

超深地層研究所計画における
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写・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

超深地層研究所計画における単孔式水理試験データ

竹内 真司*, 藤田有二*

要 旨

超深地層研究所計画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。

Mizunami Underground Research Laboratory Project
- Results of single borehole hydraulic testing

Shinji Takeuchi*, Yuji Fujita*

ABSTRACT

The results for the single borehole hydraulic tests conducted as part of the Mizunami Underground Research Laboratory Project 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.

* : Mizunami Underground Research Laboratory, 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	6
5. 解析結果	14
6. まとめ	17
引用文献	18

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）が岐阜県東濃地域において実施した、超深地層研究所計画の地上からの研究段階において取得された単孔式水理試験における透水量係数や貯留係数さらには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正馬様用地のボーリング孔 AN-1, AN-3 および MIU-1～MIU-4 号孔と瑞浪超深地層研究所用地における MSB-1～MSB-4 号孔ならびに MIZ-1 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について記載した。

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。

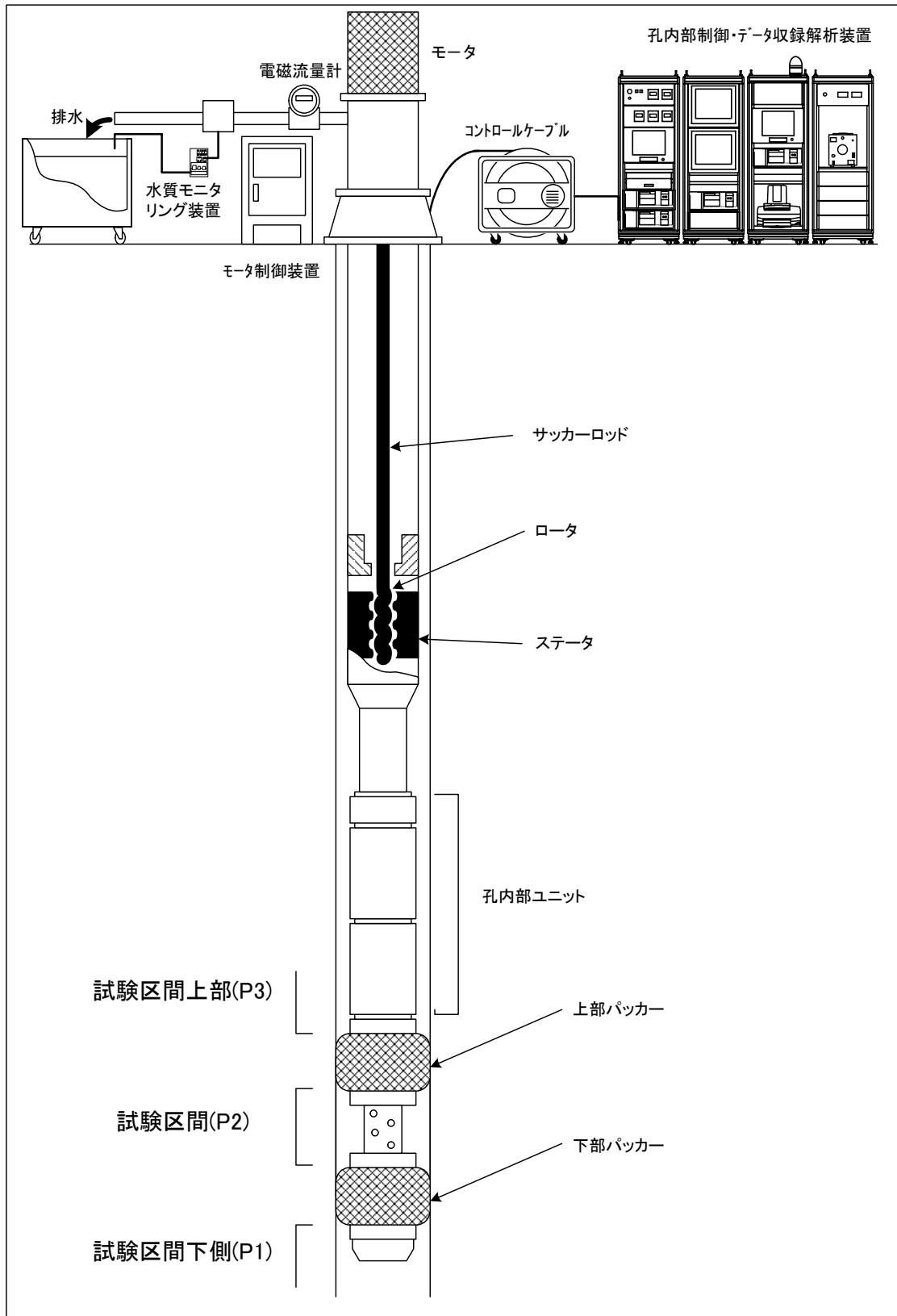


図-1 1,500m 対応水理試験装置の概略図

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。

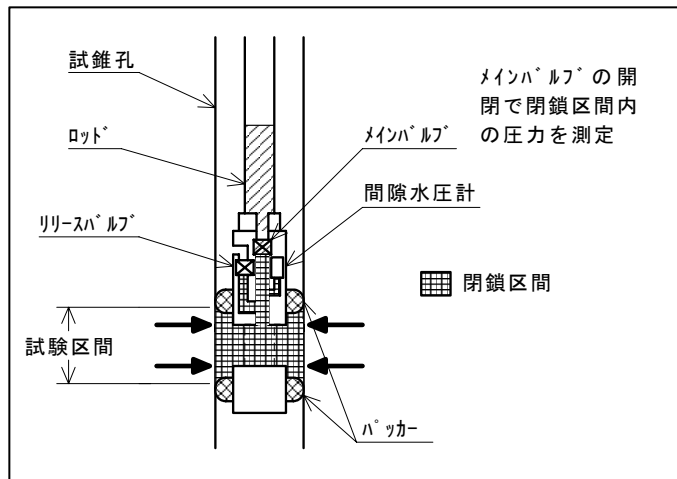


図-2 パルス試験説明図

(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⁾。

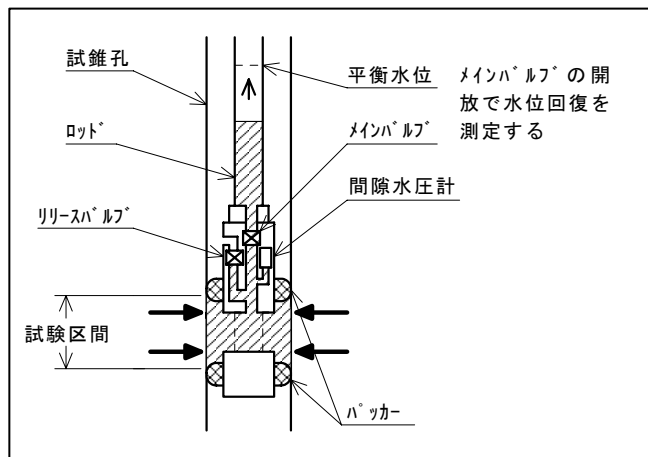


図-3 スラグ試験説明図

(3) 揚水試験 (RW: Constant rate Withdrawal)

回復試験 (RWS: Pressure recovery after RW (shut-in)/HWS: Pressure recovery after constant head withdrawal (shut-in))

揚水試験 (RW: 定流量用水試験) 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)。

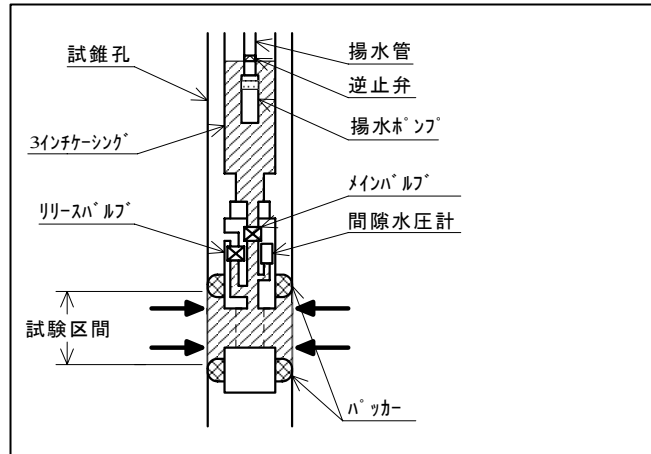


図-4 揚水試験説明図

回復試験 (RWS: 定流量揚水試験後の回復試験) は、定流量揚水試験終了後、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。また低圧揚水試験後の回復試験 (HWS) は、ボーリング孔内の揚水圧力を一定に制御した時の流量の変化を測定する試験である。試験当初は流量が上昇するが、その後、徐々に流量が安定する。その後揚水を停止 (メインバルブを閉鎖) した後の圧力回復を測定する方法である (図-5)。

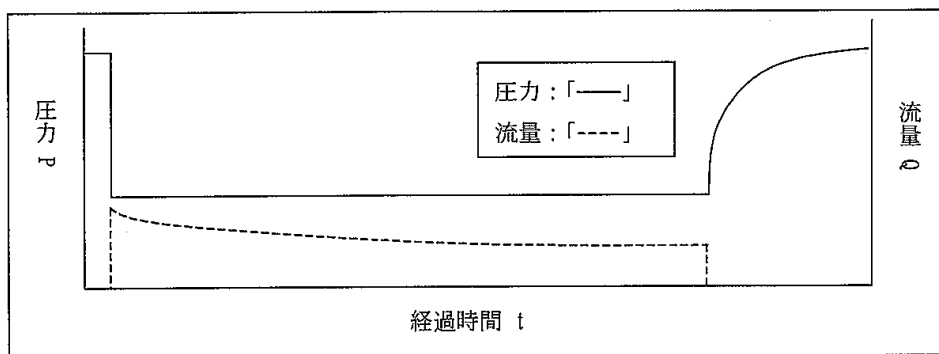


図-5 定圧揚水試験の概念的な試験データ

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。

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

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-6)。
- 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。

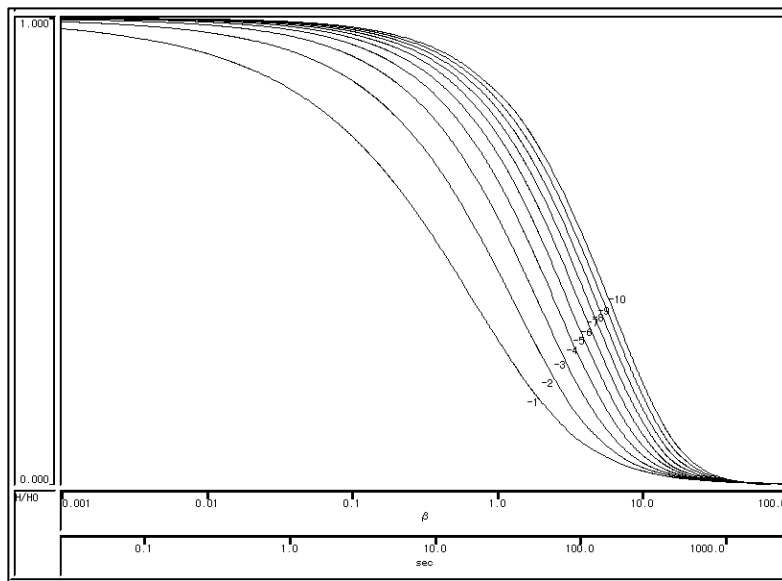


図-6 Cooperの標準曲線

Cooper等の解析式は、以下のとおりである。

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

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

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)

L ：試験区間長 (m)

Ss ：比貯留係数 (m^{-1})

t_0 ：時間 (s)

α ：貯留係数によって変化する係数 [= $S \cdot (r/Rw)^2$]

β_0 ：透水係数によって変化する係数 [= $T \cdot t_0/Rw^2$]

ただし、 S ：貯留係数 [= $Ss \cdot L$]

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 Rw 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。

$$R = \sqrt{\left(\frac{Vw}{Ew} + \alpha \right) \times \frac{1}{\pi} \times \frac{\Delta P}{\Delta H}} \quad 7$$

ここで、 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 ($=10000 \text{gf/m}^2$)

ΔH ：単位水頭 ($=0.01\text{m}$)

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-7 に示す。

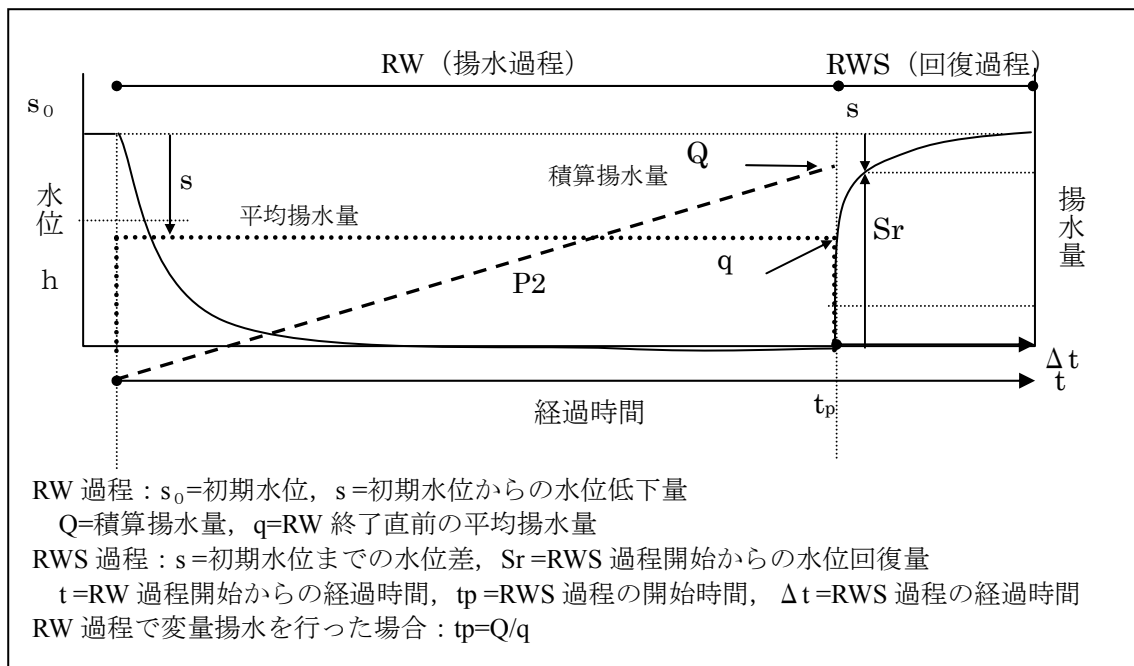


図-7 揚水試験解析

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⁾を用いた。以下に、解析方法を示す。

① Jacob 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-8)。
- ・ $\text{Log } t - s$ 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-9)。

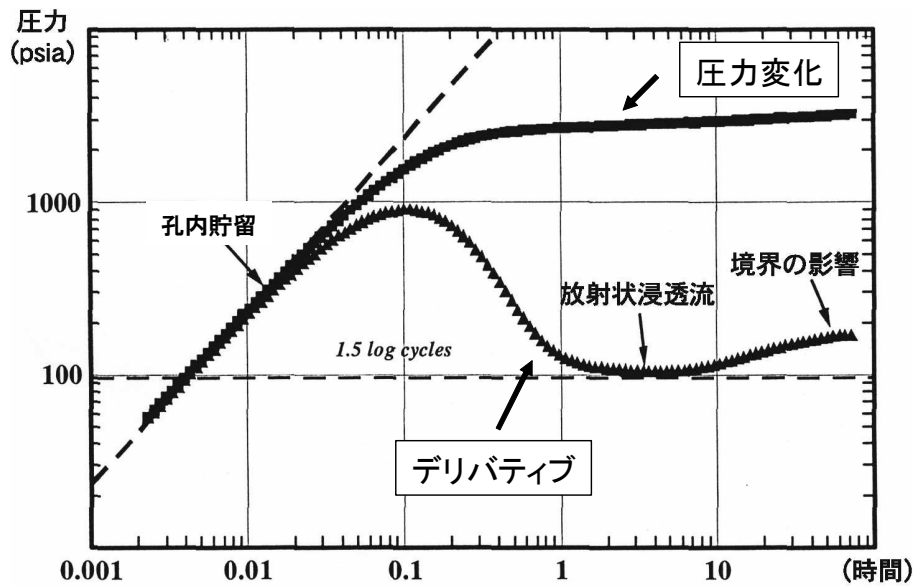


図-8 圧力変化とその時間微分（デリバティブ）プロット

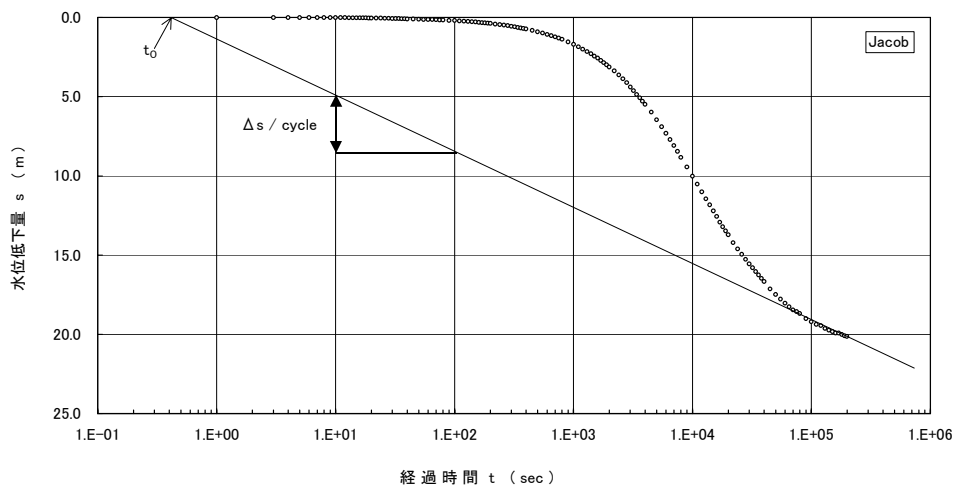


図-9 揚水過程（RW）の Logt-s グラフ

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) 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⁶⁾ (図-10) 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 Sr をとり、 $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t)) - Sr$ 曲線を作成する。
- ・ $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t)) - Sr$ 曲線に近似する直線を引き、直線の 1log サイクル間における水位差 ΔSr 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。
- ・ $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t)) - Sr$ 曲線の直線部分の延長が、 $Sr = 0$ 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。

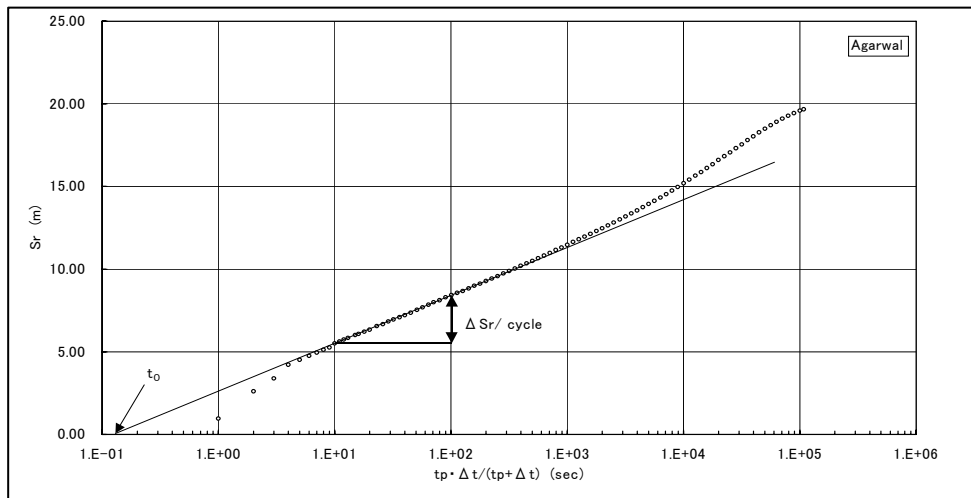


図-10 回復過程 (RWS) における Agarwal の解析方法

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 (m^2/s)

S : 貯留係数

s : 水位低下量(m)

ΔSr : $\text{Log}(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))$ の 1 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)

$(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))_0$: $s=0$ における $(t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))$ (s)

3) Jacob & Lohman の解析方法⁷⁾

Jacob & Lohman による解析式は以下のとおりである。

$$T = \frac{2.30 \Delta (\log(t / rw^2))}{4 \pi \Delta (Sw / Q)}$$

ここで, T = 透水量係数(m^2/s)

Q = 揚水量(m^3/s)

Sw = 水位低下量(m)

t = 経過時間 (s)

rw = ボーリング孔半径(m)

解析手順は以下のとおりである。

- ・対数紙上の算術目盛 (縦軸) に Sw/Q (s/m^2), 対数目盛 (横軸) に t/rw^2 (s/m^2) をとりプロットする。
- ・ $Sw/Q - t/rw^2$ 曲線における直線部分の傾きを求め, 上式から透水量係数を求める。

(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。

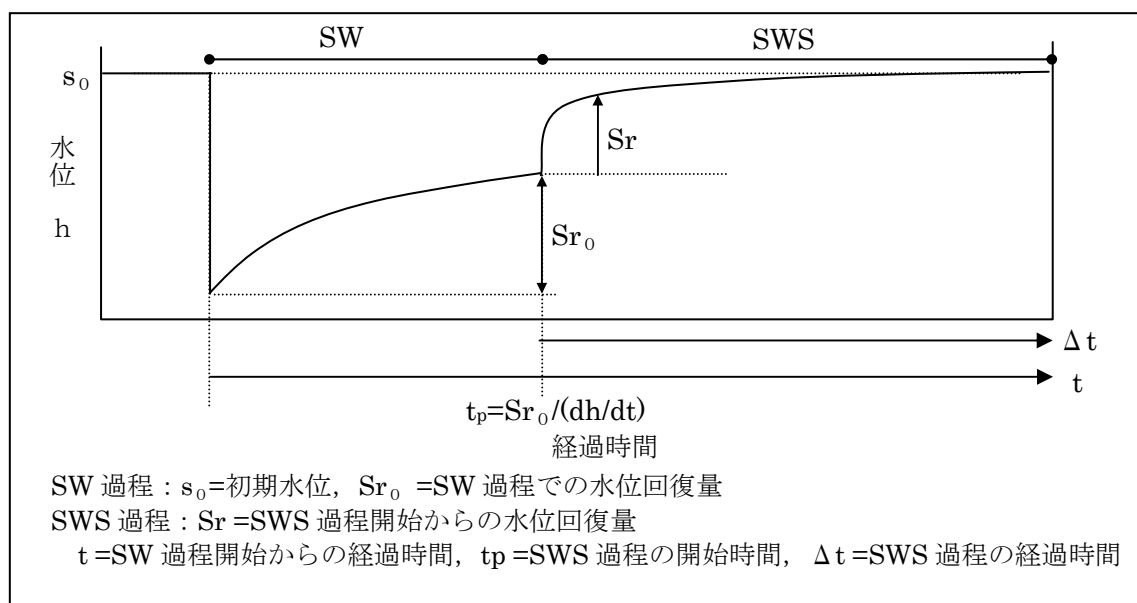


図-12 スラグ閉鎖試験 (SWS)

解析に必要な平均揚水量 q および t_p は Grisak et al.(1985)⁸⁾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 (m^3/s)

A : ピエゾメーターの断面積 (m^2)

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

Sr_0 : SW 過程の水位回復量 (m)

(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。このうち本報告で適用した手法は、FEM による数値解析手法である。カーブマ

ッチングによる解析手法は 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. まとめ

超深地層研究所計画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。

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, pp7-23, 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., Vol. 3, No.1, pp263-269, 1967
- (5) Cooper, H.H., Jacob, C.E.,: A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Trans. Am. Geophys. Un., Vol.27, No.4, pp.526-534, 1946
- (6) 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
- (7) Jacob, C.E., Lohman, S.W. : Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. Am. Geophys. Un., Vol.33 No.4, pp559-569, 1952
- (8) 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