

水理試験により得られる実測データの 解析手法の高度化と適用（その2）

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2002年3月

株式会社 鴻池組

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

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184

Japan

2002年3月

水理試験により得られる実測データの解析手法の高度化と適用（その2）

進士 喜英、狩野 裕之※

要旨

原位置地下水理試験法を大別すると定常型試験と非定常型試験に大別でき、揚水試験とスラグ試験がそれぞれの代表的な試験法であり、近年それぞれの試験法の改良が試みられている。揚水試験法では解析方法に観測値の微分項を用いた方法が提案され、従来の解析方法に加えて微分値を用いる利点がいくつか紹介されている。本報文ではこれらをまとめ、揚水試験結果の解析において微分項を定性的および定量的に活用する方法を整理する。

スラグ試験は比較的簡易で短期間に終了する試験であるが、深地層の低透水性地盤では湧水流量が少なく孔内水位回復速度が遅いことから、長期にわたる試験期間を要する場合がある。このような場合にその後の試験を踏まえ回復速度の促進する方法として提案されているのがスラグ試験中に試験孔内を閉塞(shut-in)するものである。ここでは、この方法による回復挙動を単なる回復促進だけではなく試験データとして採取し、これを解析する方法について評価する。解析方法は定流量揚水後の回復試験結果の解析と同じものであるが、閉塞までの揚水時間や揚水流量を近似する必要があり、既存の近似方法を比較したところ有用な近似法を確認することができた。

本報告書は、株式会社鴻池組が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した業務成果である。

契約番号：1306A01082

機構担当部課室および担当者：東農地科学センター地層環境特性研究グループ竹内真司

※：株式会社鴻池組土木本部技術部技術課

MARCH, 2002

Integration and application of analysis methods for observation data
on permeability tests (volume2)

Yoshihide Shinshi and Hiroyuki Kano※

Abstract

Categorizing in-situ permeability tests, we have two categories; steady-type and unsteady-type. Commonly pumping tests belong to the first category and slug tests to the second one. Recently, both of tests have been improved concerning several schemes. On a pumping test, it is proposed to use pressure derivatives of data with respect of time in addition to raw data on analyzing test data set. In a petroleum industry, this scheme has been popular and some people introduced merits of the scheme. In this report, qualitative and quantitative usages of the scheme with pressure derivatives in groundwater investigation are summarized.

Although a slug test is relatively simple and short period scheme, for low permeable media in a very deep layer, the test might need long period for completion because recovery of drawdown in a well-bore is very slow due to too small flow rate into well-bore. In such case, recovery of drawdown should be accelerated taking into consideration of afterward testing. For this issue, the scheme to close(shut-in) of a testing interval chamber during slug test has been proposed. The set of data of recovery period after shut-in is not only confirmed to be arrive at stable condition but also is data to analyze as a permeability test data. The basic concept for the analysis of the data is the same as recovery test after pumping test with a constant rate. However, pumping time up to shut-in and pumping rate are modified in order to be regard as an ordinary recovery test. The two schemes of modification were theoretically evaluated, then one of them is recognized better than another.

This work was performed by Konoike Construction CO.,Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Hydrogeological Investigation Team, Geoscience Research Execution Group, Tono Geoscience Center

※ : Civil Engineering Department, Konoike Construction

目 次	頁
1. はじめに	1
2. 微分プロットの活用方法に関する情報の整理とモデル計算	3
2.1 概 要	3
2.2 浸透流形態の評価手法に関する情報の整理	4
2.2.1 微分公式	4
(1) 微分公式の整理	4
(2) 実観測データの微分計算	5
2.2.2 微分と浸透流形態の整理	7
(1) 定流量揚水試験	10
(2) 定圧揚水試験	15
(3) 微分の利用と浸透流形態のまとめ	25
2.3 帯水層モデルの微分標準曲線	29
2.3.1 定流量揚水Ⅰ：井戸貯留を無視できる場合	29
2.3.2 定流量揚水Ⅱ：井戸貯留を考慮した場合	37
2.3.3 定圧揚水	51
2.4 実測データの解析事例	59
2.4.1 事前評価	59
2.4.2 解析結果と考察	67
3. スラグ試験後の回復試験データの解析手法に関する理論的な整合性	73
3.1 概 要	73
3.2 解析モデル	74
3.2.1 スラグ試験中の揚水流量の予測公式	74
3.2.2 変動流量型揚水公式の概要	75
(1) 重ね合わせ理論による変動流量型揚水公式	75
(2) 基本井戸関数	77
3.2.3 スラグ試験および回復試験への適用	82
(1) 湧水流量の計算	82
(2) スラグ試験のシミュレーション	83
3.3 SWS 試験結果の解析法	85
3.3.1 解析方法	85
(1) 手法 1	85
(2) 手法 2	86

3.3.2 整合性の評価	88
(1) 試験データの整理	88
(2) Theis(Horner)法による解析	89
(3) Agarwal 法による解析	95
(4) 整合性の評価	97
3.4 実測データの解析事例	98
3.4.1 事前評価	98
3.4.2 解析結果	99
3.4.3 考察	105
4. まとめと今後の課題	108
記号表	110
参考文献	111

目 次

- 図 2.2.1 平均勾配(時間微分)の計算
- 図 2.2.2 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(s_D) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.3 定流量揚水時の水位低下挙動($s_D \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.4 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(ds_D/dt_D) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.5 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(d\ln(s_D)/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.6 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(ds_D/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.7 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(i) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.8 定圧揚水時の水位低下挙動($i \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.9 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(di/dt_D) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.10 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(d\ln(i)/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.11 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(di/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.12 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(1/i) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.13 定圧揚水時の水位低下挙動($1/i \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.14 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(d(1/i)/dt_D) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.15 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(d\ln(1/i)/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.2.16 定圧揚水時の水位低下挙動($\log(d(1/i)/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)
- 図 2.3.1 水位低下挙動(定流量)：側方定水位境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, C_w=0, R_D$ 変動
- 図 2.3.2 水位低下挙動(定流量)：側方不透水境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, C_w=0, R_D$ 変動
- 図 2.3.3 水位低下挙動(定流量)：定常漏水, $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, C_w=0, r_w/B$ 変動
- 図 2.3.4 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, C_w=0, r_w/B$ 変動
- 図 2.3.5 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, C_w=0, \sqrt{(S'/S)}$ 変動
- 図 2.3.6 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, C_w=0, r_w/B$ 変動
- 図 2.3.7 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, C_w=0, \sqrt{(S'/S)}$ 変動
- 図 2.3.8 水位低下挙動(定流量)：無限遠方境界, $r_w \neq 0, (\alpha$ 変動)
- 図 2.3.9 水位低下挙動(定流量)：側方定水位境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, \alpha$ 変動
- 図 2.3.10 水位低下挙動(定流量)：側方定水位境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, R_D$ 変動
- 図 2.3.11 水位低下挙動(定流量)：側方不透水境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, \alpha$ 変動
- 図 2.3.12 水位低下挙動(定流量)：側方不透水境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, R_D$ 変動
- 図 2.3.13 水位低下挙動(定流量)：定常漏水, $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \alpha$ 変動
- 図 2.3.14 水位低下挙動(定流量)：定常漏水, $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, r_w/B$ 変動

- 図 2.3.15 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \alpha$ 変動
- 図 2.3.16 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, rw/B$ 変動
- 図 2.3.17 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \sqrt{(S'/S)}$ 変動
- 図 2.3.18 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \alpha$ 変動
- 図 2.3.19 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, rw/B$ 変動
- 図 2.3.20 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \sqrt{(S'/S)}$ 変動
- 図 2.3.21 揚水流量変動(定圧)：側方定水位境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, R_D$ 変動
- 図 2.3.22 揚水流量変動(定圧)：側方不透水境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0, R_D$ 変動
- 図 2.3.23 揚水流量変動(定圧)：定常漏水, $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, rw/B$ 変動
- 図 2.3.24 揚水流量変動(定圧)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, rw/B$ 変動
- 図 2.3.25 揚水流量変動(定圧)：非定常漏水(漏水層上端定水位),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \sqrt{(S'/S)}$ 変動
- 図 2.3.26 揚水流量変動(定圧)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, rw/B$ 変動
- 図 2.3.27 揚水流量変動(定圧)：非定常漏水(漏水層上端不透水),
 $R_D \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \sqrt{(S'/S)}$ 変動
- 図 2.4.1 揚水試験結果 No.2
- 図 2.4.2 揚水試験結果 No.3
- 図 2.4.3 揚水試験結果 No.4
- 図 2.4.4 揚水試験結果 No.6
- 図 2.4.5 揚水試験結果 No.7
- 図 2.4.6 揚水試験結果 No.12
- 図 2.4.7 解析結果 No.4
- 図 2.4.8 解析結果 No.6
- 図 2.4.9 解析結果 No.7
- 図 2.4.10 解析結果 No.12
- 図 3.2.1 変動揚水流量のモデル化
- 図 3.2.2 帯水層モデル条件の分類
- 図 3.2.3 $r_w \neq 0, C_w = 0$ 井戸による定流量揚水時の水位低下標準曲線

- 図 3.2.4 スラグ試験時の湧水流量 q の計算結果
- 図 3.2.5 スラグ試験時の水位変動結果の再現性
- 図 3.3.1 SW-SWS 試験のシミュレーション結果 ($\alpha=10^{-3}$)
- 図 3.3.2 SW-SWS 試験のシミュレーション結果 ($\alpha=10^{-8}$)
- 図 3.3.3 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット($\alpha=10^{-3}$, A タイプ)
- 図 3.3.4 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット($\alpha=10^{-3}$, B タイプ)
- 図 3.3.5 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット($\alpha=10^{-3}$, C タイプ)
- 図 3.3.6 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット($\alpha=10^{-8}$, A タイプ)
- 図 3.3.7 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット($\alpha=10^{-8}$, B タイプ)
- 図 3.3.8 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット($\alpha=10^{-8}$, C タイプ)
- 図 3.3.9 SWS 試験結果の Theis(Horner)解析結果($\alpha=10^{-3}$)
- 図 3.3.10 SWS 試験結果の Theis(Horner)解析結果($\alpha=10^{-8}$)
- 図 3.3.11 SWS 試験結果の Agarwal プロット($\alpha=10^{-3}$, B タイプ)
- 図 3.3.12 SWS 試験結果の Agarwal プロット($\alpha=10^{-3}$, C タイプ)
- 図 3.4.1 SW-SWS 試験結果のプロット
- 図 3.4.2 SW 試験時の累積湧水流量(V)と湧水流量(q)の変動(No.2)
- 図 3.4.3 SW 試験時の累積湧水流量(V)と湧水流量(q)の変動(No.9)
- 図 3.4.4 SW 試験時の累積湧水流量(V)と湧水流量(q)の変動(No.10-1)
- 図 3.4.5 SW 試験時の累積湧水流量(V)と湧水流量(q)の変動(No.10-2)
- 図 3.4.6 SW 試験時の累積湧水流量(V)と湧水流量(q)の変動(No.11)
- 図 3.4.7 SW 試験時の累積湧水流量(V)と湧水流量(q)の変動(No.12)
- 図 3.4.8 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット(No.2)
- 図 3.4.9 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット(No.9)
- 図 3.4.10 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット(No.10-1)
- 図 3.4.11 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット(No.10-2)
- 図 3.4.12 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット(No.11)
- 図 3.4.13 SWS 試験結果の Theis(Horner)プロット(No.12)

表 目 次

表 2.1.1	浸透形態を支配するパラメーター
表 2.2.2	帯水層・井戸モデルの一覧
表 2.2.3	曲線一致法での利用時(定量揚水)
表 2.2.4	曲線一致法での利用時(定圧揚水, Q)
表 2.2.5	曲線一致法での利用時(定圧揚水, 1/Q)
表 2.4.1	定流量揚水(RW)試験データ
表 2.4.2	定流量揚水(RW)試験データの再評価
表 2.4.3	揚水試験結果の一覧
表-3.2.1	境界条件一覧表
表-3.2.2	定数項一覧表 $s_D(r_D, p) = [c_1 K_0(\lambda r_D) + c_2 I_0(\lambda r_D)] \bar{f}_D$
表-3.3.3	SWS 解析結果 ($\alpha=10^{-3}$)
表-3.3.4	SWS 解析結果 ($\alpha=10^{-8}$)
表-3.3.5	SWS 解析結果 (Agarwal 法, $\alpha=10^{-3}$)
表-3.4.1	MIU-4 号孔における SWS 試験の実施状況
表-3.4.2	SW-SWS 試験条件一覧
表-3.4.3	SW-SWS 試験解析結果一覧

1. はじめに

地盤の透水性および浸透場の把握を目的とした原位置透水試験法を実施するにあたり、調査対象となる地層が極めて深部の低透水性地盤である場合には、単孔による透水試験法が実施される。単孔による原位置透水試験法にはスラグ試験に代表される非定常型試験と揚水試験に代表される定常型試験に分類でき、それぞれの特性を生かして使い分けられている^{1,2,3,4)}。特に、従来は非定常型試験から地盤の透水量係数を評価することが一般的であったが、地盤の貯留係数および流れ場を特定するために定常型試験も実施されるようになり、同一試験孔内の同一インターバルで複数種の透水試験が実施される傾向にある。

このような状況の中でいくつかの課題が抽出された。

第一の課題は、効率よく的確に流れ場を選定する方法の整理である。流れ場の選定にあたっては地層構造および地質特性から評価する方法もあるが、実施された透水試験の結果を用いて行うことが最も的確であると考えられ、定常型透水試験が有用である。この観点から、宇野⁵⁾や進士⁶⁾が水位低下パターンを整理した。特に前者は土木工学の分野では引用されることの多い研究成果である。しかしながら、これらの成果は定性的な分類にとどまり、我が国の地下水調査では流れ場の選定作業は重要視されていない現状もあり、これらの研究以降に流れ場の選定について言及したものは皆無に等しい。これに対して、諸外国や土木工学以外の分野、特に石油工学では精力的に流れ場の定量的なモデル化および流れ場の選定について検討が加えられてきた。その中で Horne がその自書で紹介した時間微分(観測値を時間で微分したもの)を用いる方法は特筆すべき技術である⁷⁾。この技術を簡単に示すと以下のようなものである。揚水試験で観測される水位低下量あるいは揚水流量は時間に対して比較的単調な変化を見せ、流れ場の違いをこの観測データ挙動に認める往々にして困難な場合が多い。しかし、観測データの時間軸に対するプロット曲線の接線勾配の変化には、流れ場の違いが認められる場合があり、この接線勾配が時間微分項であり、この特徴を積極的に活用しようと言うものである。石油工学では一般的な技術として普及しているが、我が国の地下水調査の分野では十分な認知を得た方法ではない。そこで、本検討では時間微分された揚水試験観測データの標準曲線を整理し、流れ場の選定および流れ場を特定する特性パラメータの違いによる比較をまとめる。

第二の課題は、試験孔同一インターバルで複数の透水試験(同一・異種も含めて)を実施する場合の課題である。現場透水試験法の試験条件には、初期状態(試験開始時)には水位変動はみられないことが挙げられている。このため、連続して複数の試験を行う場合には、初期状態とみなせるまで水位回復を待たねばならない。しかし、透水

性の低い地盤では回復に時間がかかり数日を要することもあり、透水試験を複数回および複数種実施することには調査工期の上から制限を受ける。これに対して、石油工学ではシーケンステストが提案され、連続する試験を個々の試験ではなく一連の試験と捉えて解析することで、個々の試験前の水位回復を不要とする方法が提案されている⁷⁾。この考え方によれば、試験時間の短縮が期待できる。本検討では、シーケンステストの一環と考えられる SWS 試験法の解析法^{8,9)}の妥当性を評価する。SWS 試験とはスラグ(SW)試験時の孔内水位回復過程の途中で孔内を shut-in させ孔内貯留をほぼ 0 とし水位回復に必要な水量を激減させることで、孔内水位回復速度を加速するものである。さらに、SWS”試験”と称されているようにこの回復促進過程の水位データを試験結果として解析し地盤の透水性を評価するものである。解析法は既に提案されているがその適用範囲と解析精度が不明であるため、本検討では SW-SWS 試験の理論解を開発し、これを用いて理論的な側面から既存の解析手法の妥当性を検討する。

最後に今後の課題をまとめる。

2. 微分プロットの活用方法に関する情報の整理とモデル計算

2.1 概要

揚水試験のように流れ場の影響を受け易いあるいは流れの影響自体を評価しようとする原位置透水試験結果を解析する場合、最初に行わなければならない作業が帯水層モデルの推定である。これはボーリング調査結果などを参考にして行われることが一般的であるが、これに加えて試験結果の分布や変動のモードから帯水層モデルを推定すべきである。帯水層モデルの推定は、流れ場を評価する目的の他に、本来の試験目的である浸透特性の評価精度に大きく関わってくる。例えば、漏水の影響を受ける帯水層での試験結果を非漏水性帯水層として評価すると、評価された透水量係数には漏水による供給が加味され、実際の透水量係数よりも大きく評価される傾向を示す。また、貯留性漏水の影響を受けた帯水層での揚水試験結果を片対数軸上($s\text{-}\log(t)$)で整理すると直線とみなされる部分があるが、これを Jacob&Cooper(直線勾配)法で整理した時にも透水量係数は実際よりも大きく評価される場合がある。このため、想定される帯水層モデルを複数用意しておき、試験結果の再現性の高いものを選択する作業が重要であり、各帯水層モデルの特徴を把握し、適切に表現できる試験結果の整理技術の適用が重要である。

帯水層モデルを推定する場合には幾つかの方法が提案されている。宇野⁹⁾や進士⁶⁾は片対数軸上($s\text{-}\log(t/r^2)$)プロットにおける水位低下パターンの整理を行った。また、Kruseman ら¹⁰⁾は両対数軸上($\log(s)\text{-}\log(t/r^2)$)プロットも片対数軸上プロットと併記して幾つかの帯水層モデルでの水位低下パターンを整理した。片対数軸上プロットでは、比較的大きな水位低下量に着目しており、その結果比較的長期間経過後の挙動に着目している。対して、両対数軸上プロットでは、比較的小さな水位低下量に着目しており、その結果比較的早期の挙動に着目している。

しかしながら、これらのプロットで評価されるパターンは大局的な観点から見たものになりがちであり、比較的細かい変動はプロット軸のスケールによって確認できないこともある。例えば、プロットを曲線として捉え、曲線の曲率から変極点を探し、ここでの情報を用いて解析する場合があるが、実測データのプロットから変極点を決定するには、技術者の技量に負うところが大きく信頼性に乏しくなることがある。

これに対していくつかの観点から、観測データの時間微分値を評価する技術が提案された。西垣¹¹⁾は揚水試験結果の自動解析を目的とした研究で、Jacob-Cooper の近似直線部分を抽出する際に片対数軸プロット曲線の接線勾配値をプロットポイント毎に計算し、勾配値の度数分布を利用する方法を提案した。これに類似するが、Kruseman ら¹⁰⁾は同じく Jacob-Cooper 法の適用に際して、各プロットポイント毎に

接線勾配値を評価し、さらに透水量係数をポイント毎に求め、適切な透水量係数を評価する方法を紹介している。これらで用いた接線勾配値は実測データの微分値に他ならないが、いずれも Jacob-Cooper 法の計算精度を向上させることが微分値の導入の目的であり、帯水層モデルの選定には言及していない。

これらの指標はいずれも片対数軸上($s - \log(t/r^2)$)での直線あるいは接線の勾配値と Jacob-Cooper 直線勾配法との関係の範疇に収まるものであるが、Bourdet ら¹²⁾は直線勾配法にはこだわらずに微分値としての利用方法を示した。ここでも片対数軸上の勾配値を用いているが、全揚水試験期間にわたってこれを評価し、微分値の時間変化を新たな標準曲線として評価する技術を提案した。ここで、微分値は *pressure derivative* と呼ばれており、観測値である水圧の微分であり、正確に呼ぶなら圧力(あるいは水位低下量)の時間に対する微分である。本報告書では時間に対する微分であることを明確にするため、便宜的に時間微分と総称する。

この方法はその後、石油工学で発展してきた技法であり 1990 年代初頭に Horne⁷⁾が自書でこの方法を紹介している。地下水工学の分野では、1980 年代以降石油工学の貯層試験技術の導入が顕著となり、幾人かの研究者が微分項を試験結果の整理に導入している。例えば、Neuman は自らの大学院修士課程の講義の中で微分項の利便性を紹介している¹³⁾。

本章では、これらの状況を踏まえ揚水試験結果である定流量揚水時の水位低下量および定圧揚水時の湧水流量の経時変化における微分項と浸透流形態・帯水層モデルの関連および具体的な活用方法をまとめる。

2.2 浸透流形態の評価手法に関する情報の整理

2.2.1 微分公式

時間微分は時間軸にプロットした観測データを曲線とみなしたときの時間ごとの接線勾配である。差分計算でプロット間の直線勾配を求めることが基本的な算出法であるが、数学公式を用いることで、計算を容易にすることができる。

(1) 微分公式の整理

主たる観測データを x とし、観測時間を t とする。揚水試験で扱われることの多い観測データは水位低下量 s (主に、定流量揚水時) と揚水流量 Q (主に、定圧揚水時) である。これに対して、評価される微分値には以下のものが考えられる。

$$\textcircled{1} \frac{dx}{d \ln t} \quad \textcircled{2} \frac{dx}{d \log t} \quad \textcircled{3} \frac{d \ln x}{d \ln t} \quad \textcircled{4} \frac{d \log x}{d \log t}$$

それぞれの微分公式を以下に示す。

①自然片対数軸上(x-ln(t))曲線の勾配

$$\frac{dx}{d \ln t} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dt}{d \ln t} \quad (2.2.1)$$

ここで、(2.2.1)式に $\ln t = y$, $t = e^y$ を代入する

$$\frac{dx}{d \ln t} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dt}{d \ln t} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{de^y}{dy} = \frac{dx}{dt} \cdot t \quad (2.2.2)$$

ここで、 dx/dt は普通軸上曲線の勾配である。

②常用片対数軸上(x-log(t))プロットの勾配

$$\frac{dx}{d \log t} = 2.3 \cdot \frac{dx}{d \ln t} = 2.3 \cdot \frac{dx}{dt} t \quad (\because \ln t = 2.3 \cdot \log t) \quad (2.2.3)$$

③両自然対数軸上プロット(ln(x)·ln(t))の勾配

$$\frac{d \ln x}{d \ln t} = \frac{dx}{d \ln t} \cdot \frac{d \ln x}{dx} \quad (2.2.4)$$

ここで、(2.2.4)式に $\ln x = z$, $x = e^z$ を代入する

$$\begin{aligned} \frac{d \ln x}{d \ln t} &= \frac{dx}{d \ln t} \cdot \frac{d \ln x}{dx} = \frac{dx}{dt} \frac{d \ln x}{dx} t = \frac{dx}{dt} \frac{dz}{de^z} t = \frac{dx}{dt} \frac{1}{e^z} t \\ &= \frac{dx}{dt} \cdot \frac{t}{x} \quad (2.2.5) \end{aligned}$$

④両常用対数軸上プロット(log(x)·log(t))の勾配

$$\begin{aligned} \frac{d \log x}{d \log t} &= \frac{2.3}{2.3} \cdot \frac{d \ln x}{d \ln t} \quad (\because \ln a = 2.3 \cdot \log a) \\ &= \frac{dx}{dt} \cdot \frac{t}{x} \quad (2.2.6) \end{aligned}$$

③および④は同値をとる。また、定圧揚水試験結果の揚水流量 Q は $(1/Q)$ をとって整理する場合があるが、ここでは観測値 $x=1/Q$ とみなして上記の整理を行う。

以上のように、主要な微分値は普通軸上のプロット曲線の接線勾配 dx/dt を評価すれば求められる。また、 dx/dt を得ずに他の微分値の評価から、 dx/dt を介在させてその他の微分値を評価することができる。

(2) 実測データの微分値計算

前述の微分公式を用いるにしても、実測データである離散データに対する微分計算が必要である。実測データの微分値計算は参考文献 4)にいくつかの紹介があり、それぞれの特徴が示されている。ここでは、連続する複数のデータ間の平均直線勾配をとる方法を採用した。

<平均勾配計算法>

時間微分項の計算には、点間差分計算法など幾つかの考え方がみられるが、点間差分計算法および計算対象とする点の選択基準を導入しても結果の信頼性には課題が残り、微分値の振動が算定されることがある。この対策として計算区間を直線近似し、この勾配値を時間微分値として与える方法を示す。図 2.2.1 のように実測データセット $s-t$ が得られた場合を考える。

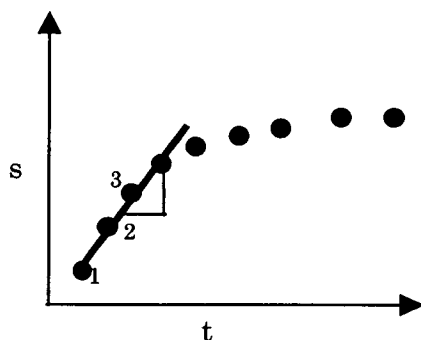


図 2.2.1 平均勾配(時間微分)の

- [1] 直線勾配を設定する軸を決め、これに対応して s および t を軸値に変換する。
- [2] i 番の観測時間 t_i から所定の時間区間(例えば 5 倍までの区間)に入るデータをピックアップする。
- [3] この区間で最小二乗近似直線を計算する。
- [4] ここで得られた近似値と実測値の平均残差を評価する。
- [5] 平均残差が所定の基準値よりも小さければ、選ばれた区間を直線視することの妥当性が確認されたとし、[7]へ進む。
- [6] 選ばれた区間を直線視することの妥当性が確認されない時、選んだ時間区間が長すぎたと考え、これを短い区間にする。短くする基準に指定は無いが、例えば現行の時間区間長の 90%に変更するなど試行する。新しい区間に対して[3]のステップからやり直す。
この試行では最終的に区間内の採用点数が 2 点になると、平均残差は 0 に収束する。

[7] 選ばれた区間を表す平均時間を求め、この時間に対する勾配値を計算結果として格納する。例えば平均時間はピックアップしたデータ間の平均時間をとる。

[8] [7]までの試行が完了すれば、次の時間ステップに進む。ここでは、微分項データ一数が減少することを避けるため、(i+1)番目時間からの時間区間を設定し、[3]へ戻る。

[9] (N-1)番目までの微分データが計算の完了後、各区間平均時間に対して並び替えを行う。

これは、時間区間の平均を計算した微分値の代表時間とすることから、平均勾配を評価する時間区間長は収束状況によって変動する。このため、収束の結果求められた代表時間とその格納の順番が時間順とならない場合がある。

2.2.2 微分と浸透流形態の整理

2.2.1 で示した微分公式を用いて代表的な標準曲線に対する時間微分値の標準曲線を作成し整理する。まず、現在評価可能な浸透形態^{2,3)}を分類すると以下の項目となる。

表 2.2.1 浸透形態を支配するパラメーター

分類	項目
揚水方法	<u>定流量揚水</u> <u>定圧揚水</u> 回復挙動(定流量揚水後の非揚水)
井戸構造 1	無限小径井戸 <u>有限径井戸、井戸貯留</u>
井戸構造 2	<u>完全貫入(全層インターバル)井戸</u> 不完全貫入(部分インターバル)井戸
水理境界条件	<u>無限遠方境界</u> <u>有限遠方境界(定水位、不透水)</u>
漏水条件	<u>非漏水</u> <u>定常漏水(漏水層上部定水位)</u> <u>非定常漏水(漏水層上部 定水位)</u> <u>非定常漏水(漏水層上部 不透水)</u>
透水異方性	<u>等方性</u> 鉛直水平異方性

本章では、表 2.2.1 中の下線を付したパラメーターについてケーススタディーを評価する。

さて、揚水試験にみられる浸透挙動を整理する場合、実測値の挙動は時間に対して概ね三つのグループに分類できる。つまり、比較的早い時間、比較的長時間経過後、そしてその中間の時間であり、Gringerten¹⁴⁾が紹介するように概ね以下の特徴を有すると考えられている。

- 揚水方法の違いは、観測項目も異なり試験全般にわたって見られる。ただし、定常状態が得られる場合には、揚水流量と水位低下量はそれぞれ一定あるいは一定の分布状態を示すので両者に差異はない。
- 井戸構造(井戸径)の違いは、比較的早い時間から若干中期に入る程度までにみられ、その後はみられなくなる。井戸貯留の違いも同様に比較的早い時間から若干中期に入る程度までみられるが、井戸貯留項が大きい場合には比較的大きな実時間まで分類上の早い時間になることを注意する。
- 水理境界の影響は、中期の終わりから遅い時間にかけてみられる。
- 定常漏水の影響は、中期の終わりから遅い時間にかけてみられる。
- 非定常漏水の影響は、比較的早い時間の終わりから中期にかけてみられるが、さらに遅い時間ではモードが変わって漏水層上端境界水位の影響が見られる。
- これらの各時間間隔を定量的に決めることは困難であり、またパラメーターの値によってこれら三分類に属する挙動が見られないこともある。

2.3 節で種々の標準曲線をまとめて掲載しているが、ここでは試験結果の整理から帯水層モデルを決定するための整理を行う。図 2.2.2~2.2.16 に各揚水試験毎に結果の代表的な観測量のプロットを示す。以下、各プロットと帯水層モデルの特徴を示す。尚、解説において時間範囲や変量値の具体的な値を示しているが、参照図を具体的に説明するためのものであり、特に普遍的な特徴である旨示していない記述は特徴のみられる範囲を具体的に説明するために引用したものである。観測位置は試験孔内であり $r_D=r/r_w=1$ 地点である。

尚、説明を簡便にするため帯水層および揚水井の異なるモデル計算の結果を表 2.2.2 で曲線を示す記号で表記した。ここで、モデル H はいわゆる Theis の非平衡揚水モデルであり $r_w=0$ である。このため、 $r_D=1$ の定義が適切ではないが、 $t_D/r_D^2=(Tt/Sr_w^2)/(r/r_w)^2= Tt/Sr^2$ とみなし r_w を評価しない表記とし、 $r=1$ で評価している。

ここでの整理は、以下のようにした。

定流量揚水試験および定圧揚水試験、さらに定流量揚水試験は井戸貯留の有無で分類している。各試験ごとの観測量は次の順に整理した。

- a) 観測量(x)–時間(t)の両対数軸上プロット[log(x)-log(t)]
- b) 観測量(x)–時間(t)の片対数軸上プロット[x·log(t)]
- c) 時間微分(dx/dt)–時間(t)の両対数軸上プロット[log(dx/dt)-log(t)]
普通軸(x-t)上プロット曲線の接線勾配値を曲線化
- d) 時間微分(dln(x)/dln(t)–時間(t)の両対数軸上プロット[log(dln(x)/dln(t))-log(t)]
a) 曲線の接線勾配値を曲線化、自然対数(ln)であるが常用対数軸(log)上の微分値と同等になることは(2.2.5)式と(2.2.6)式より確認できる。
- e) 時間微分(dx/dln(t)–時間(t)の両対数軸上プロット[log(dx/dln(t))-log(t)]
ここで、b) 曲線の接線勾配値を曲線化したものは、自然対数(ln)であるが常用対数軸(log)上の微分値とは 2.3 倍異なることは(2.2.2)式と(2.2.3)式より確認できる。

表 2.2.2 帯水層・井戸モデルの一覧

曲線	井戸径	井戸貯留	側方境界	漏水	
				定非定常	漏水層上端部
A	有	無	∞	漏水無	—
B	有	無	有限 $R_D=10^3$ (定水位)	漏水無	—
C	有	無	有限 $R_D=10^3$ (不透水)	漏水無	—
D	有	無	∞	定常 $\sqrt{(S'/S)}=0$ 漏水 $r_w/B=10^{-3}$	定水位
E	有	無	∞	非定常 $\sqrt{(S'/S)}=100$ 漏水 $r_w/B=10^{-3}$	定水位
F	有	無	∞	非定常 $\sqrt{(S'/S)}=100$ 漏水 $r_w/B=10^{-3}$	定不透水
G	有	有 ($\alpha=10^{-3}$)	∞	漏水無	—
H	無	—	∞	漏水無	—

(1)定流量揚水試験

a) 主観測量(水位低下量) s_D (両対数軸、図 2.2.2)

この図では早い時間(概ね $t_D < 10$)では 井戸径の有無、井戸貯留の有無の影響が顕著に見られる(A,G,H)。井戸貯留の影響を示す G は直線を示し、この傾きは 1 であり(ここでは、 $t_D < 10^3$)、その後徐々に曲率を見せている。対して、井戸径のみの影響を示す A は 1/2 の傾きを持った直線と見られるが、後に示すように G と比較すると直線性は劣る。これらに比べると、H は急な勾配であり直線性もみられない。E,F 以外の曲線は中間の時間に向かって一つに収束を見せる。中間の時間では貯留性漏水を示す E,F は他とは異なり、小さな水位低下量を示す。これは、漏水層の貯留特性によって帯水層への供給水量が大きくなっていることがその要因である。遅い時間で C は大きく逸脱しはじめ、しばらくすると C は傾き 1 の直線になる。これは不透水性側方境界の影響である。また、B,D はほぼフラットな挙動を示す。これは境界や漏水層からの補給と揚水の関係が平衡状態に達し水位変動が定常状態に達したことを示している。さらに、遅い時間では B,D に E が重なってくる。E の漏水挙動の貯留性の影響が薄れ、漏水層内の挙動が定常化し D と同じ状況になってきたためである。同様に、F の貯留性の影響も薄れてくるが E が漏水層内で水頭勾配をもった定常漏水になるのに対して、F は漏水補給が無くなってくる。このため、A の時間遅れの形で追随している。

曲線 G,H は井戸構造以外は A と同条件であり、中間時間以降は三曲線は一致している。

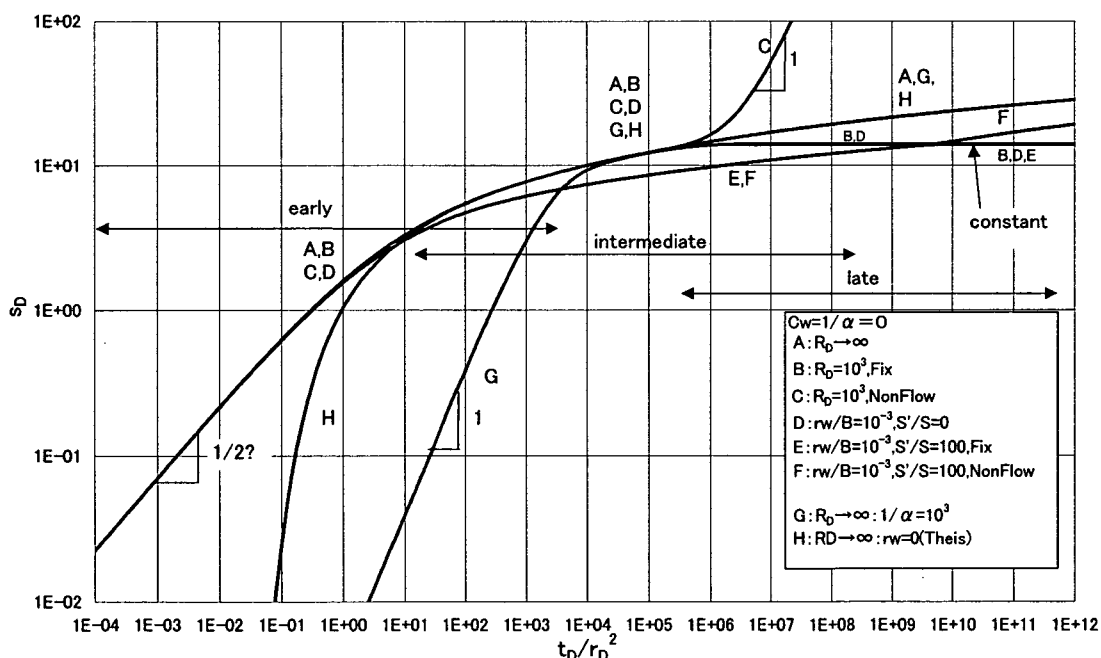


図 2.2.2 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(s_D) - \log(t_D/r_D^2)$)@ $r_D=1$)

b) 主観測量(水位低下量) s_D (片対数軸、図 2.2.3)

比較的早い時間での A,H の区別がつき難いが、G はこの図では $t_D > 10$ にみられる A の直線と比較してはらみ出しを示しており、明確である。A~D,G,H が見せる直線は IARF(Infinite Acting Radial Flow)を示し、この直線には Jacob-Cooper の直線勾配法が適用できる。しかし、貯留性漏水の影響を示す E,F も一見直線を示しているが、別の整理からこれらは直線とはいえず、Jacob-Cooper 法の適用は誤りである。この図では $t_D > 10^5$ 以降の挙動は帯水層モデルの違いが明確になっている。図 2.2.2 と比較すると、中間時間から遅い時間にかけての違いはここで示した片対数軸上プロットの方が明瞭である。

さらに、貯留性漏水の F は概ね $t_D > 10^{10}$ で直線を示し、これは A と平行であることから、Jacob-Cooper 法の直線勾配を用いて求める透水量係数の算定には有効である。しかし、貯留係数の評価では平行とはいえ時間のズレを無視できないので別途評価が必要である(Hantush¹⁵⁾)。

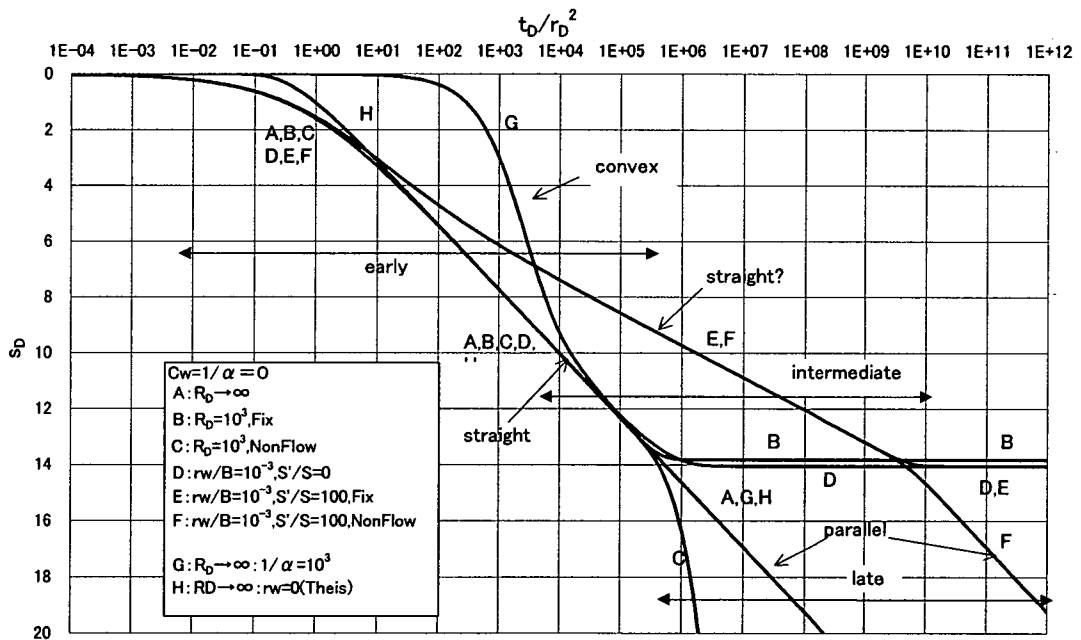


図 2.2.3 定流量揚水時の水位低下挙動($s_D - \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D = 1$)

c) 主変量の時間微分 ds_D/dt_D (両対数軸、図 2.2.4)

ここで整理するのは、主変量 s_D と時間 t_D の普通軸上プロットの接線勾配値である。他の微分項の計算のために導入している。比較的早い時間にみられる井戸構造の違いが顕著であるが、以降の挙動は前述および後に述べる特徴の方が明瞭であるため、このプロットを直接利用することはないと考えられる。

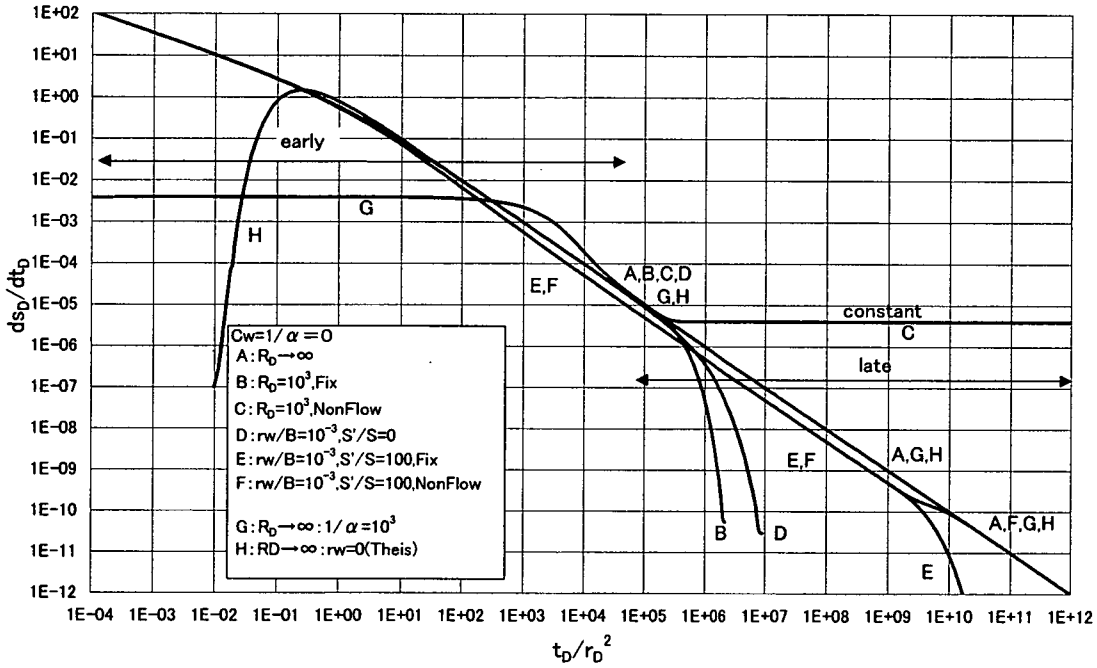


図 2.2.4 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(ds_D/dt_D) - \log(t_D/r_D^2)$)@ $r_D=1$)

d) 主変量の時間微分 $d\ln(s_D)/d\ln(t_D)$ (両対数軸、図 2.2.5)

ここで整理するのは、主変量 s_D と時間 t_D の両対数軸上プロット図 2.2.2 の接線勾配値である。対数軸は自然対数(ln)も常用対数(log)も同じ値になる(軸の対数はそれぞれ同じもの)。

このプロットからは以下の現象が確認できる。

G が井戸貯留の影響を示すところではこの微分値は1となり、これは図 2.2.2 のグラフで傾き 1 の直線を示す部分である。また、C が有限遠方不透水境界の影響を示すところでもこの微分値は1となり、これは図 2.2.2 のグラフで傾き 1 の直線を示す部分である。

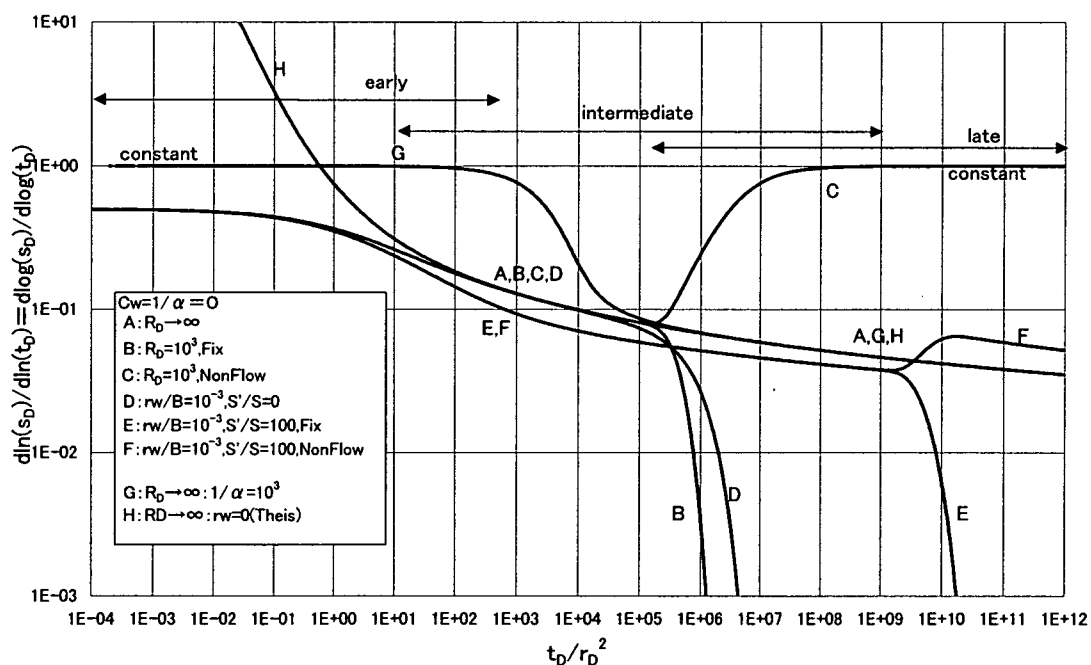


図 2.2.5 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(d\ln(s_D)/d\ln(t_D)) - \log(t_D/r_D^2)$ @ $r_D=1$)

e) 主変量の時間微分 $ds_D/d\ln(t_D)$ (両対数軸、図 2.2.6)

ここで整理するのは、主変量 s_D と対数時間 t_D 軸上プロット図 2.2.3 の接線勾配値である。対数軸は自然対数(ln)と常用対数(log)でこの微分値には 2.3 倍の違いが見られる。一般に石油工学を始め原位置透水試験結果の整理で微分項(derivative)と称されているのは、ここで定義されている微分である。

まず、井戸貯留の影響を示す G がピーク値を示す特徴が見られる。G のピーク時間から 1.5 対数時間経過すると値が一定になり、A や H に重なってくる。この一定値となる部分が図 2.2.3 でみられた Jacob-Cooper 法の近似直線の勾配であり、このように勾配値が一定とみなせることから図 2.2.3 では直線であると言え、IARF の適用範囲を示す。

また、F は E と共に A よりも低い値で一定値を示す区間を見せており、図 2.2.3 でこれらの直線性を示唆するものであるが、IARF の適用を示す場合の微分値よりも値が小さく、Jacob-Cooper 法を適用できない範囲である。しかしさらに後半で、F は E と分岐し他の値に A に重なっていることから、ここでは Jacob-Cooper 法を適用し、透水量係数を求めることは可能である。

実データでの適用では、E,F を示す帯水層で試験期間が十分でなくこの図の $t_D=10^8$ 程度で打ち切られた場合には、E,F の $t_D=10$ 付近のわずかなピークを井戸貯留とみなし、その後の一定値を Jacob-Cooper 法の直線近似とみなすこともあり、誤った評価がなされる可能性もある。

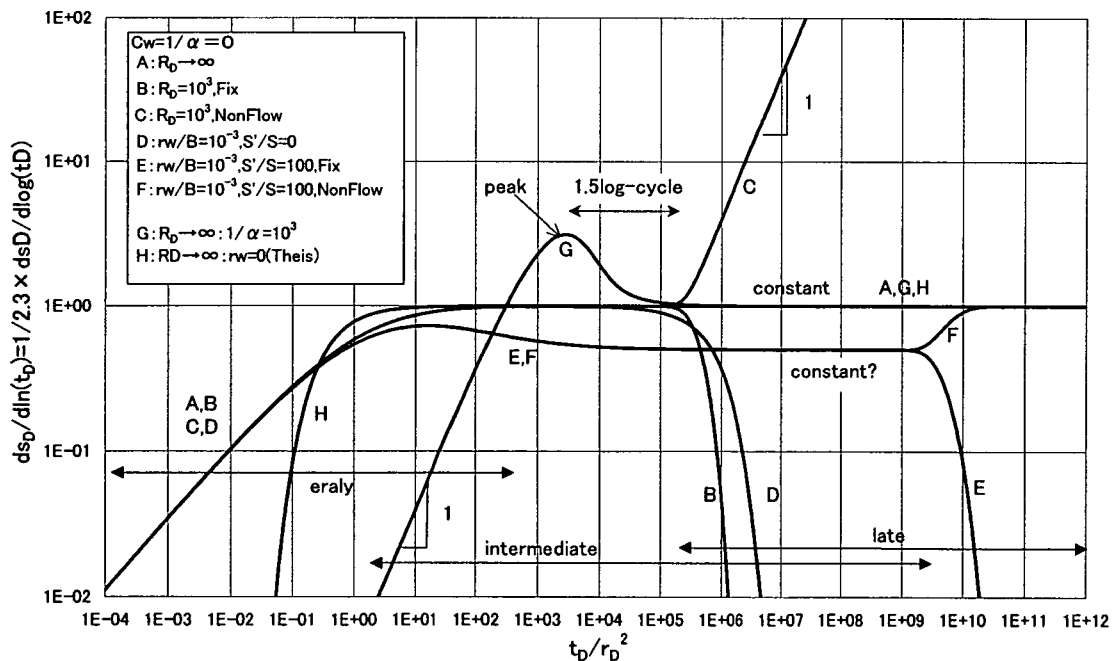


図 2.2.6 定流量揚水時の水位低下挙動($\log(ds_D/d\ln(t_D)) - \log(t_D/r_D^2)$)@ $r_D=1$)

(2) 定圧揚水試験

定圧揚水試験では揚水流量 Q が観測データであるが、ここでは揚水井壁面での動水勾配 i を無次元流量として整理した。 Q と i には以下の関係がある。

$$Q = 2\pi r_w T \frac{ds}{dr} = 2\pi r_w T \frac{s_o}{r_w} \frac{ds_D}{dr_D} = 2\pi T s_o i \quad (2.2.7)$$

$$\text{よって、} i = \frac{Q}{2\pi T s_o} \quad (2.2.8)$$

ここで、定義した動水勾配 i は Jacob&Lohman¹⁶⁾が定圧試験時の無次元揚水流量関数として誘導したものに相当する。解析方法は文献¹⁷⁾に紹介されている。

標準曲線は、ここでは有限井戸半径孔に限定しており、表 2.2.2 に示す A~F の 6 井戸・帯水層モデルである。

a) 主観測量(揚水流量) i (両対数軸、図 2.2.7)

観測データである揚水流量は時間とともに減少傾向を示す。非常に早い時間では井戸・帯水層モデルの違いは見られないが、このケースでは $t_D > 1$ で貯留性漏水の影響が見られる。さらに、このケースでは $t_D > 10^5$ オーダー半ばから各帯水層モデルの違いが明瞭になってくる。長期経過後では、側方境界 B と漏水モデル D, E は一定水位低下量を維持する。

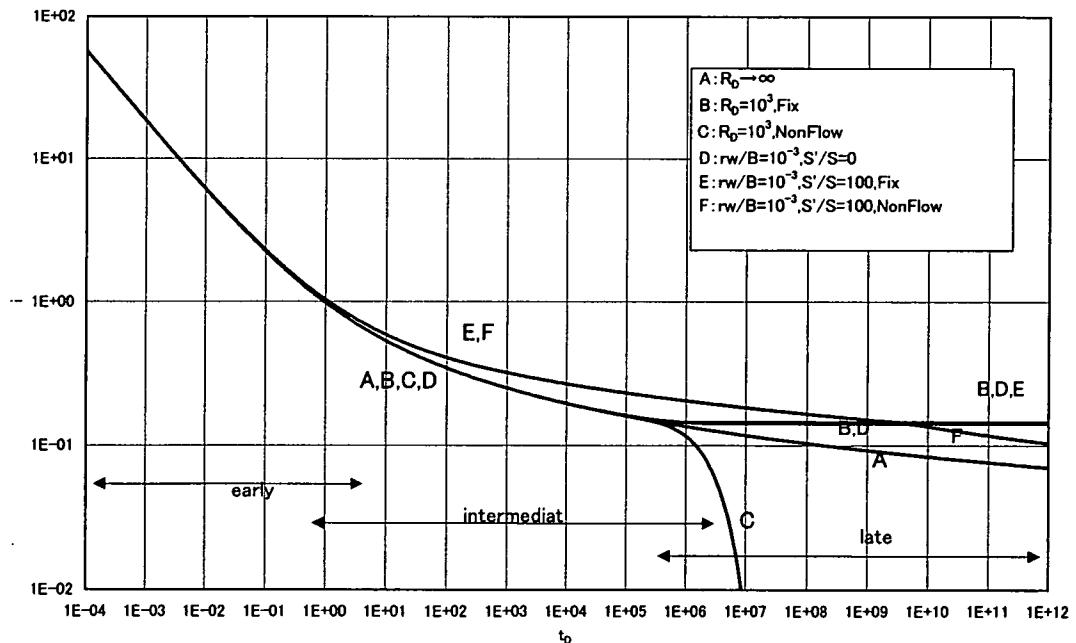


図 2.2.7 定圧揚水時の流量変動挙動($\log(i) - \log(t_D)$) @ $r_D=1$

b)主観測量(揚水流量) i (片対数軸、図 2.2.8)

図 2.2.7 の両対数軸上ではある程度の比較が見られたが、ここではまったく確認できない。これは、両対数軸が比較的小さな値に対しての違いの評価が適しているのに対して、片対数では大きな値の評価が適している（それぞれこの逆では不適である）。

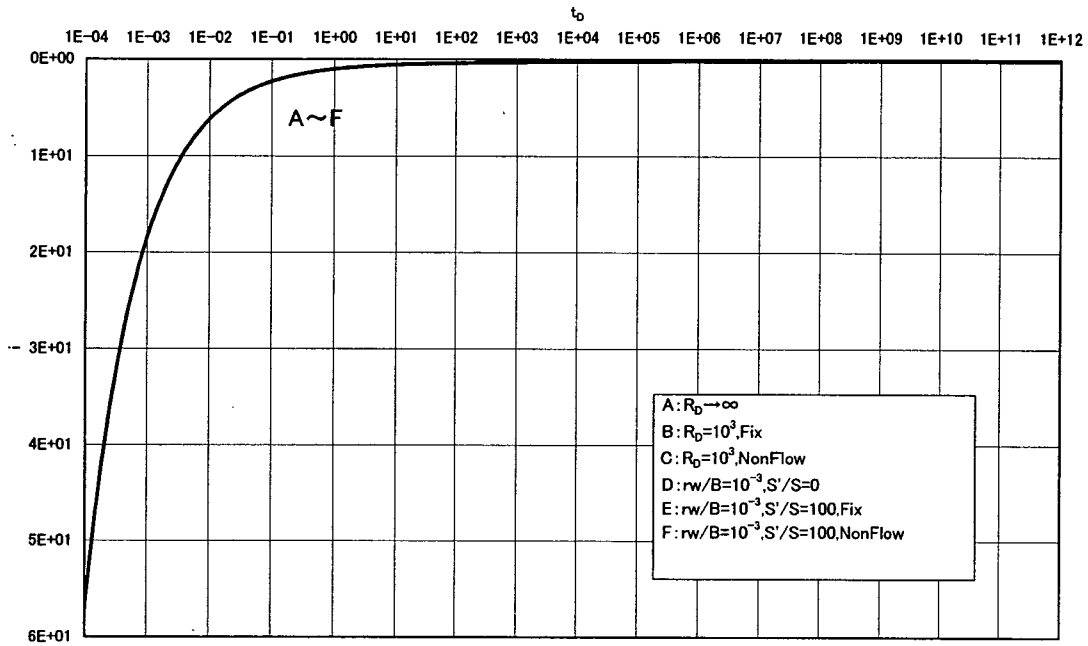


図 2.2.8 定圧揚水時の流量変動挙動($i \cdot \log(t_D)$) @ $r_D=1$)

c) 主変量の時間微分 di/dt_D (両対数軸、図 2.2.9)

ここで整理するのは、主変量 s_D と時間 t_D の普通軸上プロットの接線勾配値である。

早い時間での差異はまったくみられないが、ここでは $t_D > 10^5$ オーダーの半ばで幾分違いが見られる。このプロット形態をモデルの選定に用いることは困難であり、他の微分値の計算過程にもちいるものとする。

尚、 di/dt_D 値は負の値であるため、絶対量を表示している。

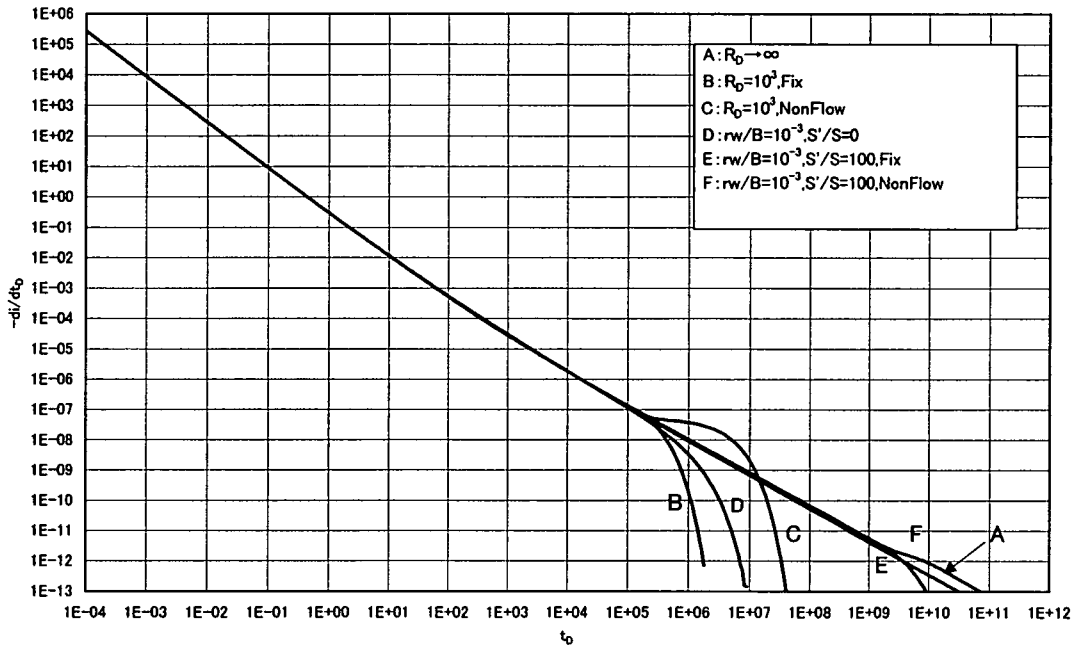


図 2.2.9 定圧揚水時の流量変動挙動 ($\log(di/dt_D) \cdot \log(t_D)$ @ $r_D=1$)

d) 主変量の時間微分 $d\ln(i)/d\ln(t_D)$ (両対数軸、図 2.2.10)

図 2.2.7 のプロットの接線勾配である。ここでは、B,C,D そして E の逸脱が顕著に確認できる。C(有限側方不透水境界)は、影響がみられるところでは傾き 1 の勾配を持つ直線を示す。他の、B,D,E は類似した低下傾向を示しており、区別はつけがたい。また、F は $t_D < 10^9$ オーダーまで減少傾向を示しているが、これ以降増加傾向を示しその後減少傾向を示す特徴が見られる。

尚、 $d\ln(i)/d\ln(t_D)$ は絶対量を表示している。

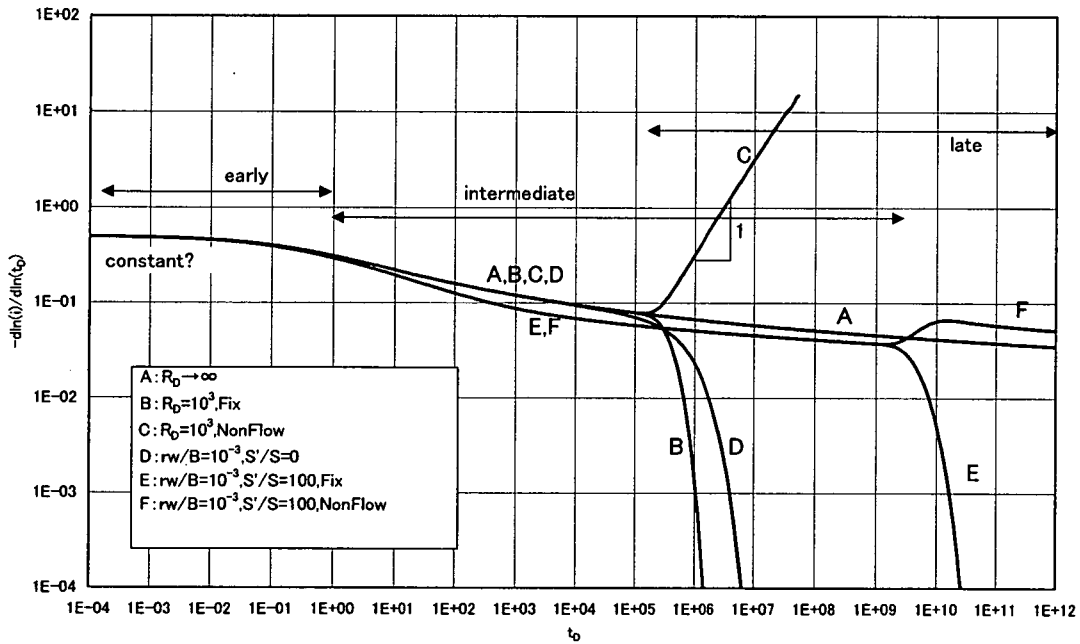


図 2.2.10 定圧揚水時の流量変動挙動($\log(d\ln(i)/d\ln(t_D)) - \log(t_D)$) @ $r_D=1$

e) 主変量の時間微分 $d(i)/d\ln(t_D)$ (両対数軸、図 2.2.11)

図 2.2.8 の曲線の接線勾配値である。これまでと異なり C に特異な挙動が見られる。しかし、図 2.2.8 にみられるように、流量そのものの値も小さい中で変動差が影響したものであり、実測データで評価できるか否かには問題も多いと思われる。

尚、 $di/d\ln(t_D)$ は絶対量を表示した。

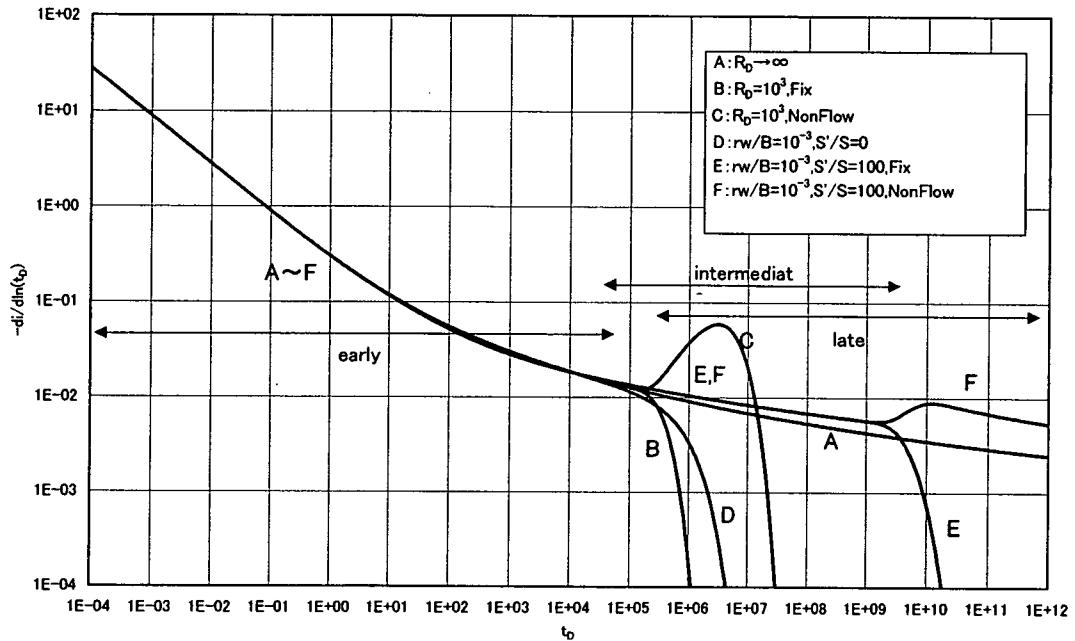


図 2.2.11 定圧揚水時の流量変動挙動 ($\log(di/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D)$) @ $r_D=1$

f) 主変量の逆数 $1/i$ (両対数軸、図 2.2.12)

参考文献 17)に示されるように流量の逆数を観測データとして片対数軸上で評価する方法がある。ここではこれにない流量の逆数を整理する。まず、ここで示した図 2.2.12 と前出の 2.2.2 を比較すると、絶対量の違いはあるが各帯水層モデル毎に同じ形状を示している。これは(2.2.8)式から動水勾配 i の逆数は以下ようになる。

$$\frac{1}{i} = \frac{2\pi T s_0}{Q} \quad (2.2.9)$$

ここで、水位低下量と揚水流量の比に透水量係数項を乗じたものが無次元指標であるとすると、 $s_0/Q = s/Q_0$ と表記でき(s : 定流量揚水時の水位低下量、 Q_0 : 一定揚水流量)、 $(1/i)$ は定流量揚水時の無次元水位低下量表示 s_D と以下の関係を示す。

$$\frac{1}{i} \propto \frac{1}{2} \frac{4\pi T s}{Q_0} = \frac{s_D}{2} \quad (2.2.10)$$

図 2.2.2 と比較すると、上式の関係は確認できる。ただし、この関係は記号 \propto で示しているように、定性的な関係であって定量的な整合性を示していない。

このように、観測値の標準的な挙動は各帯水層モデルと定流量揚水時のそれと類似することから、対応するプロット (ここでは図 2.2.2)の解説と同様になるため、重複を避け、これ以降も特筆すべきもののみ示す。

図 2.2.2 と異なるのは C であり、ここでは後半に直線を示していない。また、 i と $1/i$ の関係から、図 2.2.12 と図 2.2.7 はグラフ用紙を縦上下に裏返した形状である。

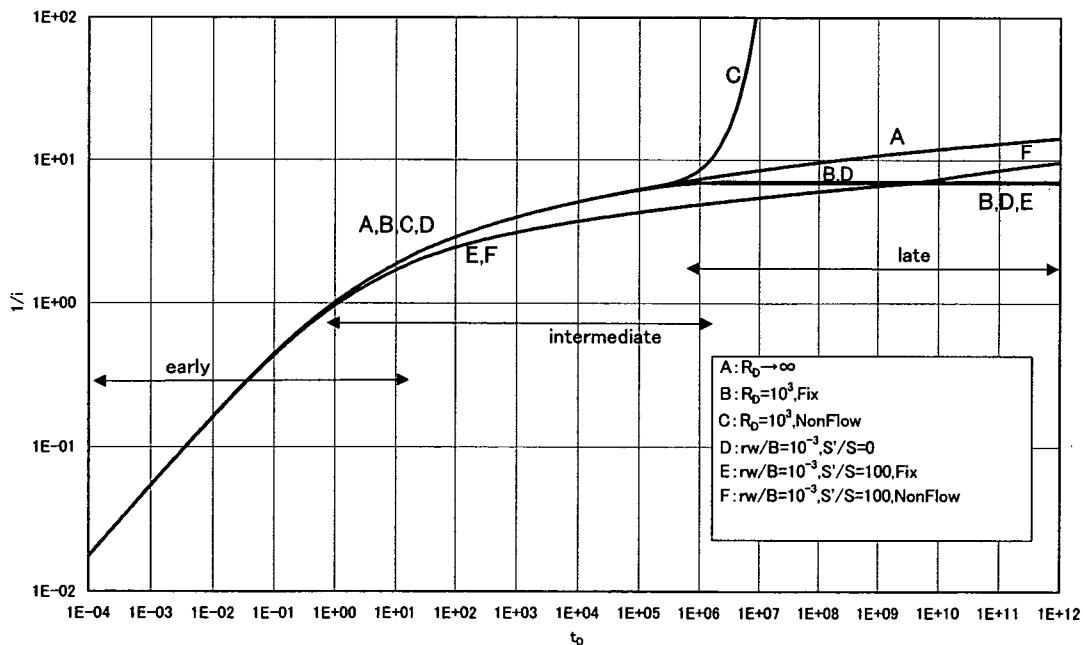


図 2.2.12 定圧揚水時の流量変動挙動($\log(1/i) \cdot \log(t_D)$) @ $r_D=1$

g) 主変量の逆数 $1/i$ (片対数軸、図 2.2.13)

A の示す直線勾配および $1/i=0$ 軸切片時間を用いて Jacob-Cooper タイプの解析が適用できる。これも、前述のように無限遠方境界非漏水性帯水層に限定されることがわかる。

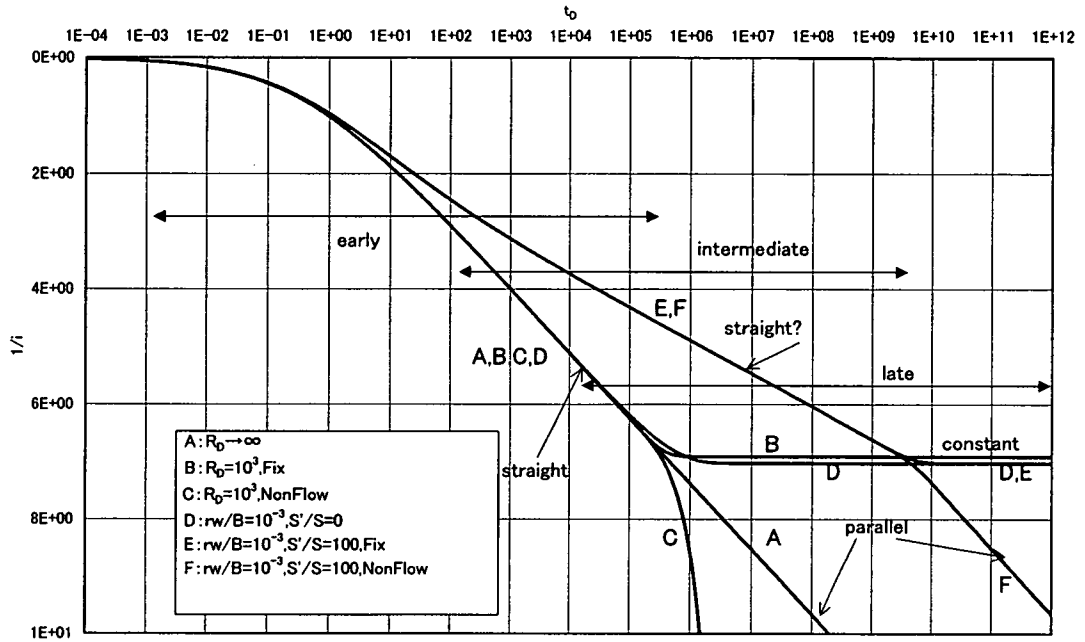


図 2.2.13 定圧揚水時の流量変動挙動($1/i \cdot \log(t_D)$) @ $r_D=1$

h) 主変量の逆数の時間微分 $d(1/i)/dt$ (両対数軸、図 2.2.14)

C 以外の挙動は図 2.2.4 と同一の形状を示す。C は不透水性の側方境界であり、図 2.2.2 では水位低下率(ds/dt)が一定になったため図にはフラットな直線が見られた。対して揚水流量は 0 に向かって減少するが、その減少率は必ずしも一定ではない。このため、C は図 2.2.2 の挙動(時間とともに一定)とは異なり、時間とともに増加傾向を示している。

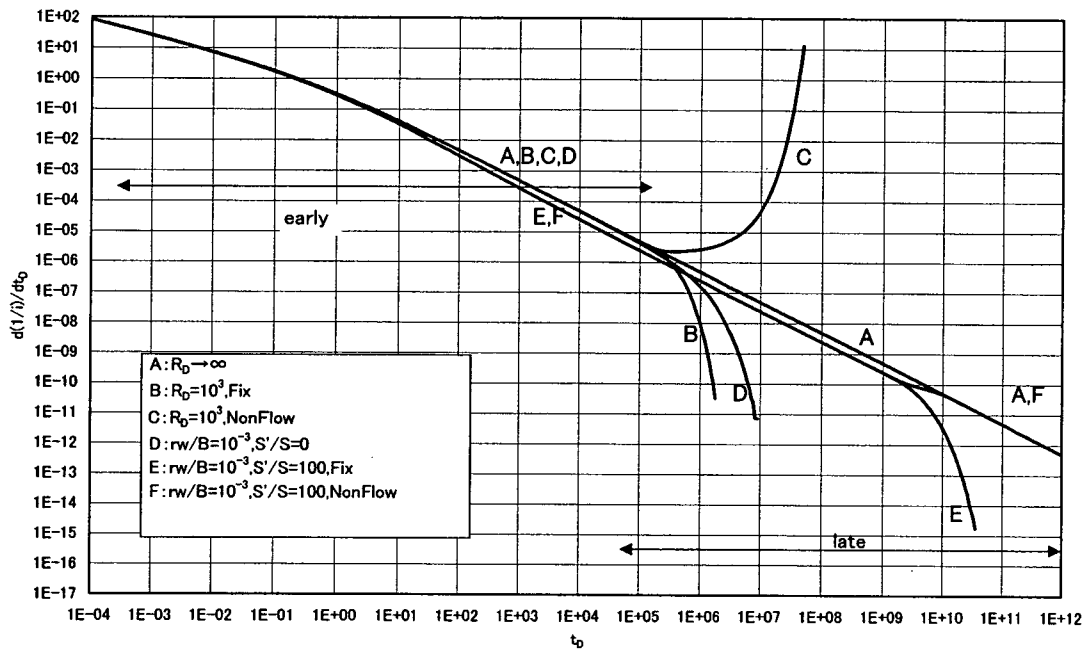


図 2.2.14 定圧揚水時の流量変動挙動 ($\log(d(1/i)/dt_D) - \log(t_D) @ r_D=1$)

i) 主変量の逆数の時間微分 $d\ln(1/i)/d\ln(t)$ (両対数軸、図 2.2.15)

ここで、C は不透水遠方境界の影響を受けると、傾き 1 の直線を示している。図 2.2.5 では C は一定値である。

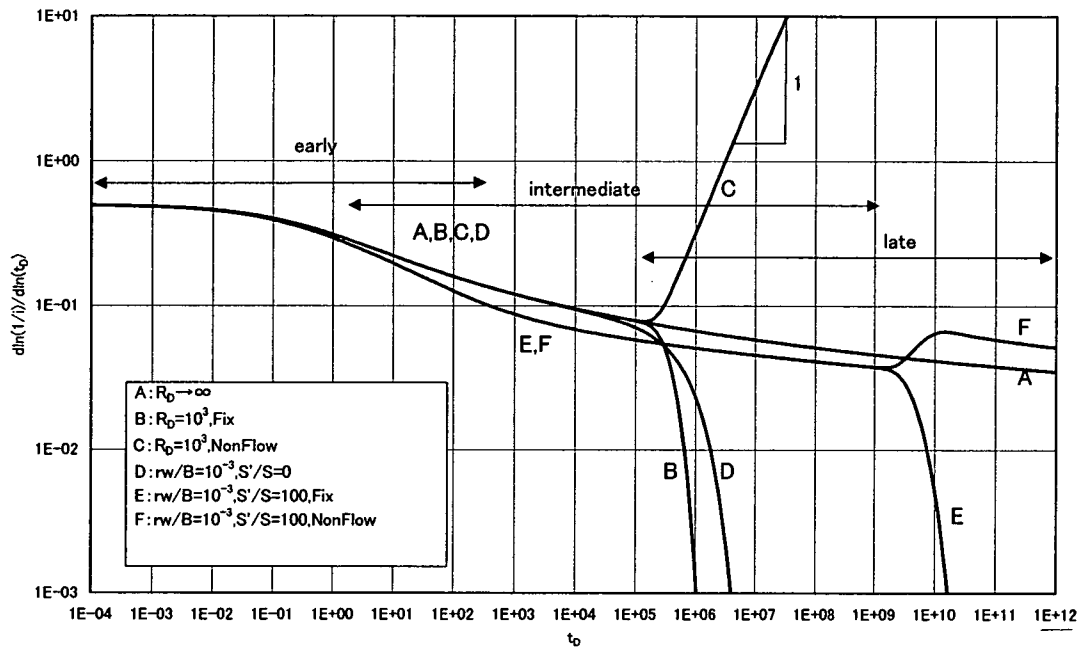


図 2.2.15 定圧揚水時の流量変動挙動 ($\log(d\ln(1/i)/d\ln(t_D)) \cdot \log(t_D) @ r_D = 1$)

j) 主変量の逆数の時間微分 $d(1/i)/d\ln(t)$ (両対数軸、図 2.2.16)

C は遅い時間で直線を示すかのようにみられるが、これを延長して確認したところこれは直線ではない。

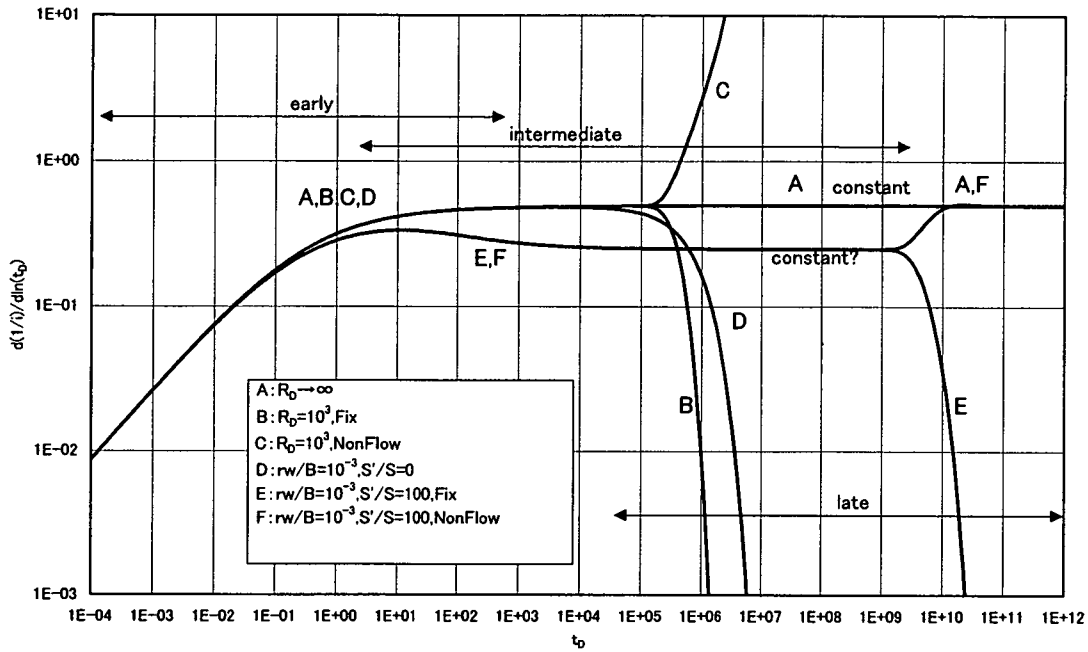


図 2.2.16 定圧揚水時の流量変動挙動 ($\log(d(1/i)/d\ln(t_D)) - \log(t_D)$) @ $r_D=1$

(3) 微分の利用と浸透流形態のまとめ

a) 定流量揚水時の水位低下挙動から井戸・帯水層モデルを選定するのに有用なプロットと特筆すべき特徴は以下のものである。

両対数軸 $\log(s) - \log(t)$

井戸貯留の影響時には傾き 1 の直線を示す

不透水遠方境界の影響時には傾き 1 の直線を示す

片対数軸 $s - \log(t)$

IARF では直線がみられるが、逆に直線が必ずしも IARF 状態とはいえない

両対数軸 $\log[d\ln(s)/d\ln(t)] - \log(t)$

井戸貯留の影響を受ける部分では一定値 1 を示す

不透水遠方境界の影響を受ける部分でも一定値 1 を示す

両対数軸 $\log[ds/d\ln(t)] - \log(t)$

片対数軸 $s \cdot \log(t)$ で直線を示す部分は、ここでは一定値を示し、この値が片対数軸上の勾配である。

井戸貯留を示す部分では傾き 1 の直線を示し、 $\log(s) - \log(t)$ プロットと重なる。

井戸貯留の影響がとしてプロット値のピーク現象を見せ、ピークを取る時間から少なくとも 1.5 対数時間以上経過しないと IARF 挙動とはいえない。

b) 定圧揚水時の揚水流量挙動から帯水層モデルを選定するのに有用なプロットと特筆すべき特徴は以下のものである。

両対数軸 $\log(Q) - \log(t)$

両対数軸 $\log[d\ln(Q)/d\ln(t)] - \log(t)$

不透水遠方境界の影響を受ける部分では傾き 1 の直線を示す

片対数軸 $(1/Q) - \log(t)$

IARF では直線がみられるが、直線が必ずしも IARF 状態とはいえない

両対数軸 $\log[d(1/Q)/d\ln(t)] - \log(t)$

片対数軸 $1/Q \cdot \log(t)$ で直線を示す部分は、ここでは一定値を示し、この値が片対数軸上の勾配である。

c) 試験結果の解析での適用

これまでの解説は、帯水層モデルの特定を考えた比較的定性的な特徴を示している。さらに、微分値は観測値の変化率に着目したため、観測値の絶対量に左右されがちな従来の観測値の両対数、片対数の各軸上プロットとは異なり、観測値の大きさに対する偏重が無く比較的全般にわたって試験結果を評価し、曲線ごとの特徴をより明瞭に表していると考えられる。また、微分値はプロット曲線の接線勾配であることから、直接この関係を用いることもできる。

以上の観点から、試験結果の解析への適用を示す。

① 曲線一致法

これまで、多くの研究者によって帯水層モデル毎の特異な特徴に基づいた解析方法が提案されてきた。直線勾配法や変極点法がこれに該当するが、いずれも理論上の適用の範囲があるに加えて、適用範囲は試験結果から直接判断することが極めて困難である。しかし、ここで示す曲線一致法は帯水層モデルが選定されれば、最良のマッチング状態から得られる座標情報および選定された標準曲線から帯水層モデル毎の特性値が得られる(曲線一致法については、文献 2)~4)に詳しく示されている)。この手法を簡単に説明すると、両対数軸上で、縦軸に観測値や微分値等の評価対象値、横軸に時間を取り、評価値に対応した理論値のグラフと実測値のグラフを同じスケール軸にそれぞれプロットする。これを重ね最適のフィッティング状態の、各軸毎の座標値から所定のパラメータを算定する。これまで示してきた微分項とパラメーターの関係を以下にまとめる。

表 2.2.3 曲線一致法での利用時(定量揚水)

実測縦軸座標値	標準縦軸座標値	一致座標値比
s	s_D	$\frac{s_D}{s} = \frac{4\pi T}{Q_0}$
ds/dt	ds_D/dt_D	$\frac{ds_D/dt_D}{ds/dt} = \frac{4\pi S r_w^2}{Q_0}$
$ds/d \ln(t)$	$ds_D/d \ln(t_D)$	$\frac{ds_D/d \ln(t_D)}{ds/d \ln(t)} = \frac{4\pi T}{Q_0}$
$ds/d \log(t)$	$ds_D/d \log(t_D)$	$\frac{ds_D/d \log(t_D)}{ds/d \log(t)} = \frac{4\pi T}{Q_0}$
$d \log(s)/d \log(t)$	$d \log(s_D)/d \log(t_D)$	$\frac{d \log(s_D)/d \log(t_D)}{d \log(s)/d \log(t)} = 1$

表 2.2.4 曲線一致法での利用時(定圧揚水, Q)

Q	i	$\frac{i}{Q} = \frac{1}{2\pi T s_0}$
dQ/dt	di/dt_D	$\frac{di/dt_D}{dQ/dt} = \frac{Sr_w^2}{2\pi T^2 s_0}$
$dQ/d \ln(t)$	$di/d \ln(t_D)$	$\frac{di/d \ln(t_D)}{dQ/d \ln(t)} = \frac{1}{2\pi T s_0}$
$dQ/d \log(t)$	$di/d \log(t_D)$	$\frac{di/d \log(t_D)}{dQ/d \log(t)} = \frac{1}{2\pi T s_0}$
$d \log(Q)/d \log(t)$	$d \log(i)/d \log(t_D)$	$\frac{d \log(i)/d \log(t_D)}{d \log(Q)/d \log(t)} = 1$

表 2.2.5 曲線一致法での利用時(定圧揚水, 1/Q)

$1/Q$	$1/i$	$\frac{1/i}{1/Q} = 2\pi T s_0$
$d\left(\frac{1}{Q}\right)/dt$	$d\left(\frac{1}{i}\right)/dt_D$	$\frac{d(1/i)/dt_D}{d(1/Q)/dt} = 2\pi s_0 Sr_w^2$
$d(1/Q)/d \ln(t)$	$d(1/i)/d \ln(t_D)$	$\frac{d(1/i)/d \ln(t_D)}{d(1/Q)/d \ln(t)} = 2\pi T s_0$
$d(1/Q)/d \log(t)$	$d(1/i)/d \log(t_D)$	$\frac{d(1/i)/d \log(t_D)}{d(1/Q)/d \log(t)} = 2\pi T s_0$
$d \log(1/Q)/d \log(t)$	$d \log(1/i)/d \log(t_D)$	$\frac{d \log(1/i)/d \log(t_D)}{d \log(1/Q)/d \log(t)} = 1$

また、時間軸は標準値に t_D や $1/u_w (=4t_D)$ が取られ、これらには以下の関係がある。

$$\frac{t}{t_D} = \frac{Sr_w^2}{T} \quad (2.2.11)$$

表 2.2.3~5 のいずれかの関係から得られた座標比および上記の時間座標比を用いて、所定のパラメータを評価することができる。

②微分値と勾配値

ここで解説した微分値は接線勾配値を表しているが、この関係を用いて以下の適用ができる。

曲線が勾配のある直線を示すとき、この部分の微分値は一定値を示しプロットではフラットな形状を示す。

曲線が勾配の無い(フラット)直線を示すとき、この部分の微分値は一定値 0 を示すが、対数軸上では 0 を表記できないため、0 に向かって減少するカーブを示す。

微分値が同じとき、対応する直線あるいは接線の勾配は同一と言えるが、必ずしも直線および接線が重なり合うものではない。

この特徴を利用すると、Jacob-Cooper 法やこれに類する直線勾配を利用した方法を適用する場合、微分値を評価し直線部とみなせる部分を抽出することができる。

この特性は積極的に活用すべきである。

2.3 帯水層モデル毎の微分標準曲線

2.2 では帯水層モデルの違いを特徴付けるプロット軸を観察した。ここでは、各帯水層モデル毎に帯水層特性値の違いがどのようにみられるかを観察する。尚、ここで用いるプロット軸は観測値とその勾配(微分)を対比することとし、2.2 で紹介したプロット軸から絞り込んでいる。尚、水位変動および流量変動を観測した地点は試験孔壁面部であり、観測位置 $r_D=r_w/r_w=1$ である。

2.3.1 定流量揚水 I : 井戸貯留を無視できる場合

ここでは、表 2.2.2 で示した A~F の 6 モデルについてパラメーター毎にこれを整理した。井戸貯留項 $C_w=0$ ($\alpha=\infty$)モデルである。

図 2.3.1 は側方定水位境界の影響、図 2.3.2 は側方不透水境界の影響みたもので、それぞれに無限遠方境界(境界種の違いは無視される)のケースも示した。無限遠方を標準にみると、これら境界の影響は明確な逸脱をみせている。

図 2.3.3 は定常漏水モデルを扱ったものである。この傾向は、図 2.3.1 と似ているが、漏水の無い無限遠方境界モデルからの逸脱は、こちらに尾方が徐々に生じている。

図 2.3.4~5 は非定常漏水モデルで漏水層上端境界が定水位境界を示すものである。片対数軸上プロットの直線部分が S/S の設定で種々みられ、当然これらに IARF モデルを適用することはできない。

図 2.3.6~7 は非定常漏水モデルで漏水層上端境界が不透水境界を示すものである。片対数軸プロットで S 字曲線を示している。

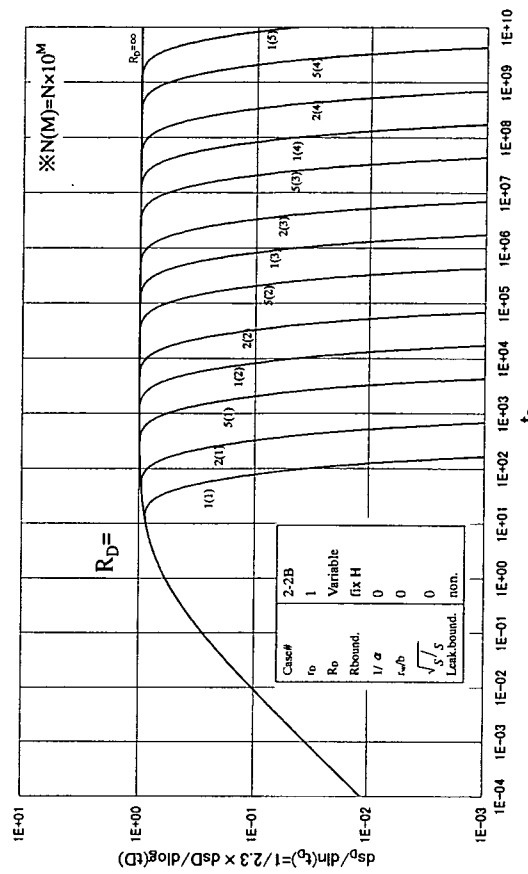
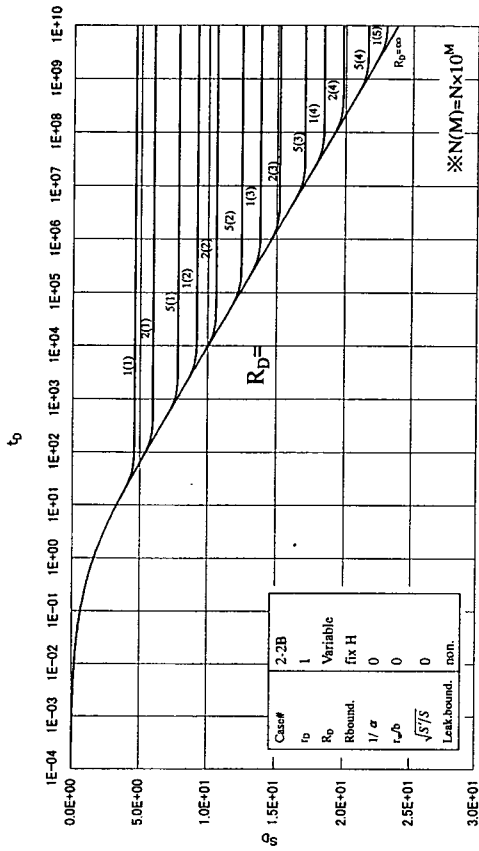
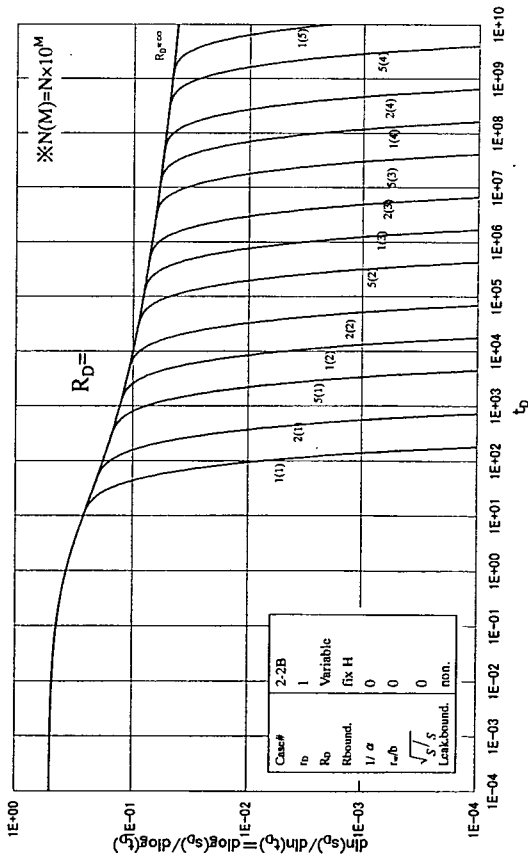
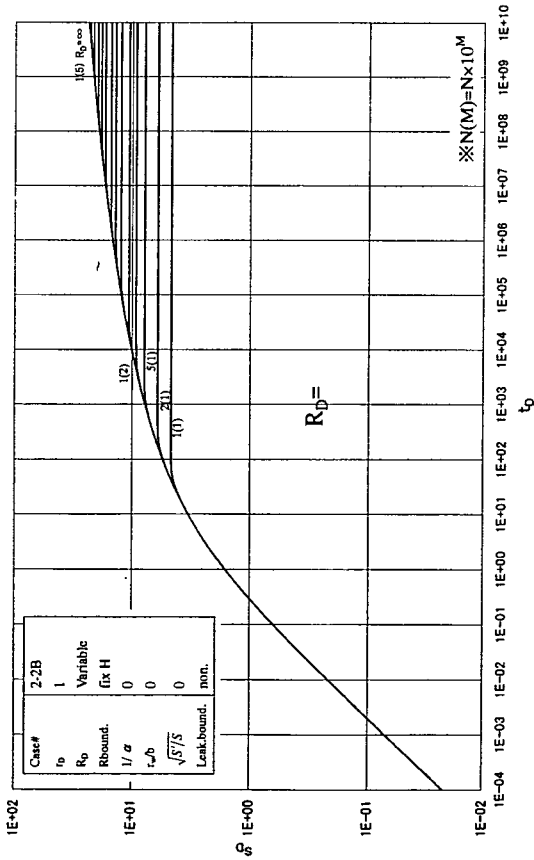


图 2.3.1 水位低下挙動(定流量)：側方定水位境界(∞,有限), $r_w \neq 0, C_w = 0, R_D$ 變動

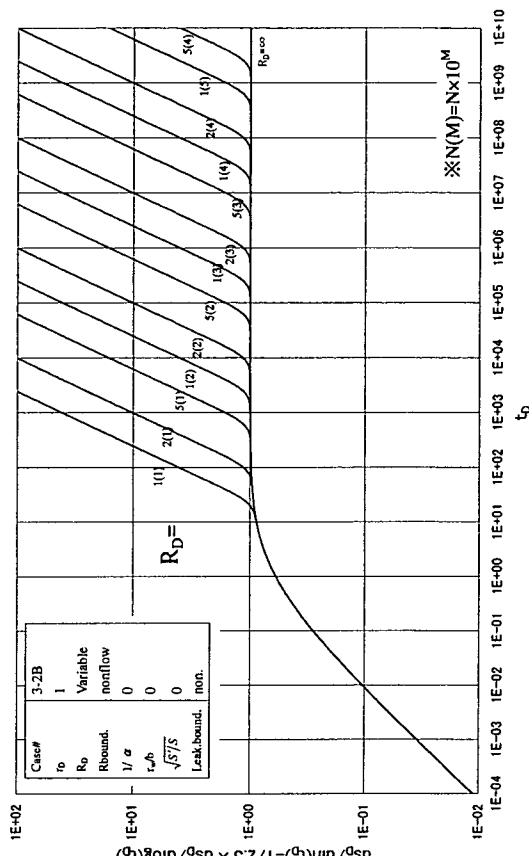
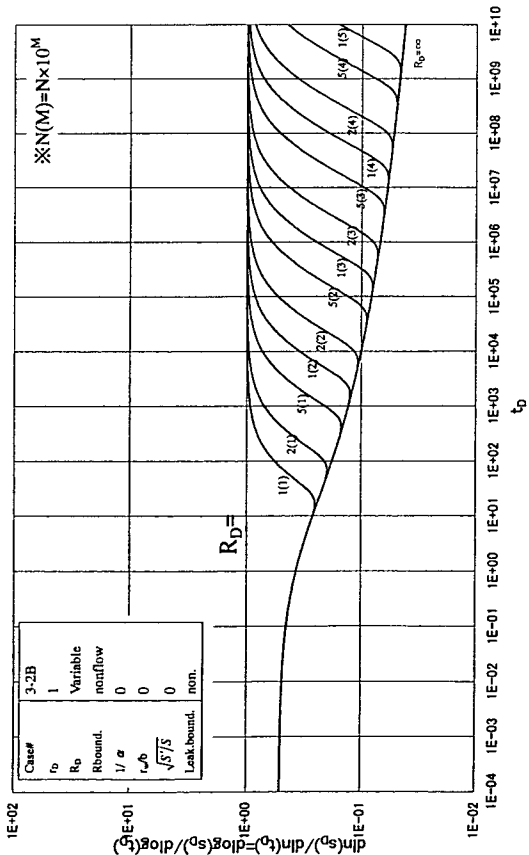
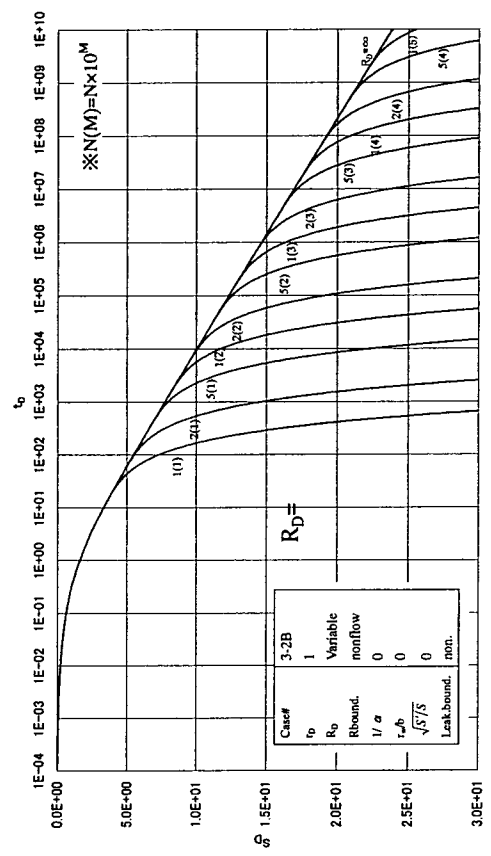
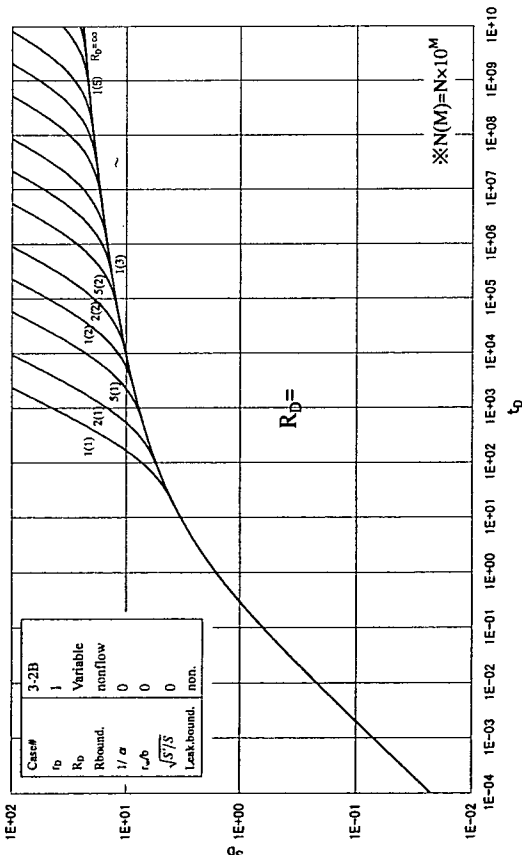


图 2.3.2 水位低下举動(定流量) : 側方不透水境界(∞ , 有限), $r_w \neq 0$, $CW=0$, R_D 變動

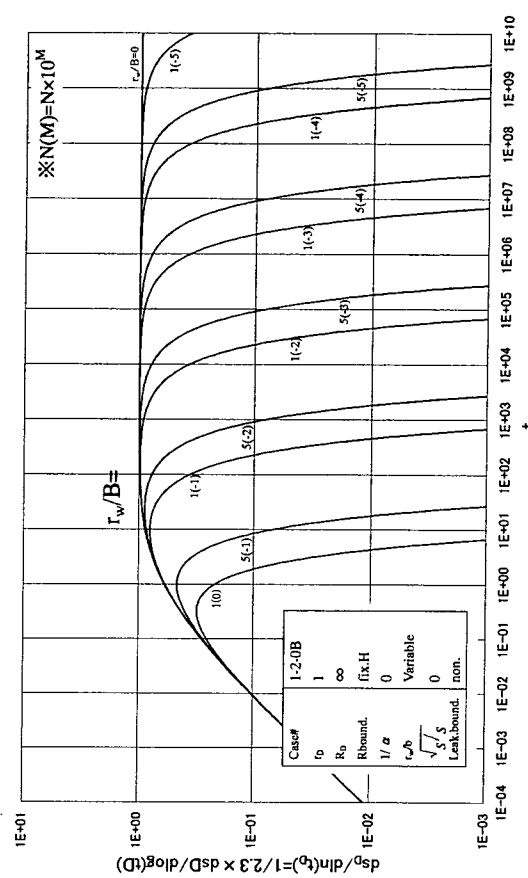
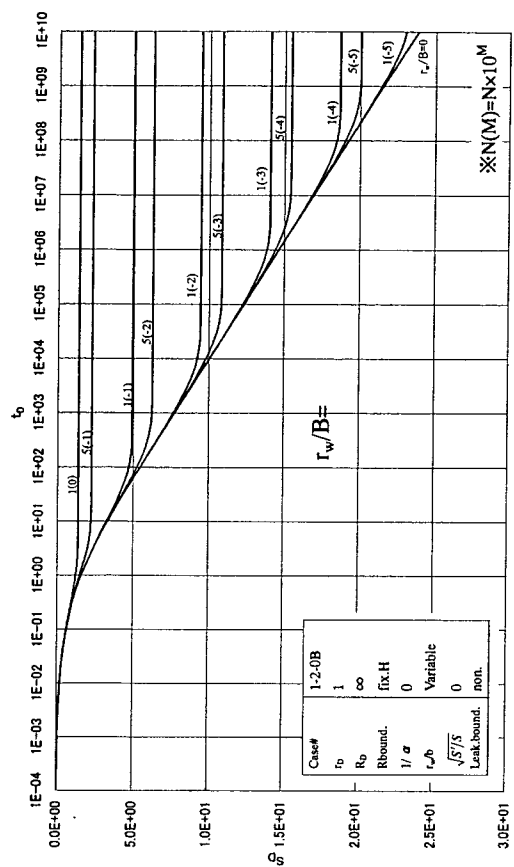
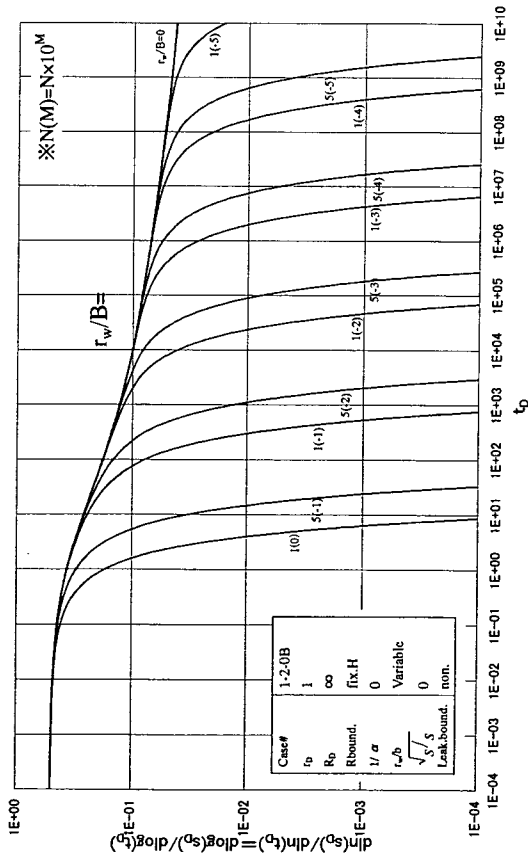
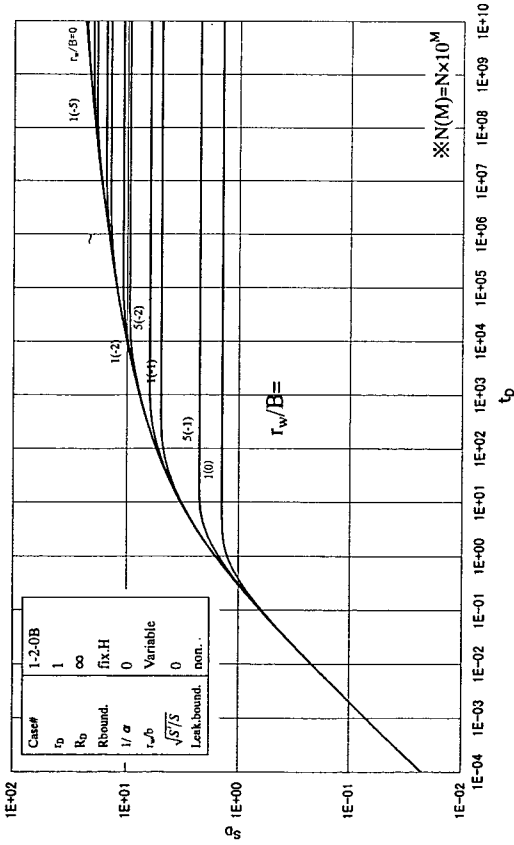


图 2.3.3 水位低下挙動(定流量) : 定常漏水, $R_0 \rightarrow \infty$, $r_w \neq 0$, $CW=0$, r_w/B 変動

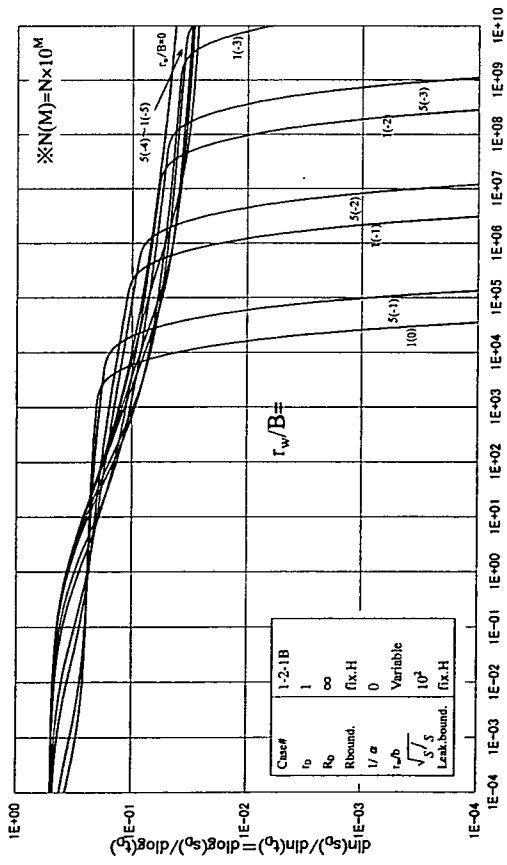
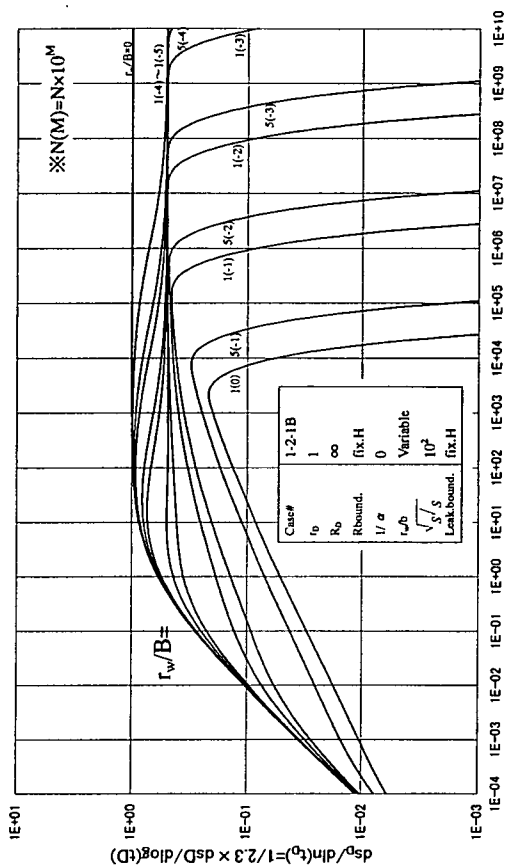
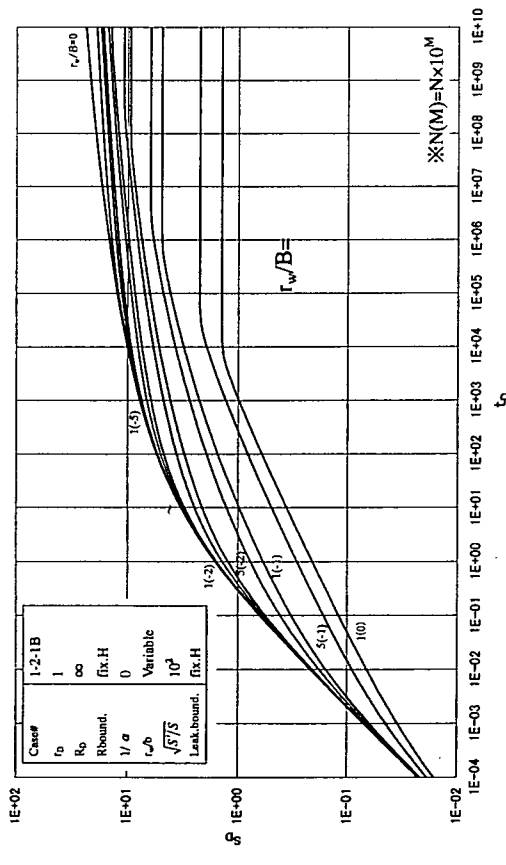
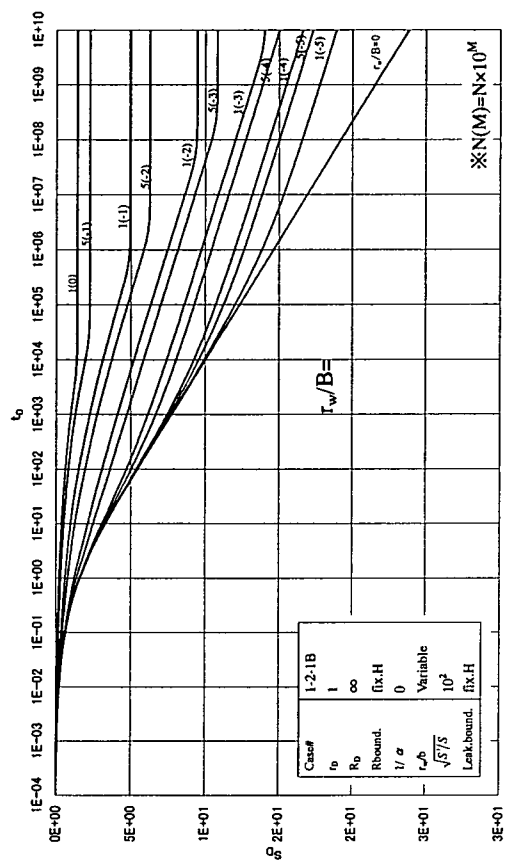


图 2.3.4 水位低下学動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位), $R_0 \rightarrow \infty, r_w = 0, CW = 0, r_w/B$ 變動

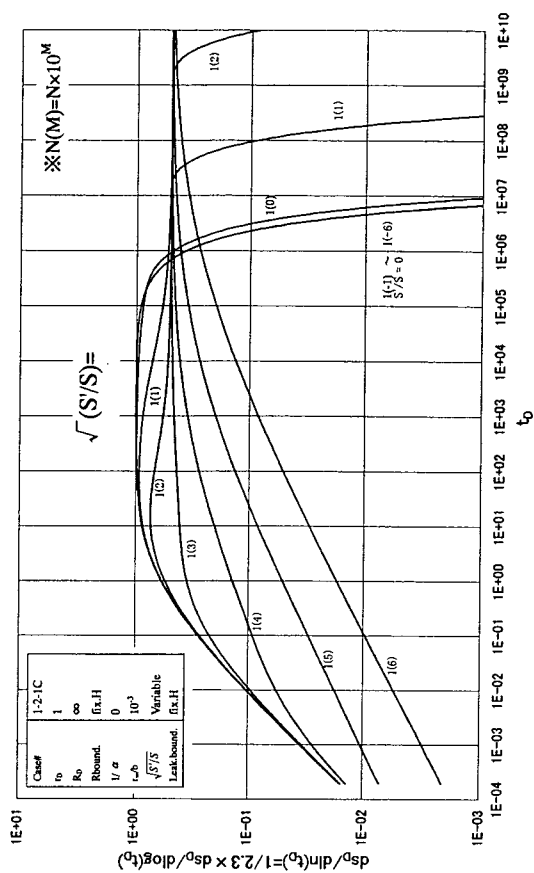
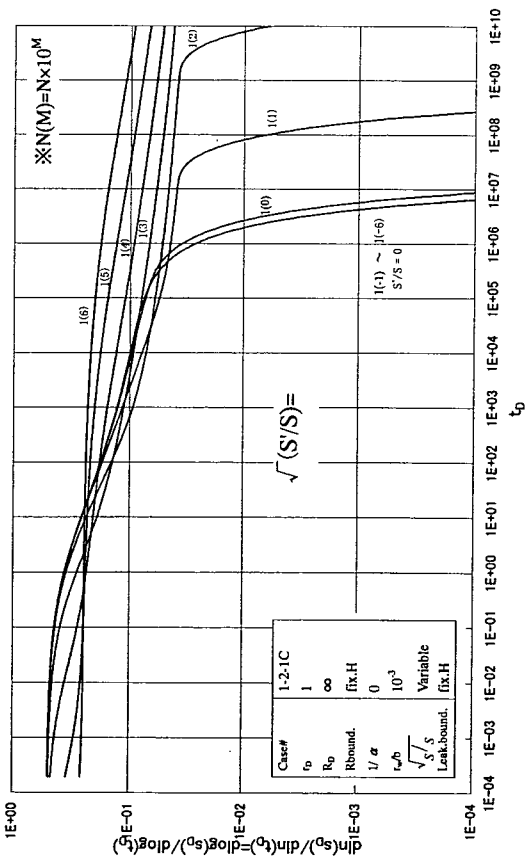
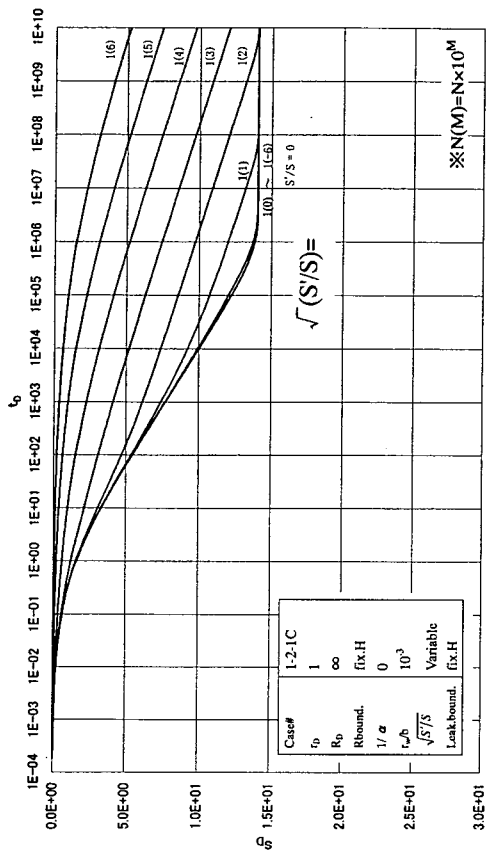
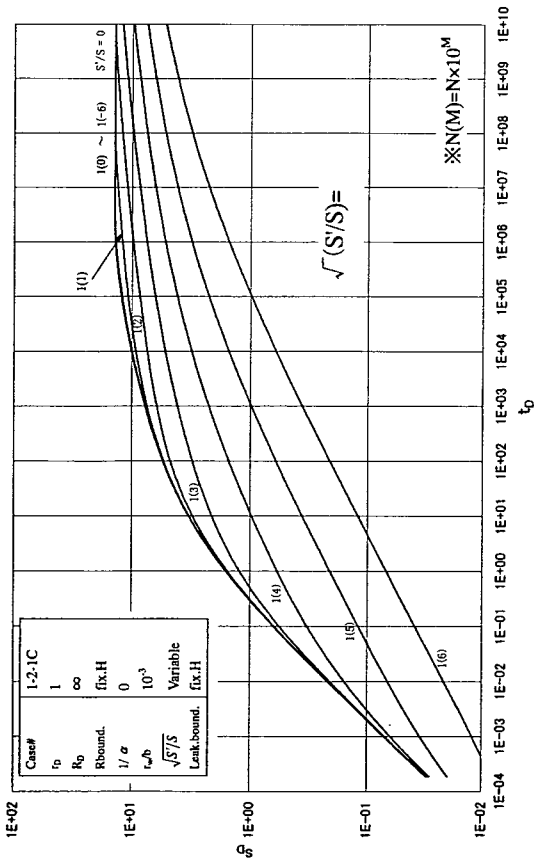


図 2.3.5 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, Cw = 0, \sqrt{S'/S}$ 変動

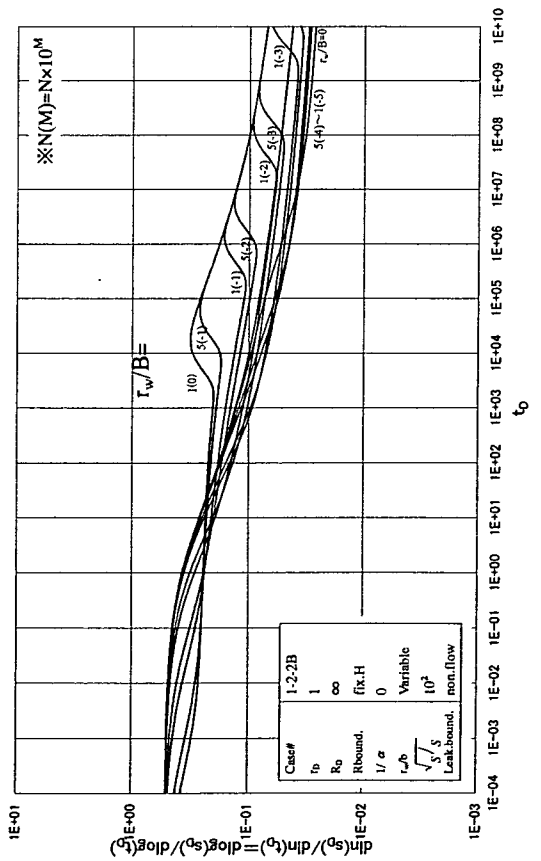
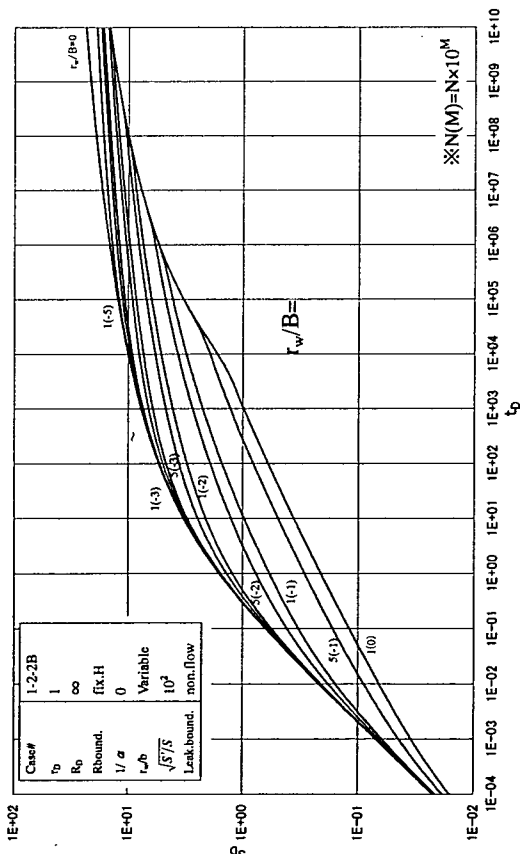
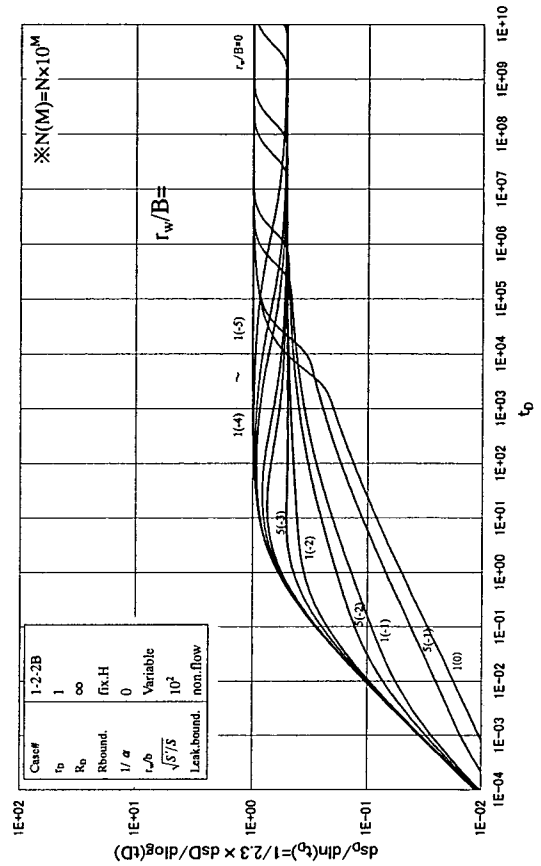
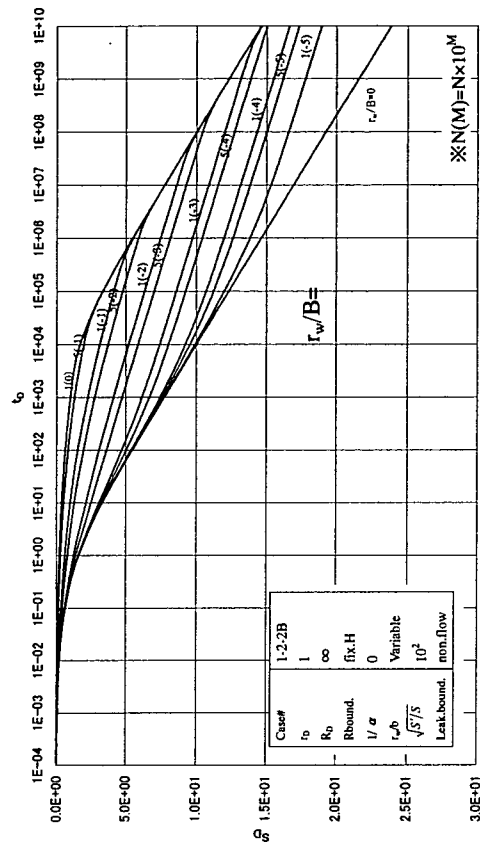


図 2.3.6 水位低下挙動(定流量) : 非定常漏水(漏水層上端不透水), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, C_w = 0, r_w/B$ 変動

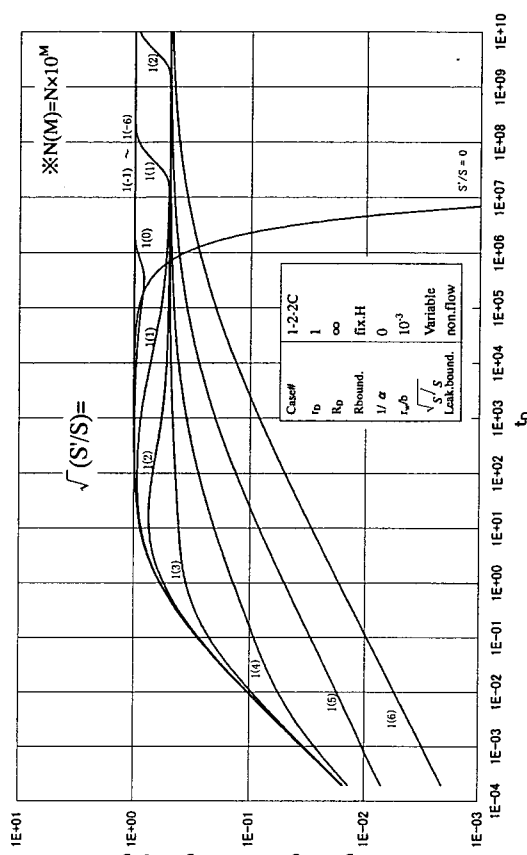
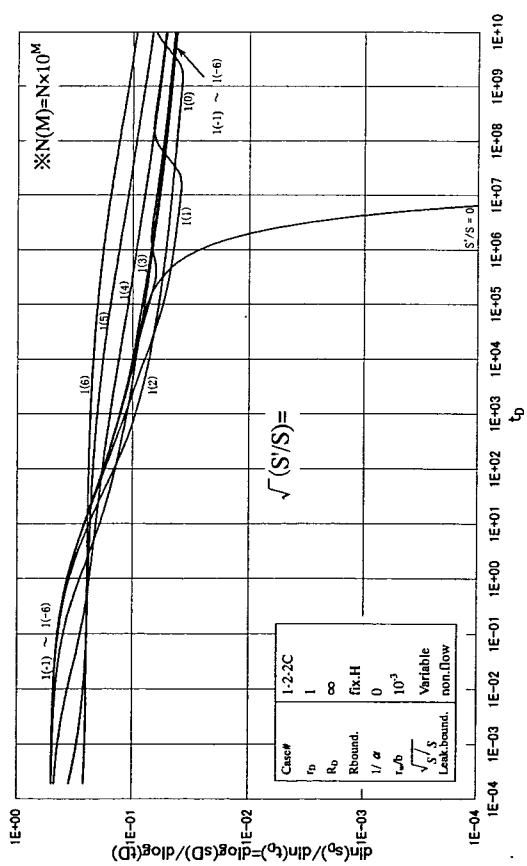
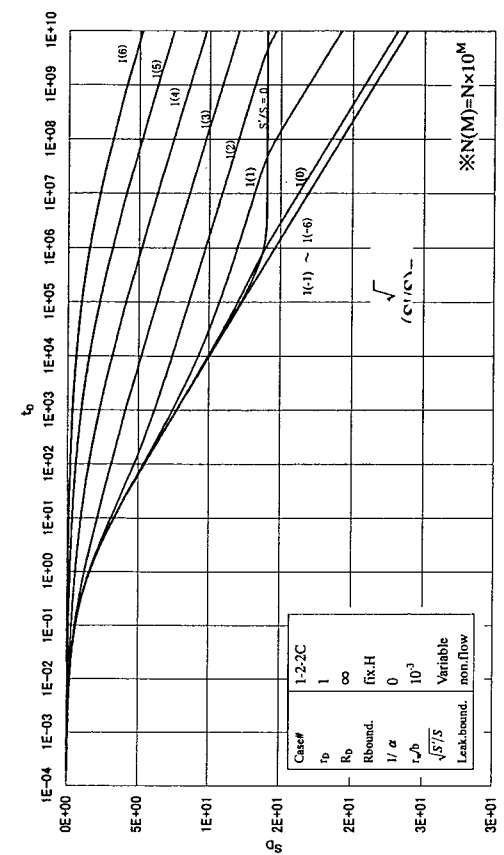
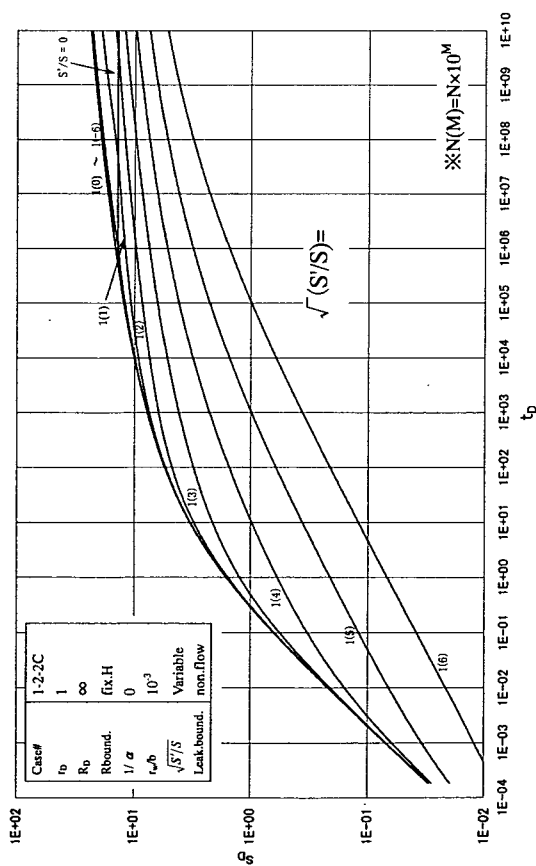


图 2.3.7 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, Cw=0, \sqrt{S'/S}$ 變動

2.3.2 定流量揚水Ⅰ：井戸貯留を考慮する場合

ここでは、表 2.2.2 で示した A～F の 6 モデルについてパラメーター毎にこれを整理した。貯留 α を変動させたモデルである。

図 2.3.8 は無限遠方境界の影響、図 2.3.9～10 は側方定水位境界の影響、図 2.3.11 から 12 は側方不透水境界の影響みたもので、それぞれに無限遠方境界(境界種の違いは無視される)のケースも示した。 α 値が小さくなると(井戸貯留大きい、地盤貯留が少ない)、井戸貯留の影響がいつまでも継続する。特に、有限側方境界の影響を受ける場合、IARF 挙動をみせることなく井戸貯留から境界の影響に至ってしまうケースが見られる。

図 2.3.13～14 は定常漏水モデルを扱ったものである。ここでも井戸貯留の影響から IARF 挙動を経ずに漏水の影響にいたるケースがある。

図 2.3.15～17 は非定常漏水モデルで漏水層上端境界が定水位境界を示すものである。片対数軸上プロットの直線部分が S/S の設定で種々みられ、当然これらに IARF モデルを適用することはできない。しかし、 α が小さいモデルでは IARF 挙動でなくとも、片対数軸上プロットで直線を示す部分が顕著に見られるケースがある。

図 2.3.18～20 は非定常漏水モデルで漏水層上端境界が不透水境界を示すものである。漏水層の境界条件の異なる図 2.3.15～17 のモデルと比較するには、十分に長時間の試験継続が必要であろう。

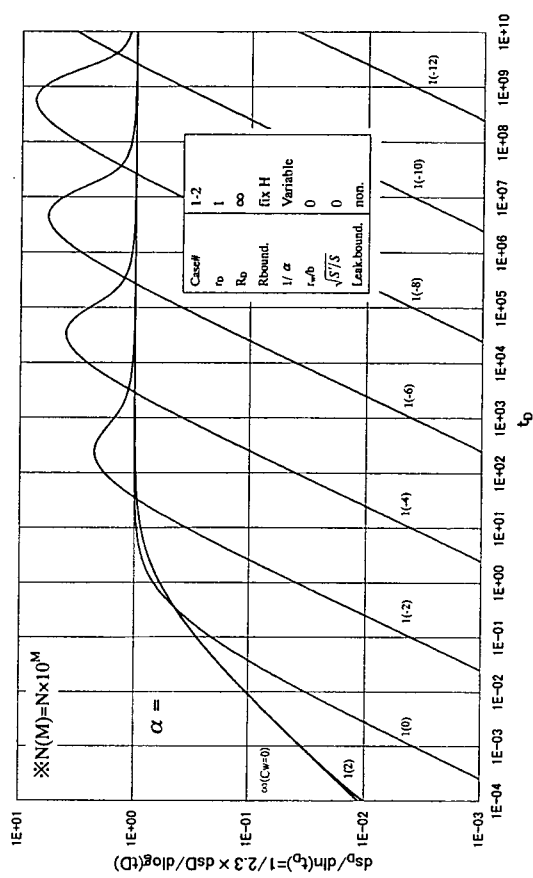
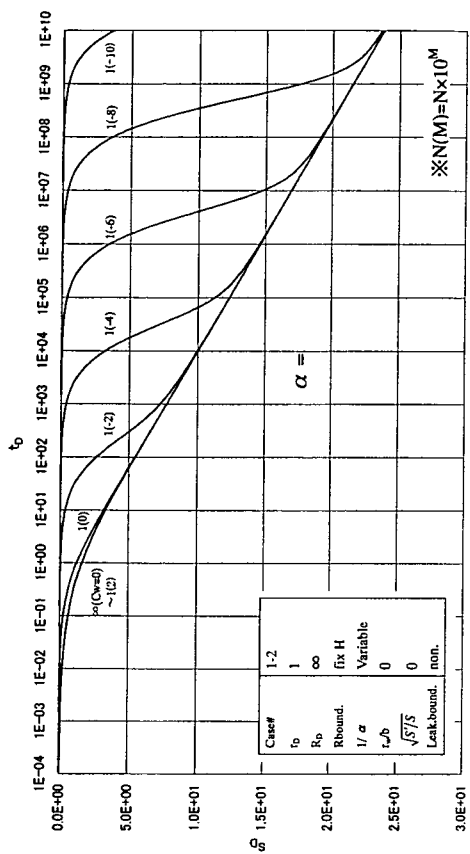
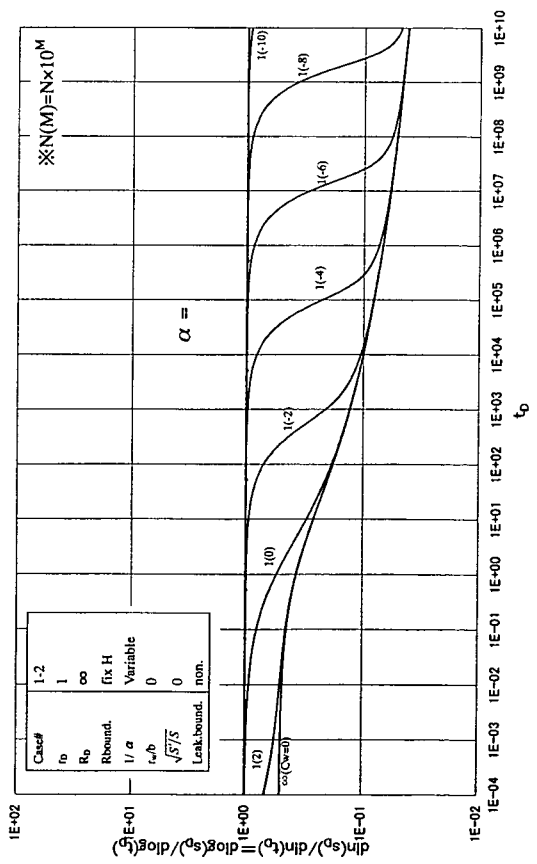
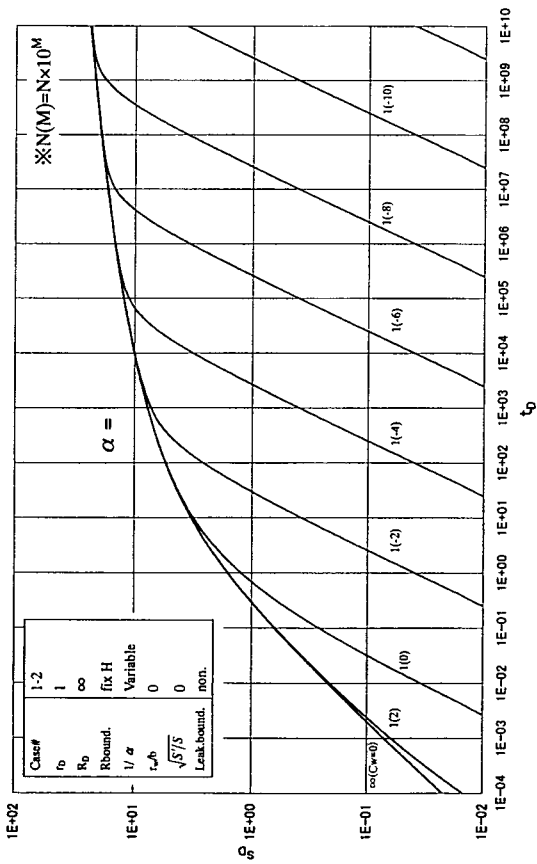


図 2.3.8 水位低下挙動(定流量) : 無限遠方境界, $r_w=0$, (α 変動)

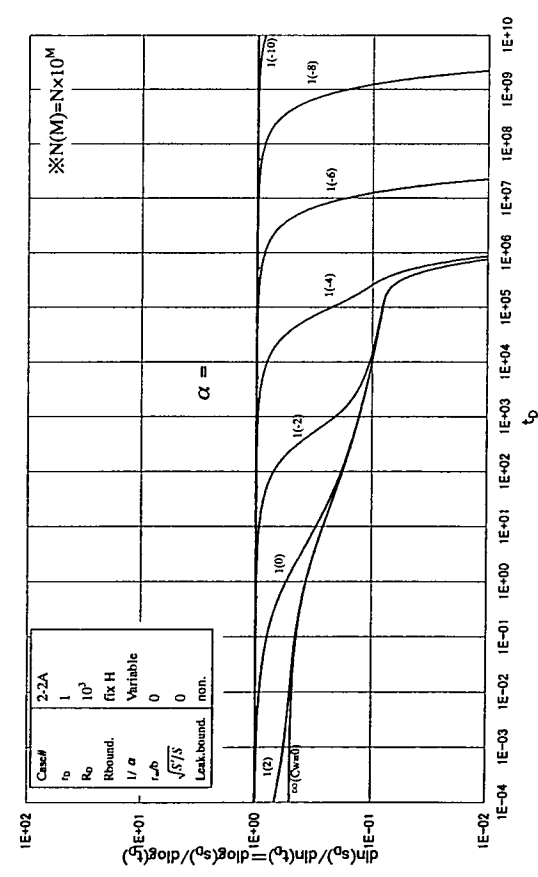
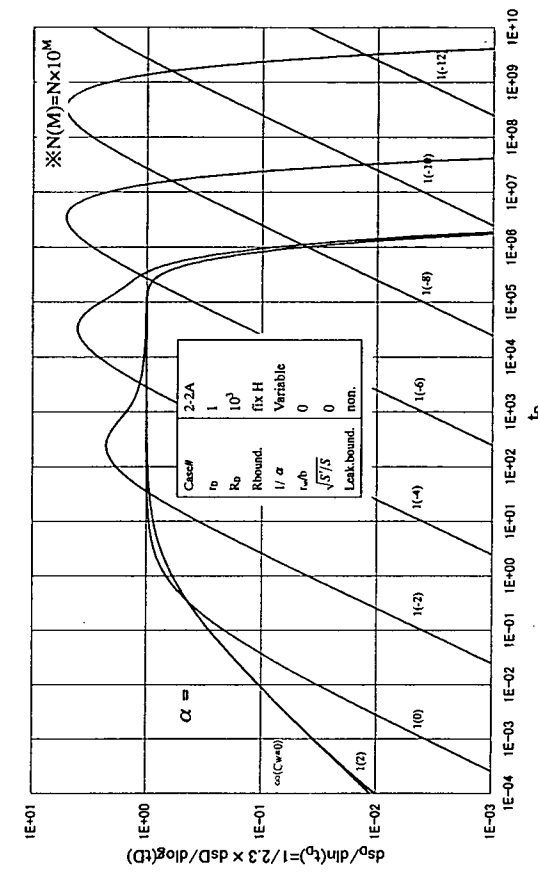
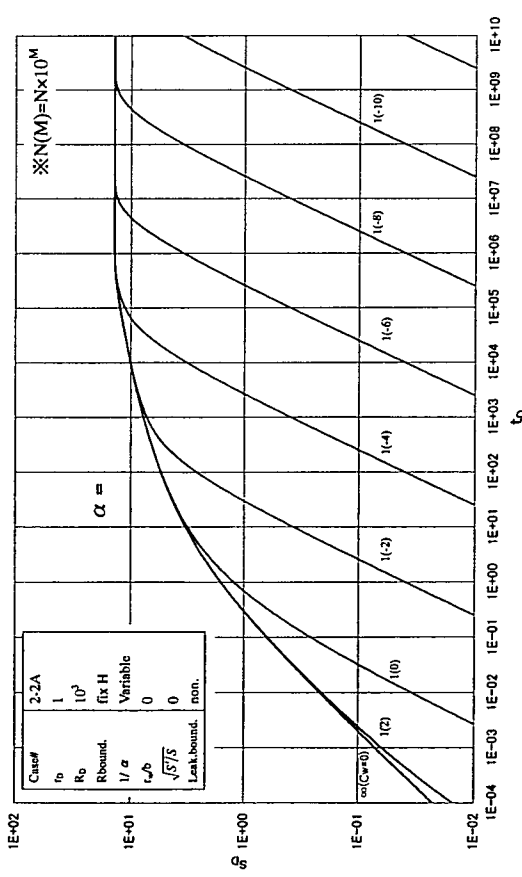
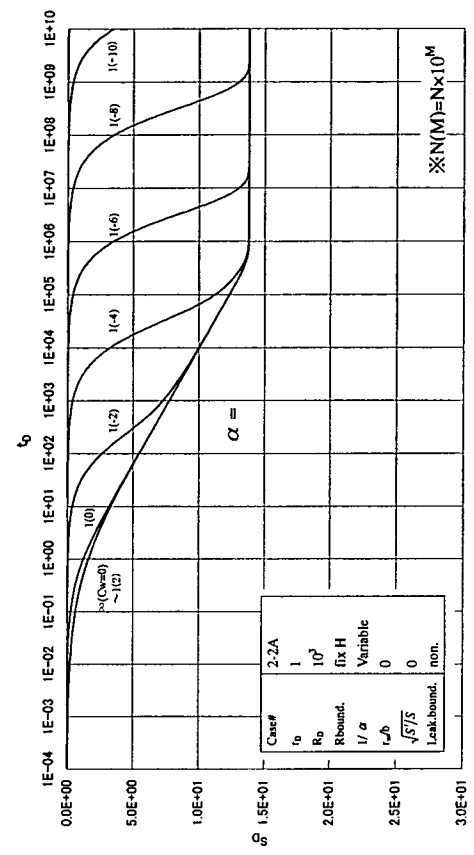


图 2.3.9 水位低下挙動(定流量)：側方定水位境界(∞ , 有限), $r_w \neq 0$, (α 変動)

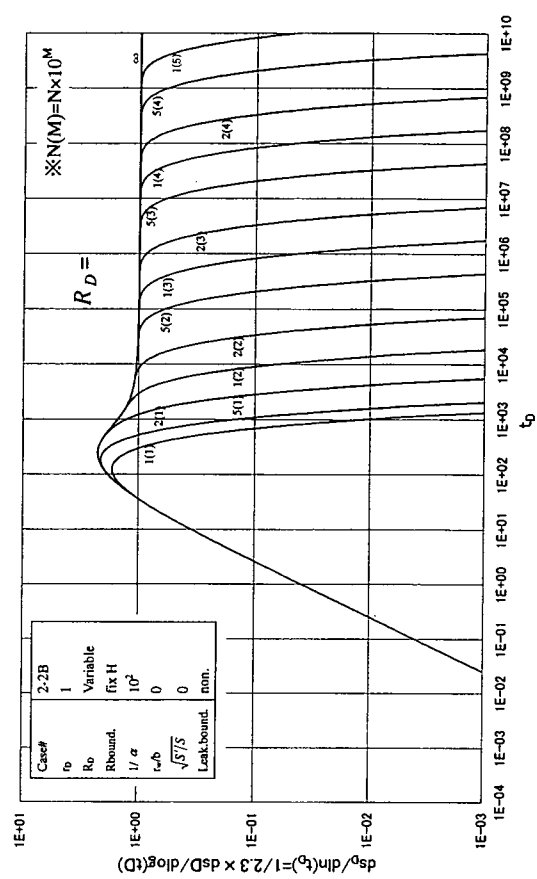
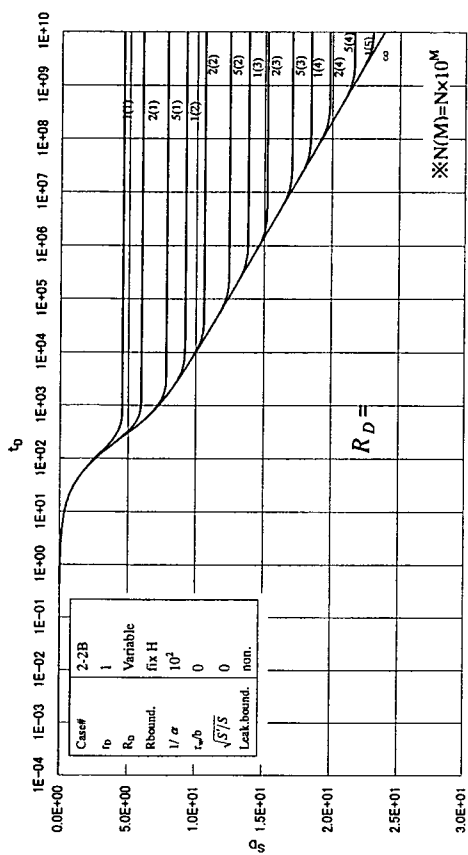
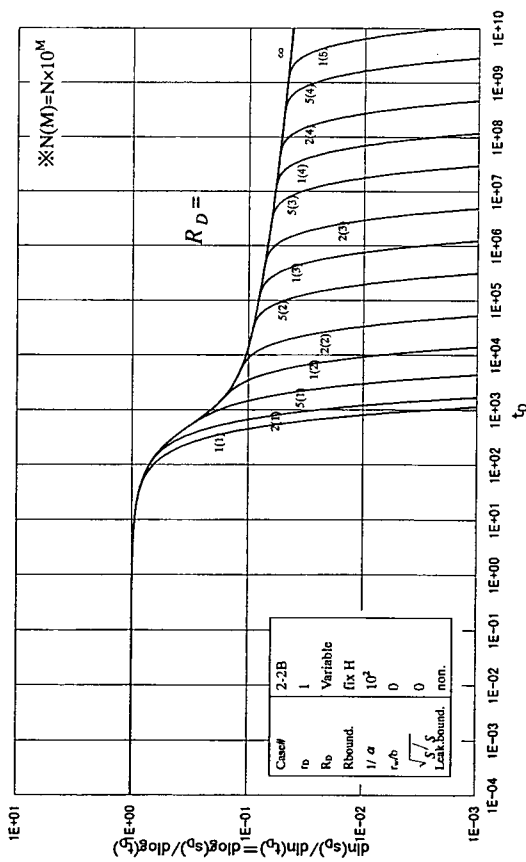
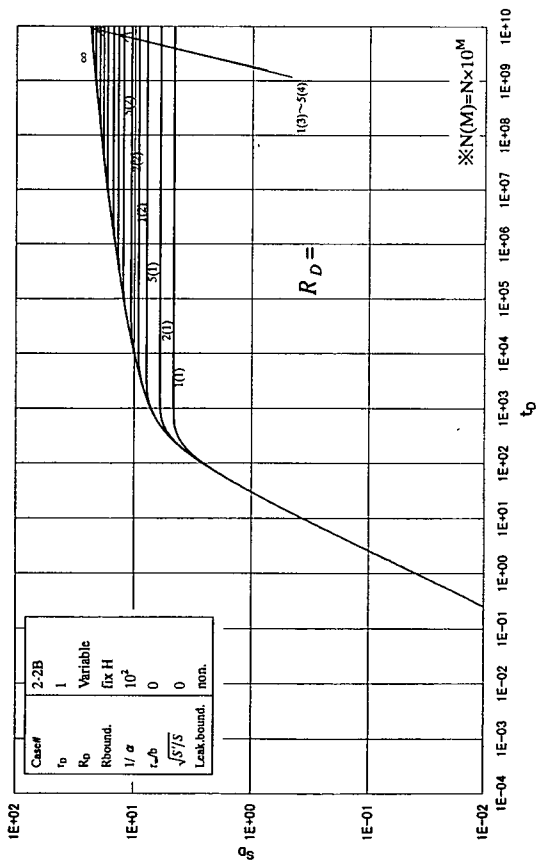


图 2.3.10 水位低下挙動(定流量) : 側方定水位境界(∞,有限), $r_w \neq 0$, R_0 変動

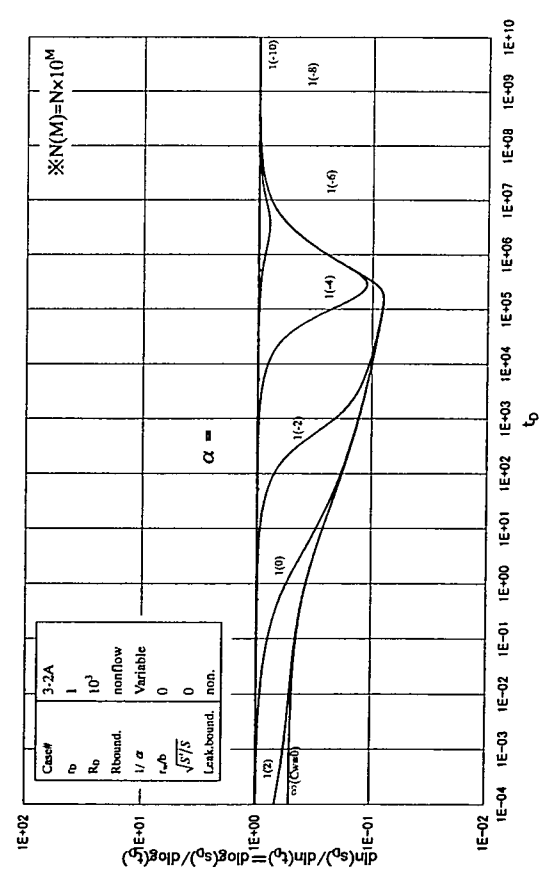
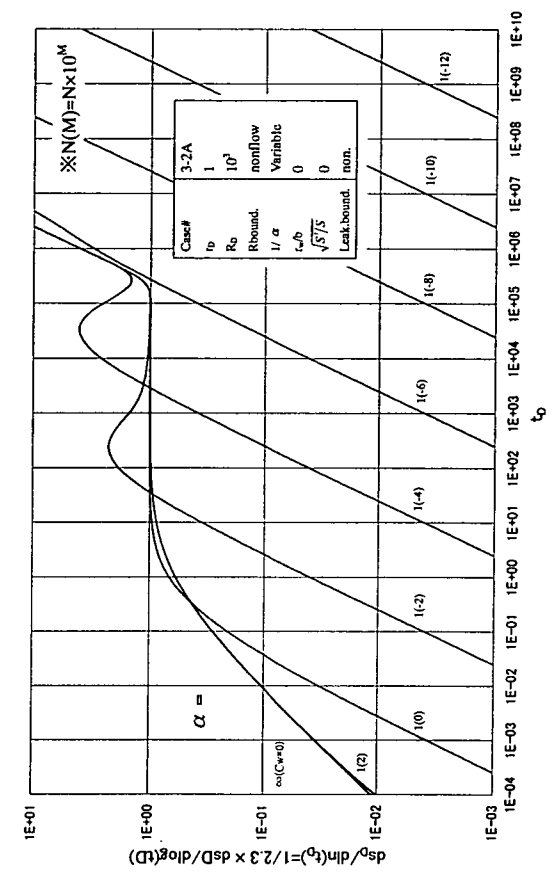
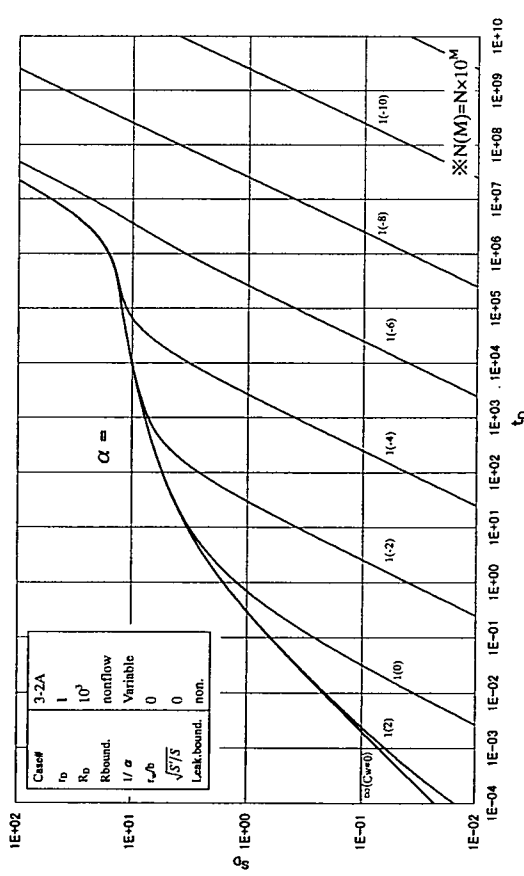
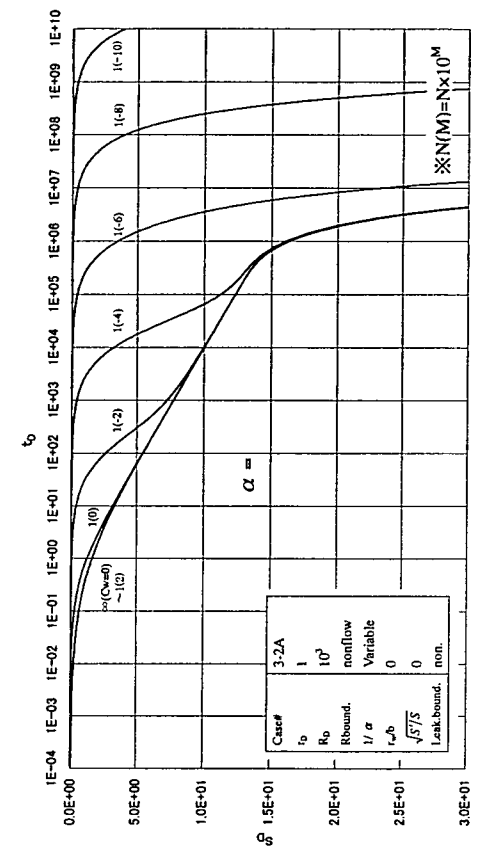


图 2.3.11 水位低下挙動(定流量)：側方不透水境界(∞,有限), $r_w \neq 0$, (α 変動)

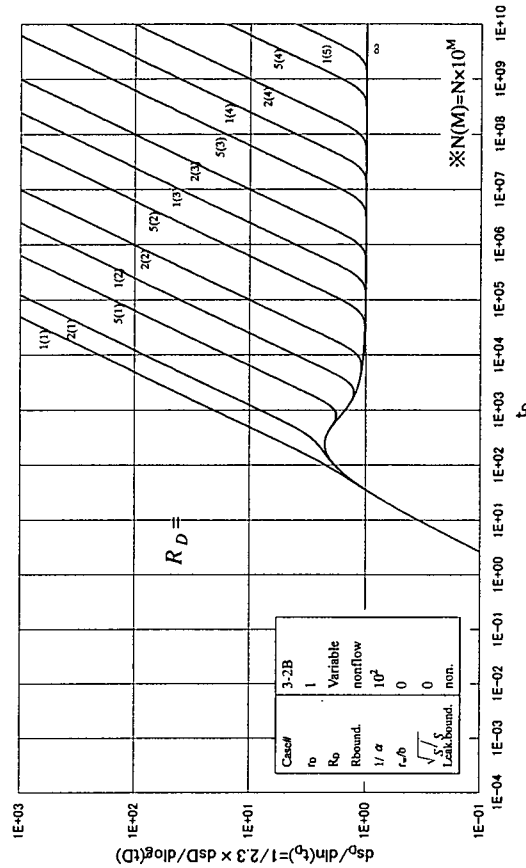
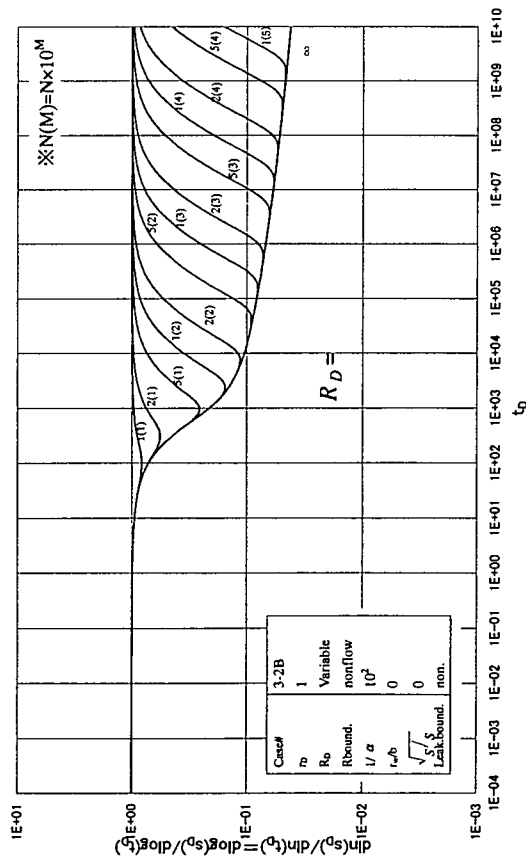
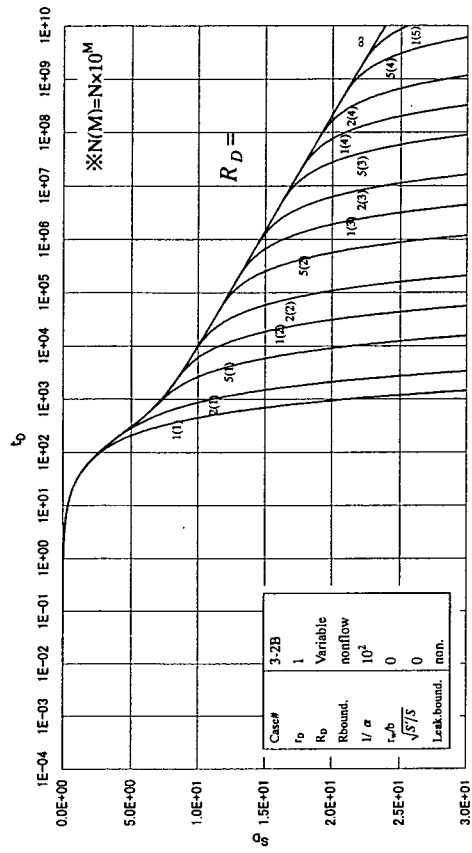
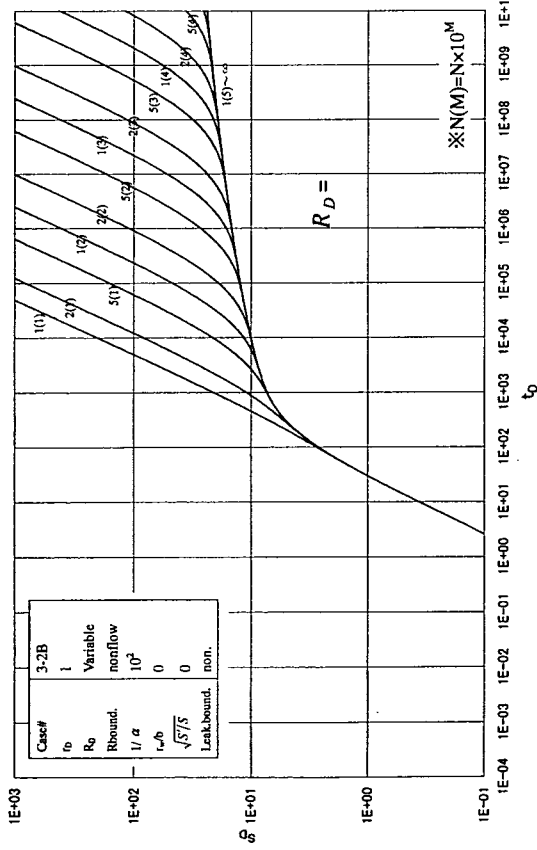


图 2.3.12 水位低下挙動(定流量)：側方不透水境界(∞,有限), $r_w \neq 0, R_D$ 變動

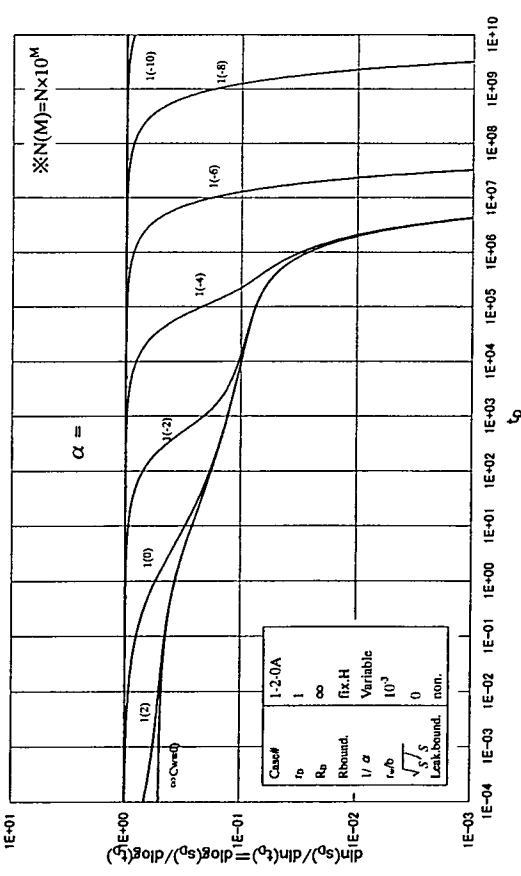
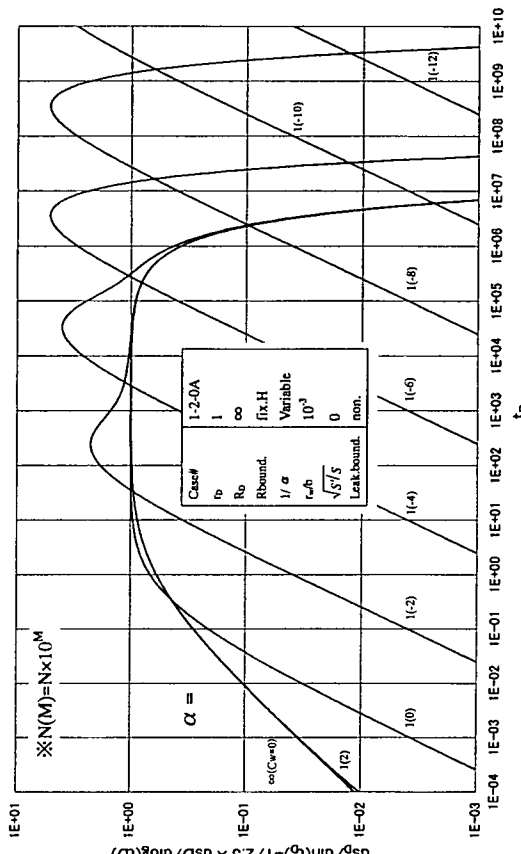
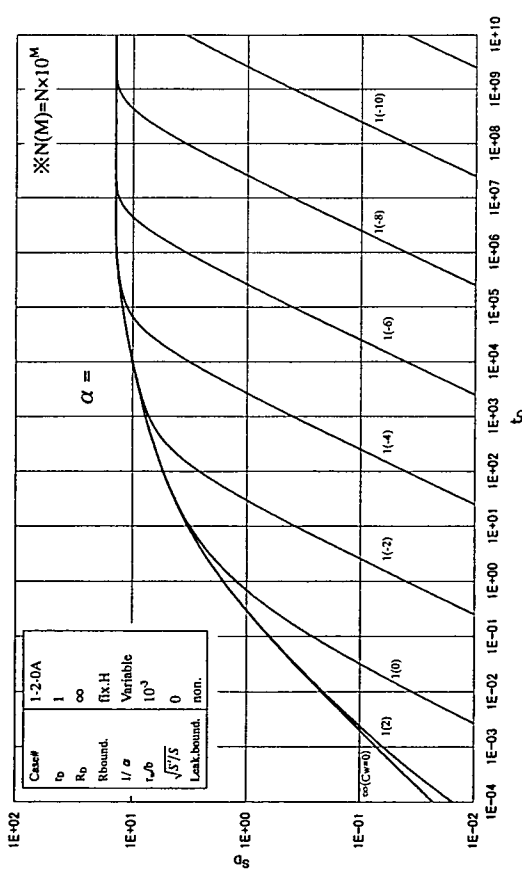
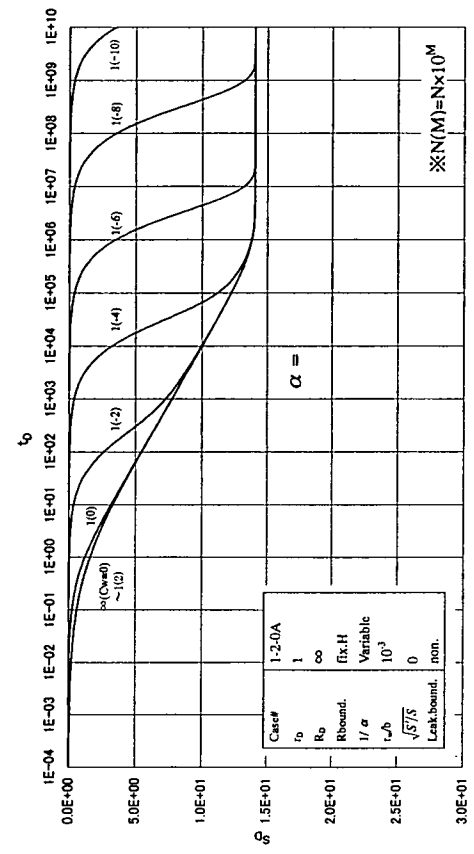


图 2.3.13 水位低下挙動(定流量)：定常漏水, $R_0 \rightarrow \infty$, $r_w = 0$, (α 変動)

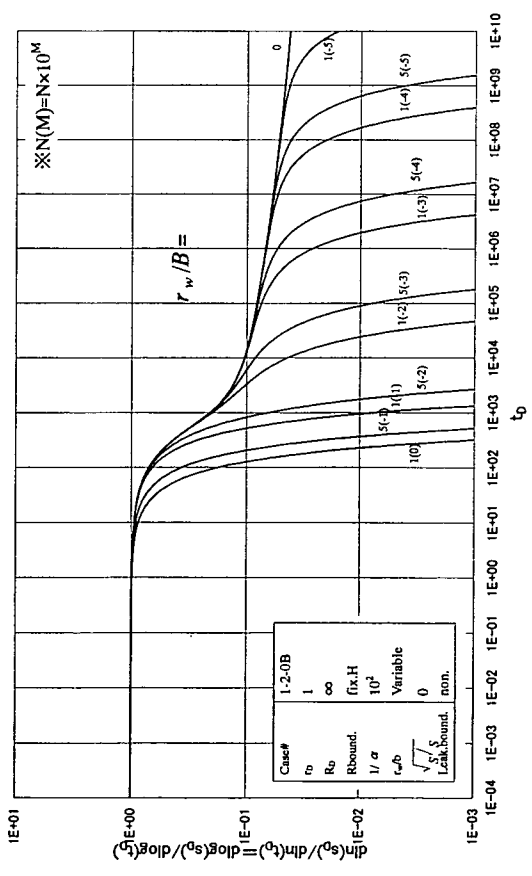
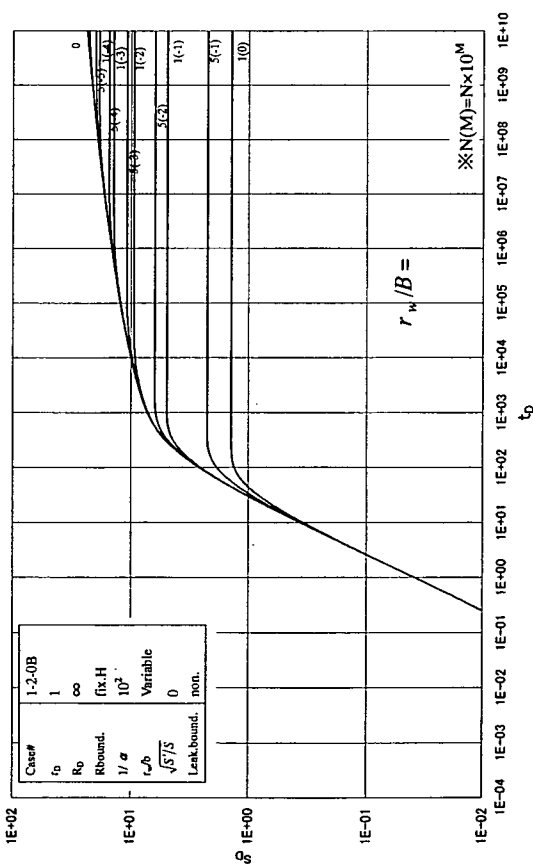
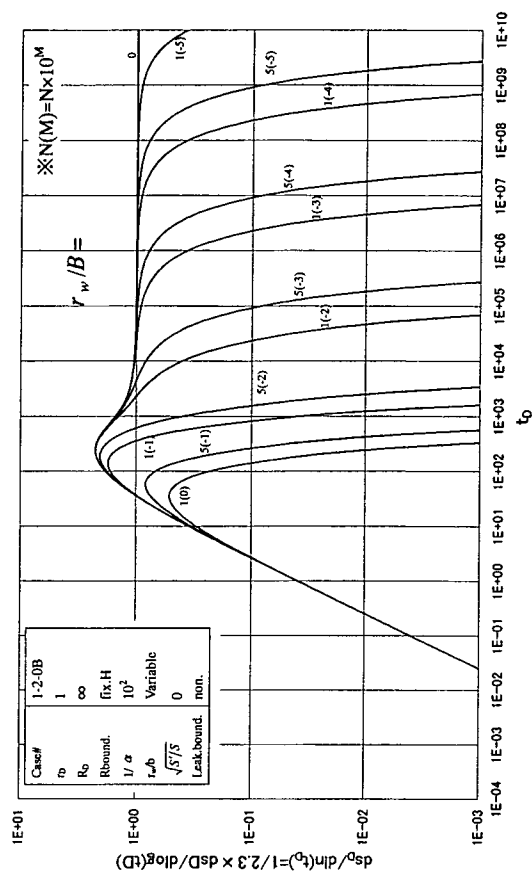
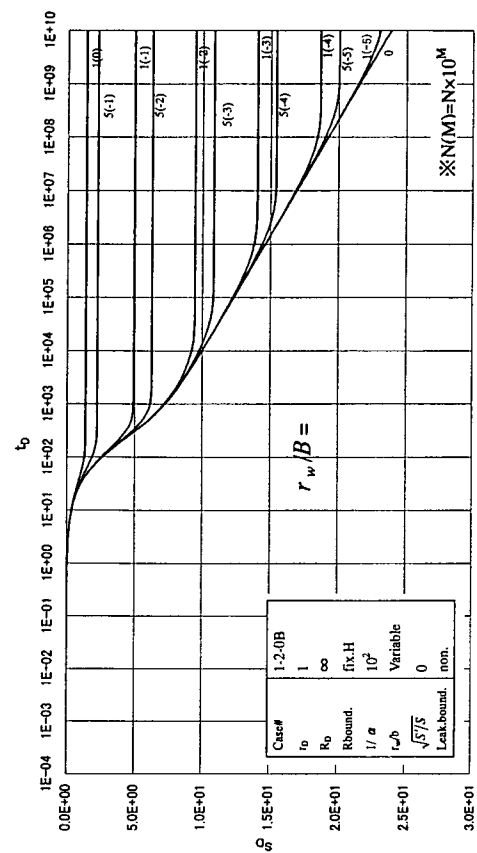


图 2.3.14 水位低下挙動(定流量) : 定常漏水, $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, r_w/B$ 変動

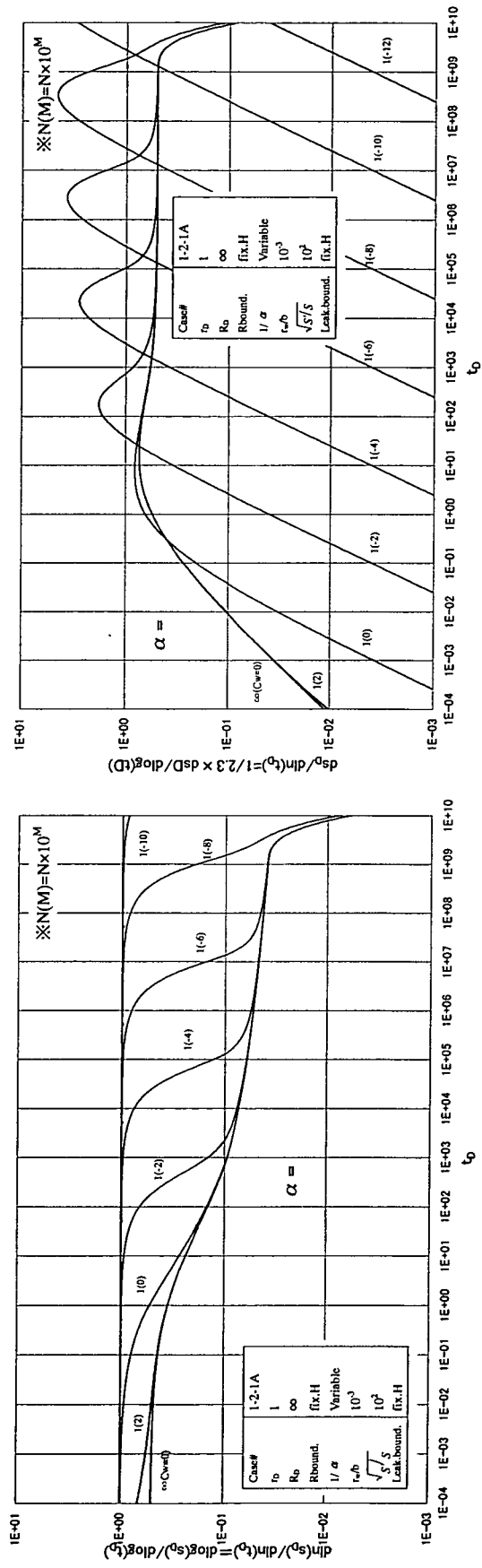
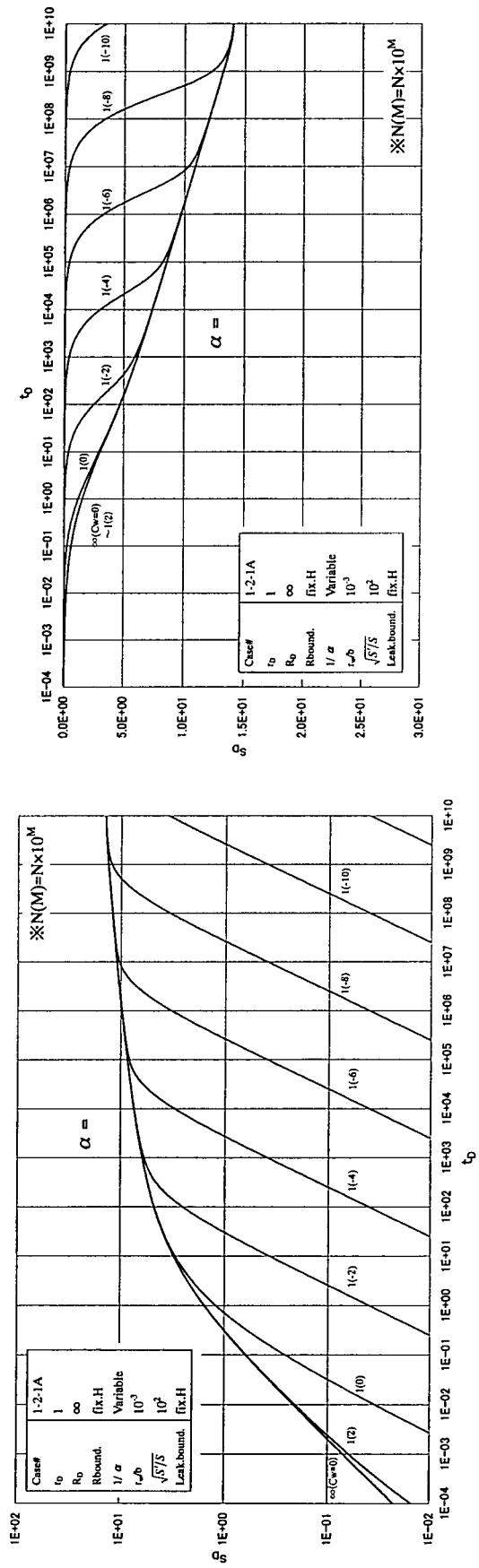


图 2.3.15 水位低下挙動(定流量)：非常漏(漏水層上端定水位), $R_0 \rightarrow \infty, r_w = 0, (\alpha \text{ 變動})$

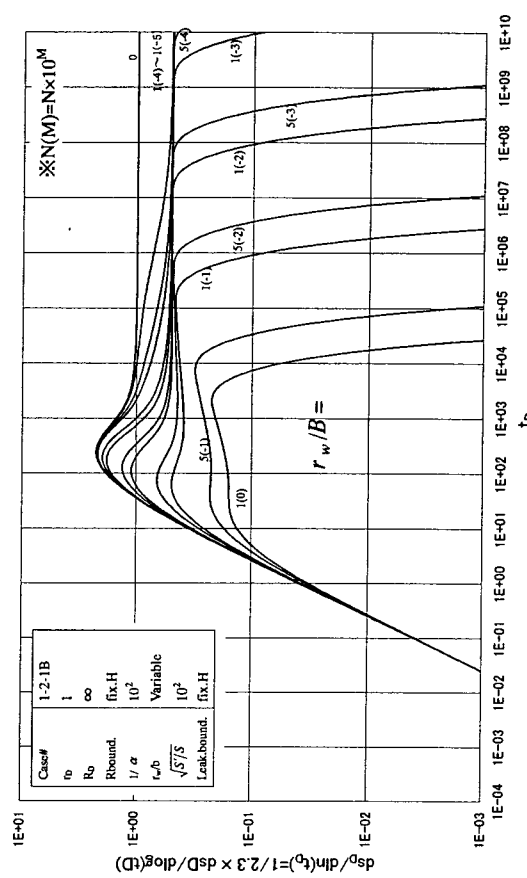
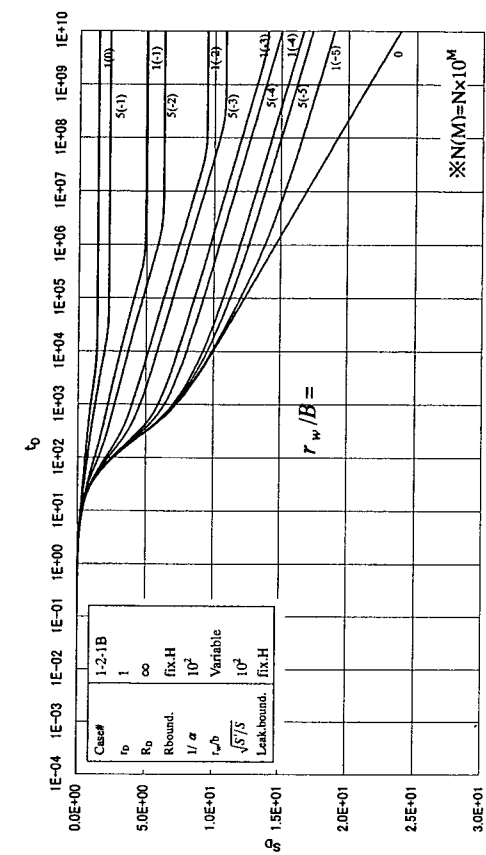
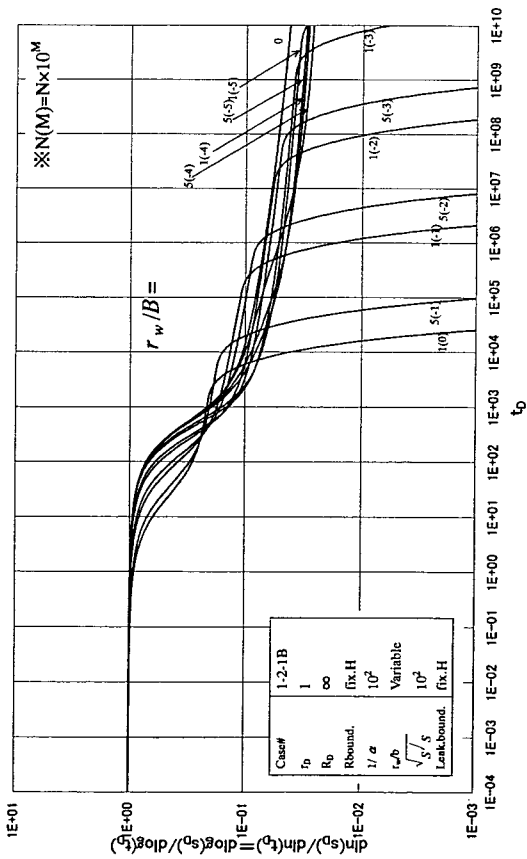
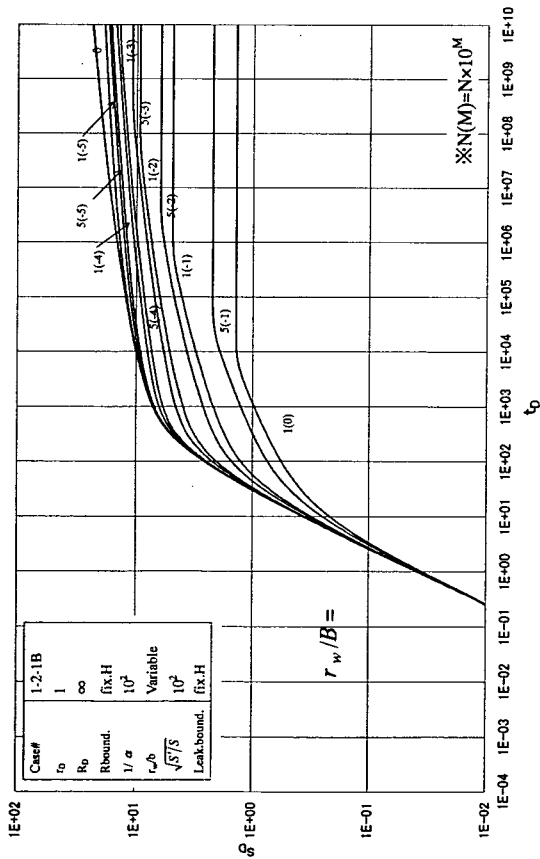


図 2.3.16 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, r_w/B$ 変動

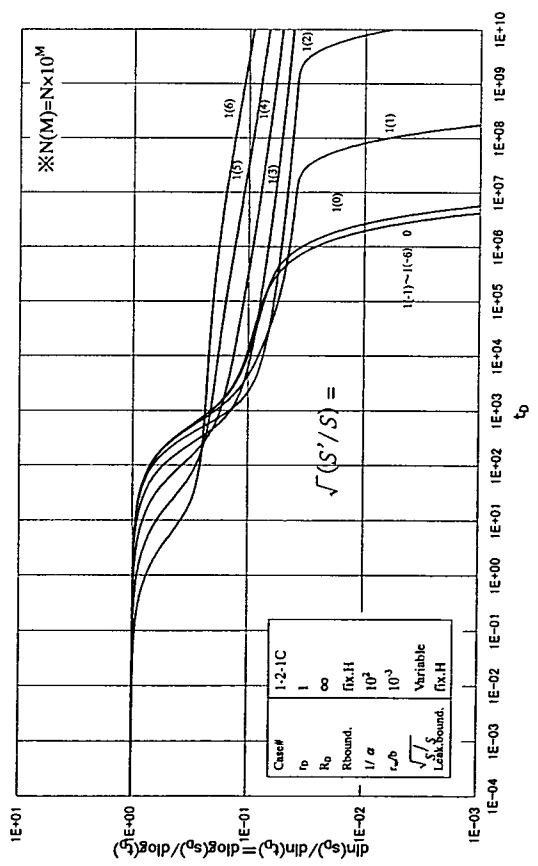
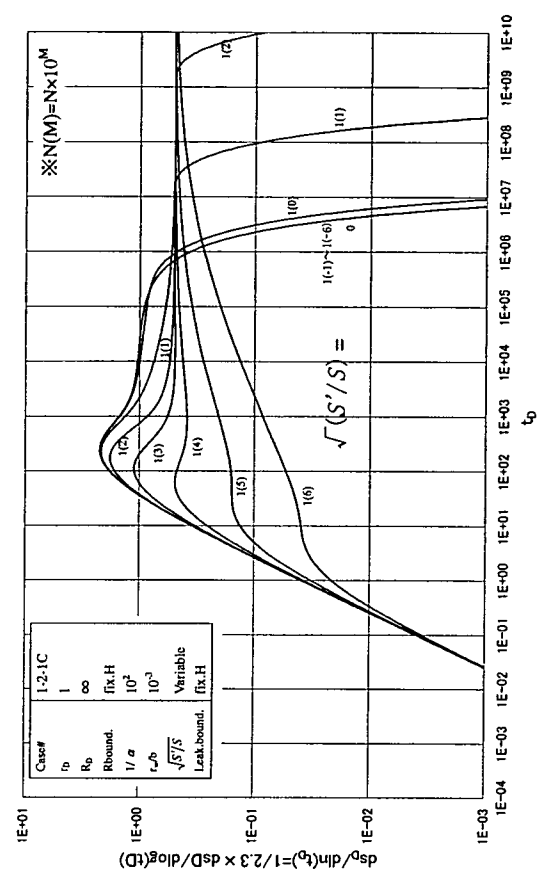
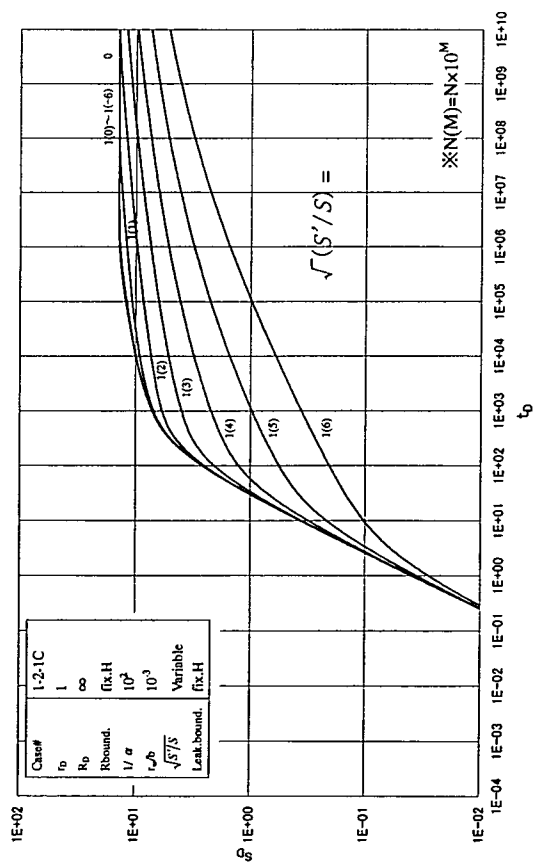
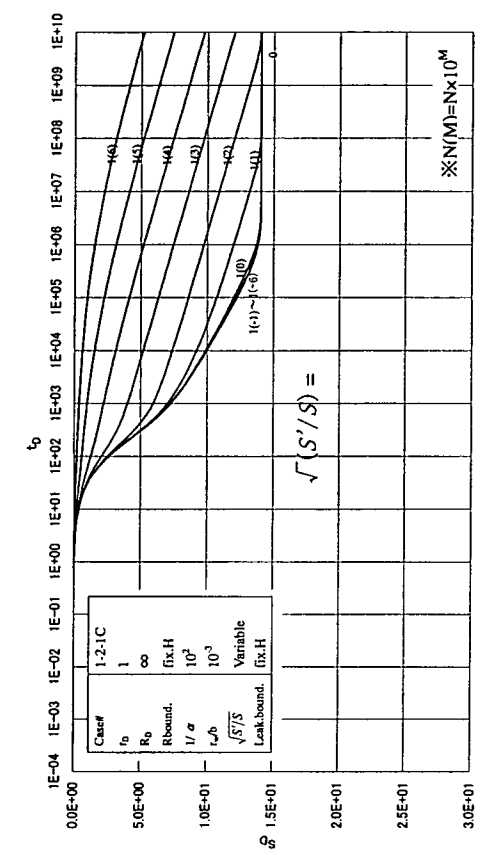


图 2.3.17 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端定水位), $R_0 \rightarrow \infty, r_w = 0, \sqrt{S'/S}$ 變動)

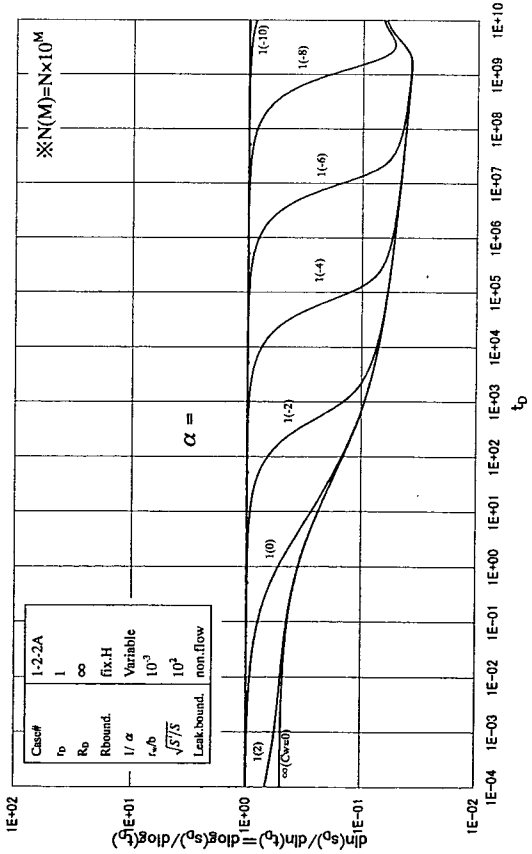
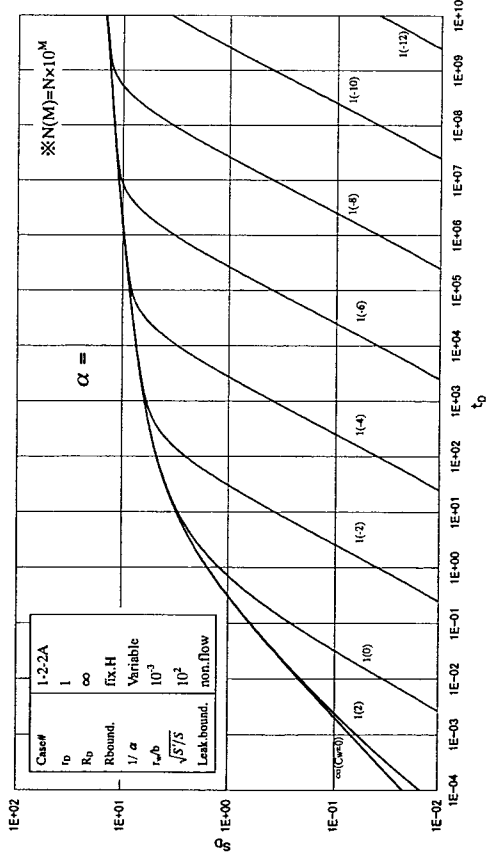
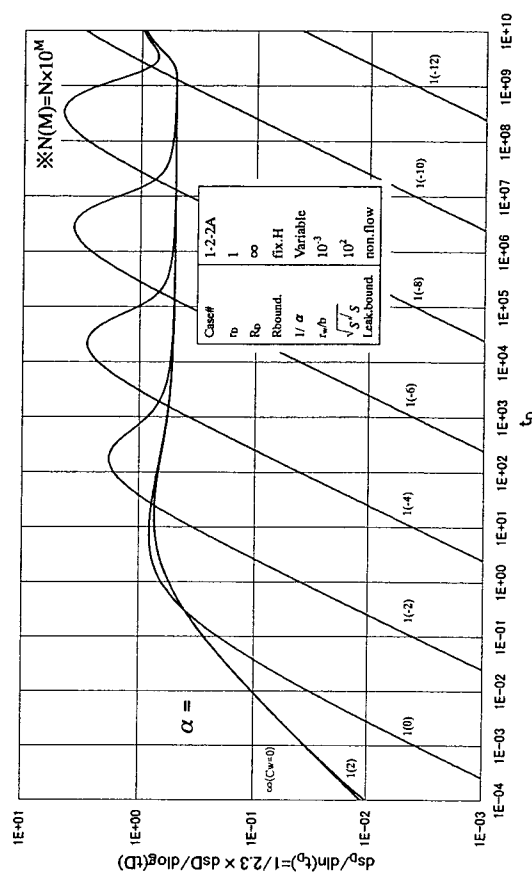
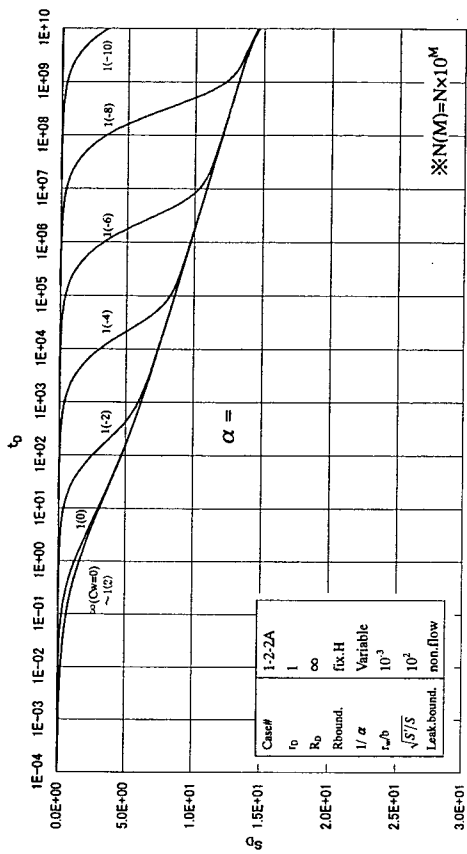


图 2.3.18 水位低下举動(定流量)：非常漏(漏水層上端不透水), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, (\alpha \text{ 變動})$

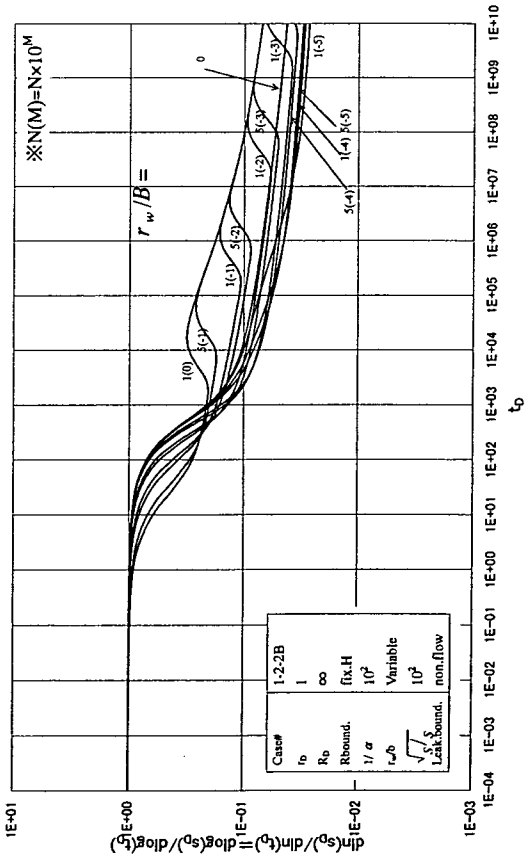
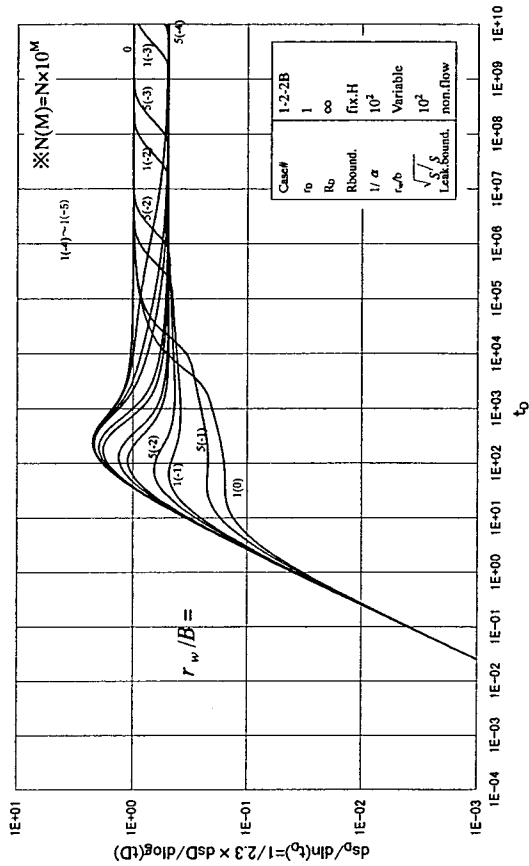
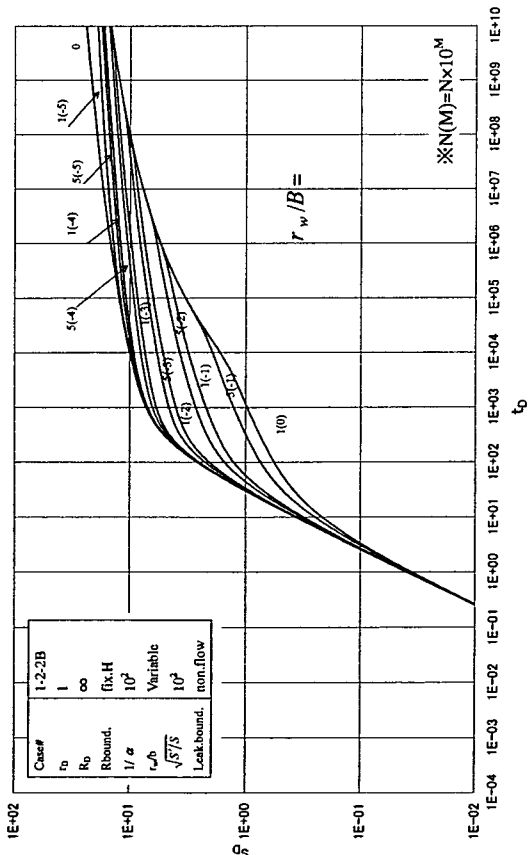
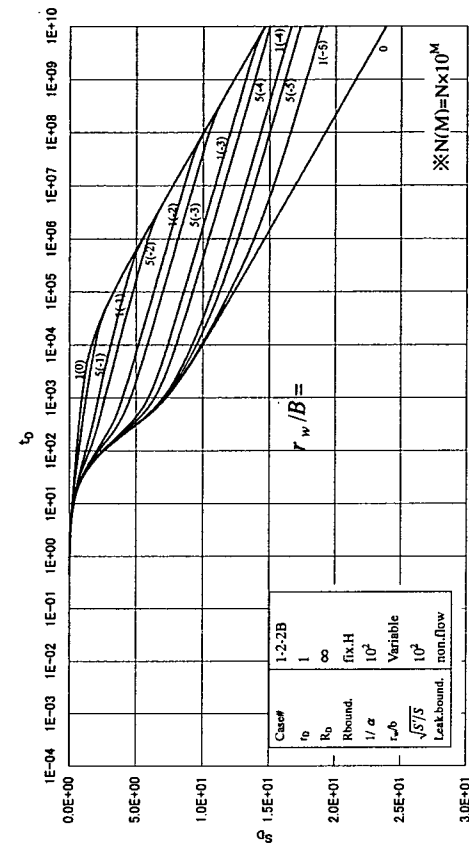


图 2.3.19 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, r_w/B$ 変動

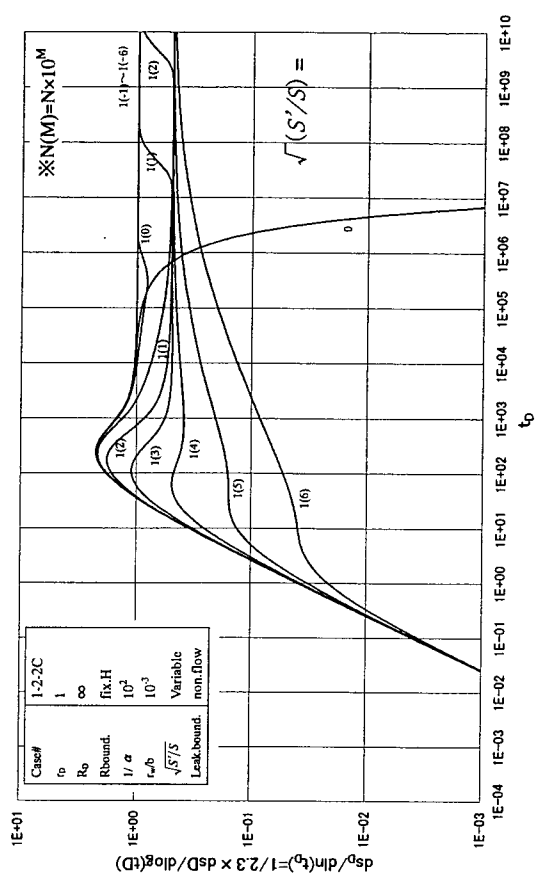
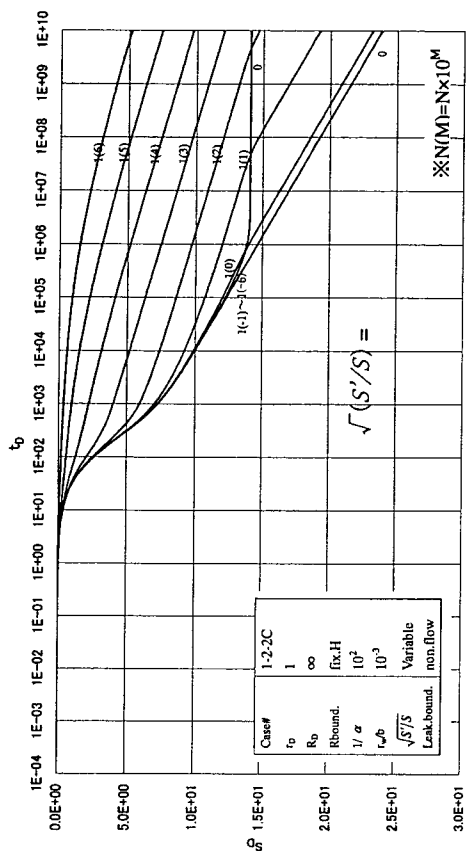
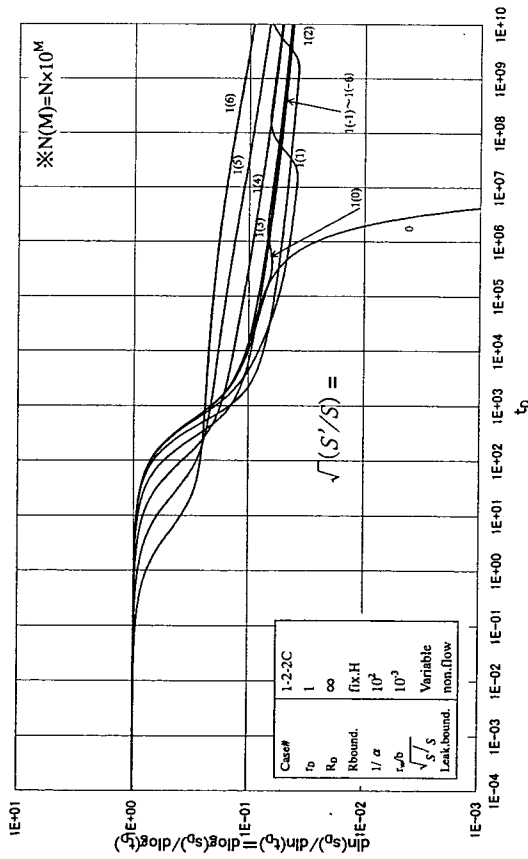
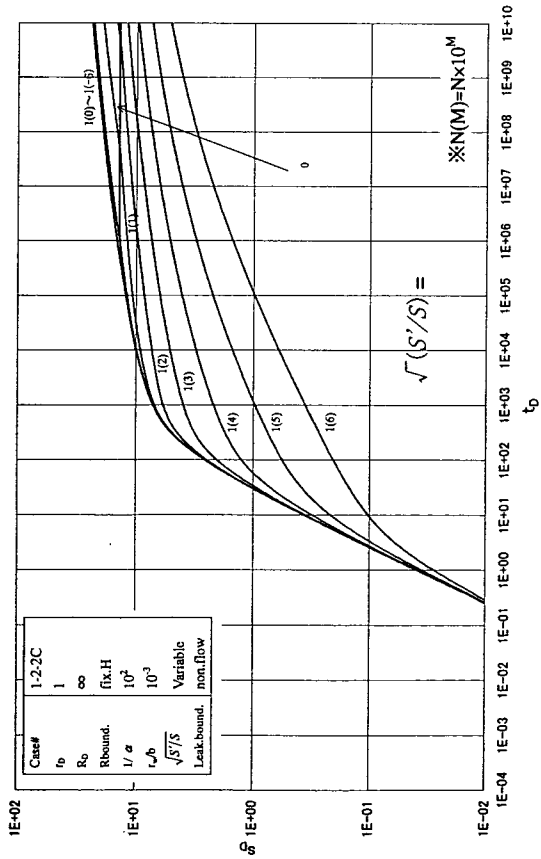


图 2.3.20 水位低下挙動(定流量)：非定常漏水(漏水層上端不透水), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \sqrt{(S'/S)}$ 變動

2.3.3 定圧揚水

ここでは、揚水流量 Q とその逆数($1/Q$)について整理するが、従来の解析方法に対応して、両対数軸上では Q 、片対数軸上では($1/Q$)⁹ を整理し、それぞれの勾配(微分)をまとめる。

図 2.3.21 は側方定水位境界の影響、図 2.3.22 は側方不透水境界の影響みたもので、それぞれに無限遠方境界(境界種の違いは無視される)のケースも示した。無限遠方を標準にみると、これら境界の影響は明確な逸脱をみせている。

図 2.3.23 は定常漏水モデルを扱ったものである。この傾向は、図 2.3.21 と似ているが、漏水の無い無限遠方境界モデルからの逸脱は、こちらに尾方が徐々に生じている。

図 2.3.24~25 は非定常漏水モデルで漏水層上端境界が定水位境界を示すものである。片対数軸上プロットの直線部分が S'/S の設定で種々みられ、当然これらに IARF モデルを適用することはできない。

図 2.3.26~27 は非定常漏水モデルで漏水層上端境界が不透水境界を示すものである。片対数軸プロットで S 字曲線を示している。

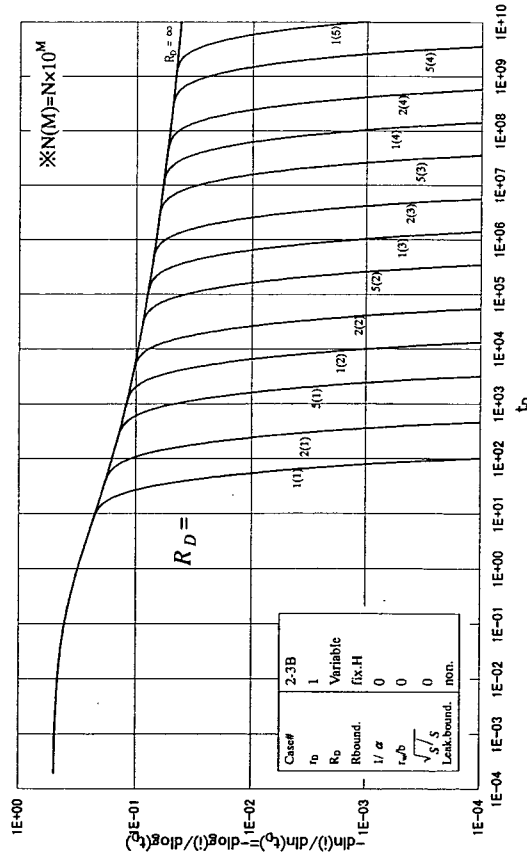
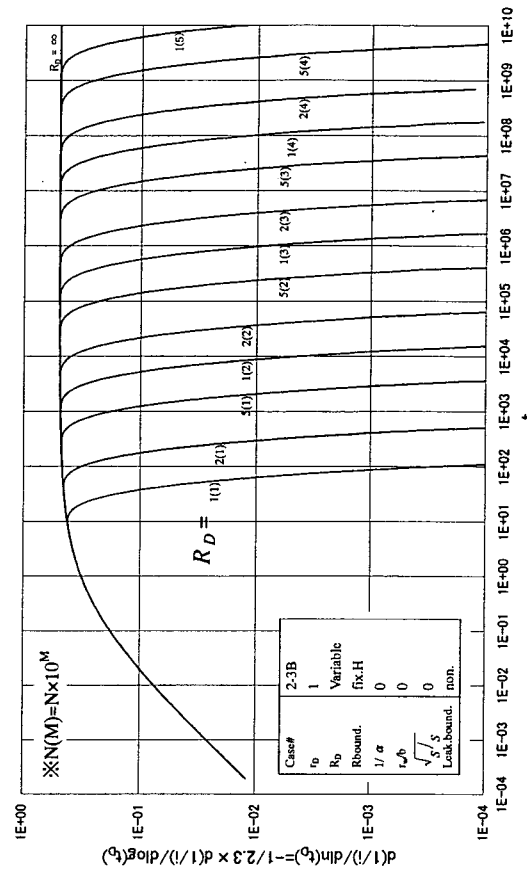
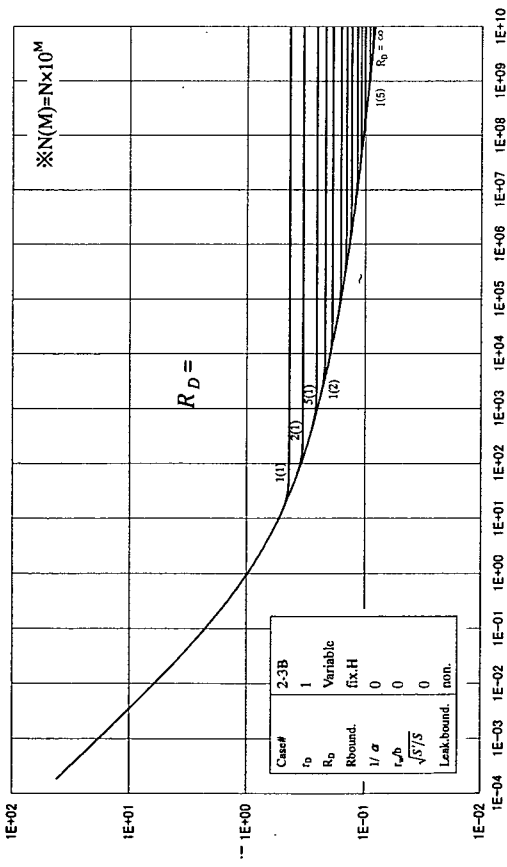
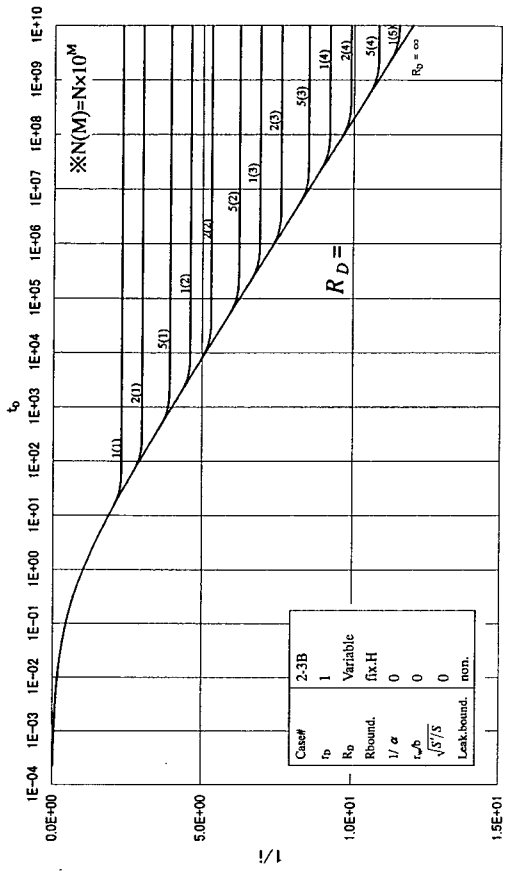


図 2.3.21 揚水流量変動(定圧) : 側方定水位境界(∞ ,有限), $r_w \neq 0$, R_n 変動

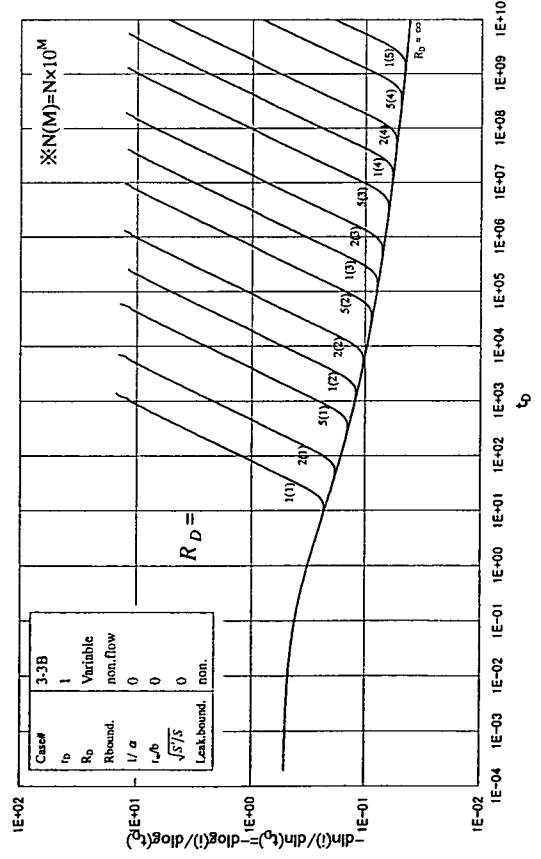
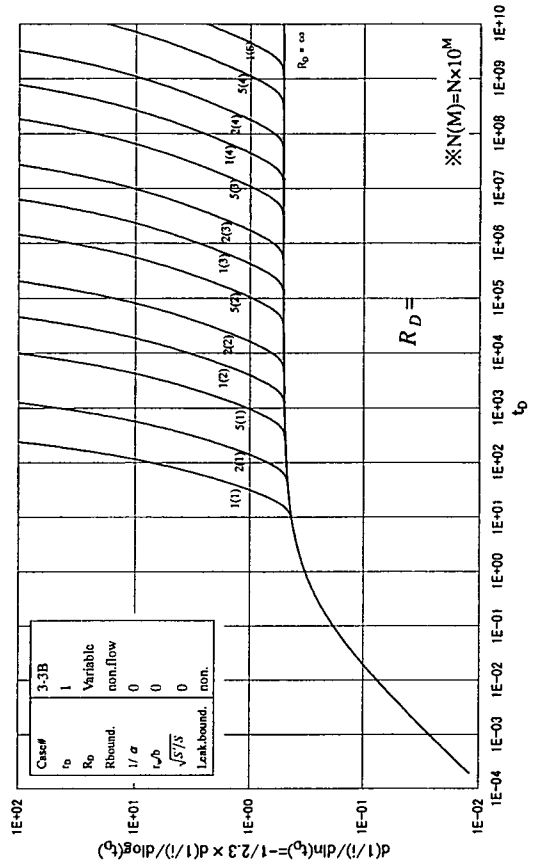
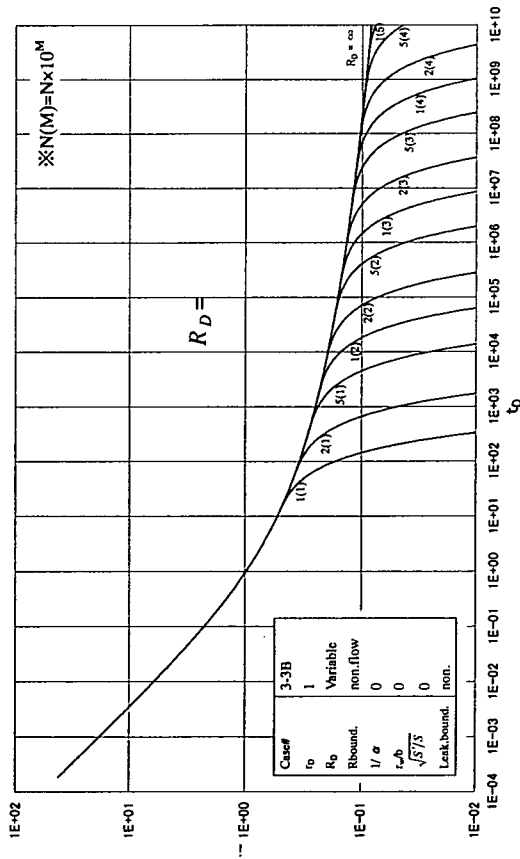
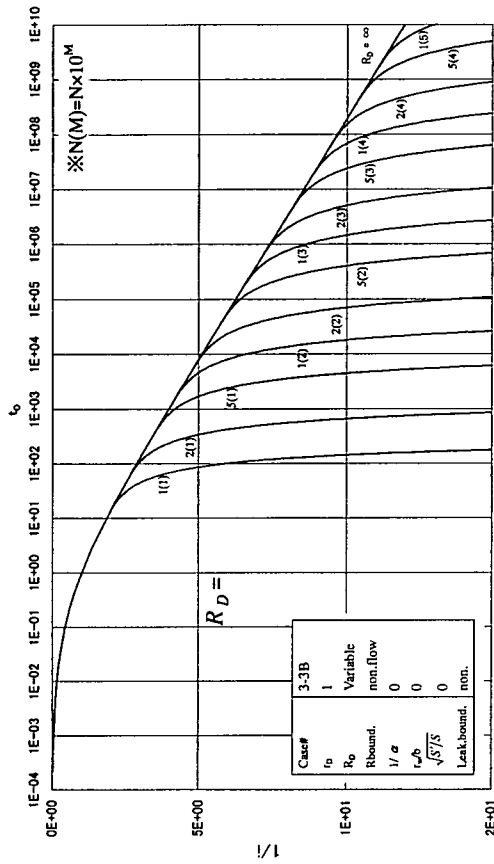


图 2.3.22 揚水流量變動(定压)：側方不透水境界(∞,有限), $r_w \neq 0$, R_0 變動

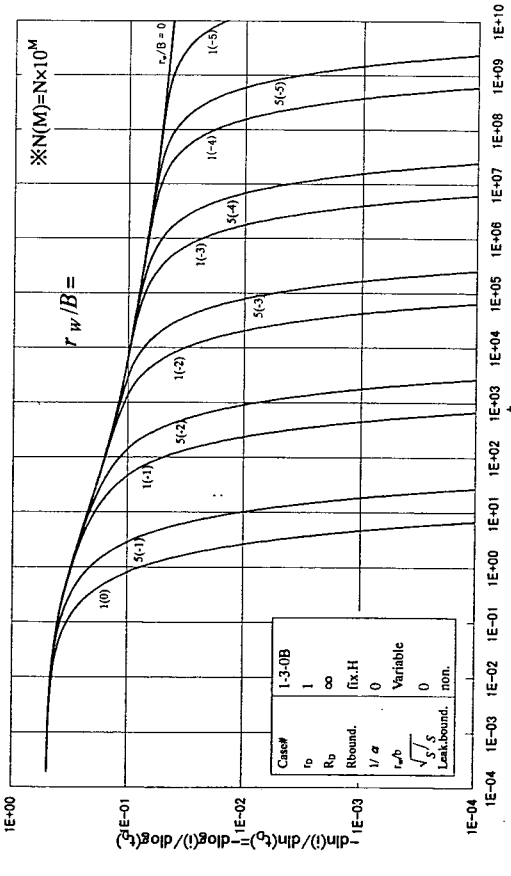
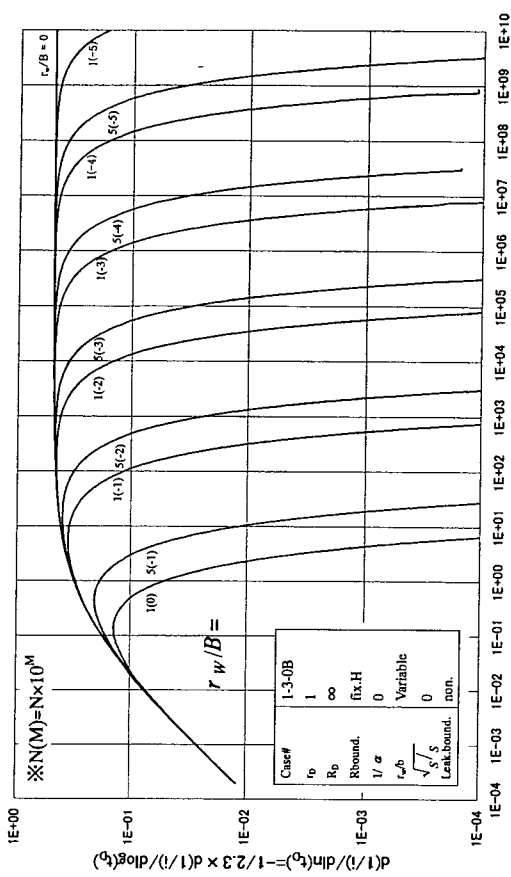
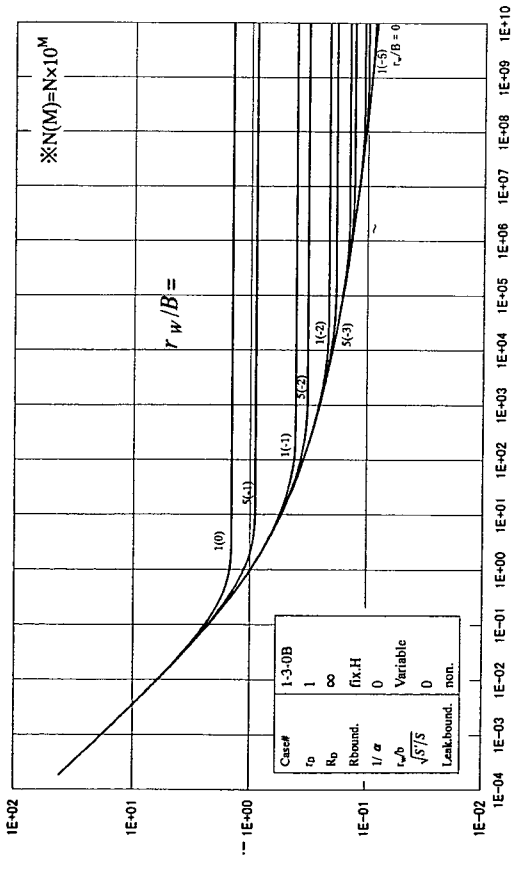
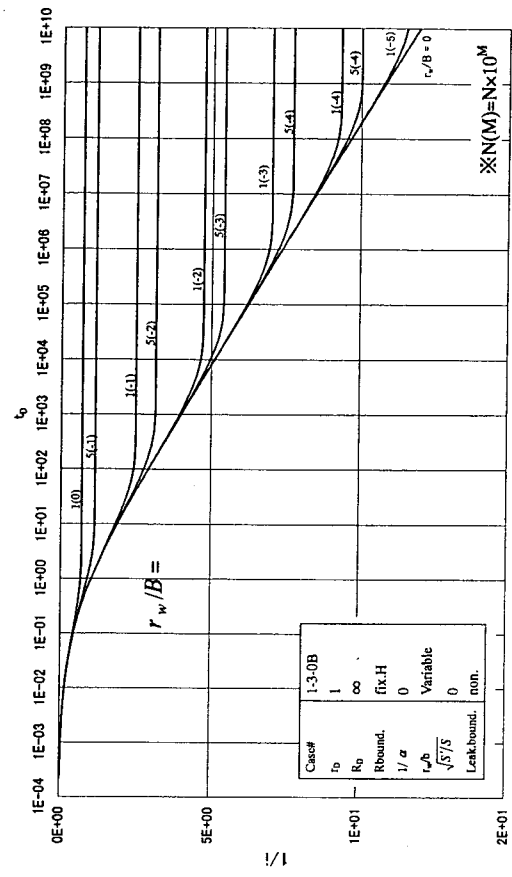


图 2.3.23 揚水流量變動(定压) : 定常漏水, $R_b \rightarrow \infty$, $r_w=0$, r_w/B 變動

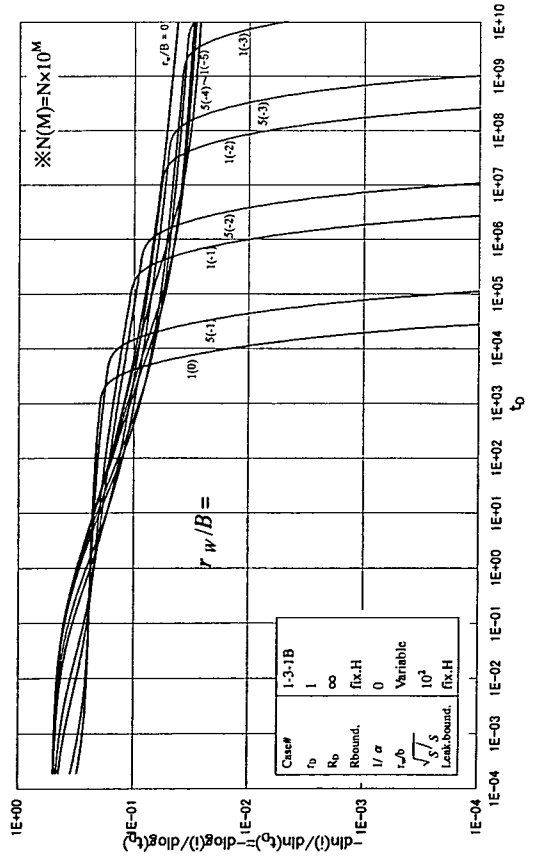
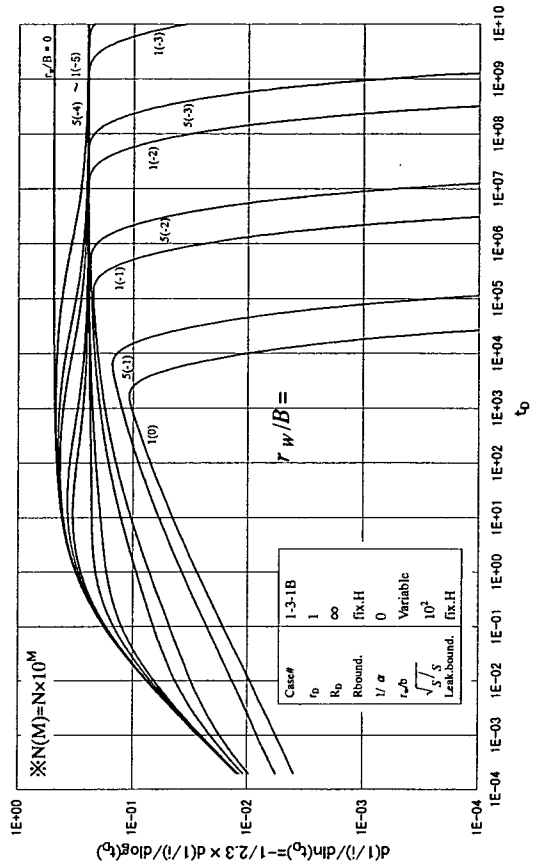
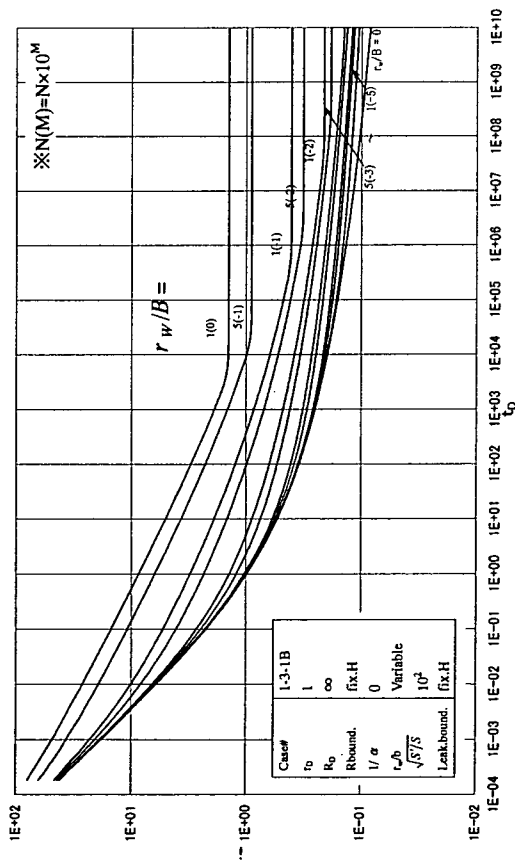
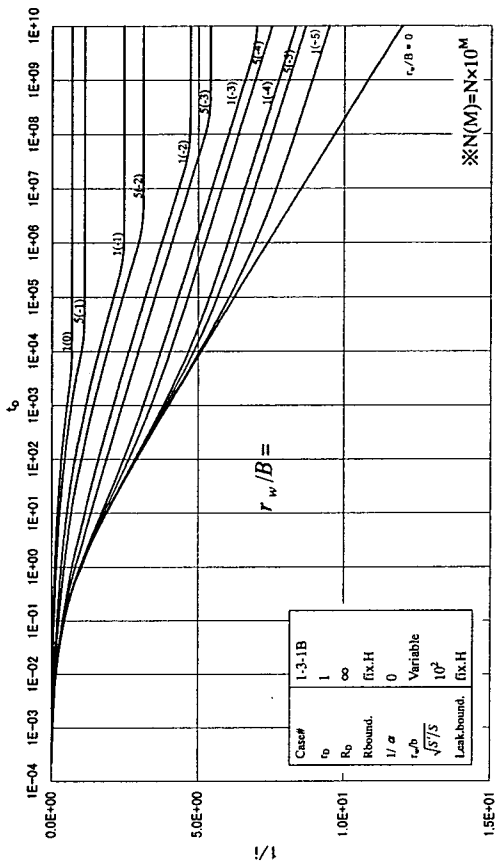


図 2.3.24 揚水流量変動(定圧) : 非常漏水上端水位, $R_0 \rightarrow \infty$, $r_w \neq 0$, r_w/B 変動

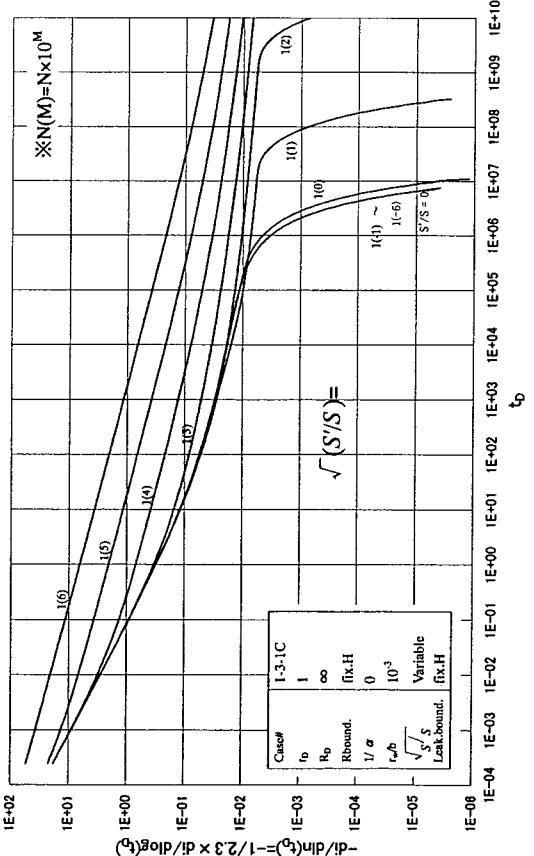
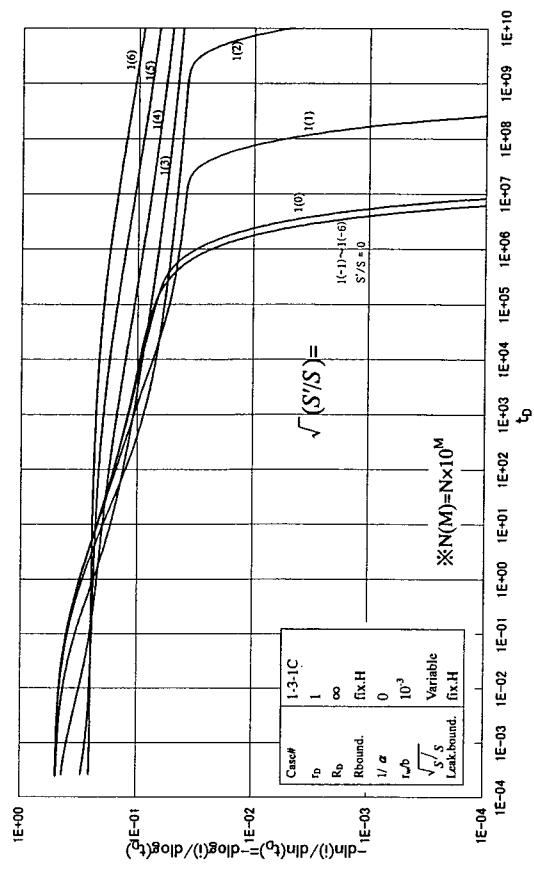
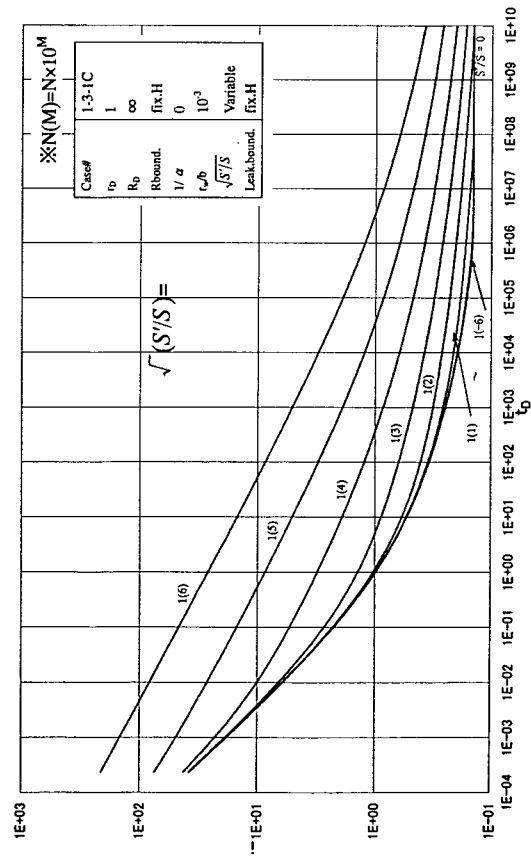
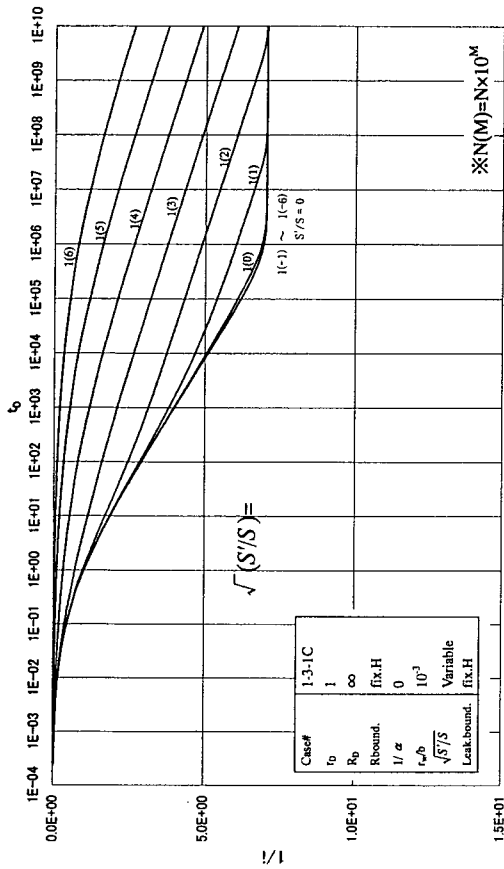


図 2.3.25 揚水流量変動(定圧)：非常漏水上端定水位， $RD \rightarrow \infty$ ， $r_w \neq 0$ ， $\sqrt{S'/S}$ 変動

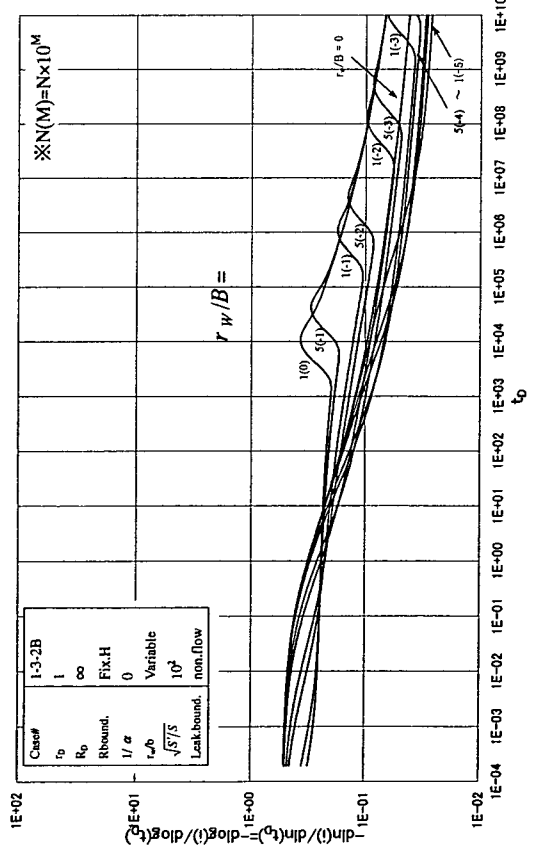
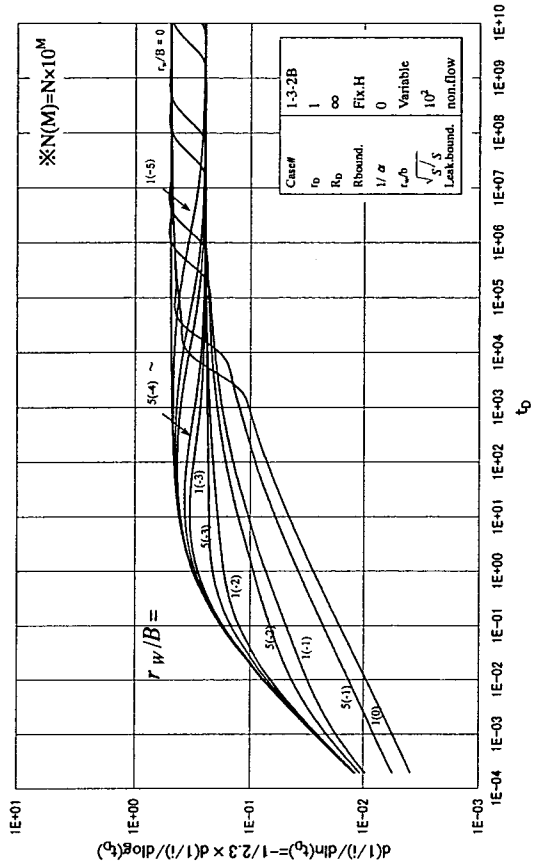
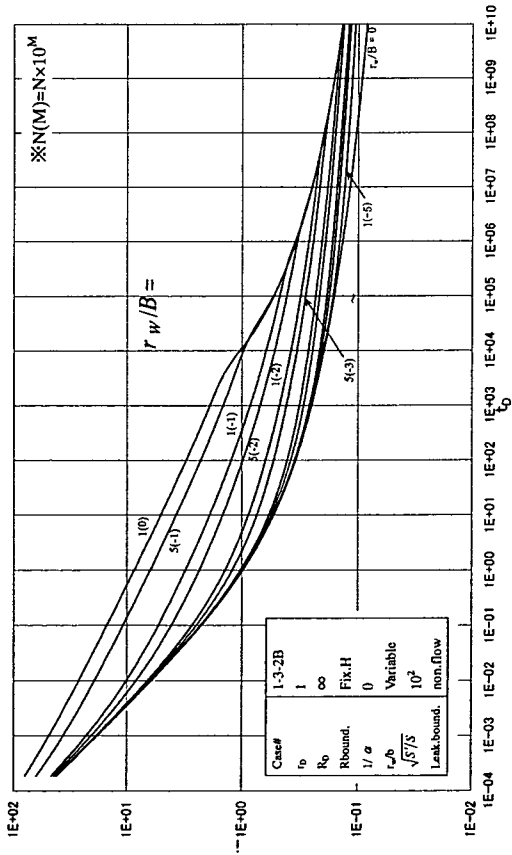
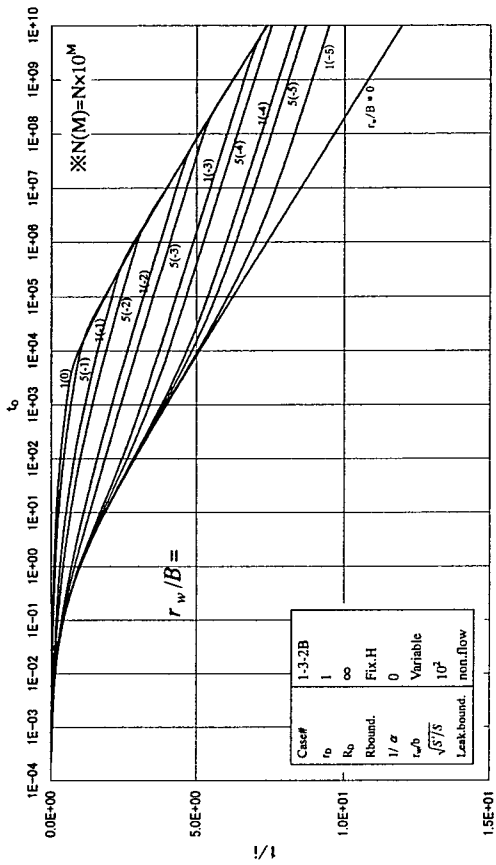


図 2.3.26 揚水流量変動(定圧)：非常漏水上端不透水， $R_0 \rightarrow \infty$ ， $r_w = 0$ ， r_w/B 変動

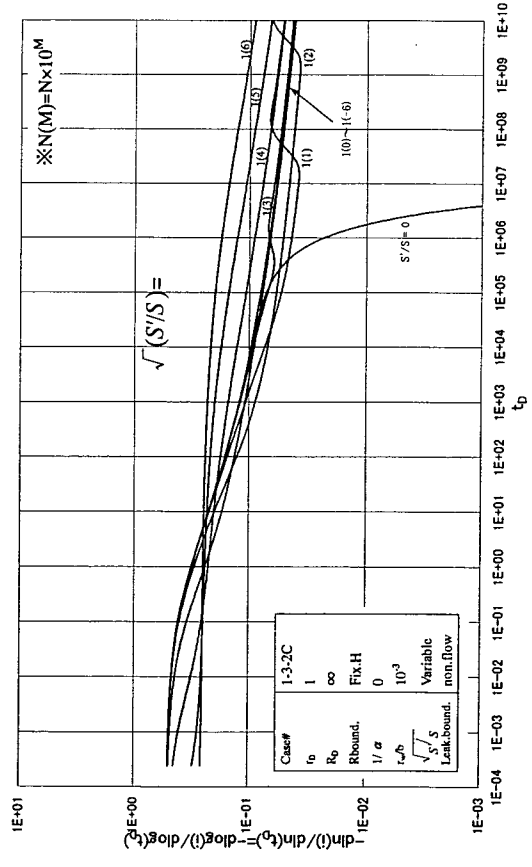
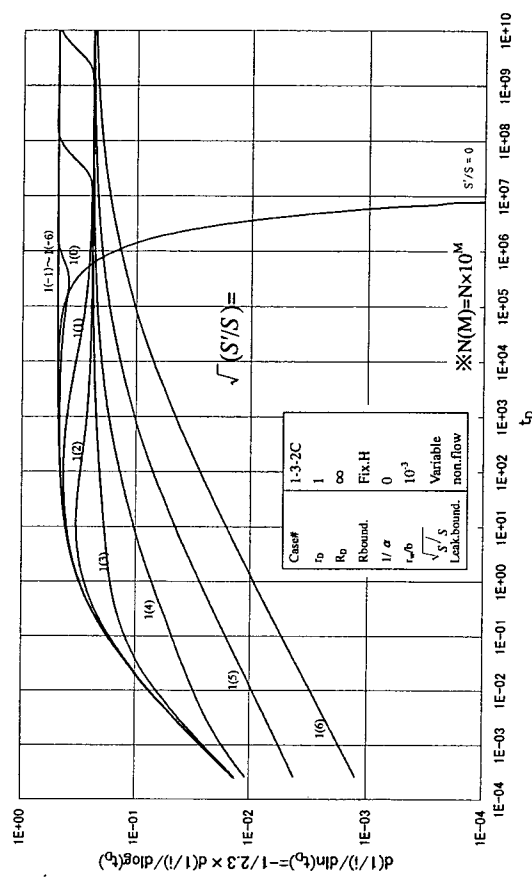
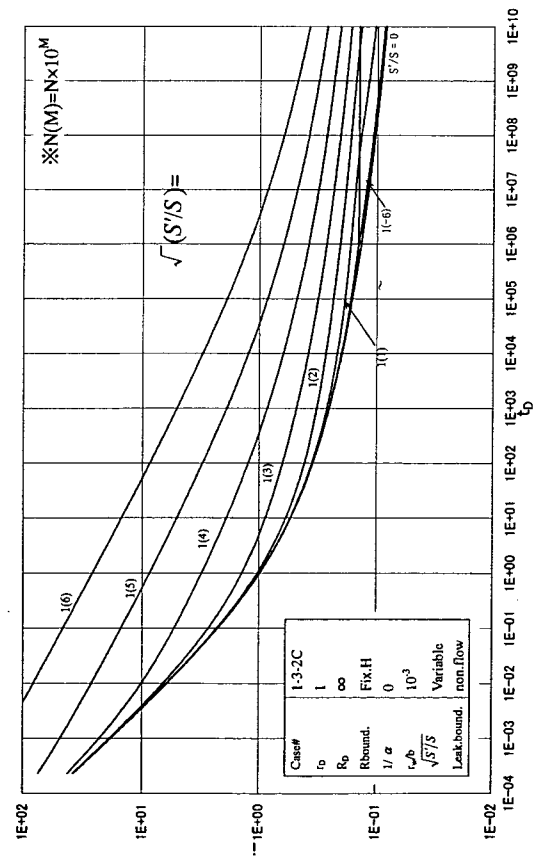
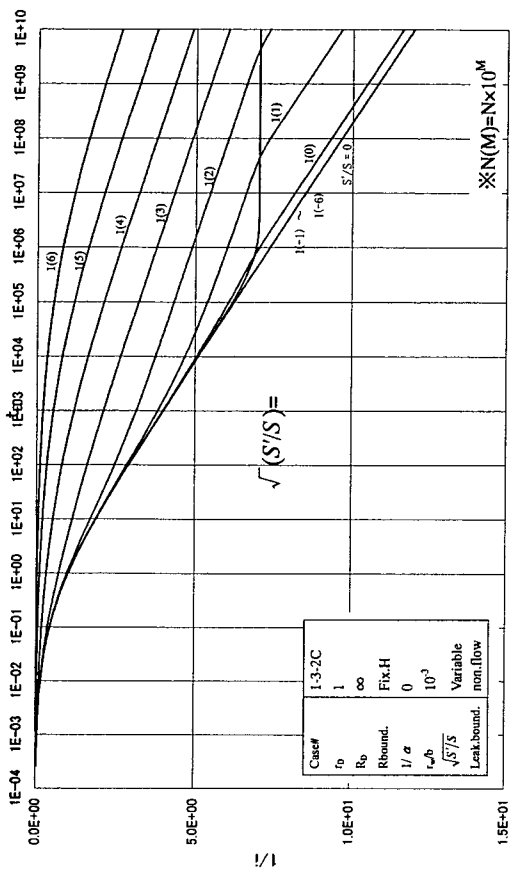


図 2.3.27 揚水流量変動(定圧)：非常漏(漏水層上端不透水), $R_0 \rightarrow \infty, r_w \neq 0, \sqrt{S'/S}$ 変動

2.4 実測データの解析事例

MIU 4 号孔で実施された一定流量による揚水試験結果データを解析する。

2.4.1 事前評価

試験時に整理された資料をもとに、表 2.4.1 に実施状況を示す。

表 2.4.1 定流量揚水(RW)試験データ

No.	評価	適用モデル(案)
1	RW 試験実施せず	—
2	1 ケース実施 IARF の確認段階(Jacob&Cooper 直線)までの試験である	R→∞モデル
3	3 ケース実施されているが、定流量揚水時の孔内水位上昇を評価するモデルは現存しない 水位低下段階の比較的良好な RW1 については、IARF の確認段階(Jacob&Cooper 直線)までの試験である	RW1 : R→∞モデル
4(RW3)	3 ケース実施されているが、RW1,RW 2 は揚水時間が短い 揚水時間の比較的良好 RW3 については、IARF の確認段階(Jacob&Cooper 直線)後、貯留性漏水の影響	RW3 : 貯留性漏水漏水層上端 不透水
5	全試験を通じて観測データのばらつきが顕著であるため、試験データとして採用するためには、適切な補正が必要である	×
6(RW3)	3 ケース実施されているが、RW1,RW 2 は揚水時間が短かく、揚水中の水位変動も見られる上揚水中の水位上昇が顕著。揚水時間の比較的良好 RW3 については、定流量揚水時の孔内水位上昇これを評価するモデルは現存しないため、RW3 については、IARF の確認段階(Jacob&Cooper 直線)までの試験とみなす	RW3 : R→∞モデル
7(RW1)	2 ケース実施されているが、RW 2 は RW1 後の連続揚水であるため、現行では解析法は確立していない。 RW1 については、IARF の確認段階(Jacob&Cooper 直線)までの試験がなされている	RW1 : R→∞モデル
8	1 ケース実施されているが水位変動が著しく不適	×
9	RW 試験実施せず	—
10-1,2	RW 試験実施せず	—
11	3 ケース実施されているが、RW1,RW 2 は水位低下量が少ない。 RW3 は 10 ⁴ sec 付近で揚水流量が変化したものか、水位増加が急増している。不適	×
12	1 ケース実施されている。定流量揚水時の孔内水位上昇を評価するモデルは現存しない IARF の確認段階(Jacob&Cooper 直線)までの試験とみなす。	R→∞モデル

以上のように 6 インターバルで揚水試験が実施されている。

ここで、図 2.4.1~図 2.4.6 に 2.3 標準曲線の整理で示した以下の 4 座標軸での整理を示す。

$$\frac{\log(s) - \log(t)}{s - \log(t)}$$

$$\log[\frac{d\ln(s)}{d\ln(t)}] - \log(t)$$

$$\log[\frac{ds}{d\ln(t)}] - \log(t)$$

また、実測データの微分計算は 2.2.1(2)で示した近似直線の平均勾配計算を行ったものであり、これは $s - \ln(t)$ 軸上での近似直線から求めた。近似化においては、選定した時間からその 5 倍の時間までの間隔を直線近似の対象とした。この時、直線性の確認指標には以下のものを用いた。

$$\frac{\sum [(\text{実測水位低下量データ}) - (\text{近似データ})]^2}{(\text{計算区間の平均水位低下量}) \times (\text{計算区間のデータ総数})}$$

計算では、上記の指標が 10^{-2} 以下となった場合、直線性ありと判断し、これを超えた場合は対象区間の上限時間を 90%に低減し再試行することで収束させた。

図 2.4.1～図 2.4.6 を再評価した結果、想定される帯水層モデルは以下となった。

表 2.4.2 定流量揚水 (RW) 試験データ再評価

No.	再評価	適用モデル(案)
2	事前評価と同様	R→∞モデル
3	事前評価と同様	RW1 : R→∞モデル
4(RW3)	事前評価と同様	RW3 : 貯留性漏水漏水層上端不透水境界
6(RW3)	図 2.4.4 において $t > 10^4$ 付近で微分 $ds/d\ln(t)$ の動きが鈍った、減少している。	RW3 : 貯留性漏水漏水層上端定水位境界
7(RW1)	事前評価と同様	RW1 : R→∞モデル
12	図 2.4.6 において、 $t > 10^5$ 付近はデータの乱れとみると、有限側方定水位境界とみなせ、時間 10^4 オーダー台まで解析範囲を拡大できる	R→有限側方定水位境界

以上の評価に加え、No2、No3、No7 はいずれも同じ帯水層モデルと評価されたので、ここでは No.2 および 3 の解析事例による置換は No.7 でも見られることから、これらを解析せず、No.4、6、7、12 の 4 ケースを解析対象データとする。

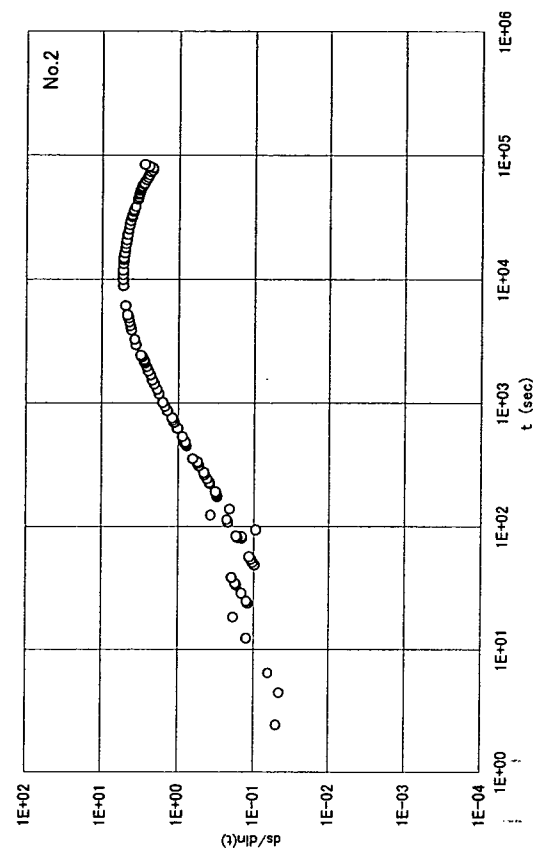
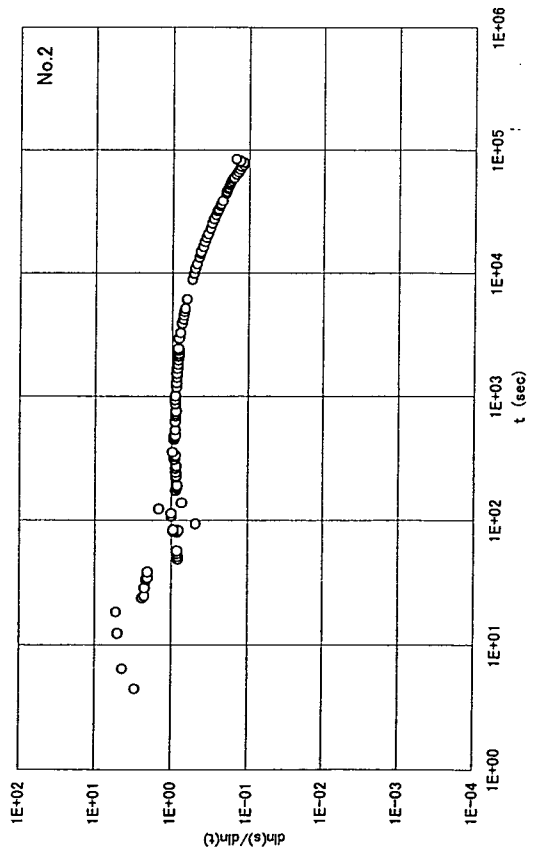
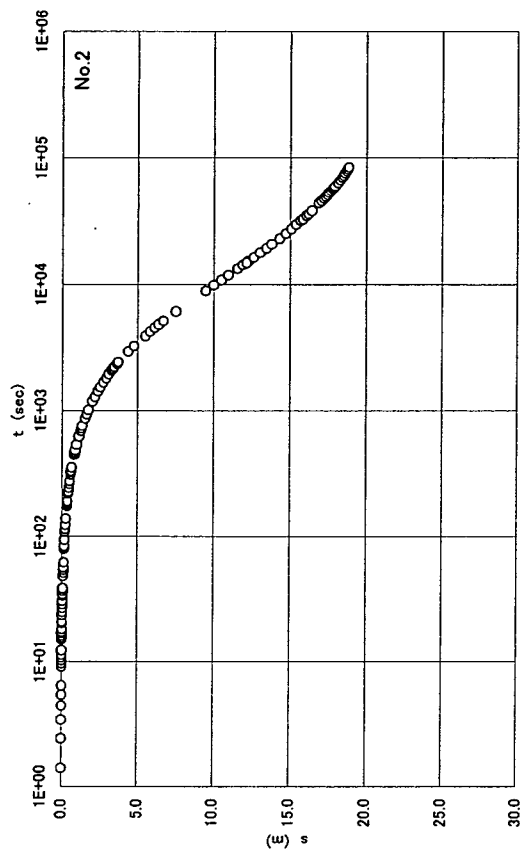
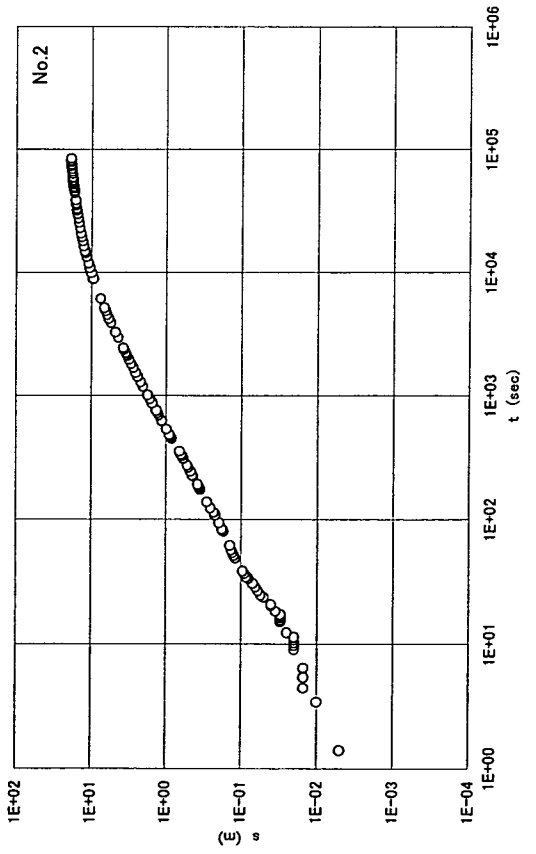


図 2.4.1 揚水試験結果 No. 2

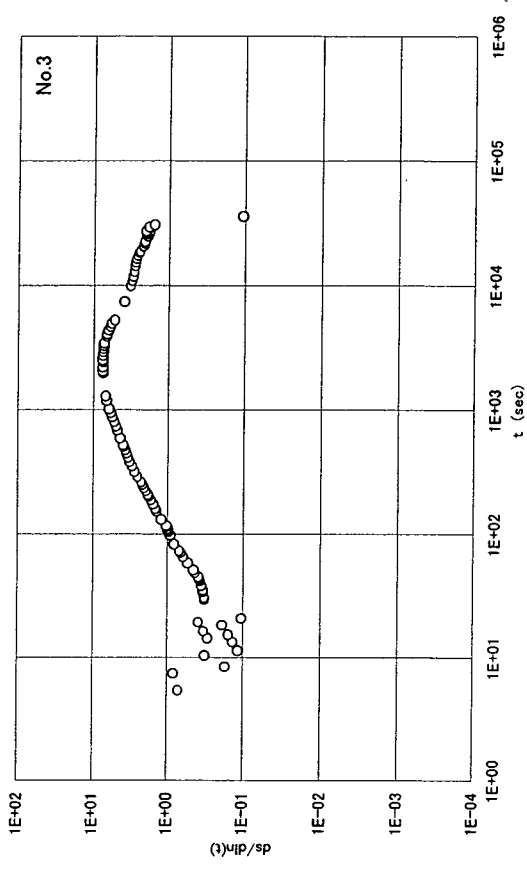
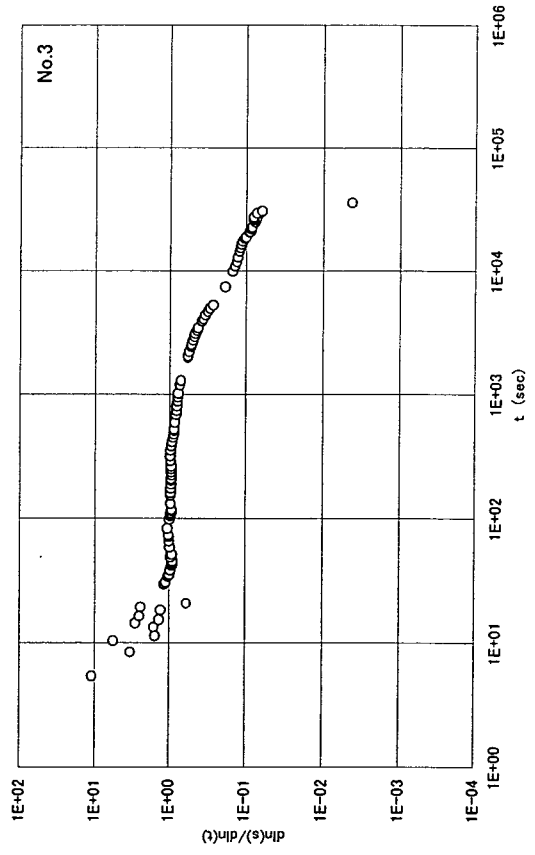
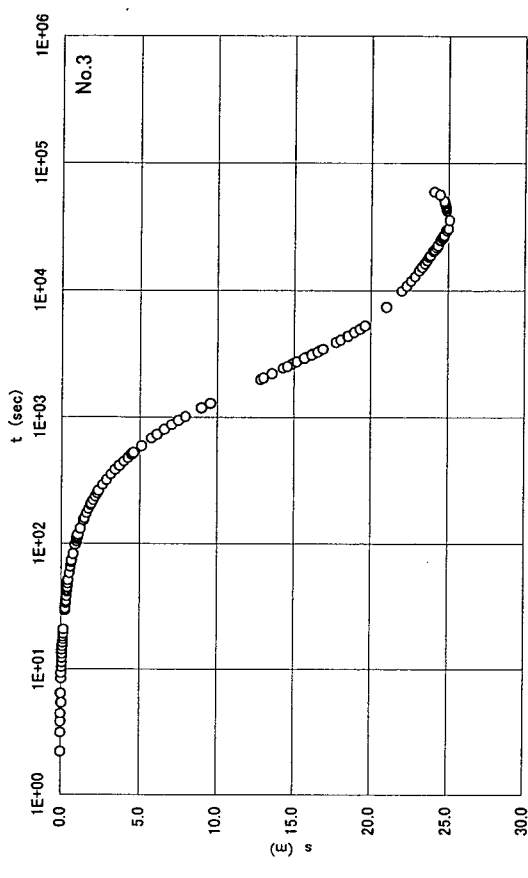
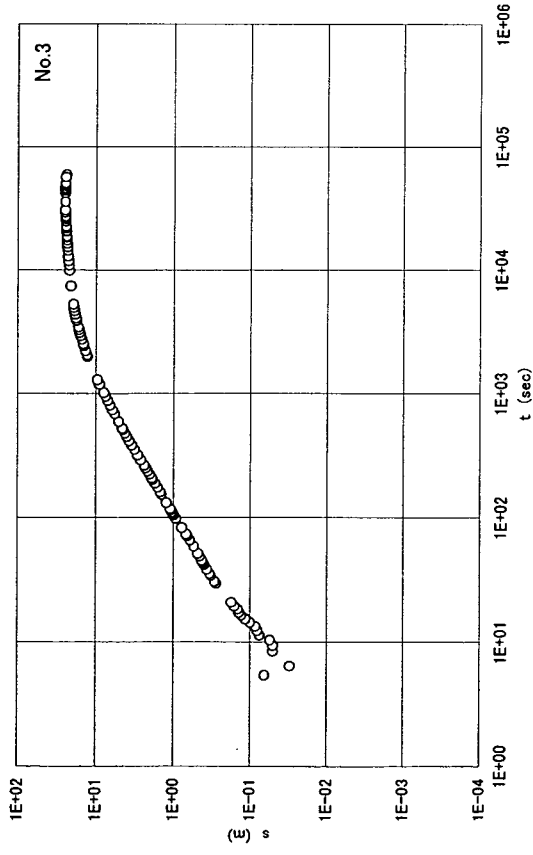


図 2.4.2 揚水試験結果 No. 3

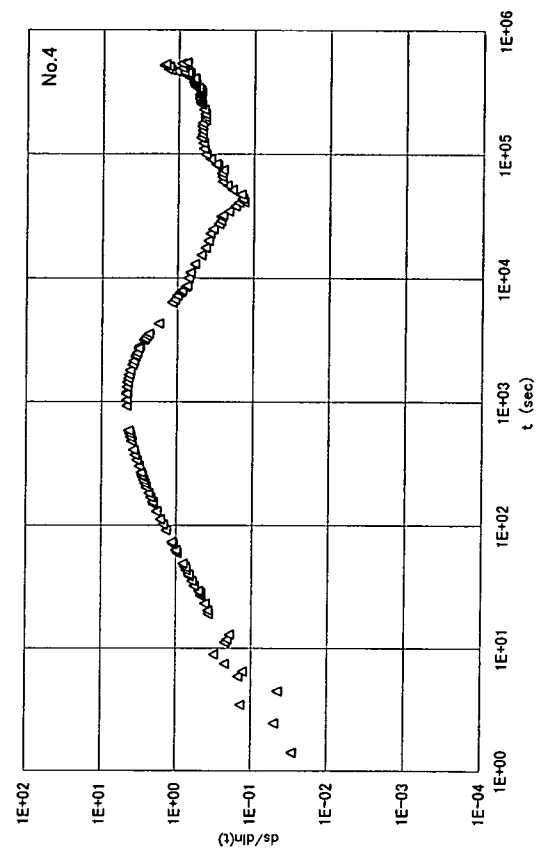
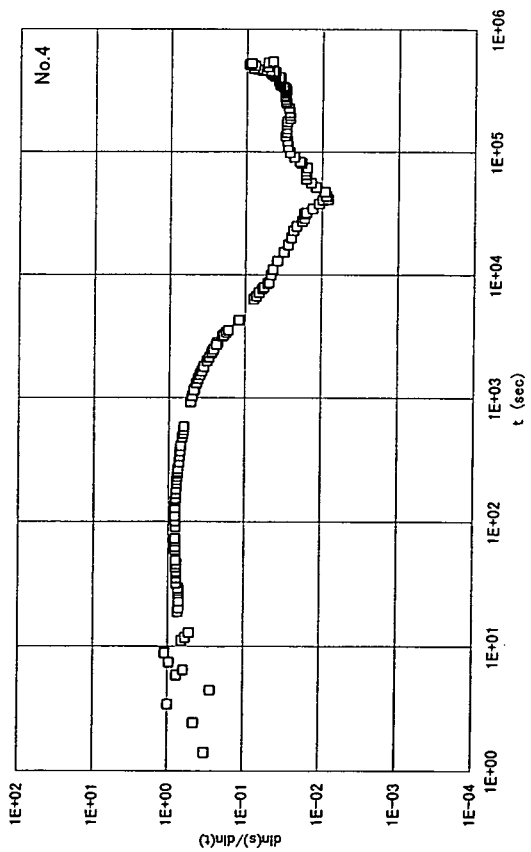
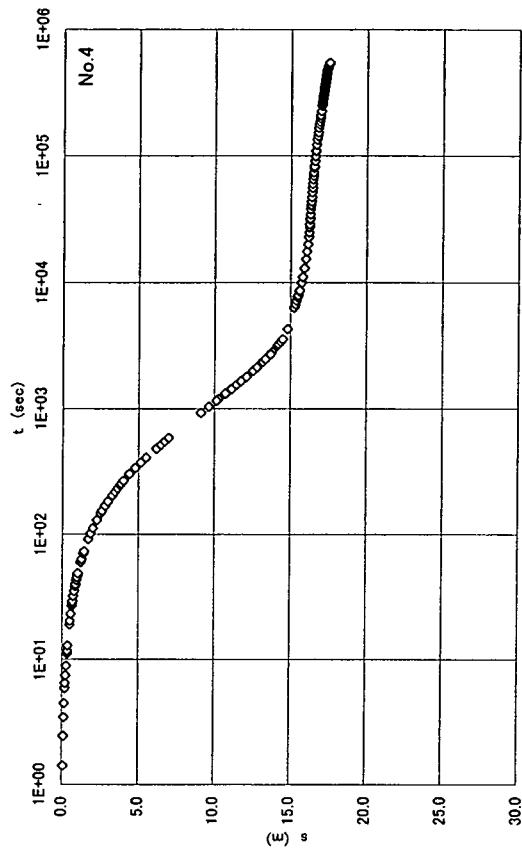
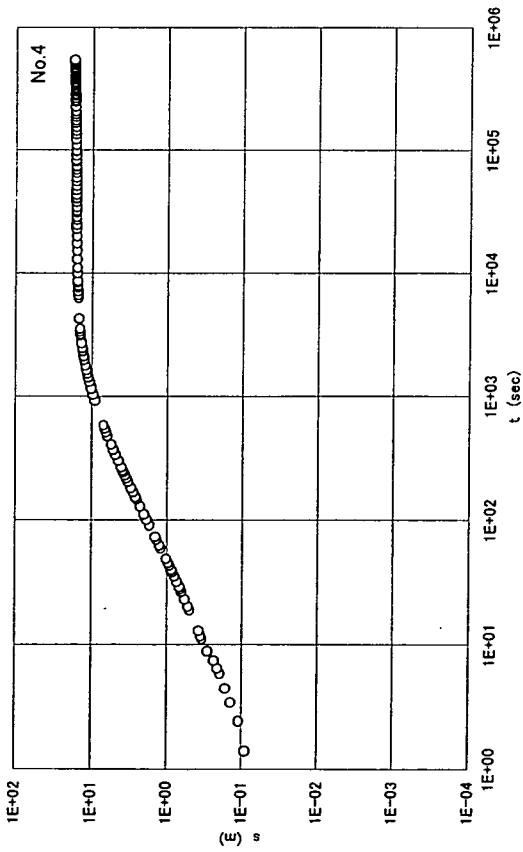


図 2.4.3 揚水試験結果 No. 4

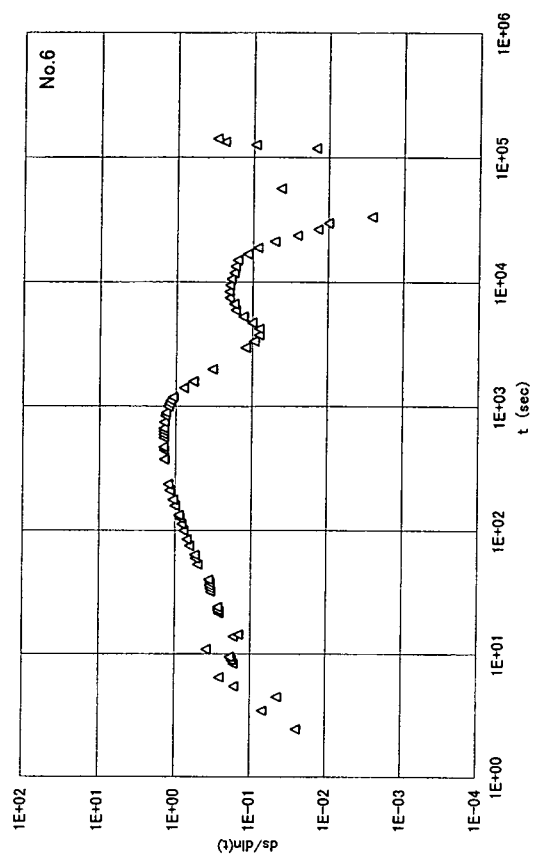
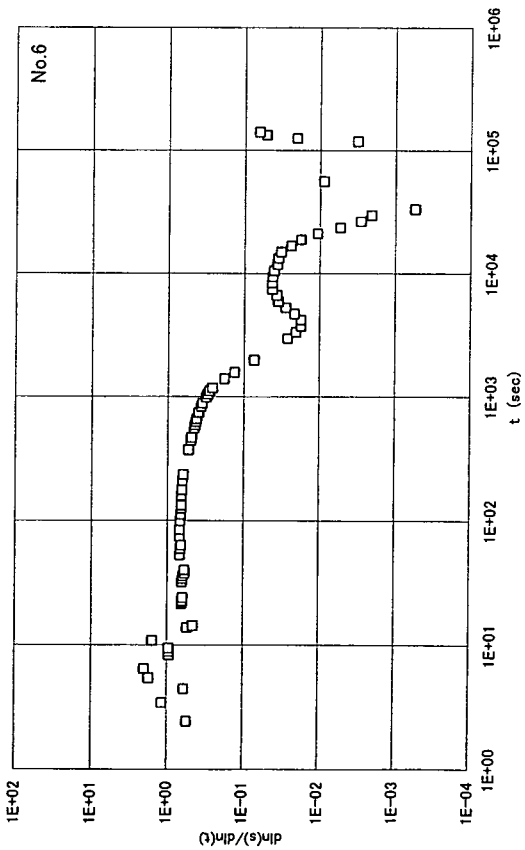
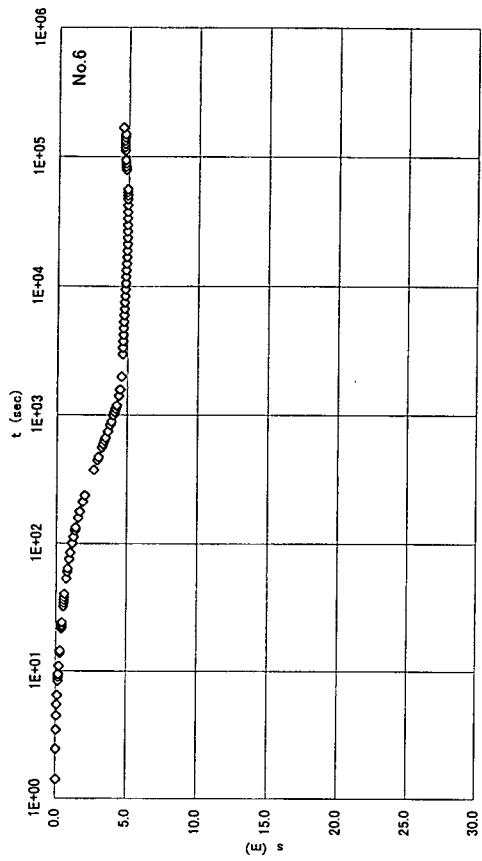
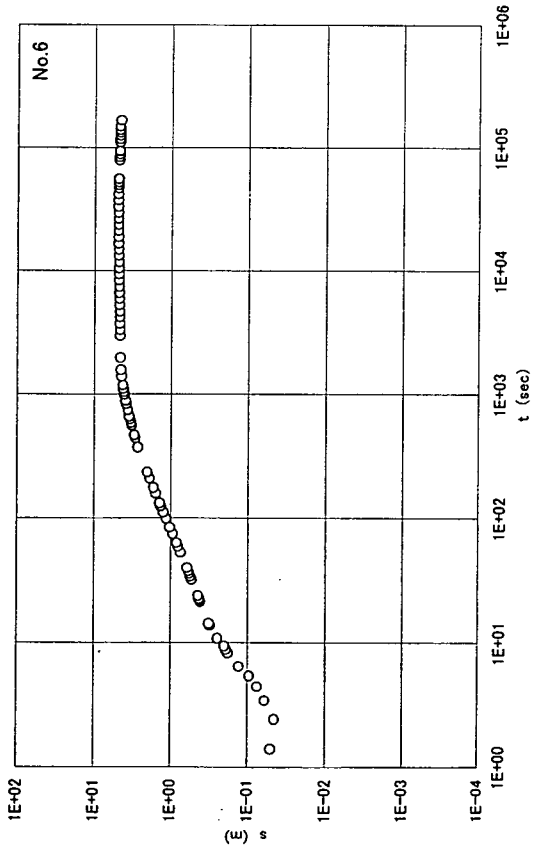


図 2.4.4 揚水試験結果 No. 6

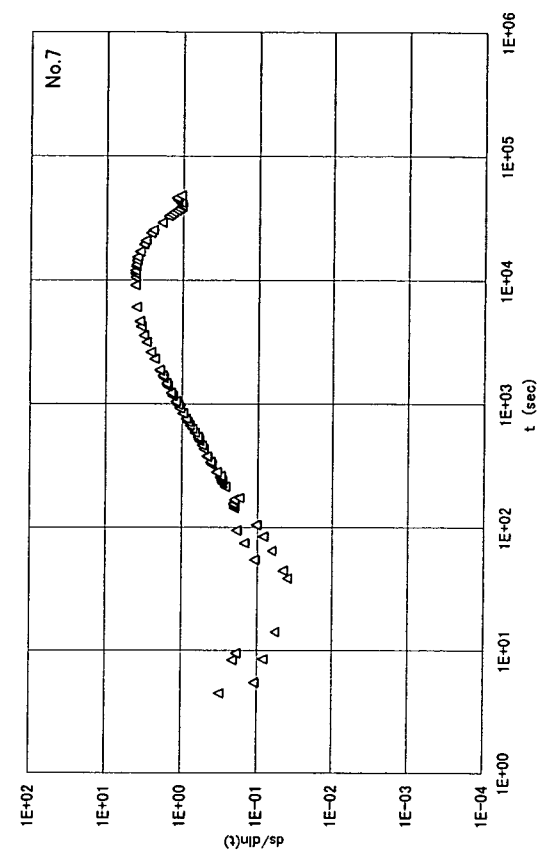
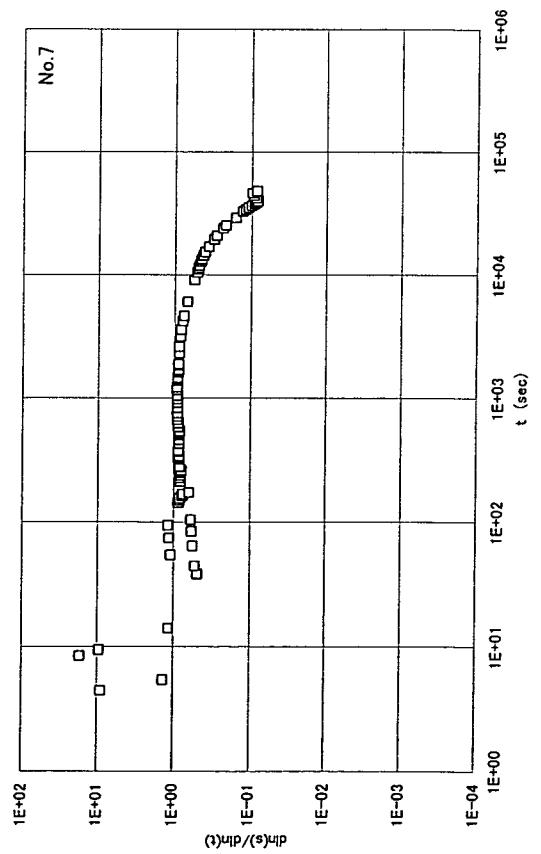
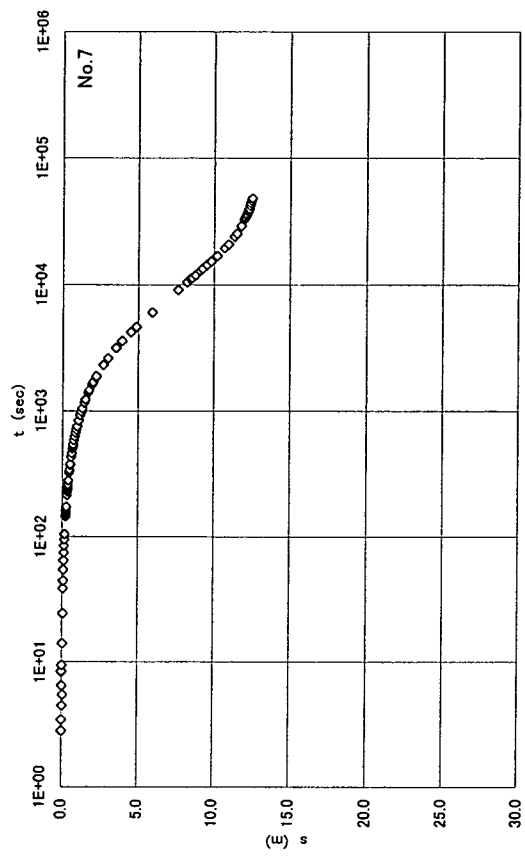
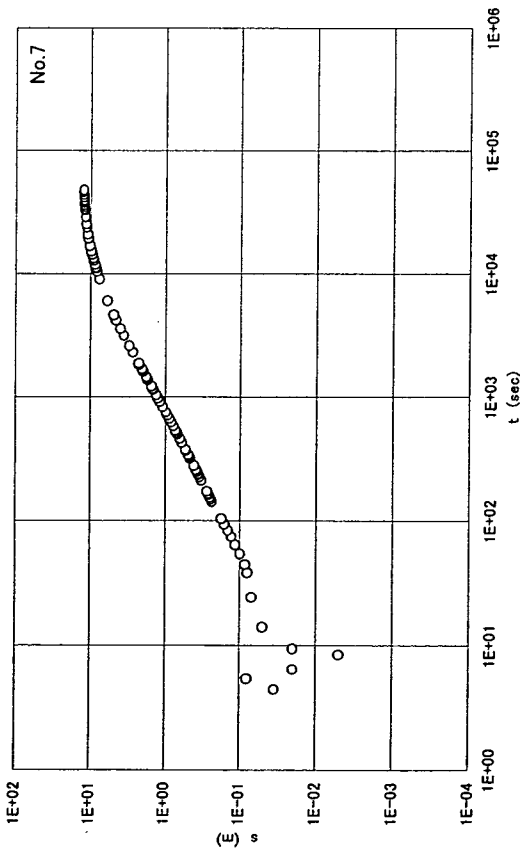


図 2.4.5 揚水試験結果 No. 7

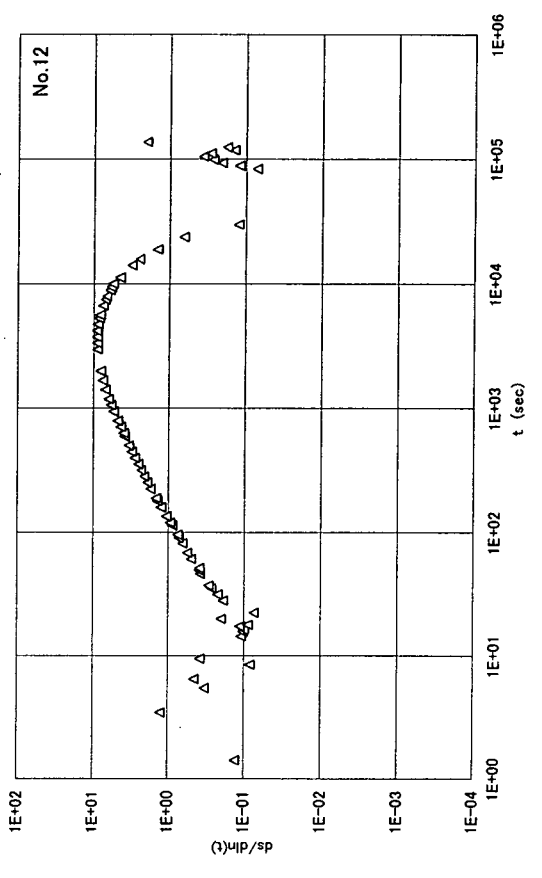
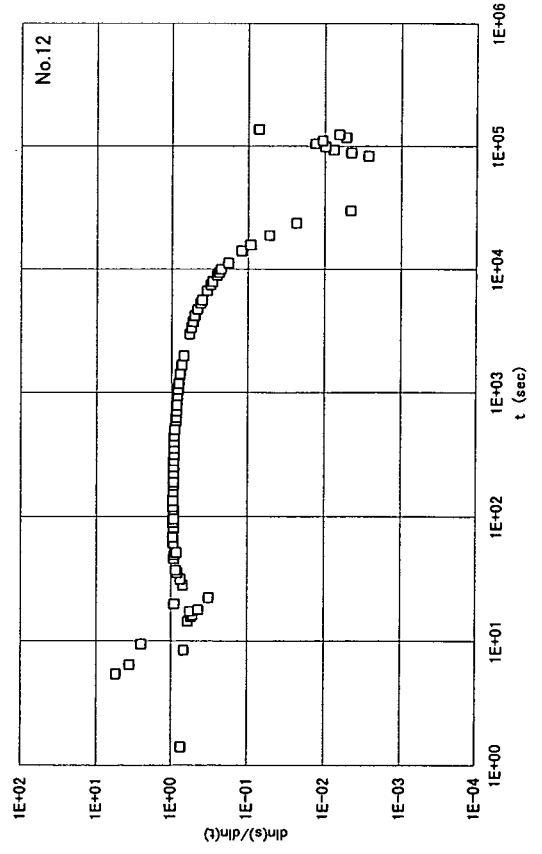
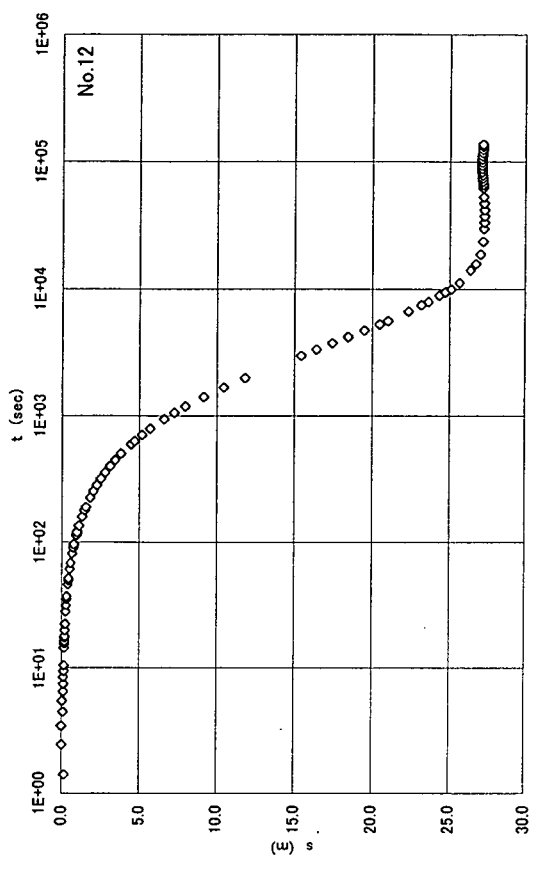
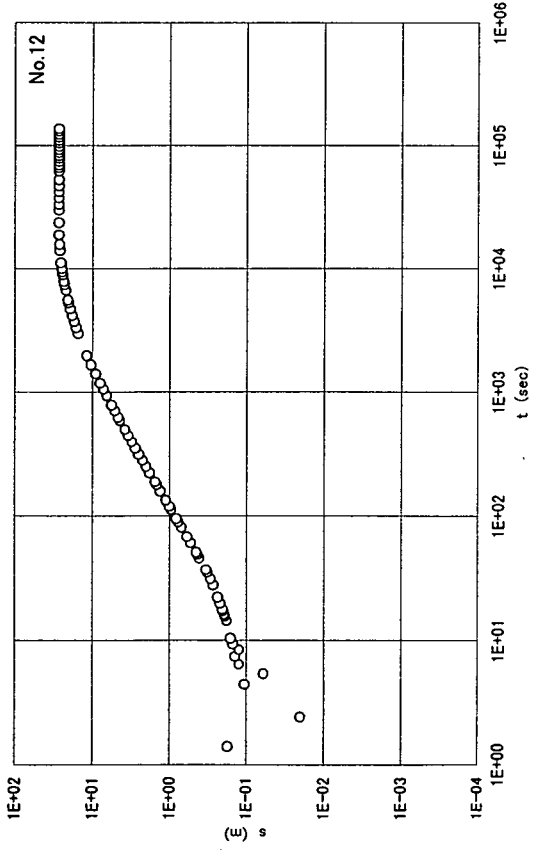


図 2.4.6 揚水試験結果 No.12

2.4.2 解析結果の考察

前述のように、解析を実施した試験データは No.4、6、7、12 の4ケースである。

ここで、揚水試験が実施された MIU4号孔は斜孔であるため、鉛直孔を想定して展開されたこれまでの揚水理論とは幾つかの点で異なる部分があると考えられる。しかし、現段階では斜孔による揚水時の挙動の定量的な違いは明確ではないことから、鉛直孔での試験結果とみなしてこれを解析することとする。

図 2.4.7～2.4.10 にマッチング結果を示す。

マッチング解析は、参考文献⁴⁾で用いられた自動解析手法による。

マッチングに用いた指標は微分値 $ds/d\ln(t)$ である。

帯水層モデルを表す特性(透水量係数 T , 貯留係数 S を除く)は、1 オーダー間では 1 と 3.16(一対数長二等分割)の二つの試行とした。時間軸上のマッチング試行は1 オーダー間では対数軸上均等に 10 区間をとった。

解析では、任意に設定した帯水層モデル毎の一曲線に対して、任意の時間軸試行パラメータ n を試行させ、実測データと計算値の倍率 f をまとめ、これらの分散を評価する。分散値 v は各特性パラメータごとに図化し、 v が最小となる時のパラメータの組み合わせを最適解とした。

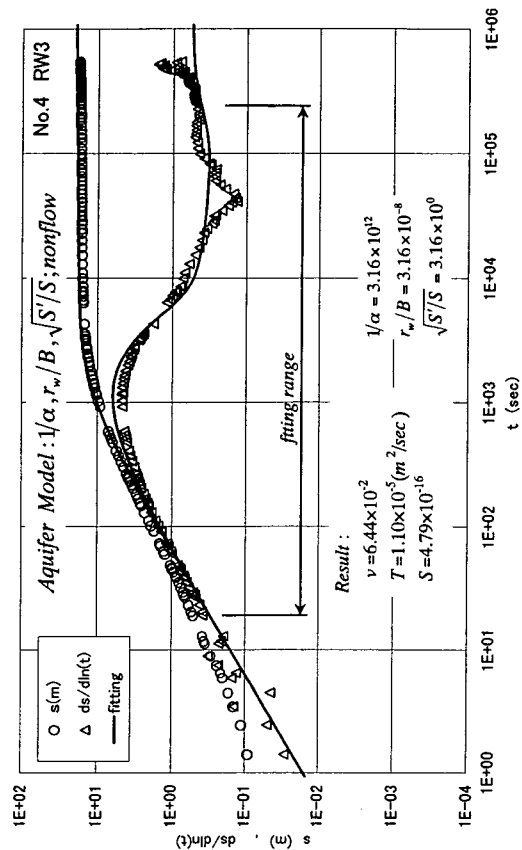
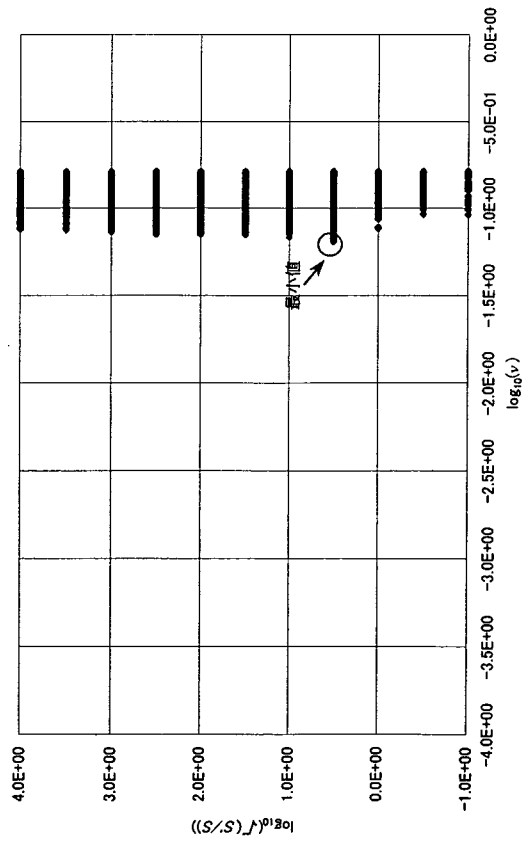
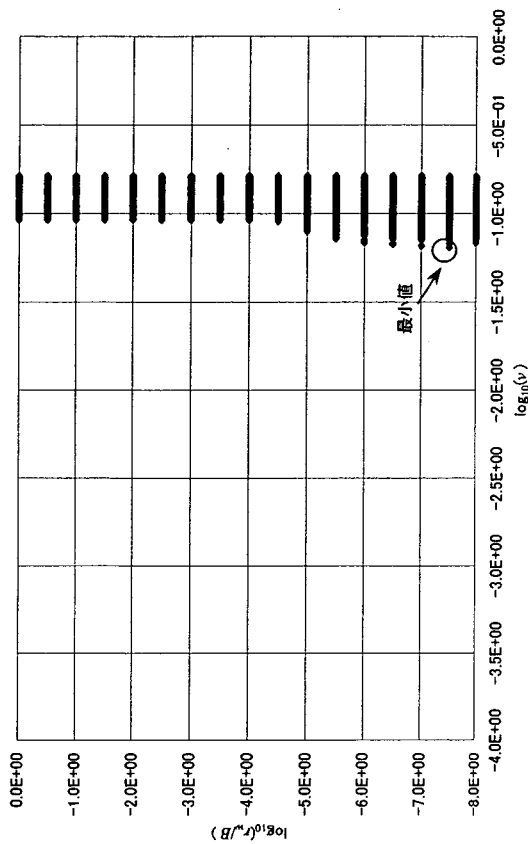
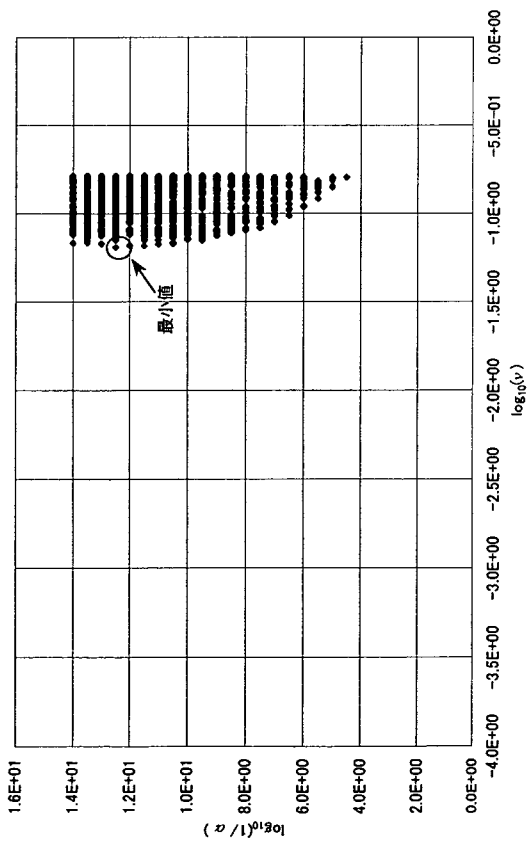


图 2.4.7 解析结果 No.4

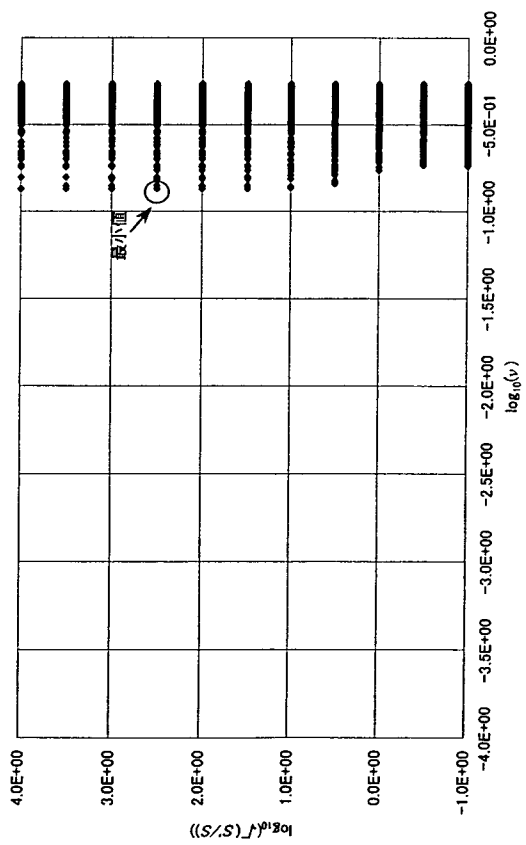
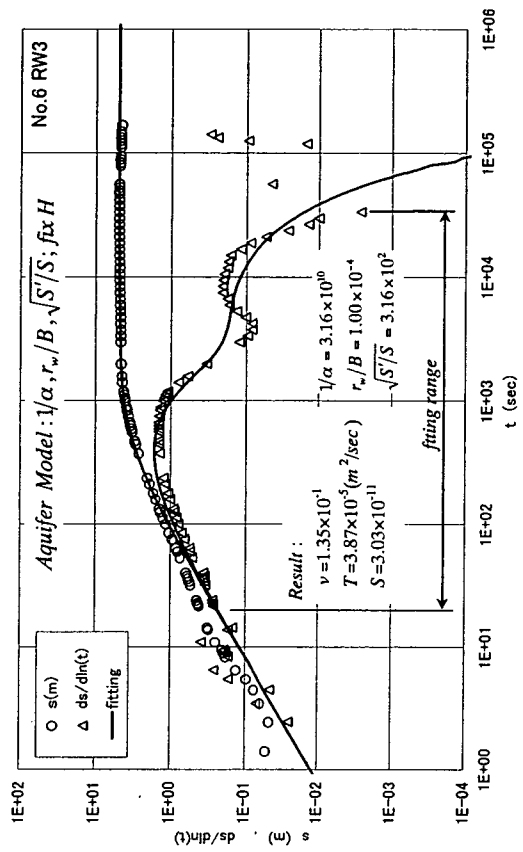
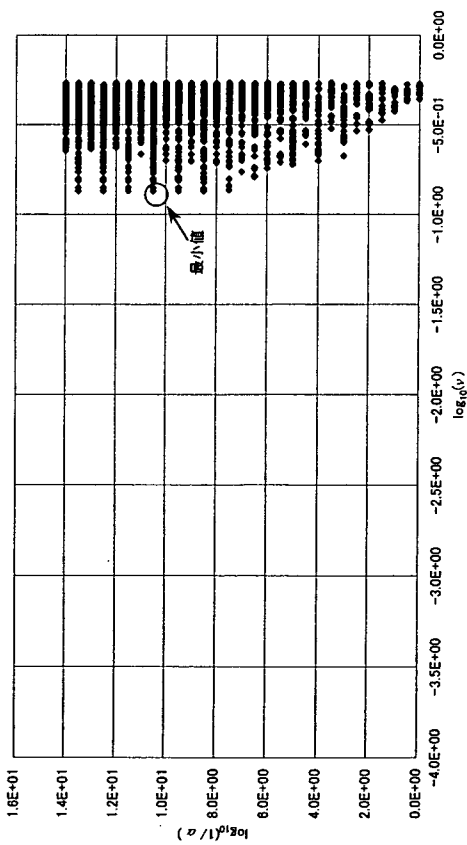
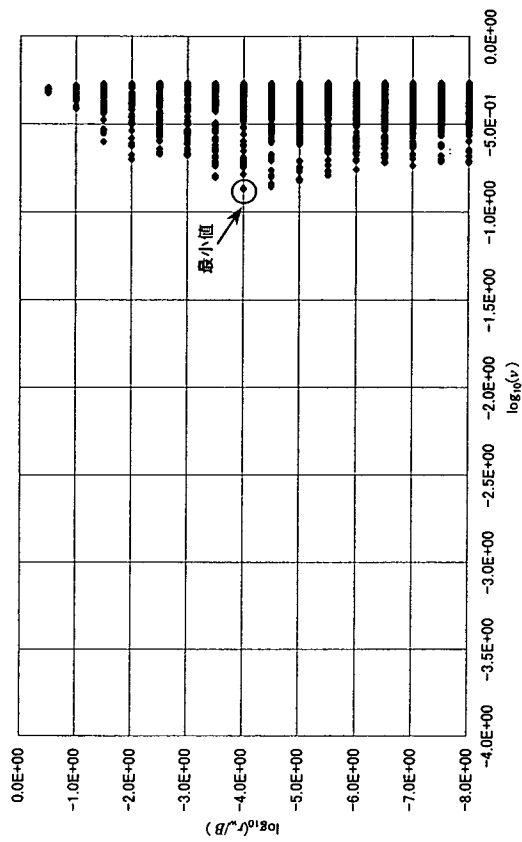


图 2.4.8 解析结果 No.6

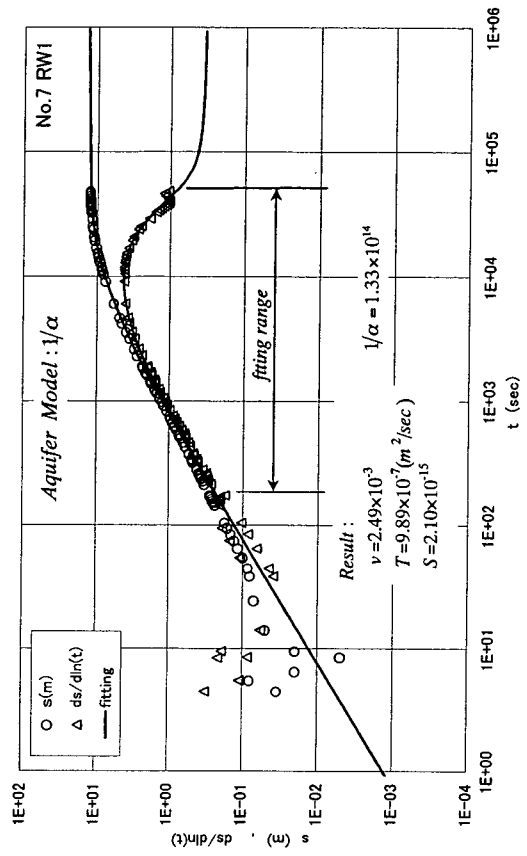
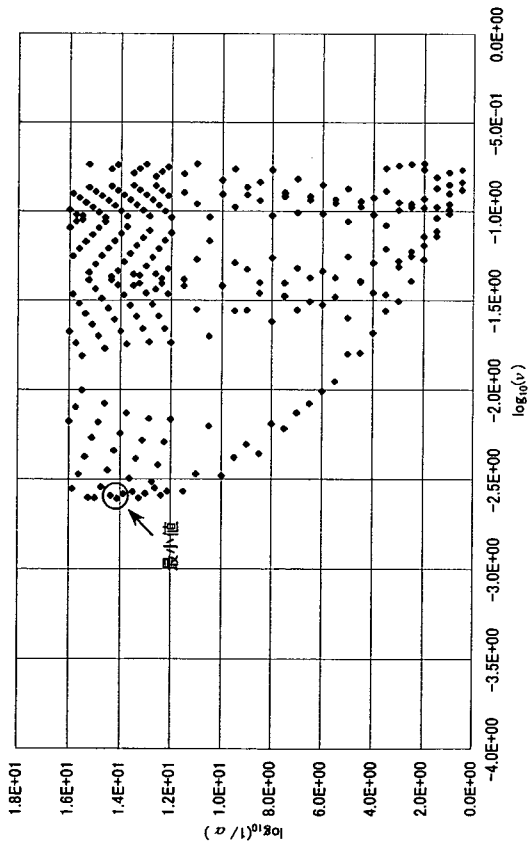


图 2.4.9 解析结果 No.7

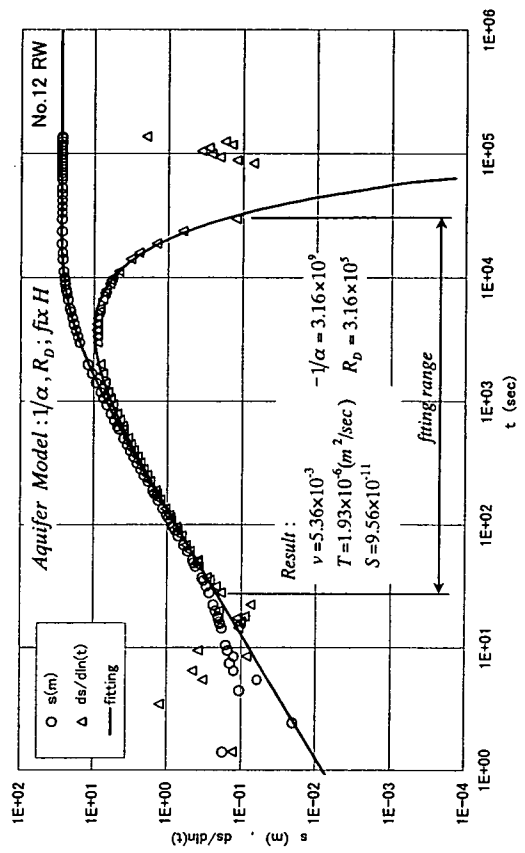
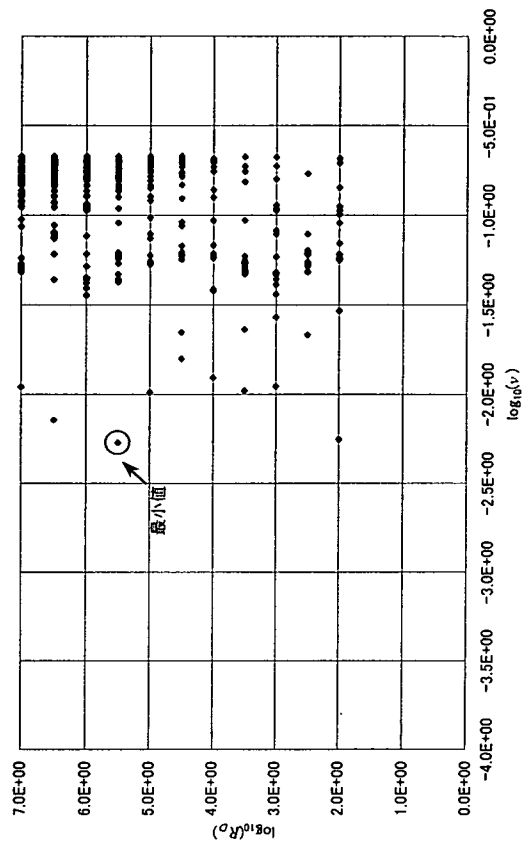
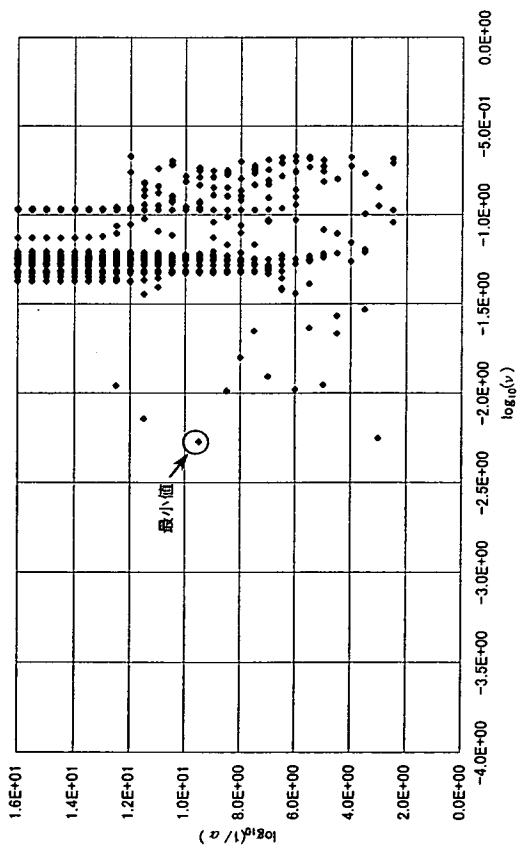


图 2.4.10 解析結果 No. 12

試験結果を表 2.4.3 にまとめた。

表 2.4.3 揚水試験結果の一覧

	No.4	No.6	No.7	No.12
Aquifer Parameters	$\alpha, r_w/B, \sqrt{S'/S}$ (non-flow)	$\alpha, r_w/B, \sqrt{S'/S}$ (fixH)	α	α, R_D (fixH)
r_w (m)	0.06			
C_w (m ²)	2.75×10^{-3}			
Q_0 (m ³ /sec)	7.5117×10^{-5}	1.3100×10^{-4}	4.1500×10^{-6}	2.6917×10^{-5}
v_{opt}	6.44×10^{-2}	1.35×10^{-1}	2.49×10^{-3}	5.36×10^{-3}
n_{opt}	2.29×10^{10}	3.54×10^8	1.31×10^{11}	5.61×10^6
$\exp(\bar{f}_{opt})$	5.45×10^{-1}	2.69×10^{-1}	3.34×10^{-1}	1.11×10^0
$1/\alpha$	3.16×10^{12}	3.16×10^{10}	1.33×10^{14}	3.16×10^9
R_D	—	—	—	3.16×10^5
r_w/B	3.16×10^{-8}	1.00×10^{-4}	—	—
$\sqrt{S'/S}$	3.16×10^0	3.16×10^2	—	—
T (m ² /s)	1.10×10^{-5}	3.87×10^{-5}	9.89×10^{-7}	1.93×10^{-6}
$S_{n_{opt}}$	1.33×10^{-13}	3.03×10^{-11}	2.10×10^{-15}	9.56×10^{-11}
S_α	7.70×10^{-14}	7.70×10^{-12}	1.83×10^{-15}	7.70×10^{-11}

$$\text{ここで, } T = \frac{Q_0}{4\pi} \frac{1}{\exp(\bar{f}_{opt})}, \quad S_{n_{opt}} = \frac{T}{r_w^2 n_{opt}}, \quad S_\alpha = \frac{\alpha C_w}{\pi r_w^2}$$

解析精度の評価方法には幾つか提案できる。

まず、分散値 v の絶対量による評価では、No.6 および No.4 は他よりも劣ると見られる。相対的な評価では分散値が試行パラメータに対して感度が鈍い(パラメータを変化させても、 v 値が変わらない)場合には、解とみなせる組み合わせが他にもあることを示唆している。ここでも、No.4、6、7 にこの傾向が認められる。しかしながら、図 2.4.7~図 2.4.10 に示された最適解を示す理論曲線はいずれも試験結果を再現できている。

3. スラグ試験後の回復試験データの解析手法に関する理論的な整合性

3.1 概要

スラグ(以下、SW)試験は単孔の試錐孔で実施できる非定常型原位置透水試験法である。前章で示した揚水試験と異なり、孔内貯留水の排除後の湧水が試験インパクトであるため、移動する地下水量は最大でも孔内再貯留量にとどまる。揚水試験が比較的長時間大量水の移動により水理境界などの影響も受けるのに対して、SW 試験は比較的少量水の移動であり、試錐孔周辺の地下水の挙動に着目した試験である。このため、SW 試験は水理境界や漏水などの影響を受け難く、試錐孔近傍地層の透水係数および比貯留係数を評価することができると考えられる。

また、SW 試験は簡易に実施できることから、土木工学では地盤のボーリング調査中に実施されることの多い試験であり、深地層と比較すると透水性に関しては数オーダー大きな地盤に対するため、回復に要する時間は比較的短い試験であると位置付けられている。しかし、低透水性を示す深地層では、スラグによってつけられた孔内外水位差の回復に要する時間は、例えば試錐孔径が数 cm オーダーといった小さいものであっても、数時間～数日かかることもめずらしくなく、試験の迅速化が課題となっている。

この対策として、閉塞チャンバーを用いた試錐孔で SW 試験を実施することがなされている。閉塞チャンバーの孔内貯留は開口孔よりも数オーダー小さく、孔内水頭回復に要する時間を短縮できるものである。実施にあたっては、水および試験孔インターバルの変形特性による孔内貯留項の評価が必要となる。これに加えて、多層構造の地層では透水性の高い地盤もあり、このような層での試験では回復速度が速すぎ十分な観測データを採取できない場合もあり、層ごとに試験方法を検討する必要がある。

他に、SW 試験途中で試験孔内を閉塞し回復時間を短縮する方法がある。ここでの検討対象である SWS (SW 試験後の shut-in(孔内閉塞)) 試験である。ここで、SWS”試験”とされているように、ここでは shut-in 後の回復過程も試験データとして解析対象としている。この試験法では、最初は開口孔で SW 試験を行い、回復が遅すぎる場合には SWS 試験に切り替えることも可能であるため試験の実施が比較的容易である。しかしながら、この手法は我が国での実施例も少なく、適用性についての議論も十分なされていないことから、妥当性について検討する。

検討では、まず SWS 試験の水位回復挙動をシミュレートできる解析モデルを説明する。次に、SWS 試験結果の解析方法として提案されている幾つかの方法をレビューし、理論的背景および適用の範囲について考察する。最後に実測データを解析し、今後の課題を示す。

3.2 解析モデル

3.3 で示すように、SWS 試験結果の解析方法は SW 試験時の水位挙動を定流量揚水よるものと近似し、SWS 試験は揚水停止後の回復挙動と考えている。しかし、SWS 試験時には、孔内外水位差が経時変化するので揚水流量に相当する湧水流量も経時的に変動するため、等価な揚水流量や停止時間の設定公式が提案されている。また、揚水を行わない SW 試験では、孔内水位変動から試験孔内への湧水流量を評価しなければならない。そこで本節では、SW 試験時の湧水流量評価公式を整理し、このようにして評価される湧水流量を揚水流量として扱う場合に必要となる変動流量型の揚水公式の誘導を整理し、SW 試験および SWS 試験への適用性を吟味する。

3.2.1 スラッグ試験中の揚水流量の評価公式

一般に、揚水流量は揚水ポンプで観測される流量 $Q_p[L^3/T]$ である。このポンプ流量は、井戸内に流入してくる地山からの湧水流量 $q[L^3/T]$ と孔内貯留水の変動流量 $[L^3/T]$ の和である。この三者は以下の関係を持つ。

$$q(t) = Q_p(t) - C_w(t) \frac{ds_w(t)}{dt} \quad (3.2.1)$$

ここで、 $q(t)$: 帯水層から井戸へ流入する湧水流量 $[L^3/T]$
(>0 , 地山から孔内への湧水)、
 $Q_p(t)$: ポンプ流量 $[L^3/T]$ 、
 C_w : 井戸貯留項 $[L^2]$ 、 s_w : 井戸内水位低下量 $[L]$ 、 t : 時間 $[T]$

この関係式が示しているのは、揚水流量から孔内貯留水量の変動を差し引いたものが地山からの湧水流量である。ここで、SW 試験では $Q_p(t)=0$ であるため、以下のよう簡略化される。

$$\text{スラッグ試験時の流量公式 : } q(t) = -C_w(t) \frac{ds_w(t)}{dt} \quad (3.2.2)$$

井戸内水位低下量 s_w は時間とともに変化し、その変化率 (ds_w/dt) も一定ではないことから地山からの湧水流量 q も変動流量となる。今、SW 試験では孔内低下水位の回復過程を観測する場合には $ds_w/dt < 0$ であり、流量 $q(t) > 0$ (湧水) となる。さらに、井戸貯留項 C_w も時間の関数とした。 C_w は孔内水位変動区間の管断面積 (πr_c^2 , r_c : 水位変動区間管内半径) であり、水位変動区間内で管径が変更している場合がある。このよう

な場合には、経時変化する水位高さに応じて C_w が変化するため、整理上は C_w の時間変化とみなせる。また、SWS 試験時には $C_w=0$ とみなすことができ、(3.2.2)式より $q(t)=0$ とすればよい。この考え方は従来の回復試験結果の理論解と同じものである。仮に、SWS 試験時に有意な C_w が認められる場合には、これを用い(3.2.2)式より $q(t)$ を評価すればよい。ただし、 $q(t) \neq 0$ 条件での SWS 試験結果の解析方法はここでは評価しない。

このように、変動揚水流量条件で SW 試験時の水位変動挙動が表現できるなら、SWS 試験時の水位回復挙動は従来の回復試験と同様に $q(t)=0$ 条件を適合して表現できると考える。

3.2.2 変動流量型揚水公式の概要

一般に、揚水試験の試験条件は定流量揚水と考えられている。しかし、いくつかの要因で流量が変動する場合がある。例えば、揚水開始直後の安定流量に達するまでの変動や過剰揚水による孔内限界水位到達による流量減少、揚水試験中の地下水試料採取時の流量変動、試験時の制御不良などが考えられる。

このような変動流量型揚水に対応した井戸公式は、揚水流量の変動を Laplace 変換して導入することが可能である。例えば、参考文献^{2,3)}では変動流量を評価できるように揚水流量は基本流量 $Q_0[L^3/T]$ とこれに時間の関数である強度関数 $f(t)[-](0 \sim 1)$ を掛けたもので表現できるように誘導されている。しかし、この技法を適用する場合には揚水流量の経時変化が Laplace 変換できなければならない。一般に滑らかな変化であれば Laplace 変換のトラブルは少ないと考えられ、観測される揚水流量データのスムージングも検討できる。しかし、スムージングしても後に逆 Laplace 変換が困難な場合もあることから、変動流量条件はより確実な方法で導入する方が望ましい。

そこで、変動流量であっても微小な時間間隔では一定とみなせる流量であり、さらに流量は段階的に変化すると考える。このケースの最も簡単な事例は定流量揚水後の回復過程の井戸公式である。このような流量変動のモデルは重ね合わせ理論によって解かれている。よって、ここでは重ね合わせ理論に基づく変動流量揚水公式の誘導を以下に検討する。

(1) 重ね合わせ理論による変動流量揚水公式

観測した揚水流量 $q(t)$ は変動しているが、短い時間内で一定流量条件として時間区間毎に異なる流量である、とモデル化する。このため、観測流量はこのモデル化できるほどの微小時間間隔で入手できるとする。しかしながら、実測でこれに対応することは困難であるため、観測データを内挿補間によって微小時間間隔に分割することでこれに対応する。

このようにモデル化すると、回復試験法の整理(変動区間・流量は 2 つ)に用いた重ね合わせ理論を多変動区間・時間条件での水位低下量の予測に用いることができる。

今、以下のような揚水流量が観測されたとする。

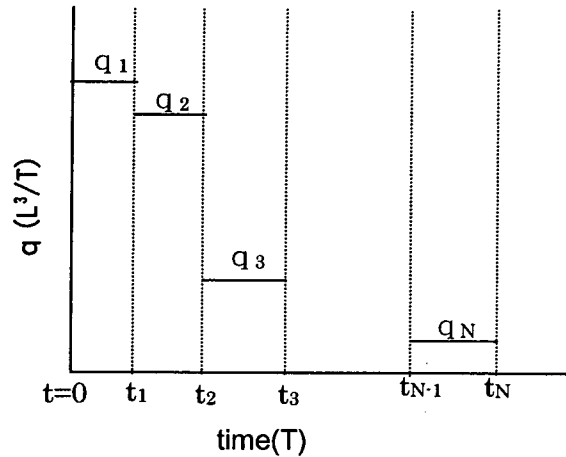


図 3.2.1 変動揚水流量のモデル化

重ね合わせ理論により水位低下量は次式によって求められる(Bear¹⁸⁾。

$$s = \frac{1}{4\pi T} [q_1 s_D(t_{D1}) + (q_2 - q_1) s_D(t_{D2}) + (q_3 - q_2) s_D(t_{D3}) + \dots + (q_N - q_{N-1}) s_D(t_{DN})] \quad (3.2.3)$$

$$= \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^N (q_i - q_{i-1}) s_D(t_{Di})$$

ここで、 $q_0=0$ 、 $t_0=0$

$$t_{Di} = \frac{T(t - t_{i-1})}{S r_w^2} \quad (3.2.4)$$

$s_D(t_D)$ は基本となる定流量揚水による水位変動の井戸関数

$$s_D(t_D) = 0 \quad \text{if } t_D \leq 0$$

さらに、Bear¹⁸⁾は式(3.2.3)を以下の形に展開した。

$$s = \frac{1}{4\pi T} \left[+q_1 \{s_D(t_{D1}) - s_D(t_{D2})\} + q_2 \{s_D(t_{D2}) - s_D(t_{D3})\} + \dots + q_{N-2} \{s_D(t_{DN-2}) - s_D(t_{DN-1})\} + q_{N-1} \{s_D(t_{DN-1}) - s_D(t_{DN})\} + q_N s_D(t_{DN}) \right]$$

$$= \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^N q_i \{s_D(t_{Di}) - s_D(t_{Di+1})\} \quad (3.2.5)$$

(3.2.3)式と(3.2.5)式は同じものである。しかし、長時間経過後では評価する時間における比較的早い時間区間 t_{Di} と t_{Di+1} がほぼ同じ値となり、さらにこれらに対応した井戸関数 s_D 値も大きな t_D に対してはわずか時間間隔ではほぼ同一の値を示す。例えば揚水開始後 1(s)程度の時間間隔は 1 日(86400(s))経過後には、時間差 1(s)は変わらないが、86400(s)と 86401(s)の時間であり、これらの時間差に対する s_D 値には有意な差がみられなくなる。つまり、このような場合には、(3.2.5)式は早い時間区間の計算を無視することができ効率的である。また、このことはある時間での流量変動の影響は長時間経過後には見られなくなることをも示している。

尚、変動流量型揚水公式として関数 $s_{VD}(V: \text{variable})$ を定義し、(3.2.5)式を以下と表記する。

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} s_{VD} \quad (3.2.6)$$

$$\text{ここで、} \quad s_{VD} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{Q_0} \{s_D(t_{Di}) - s_D(t_{Di+1})\} \quad (3.2.7)$$

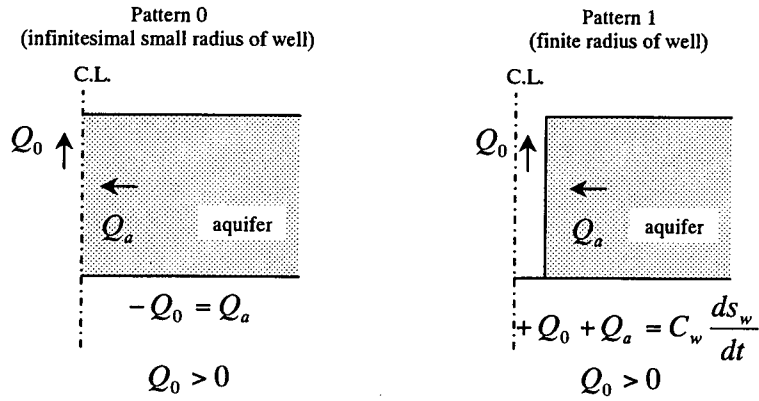
(2)基本井戸関数

基本となる井戸関数 s_D は定流量揚水条件および線形性(重ね合わせが適用できる)を満たせばよい。種々の公式は参考文献 19,2,3)に整理されているので活用できる。これらは全て理論解であるが重ね合わせができるという条件を満たすならば、理論解の誘導し難い複雑な条件下でも対応する数値解を井戸公式として用い、所定時間における水位低下量を内挿補間で評価することもできる。

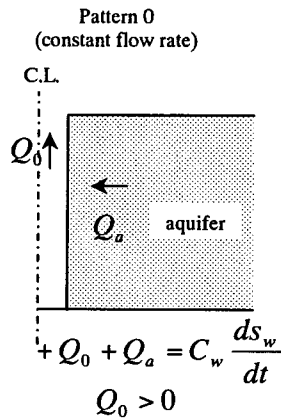
井戸関数の理論解について、図 3.2.2 に帯水層の水理境界条件の一覧図、表 3.2.1 にこれら境界条件の一覧、表 3.2.2 に Laplace 変換場での井戸公式の係数項としてまとめた。所定の境界条件に対する Laplace 変換場での $\overline{s_D}$ 解の係数 C_1, C_2 を選び、数値逆 Laplace 変換によって所定の時間 t_D に対する s_D 値を求める。この方法については文献 2)に詳細が示されている。

また、ここで示した井戸公式はポンプ流量 Q_P が一定としたものである。SW 試験では $Q_P=0$ であり、孔内水位変動から湧水流量 q (図 3.2.2 中 Q_a)を評価し、 q の変動に対する水位挙動を評価しなければならない。このため、井戸貯留項は既に考慮したことから、有限井戸径 $r_w \neq 0$ 、井戸貯留項 $C_w=0$ のモデルで揚水流量 Q_P を q に置き換えて用いればよい(表 3.2.1 および表 3.2.2 中の II-1-2 有限井戸半径定流量揚水)。

I. pumpingwell structures

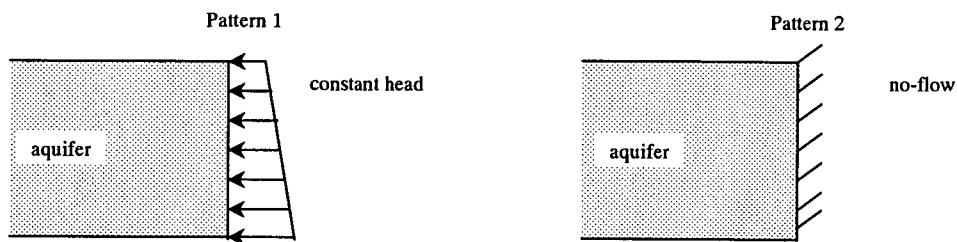


II. pumping condition

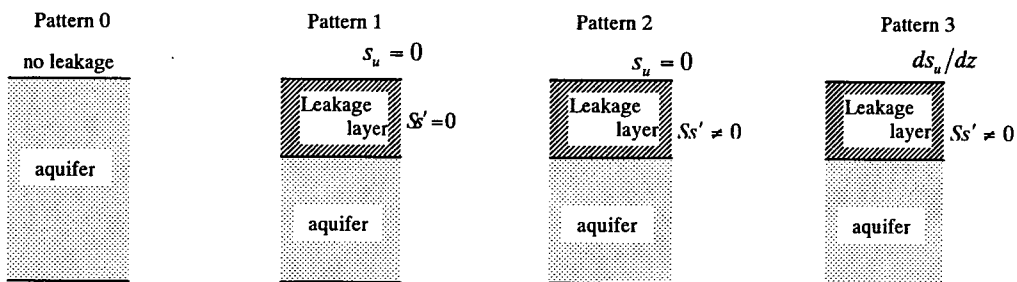


III. lateral extension boundary

infinite $r = \infty$ or finite $r = R$



IV. leakage conditions



s_u : drawdown at the upper face of leakage layer

図 3.2.2 帯水層モデル条件の分類

表-3.2.1 境界条件一覧表

	II-1-1 : 無限小井戸半径定流量揚水	II-1-2 : 有限井戸半径定流量揚水※
I-1-1 無限遠方 定水位	$s(r \rightarrow \infty, t) = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=0} = -Q_0$	$s(r \rightarrow \infty, t) = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=r_w} - C_w \frac{ds_w(t)}{dt} = -Q_0$
I-1-2 無限遠方 不透水	$\frac{ds(r \rightarrow \infty, t)}{dr} = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=0} = -Q_0$	$\frac{ds(r \rightarrow \infty, t)}{dr} = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=r_w} - C_w \frac{ds_w(t)}{dt} = -Q_0$
I-2-1 有限距離 定水位	$s(r = R, t) = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=0} = -Q_0$	$s(r = R, t) = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=r_w} - C_w \frac{ds_w(t)}{dt} = -Q_0$
I-2-2 有限距離 不透水	$\frac{ds(r = R, t)}{dr} = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=0} = -Q_0$	$\frac{ds(r = R, t)}{dr} = 0$ $2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big _{r=r_w} - C_w \frac{ds_w(t)}{dt} = -Q_0$

※(3.2.1)or(3.2.2)式で湧水流量 q を評価した場合は、 $Q_0=q$ 、 $C_w=0$ とする。

表-3.2.2 定数項一覧表： $\overline{s_D(r_D, p)} = [c_1 K_0(\lambda r_D) + c_2 I_0(\lambda r_D)] \overline{f_D}$

	Ⅱ・1・1：無限小井 戸半径定流量揚水	Ⅱ・1・2：有限井戸半径定流量揚水※
I・1・1 無限遠方 定水位	I・1・1×Ⅱ・1・1 $c_1 = 2, c_2 = 0$	I・1・1×Ⅱ・1・2 $c_1 = \frac{2}{\{\lambda K_1(\lambda) + p K_0(\lambda)/2\alpha\}}, c_2 = 0$
I・1・2 無限遠方 不透水	I・1・2×Ⅱ・1・1 $c_1 = 2, c_2 = 0$	I・1・2×Ⅱ・1・2 $c_1 = \frac{2}{\{\lambda K_1(\lambda) + p K_0(\lambda)/2\alpha\}}, c_2 = 0$
I・2・1 有限距離 定水位	I・2・1×Ⅱ・1・1 $c_1 = 2$ $c_2 = \frac{-2K_0(\lambda R_D)}{I_0(\lambda R_D)}$	I・2・1×Ⅱ・1・2 $c_1 = \frac{2}{-\{p I_0(\lambda)/2\alpha - \lambda I_1(\lambda)\} K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D) + \{\lambda K_1(\lambda) + p K_0(\lambda)/2\alpha\}}$ $c_2 = \frac{-2K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D)}{-\{p I_0(\lambda)/2\alpha - \lambda I_1(\lambda)\} K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D) + \{\lambda K_1(\lambda) + p K_0(\lambda)/2\alpha\}}$
I・2・2 有限距離 不透水	I・2・2×Ⅱ・1・1 $c_1 = 2$ $c_2 = \frac{2K_1(\lambda R_D)}{I_1(\lambda R_D)}$	I・2・2×Ⅱ・1・2 $c_1 = \frac{2}{\{p I_0(\lambda)/2\alpha - \lambda I_1(\lambda)\} K_1(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D) + \{p K_0(\lambda)/2\alpha + \lambda K_1(\lambda)\}}$ $c_2 = \frac{2K_1(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D)}{\{p I_0(\lambda)/2\alpha - \lambda I_1(\lambda)\} K_1(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D) + \{p K_0(\lambda)/2\alpha + \lambda K_1(\lambda)\}}$

ここで、定量揚水時： $\overline{f_D} = \frac{1}{p}$

※(3.2.1)or(3.2.2)式で湧水流量 q を評価した場合は、 $1/\alpha=0$ とする。

図 3.2.3 に $r_w \neq 0, C_w = 0$ 井戸による揚水時の水位低下標準曲線を示す。 $t_D > 10$ では Theis の標準曲線に一致しているが、早い時間および井戸からの離れ r が井戸径 r_w の 20 倍以下 ($r_D < 20$) では Theis 曲線とは一致しない²⁰⁾。単孔式透水試験では $r_D = 1$ の曲線を用いる。

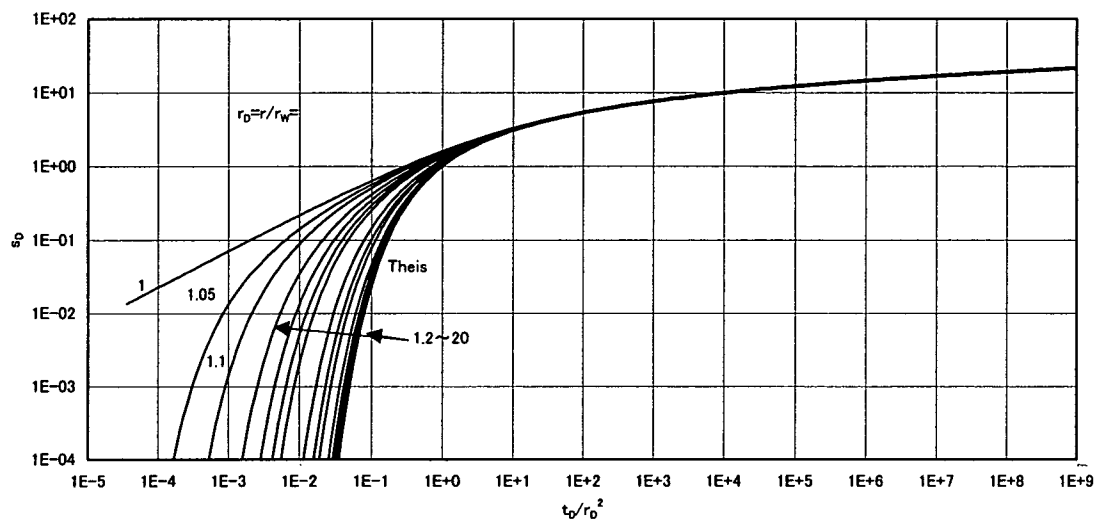


図 3.2.3 $r_w \neq 0, C_w = 0$ 井戸による定流量揚水時の水位低下標準曲線

3.2.3 スラグ試験および回復試験への適用

(3.2.5)式による SW 試験の再現性を検証する。

(1) 湧水流量の計算

SW 試験結果として Cooper らの誘導した理論水位低下量から湧水流量 q を評価する。理論水位低下量は無次元時間 t_D と正規化水位低下量 h_D および貯留比 α によって表されることから、以下の関係式から地山からの湧水流量 q を求めた。

$$q = C_w \frac{ds_w}{dt} = C_w \frac{s_0 T}{Sr_w^2} \frac{dh_D}{dt_D} = \frac{\pi s_0 T}{\alpha} \frac{dh_D}{dt_D} \quad (3.2.8)$$

$$\text{ここで、 } t_D = \frac{Tt}{Sr_w^2}, \quad h_D = \frac{s}{s_0}, \quad \alpha = \frac{\pi r_w^2 S}{C_w} \quad (3.2.9)$$

これを基本公式 (3.2.7) に代入する。

$$s_{VD} = \sum \frac{q_i}{Q_0} \{s_{Di} - s_{Di+1}\} = \sum \frac{1}{Q_0} \frac{\pi s_0 T}{\alpha} \frac{dh_D}{dt_D} \{s_{Di} - s_{Di+1}\} \quad (3.2.10)$$

ここで、

$$s_{Di} = s_D(t_{Di}), \quad t_{Di} = \frac{T(t - t_{i-1})}{Sr_w^2} \quad (3.2.11)$$

よって、

$$\frac{s}{s_0} = \frac{Q_0 s_{VD}}{4\pi T s_0} = \sum \frac{1}{4\alpha} \frac{dh_D}{dt_D} \{s_{Di} - s_{Di+1}\} \quad (3.2.12)$$

ここで、Cooper ら誘導した SW 試験時の理論水位低下量 s/s_0 は文献 1) に示される方法によって計算した。図 3.2.4 に地山湧水流量 q の変動を示す。ここで、 q は(3.2.8)式を用いて計算した。ただし、 T および s_0 はいずれも 1 単位とした。

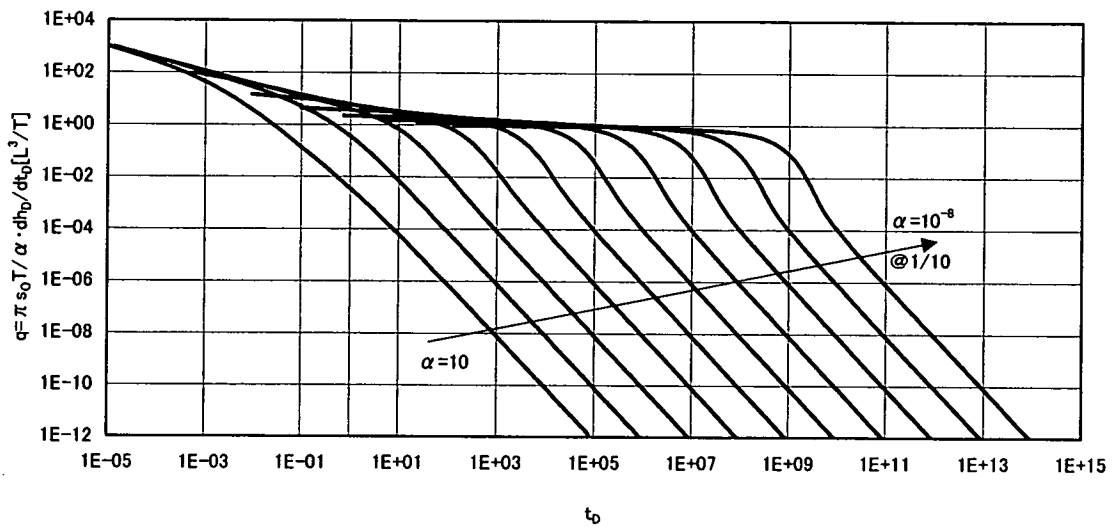


図 3.2.4 スラッグ試験時の湧水流量 q の計算結果

(2) スラッグ試験のシミュレーション

この変動流量 q により、式(3.2.6)による水位低下量の計算結果を s/s_0 として図 3.2.5 に示した(ここで、基本流量は 1 単位とした)。

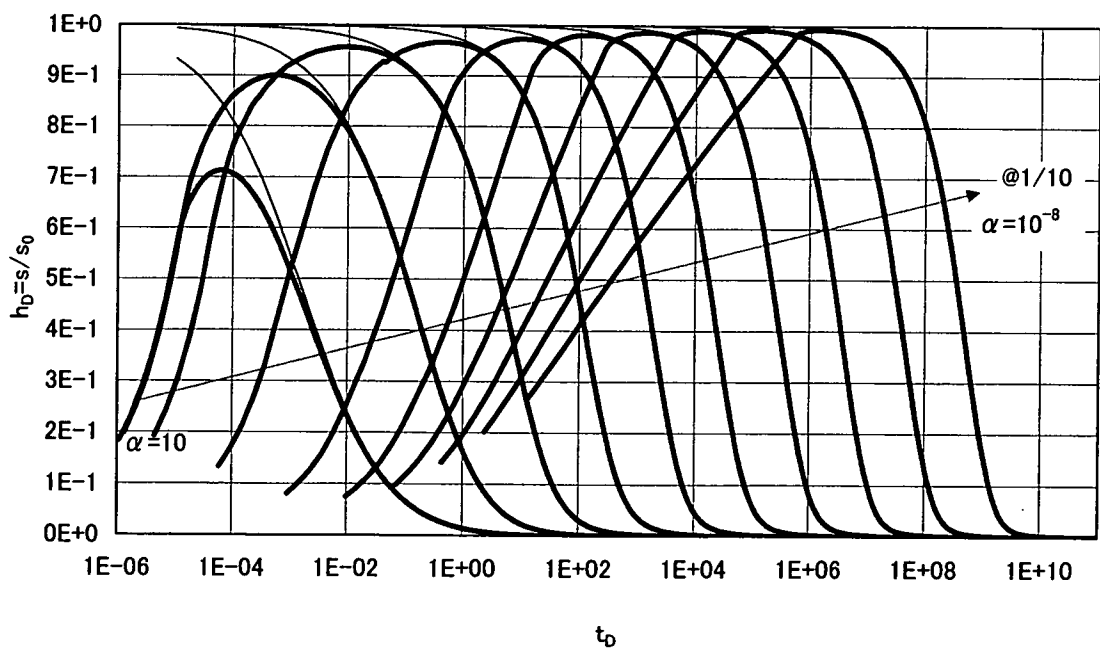


図 3.2.5 スラッグ試験時の水位変動結果の再現性

図 3.2.5 では、細線が理論水位低下量、太線が(3.2.12)式で計算したものであり、どのケースにおいても試験開始後の比較的早い時間では初期水位低下量 s_0 近傍の値を再現することができないが、ある程度時間が経過し初期水位差から 10%程度の回復 ($h_D = s/s_0 > 0.9$)以降はスラグ試験の挙動を再現できている。尚、 α が大きな値(≥ 1 、井戸貯留小、あるいは地山の貯留大)のケースではこの限りではない。これは (3.2.8)式の適用時点で既に有意な低下水位の回復が認められ、これより早い時間の水位回復過程とこれに伴う湧水流量の把握がなされていないことが、他より再現性の劣る原因と考えられる。

このように、完全な再現性には問題はあるが、ここで議論となる「ある程度スラグ試験が進行してからの shut-in 試験」での検討には十分な精度を表していると評価できる。また、ここで再現性が特に悪いケース(α が大きい)も認められたが、SW 試験の回復に時間を要するケースは α 値が比較的小さいものであるため、SWS 試験の前段階の SW 試験としては十分な再現性を示していると考ええる。

以上の考察から、 $s/s_0 > 0.9$ であれば変動型揚水流量公式で SW 試験での水位低下量を再現できる。shut-in 後には変動揚水流量 $q(t)=0$ を導入することで、SW 試験から SWS 試験を連続的に再現できる。

3.3 SWS 試験結果の解析法

SW 試験後の SWS 試験結果の解析法の妥当性を評価する。評価対象とする解析法は揚水試験後の回復試験に適用する Theis(Horner)であるが、揚水停止時間と揚水流量を修正して用いる。この修正方法が提案されており、この方法の妥当性を検証する。

3.3.1 解析方法

(1) 手法 1⁸⁾

この手法は、SW 試験開始後の総湧水量 V_P を shut-in 時の瞬間流量 q_P で除し、近似揚水時間 t_P^* を次式によって評価する方法である。

$$t_P^* = \frac{V_P}{q_P} \quad (3.3.1)$$

V_P : shut-in までの総湧水量, [L³]

q_P : shut-in 直前の湧水流量, [L³/T]

t_P^* : 近似 shut-in 時間, [T]

ここで、 V_P は shut-in までの湧水流量から評価すればよいが、ここではより簡単に、shut-in 時の井戸内水位から評価することができる。

$$V_P = \int_0^{t_P} q(t) dt = C_W (s_{W0} - s_{WP}) \quad (3.3.2)$$

ここで、

s_{W0} : スラッグ試験のインパクト水位低下量, [L]

s_{WP} : shut-in 時の水位低下量, [L]

C_W : 試験構内水位変動区間面積(井戸貯留項), [L²]

t_P : 実際のパルプ停止時間, [T]

また、shut-in 時の湧水流量 q_P は(3.2.2)式による。この方法によって求められた近似時間 t_P^* は停止時の流量 q_P で定流量揚水した時の揚水総量を shut-in までの総湧水量に一致させたものである。

この方法では、一定流量 q_P による揚水を $t=t_P^*$ で停止し、その後の回復試験結果として SWS 試験結果を解析する。解析は以下の Theis(Horner)法によるものが文献⁸⁾では提案されている。shut-in 後の経過時間を t' で表すと、一定流量による揚水過程からの経過時間 $t=(t_P^*+t')$ で表される。横軸対数軸 $\log(t/t')$ - 縦軸水位低下量 s をプロットすると、 $t/t'=1$ 近傍で直線分布が見られ、この直線勾配を Δs とすると、次式から透

水量係数 T が算定できる。

$$T = \frac{2.306 q_P}{4\pi \Delta s} \quad (3.3.3)$$

また、Agarwal 法では、時間軸は対数(t_P^*t/t)軸をとり、水位低下量軸は $s_r(=s_0-s)$ をとる。この軸上でのプロットは $s=0(s_r=s_0)$ 付近で直線を示すと考えられ、この直線勾配 Δs_r と、この外挿直線が $s_r=0$ 軸と交差する時間軸切片値($t_P t'/t$) $_0$ を評価すると透水量係数を用いて貯留係数を算定する。以下に算定公式を示す。

$$T = \frac{2.3026}{4\pi \Delta s_r} q_P \quad (3.3.4)$$

$$S = 2.2458T \left\{ \frac{t_P^* t}{t'} \right\}_0 \quad (3.3.5)$$

(2) 手法 2⁸⁾

この方法では、次式を用いて揚水時間および揚水流量をそれぞれ近似化している。

$$t_P^* = 2 \left\{ t_P - \frac{\sum_{j=1}^N q_j (t_j^2 - t_{j-1}^2)}{2 \sum_{j=1}^N q_j (t_j - t_{j-1})} \right\} \quad (3.3.6)$$

$$q_P^* = \frac{1}{t_P^*} \sum_{j=1}^N q_j (t_j - t_{j-1}) \quad (3.3.7)$$

ここで、 N : shut-in 時間までのステップ変動流量区間数, [—]

q_P^* : 近似 shut-in 直前流量, [L³/T]

この式形では幾分分かり難いが、以下の様に簡略化できる。まず、 q と変動時間間隔の積の総和は次式のように shut-in 時間までの総湧水流量である。

$$\sum_{j=1}^N q_j (t_j - t_{j-1}) = \int_0^{t_P} q(t) dt = V_P \quad (3.3.8)$$

よって、(3.3.7)式は次式である。

$$q_P^* = \frac{V_P}{t_P^*} \quad (3.3.9)$$

また、式(3.3.6)は以下のように展開できる。

$$\begin{aligned} t_P^* &= 2 \left\{ t_P - \frac{\sum_{j=1}^N q_j (t_j^2 - t_{j-1}^2)}{2V_P} \right\} = 2 \left\{ t_P - \frac{\sum_{j=1}^N q_j (t_j - t_{j-1}) \left(\frac{t_j + t_{j-1}}{2} \right)}{V_P} \right\} \\ &= 2 \left\{ t_P - \frac{\sum_{j=1}^N q_j (t_j - t_{j-1}) t_{mj}}{V_P} \right\} \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

ここで、 t_{mj} は時間区間($t_{j-1} \sim t_j$)間の平均時間である。

この手法は近似化の手法の一つであると推察はできるが、物理的な意味合いについては出典文献⁹⁾にも説明がない。

解析は、手法1と同様に Theis(Horner)法では、透水量係数の算定式は次式を用いる。

$$T = \frac{2.306 q_P^*}{4\pi \Delta s} \quad (3.3.11)$$

また、Agarwal 法では以下である。

$$T = \frac{2.3026}{4\pi \Delta s_r} q_P^* \quad (3.3.12)$$

$$S = 2.2458T \left\{ \frac{t_P^* t}{t'} \right\}_0 \quad (3.3.13)$$

3.3.2 整合性の評価

(1) 試験データの整理

$\alpha=10^{-3}$ および $\alpha=10^{-8}$ の二ケースについて、スラグ試験後の shut-in 試験をシミュレートした。図 3.3.1 および図 3.3.2 にこれを示す。

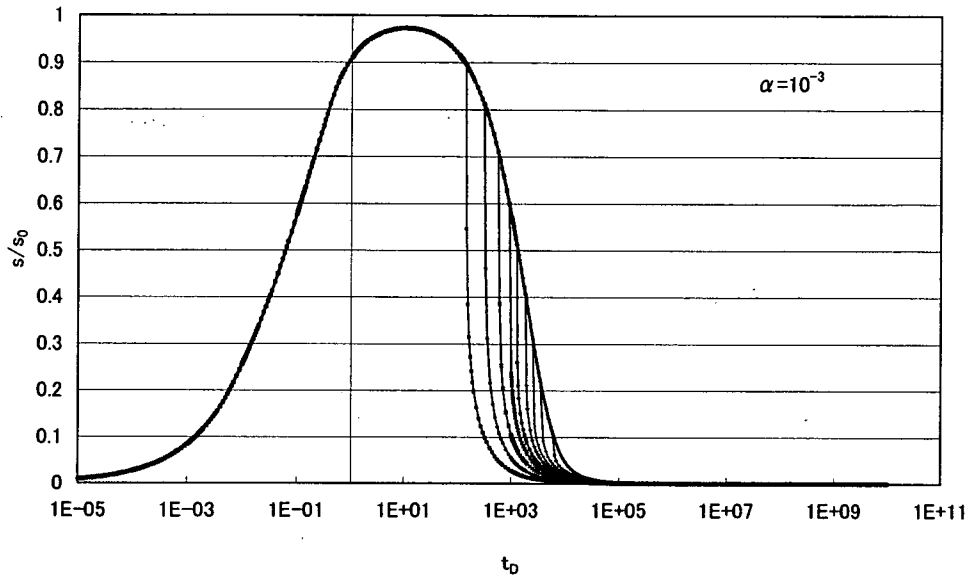


図 3.3.1 SW-SWS 試験のシミュレーション結果 ($\alpha=10^{-3}$)

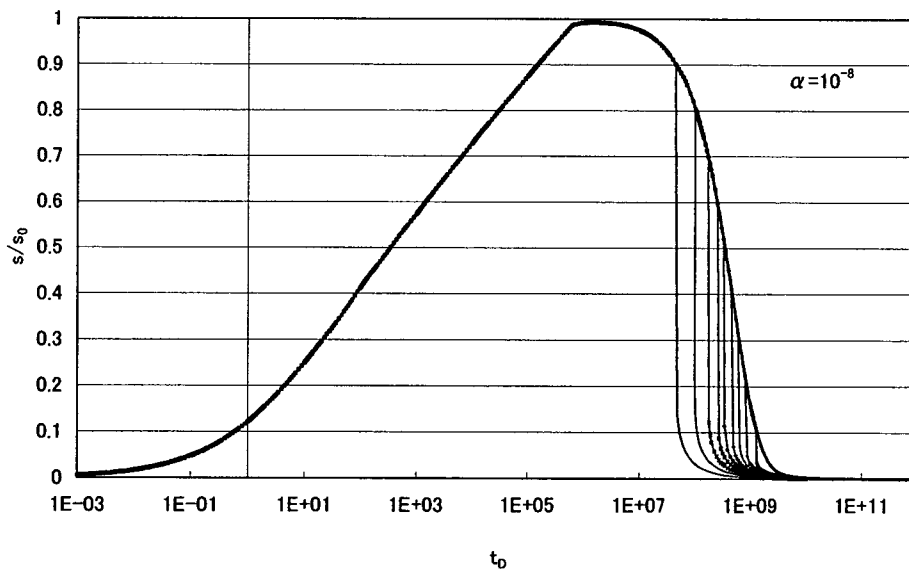


図 3.3.2 SW-SWS 試験のシミュレーション結果 ($\alpha=10^{-8}$)

上図の水位低下量の変動から各 SWS 試験は以下の条件で行ったとし、手法 1 および 2 による近似揚水停止時間 t_P^* を表 3.3.1 および表 3.3.2 にまとめた。

表. 3.3.1 SWS 試験条件 ($\alpha=10^{-3}$)

case	実測 s/s_0p	t_{pD}	qp/Q_0	t_{pD}^* (手法①)	t_{pD}^* (手法②)
s/so-0.9	0.887	135.9	1.815	178.5	153.2
s/so-0.8	0.806	316.2	1.417	431.0	360.0
s/so-0.7	0.699	584.3	1.108	853.4	677.8
s/so-0.6	0.593	926.1	0.8632	1481	1100
s/so-0.5	0.510	1259	0.6988	2200	1529
s/so-0.4	0.399	1848	0.5000	3772	2326
s/so-0.3	0.310	2512	0.3568	6073	3277
s/so-0.2	0.207	3687	0.2085	11940	5079
s/so-0.1	0.100	6310	0.07554	37410	9490

表. 3.3.2 SWS 試験条件 ($\alpha=10^{-8}$)

case	実測 s/s_0p	t_{pD}	qp/Q_0	t_{pD}^* (手法①)	t_{pD}^* (手法②)
s/so-0.9	0.900	4.642×10^7	0.6053	5.206×10^7	4.863×10^7
s/so-0.8	0.805	1.000×10^8	0.5164	1.189×10^8	1.068×10^8
s/so-0.7	0.698	1.711×10^8	0.4319	2.199×10^8	1.871×10^8
s/so-0.6	0.597	2.512×10^8	0.3592	3.522×10^8	2.817×10^8
s/so-0.5	0.503	3.415×10^8	0.2949	2.287×10^8	3.934×10^8
s/so-0.4	0.402	4.642×10^8	0.2281	8.233×10^8	5.534×10^8
s/so-0.3	0.299	6.310×10^8	0.1631	1.349×10^9	7.849×10^8
s/so-0.2	0.204	8.577×10^8	0.1054	2.379×10^9	1.122×10^9
s/so-0.1	0.109	1.259×10^9	0.05066	5.523×10^9	1.775×10^9

(2) Theis(Horner)法による解析

SWS 試験結果を Theis(Horner)解析法を用いて、手法 1 および手法 2 による近似 shut-in 時間、近似揚水流量を適用した解析を行った。また、比較のためこれら試験条件パラメータの近似を行わない場合についても同じ手法で解析した。図 3.3.3~5 に $\alpha=10^{-3}$ のケース、図 3.3.6~8 に $\alpha=10^{-8}$ のケースについて、Theis(Horner)プロットを示す。これらの図は、記号 A~C は以下のものである。

- A : 近似のない実停止時間 t_p を使用
- B : 手法 1 による近似 t_{p}^* を使用
- C : 手法 2 による近似 t_{p}^* を使用

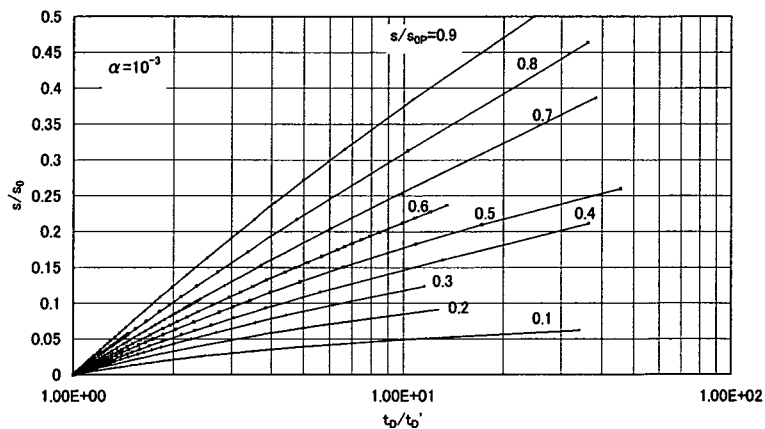


図 3.3.3 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット ($\alpha=10^{-3}$, A タイプ)

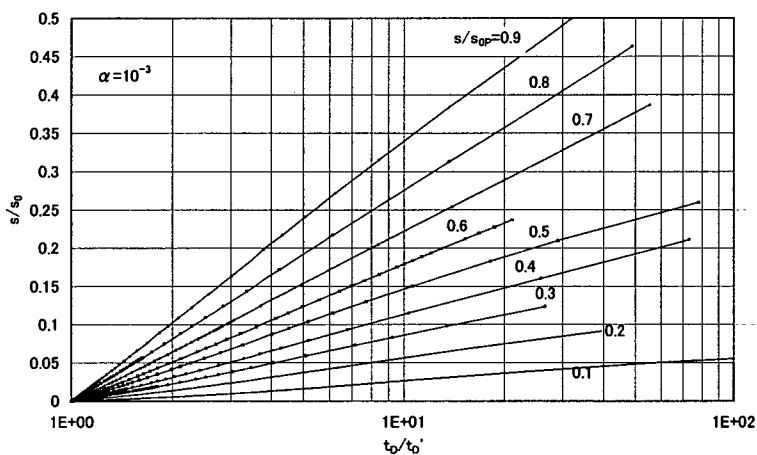


図 3.3.4 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット ($\alpha=10^{-3}$, B タイプ)

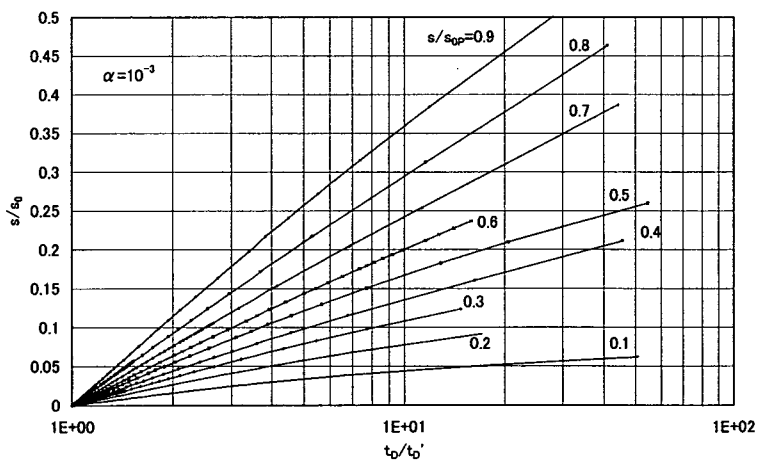


図 3.3.5 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット ($\alpha=10^{-3}$, C タイプ)

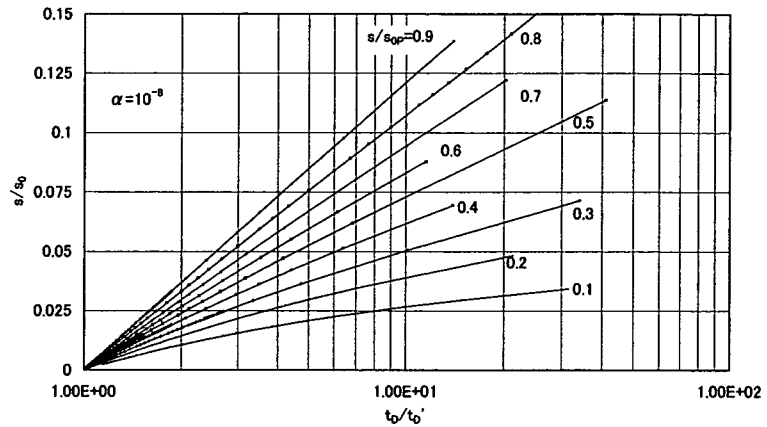


図 3.3.6 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット ($\alpha=10^{-8}$, A タイプ)

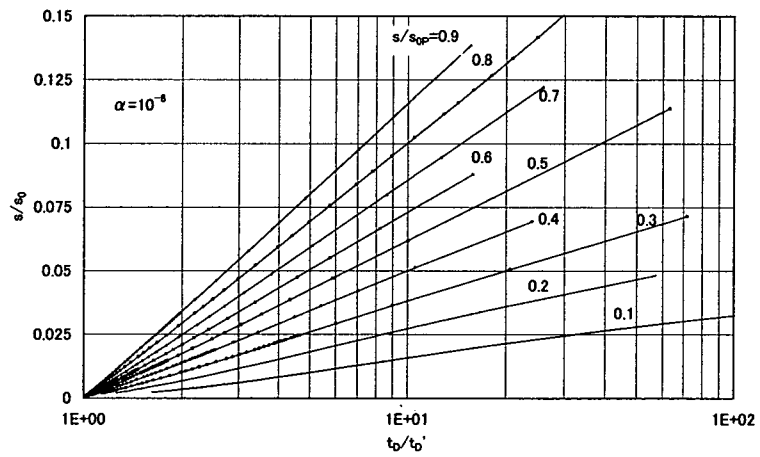


図 3.3.7 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット ($\alpha=10^{-8}$, B タイプ)

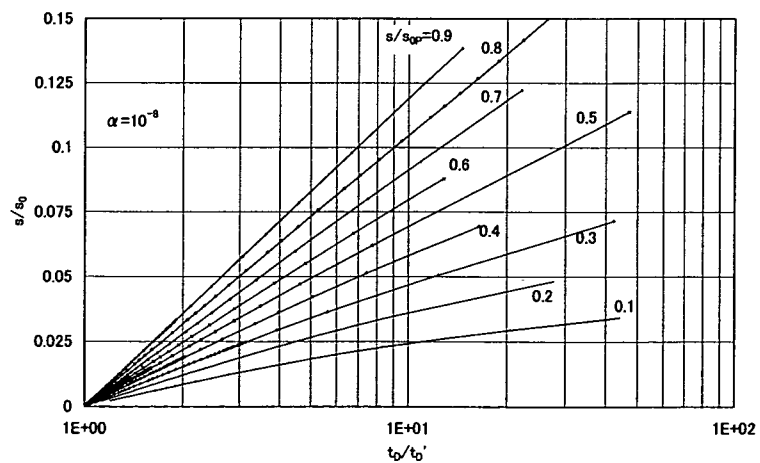


図 3.3.8 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット ($\alpha=10^{-8}$, C タイプ)

これらのプロットでは、B は直線であるが、A,C は若干上に凸の曲線を示すがほぼ直線とみなせる程度である。A,C については、 $t/t'=1$ 近傍で直線を評価した。

各ケースの解析結果を表 3.3.3 および 3.3.4 にまとめる。試験結果では $s_0=1$ 単位[L]、基本流量 $Q_0=1$ 単位[L³/T]とし、算定されるべき透水量係数は $T_{real}=1$ 単位[L²/T]としている

表 3.3.3 SWS 解析結果 ($\alpha=10^{-3}$)

case	A 解析			B 解析(手法 1) ($q_p:A$ に同じ)		C 解析(手法 2)		
	$q_p[L^3/T]$	$\Delta s[L]$	$T_A[L^2/T]$	$\Delta s[L]$	$T_B[L^2/T]$	$q_p^*[L^3/T]$	$\Delta s[L]$	$T_c[L^2/T]$
s/s ₀ -0.9	1.815	0.409	0.813	0.339	0.980	2.074	0.380	1.001
s/s ₀ -0.8	1.417	0.331	0.784	0.274	0.947	1.669	0.307	0.996
s/s ₀ -0.7	1.108	0.266	0.762	0.221	0.918	1.373	0.250	1.006
s/s ₀ -0.6	0.8632	0.226	0.699	0.177	0.893	1.143	0.203	1.031
s/s ₀ -0.5	0.6988	0.193	0.663	0.144	0.889	0.9874	0.177	1.022
s/s ₀ -0.4	0.5000	0.162	0.565	0.112	0.818	0.7940	0.144	1.010
s/s ₀ -0.3	0.3568	0.133	0.491	0.085	0.770	0.6457	0.116	1.019
s/s ₀ -0.2	0.2085	0.100	0.382	0.055	0.694	0.4769	0.089	0.981
s/s ₀ -0.1	0.07554	0.064	0.216	0.026	0.532	0.2883	0.0528	1.000

表 3.3.4 SWS 解析結果 ($\alpha=10^{-8}$)

case	A 解析			B 解析(手法 1) ($q_p:A$ に同じ)		C 解析(手法 2)		
	$q_p[L^3/T]$	$\Delta s[L]$	$T_A[L^2/T]$	$\Delta s[L]$	$T_B[L^2/T]$	$q_p^*[L^3/T]$	$\Delta s[L]$	$T_c[L^2/T]$
s/s ₀ -0.9	0.6053	0.121	0.918	0.115	0.964	0.6442	0.1189	0.992
s/s ₀ -0.8	0.5164	0.107	0.886	0.0993	0.952	0.5710	0.1042	1.004
s/s ₀ -0.7	0.4319	0.093	0.851	0.0853	0.927	0.5030	0.0914	1.008
s/s ₀ -0.6	0.3592	0.0827	0.797	0.0725	0.907	0.4441	0.0792	1.027
s/s ₀ -0.5	0.2949	0.0728	0.744	0.0616	0.877	0.3909	0.0628	1.030
s/s ₀ -0.4	0.2281	0.0617	0.679	0.050	0.835	0.3337	0.0579	1.055
s/s ₀ -0.3	0.1631	0.0506	0.592	0.0378	0.790	0.2747	0.0469	1.073
s/s ₀ -0.2	0.1054	0.0383	0.505	0.0274	0.704	0.2173	0.0360	1.105
s/s ₀ -0.1	0.05066	0.0265	0.351	0.0158	0.587	0.1531	0.0238	1.178

解析結果の T と設定した T_{real} の値の比を図 3.3.9 および図 3.3.10 に示す。

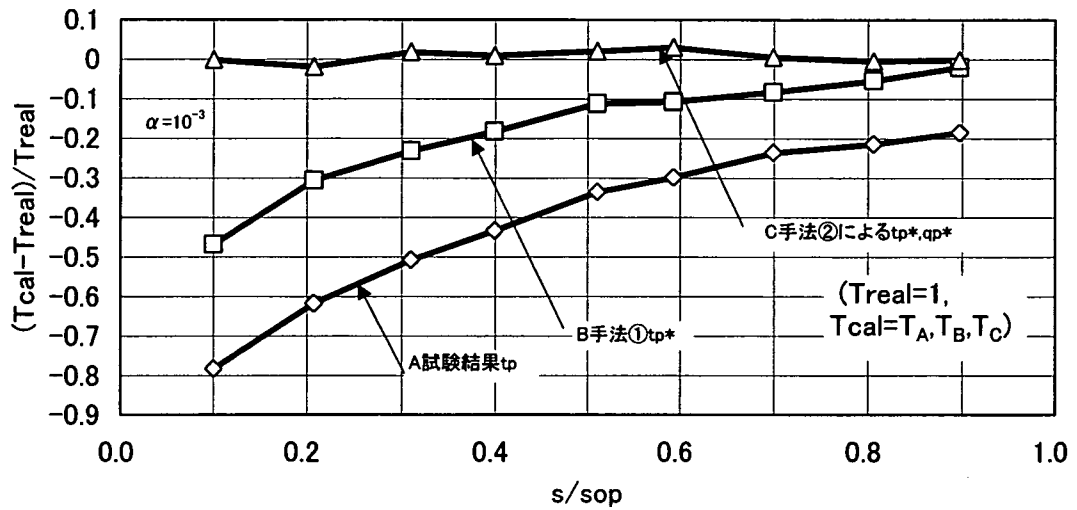


図 3.3.9 SWS 試験結果の Theis (Horner) 解析結果 ($\alpha=10^{-3}$)

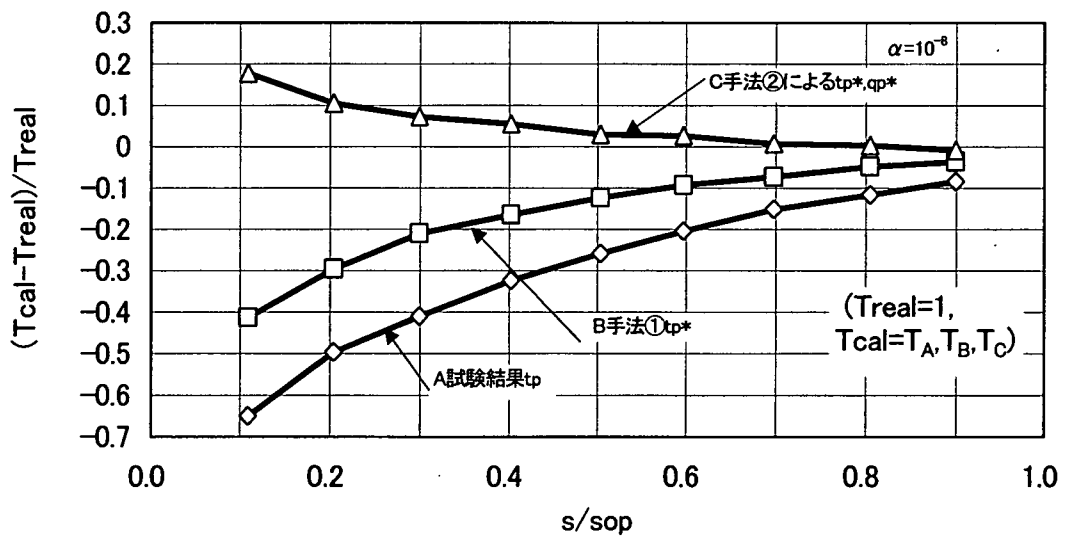


図 3.3.10 SWS 試験結果の Theis (Horner) 解析結果 ($\alpha=10^{-8}$)

全般的な傾向は、SW 試験はできるだけ早い時間(s/s_0 の大きな値)で停止し、SWS 試験に移行した方が良好な結果が得られる。各近似化手法の適用性については、以下のようである。

- ・何ら近似を行っていない A のケースでは一様に解析精度が悪く実用に供することは無理である。
- ・手法 1 によって揚水停止時間のみを近似する B のケースでは $s/s_0 > 0.6$ 程度で

SWS 試験を開始すれば、10%以下の誤差精度で透水量係数が評価できる。

- 手法2によって揚水停止時間、揚水流量のいずれも近似する C のケースでは総じて高い精度で解析できているが、 α が小さくなってくると小さな s/s_0 での精度が低下している。ここでも、 $s/s_0 > 0.6$ 程度で SWS 試験を開始すれば問題ないと考えられる。

(3) Agarwal 法による解析

Agarwal 法で整理した場合についても解析を試みた。図 3.3.11 および図 3.3.12 に手法 1 および手法 2 による近似揚水時間停止に対して整理したプロットを示す。ここでは新たに貯留係数の評価がなされる。データ作成時には貯留係数 S は 1 単位[-]、井戸径 r_w は 1 単位[L]とした。

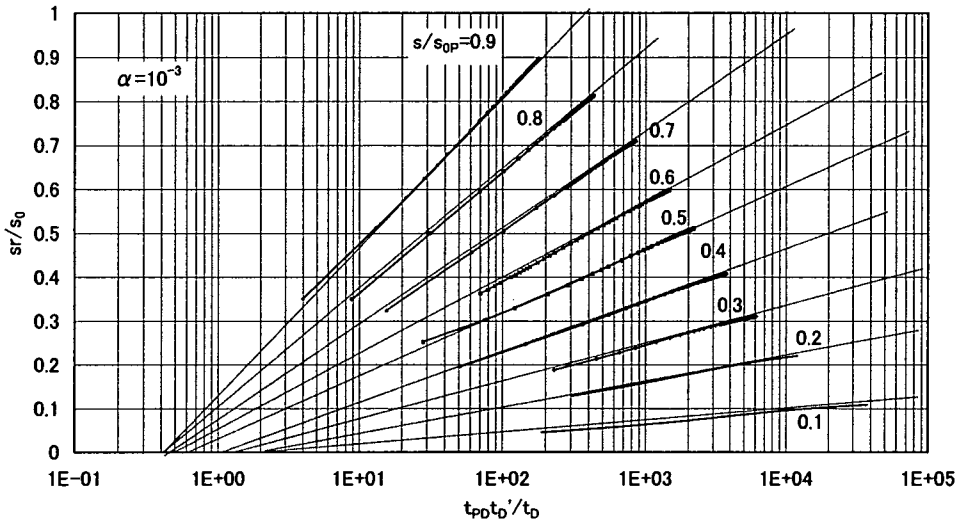


図 3.3.11 SWS 試験結果の Agarwal プロット ($\alpha=10^{-3}$, B タイプ)

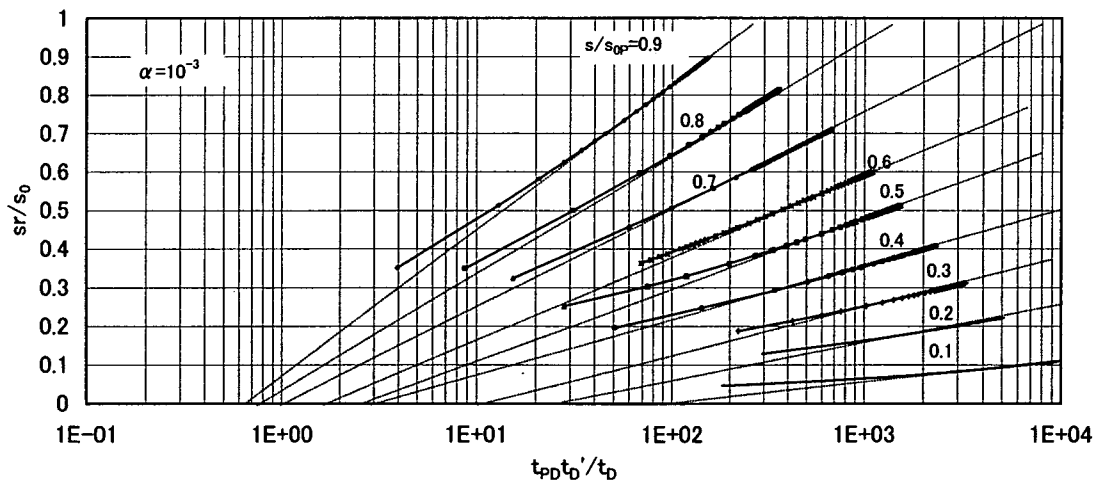


図 3.3.12 SWS 試験結果の Agarwal プロット ($\alpha=10^{-3}$, C タイプ)

表 3.3.5 SWS 解析結果(Agarwal 法, $\alpha=10^{-3}$)

case s/sop	B 解析(手法 1)					C 解析(手法 2)				
	qp [L ³ /T]	Δs [L]	T _B [L ² /T]	(tp _D t _D ' /td) ₀ [T]	S _B [-]	qp* [L ³ /T]	Δs [L]	T _C [L ² /T]	(tp _D t _D ' /td) [T]	S _C [-]
0.9	1.815	0.345	0.966	0.42	0.911	2.074	0.364	1.044	0.6	1.407
0.8	1.417	0.269	0.967	0.42	0.912	1.669	0.293	1.044	0.75	1.758
0.7	1.108	0.216	0.940	0.45	0.950	1.373	0.249	1.010	0.95	2.155
0.6	0.8632	0.164	0.964	0.5	1.082	1.143	0.213	0.983	1.7	3.753
0.5	0.6988	0.138	0.928	0.64	1.334	0.9874	0.169	1.070	2.2	5.287
0.4	0.5000	0.121	0.757	1.2	2.040	0.7940	0.142	1.024	2.9	6.669
0.3	0.3568	0.082	0.797	1.4	2.506	0.6457	0.129	0.917	10	20.59
0.2	0.2085	0.060	0.637	2.2	3.147	0.4769	0.089	0.982	25	55.14
0.1	0.07554	0.030	0.462	2.2	2.283	0.2883	0.053	0.997	80	179.1

透水量係数の算定結果については、Theis(Horner)法と Agarwal 法ではいずれも同程度の結果を算定しており、ここでも C 解析(手法 2 による近似化)の方が B 解析(手法 2 による近似化)よりも精度が良い傾向を示している。しかし、貯留係数については、B 解析の方が精度よい傾向を示している。

(4) 整合性の評価

まとめると以下のようなものである。

- 1) 概して、 s/s_{OP} 値が大きい(スラグ試験の回復率が小さい)場合の方が、shut-in 後の回復試験結果は良好に解析されている。
- 2) 透水量係数の解析精度は、手法 2 による揚水停止時間および揚水流量の近似化のほうが、手法 1 による揚水停止時間の近似化よりも高い精度であり、揚水停止回復比 s/s_{OP} の変化に対しても安定している。しかし、小さな水位回復比では精度の低下傾向が認められる。
- 3) s/s_{OP} が大きい場合には、手法 1 による近似も適切な精度を示している。
- 4) Theis(Horner)法と Agarwal 法の比較では、透水量係数の精度はこれらの解析法の両者に遜色はなく、手法 1、2 の違いについても同様の傾向である。しかし、貯留係数の解析精度は、手法 1 の方が幾分良好である。

基本的に停止時間を近似化するこれらの手法を用いているため、Agarwal 法のように停止時間 t_P が貯留係数の評価に大きく関与してくる方法では適合性については理論的な観点から課題があると思われる。

ここでの解析結果に加えて以下の知見もみられる。

- 5) SWS 試験結果を Jacob-Cooper の直線近似に基づいた解法をする場合(Theis や Honor の回復式、Agarwal の回復式を用いる場合)、直線近似できることが前提である。このことから、 α の大きな場合に見られる比較的早い時間に試験下終了してしまうケースにはこれらの回復公式の適用は不適である。
- 6) 参考文献 2) に示されるように、SW 試験は少なくとも $s/s_o < 0.5$ の範囲では SW 試験結果の解析が適切に行われない場合が多い。この観点から SWS 試験は $s/s_{OP} > 0.6$ では解析精度が悪化する傾向にあることから、 $s/s_{OP} = 0.5$ 前後で shut-in する必要があると考えられる。尚、この考察は SW 試験結果を有効に解析できるという場合である。

3.4 実測データの解析事例

MIU-4 号孔で実施された SWS 試験結果の解析を試みる。MIU-4 号孔は斜孔であるが、斜孔における水理試験結果解析方法は確立されていないことから、本解析では鉛直孔での試験結果として扱うこととする。

3.4.1 事前評価

水理試験はインターバル No.1~12 までの 12 区間で実施されている。この中で、SWS 試験が実施されているのは表 3.4.1 に示すものである。

表 3.4.1 MIU-4 号孔における SWS 試験の実施状況

No.	内 容	評 価
1	1 ケース実施	×
2	2 ケース実施、スラグインパクトの大きい SWS2 を採用	○
3	2 ケース実施	×
4	2 ケース実施	×
5	実施されず	—
6	2 ケース実施、	×
7	実施されず	—
8	実施されず	—
9	1 ケース実施	○
10-1	1 ケース実施	○
10-2	1 ケース実施	○
11	1 ケース実施	○
12	1 ケース実施	○

表中に示した評価は SWS 試験結果として採用できるか否かを表している。以下に SWS 実施のあったもので不適(表中×印)とした理由を示す。

(1) NO.1

SW(スラグ試験)段階で、約 1 日間(8996sec)の観測行い、その後 shut-in している。この段階で、12cm 程度の回復を示している($s/s_0=0.99$)。これまでの理論的検討から、SWS 試験はできるだけ大きな s/s_0 段階で開始した方が良好な結果が得られることを示されている。しかし、このケースにおける水圧観測値はスラグ投入時に 0.2991MP であり、shut-in 時に 0.3003MP となっており、観測最小桁である小数第 4 位の値が主に変動したに過ぎない(増分 0.0012MP)。このような水位変動データから孔内湧水流量を計算することは信頼性に乏しく、解析には不適と判断した。

(2) No.3

SW 試験時に、孔内外の初期水位差がつくまで無視できない時間を要している。SW 試験そのものの不適という側面もあるが、変動揚水流量を基本手法とした誘導に基づく SWS 試験結果の考え方ではこのような SW 試験以降の SWS 試験を解析するこ

とに問題はない。しかし、これを実施するには SW 試験時のスラグとして孔内貯留水を取り除いた際のポンプ揚水流量等のインパクト情報が必要である。今回の試験ではこのデータは報告されていないことから、不適とした。

(3) No.4

No.3 と同様の評価である。

(4) No.6

全工程を通じて水圧の回復傾向が顕著であり、初期圧力状態に達していないのか、周辺変動の影響を受けたものか、と推測され試験結果として不適。

3.4.2 解析結果

SW 試験結果から、地山からの湧水流量は式(3.2.2)を用いて評価したが、SW 試験開始直後には孔内水位変動が小さく、わずかな変動であっても上昇すべき孔内水圧値(減少すべき水位差 s)が減少する(水位差 s が上昇する)現象がみられた。そこで、本解析では「前観測時間での圧力観測値から減少する場合には、減少した観測値を削除する」こととした。

図 3.4.1 に SW-SWS 試験のプロット、表 3.4.2 に試験条件の一覧を示す。

いずれの試験も初期水位差 s_0 の 50%程度の回復後に shut-in している。

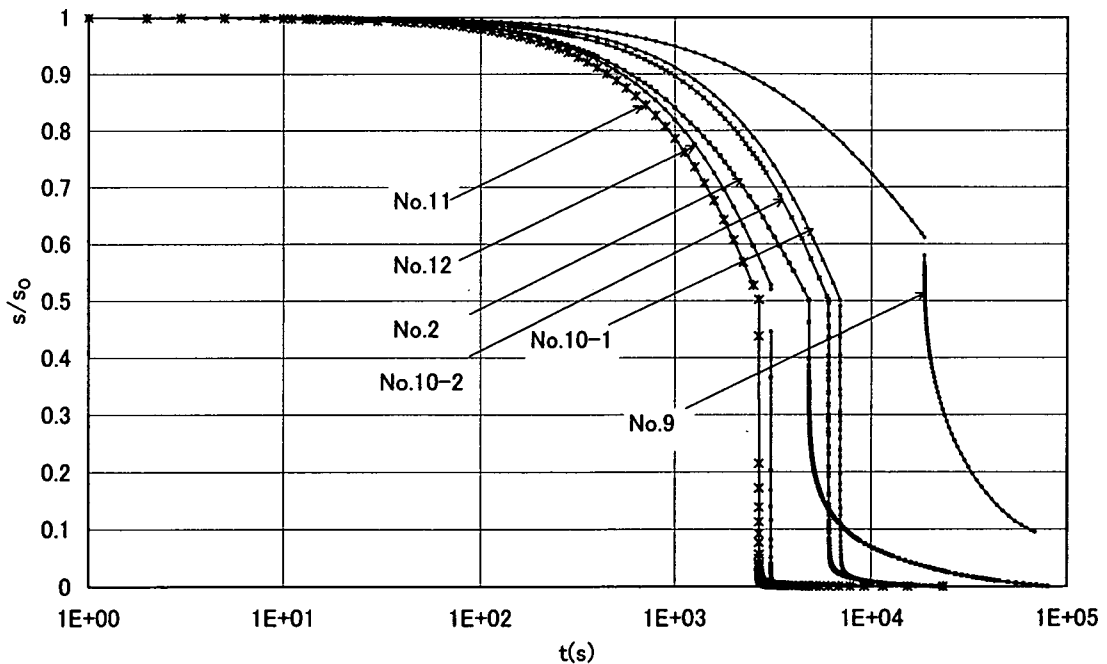


図 3.4.1 SW-SWS 試験結果のプロット

表 3.4.2 SW-SWS 試験条件一覧

No	項目	so(m)	tp(s)	sp(m)	sp/so
2	(SW2S)	19.64	4788	9.85	0.50
9	(SWS)	60.05	18460	36.72	0.61
10	1(SWS)	77.43	6856	38.83	0.50
10	2(SWS)	48.74	6010	24.40	0.50
11	(SWS)	50.99	2673	26.88	0.53
12	(SW1S)	50.03	3076	26.01	0.52

また、試験孔の構造はインターバル長以外はいずれの試験でも、

$$r_w=0.06\text{m}, r_c=0.0365\text{m}, C_w=\pi r_w^2=0.0042\text{m}^2$$

である。

図 3.4.2~7 に各 SW 試験時の累積湧水量 $V(\text{m}^3)$ と湧水流量 $q(\text{m}^3/\text{s})$ を、図 3.4.8~13 にケース毎の Theis(Horner)プロットを示す。尚、解析は 3.3.2(4)に示した考察から、Theis(Horner)方のみを実施する。

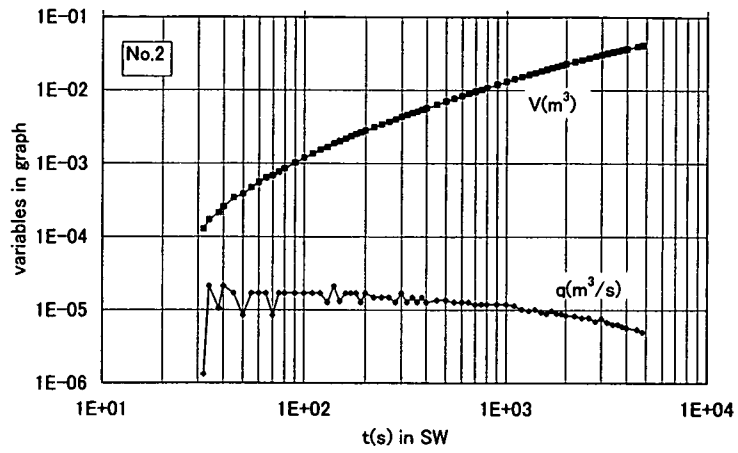


図 3.4.2 SW 試験時の累積湧水流量 (V) と湧水流量 (q) の変動 (No. 2)

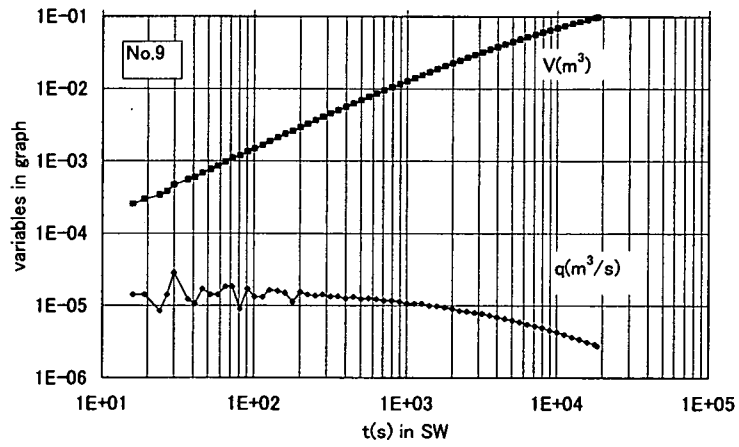


図 3.4.3 SW 試験時の累積湧水流量 (V) と湧水流量 (q) の変動 (No. 9)

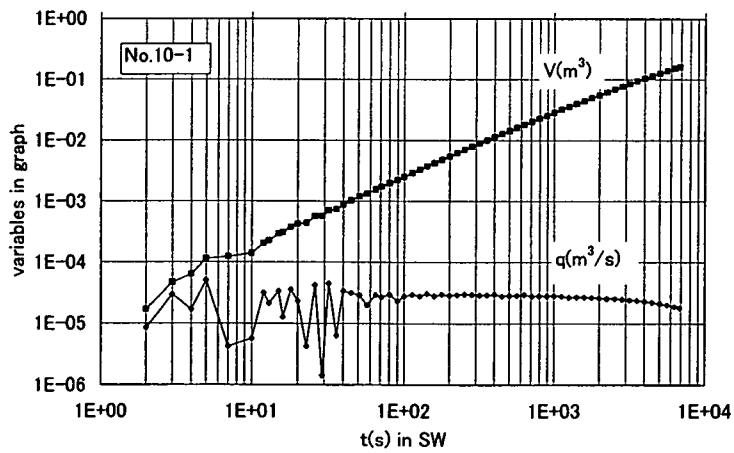


図 3.4.4 SW 試験時の累積湧水流量 (V) と湧水流量 (q) の変動 (No. 10-1)

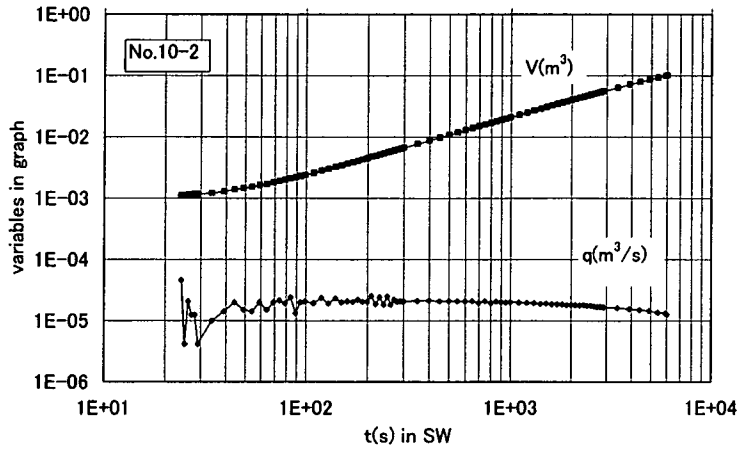


図 3.4.5 SW 試験時の累積湧水流量 (V) と湧水流量 (q) の変動 (No. 10-2)

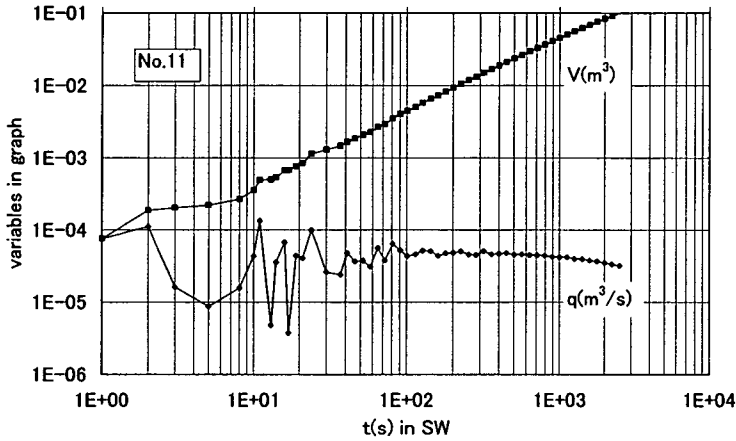


図 3.4.6 SW 試験時の累積湧水流量 (V) と湧水流量 (q) の変動 (No. 11)

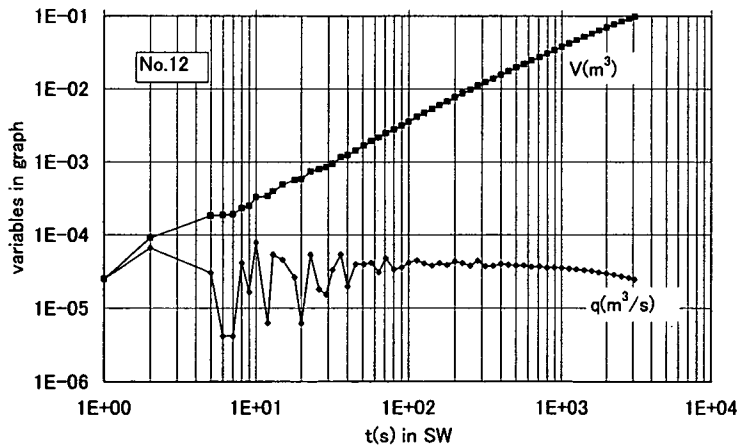


図 3.4.7 SW 試験時の累積湧水流量 (V) と湧水流量 (q) の変動 (No. 12)

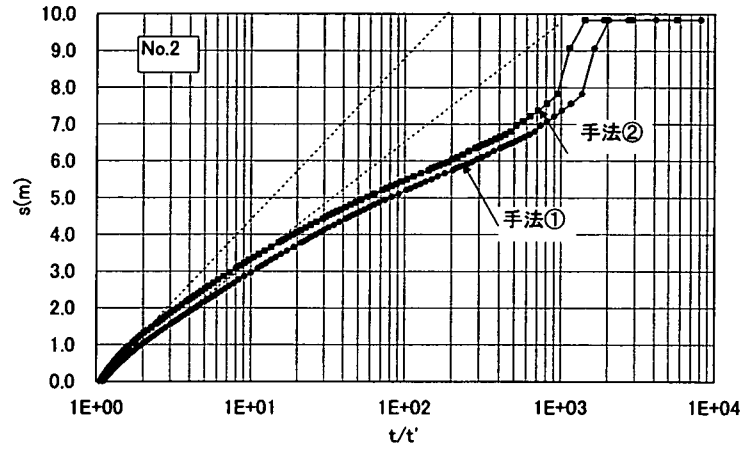


図 3.4.8 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット (No. 2)

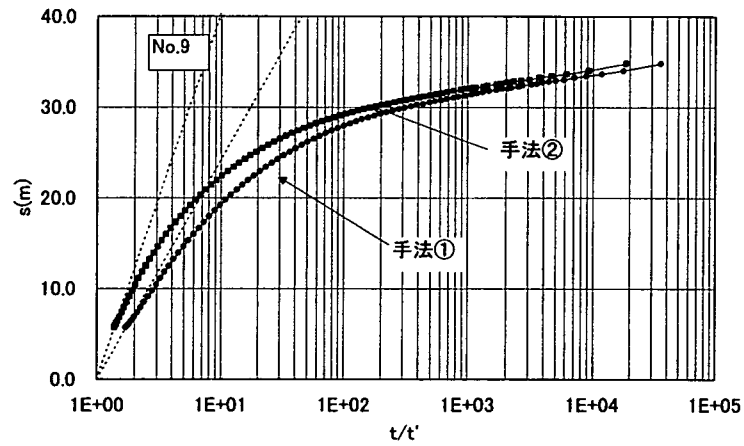


図 3.4.9 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット (No. 9)

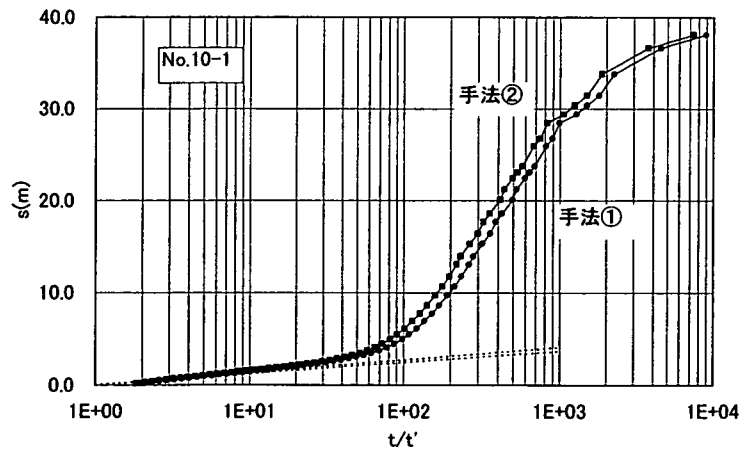


図 3.4.10 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット (No. 10-1)

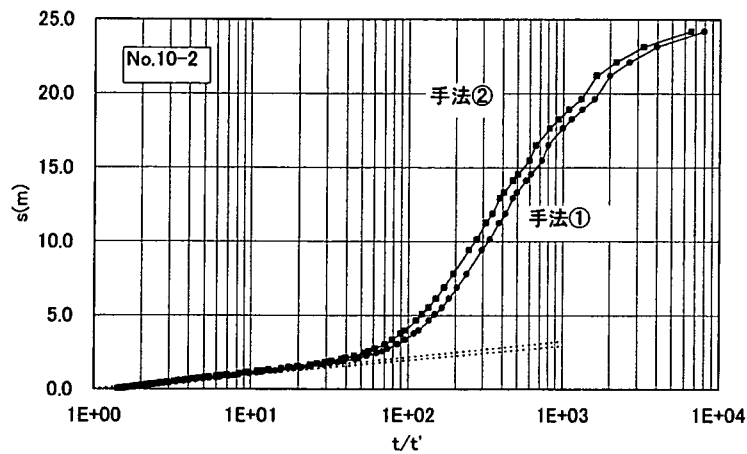


図 3.4.11 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット (No. 10-2)

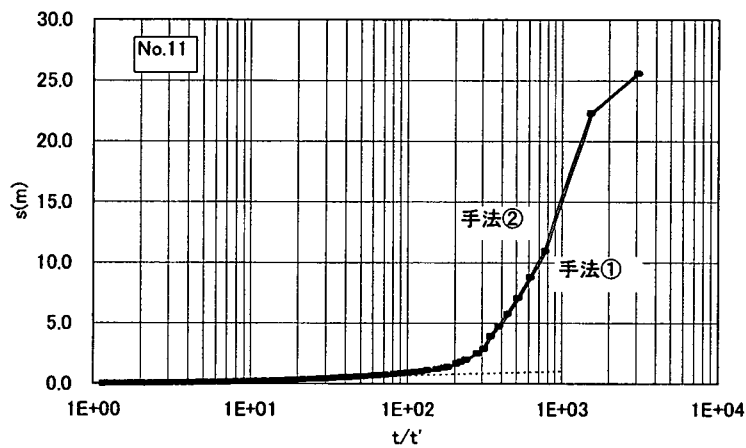


図 3.4.12 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット (No. 11)

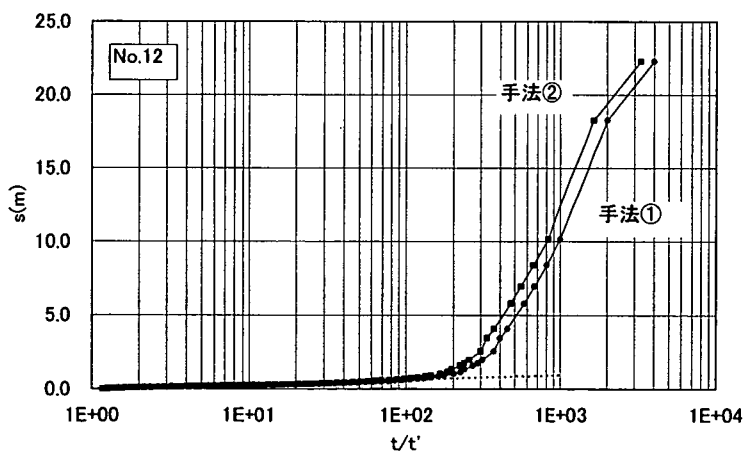


図 3.4.13 SWS 試験結果の Theis (Horner) プロット (No. 12)

解析では、3.3.1 で解説した手法1および2の方法に従って等価停止時間 t_p^* および等価揚水流量 q_p^* を設定したものを示した(手法1の q_p^* は shut-in 時の湧水流量)。いずれも、原点($\log(t/t')$, s)=(0,0)近傍でのプロットの直線部を用いるが、明確な直線を示していないものがある。スキンの影響など想定できるが明確な原因は明らかにできていない。そこで、今回の解析では全てのケースに対して水位低下量範囲 $0 < s < 1\text{m}$ で直線 $s = A \cdot \log(t/t')$ に対する最小二乗近似を行い、この定数 A を直線勾配とする。また、この水位低下量範囲のデータが観測されていない場合には、 $0 < s/s_0 < 0.1$ の範囲で同様の検討した(ここで、 s_0 : SW 試験孔内外水位差)。図 3.4.8~13 には適用した直線も示した。

表 3.4.3 SWS 解析結果一覧

No	項目	手法	$t_p^*(s)$	$q_p^*(\text{m}^3/s)$	$\Delta s(\text{m})$	直線 $s < (\text{m})$ ($s/s_0 <$)	$T(\text{m}^3/s)$
2(SW2S)		①	8142	5.04×10^{-6}	3.26	$s < 1.04$	2.83×10^{-7}
		②	5669	7.23×10^{-6}	4.39	($s/s_0 < 0.05$)	3.01×10^{-7}
9(SWS)		①	35251	2.77×10^{-6}	24.2	$s < 6.15$	2.10×10^{-8}
		②	23160	4.22×10^{-6}	40.3	($s/s_0 < 0.10$)	1.91×10^{-8}
10-1(SWS)		①	8909	1.81×10^{-5}	1.22	$s < 1.03$	2.73×10^{-6}
		②	7421	2.17×10^{-5}	1.35	($s/s_0 < 0.01$)	2.95×10^{-6}
10-2(SWS)		①	7962	1.28×10^{-5}	0.97	$s < 1.06$	2.41×10^{-6}
		②	6551	1.55×10^{-5}	1.08	($s/s_0 < 0.02$)	2.64×10^{-6}
11(SWS)		①	3137	3.22×10^{-5}	0.333	$s < 1.02$	1.77×10^{-5}
		②	3018	3.34×10^{-5}	0.367	($s/s_0 < 0.02$)	1.82×10^{-5}
12(SW1S)		①	4008	2.47×10^{-5}	0.299	$s < 1.04$	1.51×10^{-5}
		②	3289	3.06×10^{-5}	0.316	($s/s_0 < 0.02$)	1.77×10^{-5}

3.4.3 考察

3.4.2 で示した理論的背景から手法2による解析結果の信頼性が高いことが示されている。実測データについての評価は、他の試験法との結果も踏まえる必要があるが、手法1、2の比較については、shut-in 時の水位低下率 s/s_0 が 50%程度であれば、手法1であっても適正流量に対する解析流量誤差は 10%程度であり、この関係は透水量係数の算定誤差にも適用される。表 3.4.3 に整理した結果はこれを裏付けるものとなっている。ただし、No.9 については手法1による透水量係数は手法2による係数よりも大きく算定しているが、このケースのみ直線近似したデータが $s < 6.15\text{m}$ であり、図 3.4.1 および図 3.4.9 にみられるように $s=0$ までの回復データが得られておらず、解析精度が他よりも劣ると評価した。

ところで、今回の試験結果には、Theis(Horner)法による解析で明確な直線部分が確認できないものがある(No.2 および 9)。この原因は明確になっていないが、インターバル部のスキンの影響であることも否定できない。スキンの影響が試験結果にどのようにみられるかは今後の課題であるが、理論的背景からスキンの影響について若干の考察を示しておく。

Theis(Horner)法も Agarwal 法も水位低下挙動は Jacob-Cooper 法で用いられる直線近似式に基づいている。地下水工学ではスキンファクター s_K を導入した以下の水位低下公式が用いられことが多い。

$$\begin{aligned} s &= \frac{Q}{4\pi T} [s_D + s_K] \\ &= \frac{Q}{4\pi T} [\ln 2.246 t_D + s_K] \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

$$\text{ここで、 } s_K = 2 \left(\frac{K}{K_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \quad (3.4.2)$$

K_s : スキンの透水係数[L/T]、 r_s : スキン外周円の半径[L]

回復試験時の Theis(Horner)公式は以下のように誘導できる。

$$\begin{aligned} s &= s_{PUMPING} - s_{RECHARGE} = \frac{Q_0}{4\pi T} [s_D(t_D) + s_K] - \frac{Q_0}{4\pi T} [s_D(t_D') + s_K] \\ &= \frac{Q_0}{4\pi T} [\ln 2.246 t_D + s_K] - \frac{Q_0}{4\pi T} [\ln 2.246 t_D' + s_K] \\ &= \frac{Q_0}{4\pi T} \left[\ln 2.246 \frac{t_D}{t_D'} \right] \end{aligned} \quad (3.4.3)$$

定流量 Q_0 による揚水後の回復試験に対する Theis(Horner)法は、スキンの影響をキャンセルしていることがわかる。これに対して、Agarwal 法では以下ようになる。

$$\begin{aligned} s &= s_{SHUT-IN} - s_{PUMPING} + s_{RECHARGE} \\ &= \frac{Q_0}{4\pi T} [s_D(t_{PD}) + s_K] - \frac{Q_0}{4\pi T} [s_D(t_D) + s_K] + \frac{Q_0}{4\pi T} [s_D(t_D') + s_K] \\ &= \frac{Q_0}{4\pi T} [\ln 2.246 t_{PD} + s_K] - \frac{Q_0}{4\pi T} [\ln 2.246 t_D + s_K] + \frac{Q_0}{4\pi T} [\ln 2.246 t_D' + s_K] \\ &= \frac{Q_0}{4\pi T} \left[\ln 2.246 \frac{t_{PD} t_D'}{t_D} + s_K \right] \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

このように、Agarwal 法ではスキンの影響を受けることになる。

また、変動流量揚水ではスキンは以下のように扱われる。

(3.2.3)式にスキンファクター s_K を導入すると以下となる。

$$s = \frac{1}{4\pi T} \left[q_1 \{s_D(t_{D1}) + s_K\} + (q_2 - q_1) \{s_D(t_{D2}) + s_K\} + (q_3 - q_2) \{s_D(t_{D3}) + s_K\} \right. \\ \left. + \dots + (q_N - q_{N-1}) \{s_D(t_{DN}) + s_K\} \right] \quad (3.4.6)$$

$$= \frac{1}{4\pi T} \left[\sum_{i=1}^{N-1} (q_i - q_{i-1}) \{s_D(t_{Di}) + s_K\} + q_N \{s_D(t_{DN}) + s_K\} \right]$$

ここではスキンファクターは時間に依存しないと考えているため、(3.2.5)式は以下のよう示される。

$$s = \frac{1}{4\pi T} \left[+q_1 \{s_D(t_{D1}) + s_K - s_D(t_{D2}) - s_K\} + q_2 \{s_D(t_{D2}) + s_K - s_D(t_{D3}) - s_K\} \dots \right. \\ \left. + q_{N-2} \{s_D(t_{DN-2}) + s_K - s_D(t_{DN-1}) - s_K\} \right. \\ \left. + q_{N-1} \{s_D(t_{DN-1}) + s_K - s_D(t_{DN}) - s_K\} + q_N \{s_D(t_{DN}) + s_K\} \right]$$

$$= \frac{1}{4\pi T} \left[\sum_{i=1}^{N-1} q_i \{s_D(t_{Di}) - s_D(t_{Di+1})\} + q_N \{s_D(t_{DN}) + s_K\} \right] \quad (3.4.7)$$

このように、水位低下量を得る直前の揚水流量 (q_N)にのみスキンファクターは影響することになる。

さて、今回検証した SWS 試験中には $q=0$ であるため、上記の考え方に準ずれば、SWS 試験中の水位低下量はどの時間でも $q_N=0$ であり、スキンの影響は受けないことになる。

このように、SWS 試験時にはスキンの影響は受けていないと評価できるが、Agarwal 法では SWS 試験ではスキンの影響がないにもかかわらず SW 試験時のスキンの影響を shut-in 時の水位低下量を考慮することで導入してしまうことになる。

4. まとめと今後の課題

本検討で得られた知見をまとめる。

2.で示した揚水試験結果の時間微分値を用いて解析する方法をまとめた。主な知見は以下のものである。

1) 定流量揚水試験では以下の知見を得た。

- ① 水位低下量標準曲線とこれの時間微分(プロット曲線の接線勾配)値の標準曲線を帯水層モデルごとにまとめた。
- ② いくつかの値について整理を行ない、微分項には $d\ln(s)/d\ln(t)$ および $ds/d\ln(t)$ の各整理が帯水層モデルの選定に有用であることを示した。
- ③ 帯水層モデルの選定については、井戸構造の特徴、漏水の特徴、漏水および側方境界条件の特徴は、定性的な分類毎(揚水期間中の比較的早い時間、中間の時間、長時間経過後)にそれぞれ見られることがわかり、帯水層モデルの適切な選定を行うには長時間経過後までの試験の続行が必要であることが確認された。

2) 定圧揚水試験では以下の知見を得た。

前出 1)と同様の知見の他、特に以下が明確になった。

- ① 観測値は揚水流量であるが、この逆数を用いて整理すると定流量揚水時の水位低下挙動に酷似した挙動を示す。
- ② 逆数を用いて整理する直線勾配法が既に提案されているが、曲線一致法でも適用できる可能性が確認できた。

以上、1),2)に加えて、部分的ではあるが各帯水層モデル特性パラメーターによる標準曲線群を整理し、実務での視覚判断による簡易の帯水層モデル選定に貢献できると考える。

3) 定流量揚水試験結果への適用事例からは以下の知見を得た。

- ① 文献 4)でも同様に試験結果の解析を行っているが、この場合には帯水層モデルの選定は、パラメトリックスタディによってマッチング解析の中で行った。今回は、事前に選定を行うことでマッチング作業の省力化が図れた。
- ② 提供されたデータは、事前に Jacob-Cooper 直線勾配法を用いて評価されているケースもみられたが、時間微分値のプロットでは明確な Jacob-Cooper 法の適正な適用範囲を確認することができなかった。

3.で示した SW 試験途中からの SWS 試験結果の解析法についてまとめた。主な知見は以下のものである。

4) 既存の解析方法の基本的な考え方は、SW 試験 shut-in 時点の湧水流量、SW 試験継続(shut-in までの)時間を定流量揚水状態で近似し、shut-in 後の回復挙動を定流量揚水後の回復挙動として解析する。これには、shut-in 時の時間 t_p と揚水流量 q

を近似する方法が提案されており、これを評価した。結果、本文中に示した手法2が良好な結果を与えることが理論的に確認できた。また、SWS試験のための shut-in の始動条件は、湧水流量を換算するに十分な水位回復がみとめられるならできるだけ早い回復段階で shut-in した方が SWS 試験結果の精度よく解析できる。

- 5) 通常のリバース試験結果の解析法には Theis(Horner)法と Agarwal 法が用いられているが、SWS 試験結果の解析にもこれらの方法が適用できる。透水量係数の評価には両手法による結果の違いに大きな差異はみとめられなかった。しかし、Agarwal 法で評価される貯留係数については、試験データの停止時間 t_p を近似するためか、 t_p が解析において明確に影響する Agarwal 法は精度が悪い。よって、現時点では SWS 試験結果は透水量係数のみの評価とし、より適用の簡単な Theis(Horner)法の適用が薦められる。

今後の課題として以下を提案する。

6) 変動型流量試験法の適用性

水位変動条件を与えたスラグ試験を変動型流量揚水試験として SW-SWS 試験の理論解に用いた。その適合性は極めて高いと判断する。変動流量型揚水試験法の利点は、幾つか挙げられるが、特に流量管理が不要（一定にする必要がない）ことと水位変動条件を与えた場合にも流量換算することで扱えることである。このため、連続試験結果の解析が可能である。現段階では、連続試験への適用の確証がないことから、適用にあたってはあらかじめ確認する必要がある。

7) 斜試錐孔での透水試験

今回実データとして用いた透水試験データは斜試錐孔 MIU4 号孔で実施されたものである。揚水井戸から十分離れた位置にある井戸での水位観測データには揚水孔の傾斜角度が大きく関与するとは思われないが、単孔による試験では傾斜角度の影響がみられることは必至であり、今後もこのような状況での試験が実施される可能性は高い。このことから、早急に斜試錐孔が透水試験に与える影響を定量的に評価しておく必要がある。

記号表

<p>B : 漏水因子[L]</p> <p>C_w : 井戸内貯留項[L²]</p> <p>f : 対数上のデータ・近似値残差</p> <p>\bar{f} : 対数上のデータ・近似値残差の平均</p> <p>$\overline{f_{OPT}}$: \bar{f} の最適値(分散 v の最小値をとるとき の値)</p> <p>h_D : スラッグ試験の正規化水位低下量(=s/s_0)</p> <p>i : 動水勾配(=r/r_w)[-]</p> <p>K_S : スキン層の透水係数[L/T]</p> <p>n : 曲線一致法での時間軸比(=t_D/t)</p> <p>n_{OPT} : 曲線一致法での時間軸比@最小 v</p> <p>N : 時間観測データ総数</p> <p>p : Laplace 変換パラメーター</p> <p>q : 帯水層からの湧水流量[L³/T]</p> <p>q_P : 揚水停止時の瞬間 q[L³/T]</p> <p>q_{P^*} : 揚水停止時の近似 q[L³/T]</p> <p>Q_0 : 定流量揚水時の流量[L³/T]</p> <p>Q : 変動揚水時の観測流量[L³/T]</p> <p>Q_P : 揚水ポンプで観測する流量[L³/T]</p> <p>r : 井戸中心からの半径距離[L]</p> <p>r_D : r の無次元化(=r/r_w)[-]</p> <p>r_s : スキン層外円周半径[L]</p> <p>r_w : インターバル部半径[L]</p> <p>R : 有限遠方境界距離[L]</p> <p>R_D : R の無次元化(=R/r_w)[-]</p> <p>s : 水位低下量[L]</p> <p>s_0 : 定圧揚水時の一定水位低下量[L]</p> <p>s_D : s の無次元化[-]</p> <p>s_K : スキンファクター[-]</p> <p>s_u : 漏水層上端水位低下量[L]</p> <p>s_P : 揚水停止時の水位低下量[L]</p> <p>s_{VD} : 変動揚水流量公式の井戸関数[-]</p>	<p>s_r : s_P からの回復水位量[L]</p> <p>s_w : 井戸内水位低下量[L]</p> <p>S : 帯水層の貯留係数[-]</p> <p>S_α : 貯留比 α から求めた S[-]</p> <p>S_α : 最適時間軸比 n_{opt} から求めた S[-]</p> <p>t : 揚水開始後の経過時間[T]</p> <p>t' : 揚水停止後の経過時間[T]</p> <p>t_0 : 片対数軸上直線の $s = 0$ あるいは $s_r = 0$ 軸切片 t[T]</p> <p>t_m : 水位観測開始後の経過時間[T]</p> <p>t_D : t の無次元化(=$Tt/r_w^2 S$)[-]</p> <p>t_P : 揚水停止時間[T]</p> <p>t_{P^*} : 近似揚水停止時間[T]</p> <p>t_{PD} : t_P の無次元化[-]</p> <p>T : 帯水層の透水量係数[L²/T]</p> <p>V_P : スラッグ試験中の累積湧水量[L³]</p> <p>v : 残差 f の分散</p> <p>x : 観測データ</p> <p>y : 直線近似式のデータ</p> <p>α : 貯留性比(=$\pi t_w^2 S/C_w$)[-]</p>
---	--

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構、水理試験により得られる実測データの解析・整理手法の高度化(その 1)—非定常水理試験データを用いた解析手法に関する基礎的検討—、JNC TJ7440 98-007、1998.
- 2) 核燃料サイクル開発機構、水理試験により得られる実測データの解析・整理手法の高度化(その 2)—単孔式水理試験データを用いた解析手法の基礎的実験と情報の整理—、JNC TJ7440 98-008、1998.
- 3) 核燃料サイクル開発機構、水理試験により得られる実測データの解析・整理手法の高度化(その 3)—単孔式水理試験データを用いた解析手法に関する基礎的検討—、JNC TJ7440 99-015、1999.
- 4) 核燃料サイクル開発機構、水理試験により得られる実測データの解析手法の高度化と適用、JNC TJ7400 2000-010、2000.
- 5) 宇野尚雄、現場揚水試験における水位低下パターン、岐阜大学工学部研究報告、24巻,p.2,1974.
- 6) 進士喜英、帯水層定数の浸透特性の調査法に関する研究、岡山大学大学院修士論文,1986.
- 7) Horne,R.N., Modern well test analysis, the 2nd. edit., Petroway Inc., 257, 1995.
- 8) Earlougher,R.C.,Jr.、 Advances in well test analysis, Society of Petroleum Engineers of AIME, 90-104, 1977.
- 9) Sabat,M.A., Well test analysis. Gulf Publishing Company, 330-370,1991.
- 10) Kruseman,G.P.、 Ridder,N.A., Analysis and evaluation of pumping test data,2nd edition, ILRI publication 47, 375,1990.
- 11) 西垣誠、多孔式揚水試験結果の自動整理方法、土質工学会論文報告集,23,4, 178-184,1983.
- 12) Bourdet,D.、 Whittle,T.M.、 Douglas,A.A.、 A new set of type curves simplifies well test analysis、 World Oil、 May、 95-106、 1983.
- 13) Neuman,S.P., Class note HWR603, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, 1993.
- 14) Gringarten, A.C., Flow-test evaluation of fractured reservoirs, Geological Society of America, Special Paper 189,] pp.237-263, 1982.
- 15) Hantush, M.H, Hydraulics of wells, Advances in Hydrosience, edited by V.T.Chow, Academic Press, 1964.
- 16) Jacob,C.E. and S.W.Lohman, Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, Vol.33, No.4,559-569, 1952.

- 17) 土質工学会、根切り工事と地下水, 第3章, 1991.
- 18) Bear, J., *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill, Inc., 569, 1979.
- 19) Papadopoulos, I.S., et.al., Drawdown in a well of large diameter, W.R.R., Vol.3, No.1, 241-244, 1967.
- 20) Mueller, T.D. and Witherspoon, P.A., Pressure interference effects within reservoirs and aquifers, *Trans., AIME*, 234, 471-474, 1965.