データを示す。なお、図中PRB-1～12は、観測区間番号を示す。施設近傍には、MSB-1号孔(掘削長200m)、MSB-3号孔(掘削長200mの斜孔)などの浅層ボーリングや、DH-2号孔(掘削長500m)、DH-15号孔(掘削長1000m)などの深層ボーリングが図-6のように位置している。図-6中のNNW走向の断層(図中の赤色破線、IF_SB3_02、IF_SB3_02_2)は、これまでの調査結果から、遮水性を有

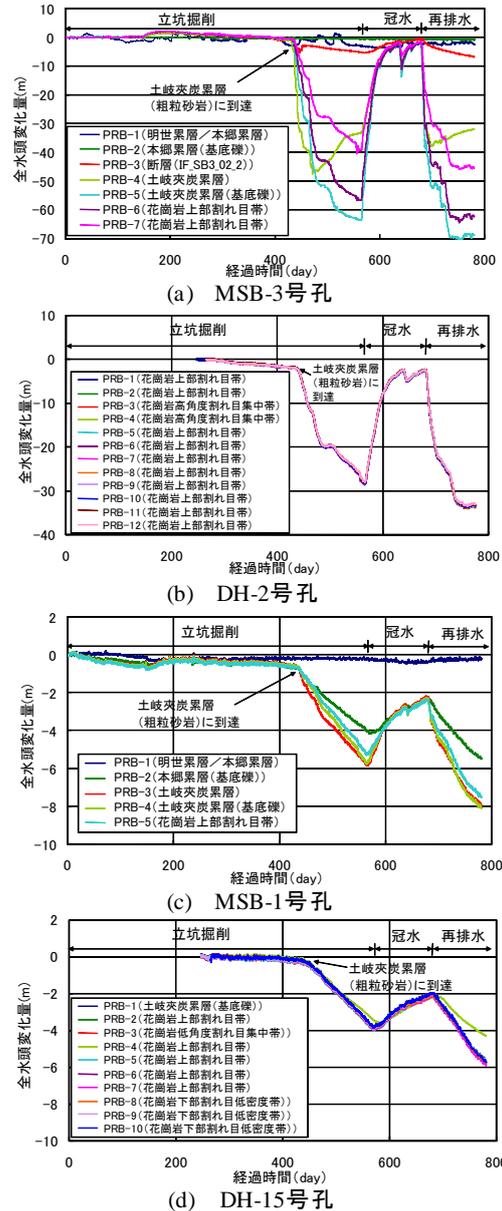


図-5 水圧応答観測データ (施設近傍)

すると想定されている。図-5より、各孔とも同様に、立坑の掘削が深度118m付近に達した時点で、急激な水圧低下が生じることが分かる。これは、立坑の掘削が土岐夾炭累層の底部に達する付近であり、水圧の急変と同じタイミングで立坑への湧水量も急増している(図-7)。この土岐夾炭累層底部付近には、比較的粒度の粗い砂岩(粗粒砂岩)が卓越して分布しており、ここからの湧水により、周辺の水圧が低下したと考えられる。また、掘削による水圧低下の後、坑内の冠水、再排水による水位変動に伴った明瞭な水圧応答が見られる。水圧応答の大きさは、立坑に最も近いMSB-3号孔で最も大きく、次いでDH-2号孔、MSB-1号孔、DH-15号孔と、立坑との距離が増すに連れて小さくなる。一方、施設からの距離が比較的遠い観測孔(立坑からの距離1km以上、孔配置は図-1を参照)としては、モデル中央を流れる日吉川の西側に位置する、MIU-1～4号孔、AN-1～3号孔と、月吉断層の北側に位置

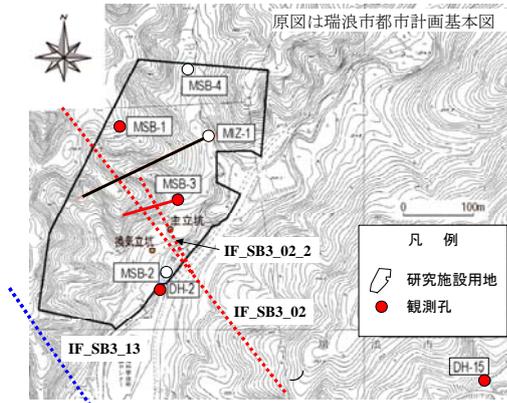


図-6 施設近傍の観測孔配置

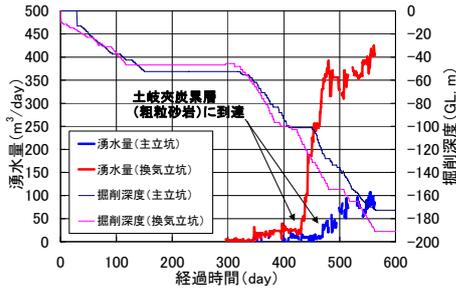


図-7 坑内湧水量と掘削工程の関係

するDH-11号孔において、同様の観測データが取得されているが、いずれも掘削～冠水～再排水時には、これらのイベントによる明瞭な水圧応答は確認されていない。

5. 既存モデルによる水圧応答データの再現性評価

既存モデルの検証を目的とし、既存モデルによる立坑掘削～冠水～再排水の一連の作業を模擬した地下水流動解析を行った。境界条件は、地表面を降雨涵養境界、側方及び底面を不透水境界、土岐川を水頭固定境界とした。掘削過程における立坑壁面の境界条件は、通常、大気圧開放とする場合が多いが、実際には、コンクリートライニングや、ライニングと岩盤の間に設置される排水マット等の影響を受け、大気圧開放状態とはならない場合も考えられる。そこで、本解析では、立坑壁面の境界条件を大気圧開放状態と不透水状態の中間に設定するために以下の「圧力開放率： α 」の概念を導入した。

$$P_D = \alpha (P_{D0} - P_A) \quad (1)$$

ここに、 α ：圧力開放率 (-)， P_D ：立坑壁面の境界水圧 (m)， P_{D0} ：対象地点の掘削前初期水圧 (m)， P_A ：大気圧 (m) である。すなわち、 α が0の場合は完全大気圧境界、1の場合は不透水境界を示す。本解析では、 α を0.2と仮定したが、今後、地下施設建設時の水圧応答データ等をもとに見直す予定である。また、掘削過程においては、実際の掘削工程をできる限り忠実に反映し、境界条件を非定常的に変化させた。非定常解析の1ステップは基本的に10日とし、その間に掘削された箇所境界条件を(1)式に基づいて随時変更した。冠水～再排水過程におい

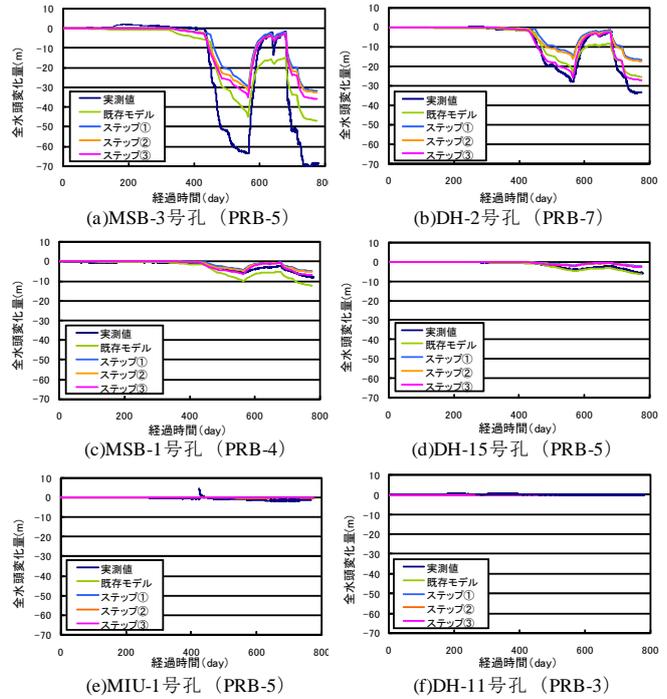


図-8 実測値と解析値の比較

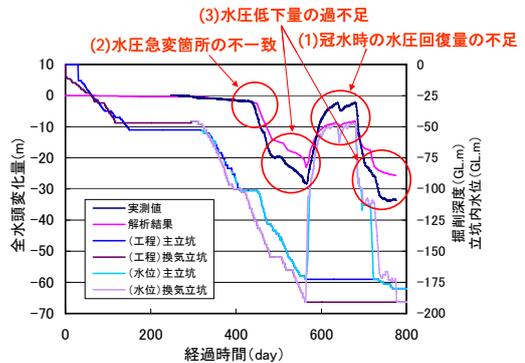


図-9 既存モデルの課題 (例：DH-2, PRB-7)

ては、掘削後の立坑壁面の境界条件を坑内水位相当の水頭固定境界とし、坑内水位の変動をできる限り忠実に反映しつつ、非定常的に変化させた。なお、解析には、有限要素法による三次元飽和・不飽和浸透流解析コードであるEQUIV_FLO⁷を用いた。

図-8中に解析結果を示す。既存モデルでは、施設近傍の4孔 (MSB-3号孔, DH-2号孔, MSB-1号孔, DH-15号孔) には、解析結果に掘削～冠水～再排水に伴う明瞭な応答が見られ、遠方のMIU-1号孔, DH-11号孔では、応答が見られない点など、実測データに見られる立坑からの距離と応答の有無の関係については、概ね再現できていることが分かる。また、明瞭な応答が見られる観測孔の中でもMSB-3号孔, DH-2号孔の応答が大きく、それと比較して、MSB-1号孔, DH-15号孔の応答は小さい点など、施設近傍の観測孔の応答の大小関係についても概ね再現できている。ただし、各観測孔におけるセンサー毎の応答の大きさの違いなど、詳細な応答特性までは再現できていない。本稿では、既存モデルの課題として、図-9に示す3点を挙げ、その要因と課題解決に向けたモデルの更新を行った。次章に、検討内容について概説する。

6. モデルキャリブレーション

表-2に、3つの課題に対するモデル更新の手順を示す。以下に、各ステップにおける課題解決へのアプローチとモデルの更新内容について述べる。

(1) 冠水時の水圧回復量の不足 (ステップ①)

既存モデルの解析結果は、実測データと比べて、冠水完了時の水圧回復量が不足している。これは、既存モデルが、地下施設近傍の初期水位を十分に再現できていないことによるものと考えられる。既存モデルは、掘削前の自然状態の水圧モニタリングデータを用いたモデルキャリブレーションにより、広域的な自然状態の初期水位分布をある程度再現できるモデルとなっているが、一部、地下施設近傍では、自然水位が低い領域 (図-10: 以後、低水頭領域と呼ぶ) が分布しており、この領域では、解析値に比べて実測値の水頭が50m程度低く、初期水位を十分に再現できていない。低水頭領域の形成要因については、現在も議論が続けられており、一つの可能性として、浅部堆積岩中の遮水性、あるいは透水性の構造により、この領域の深部への降雨涵養が阻害されている可能性が考えられているが、これまでの調査結果からは、これに相当する情報は得られていない。そこで、本稿では、低水頭領域の初期水位の再現性を重視し、土岐川と月吉断層、日吉川で囲まれた領域について、地表面の境界条件を変更し、この領域への降雨涵養を零とした。その結果、図-8中 (ステップ①) に示すように、初期水位が低くなることにより、冠水完了時の水圧回復量が大きくなった。ただし、水圧回復量の増大に伴い、掘削及び再排水過程における水圧低下量が小さくなり、逆に再現性が低下した。これについては、ステップ③で検討する。

(2) 水圧急変箇所の不一致 (ステップ②)

既存モデルでは、掘削過程において、水圧が急激に低下し始める時間が一致していない。これは、既存モデルに、土岐夾炭累層の粗粒砂岩部をモデル化していないことに起因すると考えられる。既存モデルは、土岐夾炭累層を均質一様で比較的透水性が低い地層としてモデル化しており (図-4)、掘削過程の湧水量は、主に、その下位の土岐夾炭累層 (基底礫) で発生すると想定していた。しかし、実際の湧水量は、立坑の掘削が土岐夾炭累層の粗粒砂岩部に達した付近から急増し始め、観測孔の水圧もそれと同時に急低下する。そこで、本稿では、この土岐夾炭累層の粗粒砂岩部をモデル化し、その下位の基底礫部と同等の透水性を設定した (図-11)。その結果、図-12に示すように、湧水量の急増する時間をほぼ再現し、図-8中 (ステップ②) に示すように、掘削過程の水圧が急低下し始める時間をほぼ再現した結果となった。

(3) 水圧低下量の不足 (ステップ③)

以上のモデル更新により、上記の2つの課題はほぼ解決したが、特に、ステップ①の降雨涵養量の変更により、掘削及び再排水過程の水圧低下量が不足する結果となった。水圧低下量の不足は、特に、DH-2号孔やMSB-3号孔の深部で顕著であり、これらは、いずれも立坑間に位置する遮水性を有する断層 (IF_SB3_02) の西側 (換気立坑側) に位置している。この課題の解決には、幾つかのアプローチが考えられる。一つは、水圧低下量の不足を掘削、排水による擾乱の不足として解釈するケースである。これは、深度約180mまでの立坑掘削中の湧水量の多くを

表-2 モデル更新の手順

ステップ	着目する課題	変更箇所
ステップ①	冠水時の水圧回復量の不足	低水頭領域の降雨涵養量を零
ステップ②	水圧急変箇所の不一致	土岐夾炭累層の粗粒砂岩部をモデル化
ステップ③	水圧低下量の過不足	NNW走向の断層(IF_SB3_13)を遮水性を有する断層として追加

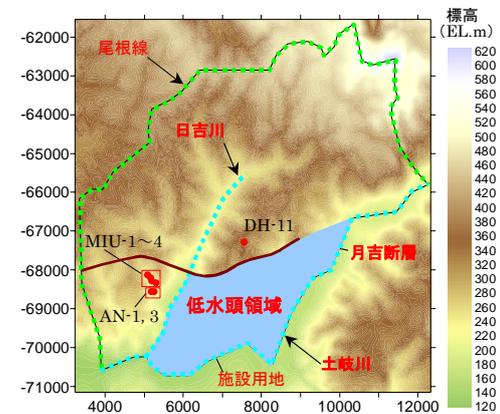


図-10 低水頭領域

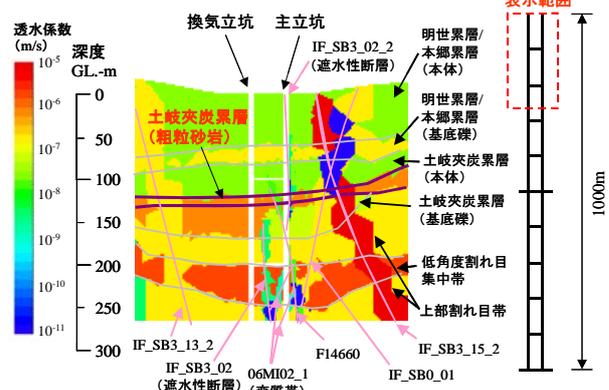


図-11 更新モデル (ステップ②) の透水性係数

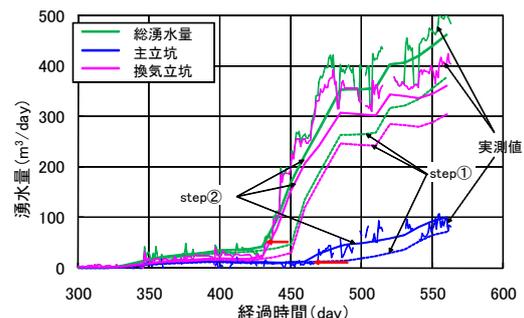


図-12 立坑掘削時の湧水量の比較 (ステップ②)

占める、土岐夾炭累層の粗粒砂岩部や、同基底礫部の透水性を高くし、掘削時の湧水量を多くすることで、それに伴う周辺の水圧低下量を大きくするというケースである。ただし、このケースは、湧水量の増加を伴うため、現状で既にある程度再現できている湧水量の再現性を逆に低下させることとなる。もう一つは、遮水性を有する断層で囲まれた水理学的なコンパートメントにより、水圧低下量を大きくするケースである。これは、調査では確認されているが、既存モデルには反映していない断層を遮水性を有する断層として新たにモデル化し、それによるコンパートメント効果により、水圧低下範囲を限定し、同じ擾乱に対する水圧応答を局所的に大きくするケースである。本稿では、湧水量の再現性を考慮し、後者のケースを採用した。具体的には、地下施設の西側に位置する遮水性を有すると想定されている断層（図-6中の青色破線：IF_SB3_13）を立坑間に位置するIF_SB3_02断層と同等の遮水性を有する断層としてモデル化し、これらに挟まれるDH-2号孔及びMSB-3号孔の深部の水圧応答を大きくするという試みである。このIF_SB3_13は、第1段階で実施したボーリング調査において遮水性を有していると想定されていたものの、孔間水理試験結果に基づくモデルキャリブレーションでは影響外であったことから既存モデルでは考慮しなかったものである。新たに断層を追加した結果、図-8より、DH-2号孔及びMSB-3号孔の深部の水圧応答は大きくなった。以上より、一部で実測データの再現性に課題は残っているものの、遮水性断層を追加することによって、より実測データを再現するモデルを構築することができた。

7. まとめ

本稿では、これまでに構築してきた水理地質構造モデルによる立坑掘削～冠水～再排水時の周辺観測孔の水圧応答や湧水量の再現性の確認を行った。その結果、既存モデルは、掘削から再排水までの一連の坑内作業に対す

る水圧応答の有無や大小関係など、概略の傾向をほぼ再現できていることが確認された。ただし、施設近傍のより細かい応答特性は、一部再現できておらず、既存モデルの課題として抽出し、課題解決に向けたモデルの更新を実施した。モデル更新においては、初期水頭の再現性向上や水理地質構造の再区分の必要性等を示した。また、施設近傍の水圧応答の大小関係から、NNW走向の遮水性を有する断層が、施設近傍の地下水流動場に影響を与えている可能性があることを示した。以上より、第1段階での調査と比較して、水理学的に大きな擾乱を与える立坑掘削時の水圧応答をモニタリングすることは、水理地質構造モデルを更新する上で有効であると考えられる。

今後は、深度180m以深の掘削において取得される同様のデータを用いて、モデルの更新を継続するとともに¹⁾、水理地質構造モデルの妥当性確認及び更新に関する調査・解析の方法論を構築していく予定である。

参考文献

- 1) 三枝博光ほか著者 18名：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書，JAEA-Research 2007-043，2007。
- 2) 文村賢一，下茂道人，三枝博光，尾上博則：水圧観測値を用いた地下水流動モデルのキャリブレーション，土木学会第60回年次学術講演回講演論文集，2005。
- 3) 熊本創，下茂道人，三枝博光，尾上博則：孔間水理試験データを用いた地下水流動モデルのキャリブレーション，第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2007。
- 4) 熊本創，下茂道人，三枝博光，尾上博則：立坑掘削時の調査データを用いた地下水流動モデルのキャリブレーション，土木学会第63回年次学術講演会講演論文集，2008。
- 5) 稲葉薫，三枝博光：深部地下水流動系を抽出するための後背湿地地形の影響を考慮した広域地下水流動解析，地下水学会誌，第47巻，第1号，pp.81-95，2005。
- 6) 糸魚川淳二：“瑞浪地域の地質”，瑞浪市化石博物館専報，第1号，pp.1-50，1980。
- 7) 下茂道人，山本肇：等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法，大成建設技術研究所報，pp.257-252，1996。

HYDROGEOLOGICAL MODELLING WITH INFLOW VOLUME AND PRESSURE RESPONSE DURING GROUNDWATER RECOVERY AND DISCHARGE IN SHAFT

Sou KUMAMOTO, Michito SHIMO, Hiromitsu SAEGUSA and Takuya OHYAMA

The Mizunami Underground Research Laboratory is being constructed by Japan Atomic Energy Agency at Mizunami, Japan. During construction, the information needed for testing and revising the hydrogeological model has been obtained. During shaft excavation, pumping from the shaft has to be halted and the water level in shaft was recovered for the improvement of facility for treatment of discharged water. This period was divided into three phases, such as excavation, recovery and discharging, and hydraulic behavior in these phases was considered as a large-scale hydraulic test. In this study, model testing and calibration using the data of inflow volume and hydraulic behavior observed in these phases have been carried out.