

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

熊本 創^{1*}・下茂 道人¹・三枝 博光²・尾上 博則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、地下研究施設建設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および地下水流動解析を進めている。筆者等は、これまでに、地表からの探査やボーリング調査結果等に基づき、モデルの構築および周辺観測井内の定常状態の水頭観測値を用いた水理パラメータの同定を行ってきた。今回、孔間水理試験で得られた非定常データを用い、揚水に対する圧力応答の再現性に着目した、地質構造および水理パラメータの同定を実施した。その結果、遮水性や透水性を有する断層等の地質構造を反映することで、孔間の圧力応答を再現できた。また、定常観測値によるキャリブレーションでは求られない、比貯留係数の特定が可能であることが分かった。

Key Words : cross-hole hydraulic test, hydrogeological model, parameter calibration, fault, specific storage

1. はじめに

地下水流動評価のための水理地質構造モデルは、地表からの探査やボーリング調査、水理試験等によって得られる限られた情報量に基づいて構築されることが多い。また、モデル化には、様々な仮定に基づいた実測データの解釈、モデル化の概念が適用されるため、構築したモデルは、多くの不確実性を含んでいるものと考えられる。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が岐阜県瑞浪市で実施している超深地層研究計画においては、瑞浪超深地層研究所の地下施設建設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および地下水流動解析を進めている¹⁾。筆者等は、原子力機構が同地区においてこれまでに実施した調査結果を基に、水理地質構造モデルの構築を行い、先に述べたようなモデルの不確実性を低減することを目的として、周辺観測井内の定常状態における水頭観測値を用いた岩盤水理パラメータの同定を行ってきた²⁾。今回は、孔間水理試験で得られた観測井内の圧力変化の非定常データを用い、揚水に対する観測井の圧力応答をより正確に再現できるような地質構造や水理パラメータの組合せを求めた。本報では、キャリブレーションの方法と結果について述べる。

2. 解析対象領域の概要

解析対象領域は、図-1に示す約9km×9kmの領域である。北および西側境界は、最大標高620mの尾根線からなり、東および南側境界は南西方向に流れる土岐川を境界とする。領域中央部に、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³⁾。

図-2に対象領域周辺の地質図を示す。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

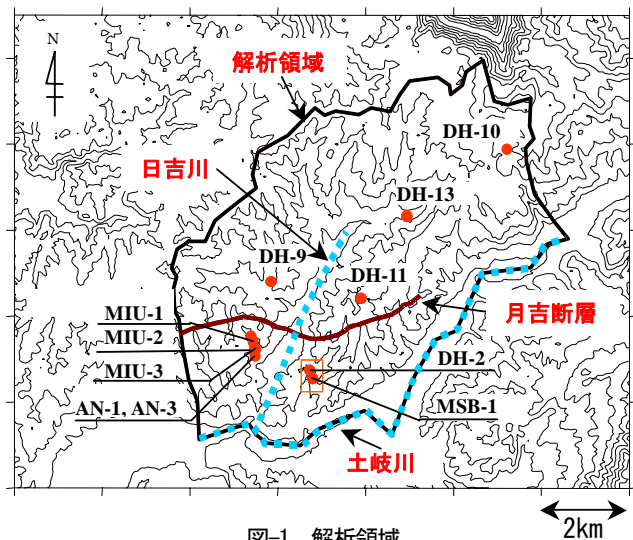


図-1 解析領域

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、下位より土岐夾炭累層、明世累層、本郷累層および生俣累層に区分される。花崗岩は、浅部に30°以下の低角度傾斜の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傾斜を有する割れ目が集中するゾーンが存在する。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度南傾斜）の他、地表からの探査やボーリング調査により、47本の断層が確認されている。これらの断層のうち、MSB3FZおよび2D_MIZ1FZ06断層は、瑞浪超深地層研究所用地（以下、研究所用地と呼ぶ）の中央部を通過する北西走向の断層であり、IF_SB0_01断層は北北西走向の断層である（図-3）。

研究所用地周辺には、掘削長約1,300m（MIZ-1号孔）および約1,000m（DH-15号孔）、約500m（DH-2号孔）の深層ボーリングや、掘削長約100～200mの浅層ボーリング孔（MSB-1～MSB-4号）が存在する（図-3）。これらのボーリング孔のうち、DH-2、DH-15、MSB-1、MSB-3号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。

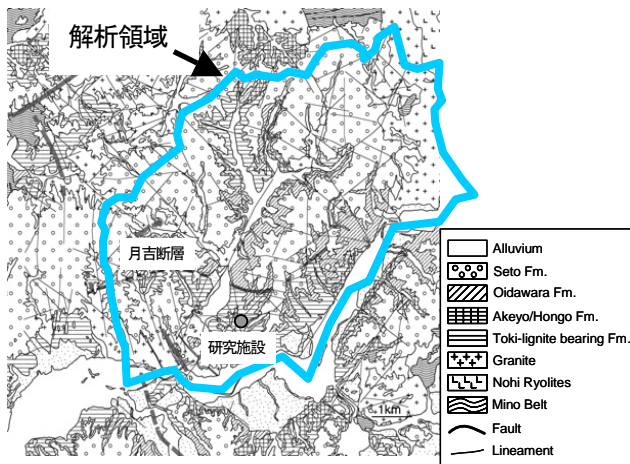


図-2 対象領域周辺の地質図

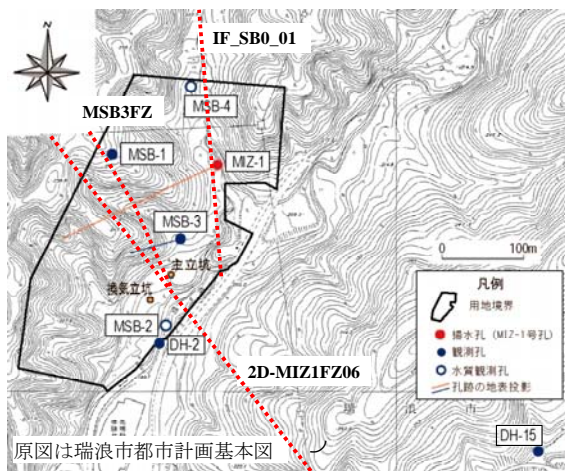


図-3 試験位置図

3. 孔間水理試験結果⁴⁾

孔間水理試験は、上記のボーリング孔の内、MIZ-1号孔を揚水井とし、長期モニタリング装置の設置されたDH-2、DH-15、MSB-1、MSB-3号孔を観測井として実施された。揚水区間は、MIZ-1号孔の深度191～226mおよび662～706mの区間に存在する断層を対象とした2区間である（以下それぞれ試験1および試験2と呼ぶ）。揚水区間および観測区間の位置関係と主要な地質・地質構造の概略を図-4に示す。

試験1および試験2の揚水量の経時変化を図-5に示す。また、試験条件を表-1に示す。試験1では、本揚水を開始する前に、孔壁に付着した泥膜を除去するために、短時間の揚水を数回繰り返した。また、試験2では、揚水の初期において段階的に揚水量を増加した。

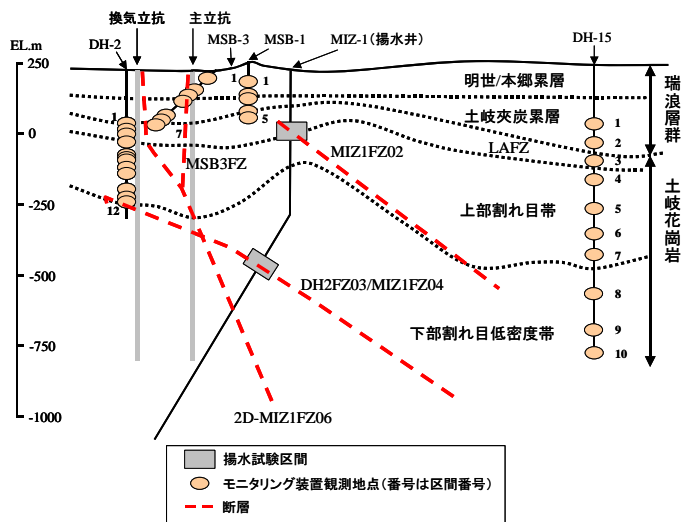


図-4 揚水区間と観測センサーの配置（模式図）

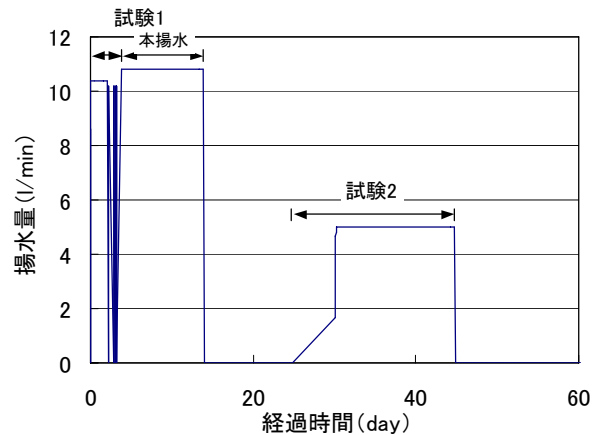


図-5 揚水量の経時変化⁴⁾

表-1 試験条件⁴⁾

試験	試験区間 (掘削深度m)	揚水量 (L/min)	揚水時間 (day)	総揚水量 (m ³)
試験1	191.00～226.41	10.8	10.2	157.6
試験2	662.20～706.23	5.2	14.8	110.9

図-6に各観測井の水圧変化を示す。図中の赤線および青線は、それぞれ揚水を開始および停止した時間を示す。

2回の試験で明瞭な水圧応答が観測されたのはDH-15号孔およびMSB-1号孔の深部のみである。一方、MSB3FZ断層の西側に位置するDH-2号孔やMSB-3号孔の掘削深度約90m以深では明瞭な水圧応答は認められない。これは、遮水性を有する断層（MSB3FZ, 2D_MIZIFZ06）によって、揚水による圧力応答が遮られたことを示唆しており、このことは、原子力機構がこれまでに実施してきた、連続モニタリング結果に見られる、日本近海で発生した地震に同期した圧力変動の違いとも一致している（図-7）⁴⁾。また、MSB-1の浅部センサーは、設置深度が浅いため、気候の影響による値のばらつきが見られる。

また、図-7に示すように、孔間水理試験で得られた観測井の圧力変動は地震の影響を受けており、特に試験期間中は、紀伊半島沖地震（マグニチュード：7.1、震源からの距離：約260km）直後の一時的な圧力上昇の後の圧力低下傾向の中にある。そこで、キャリブレーションに先立って、地震の影響を除去するために、各観測井の圧力変動から紀伊半島沖地震によるバックグラウンドの圧力変動分を補正した。具体的には、図-8に示すように紀伊半島沖地震後の長期的な圧力低下傾向を多項式でフィッティングし、これを圧力の観測値から差し引いた。

4. 解析モデル

解析モデルを図-9に示す。解析モデルは、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た。施設スケール領域では、地下施設掘削の影響を詳細に把握するため、立坑などの構造を反映した他、地質構造をより細かく区分し、メッシュ分割も詳細化した。断層については、月吉断層は直接メッシュに反映したが、それ以外の断層は、メッシュ作成後、対応する位置の要素を抽出し、各断層の水理物性をそれぞれ与えた。

解析に使用する水理特性の初期値は、原位置水理試験結果を基に、表-2のように設定した。断層の物性値については、月吉断層は、断層主要部と断層に伴う割れ目帯に要素を分割し、それぞれに物性値を別途与えた。それ以外の断層は、断層面に交差する要素に断層面方向とそれに直交する方向で異なる透水係数を与えることで、断層の透水異方性をモデル化した。なお、初期ケースのモデルでは、月吉断層およびトレース長3km以上の断層（広域スケールの断層）以外の施設スケールの断層は、モデル化していない。

境界条件は、地表面を降雨涵養境界、側方および底部を不透水境界、土岐川を水頭固定境界とした。また、揚

水区間については、試験と同等の揚水条件を与えた流量固定境界とした。なお、地下水流動解析には、有限要素法による三次元飽和・不飽和浸透流解析コード（EQUIV_FLO）を用いた⁵⁾。

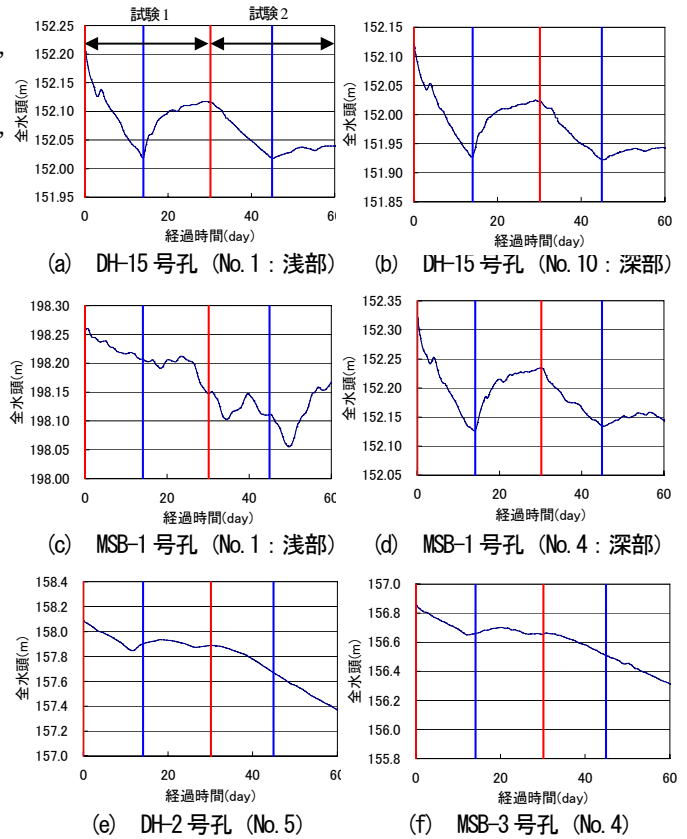


図-6 観測井の圧力変化の実測値

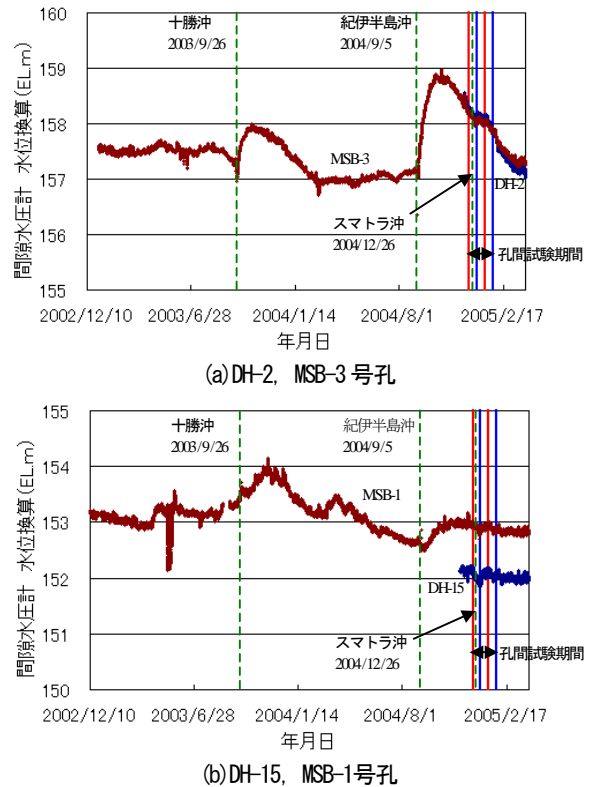


図-7 地震に伴う観測井の圧力変化

5. モデルキャリブレーション

キャリブレーションは、主に各観測井の応答の有無に着目し、特に観測井の応答に影響を与えると考えられる断層を抽出しモデルに追加する、いわゆる地質構造のキャリブレーションと、応答の大きさや圧力低下および回復の速さに着目し、地層や断層の水理パラメータを変化させる水理パラメータのキャリブレーションの大きく分けて2つのステップについて実施した。表-3にキャリブレーションのステップと内容を示す。また、図-10に各ステップにおける観測井の圧力変化の実測値と解析値の比較を示す。図中の赤線および青線は、それぞれ、揚水の開始および停止した時間を示す。

(1) 初期ケース

初期ケースは、図-9の地質構造モデルに、解析領域内で確認された比較的規模の大きい（トレース長が3km以上のリニアメント）5断層を反映したモデルを用いた。

図-10より、初期ケースの解析結果では、全ての観測井に応答が見られ、特に揚水井の近傍に位置するMSB-1、MSB-3、DH-2号孔の応答が実測値に比べて過大であり、実測値の傾向と一致しない。そこで、キャリブレーションのステップ①では、観測井の圧力応答の有無に着目し、連続モニタリング結果から遮水性が確認されており、特にDH-2およびMSB-3号孔への応答を遮ると考えられるMSB3FZおよび2D_MIZ1FZ06断層をモデルに追加した。

(2) ステップ①

図-10より、ステップ①の結果は、遮水性を設定した2断層によって、特にDH-2号孔への応答が小さくなり、実測の傾向と一致している。しかし、揚水井の極近傍に位置するMSB-1、MSB-3号孔への試験1に対する応答が実測と比べて過大である。また、DH-15号孔への試験1に対する応答を見ると、解析結果は、揚水区間と距離の近い浅部で応答が大きく、距離の離れた深部で応答が小さくなっている。一方、実測値は、浅部と深部の応答がほぼ同等の大きさを示している。これは、試験1の揚水区間からDH-15号孔の深部に向かう高透水性の圧力伝達経路の存在を示唆している。そこで、ステップ②では、ステップ①のモデルに、2つの揚水区間に交わるMIZ1FZ02およびDH2FZ03/MIZ1FZ04断層（図-4）をモデルに追加した。なお、水理パラメータは、両断層とも実測値を参考に設定した。

(3) ステップ②

ステップ②では、特に試験1の揚水区間に交差し、DH-15号孔の深部に向かって延びる断層であるMIZ1FZ02をモデルに反映したため、DH-15号孔の深部の応答が大

きくなり、浅部と深部の応答の大きさがそれぞれ同程度の大きさを示した。また、揚水区間に高透水性の断層が反映され、断層に沿って集水域が面的に拡大したため、全体的に圧力応答の伝播が緩和され、各観測井の圧力低

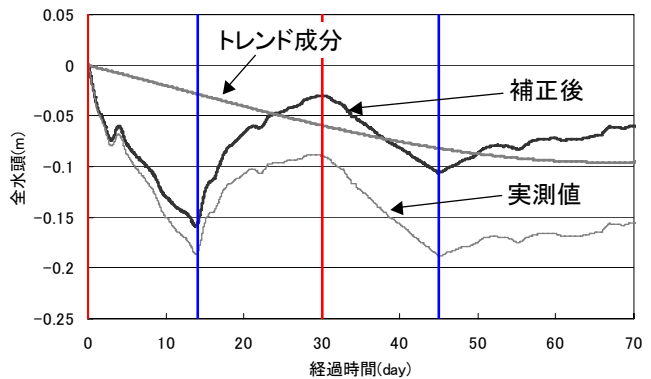
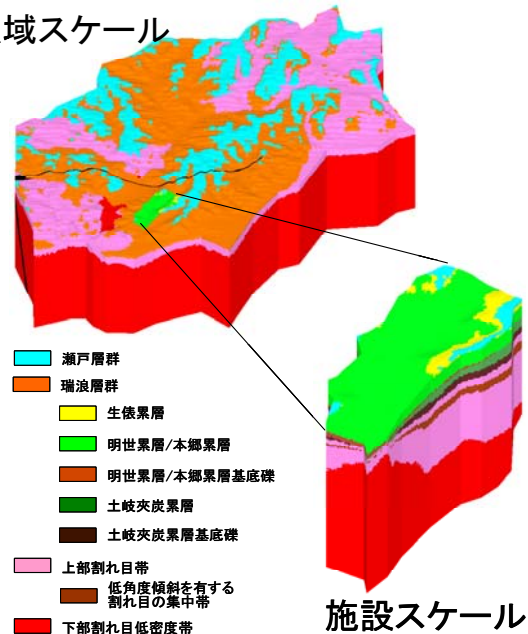


図-8 地震の影響の除去（例：DH-15 No.1）

広域スケール



施設スケール

図-9 地質構造モデル

表-2 水理パラメータ

地質・地質構造要素	透水係数		比貯留係数 Ss(1/m)	
	水平方向 (断層面に平行) K _h (m/s)	鉛直方向 (断層面に直交) K _v (m/s)		
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
	生俣累層	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)	5.2E-07	5.2E-07	1.0E-06
	土岐夾炭累層(本体)	9.0E-08	9.0E-08	1.0E-06
花崗岩	土岐夾炭累層(基底礫)	3.0E-06	3.0E-06	1.0E-06
	上部割れ目帯(UHFD)	2.2E-07	2.2E-07	5.0E-07
	低角度割れ目帯(LAFZ)	1.1E-06	1.1E-06	5.0E-07
不連続構造	下部割れ目低密度帯(LSFD)	3.2E-08	3.2E-08	5.0E-07
	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
	MIZ1FZ02	9.2E-06	9.2E-06	1.0E-07
	DH2FZ03/MIZ1FZ04	2.4E-07	2.4E-07	1.0E-07
	MSB3FZ	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
	2D_MIZ1FZ06	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
IF_SB0_01	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07	
トレース長3km以上の断層	5.6E-06	1.0E-11	1.0E-07	

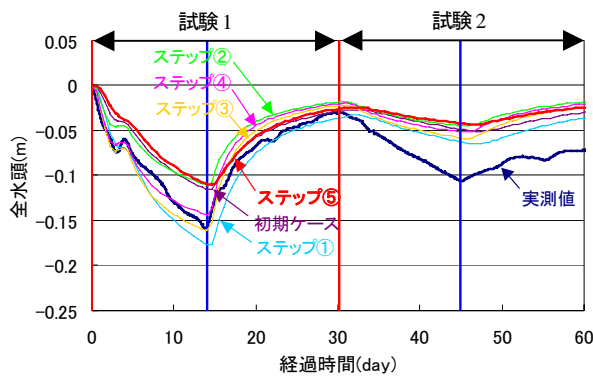
下量が小さくなった。このため、揚水井近傍のMSB-1、MSB-3号孔の試験1に対する応答は減少したものの、実測値と比べると過大である。そこで、次のステップ③では、施設スケール内で確認されている断層の内、位置的にMSB-1、MSB-3号孔への応答を遮ると考えられるIF_SB0_01断層をモデルに追加した。なお、この断層は、水理パラメータが取得されていないため、同様の走向、傾斜を有するMSB3FZ断層と等しい物性を仮定した。

(4) ステップ③

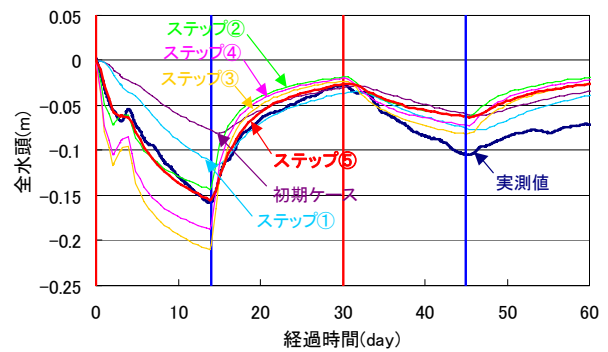
図-10より、ステップ③では、揚水井近傍のMSB-1、MSB-3号孔への応答が小さくなり、特にMSB-3号孔では、実測の傾向に一致するような改善が見られるが、MSB-1号孔は、逆に応答の大きさが実測を下回る結果となった。

表-3 キャリブレーションのステップ一覧

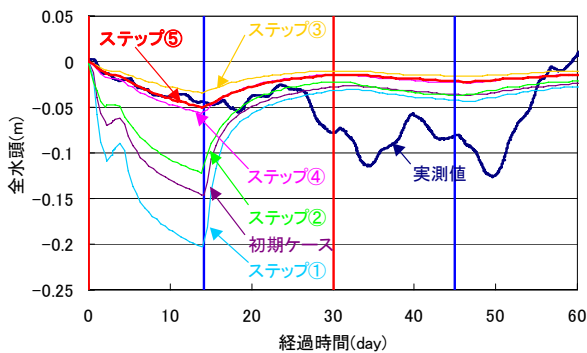
ステップ	追加した断層	物性値
地質構造の検討	初期ケース	初期物性
	ステップ①	
	ステップ②	
	ステップ③	
水理物性の検討	ステップ④	IF_SB0_01の透水係数 $9.3 \times 10^{-9}(\text{m/s}) \rightarrow 2.0 \times 10^{-7}(\text{m/s})$
	ステップ⑤	上部割れ目帯、低角度割れ目帯の比貯留係数 $5.0 \times 10^{-7}(1/\text{m}) \rightarrow 1.0 \times 10^{-6}(1/\text{m})$



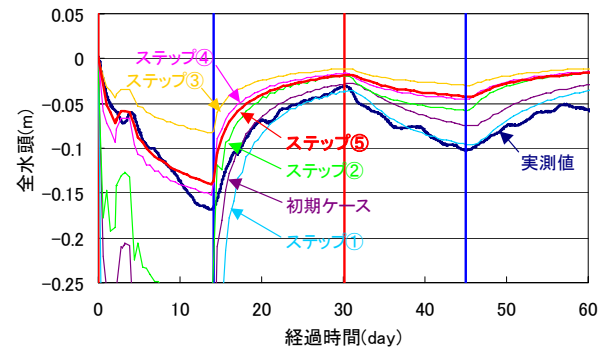
(a) DH-15号孔 (No. 1 : 浅部)



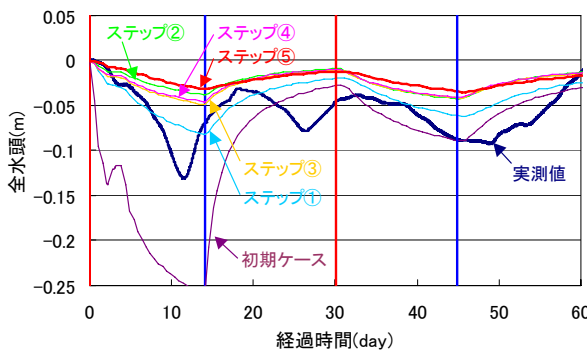
(b) DH-15号孔 (No. 7 : 深部)



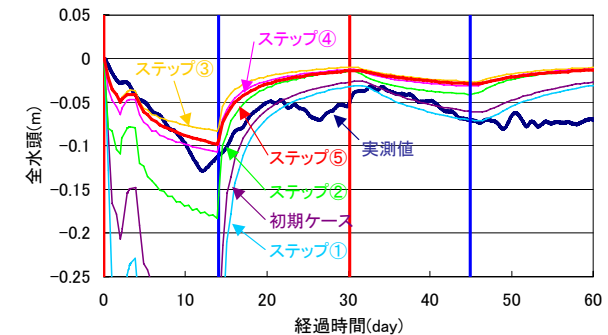
(c) MSB-1号孔 (No. 1 : 浅部)



(d) MSB-1号孔 (No. 4 : 深部)



(e) DH-2号孔 (No. 5)



(f) MSB-3号孔 (No. 4)

図-10 実測値と解析値の比較 (初期モデル～ステップ⑤)

また、IF_SB0_01断層の遮水性により、集水域が縮小されたため、DH-15孔への応答がやや過大となった。これらの変化は、ステップ③で仮定したIF_SB0_01断層の遮水性が強すぎることに起因すると考えられる。そこで、次のステップ④では、IF_SB0_01断層の透水性を大きくした。

(5) ステップ④

図-10より、ステップ④では、IF_SB0_01断層の遮水効果を弱めたことにより、断層背面にあるMSB-1号孔への応答が大きくなり、特に1回目の応答は、実測とほぼ同等の大きさとなった。しかし、全ての観測井において、揚水に対する圧力応答の速さが実測と比べてやや速い。

そこで、次のステップ⑤では、全体的な応答の速さに影響を与えると考えられる花崗岩の上部割れ目帯および低角度割れ目密集帯の比貯留係数を大きくした。これらの地層は、試験1の揚水区間を含む地層であり、低密度割れ目帯と比べて透水性が高く、空隙率も大きいと考えられるため、比貯留係数が大きい可能性がある。

(6) ステップ⑤

図-10より、ステップ⑤では、DH-15号孔への応答が実測値と比べてやや過小となったが、全体的に応答の速さが遅くなり、実測の傾向と概ね一致した。ただし、実測データにおいて明瞭な応答の見られなかったDH-2およびMSB-3号孔にも解析結果に応答がみられる。しかし、図-7に示すように、DH-2、MSB-3号孔は、地震による圧力変動がDH-15、MSB-1号孔よりも大きく、揚水に伴う圧力変動が見えにくくなっている可能性があるため、実際は実測値にも多少の水圧応答は生じている可能性があると考えられる。

以上より、ステップ①～⑤のキャリブレーションにより、孔間水理試験における観測井の圧力応答を振幅、応答速度とも概ね再現することができた。

5. まとめ

今回のモデル化・解析の実施により、断層をモデルに反映することで、孔間水理試験における揚水に対する観測井の圧力応答の大きさをある程度再現できることが分かった。また、地層の比貯留係数を変えることで、応答の速さの再現性を向上できることが分かった。

今後は、地下施設建設に伴う観測井の圧力応答や、坑道への湧水量などの、より大きなインパクトに対する非常の応答データを用いた同様のキャリブレーションを実施し、モデルの更なる信頼性向上を目指す。

参考文献

- 1) 三枝博光, 下茂道人, 文村賢一, 竹内真司, 尾上博則: “地下研究坑道掘削に伴う地下水流動状態の変化を予測するための地下水流動解析とそれに基づく調査研究計画の策定”, 日本地下水学会 2006年秋季講演会要旨, 2006 (投稿中) .
- 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に関する検討”, 土木学会全国大会予稿集, 2005.
- 3) 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.
- 4) 竹内真司, 藤田有二, 安藤賢一: “亀裂性岩盤を対象とした長期揚水試験”, 日本地下水学会 2005年秋季講演会講演要旨, 2005.
- 5) 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.257-262, 1996.

CALIBRATION OF GROUNDWATER FLOW MODEL WITH RESULT OF CROSS-HOLE HYDRAULIC TEST

Sou KUMAMOTO, Michito SHIMO, Hiromitsu SAEGUSA and Hironori ONOE

Japan Atomic Energy Agency is currently developing the hydrogeological model based on the results of investigations carried out on ground, to predict the hydraulic impacts onto the groundwater systems during the construction of underground facilities. In this study, a systematic model calibration study has been carried out using nonsteady head responses obtained during the crosshole hydraulic interference tests. It has been shown that the nonsteady head observations contribute significantly to select the key geological features, such as faults, and to determine the hydraulic parameters, such as specific storage, and finally to reduce the uncertainties associated with the hydrogeological model.