

1,000m 級ボーリング孔を用いた長期揚水試験

LONG-TERM PUMPING TEST IN DEEP UNDERGROUND WITH 1,000m DEPTH BOREHOLES

竹内真司*・下茂道人**・山本 肇**・文村賢一**

Shinji TAKEUCHI, Michito SHIMO, Hajime YAMAMOTO and Ken-ichi FUMIMURA

Long-term pumping tests were performed using a 1000 m borehole, MIU-2, as a pumping hole, and other five boreholes as monitoring holes, at MIU (Mizunami Underground Research Laboratory) Site in Gifu Prefecture. The purpose of the tests is to identify the hydraulic connections in deep underground of MIU site, focusing the role of the Tsukiyoshi fault and associated fracture zones beneath and above the fault onto groundwater hydrology of the site. The responses to pumping were obtained only at the selected sections within fractured zones along the fault showing the existence of localized flow paths along the fault. No response was obtained at the opposite side of the fault from the pumping section, confirming that the Tsukiyoshi fault is acting as a water barrier. The responses to larger impacts generated by opening and closing the packers located within the Tsukiyoshi fault before and after each pumping test were detected at all monitoring sections and they were evaluated using a numerical model considering the three dimensional geological structure. The obtained hydraulic parameters both from pumping tests and fault ON/OFF operations were not identical showing the scale dependent heterogeneity.

Key Words: long-term pumping test, deep borehole, fracture zone, fault, hydrogeological characterization

1. はじめに

地下深部岩盤内の水理地質構造のモデル化や地下水流動評価にあたっては、断層や亀裂に起因する岩盤内の水みちを把握することが重要である。これまでの調査¹⁾から、岩盤内の水みちの特定には、複数孔を用いた圧力干渉試験(揚水試験など)が有効であることが示されている。通常、揚水試験における調査範囲(影響範囲)を拡大するには、揚水の規模(揚水量、揚水期間)を大きくする。しかし、岩盤の透水性が低い場合、試験区間からの揚水可能量には限界があるため、揚水期間を長期化することが有効と考えられる。

筆者らは、花崗岩類を主体とする調査区域内において、深度約1,000mのボーリング孔を用いた長期(約1ヶ月間)の揚水回復試験を行い、周辺水圧応答の観測結果などから、断層付近の水理特性を調査した。また、断層の遮水性に起因した断層上下盤での自然水位差を利用し、断層部のパッカー開閉によって生じる周辺水圧変動の観測から、より広域の水理特性に関する情報の取得を試みた。

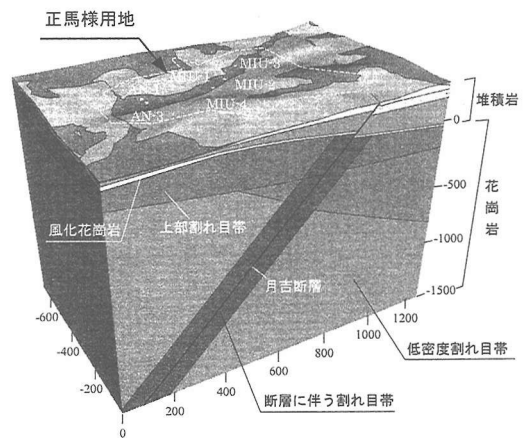


図-1 地質構造モデル

* 正会員 核燃料サイクル開発機構

** 正会員 大成建設(株) 土木技術研究所

2. 研究対象領域および地質の概要

研究対象領域は、岐阜県瑞浪市にあるサイクル機構の、正馬様用地と呼ぶ約 700m×400m の領域である (図-1)。当地域の地質は、基盤をなす領家帯花崗岩類と、これを被覆する新第三紀中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群などからなる。また、月吉断層と呼ばれる逆断層 (走向：東西、傾斜：約 70～80 度南落ち、落差：約 30m) が存在し、用地内を横断している。当用地内においては、既に 5 本の鉛直ボーリング孔 (掘進長約 1,000m) と 1 本の斜めボーリング孔 (鉛直から 30 度下向き、掘進長約 790m) が掘削され、各種の調査試験が行われている (図-1、2)。

当用地を含む周辺領域では、各種調査結果をもとに、図-1 に示す地質構造モデルが構築されている。このモデルでは、基盤の花崗岩を厚さ約 100m の堆積岩が被覆しており、さらに花崗岩は、厚さ数 m からなる風化部、深度約 300m 程度まで分布する水平割れ目が卓越する上部割れ目帯、それ以深に分布する低密度割れ目帯に区分される。

月吉断層は、図-2 に概念的に示したように、MIU-2 号孔の深度約 900m、MIU-3 号孔の深度約 700m、MIU-4 号孔の掘進長約 670m において確認されている。同断層の本体部は、厚さ 20～25m 程度の熱水変質に伴う固結した断層岩からなり、その上盤と下盤には、断層に付随した割れ目帯 (見かけ厚さ約 100m の割れ目帯が断層の上下盤に存在) が存在する (図-2)。これまでの調査結果から、月吉断層は遮水構造として機能しており、下盤の地下水圧は上盤のそれに対して水頭で 30m 程度高いことが分かっている¹⁾。

3. 試験内容および試験条件

長期揚水試験は、MIU-2 号孔を揚水孔とし、他の試験孔 (MIU-1、MIU-3、MIU-4、AN-1、AN-3) を観測孔として実施した。観測孔では、揚水・回復に伴う水圧変化を観測した。試験は 2 回に分けて行ない、第 1 回目試験では断層下盤側を、第 2 回目試験では断層上盤側を各々対象とした。各揚水区間は、先に実施された単孔式透水試験結果から高い透水性が確認されている「断層に伴う割れ目帯」の内部に設定した (図-2)。試験条件を表-1 に示す。

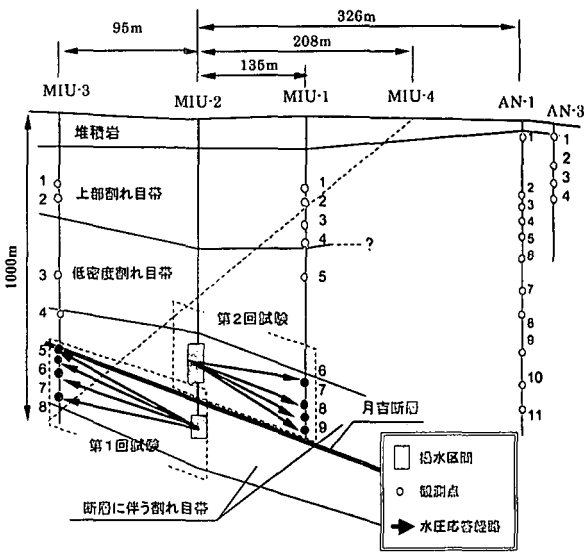


図-2 揚水孔と観測孔の配置と水圧応答経路

表-1 試験条件

試験名	揚水区間 (mbgl)	区間長 (m)	揚水量 (t/分)	揚水期間 (日)	回復期間 (日)
第1回試験	970.7-1012.0 (断層下盤)	41.3	16	11	23
第2回試験	844.0-867.5 (断層上盤)	23.5	2.3	14	13

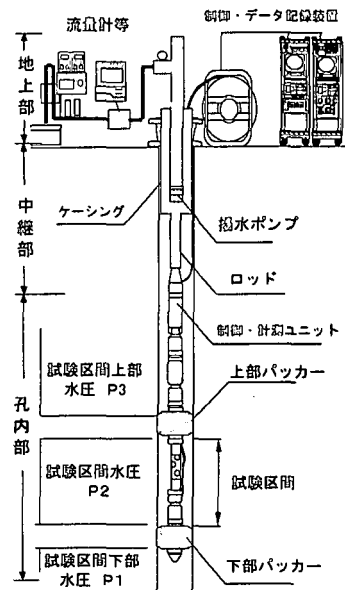


図-3 1000m 対応水理試験装置

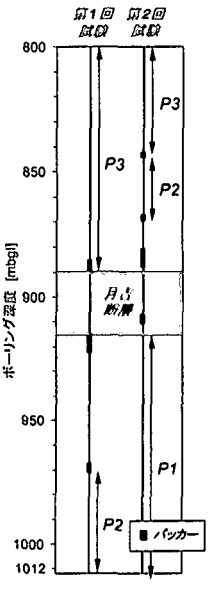


図-4 パッカー配置

揚水孔には「1,000m 対応水理試験装置」(図-3)を設置した。同装置は、定流量ポンプによる揚水とともに、揚水流量ならびに揚水区間水圧(P2)及びその上下区間の水圧(各々P3、P1)を連続測定する機能を有する(図-3)。断層部における下盤から上盤への圧力の漏れを回避するために断層周辺に多重のパッカーを設置した。各試験における揚水孔内のパッカー配置を図-4に示す。

観測孔での水圧測定には、パッカーにより隔離した複数の孔内区間の水圧を同時に測定するシステム(MP システム、Westbay 社製)を用いた。各孔の水圧観測区間のセンサー配置を図-2中に示した。各観測区間のセンサーは、地表側の区間より、PRB-1,2...と深度順に番号付けされており、それらのセンサー番号を図-2 中にあわせて示した。

試験では、揚水孔である MIU-2 号孔において、以下の操作・測定を行った(図-5~7)。まず、試験に先立ち、設置されていた MP システムを撤去した。次に、「1,000m 対応水理試験装置」を設置し、パッカーを拡張(INF)した後、水圧観測を開始した(PSR)。前述した通り、自然状態では、断層下盤側の方が上盤側よりも約 30m 高い水頭を有している。従って、揚水孔への装置設置のため、断層部のパッカーを一時開放すると、ボーリング孔が導水路となり上下盤間の水圧が平衡に向かう。揚水試験開始時点では、再度パッカーで断層部を閉鎖したことに伴う水圧回復(下盤側の場合は上昇、上盤側の場合は下降)過程にあり、定常状態には至っていなかった。しかし、解析上、この水圧変化の補正が可能と判断し(後述)、揚水を開始した(RW)。揚水終了後、引続き回復試験(RWS)に移行した。回復試験終了後、パッカー収縮(DEF)して試験を終了した。

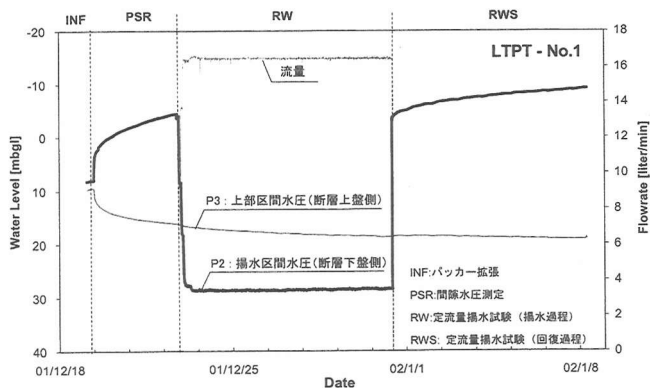


図-5 揚水孔内の圧力変化(第1回試験)

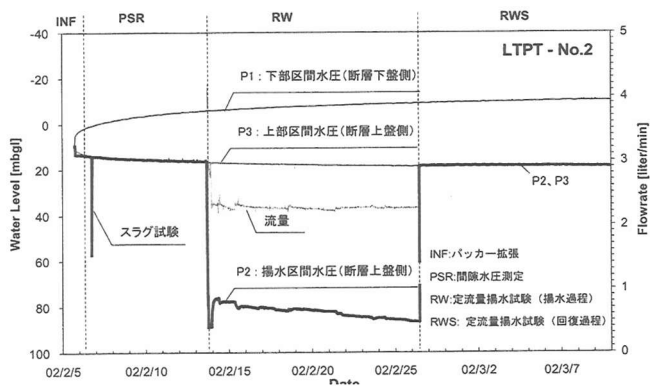


図-6 揚水孔内の圧力変化(第2回試験)

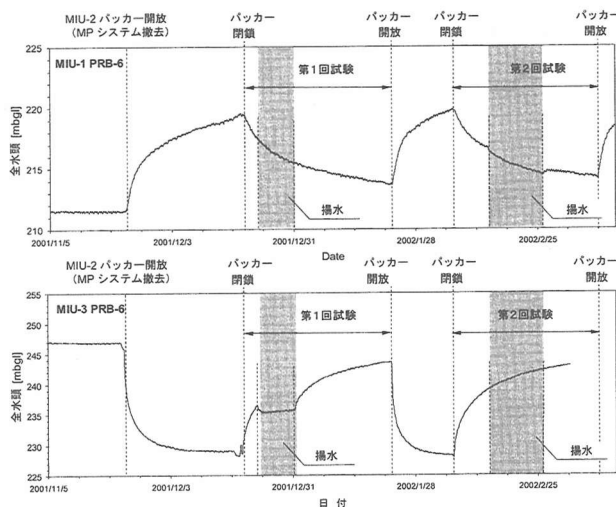


図-7 観測孔での水圧応答の例

(MIU-1 PRB-6 (断層上盤) 及び MIU-3 PRB-6 (断層下盤))

4. 試験結果と評価

(1) 揚水孔における観測結果

第1回及び第2回試験における、揚水区間と上下部区間の圧力変化を図-5及び図-6に示す(P1、P2、P3の表

記については、図-3 参照)。これらの図より、揚水に伴う揚水区間水圧の明瞭な低下が確認される。なお、第2回試験の揚水当初に水圧が一時的に下がり、再度回復しているのは、実際の可能揚水量が当初想定より少なく、試験装置内の水位がポンプ付近まで低下したため、揚水量を下げたことによる。揚水区間の上部・下部の圧力に、揚水に伴う変動が見られないことから、パッカーによる断層部の閉鎖が良好であることが確認される。

(2)観測孔における観測結果

MIU-2 号孔からの揚水に対し、明瞭な水圧応答が観測された経路を図-2 に示した。応答が観測されたのは、MIU-2 号孔に隣接する MIU-1 および MIU-3 号孔(孔間距離 95m、135m) の内、断層に伴う割れ目帯中の観測区間のみであった(第1回試験時: MIU-3 号孔断層下盤側の4区間、第2回試験時: MIU-1 号孔の4区間)。他の観測孔では、揚水に対する明確な水圧応答は認められなかった。

図-7 に、MIU-1 号孔と MIU-3 号孔での水圧変化の一例を示す。同図から、揚水期間の水圧変化量よりも、月吉断層部をパッカーで閉鎖、開放することによって生じる水圧変動の方が大きいことが分かる。このパッカーの閉鎖・開閉に伴う水圧変動については、後で詳しく検討する。

次に、水圧応答の認められた区間について、Andersson 他²⁾の手法に則り、水圧応答特性を検討した結果を図-8 に示す。図-8 の縦軸は、後述するバックグラウンドの補正後のデータから読み取った水位低下量 (S_p) を揚水区間の揚水量 (Q) で規格化したものである。横軸は、揚水開始を時間 0 として観測孔で 1kPa (約 10cm) 以上の明瞭な水圧低下が観測されるまでの経過時間 (t_R) を、揚水区間と観測区間の直線距離の二乗 (R^2) で規格化したものである。グラフの左側ほど水圧の伝搬性が高く、上側ほど単位揚水量あたりの水位低下が大きいことを示す。この図から、断層下盤側、上盤側とも、単位流量当たりの水位低下量には差がなく、水圧の伝搬性は上盤側より下盤が良いことが分かる。また、各試験で応答した区間の中では応答性に大きな差が無いことが分かる。このことは、応答経路内部での水理的な連結性が良いことを示唆している。

(3)水理パラメータの評価

上記の試験結果を用い、水理パラメータ(透水係数及び比貯留係数)を算出した。算出にあたっては、まず、観測され

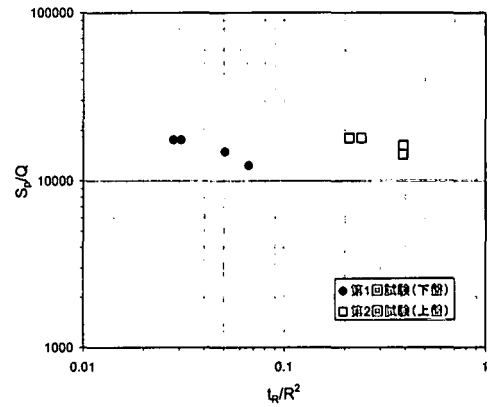


図-8 圧力応答解析図

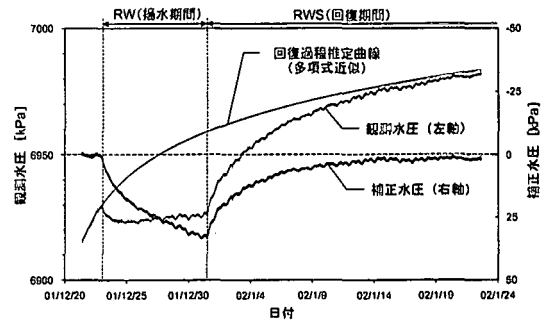


図-9 水圧変化の補正の例(MIU-3 PRB5)

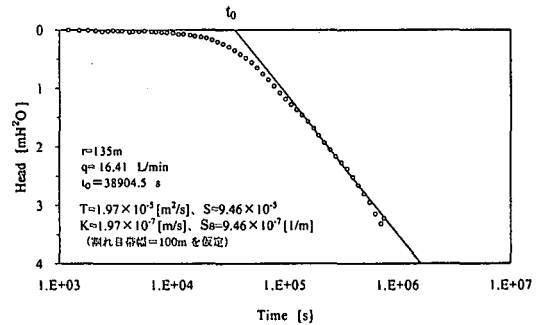


図-10 Jacob 法による解析例(MIU-3 PRB5)

表-2 試験結果一覧表(長期揚水試験)

第一回試験 (下盤側揚水)					
試験孔	MIU-2(取水孔)	MIU-3(観測孔)			
対象区間	970.72~1012.00mbl	PRB-5	PRB-6	PRB-7	PRB-8
試験/解析方法	段階揚水試験/Eden-Hazel	揚水過程/Jacob			
透水係数: K (m/s)	2.13×10^{-7}	1.97×10^{-7}	1.72×10^{-7}	1.59×10^{-7}	1.78×10^{-7}
比貯留係数: Ss (1/m)	—	9.46×10^{-3}	4.51×10^{-3}	5.36×10^{-3}	7.53×10^{-3}
第二回試験 (上盤側揚水)					
試験孔	MIU-2(取水孔)	MIU-1(観測孔)			
対象区間	844.00~867.50mbl	PRB-6	PRB-7	PRB-8	PRB-9
試験/解析方法	回復過程/Jacob	揚水過程/Jacob			
透水係数: K (m/s)	1.13×10^{-6}	2.25×10^{-7}	1.90×10^{-7}	2.21×10^{-7}	1.71×10^{-7}
比貯留係数: Ss (1/m)	—	3.71×10^{-3}	5.72×10^{-3}	3.87×10^{-3}	8.12×10^{-3}

*観測区間 (MIU-1, 3) の K, Ss は、割れ目帯幅=100mを仮定して計算した。

た水圧変動から、パッカー開閉に伴って生じたバックグラウンドの水圧変動分を補正した。具体的には、揚水開始前後の水圧変動部分を多項式でフィッティングし、これを回復過程の水圧上昇分と仮定して観測水圧より差し引いた(図-9)。この補正後のデータをもとに、Jacob 法(図-10)などにより算出した水理パラメータの代表値を表-2 に示す。表-2 から、MIU-2 号孔の揚水区間では、上盤側の透水係数($k=1.13 \times 10^{-6}$ m/s)は、下盤側($k=2.13 \times 10^{-7}$ m/s)よりも1オーダー大きい。次に、観測区間での水圧応答に対し、帯水層として割れ目帯の幅100mを仮定すると、上盤側： $k=(1.7 \sim 2.3) \times 10^{-7}$ m/s、 $S_s=(3.7 \sim 8.1) \times 10^{-7}$ 1/m、下盤側： $k=(1.6 \sim 2.0) \times 10^{-7}$ m/s、 $S_s=(4.5 \sim 9.5) \times 10^{-7}$ 1/m、となり、上下盤で同程度の水理パラメータが求められた。

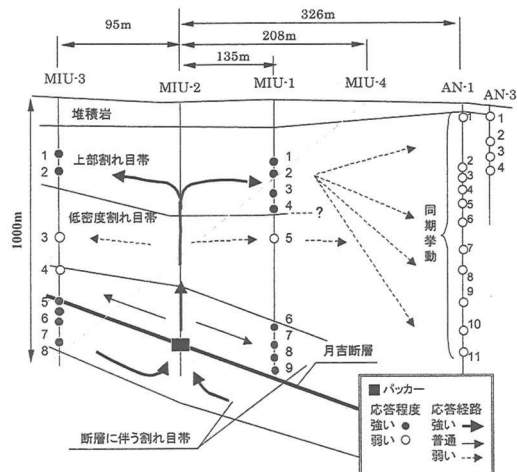


図-11 MIU-2 号孔パッカー開放時の水圧応答径路
(閉鎖時は逆方向の応答が生じる)

5. 断層部パッカー開閉に伴う水圧変動の解析

前述したように、MIU-2 号孔からの揚水時には、揚水孔に隣接した MIU-1 号孔と MIU-3 号孔以外、明瞭な水圧応答は観測されなかった。一方、MIU-2 号孔パッカーの開鎖・開放に伴う水圧変化は、より広い領域にインパクトを与えている。

MIU-2 号孔パッカーの開鎖・開放に伴って生じた観測孔の水圧変化の例を図-13 中に示す。この図から、MIU-2 号孔より 326m 離れた AN-1 号孔においても明瞭な応答が見られているのが分かる。また、断層から距離的に遠い上部割れ目帯中の水圧の方が、低密度割れ目帯中の水圧よりも大きく応答していることが注目される。パッカー開放・閉鎖時に生じた水圧応答の程度、ならびに、地質構造モデルから推定される水圧伝播径路を図-11 に示す。

ここでは、長期揚水試験よりも、さらに広い範囲における岩盤の水理特性の把握を目的とし、月吉断層部のパッカー開閉を模擬した3次元非定常飽和・不飽和浸透流解析を実施し、観測値と計算値のマッチングから、水理パラメータの取得を試みた。解析には、図-12 に示す3次元解析メッシュを用い、解析コードには、EQUIV_FLO(大成建設(株)開発)²⁾を用いた。解析メッシュは、正馬様用地を中心とした約4km×6kmの範囲において、地形面(上面境界)や河川や尾根線(側面境界)を境界とし、さらに図-1 および図-11 の地質構造を反映したものである³⁾。境界条件は、側面境界を水頭固定(但し土岐川を含む側面は不透水境界)とし、上面境界を一定流量(降雨涵養量 50mm/yr)境界、下面境界を不透水境界とした。パッカー開閉は、MIU-2 号孔の透水量係数を変化させて表現した(開放時： $T=1 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 、閉鎖時： $T=1 \times 10^{15} \text{ m}^2/\text{s}$)。水圧挙動から、水圧拡散率(=透水係数/比貯留係数)などは求められるが、透水係数と比貯留係数を分離できないため、今回は、断層上盤の割れ目帯の透水係数を、揚水試験の観測孔データから求めた値(2×10^{-7} m/s)に固定し、その相対値として他を決定した。透水係数と比貯留係数を分離する方法として、将来的には、パッカー開閉直後の孔内流速測定の実施が考えられる。マッチングの結果として、計算値と観測値の比較を図-13 に示す。表-3

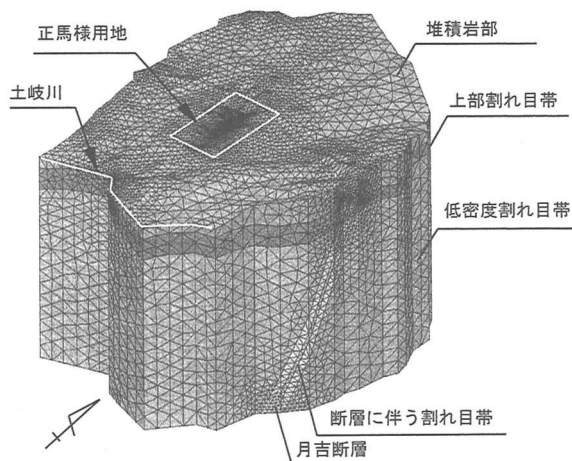


図-12 解析メッシュ(約4km×6km)
節点数: 45787、要素数: 250160

の水利パラメータにより、観測された水圧変動を概略再現できることが分かる。この結果から、図-11に示す地質構造のうち、上部割れ目帯と断層に伴う割れ目帯（下盤）の透水係数が、他の部分よりも1オーダー以上大きくなっており、主要な水みちとなっていることが分かる。

得られた水利パラメータ（表-3）を長期揚水試験結果と比較すると、断層下盤の割れ目帯では、シミュレーション結果の方が長期揚水試験結果よりも1オーダー大きい透水係数が得られた。透水係数が異なる理由として、100m スケール～数 100m スケールの応答を、単一の水利パラメータで再現することが困難であること（不均一性）が考えられる。

6. まとめ

- (1) 断層の上盤側、下盤側を揚水区間として各々実施した2回の揚水試験では、いずれも月吉断層を隔てた区間での水圧応答が観測されなかったことから、月吉断層が遮水壁として機能していることが確認された。
- (2) 断層の遮水性に起因した自然水圧差を利用することにより、通常の揚水試験によりも大きな水利的インパクトを発生させた水利試験が可能である。今回は、パッカー部の開閉により生じる水圧変動を解析することにより、数 100m スケールの広い範囲における水みちや水利特性を把握できた。今回適用した試験手法は大深度かつ広範囲を対象とした岩盤の水利学的な連続性ならびにその水利特性を評価する上で有効な試験方法である。
- (3) パッカー開閉時の水圧変動をマッチングして得られた水利パラメータは、揚水試験結果と異なる結果となった。これは、試験で影響する対象岩盤の規模が異なることや、岩盤内の不均質性の影響と考えられる。

参考文献

- 1) 竹内真司、下茂道人、西島望、後藤和幸(2001)：1000m ボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査、第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp296-300
- 2) Andersson,P.,Ludvigsson,J-E., Wass,E.,(1998):TRUE Block Scale Project Preliminary Characterisation Stage. Combined Interference Tests and Tracer Tests. Performance and Preliminary Evaluation. Aspo Hard Rock Laboratory Technical Note TN-98-28b.
- 3) Shimo, M., N.Nishijima, K.Fumimura (2001)：Evaluation of Uncertainty due to Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Analysis(3) – Taisci Equivalent Heterogeneous Continuum Model using EQUIV_FLO -, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集，pp269-278.

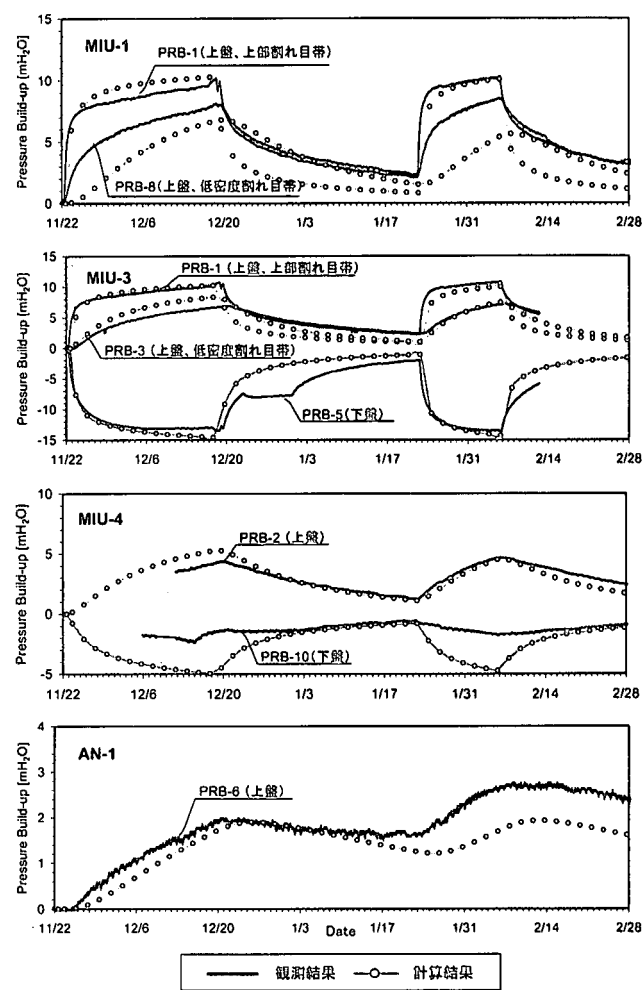


図-13 観測値の計算値の比較
(断層部パッカー開閉に伴う水圧変動)

表-3 水利パラメータ（3次元数値解析モデル）

		透水係数 [m/s]		比貯留係数 [1/m]	
		長期揚水試験	数値解析	長期揚水試験	数値解析
花崗岩	堆積岩	—	2×10^{-7}	—	2×10^{-5}
	上部割れ目帯	—	4×10^{-6}	—	2×10^{-6}
	割れ目低密度帯	—	1×10^{-7}	—	2×10^{-5}
	断層に伴う割れ目帯(上盤)	$(1.7 \sim 2.3) \times 10^{-7}$	2×10^{-7}	$(3.7 \sim 8.1) \times 10^{-7}$	1×10^{-6}
	月吉断層	—	1×10^{-10}	—	1×10^{-6}
	断層に伴う割れ目帯(下盤)	$(1.6 \sim 2.0) \times 10^{-7}$	4×10^{-6}	$(4.5 \sim 9.5) \times 10^{-7}$	1×10^{-6}