

広域地下水流動研究における
単孔式水理試験データ

平成 17 年 9 月

核燃料サイクル開発機構
東濃地科学センター

本資料の全部または一部を複製・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村松 4 番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@inc.go.jp

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

広域地下水流動研究における単孔式水理試験データ

竹内 真司*, 天野健治*, 藤田有二*

要 旨

広域地下水流動研究の一環で取得された単孔式水理試験の試験結果をデータセットとして取りまとめた。データセットには試験実施日, 試験区間, 区間長, 地質・地質構造, 試験結果(代表値), 試験手法, 解析方法などの情報を一覧表で示した。さらに亀裂性岩盤中の水理学的有効空隙率について, DH-2号孔で実施した電気伝導度検層の結果抽出された詳細な水みちと透水性のデータを用いて推定した。

*東濃地科学センター 地質環境研究グループ

Regional Hydrogeological Study- Results of single borehole hydraulic testing

Shinji Takeuchi* , Kenji Amao* , Yuji Fujita*

ABSTRACT

The results for the single borehole hydraulic tests conducted as part of the Regional Hydrogeological Study were tabulated. The details of each test (date, test interval, geology, etc.) as well as the interpreted hydraulic parameters and analytical method used are presented. Flow porosity was estimated based on the WCF which is identified from the results of fluid electric conductivity logging and hydraulic tests.

* : Geoscience Research Group, Tono Geoscience Center

目次

1. はじめに	1
2. 試験装置	2
3. 試験方法	4
4. 解析方法	5
5. 解析結果	14
6. 水理学的有効空隙率の推定	17
7. まとめ	22
引用文献	23

1. はじめに

本報告書は核燃料サイクル機構開発機構（以下、サイクル機構）が広域地下水流動研究の一環で取得した単孔式水理試験における透水量係数や貯留係数，間隙水圧などの水理特性をまとめたものである。対象としたボーリング孔はDH-1～DH-15号孔である。

報告書は，はじめに単孔式水理試験に使用した試験装置，試験方法，解析方法について概要を述べた後，試験結果を一覧表で示す。試験結果の一覧には，各ボーリング孔における試験深度，試験実施期間，試験対象岩盤，透水量係数，透水係数，貯留係数，比貯留係数，間隙水圧，水理特性を算出した試験イベントと評価方法など，トレーサビリティの観点から必要と考えられる情報を記載した。

さらに，DH-2号孔で実施した電気伝導度検層の結果などに基づく，割れ目の水理学的有効空隙率の推定結果についても述べる。

2. 試験装置

水理試験に使用した装置は、核燃料サイクル開発機構が開発した動燃式 JFT⁽¹⁾、1,000 m 対応水理試験装置および揚水試験装置である。使用した試験装置の一例として、図-1 に 1,000 m 対応水理試験装置の概略図を示す。本装置は地上部、中継部および孔内部から構成される。地上部にはパッカーの拡張やバルブ操作などの制御装置、データ記録装置、流量制御装置、水質モニタリング装置などが設置されている。また孔内部は圧力計やバルブを内蔵する制御ユニットやメジャメントユニットならびにパッカーなどから構成される。地上部と孔内部は揚水ケーシングやロッドより構成される中継部を介して接続される。水理試験は区間をシングルパッカーまたはダブルパッカーで遮蔽して試験が実施可能である。試験中の圧力の変化は試験区間 (P2) およびその上下区間 (それぞれ P3, P1) で測定が可能である。

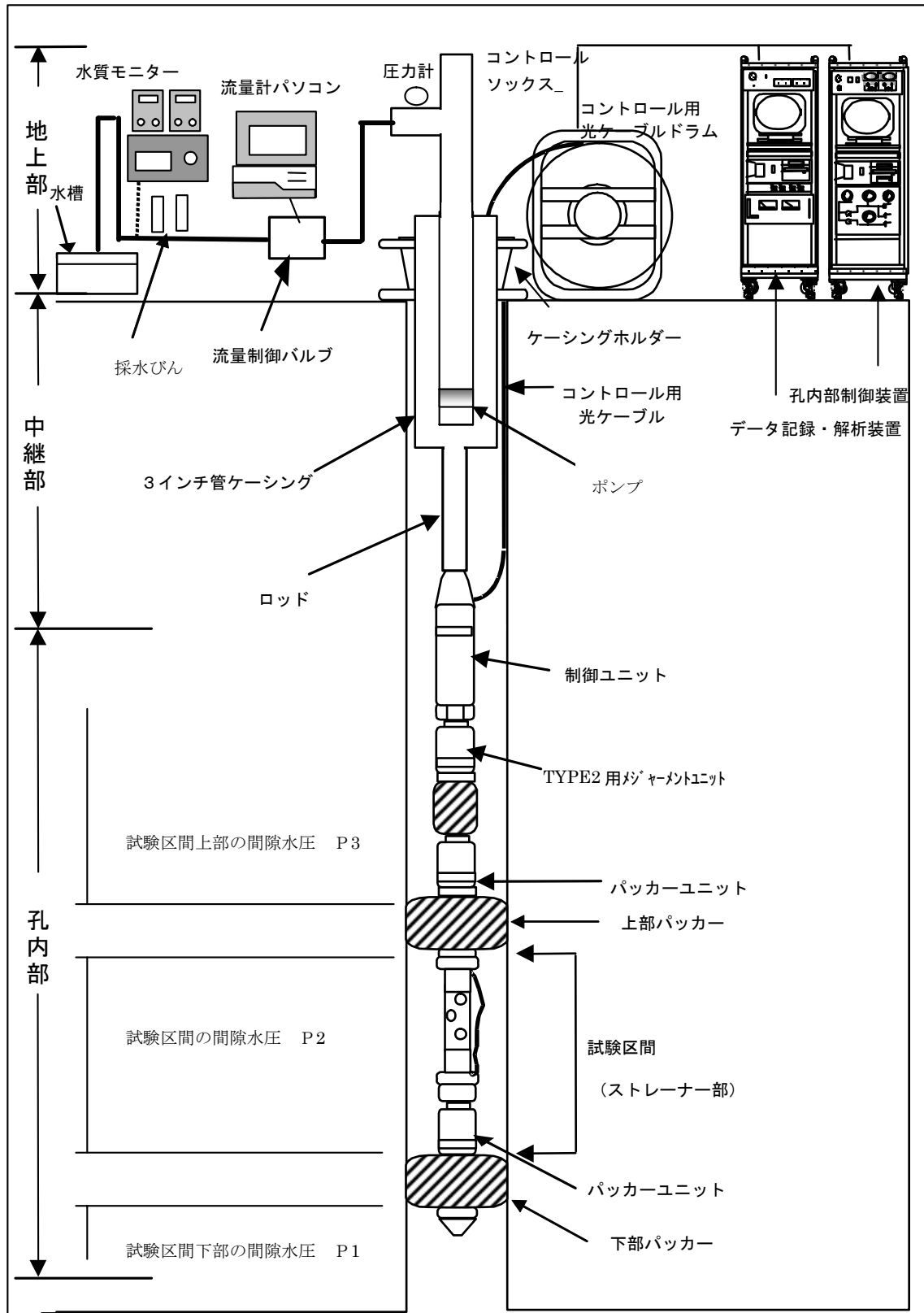


図-1 1,000m 対応水理試験装置の概略図

3. 試験方法

試験方法はパッカー拡張、間隙水圧測定の後、パルス試験やスラグ試験および揚水試験を実施した。以下に各試験イベントの概要を示す。

(1)パルス試験 (PW : Pulse Withdrawal, PI : Pulse Injection)

パルス試験は、メインバルブを閉鎖して閉鎖区間を形成し、瞬時にメインバルブの開閉を行うことにより区間の間隙水圧に対して差圧を生じさせ、その後の水圧変化を水圧計で測定する方法である(図-2)。PW 試験は、ロッド内の水圧を試験区間の間隙水圧よりも低い水頭差で設定する手法であり、PI 試験は、ロッド内の水圧を試験区間の間隙水圧よりも高い水頭差で設定する手法である。

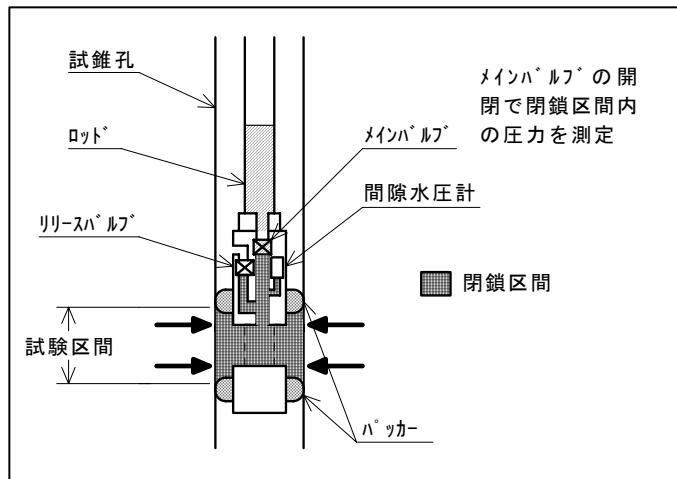


図-2 パルス試験説明図

(2) スラグ試験(SW: Slug Withdrawal, SWS: Pressure recovery after slug withdrawal (shut-in))

スラグ試験は、メインバルブを閉鎖した状態で、ロッド内の水位を試験区間の平衡水位よりも小さく設定し、メインバルブ開放後のロッド内の水位変化を水圧計で測定する方法である(図-3)。SWS 試験は SW 試験の途中で開放したバルブを閉鎖(shut-in)し、後の回復する圧力を測定する方法である。この試験は石油工学や地熱開発の分野で実施されるドリルシステムテスト(Drill stem test)と同様の試験方法である⁽²⁾。

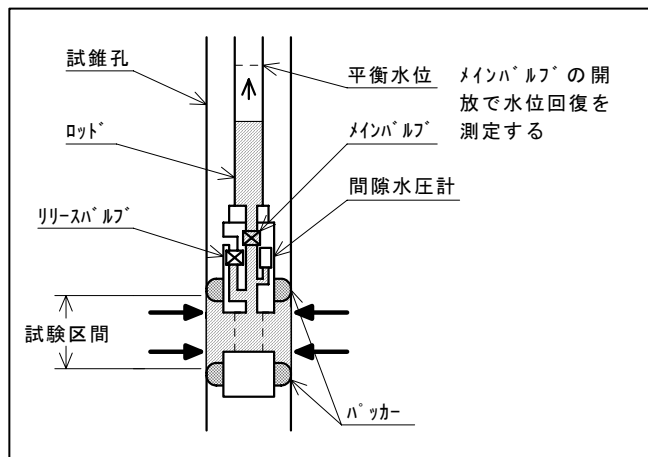


図-3 スラグ試験説明図

(3) 揚水試験 (RW: Constant rate Withdrawal) / 回復試験 (RWS: Pressure recovery after RW (shut-in))

揚水試験は、一定の揚水量で試験区間の地下水を汲み上げ、このときの試験区間の水位変化を水圧計で測定する方法である (図-4)。

回復試験は、揚水試験終了後、メインバルブを閉鎖し、閉鎖系での圧力回復を水圧計で測定する方法である。

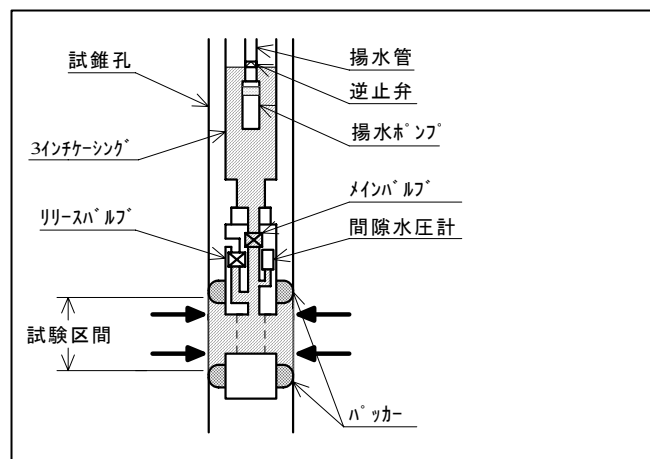


図-4 揚水試験説明図

4. 解析方法

(1) パルス試験およびスラグ試験の解析

パルス試験およびスラグの解析は、定常解析式である Hvorslev の解析式と、非定常解析式である Cooper の解析式を用いた。また、スラグ試験の途中でメインバルブを閉鎖する SWS 試験については基本的に Agarwal の解析法を用いた。なお、同解析法は揚水試験後の回復試験 (RWS) と基本的に同様の解析法であることから、RWS の解析法の後に紹介する。

1) Hvorslev の解析式⁽³⁾

解析式は、以下のとおりである。

$$k = \frac{(2Rw)^2 \cdot \ln(mL/r)}{8L(t_2 - t_1)} \ln(h_1/h_2)$$

ここで、 k : 透水係数(m/s)

Rw : ピエゾメーターの管内半径 (m)

r : ボーリング孔の半径 (m)

m : 縦横方向の透水係数比 (通常は 1)

L : 試験区間長 (m)

t : 経過時間(s)

h : 経過時間に対応する水頭差 (m)

t_1 , t_2 および h_1 , h_2 は、 t -Log h 曲線から読み取る。

2) Cooper 等の解析式⁽⁴⁾

地盤の貯留係数が大きく、 t -Log h 曲線の直線性が損なわれる場合は、定常式である Hvorslev の解析式では対応ができなくなることから非定常式である Cooper の解析式を用いた。以下に Cooper 等による解析法について述べる。

- a) 標準曲線を準備する (図-5)。
- b) 実測した水位変化のデータを標準曲線と同じスケールで Log t - h/h_0 のグラフにプロットする。
- c) 標準曲線と Log t - h/h_0 曲線とを平衡移動させてマッチングポイントを決め、 α 、 β_0 および t_0 の値を決定する。
- d) 得られた α 、 β_0 および t_0 の値を用いて、次式により透水係数と比貯留係数を算出する。

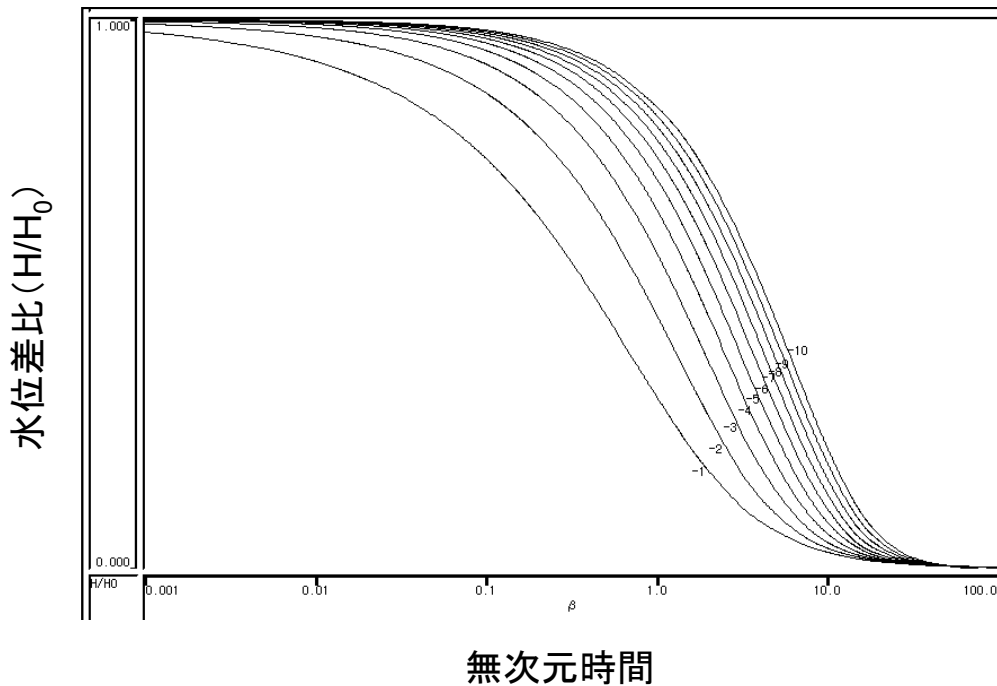


図-5 Cooper の標準曲線

Cooper 等の解析式は、以下のとおりである。

$$k = \frac{Rw^2\beta_0}{t_0 \cdot L}$$

$$Ss = \frac{\alpha}{(r/Rw)^2 \cdot L}$$

ここで、 k : 透水係数 (m/s)

R_w : ピエゾメーターの管内半径 (m)
 r : ボーリング孔の半径 (m)
 L : 試験区間長 (m)
 S_s : 比貯留係数 (m^{-1})
 t_o : 時間 (s)
 α : 貯留係数によって変化する係数 [= $S \cdot (r/R_w)^2$]
 β_o : 透水係数によって変化する係数 [= $T \cdot t_o/R_w^2$]

ただし、 S : 貯留係数 [= $S_s \cdot L$]
 T : 透水量係数 [= $k \cdot L$]

PW の場合、ピエゾメーターの管内半径 R_w は、仮想半径 R とする⁽¹⁾。
 仮想半径 R の計算式は以下のとおりである。

$$R = \sqrt{\left(\frac{V_w}{E_w} + \alpha \right) \times \frac{1}{\pi} \times \frac{\Delta P}{\Delta H}}$$

ここに、 R : 仮想半径 (m)
 V_w : 閉鎖区間内の水の体積 (m^3)
 E_w : 水の変形係数 (= $2.3 \times 10^{11} \text{ gf/m}^2$)
 α : パッカーの弾性係数 (m^5/gf)
 ΔP : 単位圧力 (= 10000 gf/m^2)
 ΔH : 単位水頭 (= 0.01 m)

閉鎖区間内の水の体積は、孔内部ユニットのメインバルブ以深の内部配管容積と、遮水パッカーで区切られる試錐孔の内容積の和である。

パッカーの弾性係数 α は、室内試験で孔内部の遮水パッカーのキャリブレーションを行って求める。遮水パッカーのキャリブレーションは、閉鎖した圧力チャンバー内でパッカーを拡張させ、閉鎖したチャンバー内に水を加えることにより増加するパッカーの圧力（初期圧との差圧）と加えた水の量を測定する。また、逆にチャンバーから水を抜いた場合の変化も測定する。

弾性係数 α は、このキャリブレーションの勾配で示される。

$$\alpha = Q/\Delta P$$

α : 弾性係数 ($m^3/\text{gf/m}^2 = m^5/\text{gf}$)
 Q : 段階的に変化させた水量 (m^3)
 ΔP : パッカーの差圧 (gf/m^2)

(2) RW/RWS の解析方法（揚水試験/回復試験）

RW/RWS の結果は、非定常解析式を用いて解析を行った。揚水試験解析説明を図-6 に示す。

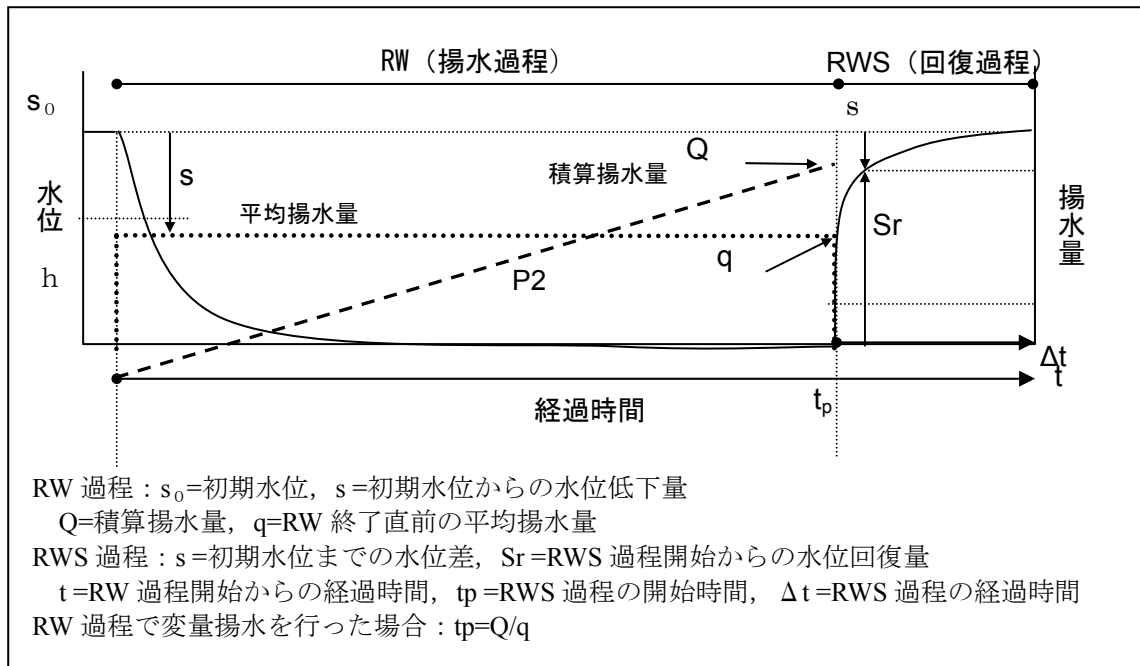


図-6 揚水試験解析

揚水試験中に揚水量を変化させている（変量揚水）場合、揚水過程の Jacob による解析は、揚水開始から揚水量を変化させるまでのデータを使用した。この場合、回復過程の解析は、変量揚水を考慮し、 t_p は Q/q とする。

1) 揚水過程(RW)の解析方法

RW の解析は、2次元放射状流れを前提とした Jacob の解析法⁵⁾を主に用い、その他の解析方法として、揚水量の変動を考慮した Birsoy&Summers の方法⁶⁾や Jacob 法に孔内貯留を考慮した解析方法である高坂らの方法⁷⁾などを用いた。以下に、解析方法を示す。

①Jacob の解析法

- ・ 片対数グラフの対数目盛りに 経過時間 t を、算術目盛りに初期水位からの水位低下量 s をとり、 $\text{Log } t - s$ 曲線を作成する。
- ・ $\text{Log } t - s$ 曲線に近似する直線を引き、直線の $1\log$ サイクル間における水位差 Δs を求め、透水量係数 T を算出する。
- ・ 解析に使用するデータ領域は、圧力変化の時間微分（デリバティブ）プロットの放射状浸透流の領域とする（図-7）。
- ・ $\text{Log } t - s$ 曲線の直線部分の延長が $s = 0$ と交わる点 t_0 を求め、貯留係数 S を算出する（図-8）。

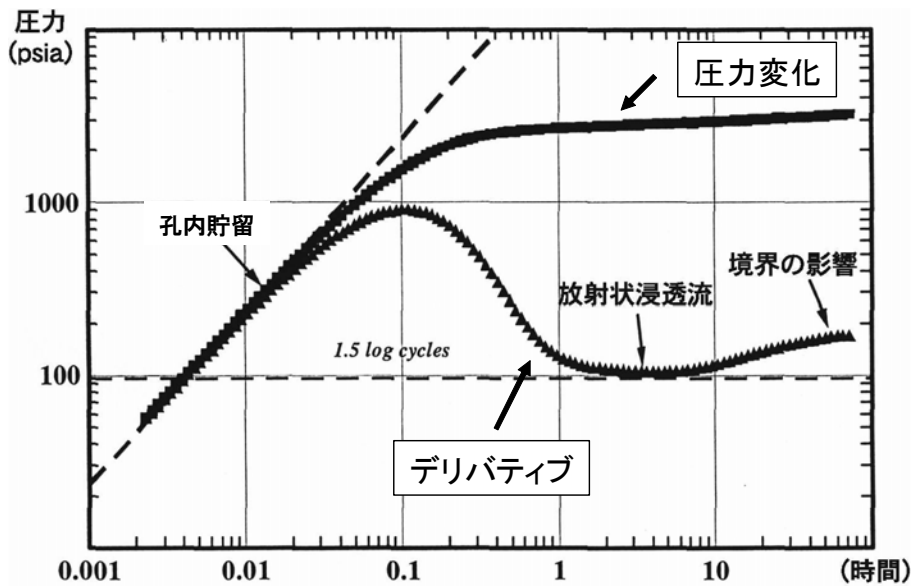


図-7 圧力変化とその時間微分（デリバティブ）プロット

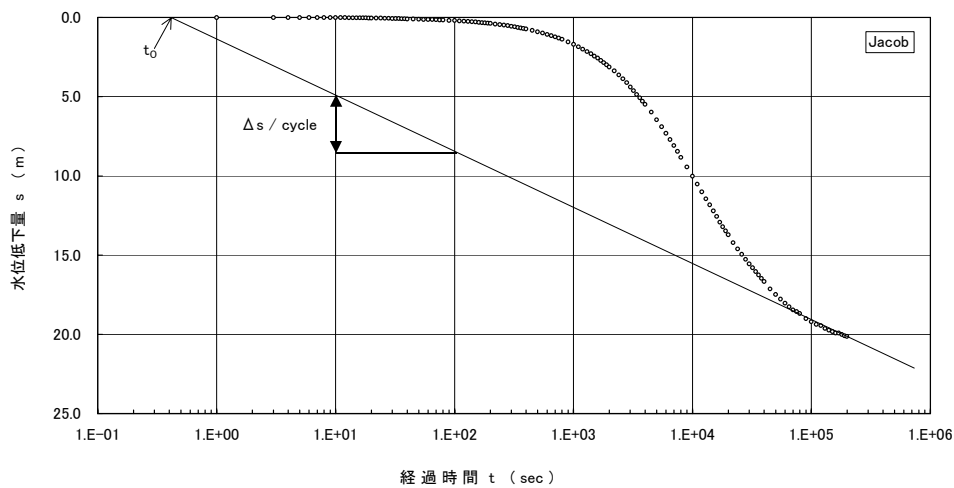


図-8 揚水過程（RW）の Logt-s グラフ

解析式は以下のとおりである。

$$T = \frac{0.183 q}{\Delta s}$$

$$S = \frac{2.25 T}{r^2} \cdot t_0$$

ここに、 T : 透水量係数 (m²/s)

S : 貯留係数

s : 水位低下量(m)

Δs : Log t の 1log サイクル間における水位低下量(m)

r : ボーリング孔半径 (m)

q : 平均揚水量 (m^3/s)

t_0 : $s=0$ における経過時間 t (s)

② Birsoy & Summers の解析方法

- ・ 各段階の実効揚水量を、階段状の平均揚水量 q で近似する(図-9)。
- ・ 各時刻の揚水量に対応する等価時間 $\beta_{t(n)}(t-t_n)$ を(3)式を用いて計算する。
- ・ 片対数紙上の算術目盛(縦軸)に比水位降下 s/q を、対数目盛(横軸)に $\beta_{t(n)}(t-t_n)$ をと
り、各点を結ぶ直線を引く。
- ・ $s/q - \beta_{t(n)}(t-t_n)$ 図において、直線上の任意の2点の等価時間 $\beta_{t(n)}(t-t_n)$ と比水位降下 s/q を
読み取り、(1)式を用いて透水量係数 T を求める。
- ・ 直線を $s/q=0$ 軸に交わるまで延長し、交点の値 $\beta_{t(n)}(t-t_n)_{(s/q=0)}$ を求めて、(2)式を用いて貯
留係数 S を求める。

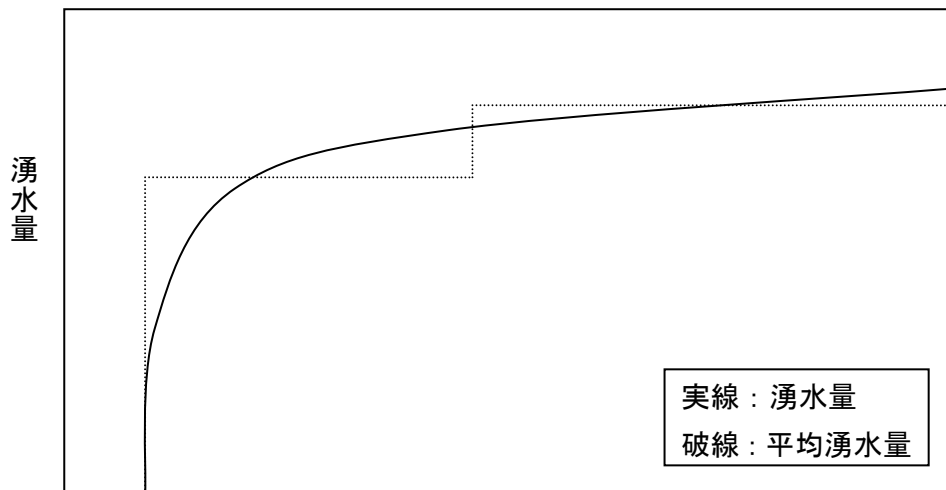


図-9 実効揚水量の段階状近似

$$T = \frac{1}{4\pi[(s/q)_2 - (s/q)_1]} \times Ln \left[\frac{\beta_{t(n)}(t-t_n)_2}{\beta_{t(n)}(t-t_n)_1} \right] \dots \dots \cdot (1)$$

$$S = \frac{2.25T}{r^2} \times [\beta_{t(n)}(t-t_n)]_{(s/q)=0} \dots \dots \cdot (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \beta_{t(n)} &= \prod_{i=1}^{n-1} \left(\frac{t-t_i}{t-t'_i} \right)^{q_i/q_n} \\ &= \left(\frac{t-t_1}{t-t'_1} \right)^{q_1/q_n} \times \left(\frac{t-t_2}{t-t'_2} \right)^{q_2/q_n} \times \dots \times \left(\frac{t-t_{n-1}}{t-t'_{n-1}} \right)^{q_{n-1}/q_n} \times (t-t_n) \dots \dots \cdot (3) \end{aligned}$$

ここで、 T : 透水量係数(m^2/s)

$(s/q)_1$: 比水位降下(s/m^2)

$(s/q)_2$: 比水位降下(s/m^2)

$\beta_{t(n)(t-t_n)_1}$: $(s/q)_1$ に対応する等価時間(sec)

$\beta_{t(n)(t-t_n)_2}$: $(s/q)_2$ に対応する等価時間(sec)

S : 貯留係数

r : ボーリング孔半径(m)

$\beta_{t(n)(t-t_n)}$: $(s/q)=0$ の時の等価時間

t_i : i 番目の揚水開始時間(sec)

t'_i : i 番目の揚水終了時間(sec)

$t - t_i$: i 番目の揚水開始からの経過時間(sec)

$t - t'_i$: i 番目の揚水終了からの経過時間(sec)

q_i : i 番目の揚水量(m^3/s)

③高坂らの解析方法

解析式は以下の通りである (図-10 参照)。

$$T = \frac{1}{4\pi \left\{ \left(\frac{s}{q} \right)_2 - \left(\frac{s}{q} \right)_1 \right\}} \cdot Ln \frac{t_2/r^2}{t_1/r^2}$$

$$S = 2.25T \left(\frac{t}{r^2} \right)_{s/q=0}$$

ここで、 T : 透水量係数 (m^2/s)

S : 貯留係数

t_1, t_2 : 揚水開始からの経過時間 (s)

$(s/q)_1$: t_1 に対応した水等水頭差と地盤からの湧水量の比 (s/m^2)

$(s/q)_2$: t_2 に対応した水等水頭差と地盤からの湧水量の比 (s/m^2)

s : 初期水位からの水頭差 (m)

q : 地盤からの湧水量 $q=Q-(\Delta s_w \cdot A)/\Delta t$ (m^3/s)

Δt : プロット点間の時間差 (s)

Δs_w : プロット点間の水頭差 (m)

A : 揚水ケーシングの有効断面積 (m)

※揚水ケーシング内断面積－ロッド (揚水管) 等の断面積

Q : 揚水量 (m^3/s)

r : ボーリング孔半径 (m)

・揚水開始後の経過時間 t (sec) における水頭差 s (m) を次式で算定する。

$$S=h_0-h$$

ここで、 s : 水頭差 (m)

h_0 : 初期水位 (m)

h : 揚水開始後の経過時間 t における水位 (m)

- ・揚水量 Q から井戸貯留水量を考慮した湧水量 Q を求め、 s/q を求める。
- ・片対数紙上の算術目盛り (縦軸) に水頭差と地盤からの湧水量の比 s/q (s/m^2)、対数目盛り (横軸) には経過時間 t (s) をとり、プロットする。
- ・ s/q -Log t 曲線の直線部分における s/q と t の座標を読み取り、透水量係数 T を求める。
- ・ s/q -Log t 曲線の直線部分から、 $(t/r^2)_{s/q=0}$ を求めて貯留係数 S を求める。

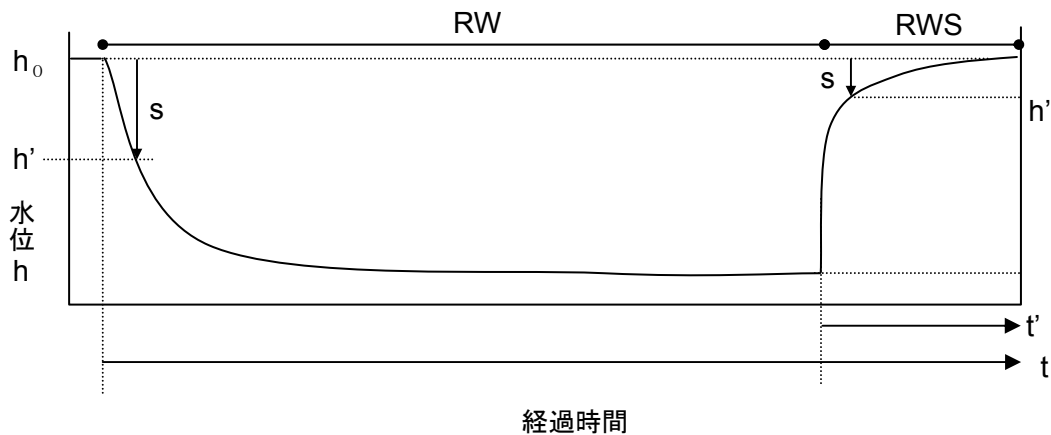


図-10 高坂らの解析方法

2) 回復過程(RWS)の解析手順

回復過程における解析は、Agarwal の解析法⁸⁾ (図-11) を用いる。以下に、解析手順を示す。

- ・片対数グラフの対数目盛りに Agarwal の等価時間 $(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))$ を、算術目盛りに水位回復量 S_r をとり、 $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t)) - S_r$ 曲線を作成する。
- ・ $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t)) - S_r$ 曲線に近似する直線を引き、直線の $1 \log$ サイクル間における水位差 ΔS_r を求め、透水量係数 T を算出する。
- ・解析は圧力変化のデリバティブプロットにおける放射状浸透流の領域とする。この際デリバティブプロットの時間軸 t は、 $(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))$ とする。
- ・ $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t)) - S_r$ 曲線の直線部分の延長が、 $S_r = 0$ と交わる点 $(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))_0$ を求め、貯留係数 S を算出する。

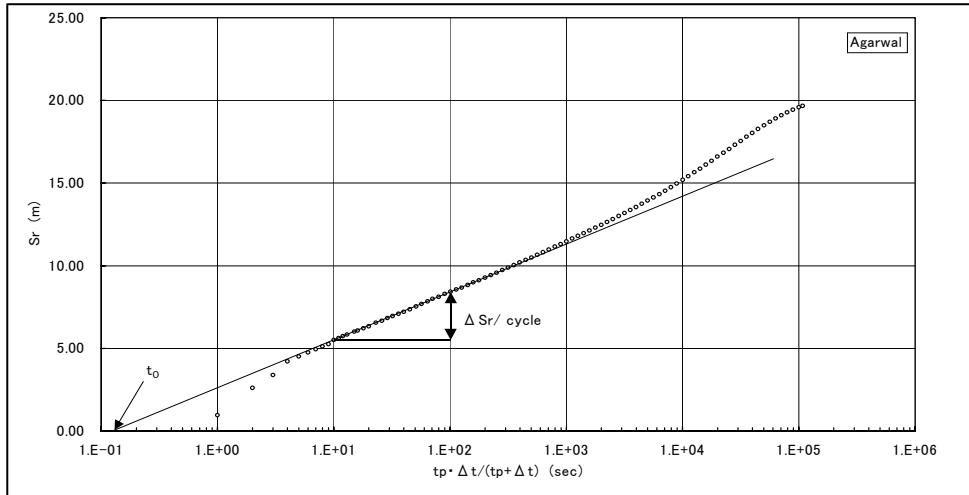


図-11 回復過程(RWS)における Agarwal の解析方法

解析式は、以下のとおりである。

$$S = \frac{2.25 T}{r^2} \cdot (t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))_0$$

ここで、 T : 透水量係数 (m²/s)

S : 貯留係数

s : 水位低下量(m)

Δ Sr : Log (t_p × Δ t / (t_p + Δ t)) の 1 サイクル間における水位降下量(m)

r : ボーリング孔半径 (m)

q : 平均揚水量 (m³/s)

(t_p × Δ t / (t_p + Δ t))₀ : s=0 における (t_p × Δ t / (t_p + Δ t)) (s)

(3) スラグ閉鎖試験 (SWS) の解析方法

スラグ閉鎖試験 SWS は先行して実施される開放系でのスラグ試験過程を揚水過程とみなし、その後のバルブ閉鎖過程 (SWS) を揚水後の回復過程とみなす。したがって、SWS の解析は、RWS と同様に Agarwal による解析法で行う。SWS 過程解析説明を図-12 に示す。

解析に必要な平均揚水量 q および t_p は Grisak et al.(1985)⁹⁾を参考に以下のとおりとした。

$$q = A \times (dh / dt)$$

$$t_p = Sr_0 / (dh / dt)$$

ここで、 q : 平均揚水量 (m³/s)

A : ピエゾメーターの断面積 (m²)

(dh / dt) : SWS 開始直前 60 秒間の水位回復速度 (m / s)

Sr₀ : SW 過程の水位回復量 (m)

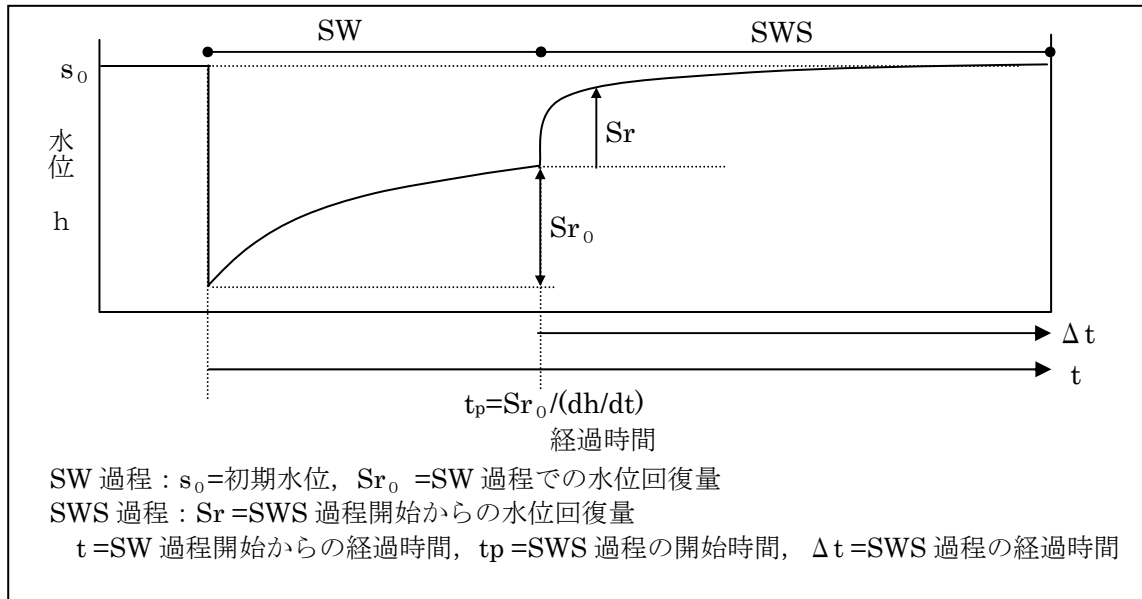


図-12 スラッグ閉鎖試験 (SWS)

(4) その他の解析方法

1) カーブマッチング

各試験イベントにおいて得られた圧力に関するデータを、ある浸透流モデルに基づく理論理論曲線に順解析的にフィッティングすることによって水理特性を推定する方法である。非定常解析手法の一つであり、イベント毎の圧力カーブに対してフィッティングさせる手法や FEM による数値解析を利用して複数イベントに対してフィッティングさせる手法などがある。Jacob 法などの直線勾配から求める手法に比較して、孔内貯留やスキンならびに境界条件など多くの水理特性に関する情報を推定することが可能である。

2) 逆解析

カーブマッチングの 1 つの解析手法であるが、予め試験孔周辺のスキン効果、試験場の不均質性 (均質、ダブルポロシティ) や境界条件、流れの次元を考慮したフローモデルを理論的に推定し、これに基づいて逆解析的に試験区間の透水量係数、貯留係数、間隙水圧等の水理パラメータを逆解析手法により算定する。複数の試験イベントを連続的に実施したデータに対してもフィッティングが可能であり、ボーリング孔を中心とした試験区間周辺の平均的な水理特性を推定することが可能である。

5. 解析結果

表-1 に解析結果を示す。表には孔名、孔口座標、試験実施日、試験区間、試験区間長、透水量係数、透水係数、貯留係数、比貯留係数、間隙水圧、代表値を算定した試験イベントおよび解析手法など各試験区間において追跡性の観点から必要と考えられる項目に関する情報を記載した。

6. 水理学的有効空隙率の推定

水理学的有効空隙率は、地下水流動解析で算出されたダルシー流速から個々の亀裂中の地下水流速を求める際に必要なパラメータである。水理学的有効空隙率は、一般的には非収着性トレーサ試験などの原位置試験データから求められることが多いが、実際には孔間距離が長く岩盤中の割れ目の連続性が明確になっていないことなどからトレーサ試験の実施は困難である。そこで、DH-2号孔において実施した詳細な水みちの抽出が可能であることが確認された電気伝導度検層の結果¹⁰⁾を用いて花崗岩中の透水性に關与する水理学的有効空隙率を推定した。

DH-2号孔は深度約500mの鉛直ボーリング孔であり、地質学的な調査の結果深度約170mまでに堆積岩が、それ以深に花崗岩が分布する。さらに花崗岩中には上部割れ目帯が孔底まで分布し、下位の地質構造要素である下部割れ目低密度帯との境界は観察されていない。また調査の結果、花崗岩部には割れ目帯が7箇所存在する(図-13)。水理学的有効空隙率は、以下の手順で算出を行った。

- ① 水みちとなる割れ目(WCF)を流体検層や掘削中の逸水量の増大箇所の記録などから抽出する。
- ② 抽出した個別のWCFにおける透水量係数(T)を流体検層結果や水理試験の結果から算出する。
- ③ 割れ目の水理学的開口幅(a)を算出する。
- ④ 水理学的有効空隙率は抽出されたWCFの開口幅とそれを含む地質構造(DH-2号孔では「割れ目帯」と「健岩部」)の厚さ(L)の比(a/L)により算出する。

①の結果、DH-2号孔における電気伝導度検層および掘削中の逸水記録などに基づき、合計32箇所のWCFを抽出した。

②のWCFの透水量係数(T)の算出は、水理試験結果、電気伝導度検層結果に基づく1次元移流・分散方程式に基づく数値解析結果、スピナー式およびヒートパルス式フローメータ検層の結果から推定した。電気伝導度検層に基づく数値解析では、個別のWCFの透水量係数は孔全体の透水量係数との比としても算出されることから、電気伝導度検層とフローメータ検層結果に基づいて算出される透水量係数の値の整合性を確保するため、孔全体の透水量係数にフローメータ検層のビルドアップ試験から求めた値を用いた。また、電気伝導度検層に基づいて抽出されたWCFの中で数値解析では透水量係数が算出されなかったものについては、当該WCFを包む区間においてフローメータ検層に基づいて算出された透水量係数と他のWCFの透水量係数との差し引きから算出した。なお、同一のWCFにおいて電気伝導度検層と水理試験の両者により透水量係数が算出されているものについては、試験結果の信頼性の観点から水理試験により算出された値を採用した。

③の水理学的開口幅(a)は、第2次とりまとめで用いた経験式 $a=2\sqrt{T}$ (Tは透水量係数により求めた(表-2))。

④の水理学的有効空隙率 (a/L) は、図-13 に示した割れ目帯とそれ以外の部分に分け、それぞれの要素の厚さとその中に含まれる WCF の水理学的開口幅に基づいて算出した。

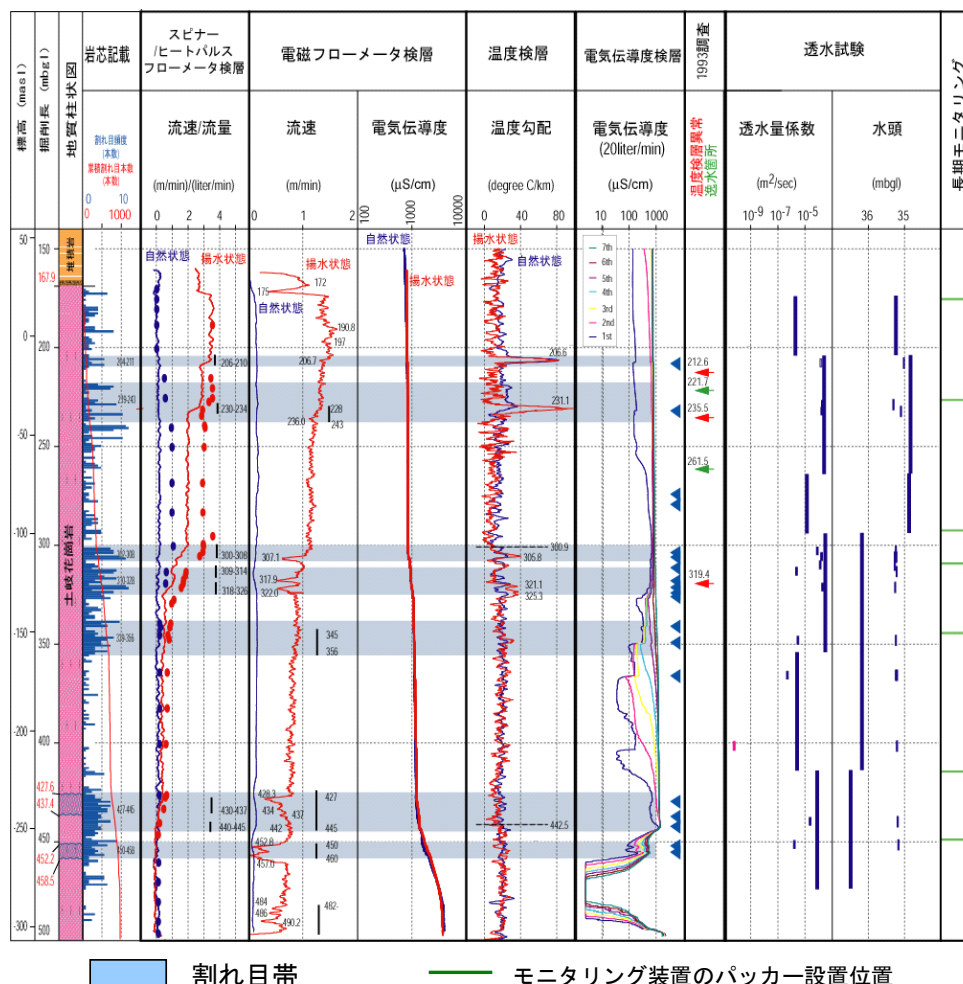


図-13 DH-2 号孔における水理調査結果

表-3 に図-13 で示した割れ目帯以外の区間の水理学的有効空隙率を、表-4 に同図で示した割れ目帯の水理学的有効空隙率の算出結果を示す。

次に上記結果を基に下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率を推定した。これには、ボアホールテレビ (BTV) で観察される全割れ目数、および同計測による開口割れ目と明瞭割れ目数の合計ならびに流体検層によって検出された WCF の数について、これらのデータが取得されている正場様用地におけるボーリング調査結果に基づき、それらの上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯の比を求め、これに DH-2 号孔の割れ目帯以外の区間の水理学的有効空隙率を乗じることにより推定した。DH-2 号孔の花崗岩は上部割れ目帯の下限境界に達していないが、地質学的な予測の結果、この境界は DH-2 号孔の孔底から数 m 深部に位置すると予測されることから、得られた結果は上部割れ目帯全体を反映した水理学的有効空隙率を示しているとみなした。

表-2 WCFの透水量係数と水理学的開口幅

Inflow/Outflow Points			Water Conducting Features			Geology		
Depth (mbgl)	Methods	Number	Depth (mbgl)	Strike, Dip				
207.00-208.00	EC log	1	207.53	N20W24N	低角度傾斜を有する割れ目の集中帯 (204.30-211.17m) 近傍に高角度割れ目が分布			
208.50-209.50	Temp log (1993)	2	221.78	N29W21N	低角度傾斜を有する割れ目の集中帯 (219.00-243.42m) 近傍に高角度割れ目が分布			
221.00-222.00	Drilling fluid balance	3	231.89	N43W27N	低角度傾斜を有する割れ目の集中帯 (219.00-243.42m) 近傍に高角度割れ目が分布			
231.00-232.00	EC log	4	233.70	N43W12N	低角度傾斜を有する割れ目の集中帯 (219.00-243.42m) 近傍に高角度割れ目が分布			
232.00-234.00	Temp log (1993)	5	236.08	N61W18N	低角度傾斜を有する割れ目の集中帯 (219.00-243.42m) 近傍に高角度割れ目が分布			
233.50-234.50	EC log (20liter)	6	250.62	N76W80S	単一割れ目			
235.50-237.00	Drilling fluid balance	7	274.38	N78E83S	単一割れ目			
273.50-274.50	EC log (20liter)	8	285.88	N79W69S	単一割れ目			
285.00-286.50	EC log	9	297.03	N69E84S	単一割れ目			
296.00-298.00	EC log	10	302.28	N51W73S	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
301.50-302.50	EC log (20liter)	11	303.90	N63E65S	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
303.00-304.00	EC log	12	306.24	N73E67S	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
311.00-312.00	EC log	13	311.57	N64W64N	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
313.30-314.00	EC log (5, 10liter)	14	313.89	N38E76N	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
317.50-318.50	EC log	15	318.17	N64E69S	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
318.00-322.00	Temp log (1993)	16	321.53	N61W67S	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
321.00-322.00	EC log	17	324.34	N71W71N	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
323.50-324.50	EC log	18	324.84	N67W72N	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
324.50-325.50	EC log (10, 20liter)	19	326.20	N73E63N	割れ目帯 (302.14-328.42m) : 高角度, 東西系			
326.00-327.00	EC log	20	341.19	N57W79S	割れ目帯 (339.18-355.98m) : 高角度, 東西系			
340.50-341.50	EC log	21	344.32	N65E59S	割れ目帯 (339.18-355.98m) : 高角度, 東西系			
343.50-344.50	EC log (10, 20liter)	22	348.72	N45-55W80-90N (No BHTV data)	割れ目帯 (339.18-355.98m) : 高角度, 東西系			
348.00-349.00	EC log	23	349.41	N59W78S	割れ目帯 (339.18-355.98m) : 高角度, 東西系			
349.00-350.00	EC log	24	366.25	N82W70S	単一割れ目			
365.50-366.50	EC log	25	386.77	N52E74S	単一割れ目			
385.00-387.00	EC log (10, 20liter)	26	403.75	N47W77S	単一割れ目			
403.00-404.00	EC log	27	429.80	N50E61S	割れ目帯 (426.43-444.10m) : 高角度, 東西系			
429.00-430.00	EC log	28	432.25	N69W61N	割れ目帯 (426.43-444.10m) : 高角度, 東西系			
431.00-432.00	EC log	29	437.42	N63W61S	割れ目帯 (426.43-444.10m) : 高角度, 東西系			
436.50-437.50	EC log	30	442.07	N69E68N (BTV data)	割れ目帯 (426.43-444.10m) : 高角度, 東西系			
442.00-443.00	EC log	31	452.27	N20W82E	割れ目帯 (452.18-458.45m) : 高角度, 北北西系			
452.00-453.00	EC log	32	455.50	N24W85E	割れ目帯 (452.18-458.45m) : 高角度, 北北西系			
455.00-456.50	EC log							

割れ目帯中のWCF

T_{HT}: 水理試験による透水量係数, T_{FEC}: 電気伝導度検層による透水量係数, T_i/T_{tot}: WCFの透水量係数比
 Calibrated T(FEC): ビルドアップ試験から求めた透水量係数から求めたT_i, aHT: 水理試験結果に基づく水理学的開口幅,
 aFEC: 電気伝導度検層に基づく水理学的開口幅, a Representative: 水理学的開口幅の代表値

さらに、DH-2号孔は鉛直孔であることならびに遭遇する亀裂に高角度のものが存在することから、ボーリング孔と高角度割れ目との遭遇率は低角度のそれと比較すると小さくなる。したがって、算出されたそれぞれの場合の水理学的有効空隙率に、BTV計測に基づく割れ目帯の平均傾斜角から Terzaghi factor を用いて傾斜補正を実施した。

表-3 割れ目帯以外の区間における水理学的有効空隙率の算出結果（傾斜補正なし）

割れ目帯以外の区間深度			L (区間長(m))	a (WCF開口幅)	水理学的有効空隙率 (a/L)
区間No	上端(mabh)	下端(mabh)			
①	167.9	204.3	36.4	0	0
②	211.17	219	7.83	0	0
③	243.42	302.14	58.72	4.47E-02	7.61E-04
④	328.42	339.18	10.76	0	0
⑤	355.98	426.43	70.45	1.72E-02	2.44E-04
⑥	444.1	452.18	8.08	0	0
⑦	458.45	501.09	42.64	0	0
割れ目帯以外の水理学的有効空隙率			234.88	6.19E-02	2.63E-04

表-4 割れ目帯における水理学的有効空隙率の算出結果（傾斜補正なし）

割れ目帯の区間深度			L (区間長(m))	a (WCF開口幅)	水理学的有効空隙率 (a/L)
区間No	上端(mabh)	下端(mabh)			
①	204.3	211.17	6.87	3.03E-02	4.41E-03
②	219	243.42	24.42	9.62E-02	3.94E-03
③	302.14	328.42	26.28	1.99E-01	7.58E-03
④	339.18	355.98	16.8	2.68E-02	1.60E-03
⑤	426.43	444.1	17.67	3.99E-02	2.26E-03
⑥	452.18	458.45	6.27	6.67E-03	1.06E-03
割れ目帯の水理学的有効空隙率			98.31	3.99E-01	4.06E-03

- 上部割れ目帯中の割れ目帯以外の区間の水理学的有効空隙率の傾斜補正結果
 $(\text{上部割れ目帯中の割れ目帯以外の区間の水理学的有効空隙率}) / \sin(13.3) =$
 $2.63E-4 / \sin(13.3) = 3.93E-4$
ただし、上式の 13.3° は DH-2 号孔と WCF の平均傾斜角度
- 下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率の推定結果（全割れ目を対象）
正馬様用地の MIU-2 号孔における BTV 計測¹¹⁾による全割れ目を対象とした上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯の割れ目頻度はそれぞれ以下の通り。
(下部割れ目低密度帯の割れ目頻度 (本/m)) = 1.86
(上部割れ目帯の割れ目頻度 (本/m)) = 4.87
上記値を用いた場合の下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率は、
(上部割れ目帯の水理学的有効空隙率) × 1.86/4.87 =
 $2.63E-4 \times 1.86/4.87 = 1.01E-4$
また上記結果に傾斜補正を加えた場合は、
 $3.93E-4 \times 1.86/4.87 = 1.50E-4$

- 下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率の推定結果（開口割れ目と明瞭割れ目を対象）

正馬様用地の MIU-2 号孔における BTV 計測による開口割れ目と明瞭割れ目を対象とした上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯の割れ目頻度はそれぞれ以下の通り。

（下部割れ目低密度帯の割れ目頻度（本/m））= 0.89

（上部割れ目帯の割れ目頻度（本/m））= 3.09

上記値を用いた場合の下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率は、

（上部割れ目帯の水理学的有効空隙率）×0.89/3.09 =

$$2.63E-4 \times 0.89/3.09 = 7.59E-5$$

また上記結果に傾斜補正を加えた場合は、

$$3.93E-4 \times 0.89/3.09 = 1.13E-4$$

- 下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率の推定結果（WCF を対象）

WCF を指標とした下部割れ目低密度帯の水理学的有効空隙率の推定には、正場様の MIU-1 から MIU-3 までの流体検層（フローメータ検層）に基づいて抽出された WCF の数を用いた^{12) 13) 14)}。ここで WCF としての抽出基準は、異常が認められる区間長が約 15m 以内であること、およびその区間における水理試験結果やフローメータ検層結果に基づく透水量係数が 1.0E-7 (m²/s) 以上であることとした。この透水量係数は、東濃地域におけるこれまでの岩盤の水理調査で、周辺岩盤の透水性よりも有意に高いと設定し得る値である。表-5 に正馬様用地におけるボーリング孔で得られた WCF の抽出結果を示す。また、表-6

表-5 正馬様用地におけるボーリング孔の WCF 抽出結果

	深度(mbgl)	区間長(m)	T (m2/s)	備考
MIU-1	93.50 - 103.50	10.0	8.53E-07	花崗岩風化部（水理試験）
	196.00 - 202.50	6.5	4.01E-07	上部割れ目帯（水理試験）
	608.50 - 615.00	6.5	3.82E-07	下部割れ目低密度帯（水理試験）
	651.50 - 658.00	6.5	2.46E-07	下部割れ目低密度帯（水理試験）
	880.00 - 884.00	4.0	1.00E-05	断層に伴う割れ目帯
	901.00 - 910.00	9.0	2.36E-06	断層に伴う割れ目帯
	908.50 - 915.00	6.5	1.11E-05	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
	943.00 - 947.00	4.0	5.90E-07	断層に伴う割れ目帯
	947.00 - 960.00	13.0	4.92E-06	断層に伴う割れ目帯
	957.00 - 963.50	6.5	1.42E-05	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
MIU-2	973.00 - 979.50	6.5	4.94E-07	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
	1005.00 - 1010.00	5.0	5.51E-06	断層に伴う割れ目帯
	119.40 - 125.90	6.5	2.40E-07	上部割れ目帯（水理試験）
	220.90 - 227.40	6.5	7.21E-05	上部割れ目帯（水理試験）
	262.75 - 269.25	6.5	5.87E-05	上部割れ目帯（水理試験）
	315.50 - 322.00	6.5	3.98E-07	上部割れ目帯（水理試験）
	364.75 - 371.25	6.5	4.29E-07	上部割れ目帯（水理試験）
	859.00 - 865.50	6.5	1.39E-07	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
MIU-3	916.80 - 931.30	14.5	3.74E-06	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
	960.30 - 966.80	6.5	2.38E-05	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
	976.70 - 983.20	6.5	1.92E-05	断層に伴う割れ目帯（水理試験）
	91.00 - 98.00	7.0	1.78E-05	花崗岩風化部（水理試験）
	748.30 - 755.30	7.0	7.81E-07	断層に伴う割れ目帯
	862.50 - 873.50	11.0	2.09E-07	断層に伴う割れ目帯（水理試験）

には正馬様用地における各ボーリング孔における上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯の厚

さ¹⁵⁾と抽出された各要素における WCF の抽出数に基づく WCF 密度を示す。この結果より、
 上部割れ目帯中の WCF 密度 = 0.007
 下部割れ目低密度帯中の WCF 密度 = 0.001

表-6 正馬様用地におけるボーリング孔の WCF 密度

	WCFの本数		上部割れ目帯, 下部割れ目低密度帯の厚さ						WCF密度	
	上部割れ目帯	下部割れ目低密度帯	上部割れ目帯			下部割れ目低密度帯			上部割れ目帯 (本/m)	下部割れ目 低密度帯(本/m)
			上端(m)	下端(m)	厚さ(m)	上端(m)	下端(m)	厚さ(m)		
MIU-1	1	2	89	350	261	350	833	483	0.003831418	0.004140787
MIU-2	5	0	89	370	281	370	716	346	0.017793594	0
MIU-3	0	0	88	317	229	317	600	283	0	0
WCF平均密度									0.007208337	0.001380262

以上により、WCF を対象とした下部割れ目低密度帯の WCF の推定結果は、

$$2.63E-4 \times (0.001/0.007) = 3.76E-5$$

さらに上記結果に傾斜補正を加えた場合は、

$$3.93E-4 \times (0.001/0.007) = 5.62E-5$$

7. まとめ

広域地下水流動研究において実施された、単孔式水理試験によって得られた透水性や貯留性ならびに間隙水圧などの水理特性を、試験実施区間の深度や試験実施日、試験イベント、解析方法など追跡性を考慮して取りまとめた。なお、これらの試験は 10 年以上の期間をかけて実施しており、この間に試験装置や試験手法、解析手法は進歩していることから、データの品質は同様ではないことに留意が必要である。

また、花崗岩中の透水性の割れ目を詳細に把握可能な電気伝導度検層の結果に基づき、水理学的有効空隙率を推定した。

引用文献

- (1) 柳澤孝一, 斉藤 章, 西垣 誠, 平田洋一 : 新しい現場透水試験法(動燃式 JFT)の開発と測定例, 土と基礎, pp47-52, 1989
- (2) Th. Kupfer, P. Hufschmied, F. Pasquier, :Hydraulic Testing in the Nagra Boreholes, Nagra Bulletin, p7-23, 1989
- (3) Hvorslev M.T. : Time Lag and Soil Permeability in Ground-water Observation, U.S. Army, Corps of Eng., Waterways Experiment Sta. Bull No.36, p50, 1951
- (4) Cooper, H.H, Bredehoeft, J.D., and Papadopoulos, I.S. : Response of a Finite-diameter Well to an Instantaneous Charge of Water, Water Resour. Res., 3(1), pp263-269, 1967
- (5) Cooper, H.H., Jacob, C.E. : A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Transactions, American Geophysical Union, Vol.27, No.4, pp.526-534, 1946
- (6) G. P. Kruseman, N. A. de Ridder : Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, International Institute for Land Reclamation and Improvement,pp.181-191, 1991
- (7) 高坂信章, 三宅紀治 : 特殊な揚水試験に関する一考察, 土木学会第 45 回年次学術講演会, pp836-837, 1990
- (8) Agarwal, R.G. : A New Method to Account for Production Time Effects When Drawdown Type Curves Are Used to Analyze Build up and Other Test Data, SPE paper9289, 55th Annual Fall Meeting, Dallas ,Tex., pp1-13, 1980
- (9) Grisak, G.E., Pickens, J.F., Belanger, D.W. , Avis, J.D. : Hydrogeologic Testing of Crystalline Rocks during the Nagra Deep Drilling Program, NTB85-08, Nagra, p194 1985
- (10) Takeuchi S., Shimo M., Doughty, C. and C.-F. Tsang : Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp.349-354. 2004
- (11) 石川清, 目崎吉彦, 鈴木秀雄, 甲斐昌宣, 渡部倂, 藤盛誠二, 石川潤一:正馬様用地における試錐調査 (MIU-2 号孔) , 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7420 99-016, 1999
- (12) 西出四郎, 窪田亮, 川西繁, 水落幸広, 馬場秀人, 西内哲雄, 棚瀬充史 : 立坑掘削予定地における試錐調査 (MIU-1 号孔) , 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 98-001, 1998
- (13) 豊蔵勇, 橋井智毅, 名越澄生, 伊藤孝, 杉森辰次, 杉田信隆, 政枝宏 : 正馬様用地における試錐調査 (MIU-3 号孔) , 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2000-022, 2000
- (14) 竹内真司, 藤田有二 : 超深地層研究所計画における単孔式水理試験データ, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-011, 2005
- (15) 核燃料サイクル開発機構 : 超深地層研究所計画 年度報告書 (平成 11 年度) , 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7410 2001-003, 2000