JNC TJ7440 99-015

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）

－単孔式揚水試験データを用いた解析手法に関する基礎的検討－

（核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書）

１９９９年3月

株式会社鴻池組

公開資料
JNC TJ7440 99-015
1999年3月

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)
—単孔式揚水試験データを用いた解析手法に関する基礎的検討—

進士 喜英※
狩野 裕之※

要 旨

本報告では、最初に、単孔式揚水試験実施時の水位低下量や揚水流量の非定常挙動を予測できる理論解析解の誘導および改良を行い、全層ストレーナー井戸から部分インターバル井戸による揚水試験を扱うことができるようにした。この解を用いて、特に部分インターバル長および設置位置が試験結果に与える影響を評価した。その結果、揚水開始後比較的短い時間経過後の挙動は、インターバル長を帯水層厚さとして考えた（全層ストレーナ井戸による）揚水時の挙動を示し、比較的長時間経過後では部分インターバル長に関係なく全帯水層厚の全層をストレーナ長とした揚水挙動をそれぞれ示すことが確認された。また、その解析手法で用いられる直線勾配法ではプロットに異なる直線部分が複数みられることがあり、この手法の適用には注意を促すことがわかった。これに対して、パラメータスタディの煩雑さはあるものの、曲線一致手法では比較的良好に評価できる見込みが確認された。

次に、定圧揚水試験後の回復試験結果の整理手法の適用性を評価した。我が国での適用例がないことから、海外の石油工学分野で開発された手法の妥当性を確認し、その適用範囲を明確にした。いくつかのシミュレーション結果(の整理)から定圧揚水試験期間に影響しない井戸貯留が回復試験では極めて支配的な影響を示すことがわかり、回復試験時に井戸貯留項を小さくする利点を示した。

最後に、スキン現象のモデル化について既存の文献を調査した。この結果、非定常型単孔透水試験では評価される透水係数はインターバル周辺のスキンの影響を受けるが、揚水試験ではスキンの影響を除外した透水係数を評価できる可能性がみとめられた。

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：10C0945

機構担当部課室および担当者：東濃地科学センター調査技術グループ 茂田直孝

※：土木本部土木設計部構造設計課

JNC TJ7440 99-015
MARCH, 1999

Integration of analysis methods for observation data
on permeability tests
-Basic discussion on analysis schemes for a single borehole test

Yoshihide Shinshi※
Hiroyuki Kano※

Abstract

The report has three discussions on in-situ permeability tests and analysis schemes for their results. The first discussion is to develop a mathematical model which can be solve drawdown/pumping rate to be observed for a single borehole pumping test with partially installing interval well. Evaluating effect of length and position of the interval, a whole of aquifer is dominant over the behavior after long time passed and a length of the interval is dominant for small time. Plots of the result on a semi-logarithmic paper may have several linear segmemts, therefore a Jacob-Cooper scheme has to be used carefully for such plots. A matching scheme might be more suitable to the plots in despite of complexty in its usage.

The second is to evaluate validity of a scheme for a recovery testing after a constant drawdown test. The scheme has been verified about valid time to stop pumping. When one can use this recovery test, without storage a welbore will make an advantage to analyze its resuls accuraletly.

The final discussion is of modeling skin phenomena between an interval and an aquifer. Three models have been discussed and characteristics of each model have been summarized.

This work was performed by Konoike Construction CO.,LTD. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
JNC Liaison : Characterization Technology Development Group
※ : Civil Engineering Department

目　次

図目次

図 目 次(続き)

図 目 次(続き)

表目次

1. はじめに

地盤の浸透特性および水理境界を調査する手法として揚水井戸を利用する現場透水試験法が知られており、我が国での実績も多く有効な地盤調査法の一つとして知られている。現場透水試験法にはいくつかの種類があるが、地下水にインパクトを与える揚水井戸(一般的に揚水を行うため)と周辺の地下水位変化量を観測する観測井戸の組み合わせが一般的であり、特に観測も揚水井戸で行う現場透水試験法を単孔式透水試験と呼び、瞬間的なインパクトに対する水理的反応を観測するものを非定常型透水試験、定常的なインパクトに対する水理的反応を観測するものを揚水試験(定常型透水試験)と位置づけられている。

このように単孔式揚水試験では長時間にわたる揚水を継続することで、非定常型試験として分類されているスラグ試験法などと異なり、揚水の比較的早い時間、中期、遅い時間に分け、それぞれの時間帯で特徴のある挙動を示す。ここで、単孔式揚水試験で無視することのできない特性が、井戸半径と井戸貯留それぞれの影響であり、無限小径井戸による揚水理論 [1]に基づいた従来の整理手法ではこれらの影響の考慮は簡単に行えず、別途用意する必要がある。加えて、長期間にわたる試験期間は揚水井戸周辺の浸透特性だけでなく比較的遠方の水理境界条件の影響が加味され、試験結果の整理はさらに困難になる。しかしながら、揚水試験結果の整理で重要になるのは、地盤および試験条件の適正な数学モデルを選択することになり、複雑な挙動とは言えモデル化に大きな誤りがなければ比較的良好な評価がなされる。このためには、モデル化の可能な条件における挙動予測をうまく整理あるいは分類してデーターベース化しておくことである。

そこで、全層ストレーナ井戸揚水時に関係するいくつかの影響要因については検討業務(その２)[2]で検討し、本報告では、これに加えて不完全貫入井戸(あるいは部分インターバル揚水井戸)による影響を評価する。

次に、揚水試験実施時の問題点の一つに、長期にわたる定量揚水では揚水流量を過大に設定してしまうと井戸枯れを起こし試験条件が途中で変わってしまう問題が生じることがあり、透水性の低い地盤では適正揚水流量の設定が極めて困難である。これに対して、定圧揚水試験は揚水井戸内水位を一定に保ち、これに伴う揚水流量の測定を行うというものであるため、井戸枯れ問題には及ばない [3]。今後、この試験法は低透水性地盤を対象に適用が増加すると推測される。しかしながら、定量揚水では試験終了後に低下した水位の回復過程のデータを整理することで揚水試験同様に浸透特性が評価できるが、定圧揚水には回復試験の適用はなされていない。これは、回復挙動の推定が流量インパクト条件の重ね合せ理論に基づいており、定圧揚水条件後の回復試験条件に適用し難いという数学モデル上の取り扱いの困難さが原因である。これに対して、石油工学の分野では定圧揚水時の揚水流量の平均化や定量揚水試験と定圧揚水試験の類似性に基づいた検討により、定圧揚水後の回復試験結果の整理手法の提案がなされていることから、この手法の妥当性と改良点をまとめた。

最後に、単孔式揚水試験では揚水井戸が観測井戸を兼ねるものであるため、揚水井戸周辺の低透水あるいは高透水ゾーンとなるスキンゾーンの影響を受け、試験結果に大きく影響を与える。現段階では揚水井戸作製時の洗浄を十分に行うことで低透水性スキンを極力

除去すること、あるいは削孔時に極力地山を傷めない削孔方法を採用することで高透水性スキンを極力除去することが一般になされている解決策であり、スキンを積極的に調査し定量的な評価を加えようとはされていない。そこで、この問題に対する初等段階の調査として石油工学分野などで用いられているスキンモデルを文献調査し、その特性をまとめる。

２．部分インターバル試錐孔による揚水試験データの解析手法の整理

２．１　検討概要

地盤の浸透特性および水理境界を知るための原位置透水試験法の一つである揚水試験は、一般には多孔式揚水試験をさし、揚水井戸の他に観測井戸による水位観測データーを試験結果として用いることを前提に試験法が成り立っている。さらに、揚水井戸近傍の観測データーは揚水井戸内の井戸貯留の影響を受け、Theis の井戸理論 [1]に代表される無限小径揚水井戸による揚水理論が適用し難く、観測井戸として揚水井戸での試験結果を用いることには課題のあるところである。

これを踏まえ、前年度業務報告 [2]では完全貫入ストレーナー揚水井戸による揚水理論をまとめるに至った。この報告では、解析解の誘導時に用いる数値逆 Laplace 変換技法の有効性 [5,6]、この技法の導入による種々の水理境界条件の導入、マッチング解法のための標準曲線の作成、既存の図式解法(Jacob-Cooper 法など)の適用性、等が確認され、単孔による揚水試験の実用化に向けての基本的な課題が検討された。

本年度業務では、インターバルが揚水対象帯水層内に部分的に設置された揚水井戸による揚水理論式の誘導を行った。ここで対象とした地盤は多孔質媒体であるため、岩盤を対象とした調査には自ずとその適用性も議論されるべきである。しかし、当検討では岩盤を対象とする場合には堆積岩質や微少な亀裂が多く卓越する地盤を扱うことで、多孔質媒体とみなせる地盤への適用を前提とした。

検討結果は以下の構成とした。まず、揚水理論の理論的誘導および数値的処理について解説し、FEM 浸透流解析結果との比較によって誘導された理論解の妥当性を検証した後、種々の条件下における標準曲線の作成および既存解析手法(全層ストレーナー井戸による揚水試験の解析手法)の適用性について評価する。

2．2 解析解の誘導および妥当性の検討

2．2．1 理論展開

(1) 仮定条件

図-2.2.1 に示す試錐孔および帯水層に対して検討する。

① 帯水層の上下境界は不透水層とする。が、漏水条件を考慮することができる。

② 漏水層は Hantush[7]の漏水モデルを採用し、貯留性の有無および漏水層上端水頭境界を選ぶことができる。

③ 各層は水平方向に広がりを有するが、無限遠方境界と有限遠方境界を選ぶことができる。

④ 帯水層内および漏水層内は揚水開始前には流れがなく、水位低下量 0 が分布している。

⑤ 帯水層は均質であるが、透水性は鉛直方向と水平方向の二成分に対して異方性を考慮できる（水平成分は等方性とする)。

⑥ 地下水、帯水層、漏水層の物理特性は任意の地点及び時間に独立である。

⑦ 揚水によって生じる地下水流は Darcy 則に従う。

⑧ 揚水によって生じる流れは 3 次元放射状流である。

⑨ 試錐孔は帯水層を貫通しているが、インターバル(ストレーナー)は部分的に一箇所設置する。

⑩ 試錐孔と帯水層間には井戸損失を有さない。

⑪ 帯水層および漏水層は全揚水期間を通じて被圧状態である。

⑫ インターバル部に流入する地下水流はインターバル部で等分布流量条件とする。

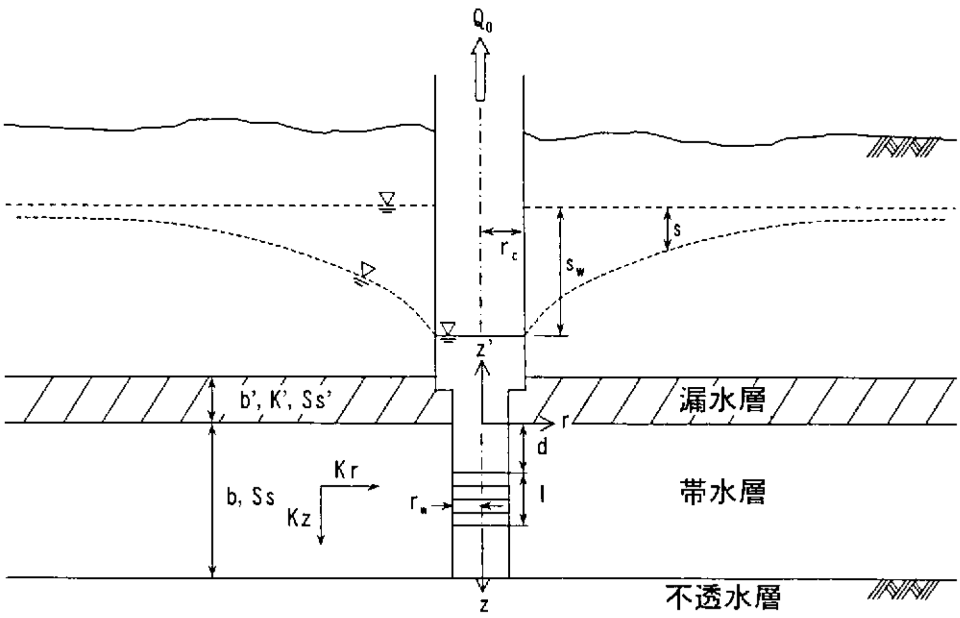


図-2.2.1 単孔式揚水試験および帯水層のモデル図

(2)基礎方程式

1) 支配方程式

$$K_r \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + K_r \frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r} + K_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} + \frac{K'}{b}\frac{\partial s'}{\partial z'}\bigg|_{z'=0} = S_S \frac{\partial s}{\partial t} \qquad (2.2.1)$$

ここで、s：初期状態からの水頭低下量[L]、r：井戸中心からの半径方向距離[L]

z：帯水層上端から鉛直方向距離(下向き正)[L]、

z'：帯水層上端から鉛直方向距離(上向き正)[L]、

t：揚水開始後の経過時間[T]、Kr：帯水層の水平方向成分透水係数[L/T]、

Kz：帯水層の鉛直方向成分透水係数[L/T]、Ss：帯水層の比貯留係数[1/L]、

K'：漏水層の透水係数(鉛直方向成分のみ)[L/T]、b：帯水層厚さ[L]、

l：インターバル長[L]、d：インターバル上ケーシング管長[L]

b'：漏水層厚さ[L]

各パラメータは図 2.2.1 に図示する。

2)帯水層の条件

図 2.2.2 に境界条件の一覧を示す。

①初期条件

$$s(r, z, t=0) = 0 \qquad (2.2.2)$$

②境界条件(Ⅰ)

遠方境界 BCR (1-1):無限遠方水位一定: $s(r \to \infty, z, t) = 0$ (2.2.3.1)

遠方境界 BCR (1-2):無限遠方不透水: $\dfrac{ds(r \to \infty, z, t)}{dr} = 0$ (2.2.3.2)

遠方境界 BCR (2-1):有限遠方水位一定: $s(r = R, z, t) = 0$ (2.2.3.3)

遠方境界 BCR (2-2):有限遠方不透水: $\dfrac{ds(r = R, z, t)}{dr} = 0$ (2.2.3.4)

ここで、R：有限影響圏半径距離[L]

③境界条件(Ⅱ)

・井戸境界 BCW1：定流量揚水(無限小井戸半径)

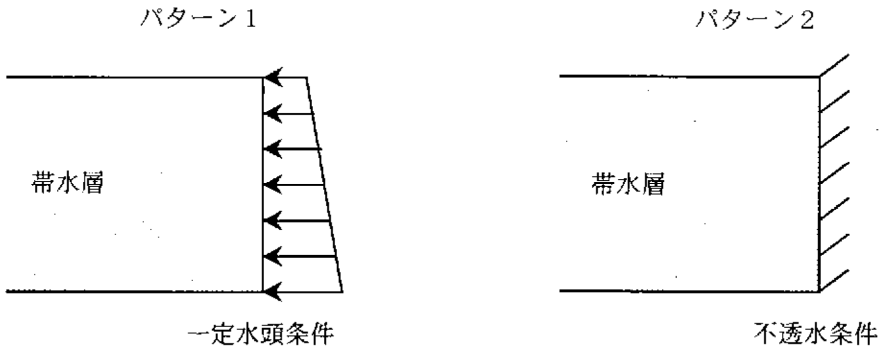
$$2\pi K_r r \frac{ds}{dr}\bigg|_{r \to 0} = \frac{-Q_0}{l} g(z) \qquad (2.2.4.1)$$

・井戸境界 BCW2：定流量揚水(有限井戸半径)

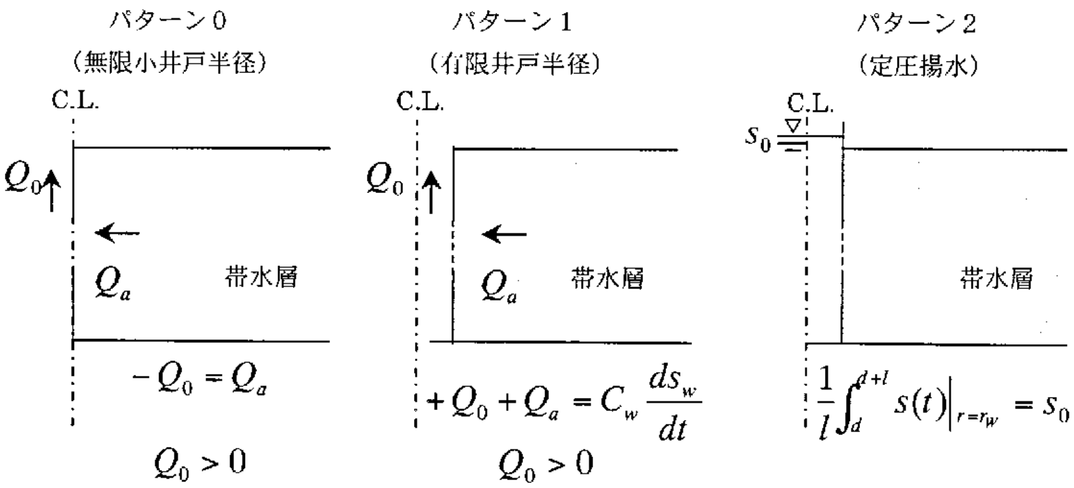
$$2\pi K_r r \frac{ds}{dr}\bigg|_{r = r_W} = \left\{ \frac{C_W}{l}\frac{ds_w}{dt} - \frac{Q_0}{l} \right\} g(z) \qquad (2.2.4.2)$$

Ⅰ．側方境界条件

無限遠方$r=\infty$または有限距離　$r=R$



Ⅱ．揚水条件（井戸条件）



Ⅲ．漏水条件

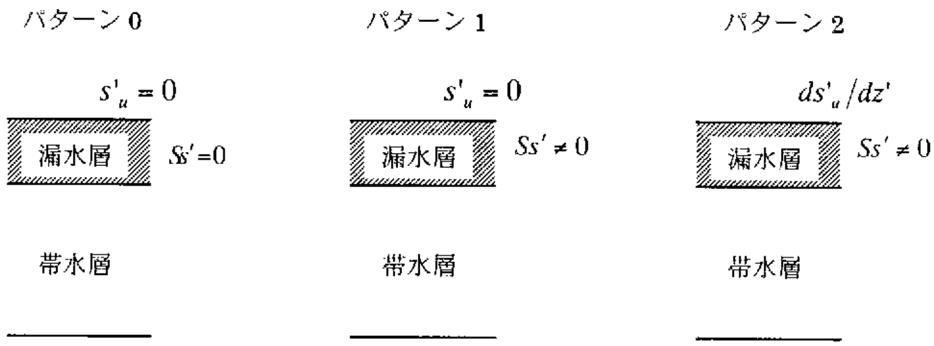


図-2.2.2 境界条件一覧

・井戸境界 BCW3：定圧揚水

$$2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right|_{r=r_W} = \frac{-Q(t)}{l} g(z) \tag{2.2.4.3}$$

$$\frac{1}{l}\int_d^{d+l} s(r=r_W, z, t)dz = s_o \tag{2.2.4.4}$$

ここで、boxcar 関数 g(z)は以下の定義である。

$$g(z) = \begin{cases} 0 & 0 \le z < d,\ d+l < z \le b \\ 1 & d \le z \le d+l \end{cases}$$

(2.2.4.5)

s_w：井戸内平均水位低下量[L]、C_w：井戸内貯留項[L^2]、

r_w：井戸ストレーナー部半径[L]、Q_o：一定揚水流量[L^3/T]、

s_o：孔内一定水位低下量[L]、Q(t)：定圧揚水時の湧水流量関数[L^3/T]

・帯水層上下端部

$$\frac{ds}{dz}(r, z=0, t) = 0 \tag{2.2.5.1}$$

$$\frac{ds}{dz}(r, z=b, t) = 0 \tag{2.2.5.2}$$

3)漏水層の条件

① 初期条件

$$s'(r, z', t=0) = 0 \tag{2.2.6}$$

ここで、s': 漏水性粘性土層内水頭低下量[L]

② 境界条件

$$s'(r, z'=0, t) = s(r, t) \tag{2.2.7.1}$$

$$s'(r, z'=b', t) = 0 \tag{2.2.7.2}$$

あるいは

$$\frac{\partial s'(r, z'=b', t)}{\partial z'} = 0 \tag{2.2.7.3}$$

ここで、b': 漏水性粘性土層厚[L]

③ 漏水層条件

(a)非貯留性漏水層：
$$\frac{\partial^2 s'}{\partial z'^2} = 0 \tag{2.2.8.1}$$

(b)貯留性漏水層：

$$\frac{\partial^2 s'}{\partial z'^2} = \frac{S_S'}{K'}\frac{\partial s'}{\partial t} \tag{2.2.8.2}$$

ここで、S_S'：粘性土層の比貯留係数[1/L]

(3) 無次元化

1)無次元化パラメータ

$$r_D=\frac{r}{r_W}、\ t_D=\frac{K_r t}{S_S r_W{}^2}、\ z_D=\frac{z}{b}、\ z_D'=\frac{z'}{b'}、\ \alpha=\frac{\pi r_W{}^2 b S_S}{C_W}$$

$$s_D\begin{cases}=s\big/Q_o/4\pi bK_r\\ =s\big/s_o\end{cases} \tag{2.2.9}$$

$$s'_D\begin{cases}=s'\big/Q_o/4\pi bK_r\\ =s'\big/s_o\end{cases}$$

$$B^2\equiv\frac{K_r bb'}{K'}$$

ここで、B：漏水因子[L]

2)支配方程式の無次元化

$$K_r\frac{1}{r_W{}^2}\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D{}^2}+K_r\frac{1}{r_W{}^2}\frac{1}{r_D}\frac{\partial s_D}{\partial r_D}+K_z\frac{1}{b^2}\frac{\partial^2 s_D}{\partial z_D{}^2}+\frac{K'}{b}\frac{1}{b'}\frac{\partial s_D'}{\partial z_D'}\bigg|_{z_D'=0}=\frac{K_r}{S_S r_W{}^2}\frac{\partial s_D}{\partial t_D}\cdot S_S$$

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D{}^2}+\frac{1}{r_D}\frac{\partial s_D}{\partial r_D}+\frac{K_z}{K_r}\left(\frac{r_W}{b}\right)^2\frac{\partial^2 s_D}{\partial z_D{}^2}+\frac{K'}{K_r bb'}r_W{}^2\frac{\partial s_D'}{\partial z_D'}\bigg|_{z_D'=0}=\frac{\partial s_D}{\partial t_D}$$

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D{}^2}+\frac{1}{r_D}\frac{\partial s_D}{\partial r_D}+a^2\frac{\partial^2 s_D}{\partial z_D{}^2}+\left(\frac{r_W}{B}\right)^2\frac{\partial s_D'}{\partial z_D'}\bigg|_{z_D'=0}=\frac{\partial s_D}{\partial t_D} \tag{2.2.10}$$

ここで、$a^2=\dfrac{K_z}{K_r}\left(\dfrac{r_W}{b}\right)^2$ (2.2.11)

3) 帯水層条件の無次元化

① 初期条件

$$s_D(r_D,z_D,t_D=0)=0 \tag{2.2.12}$$

② 境界条件(Ⅰ)

遠方境界 BCR (1-1)：無限遠方水位一定：$s_D(r_D\to\infty,z_D,t_D)=0$ (2.2.13.1)

遠方境界 BCR (1-2)：無限遠方不透水：$\dfrac{ds_D(r_D\to\infty,z_D,t_D)}{dr_D}=0$ (2.2.13.2)

遠方境界 BCR (2-1)：有限距離水位一定：$s_D(r_D=R_D,z_D,t_D)=0$ (2.2.13.3)

遠方境界 BCR (2-2)：有限遠方不透水：　$\dfrac{ds_D(r_D = R_D, z_D, t_D)}{dr_D} = 0$　(2.2.13.4)

ここで、R_D：有限影響圏半径 R の無次元量

帯水層上下端部境界

$$\frac{ds_D(r_D, z_D = 0, t_D)}{dz_D} = 0 \qquad (2.2.13.5)$$

$$\frac{ds_D(r_D, z_D = 1, t_D)}{dz_D} = 0 \qquad (2.2.13.6)$$

③ 境界条件(Ⅱ)　井戸境界 BCW1 ：定流量揚水(無限小井戸半径)：

$$2\pi r_D r_W K_r \frac{1}{r_W} \frac{Q_o}{4\pi b K_r} \left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=0} = \frac{-Q_o}{l} g_D(z_D)$$

$$\therefore r_D \left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=0} = \frac{-2b}{l} g_D(z_D) \qquad (2.2.14)$$

井戸境界 BCW2 ：定流量揚水(有限井戸半径)：

$$2\pi r_D r_W K_r \frac{1}{r_W} \frac{Q_o}{4\pi b K_r} \left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=1} = \left\{\frac{C_W}{l} \frac{bK_r}{bS_S r_W^{\,2}} \frac{Q_o}{4\pi T} \frac{ds_{WD}(t_D)}{dt_D} - \frac{Q_o}{l}\right\} g_D(z_D)$$

$$\therefore r_D \left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=1} = \left\{\frac{b}{2l\alpha} \frac{ds_{WD}(t_D)}{dt_D} - \frac{2b}{l}\right\} g_D(z_D) \qquad (2.2.15)$$

井戸境界 BCW3 ：定圧揚水：

$$2\pi r_D r_W K_r \frac{1}{r_W} s_o r_D \left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=1} = -\frac{Q(t)}{l} g_D(z_D)$$

$$\begin{aligned} r_D \left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=1} &= -\frac{Q(t_D)}{2\pi K_r l s_o} g_D(z_D) \\ &= -Q_D(t_D) g_D(z_D) \end{aligned} \qquad (2.2.16.1)$$

$$\frac{b}{l}\int_{d/b}^{(d+l)/b} s_D(r_D = r_{WD}, z_D, t_D)\, dz_D = 1 \qquad (2.2.16.2)$$

ここで、s_{WD}：井戸内平均水位低下量(@ $r_D=1$)の無次元量、

r_{WD}：井戸半径の無次元量(=1)

$$g_D(z_D)=\begin{cases}0 & 0 \le z_D < d/b,\ \dfrac{d+l}{b} < z_D \le 1 \\ 1 & d/b \le z_D \le \dfrac{d+l}{b}\end{cases} \tag{2.2.16.3}$$

$$Q_D=\frac{Q}{2\pi K_r S_0}\cdot\frac{1}{l} \tag{2.2.16.4}$$

4) 粘性土層条件

① 初期条件

$$s_D'(z'_D, r_D, t_D = 0) = 0 \tag{2.2.17}$$

② 境界条件

$$s_D'\left(r_D, z'_D = 0, t_D\right) = s_D(r_D, z_D = 1, t_D) \tag{2.2.18.1}$$

$$s_D'\left(r_D, z'_D = 1, t_D\right) = 0 \tag{2.2.18.2}$$

あるいは

$$\frac{\partial s'_D\left(r_D, z'_D = 1, t_D\right)}{\partial z'_D} = 0 \tag{2.2.18.3}$$

③ 漏水の支配方程式

(a)非貯留性漏水層：
$$\frac{\partial^2 s'_D}{\partial z'^2_D} = 0 \tag{2.2.19}$$

(b)貯留性漏水層：

$$\frac{1}{b'^2}\frac{\partial^2 s'_D}{\partial z'^2_D} = \frac{S_S'}{K'}\frac{K_r}{S_S r_W^2}\frac{\partial s'_D}{\partial t_D}$$

$$\frac{\partial^2 s'_D}{\partial z'^2_D} = \frac{K_r}{r_W^2 K'}\frac{b}{b}\frac{b'^2}{1}\frac{S_S'}{S_S}\frac{\partial s'_D}{\partial t_D}$$

$$\therefore \frac{\partial^2 s'_D}{\partial z'^2_D} = \left(\frac{B}{r_W}\right)^2 \frac{S_S' b'}{S_S b}\frac{\partial s'_D}{\partial t_D} \tag{2.2.20}$$

ただし、$B^2 \equiv \dfrac{K_r b b'}{K'}$

(4) 漏水層からの漏水流量の評価

初期条件：$s'_D(r_D, z'_D, t_D = 0) = 0$ (2.2.21.1)

境界条件：$s'_D\left(r_D, z'_D = 0, t_D\right) = s_D(r_D, z_D = 0, t_D)$ (2.2.21.2)

$$s_D'\left(z'_D = 1, r_D, t_D\right) = 0 \tag{2.2.21.3}$$

1)非貯留性漏水層：
$$\frac{\partial^2 s'_D}{\partial z'^2_D} = 0 \tag{2.2.22}$$

方程式(2.2.22)の一般解は次式となる。

$$s_D' = c_1' z_D + c_2' \tag{2.2.23.1}$$

ここで、c_1'、c_2'：定数

条件式(2.2.21.2)を式(2.2.23.1)に代入すると次式となる。

$$c_1'0 + c_2' = s_D\left(r_D, z_D = 0, t_D\right) \tag{2.2.23.2}$$

条件式(2.2.21.3)を式(2.2.23.1)に代入すると次式となる。

$$c_1' + c_2' = 0 \tag{2.2.23.3}$$

式(2.2.23.2,3)を連立方程式として、c_1'、c_2' について解き、これらを式(2.2.23.1)に代入すると次式を得る。

$$s'_D = -s_D z'_D + s_D \tag{2.2.23.4}$$

よって、式(2.2.10)中にみられる漏水層内の水位低下特性(左辺第4項の微分項)は次式で表すことができる。

$$\frac{ds'_D}{dz'_D} = -s_D \tag{2.2.24}$$

2)貯留性漏水層：
$$\frac{\partial^2 s'_D}{\partial z'^2_D} = \left(\frac{B}{r_W}\right)^2 \frac{S_S' b'}{S_S b} \frac{\partial s'_D}{\partial t_D} \tag{2.2.25}$$

時間項 t_D に対して Laplace 変換をとる。

$$\frac{\partial^2 \overline{s'_D}}{\partial z'^2_D} = \frac{B^2}{r_W^2} \frac{S_S' b'}{S_S b} \left\{ p\overline{s'_D} - s'_D\left(t_D = 0\right) \right\} \tag{2.2.26.1}$$

ここで、p：Laplace のパラメータ、$\overline{s_D}'$：s_D' の Laplace 変換

初期条件式(2.2.21.1)を代入すると以下となる。

$$\therefore \frac{\partial^2 \overline{s'_D}}{\partial z'^2_D} - \frac{B^2}{r_W^2} \frac{S_S' b'}{S_S b} p\overline{s'_D} = 0 \tag{2.2.26.2}$$

ここで、$\lambda'^2 \equiv \dfrac{B^2}{r_W{}^2}\dfrac{S_S'b'}{S_S b}p$ とおくと次式を得る。

$$\therefore \frac{\partial^2 \overline{s'_D}}{\partial z'_D{}^2} - \lambda'^2 \overline{s'_D} = 0 \qquad (2.2.27)$$

方程式(2.2.27)の一般解は次式である。

$$\overline{s'_D} = c_1'\exp(\lambda' z'_D) + c_2'\exp(-\lambda' z'_D) \qquad (2.2.28.1)$$

条件(2.2.18.1)を導入すると次式を得る。

$$c_1'\exp(0) + c_2'\exp(0) = \overline{s_D} \qquad (2.2.28.2)$$

条件(2.2.18.2)を導入すると次式を得る。

$$c_1'\exp(\lambda') + c_2'\exp(-\lambda') = 0 \qquad (2.2.28.3)$$

条件(2.2.18.3)を導入すると次式を得る。

$$c_1'\exp(\lambda') - c_2'\exp(-\lambda') = 0 \qquad (2.2.28.4)$$

①粘性土層上端部が定水頭境界の時

式(2.2.28.2,3)を連立方程式として、 c_1'、c_2' について解き、これらを式(2.2.28.1)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned}
\overline{s'_D} &= \frac{-\exp(-\lambda')\exp(\lambda' z'_D) + \exp(\lambda')\exp(-\lambda' z'_D)}{\exp(\lambda') - \exp(-\lambda')}\overline{s_D} \\
\overline{s'_D} &= \frac{-\exp\{-\lambda'(1-z'_D)\} + \exp\{\lambda(1-z'_D)\}}{\exp(\lambda') - \exp(-\lambda')}\overline{s_D} \\
&= \frac{\sinh\{\lambda'(1-z'_D)\}}{\sinh(\lambda')}\overline{s_D}
\end{aligned} \qquad (2.2.28.5)$$

よって、式(2.2.10)中にみられる漏水層内の水位低下特性(左辺第 4 項微分項)は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
\left.\frac{d\overline{s'_D}}{dz'_D}\right|_{z'_D=0} &= -\left.\frac{\lambda'\cosh\{\lambda'(1-z'_D)\}}{\sinh(\lambda')}\right|_{z'_D=0}\overline{s_D} \\
&= -\frac{\lambda'\cosh(\lambda')}{\sinh(\lambda')}\overline{s_D} = -\lambda'\coth(\lambda')\overline{s_D}
\end{aligned} \qquad (2.2.29)$$

$$\lambda'^2 = \frac{B^2}{r_W{}^2}\frac{S_S'b'}{S_S b}p \tag{2.2.30}$$

②粘性土上端部が不透水境界の時

式(2.2.28.2,4)を連立方程式として、 c_1、c_2について解き、これらを式(2.2.28.1)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned}
\overline{s'_D} &= \frac{\exp(-\lambda')\exp(\lambda' z'_D) + \exp(\lambda')\exp(-\lambda' z'_D)}{\exp(\lambda') + \exp(-\lambda')}\overline{s_D} \\
\overline{s'_D} &= \frac{\exp\{-\lambda'(1-z'_D)\} + \exp\{\lambda'(1-z'_D)\}}{\exp(\lambda') + \exp(-\lambda')}\overline{s_D} \\
&= \frac{\cosh\{\lambda'(1-z'_D)\}}{\cosh(\lambda')}\overline{s_D}
\end{aligned} \tag{2.2.31}$$

よって、式(2.2.10)中にみられる漏水層内の水位低下特性(左辺第 4 項微分項)は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
\left.\frac{d\overline{s'_D}}{dz'_D}\right|_{z'_D=0} &= -\left.\frac{\lambda'\sinh\{\lambda'(1-z'_D)\}}{\cosh(\lambda')}\right|_{z'_D=0}\overline{s_D} \\
&= -\frac{\lambda'\sinh(\lambda')}{\cosh(\lambda')}\overline{s_D} = -\lambda'\tanh(\lambda')\overline{s_D}
\end{aligned} \tag{2.2.32}$$

$$\lambda'^2 = \frac{B^2}{r_W{}^2}\frac{S_S'b'}{S_S b}p \tag{2.2.30}$$

これらをまとめると漏水による供給項の微分項は以下のようになる。

$$\left.\frac{d\overline{s'_D}}{dz'_D}\right|_{z'_D=0} = -f(\lambda')\overline{s_D} \tag{2.2.33.1}$$

ここで、関数$f(\lambda')$は以下の値をとる。

$$f(\lambda') = \begin{cases} 0 & \text{for } \dfrac{r_W}{B} = 0 \\ 1 & \text{for } \dfrac{r_W}{B} \neq 0, S_S'/S_S = 0 \\ \lambda'\coth(\lambda') & \text{for } \dfrac{r_W}{B} \neq 0, S_S'/S_S \neq 0, s_u' = 0 \\ \lambda'\tanh(\lambda') & \text{for } \dfrac{r_W}{B} \neq 0, S_S'/S_S \neq 0, ds_u'/dz' = 0 \end{cases} \tag{2.2.33.2}$$

(4)変換技法

1)Laplace 変換

時間項について Laplace 変換を行う。Laplace 変換は以下の公式による。

$$L[f(t)] = \overline{f(p)} = \int_0^\infty \exp(-pt) f(t) dt \tag{2.2.34.1}$$

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = p\overline{f(p)} - f(t=0) \tag{2.2.34.2}$$

$$L[a] = \frac{a}{p} \tag{2.2.34.3}$$

支配方程式は次式のように Laplace 変換できる。

$$\frac{\partial^2 \overline{s_D}}{\partial r_D{}^2} + \frac{1}{r_D}\frac{\partial \overline{s_D}}{\partial r_D} + a^2 \frac{\partial^2 \overline{s_D}}{\partial z_D{}^2} + \left(\frac{r_W}{B}\right)^2 \left.\frac{\partial \overline{s_D}'}{\partial z_D'}\right|_{z_D'=0} = p\overline{s_D} - s_D(t_D = 0) \tag{2.2.35.1}$$

初期条件 (2.2.12) を代入すると以下となる。

$$\frac{\partial^2 \overline{s_D}}{\partial r_D{}^2} + \frac{1}{r_D}\frac{\partial \overline{s_D}}{\partial r_D} + a^2 \frac{\partial^2 \overline{s_D}}{\partial z_D{}^2} - \left(\frac{r_W}{B}\right)^2 f(\lambda')\overline{s_D} - p\overline{s_D} = 0 \tag{2.2.35.2}$$

2)Fourier Cosine 変換

Z 軸方向に Fourie Cosine 変換を行う。変換は以下の公式による。

$$F_C[f(z)] = f_C(n) = \int_0^1 f(z)\cos(n\pi z) dz \tag{2.2.36.1}$$

$$F_C\left[\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2}\right] = -(n\pi)^2 f_C(n) + (-1)^n \left.\frac{df}{dz}\right|_{z=1} - \left.\frac{df}{dz}\right|_{z=0} \tag{2.2.36.2}$$

よって、支配方程式は以下となる。

$$\frac{\partial^2 \overline{s_{DC}}}{\partial r_D{}^2} + \frac{1}{r_D}\frac{\partial \overline{s_{DC}}}{\partial r_D} - a^2 (n\pi)^2 \overline{s_{DC}} + (-1)^n \left.\frac{\partial \overline{s_D}}{\partial z_D}\right|_{z_D=1} - \left.\frac{\partial \overline{s_D}}{\partial z_D}\right|_{z_D=0} - \left(\frac{r_W}{B}\right)^2 f(\lambda')\overline{s_{DC}} - p\overline{s_{DC}} = 0 \tag{2.2.37.1}$$

境界条件(2.2.13.5 及び 6)を代入すると以下のようになる。

$$\frac{\partial^2 \overline{s_{DC}}}{\partial r_D{}^2} + \frac{1}{r_D}\frac{\partial \overline{s_{DC}}}{\partial r_D} - \left\{a^2 (n\pi)^2 + \left(\frac{r_W}{B}\right)^2 f(\lambda') + p\right\}\overline{s_{DC}} = 0 \tag{2.2.37.2}$$

ここで、以下とおく。

$$\lambda^2 \equiv a^2 (n\pi)^2 + \left(\frac{r_W}{B}\right)^2 f(\lambda') + p \tag{2.2.38}$$

よって

$$\frac{\partial^2 \overline{s_{DC}}}{\partial {r_D}^2} + \frac{1}{r_D}\frac{\partial \overline{s_{DC}}}{\partial r_D} - \lambda^2 \overline{s_{DC}} = 0 \tag{2.2.39}$$

3)境界条件の Laplace-Fourier 変換

境界条件は先の Laplace 変換および Fourier Cosine 変換によって以下のようになる。

$$\overline{s_{DC}(r_D \to \infty)} = 0 \tag{2.2.40.1}$$

$$\frac{d\overline{s_{DC}(r_D \to \infty)}}{dr_D} = 0 \tag{2.2.40.2}$$

$$\overline{s_{DC}(r_D = R_D)} = 0 \tag{2.2.40.3}$$

$$\frac{d\overline{s_{DC}(r_D = R_D)}}{dr_D} = 0 \tag{2.2.40.4}$$

$$r_D \frac{d\overline{s_{DC}(r_D \to 0)}}{dr_D} = -\frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \tag{2.2.40.5}$$

$$r_D \frac{d\overline{s_{DC}(r_D = 1)}}{dr_D} = \left\{\frac{bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp}\right\} g_{DC}(n) \tag{2.2.40.6}$$

$$r_D \frac{d\overline{s_{DC}(r_D = 1)}}{dr_D} = -\overline{Q_D} g_{DC}(n) \tag{2.2.40.7}$$

$$\int_{d/b}^{(d+l)/b} \overline{s_D(r_D = 1, z_D)} dz_D = \frac{l}{bp} \tag{2.2.40.8}$$

ここで、boxcar 関数 g_D の FourierCosine 変換は以下のようになる。

$$\begin{aligned} g_{DC}(n) &= \int_0^1 g_D(z_D)\cos(n\pi z_D)dz_D \\ &= \int_{d/b}^{(d+l)/b} g_D(z_D)\cos(n\pi z_D)dz_D \\ &= \int_{d/b}^{(d+l)/b} 1\cdot\cos(n\pi z_D)dz_D \end{aligned} \tag{2.2.41.1}$$

n=0 の時、

$$g_{DC}(0) = \int_{d/b}^{(d+l)/b} 1 \cdot \cos(0\pi z_D) dz_D$$
$$= \int_{d/b}^{(d+l)/b} dz_D = \frac{l}{b} \tag{2.2.41.2}$$

n≠0 の時、

$$g_{DC}(n) = \frac{1}{n\pi}\left[\sin(n\pi z_D)\right]_{d/b}^{(d+l)/b}$$
$$= \frac{1}{n\pi}\left[\sin\left(\frac{n\pi(d+l)}{b}\right) - \sin\left(\frac{n\pi d}{b}\right)\right]$$
$$= \frac{2}{n\pi}\cos\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin\left(\frac{n\pi d}{2b}\right) \tag{2.2.41.3}$$

(5)境界条件の導入

方程式(2.2.39)の一般解は次式となることが知られている。

$$\overline{s_{DC}} = C_1 K_0(\lambda r_D) + C_2 I_0(\lambda r_D) \tag{2.2.42}$$

ここで、C_1, C_2 はそれぞれ定数項であり、適切な境界条件の組み合わせによる連立によって得ることができる。

①各境界条件の整理

境界条件 BCR1-1 : (2.2.40.1)

$$\overline{s_{DC}(r_D \to \infty)} = 0 : C_2 = 0 \tag{2.2.43.1}$$

境界条件 BCR1-2 : (2.2.40.2)

$$\frac{d\overline{s_{DC}(r_D \to \infty)}}{dr_D} = \lim_{r_D \to \infty} -\lambda C_1 K_1(\lambda r_D) + \lambda C_2 I_1(\lambda r_D) = 0 : C_2 = 0 \tag{2.2.43.2}$$

ここで、 K_0 :第二種0次修正ベッセル関数 、I_0 :第一種0次修正ベッセル関数

境界条件 BCR2-1 : (2.2.40.3)

$$\overline{s_{DC}(r_D = R_D)} = 0 : C_1 K_0(\lambda R_D) + C_2 I_0(\lambda R_D) = 0 \tag{2.2.43.3}$$

境界条件 BCR2-2 : (2.2.40.4)

$$\frac{d\overline{s_{DC}(r_D = R_D)}}{dr_D} = -\lambda C_1 K_1(\lambda R_D) + \lambda C_2 I_1(\lambda R_D) = 0 \ : \ -C_1 K_1(\lambda R_D) + C_2 I_1(\lambda R_D) = 0 \tag{2.2.43.4}$$

境界条件 BCW1 : (2.2.40.5)

$$r_D \frac{d\overline{s_{DC}(r_D \to 0)}}{dr_D} = \lim_{r_D \to 0} r_D \{-\lambda K_1(\lambda r_D) C_1 + \lambda I_1(\lambda r_D) C_2\} = -\frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \ : \ C_1 = \frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \tag{2.2.43.5}$$

境界条件 BCW2 : (2.2.40.6)

$$r_D \frac{d\overline{s_{DC}(r_D = 1)}}{dr_D} = \left\{\frac{bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp}\right\} g_{DC}(n) :$$

$$-\lambda K_1(\lambda) C_1 + \lambda I_1(\lambda) C_2 = \left\{\frac{bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp}\right\} g_{DC}(n) \tag{2.2.43.6}$$

境界条件 BCW3 : (2.2.40.7)

$$r_D \frac{d\overline{s_{DC}(r_D = 1)}}{dr_D} = -\overline{Q_D} g_{DC}(n) : -\lambda K_1(\lambda) C_1 + \lambda I_1(\lambda) C_2 = -\overline{Q_D} g_{DC}(n) \quad (2.2.43.7)$$

②境界条件の組み合わせによる連立

ケース 1 : BCR1-1+BCW1

$$C_1 = \frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \quad (2.2.44.1.1)$$

$$C_2 = 0 \quad (2.2.44.1.2)$$

ケース 2 : BCR1-1+BCW2

$$C_2 = -\left\{ \frac{bp}{2l\alpha} \overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp} \right\} \frac{g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda)} \quad (2.2.44.2.1)$$

$$C_2 = 0 \quad (2.2.44.2.2)$$

ケース 3 : BCR1-1+BCW 3

$$C_1 = \frac{\overline{Q_D} g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda)} \quad (2.2.44.3.1)$$

$$C_2 = 0 \quad (2.2.44.3.2)$$

ケース 4 : BCR2-1＋BCW1

$$C_1 = \frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \quad (2.2.44.4.1)$$

$$C_2 = \frac{-K_0(\lambda R_D)}{I_0(\lambda R_D)} \frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \quad (2.2.44.4.2)$$

ケース 5 : BCR2-1＋BCW 2

$$C_1 = -\left\{ \frac{bp}{2l\alpha} \overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp} \right\} \frac{I_0(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda) I_0(\lambda R_D) + \lambda I_1(\lambda) K_0(\lambda R_D)} \quad (2.2.44.5.1)$$

$$C_2 = -\left\{ \frac{bp}{2l\alpha} \overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp} \right\} \frac{-K_0(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda) I_0(\lambda R_D) + \lambda I_1(\lambda) K_0(\lambda R_D)} \quad (2.2.44.5.2)$$

ケース 6 : BCR2-1+BCW3

$$C_1 = \overline{Q_D} \frac{I_0(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda) I_0(\lambda R_D) + \lambda I_1(\lambda) K_0(\lambda R_D)} \quad (2.2.44.6.1)$$

$$C_2 = \overline{Q_D} \frac{-K_0(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda) I_0(\lambda R_D) + \lambda I_1(\lambda) K_0(\lambda R_D)} \quad (2.2.44.6.2)$$

ケース７：BCR2-2+BCW1

$$C_1 = \frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \tag{2.2.44.7.1}$$

$$C_2 = \frac{K_1(\lambda R_D)}{I_1(\lambda R_D)} \frac{2b}{lp} g_{DC}(n) \tag{2.2.44.7.2}$$

ケース８：BCR2-2+BCW２

$$C_1 = -\left\{ \frac{bp}{2l\alpha} \overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp} \right\} \frac{-I_1(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{-\lambda K_1(\lambda) I_1(\lambda R_D) + \lambda I_1(\lambda) K_1(\lambda R_D)} \tag{2.2.44.8.1}$$

$$C_2 = -\left\{ \frac{bp}{2l\alpha} \overline{s_{WD}} - \frac{2b}{lp} \right\} \frac{-K_1(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{-\lambda K_1(\lambda) I_1(\lambda R_D) + \lambda I_1(\lambda) K_1(\lambda R_D)} \tag{2.2.44.8.2}$$

ケース９：BCR2-2+BCW3

$$C_1 = \overline{Q_D} \frac{I_1(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda) I_1(\lambda R_D) - \lambda I_1(\lambda) K_1(\lambda R_D)} \tag{2.2.44.9.1}$$

$$C_2 = \overline{Q_D} \frac{K_1(\lambda R_D) g_{DC}(n)}{\lambda K_1(\lambda) I_1(\lambda R_D) - \lambda I_1(\lambda) K_1(\lambda R_D)} \tag{2.2.44.9.2}$$

尚、ここではBCR1-2に対する組み合わせは除外した。これは式(2.2.43.1及び2)に示すように無限遠方境界条件下では定水位及び不透水境界の違いが見られず、どちらも$C_2 = 0$で表せることから、BCR1-1条件にBCR1-2条件が含まれるとした。

境界条件の一覧を表-2.2.1、以上のように得られた定数C_1，C_2を表-2.2.2にそれぞれまとめた。

表-2.2.1　境界条件一覧表

	BCW1：無限小井戸半径定流量揚水	BCW2：有限井戸半径定流量揚水	BCW3：定圧揚水
BCR1-1 無限遠方定水位	$s(r \to \infty, t) = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=0} = -\frac{Q_o}{l} g(z)$	$s(r \to \infty, t) = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = \left\{C_W \frac{ds_W(t)}{dt} - \frac{Q_o}{l}\right\} g(z)$	$s(r \to \infty, t) = 0$ $\frac{1}{l}\int_d^{d+l} s(r_W, z, t)dz = s_o$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = -\frac{Q(t)}{l} g(z)$
BCR1-2 無限遠方不透水	$\frac{ds(r \to \infty, t)}{dr} = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=0} = -\frac{Q_o}{l} g(z)$	$\frac{ds(r \to \infty, t)}{dr} = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = \left\{C_W \frac{ds_W(t)}{dt} - \frac{Q_o}{l}\right\} g(z)$	$\frac{ds(r \to \infty, t)}{dr} = 0$ $\frac{1}{l}\int_d^{d+l} s(r_W, z, t)dz = s_o$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = -\frac{Q(t)}{l} g(z)$
BCR2-1 有限距離定水位	$s(r = R, t) = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=0} = -\frac{Q_o}{l} g(z)$	$s(r = R, t) = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = \left\{C_W \frac{ds_W(t)}{dt} - \frac{Q_o}{l}\right\} g(z)$	$s(r = R, t) = 0$ $\frac{1}{l}\int_d^{d+l} s(r_W, z, t)dz = s_o$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = -\frac{Q(t)}{l} g(z)$
BCR2-2 有限距離不透水	$\frac{ds(r = R, t)}{dr} = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=0} = -\frac{Q_o}{l} g(z)$	$\frac{ds(r = R, t)}{dr} = 0$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = \left\{C_W \frac{ds_W(t)}{dt} - \frac{Q_o}{l}\right\} g(z)$	$\frac{ds(r = R, t)}{dr} = 0$ $\frac{1}{l}\int_d^{d+l} s(r_W, z, t)dz = s_o$ $2\pi K_r r \left.\frac{ds}{dr}\right\|_{r=r_W} = -\frac{Q(t)}{l} g(z)$

表-2.2.2 定数項一覧表： $\overline{s_{DC}}(r_D,p)=\left[c_1K_0(\lambda r_D)+c_2I_0(\lambda r_D)\right]$

	BCW1：無限小井戸半径定流量揚水	BCW2：有限井戸半径定流量揚水	BCW3：定圧揚水
BCR1-1 無限遠方 定水位	BCR1-1× BCW1 $c_1=\frac{2b}{lp}g_{DC}$、$c_2=0$	BCR1-1× BCW2 $c_1=\left\{\frac{-bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}}+\frac{2b}{lp}\right\}\frac{g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)}$、$c_2=0$	BCR1-1× BCW3 $c_1=\frac{\overline{Q_D}}{\lambda K_1(\lambda)}g_{DC}$、$c_2=0$
BCR1-2 無限遠方 不透水	BCR1-2×BCW1 $c_1=\frac{2b}{lp}g_{DC}$、$c_2=0$	BCR1-2× BCW2 $c_1=\left\{\frac{-bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}}+\frac{2b}{lp}\right\}\frac{g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)}$、$c_2=0$	BCR1-2× BCW3 $c_1=\frac{\overline{Q_D}}{\lambda K_1(\lambda)}g_{DC}$、$c_2=0$
BCR2-1 有限距離 定水位	BCR2-1×BCW1 $c_1=\frac{2b}{lp}g_{DC}$ $c_2=\frac{-2b}{lp}\frac{K_0(\lambda R_D)g_{DC}}{I_0(\lambda R_D)}$	BCR2-1× BCW2 $c_1=\left\{\frac{-bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}}+\frac{2b}{lp}\right\}\frac{g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D)}$ $c_2=\left\{\frac{-bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}}+\frac{2b}{lp}\right\}\frac{-K_0(\lambda R_D)g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)I_0(\lambda R_D)+\lambda I_1(\lambda)}$	BCR2-1× BCW3 $c_1=\overline{Q_D}\frac{g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D)}$ $c_2=\overline{Q_D}\frac{-g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)I_0(\lambda R_D)/K_0(\lambda R_D)+\lambda I_1(\lambda)}$
BCR2-2 有限距離 不透水	BCR2-2×BCW1 $c_1=\frac{2b}{lp}g_{DC}$ $c_2=\frac{2b}{lp}\frac{K_1(\lambda R_D)g_{DC}}{I_1(\lambda R_D)}$	BCR2-2× BCW2 $c_1=\left\{\frac{-bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}}+\frac{2b}{lp}\right\}\frac{-g_{DC}}{-\lambda K_1(\lambda)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D)}$ $c_2=\left\{\frac{-bp}{2l\alpha}\overline{s_{WD}}+\frac{2b}{lp}\right\}\frac{-K_1(\lambda R_D)g_{DC}}{-\lambda K_1(\lambda)I_0(\lambda R_D)+\lambda I_1(\lambda)}$	BCR2-2× BCW3 $c_1=\overline{Q_D}\frac{g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)-\lambda I_1(\lambda)K_1(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D)}$ $c_2=\overline{Q_D}\frac{K_1(\lambda R_D)g_{DC}}{\lambda K_1(\lambda)I_1(\lambda R_D)-\lambda I_1(\lambda)}$

2.2.2 数値的逆変換

(1)井戸内平均水位低下量

①境界条件 BCW1 の場合：無限小径井戸による定量揚水

$r_D=1$ における平均地下水位低下量を評価する。ここでは、揚水井戸近傍であることからストレーナー長さと同じ観測井戸ストレーナーに対する平均化を行う。

$$\overline{s_{1D}} = \frac{b}{l}\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[\overline{s_{DC}(r_D=1)}g_{DC}(n)\right]dz_D \tag{2.2.45.1}$$

$$\overline{s_{1D}} = \frac{b}{l}\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[\zeta_1 f_{11}g_{DC} + \zeta_2 f_{21}g_{DC}\right]dz_D \tag{2.2.45.2}$$

$$\overline{s_{1D}} = \frac{b}{l}\zeta_1\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{11}g_{DC}\right]dz_D + \frac{b}{l}\zeta_2\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{21}g_{DC}\right]dz_D \tag{2.2.45.3}$$

$$\overline{s_{1D}} = \frac{b}{l}\zeta_1\Omega_1 + \frac{b}{l}\zeta_2\Omega_2 \tag{2.2.45.4}$$

②境界条件 BCW2 の場合：有限径井戸による定量揚水

次式に示すように、井戸内水位はストレーナー部($r_D=1, d/b<z<(d+l)/b$)に分布する水位低下量をストレーナー長にわたって平均化したものと考えると

$$\overline{s_{WD}} = \frac{b}{l}\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[\overline{s_{DC}(r_D=1)}g_{DC}(n)\right]dz_D \tag{2.2.46.1}$$

上式右辺には$\overline{s_{WD}}$が含まれている。

$$\overline{s_{WD}} = \frac{b}{l}\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[\left(\eta_1\overline{s_{WD}} + \zeta_1\right)f_{11}g_{DC} + \left(\eta_2\overline{s_{WD}} + \zeta_2\right)f_{21}g_{DC}\right]dz_D \tag{2.2.46.2}$$

$$\overline{s_{WD}} = \frac{b}{l}\left(\eta_1\overline{s_{WD}} + \zeta_1\right)\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{11}g_{DC}\right]dz_D + \frac{b}{l}\left(\eta_2\overline{s_{WD}} + \zeta_2\right)\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{21}g_{DC}\right]dz_D \tag{2.2.46.3}$$

$$\overline{s_{WD}} = \frac{b}{l}\left(\eta_1\overline{s_{WD}} + \zeta_1\right)\Omega_1 + \frac{b}{l}\left(\eta_2\overline{s_{WD}} + \zeta_2\right)\Omega_2 \tag{2.2.46.4}$$

$$\overline{s_{WD}} = \frac{\zeta_1\Omega_1 + \zeta_2\Omega_2}{\left(\frac{l}{b} - \eta_1\Omega_1 - \eta_2\Omega_2\right)} \tag{2.2.46.5}$$

③境界条件 BCW3 の場合：定圧揚水

定圧揚水時の境界条件として、孔内平均水位低下量は常に一定という条件を導入する。

$$\begin{aligned}\overline{s_{WD}} &= \frac{b}{l}\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[\overline{s_{DC}(r_D=1)}g_{DC}(n)\right]dz_D \\ &= \frac{1}{p}\end{aligned} \tag{2.2.47}$$

上式右辺には$\overline{Q_D}$が含まれている。

上式右辺には$\overline{Q_D}$が含まれている。

$$\int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[\eta_1 \overline{Q_D} f_{11} g_{DC} + \eta_2 \overline{Q_D} f_{21} g_{DC}\right] dz_D = \frac{l}{bp} \tag{2.2.48.1}$$

$$\eta_1 \overline{Q_D} \int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{11} g_{DC}\right] dz_D + \eta_2 \overline{Q_D} \int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{21} g_{DC}\right] dz_D = \frac{l}{bp} \tag{2.2.48.2}$$

$$\eta_1 \overline{Q_D} \Omega_1 + \eta_2 \overline{Q_D} \Omega_2 = \frac{l}{bp}$$

(2.2.48.3)

$$\overline{Q_D} = \frac{l}{bp} \frac{1}{\eta_1 \Omega_1 + \eta_2 \Omega_2} \tag{2.2.48.4}$$

以上のように主変量 $\overline{s_{1D}}$、$\overline{s_{WD}}$、$\overline{Q_D}$ を求めるには係数η、ς、f の定義が必要であり、

これらの定義から以下に示すΩの算定を行う。Ωの算定に必要なη、ς、fの定義を表-2.2.3にまとめた。

表-2.2.3 定数項一覧表：$\overline{s_{DC}(r_D=1,p)} = \left(\eta_1\overline{F}+\zeta_1\right)f_{11}g_{DC} + \left(\eta_2\overline{F}+\zeta_2\right)f_{21}g_{DC}$

	BCW1：無限小井戸半径定流量揚水	BCW2：有限井戸半径定流量揚水	BCW3：定圧揚水
BCR1-1,1-2 無限遠方 定水位及び 不透水	BCR1-1× BCW1 $\overline{F}=0$ $\eta_1=0$、$\zeta_1=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{11}=K_0(\lambda)$ $\eta_2=0$、$\zeta_2=0$、$f_{21}=0$	BCR1-1× BCW2 $\overline{F}=\overline{s_{WD}}$ $\eta_1=-\dfrac{bp}{2i\alpha}$、$\zeta_1=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{11}=\dfrac{K_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)}$、 、$\eta_2=0$、$\zeta_2=0$、$f_{21}=0$	BCR1-1× BCW3 $\overline{F}=\overline{Q_D}$ $\eta_1=1$、$\zeta_1=0$、 $f_{11}=\dfrac{K_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)}$、 、$\eta_2=0$、$\zeta_2=0$、$f_{21}=0$
BCR2-1 有限距離 定水位	BCR2-1× BCW1 $\overline{F}=0$ $\eta_1=0$、$\zeta_1=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{11}=K_0(\lambda)$ $\eta_2=0$、$\zeta_2=\dfrac{-2b}{lp}$、 $f_{21}=\dfrac{K_0(\lambda R_D)I_0(\lambda)}{I_0(\lambda R_D)}$	BCR2-1× BCW2 $\overline{F}=\overline{s_{WD}}$ $\eta_1=-\dfrac{bp}{2l\alpha}$、$\zeta_1=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{11}=\dfrac{K_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D)}$ 、$\eta_2=-\dfrac{bp}{2l\alpha}$、$\zeta_2=\dfrac{2b}{lp}$ $f_{21}=\dfrac{-K_0(\lambda R_D)I_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)I_0(\lambda R_D)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)}$	BCR2-1× BCW3 $\overline{F}=\overline{Q_D}$ $\eta_1=1$、$\zeta_1=0$、 $f_{11}=\dfrac{K_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)/I_0(\lambda R_D)}$ $\eta_2=1$、$\zeta_2=0$、 $f_{21}=\dfrac{-K_0(\lambda R_D)I_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)I_0(\lambda R_D)+\lambda I_1(\lambda)K_0(\lambda R_D)}$
BCR2-2 有限距離 不透水	BCR2-2× BCW1 $\overline{F}=0$ $\eta_1=0$、$\zeta_1=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{11}=K_0(\lambda)$ $\eta_2=0$、$\zeta_2=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{21}=\dfrac{K_1(\lambda R_D)I_0(\lambda)}{I_1(\lambda R_D)}$	BCR2-2× BCW2 $\overline{F}=\overline{s_{WD}}$ $\eta_1=-\dfrac{bp}{2l\alpha}$、$\zeta_1=\dfrac{2b}{lp}$、 $f_{11}=\dfrac{-K_0(\lambda)}{-\lambda K_1(\lambda)+\lambda I_1(\lambda)K_1(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D)}$ 、$\eta_2=-\dfrac{bp}{2l\alpha}$、$\zeta_2=\dfrac{2b}{lp}$ $f_{21}=\dfrac{-K_1(\lambda R_D)I_0(\lambda)}{-\lambda K_1(\lambda)I_1(\lambda R_D)+\lambda I_1(\lambda)K_1(\lambda R_D)}$	BCR2-2× BCW3 $\overline{F}=\overline{Q_D}$ $\eta_1=1$、$\zeta_1=0$、、 $f_{11}=\dfrac{K_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)-\lambda I_1(\lambda)K_1(\lambda R_D)/I_1(\lambda R_D)}$ 、$\eta_2=1$、$\zeta_2=0$、 $f_{21}=\dfrac{K_1(\lambda R_D)I_0(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)I_1(\lambda R_D)-\lambda I_1(\lambda)K_1(\lambda R_D)}$

(2)Ωの数値処理

上記の整理によって、所定の変量は逆 Fourier 変換を行った後に関数値Ω_1およびΩ_2を求めれば、逆 Laplace 変換に持ち込むことができる。ここでは、関数値Ωi の算定について述べる。

一般形Ωi は次式による。

$$\Omega_i = \int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{i1} g_{DC}\right] dz_D \tag{2.2.49}$$

上式からわかるように、Ωi の計算には、逆 Fourier 変換(F_C^{-1})とストレーナー区間での積分という二つの計算が要求されている。これには以下の二通りの解き方が考えられる。

①解法１：直接展開

$$\begin{aligned}
\Omega_i &= \int_{d/b}^{(d+l)/b} F_C^{-1}\left[f_{i1} g_{DC}\right] dz_D \\
&= \int_{d/b}^{(d+l)/b}\left[f_{i1}(n=0) g_{DC}(n=0) + 2\sum_{n=1}^{\infty} f_{i1}(n)\frac{2}{n\pi} g_{DC}(n)\cos(n\pi z_D)\right] dz_D
\end{aligned} \tag{2.2.50.1}$$

$$= \int_{d/b}^{(d+l)/b} f_{i1}(n=0)\frac{l}{b}dz_D + \int_{d/b}^{(d+l)/b}\left[2\sum_{n=1}^{\infty} f_{i1}(n)\frac{2}{n\pi}\cos\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)\cos(n\pi z_D)\right]dz_D$$

$$= \int_{d/b}^{(d+l)/b} f_{i1}(n=0)\frac{l}{b}dz_D + \int_{d/b}^{(d+l)/b}\left[2\sum_{n=1}^{\infty} f_{i1}(n)\frac{2}{n\pi}\cos\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)\cos(n\pi z_D)\right]dz_D$$

$$= \left(\frac{l}{b}\right)^2 f_{i1}(n=0) + 2\sum_{n=1}^{\infty} f_{i1}(n)\frac{2}{n\pi}\cos\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)\int_{d/b}^{(d+l)/b}\left[\cos(n\pi z_D)\right]dz_D$$

$$= \left(\frac{l}{b}\right)^2 f_{i1}(n=0) + 2\sum_{n=1}^{\infty} f_{i1}(n)\frac{2}{(n\pi)^2}\cos\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)\left[\sin\left(\frac{n\pi(d+l)}{b}\right) - \sin\frac{ndl}{b}\right]$$

$$= \left(\frac{l}{b}\right)^2 f_{i1}(n=0) + 2\sum_{n=1}^{\infty} f_{i1}(n)\frac{2}{(n\pi)^2}\cos\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)\left[\sin\left(\frac{n\pi(d+l)}{b}\right) - \sin\frac{ndl}{b}\right]$$

$$= \left(\frac{l}{b}\right)^2 f_{i1}(n=0) + \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{f_{i1}(n)}{n^2}\cos^2\left(\frac{n\pi(2d+l)}{2b}\right)\sin^2\left(\frac{n\pi l}{2b}\right) \tag{2.2.50.2}$$

解法１で示した無限級数和を含む計算は Hyder ら[8]の論文では極めて計算時間がかかることが示されている。もっとも、Hyder らの手法を観測井戸での水位低下挙動にまで拡張した Butler[22]の論文およびこれに基づく解析プログラムでは解法１による無限級数和が計算されている。当初、当検討業務(その２)でこの解析プログラムを使用したが、スラグ試験法のシミュレーションは体感では計算時間の負担を感じなかった。よって、この解析１によって当検討内容である単孔による揚水試験シミュレーションを行ったところ、揚水試験のシミュレーションでは過大な計算時間がかかる事が分かり、種々の理論曲線の算定には実用上使用不可であるとの結論に達し、以下の解析２に示す手法を採用することとした。

②解法２：高速 Fourier 逆変換(FFT)

まずはΩ_iを求めるにあたり、式(2.2.49)の右辺$\left[f_{i1}g_{DC}\right]$のフーリエ逆変換を考える。フーリエ変換及びフーリエ逆変換は以下の関係にある。

$$\left.\begin{aligned} F_C(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(z_D)e^{-i(2\pi f z_D)}dz_D && \text{フーリエ変換} \\ F(z_D) &= \int_{-\infty}^{\infty} F_C(f)e^{i(2\pi f z_D)}df && \text{フーリエ逆変換} \end{aligned}\right\} \quad (2.2.51)$$

ここでは$\left[f_{i1}g_{DC}\right]$を離散化された N 個のデータとして取り扱う。式(2.2.51)は有限個のデータに対して次式のように表せる。

$$\left.\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi nm/N)} && n = 0,1,2,\cdots,N-1 \\ x_m &= \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{i(2\pi nm/N)} && m = 0,1,2,\cdots,N-1 \end{aligned}\right\} \quad (2.2.52)$$

フーリエ変換及びフーリエ逆変換は上式の数値計算を行うことにより得られるが、この方法では１個の係数を求めるために N 回の計算が必要なため、データ個数 N の増加に伴い計算時間が N^2 に比例して増大する。ＦＦＴはこの欠点を改良し非常に高速に変換を行うことのできる手法である。

式(2.2.52)に着目すると第１式の $1/N$ 及び両式指数部の±を別にすれば、これらは次式の形に表すことができる。

$$b_k = \sum_{j=0}^{N-1} a_j W^{jk} \qquad k = 0,1,2,\cdots,N-1 \qquad (2.2.53)$$

ここに

$$W = e^{i(2\pi/N)} \qquad (2.2.54)$$

これより、両変換は共通の形で表され、同じ算法が適用できることがわかる。

いま、データの個数 N が 2 の累乗のとき式(2.2.53)に従ってa_j（j=0,1,2,…,N-1）を偶数番目と奇数番目の２つの数列に分割し並べ替える。

$$\left.\begin{aligned} &a_0, a_2, a_4, \cdots, a_{2j}, \cdots, a_{N-2} \\ &a_1, a_3, a_5, \cdots, a_{2j+1}, \cdots, a_{N-1} \end{aligned}\right\} \qquad (2.2.55)$$

このとき、データ個数 N の 数列a_jのフーリエ変換は式(2.2.55)のように分割するとそれぞれ長さ $N/2$ の 2 列のフーリエ変換の和で表すことができる。すなわち式(2.2.53)によると

$$\begin{aligned} b_k &= \sum_{j=0}^{N-1} a_j e^{2\pi ijk/N} \\ &= \sum_{j=0}^{N/2-1} a_{2j} e^{2\pi i(2j)k/N} + \sum_{j=0}^{N/2-1} a_{2j+1} e^{2\pi i(2j+1)k/N} \end{aligned}$$

$$= \sum_{j=0}^{N/2-1} a_{2j} e^{2\pi i(2j)k/N} + e^{2\pi ik/N} \sum_{j=0}^{N/2-1} a_{2j+1} e^{2\pi i(2j)k/N}$$

$$= \sum_{j=0}^{N/2-1} a_{2j} e^{2\pi ijk/N} + W^k \sum_{j=0}^{N/2-1} a_{2j+1} e^{2\pi ijk/N} \qquad (2.2.56)$$

となり、式(2.2.56)の偶数、奇数番数列のフーリエ変換それぞれ$b_k^{(e)}$、$b_k^{(o)}$とすると

$$b_k = b_k^{(e)} + W^k b_k^{(o)} \qquad k = 0,1,2,\cdots,N-1 \qquad (2.2.57)$$

式(2.2.57)は$b_k^{(e)}$、$b_k^{(o)}$の足し合わせからb_kが求められることを示しており、FFT では式(2.2.57)の関係を漸化式として適用することにより、高速に係数の合成を行う。たとえば、式(2.2.58)に示すように偶偶数、奇偶数、偶奇数、奇奇数番号からなる 4 行の数列に分解すれば、これらの合成から$b_k^{(e)}$、$b_k^{(o)}$が求められる。

$$\left.\begin{array}{l} a_0, a_4, a_8, \cdots, a_{4j}, \cdots, a_{N-4} \\ a_2, a_6, a_{10}, \cdots, a_{4j+2}, \cdots, a_{N-2} \\ a_1, a_5, a_9, \cdots, a_{4j+1}, \cdots, a_{N-3} \\ a_3, a_7, a_{11}, \cdots, a_{4j+3}, \cdots, a_{N-1} \end{array}\right\} \begin{array}{l} \left.\begin{array}{l} \to b_k^{(ee)} \\ \to b_k^{(eo)} \end{array}\right\} \to b_k^{(e)} \\ \left.\begin{array}{l} \to b_k^{(oe)} \\ \to b_k^{(oo)} \end{array}\right\} \to b_k^{(o)} \end{array} \qquad (2.2.58)$$

すなわち、式(2.2.55)の分割を順次行い、分割を$\log_2 N$回行えば元の N 個のデータは N 行 1 列の数列に分解される。データ数 1 個のフーリエ変換は式(2.2.52)で N=1 の時であるから、そのデータの値そのものである。

したがって、N 行 1 列に分割されたデータから式(2.2.57)の合成を$\log_2 N$回行えば式(2.2.53)に示すフーリエ変換b_kが得られることになる。これを N 個のデータについて行うわけであるから、計算時間は$N \log_2 N$に比例する。

このことより FFT による計算時間は式(2.2.52)の数値計算を行う場合よりデータ個数 N が多いほどはるかに高速となることがわかる。

このように、FFT ルーチンを用いることにより、N 個のデータに離散化された$\left[f_{i1} g_{DC}\right]$のフーリエ逆変換すなわち、帯水層鉛直方向に離散分布する$\overline{s_D(r_D, z_D)}$が得られる。

次に得られた$\overline{s_D(r_D, z_D)}$に対して対象区間の積分を行う。解法 1 では対象区間の積分式を誘導しているが、ここでは離散化されたデータを取り扱っているため、区分求積法による積分を行うこととなる。

以上のようにしてΩ_iを算定した。

(3)解法３：逆 Laplace 変換

解法１あるいは解法２によってΩ_iを得、これを 式(2.2.45.4)、式(2.2.46.5)、式(2.2.48.4)に代入し、$\overline{s_D(r_D, z_D)}$が得られると、数値的逆 Laplace 変換技法によって s_D 値あるいは Q_D に変換することとなる。(その２)業務で紹介したように、Laplace 変数 p を実数場のみ扱う Stehfest 法と複素数場で扱う Crump 法[6]が知られている。

(その 2)業務では精度面に着目して Crump 法を採用したが、不完全貫入井戸の問題では Fourier 逆変換の計算労力の問題があったことと、同系列の Butler[22]のプログラムで採用されて適切な精度を有すると確認されていることから、今回は Stehfest 法[5]によった。
Stehfest 法では次式で逆変換[10]がなされている。

$$G(t) = \frac{\ln(2)}{t}\sum_{k=1}^{N} V_k \overline{G}\left(\frac{k\ln(2)}{2}\right) \tag{2.2.59.1}$$

ここで、
$$V_k = (-1)^{\left[N/2+k\right]}\sum_{m=\frac{k+1}{2}}^{\min(k,N/2)} \frac{m^{N/2}(2m)!}{(N/2-m)!\,m!\,(m-1)!\,(k-m)!\,(2m-1)!} \tag{2.2.59.2}$$

2．2．3 妥当性の検討

数値解析 [11]によるシミュレーション結果と理論解の比較を行う。ここでは表 2.2.4 及び 5 に示す基本物性及び基本試験条件に対するシミュレーションケースをまとめた。単孔式揚水試験であることを前提に、ここでの比較は揚水井戸から得られる情報のみ対象とした。解析に用いた要素分割図を図-2.2.3 に示す。解析結果は実次元であるが、比較時の標記は前節で定義した無次元化式(2.2.9)によった。

表-2.2.4 基本物性条件

物性項目	対象	物性値	備考
透水係数①	帯水層	$K=10^{-2}$cm/s	$r_W/B=1.58\times10^{-4}$
	漏水層	$K'=10^{-6}$ cm/s	
透水係数②	帯水層	$K=10^{-5,-2}$ cm/s	$r_W/B=1.58\times10^{-3}$ を保つように帯水層と漏水層と漏水層の透水係数を決定した。 ※） $K_r=K_z=K$
	漏水層	$K'=10^{-7,-4}$ cm/s	
比貯留係数	帯水層	$Ss=10^{-8}$1/cm	
	漏水層	$Ss'=10^{-6}$1/cm	
層　厚	帯水層	$b=10^3$cm	
	漏水層	$b'=10^2$cm	
有限影響圏	帯水層	R=50m	

※）透水係数①：図-2.2.7

透水係数②：図-2.2.4～6

表-2.2.5 基本試験条件

	項目	物性値	備考
井戸構造	ストレーナー径	rw=5cm	
	ストレーナー長	l=250cm	l/b=0.25
	ストレーナー位置	帯水層中央	d/b=0.375
定量揚水	揚水流量	$Q_o=3\times10^3$cm^3/s	$K=10^{-2}$ cm/s の時
	揚水流量	$Q_o=3$cm^3/s	$K=10^{-5}$ cm/s の時
定圧揚水	孔内水位低下量	$s_o=10^3$cm	

※）透水係数①：図-2.2.7

透水係数②：図-2.2.4～6

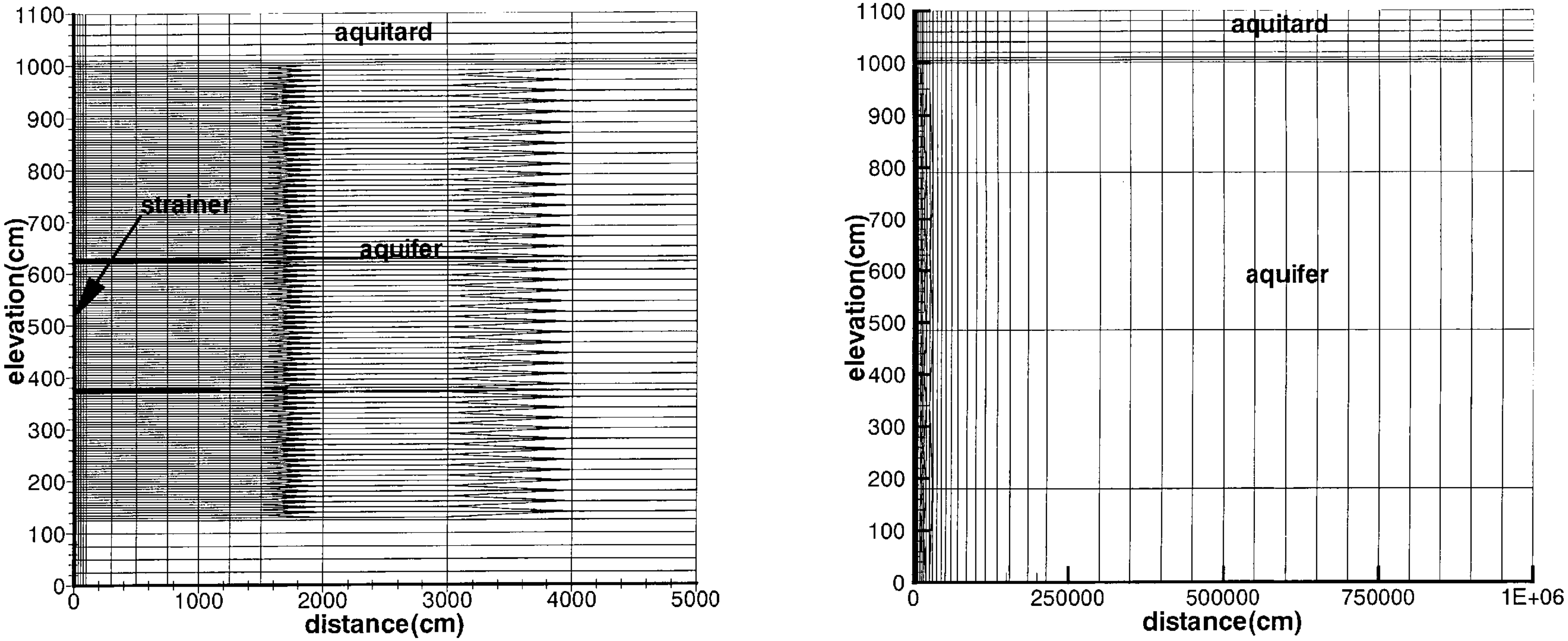


図-2.2.3　FEM 解析に用いた要素分割図

表-2.2.6 検証ケース一覧表

a. $r_W / B = 1.58 \times 10^{-4}$ 相当時

図番号 (図*.*(*))	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.2.4.a	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	無
図-2.2.4.b	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	定水位	無
図-2.2.4.c	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	不透水	無
図-2.2.4.d	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	非貯留
図-2.2.4.e	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	貯留定水位
図-2.2.4.f	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	貯留不透水
図-2.2.5.a	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	無
図-2.2.5.b	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	定水位	無
図-2.2.5.c	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	不透水	無
図-2.2.5.d	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	非貯留
図-2.2.5.e	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留定水位
図-2.2.5.f	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留不透水
図-2.2.6.a	s_0	$r_W \neq 0$	−	R→∞	無
図-2.2.6.b	s_0	$r_W \neq 0$	−	定水位	無
図-2.2.6.c	s_0	$r_W \neq 0$	−	不透水	無
図-2.2.6.d	s_0	$r_W \neq 0$	−	R→∞	非貯留
図-2.2.6.e	s_0	$r_W \neq 0$	−	R→∞	貯留定水位
図-2.2.6.f	s_0	$r_W \neq 0$	−	R→∞	貯留不透水

※）Q_0：定量揚水　、s_0：定圧揚水
非貯留：非貯留性漏水
貯留定水位：貯留性漏水（粘性土層上端部定水位）
貯留不透水：貯留性漏水（粘性土層上端部不透水）

b. $r_W / B = 1.58 \times 10^{-3}$ 相当時

図-2.2.7.a	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	非貯留
図-2.2.7.b	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	貯留定水位
図-2.2.7.c	Q_0	$r_W \neq 0$	Cw=0	R→∞	貯留不透水
図-2.2.7.d	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	非貯留
図-2.2.7.e	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留定水位
図-2.2.7.f	Q_0	$r_W \neq 0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留不透水
図-2.2.7.g	s_0	$r_W \neq 0$	―	R→∞	非貯留
図-2.2.7.h	s_0	$r_W \neq 0$	―	R→∞	貯留定水位
図-2.2.7i	s_0	$r_W \neq 0$	―	R→∞	貯留不透水

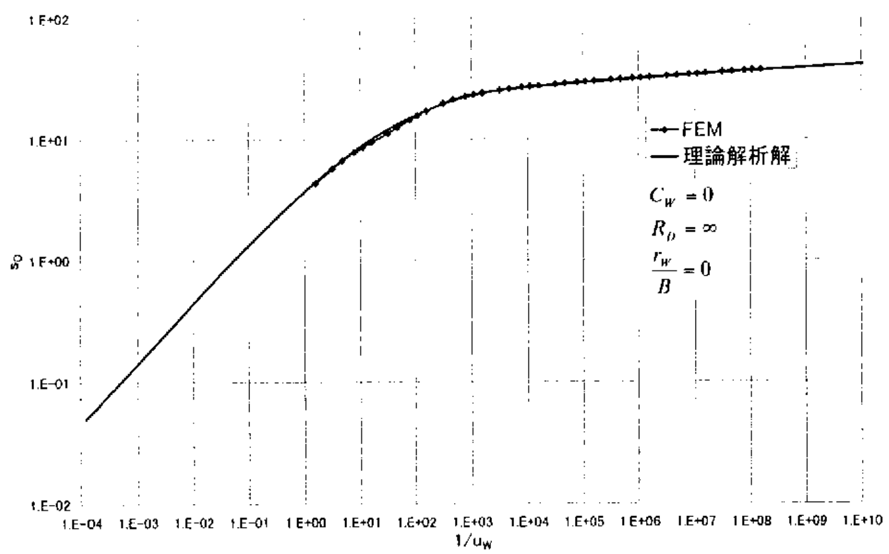
※）Q_0：定量揚水　、s_0：定圧揚水
非貯留：非貯留性漏水
貯留定水位：貯留性漏水（粘性土層上端部定水位）
貯留不透水：貯留性漏水（粘性土層上端部不透水）

これらの検証結果は、図-2.2.4～6 に示す。

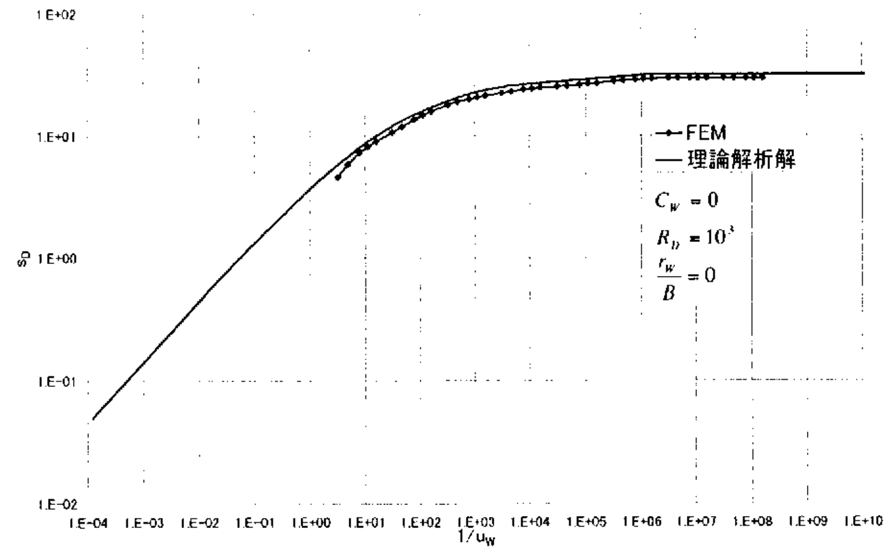
いずれの結果も数値解析結果と理論解はよく一致している。特にここでは、漏水に関する以下の特性を確認しておく。数値解析モデルで表現された漏水モデルは異なる浸透特性を有する二層系モデルであり、実際現象をより正確に扱っている。しかし、理論解で扱っているのは近似的な漏水モデルである。漏水モデルと二層系モデルの違いは以下の点で異なる。

- 二層系モデルでは、漏水流量は両層々境の水位低下量に対して計算され、漏水層からの供給水は層境から帯水層内へ鉛直水平両成分を有して逸散する。このため、層境の水位分布は他の深度面と異なってしかるべきである。
- 漏水性モデルでは、計算対象深さの水位低下量を深さ方向の平均値とみなした上での漏水流量を算定している。それゆえに、二層系モデルで見られるような漏水による供給水の逸散は水平方向成分しか有さない。また、漏水層内の流れは鉛直方向に限定している。

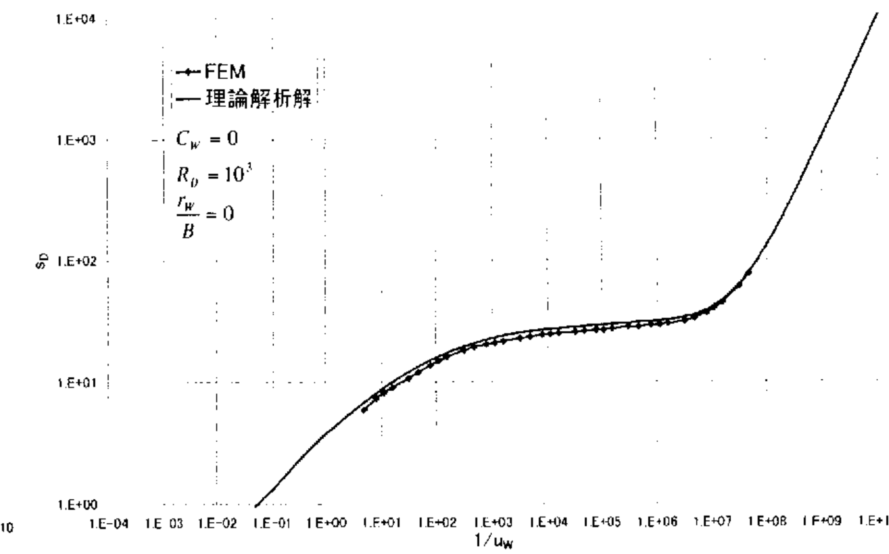
このため、帯水層の逸散能力に比べて漏水量の多くなるケースでは FEM 解と理論解の一致が見られないと思われ、漏水量の多くなる $r_W/B=1.58\times10^{3}$ のケースを図-2.2.7 に比較した。結果としては両者良く一致している事が確かめられ、実用上両モデル化の差違は無いと考えられる。よって、本検討で開発した理論解は妥当であると判断する。



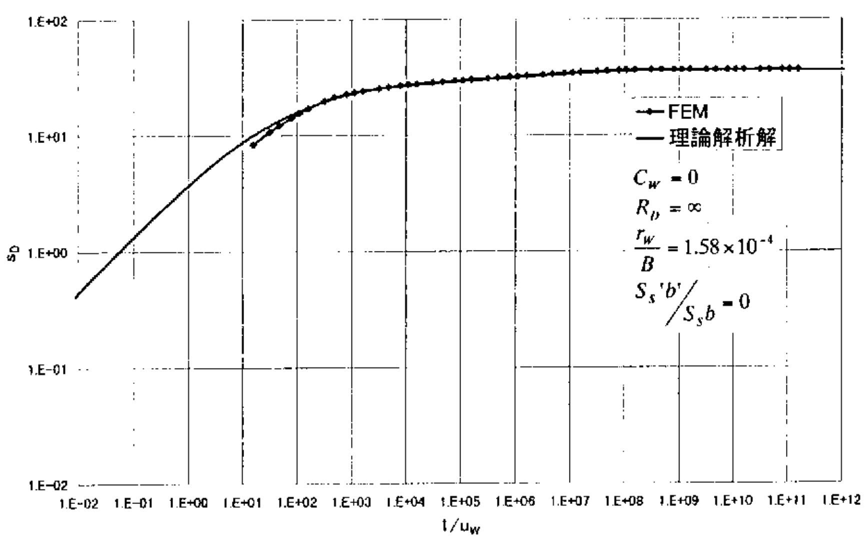
a.無限遠方境界



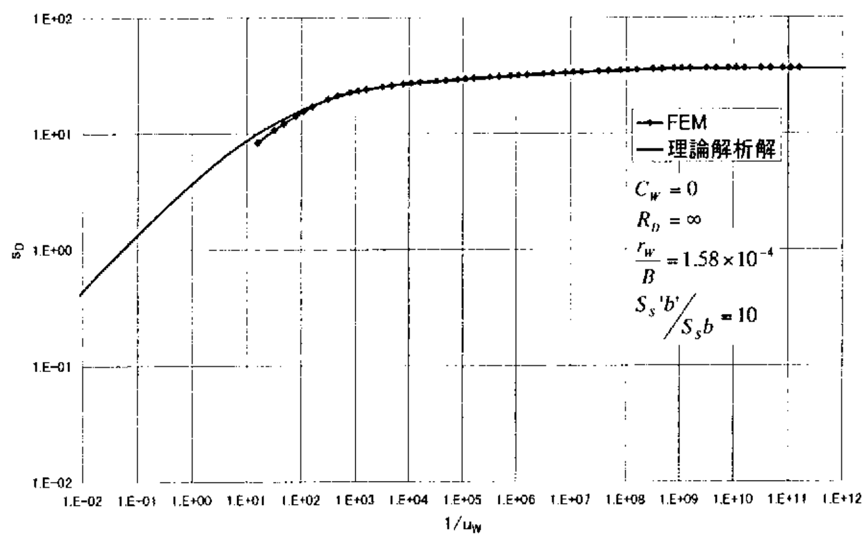
b.有限遠方定水位境界



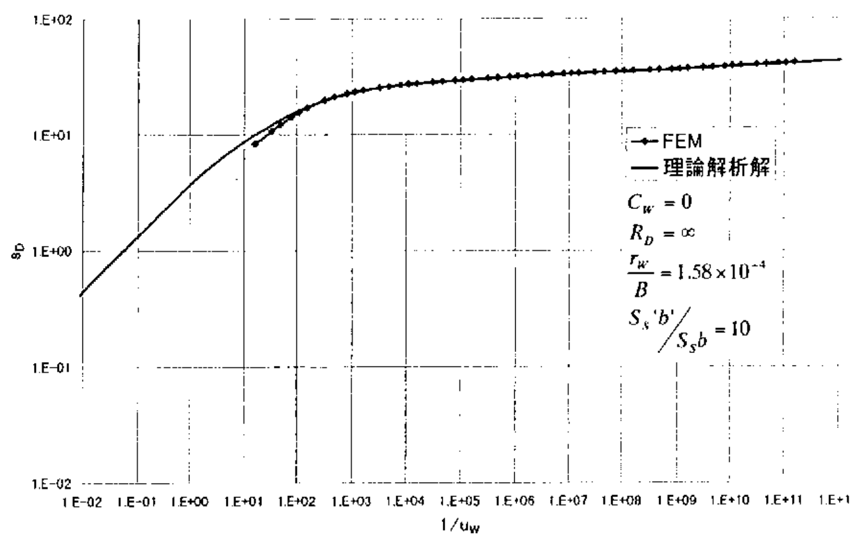
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



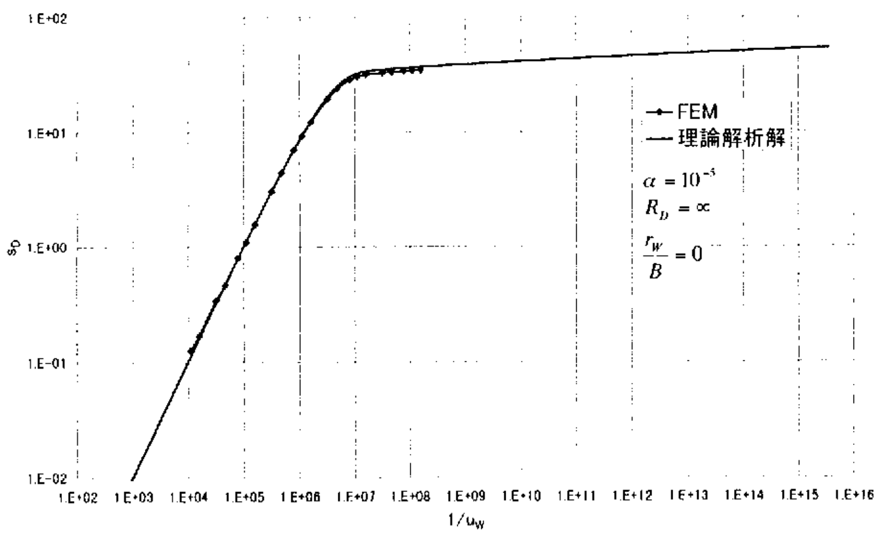
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q} s$ （式(2. 2. 9)参照）

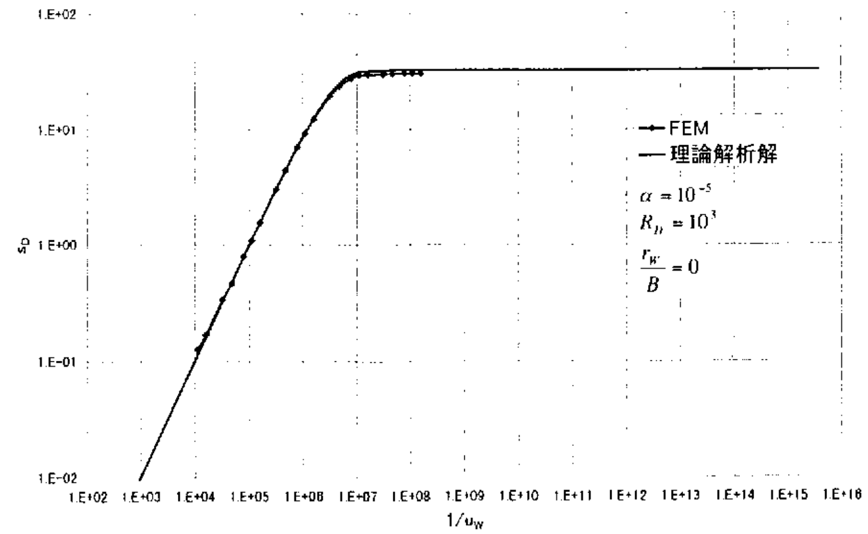
横軸：$1/u_W = \dfrac{4K_r}{S_S} \dfrac{t}{r_W^2}$ （式(2. 3. 10)参照）

$l/b = 0.25 \cdot d/b = 0.375$

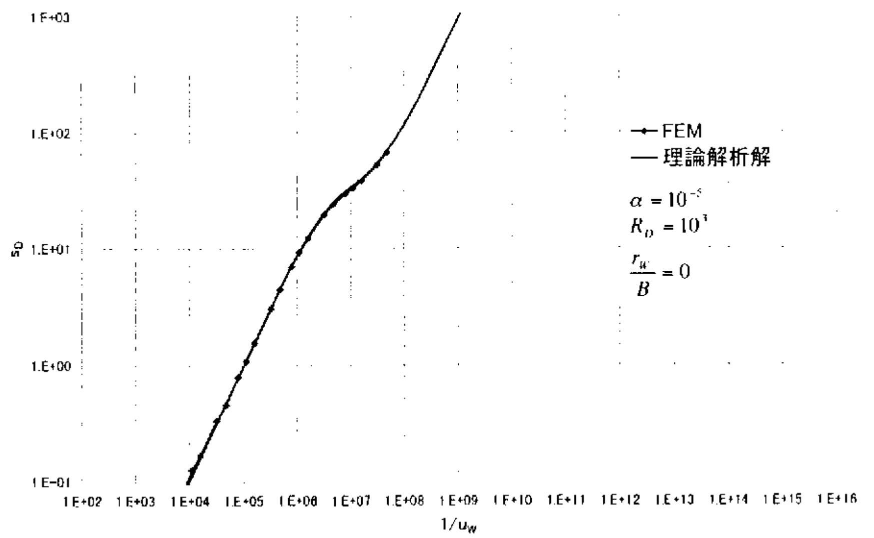
図-2. 2. 4　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の検証結果（両対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）



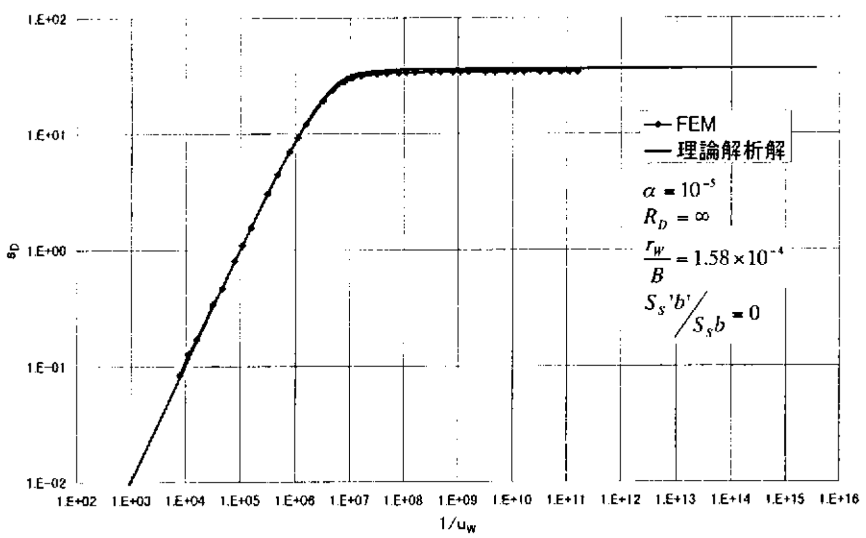
a.無限遠方境界



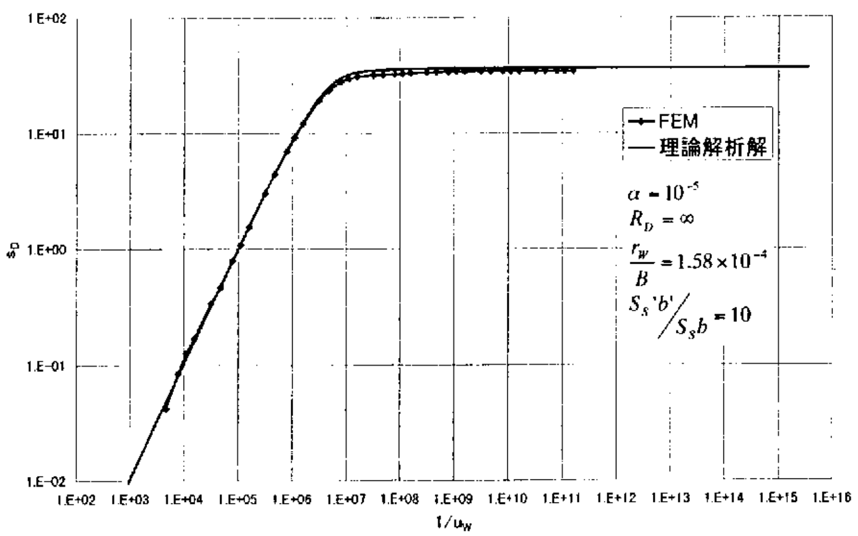
b.有限遠方定水位境界



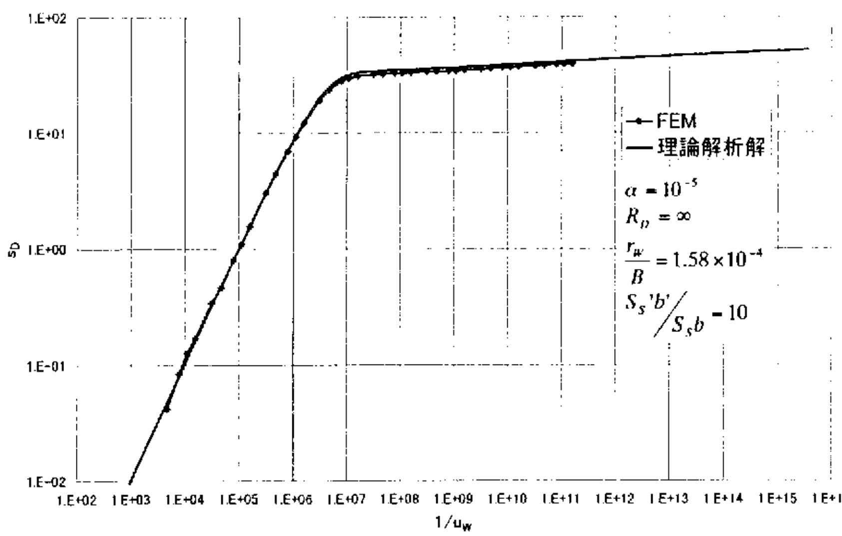
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



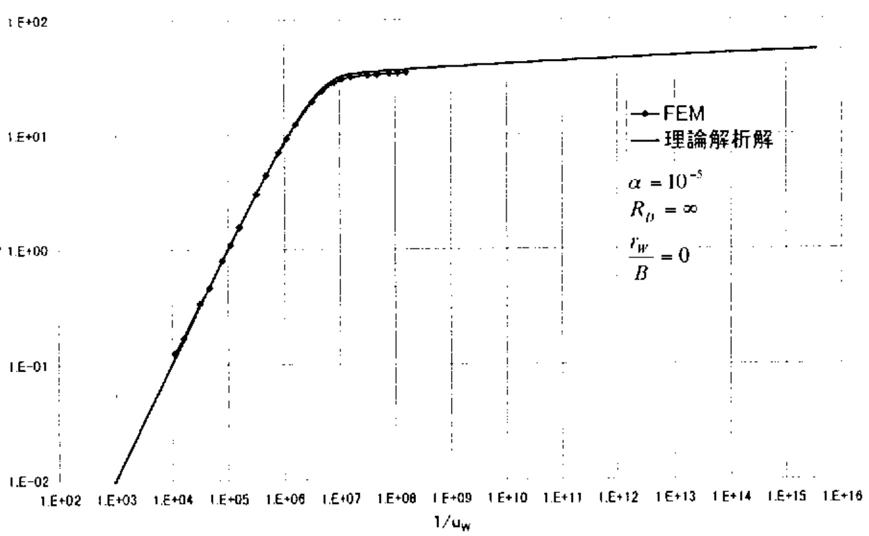
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q} s$ （式(2. 2. 9)参照）

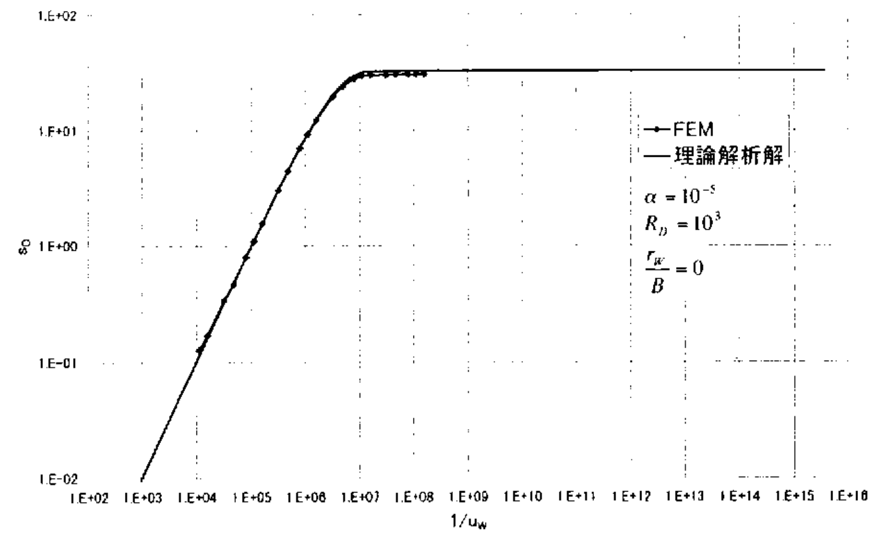
横軸：$1/u_W = \dfrac{4K_r}{S_S}\dfrac{t}{r_W^2}$ （式(2. 3. 10)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

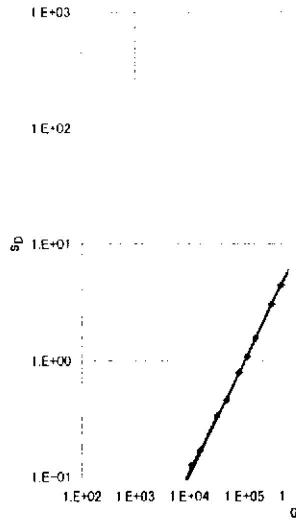
図-2. 2. 5　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の検証結果（両対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）

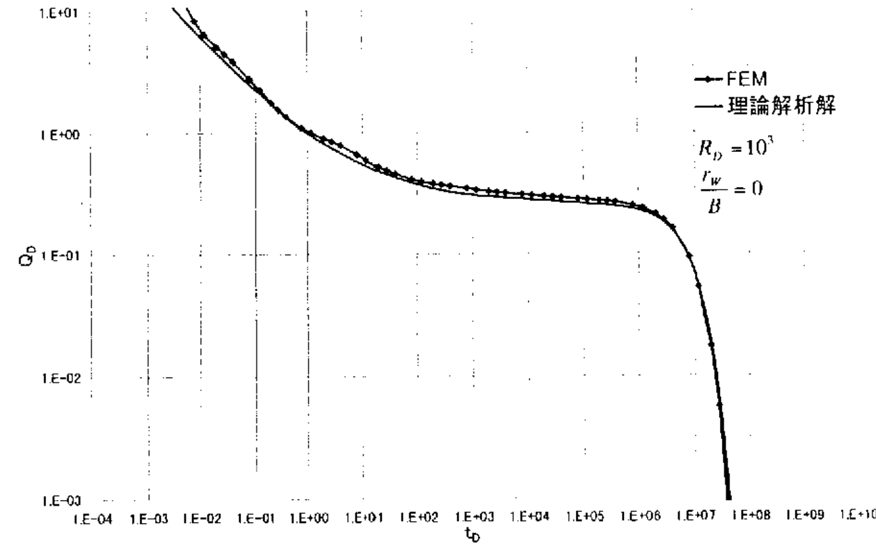


a.無限遠方境界

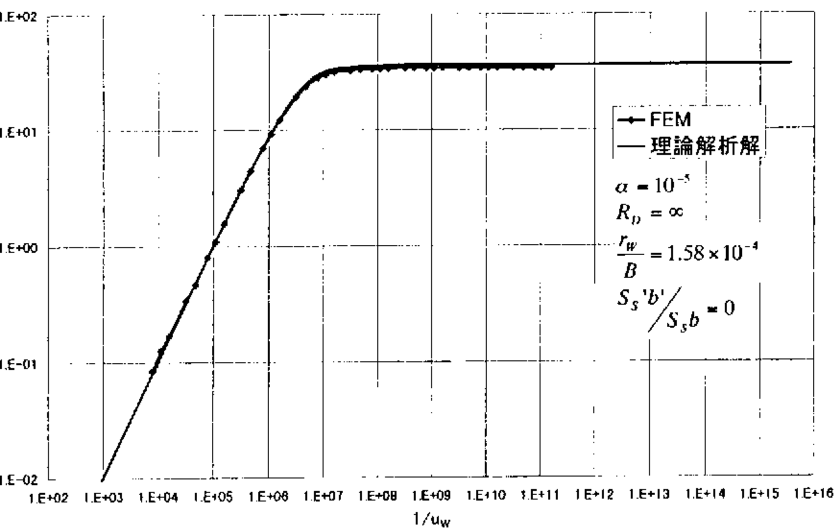


b.有限遠方定水位境界

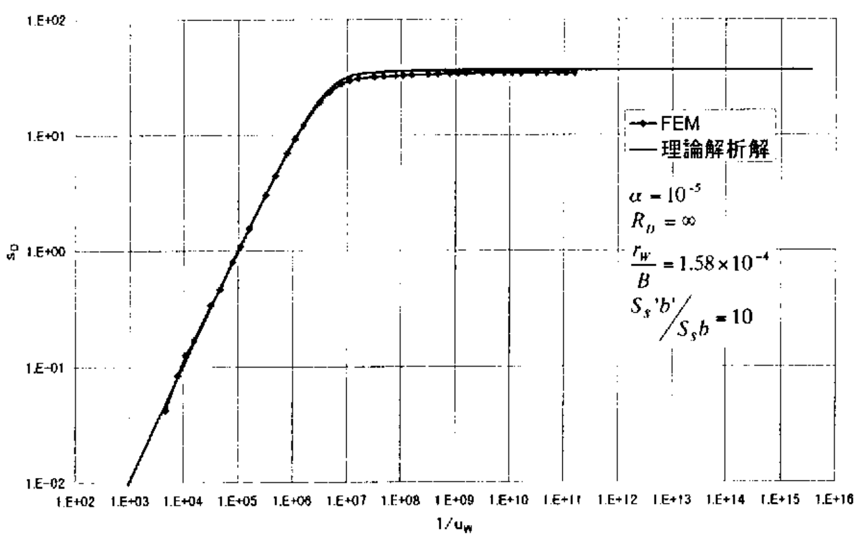




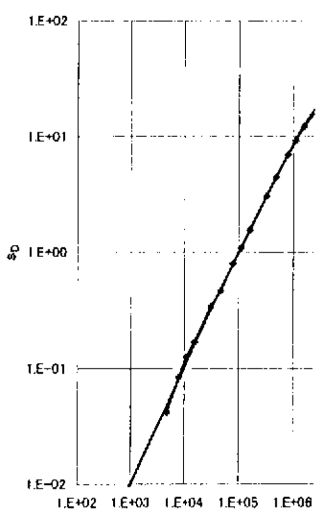
c.有限遠方不透水境界



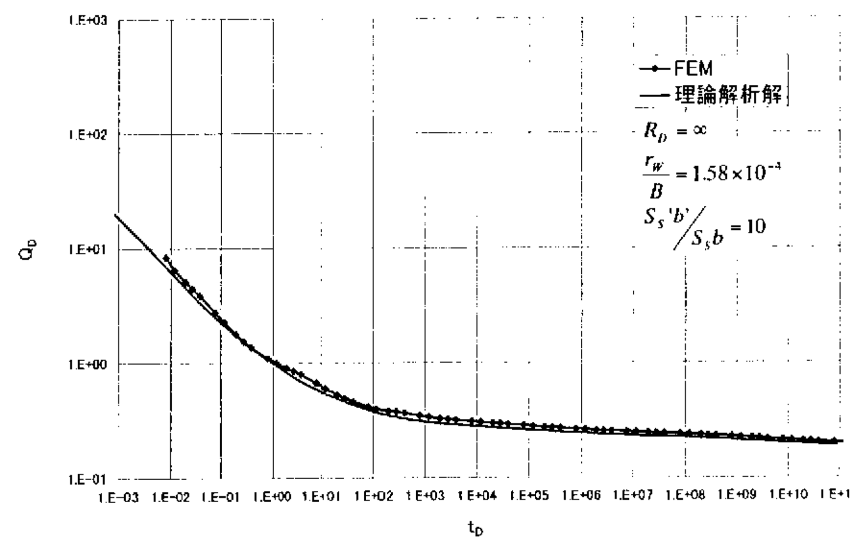
d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



f.貯留



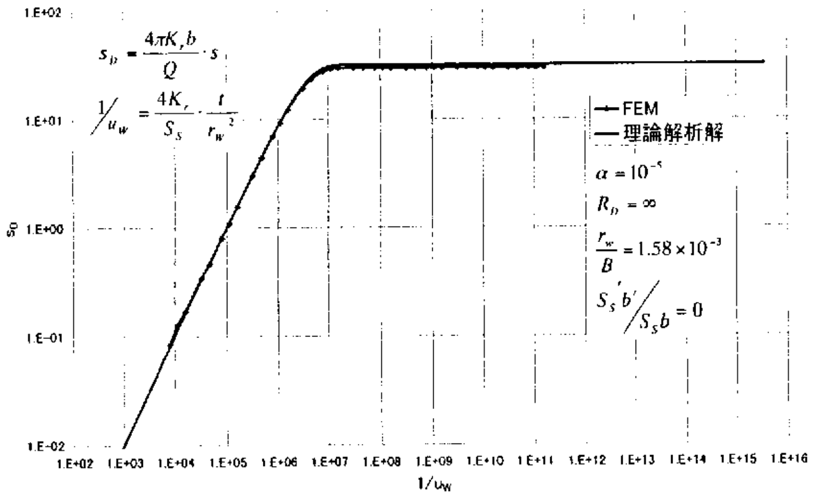
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$Q_D = \frac{Q}{2\pi K_r s_0}\frac{1}{l}$ （式(2. 2. 16. 4)参照）

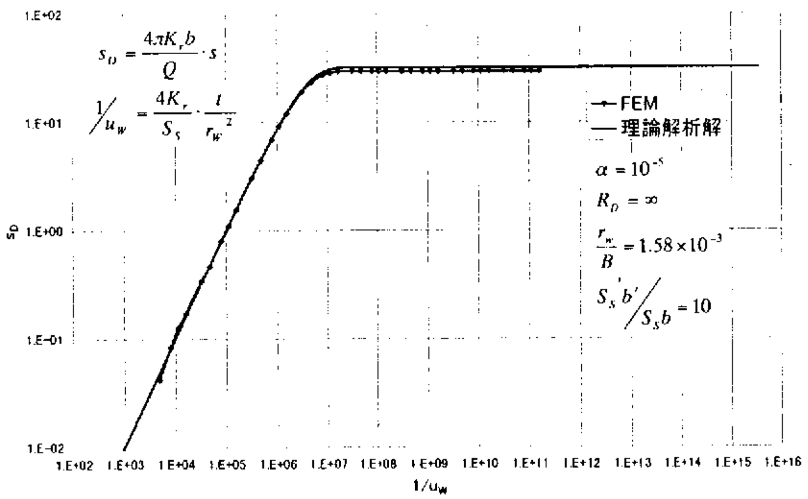
横軸：$t_D = \frac{K_r}{S_S}\frac{t}{{r_W}^2}$ （式(2. 2. 9)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

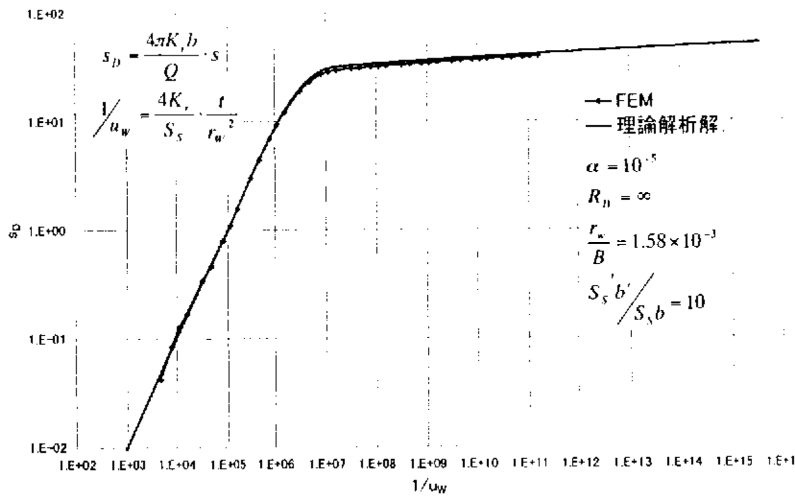
図-2. 2. 5　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の検証結果（両対数で整理・水位低下量を帯水層厚ｂで無 で無次元化）



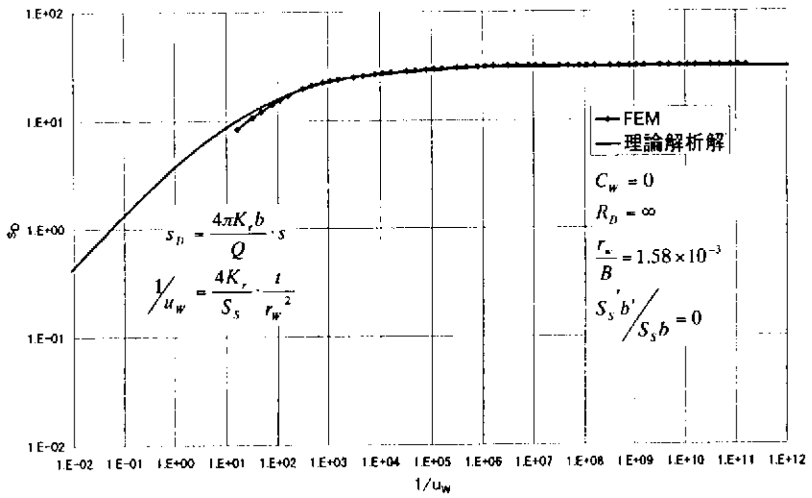
定流量揚水（井戸貯留有り）：非貯留性漏水



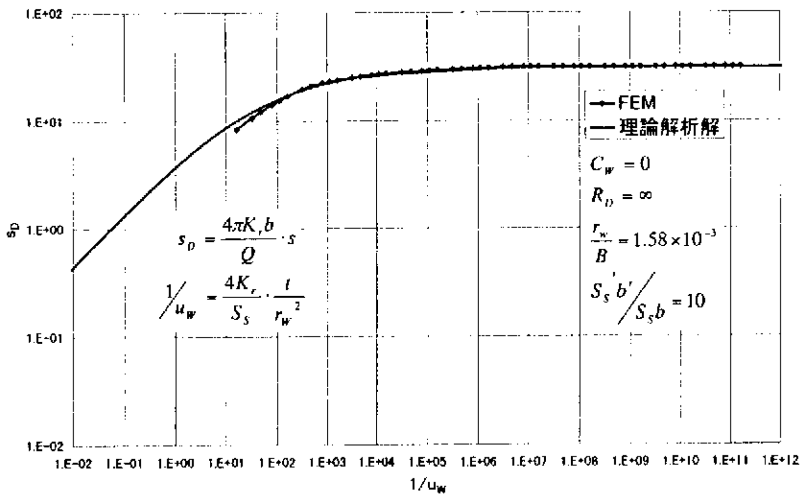
定流量揚水（井戸貯留有り）：貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



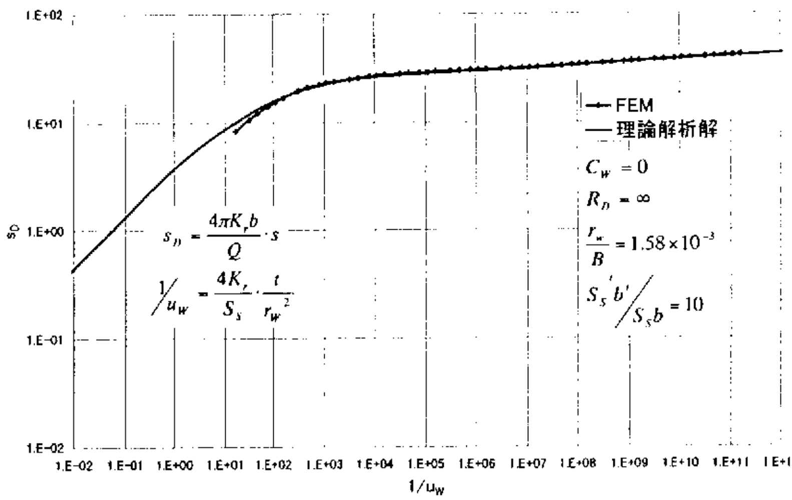
定流量揚水（井戸貯留有り）：貯留性漏水（漏水層上端部不透水）



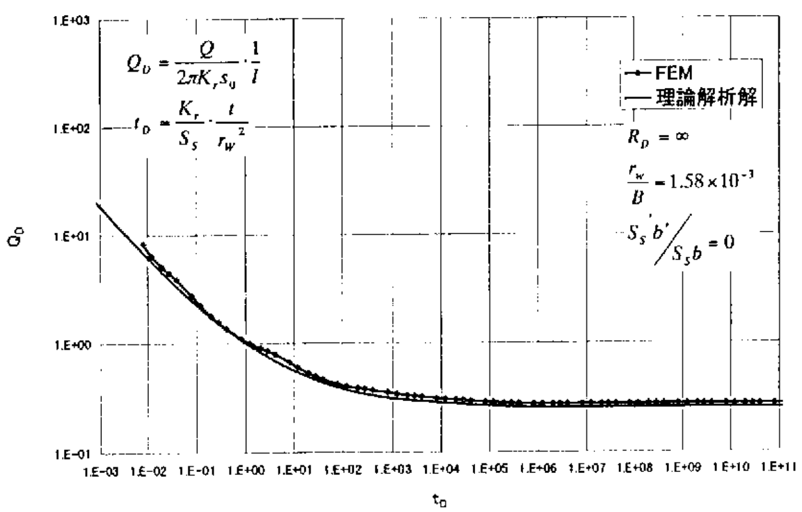
定流量揚水（井戸貯留無し）：非貯留性漏水



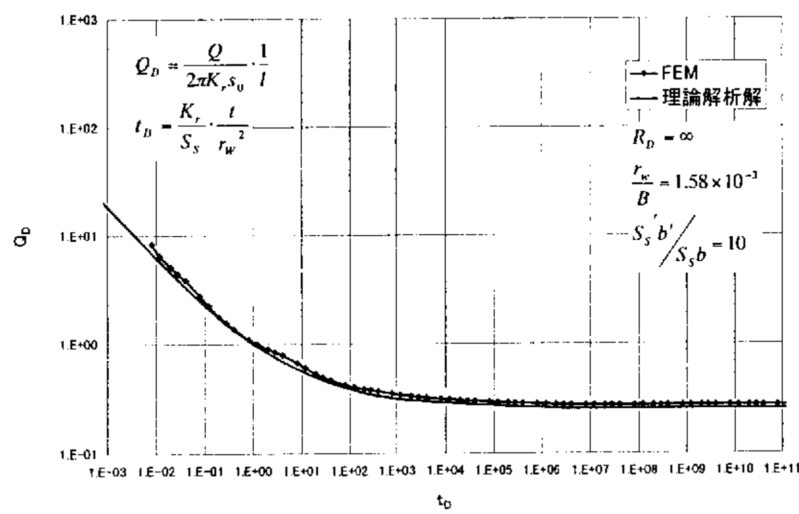
定流量揚水（井戸貯留無し）：貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



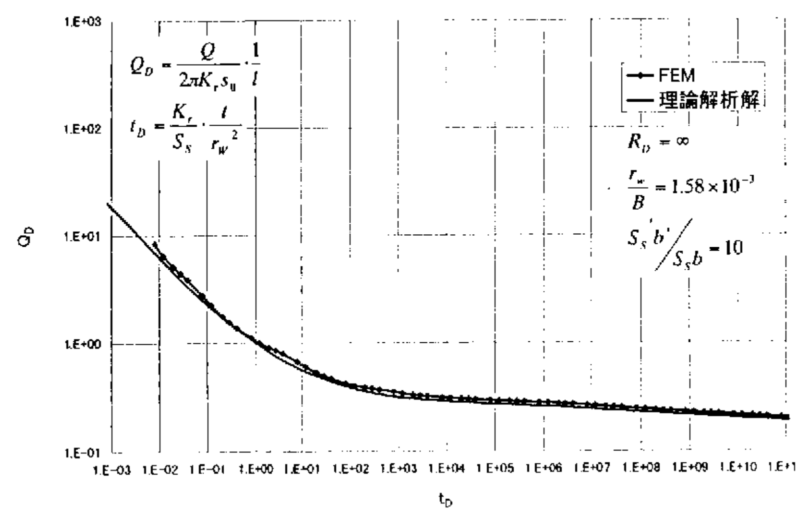
定流量揚水（井戸貯留無し）：貯留性漏水（漏水層上端部不透水）



定圧揚水：非貯留性漏水



定圧揚水：貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



定圧揚水：貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

図-2.2.7 漏水性帯水層の検証結果

2.3 標準曲線

標準曲線は、以下の各条件に対応することができる。

- ・3 種類の揚水井戸構造(揚水方法)および任意の井戸貯留項値
- ・揚水過程と回復過程
- ・3 種類の遠方境界および任意の影響圏半径値
- ・4 種類の漏水条件および任意の漏水物性値
- ・任意のインターバル位置および任意のインターバル長
- ・帯水層の鉛直水平成分の任意の異方性透水係数(水平 2 成分は等方性)

当検討で作成した標準曲線は表-2.3.1 の一覧表に示すものである。

また、インターバル位置は断りの無い限り帯水層中央部に設置し、同じく貫入率は l/b= 0.25 , 0.5 , 0.75 , 1.0 の 4 種類とし、透水係数は等方性とした。

標準曲線のプロットは、試験結果の整理方法に対応して両対数軸および片対数軸でそれぞれ整理した。また、各試験毎に試験結果の解析手法の一例を紹介した。尚、ここで示す標準曲線の特性は部分インターバルの影響以外は全層ストレーナ井戸のケースに基本的に一致するところであり、検討業務(その 2)[2)]の解説との重複を避けるために同様の現象については簡単に示すこととした。

表-2.3.1 標準曲線作成ケース

a. (揚水過程)

図番号 (図*.*(*))	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.3.1～4.a 図-2.3.32.a	Q_0	$r_W=0$	−	R→∞	無
図-2.3.1～4.b	Q_0	$r_W=0$	−	定水位	無
図-2.3.1～4.c	Q_0	$r_W=0$	−	不透水	無
図-2.3.1～4.d	Q_0	$r_W=0$	−	R→∞	非貯留
図-2.3.1～4.e	Q_0	$r_W=0$	−	R→∞	貯留定水位
図-2.3.1～4.f	Q_0	$r_W=0$	−	R→∞	貯留不透水
図-2.3.5～8.a 図-2.3.30.e 図-2.3.32.d	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	無
図-2.3.5～8.b	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	定水位	無
図-2.3.5～8.c	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	不透水	無
図-2.3.5～8.d 図-2.3.31.e	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	非貯留
図-2.3.5～8.e	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	貯留定水位
図-2.3.5～8.f	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	貯留不透水
図-2.3.9～12.a 図-2.3.30.d	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	無
図-2.3.9～12.b	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	定水位	無
図-2.3.9～12.c	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	不透水	無
図-2.3.9～12.d 図-2.3.31.d	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	非貯留
図-2.3.9～12.e	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留定水位
図-2.3.9～12.f	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留不透水
図-2.3.13～16.a 図-2.3.30.f	s_0	$r_W\neq0$	−	R→∞	無
図-2.3.13～16.b	s_0	$r_W\neq0$	−	定水位	無
図-2.3.13～16.c	s_0	$r_W\neq0$	−	不透水	無
図-2.3.13～16.d 図-2.3.31.f	s_0	$r_W\neq0$	−	R→∞	非貯留
図-2.3.13～16.e	s_0	$r_W\neq0$	−	R→∞	貯留定水位
図-2.3.13～16.f	s_0	$r_W\neq0$	−	R→∞	貯留不透水

※) Q_0：定量揚水　、s_0：定圧揚水

非貯留：非貯留性漏水

貯留定水位：貯留性漏水（粘性土層上端部定水位）

貯留不透水：貯留性漏水（粘性土層上端部不透水）

b. （回復過程）

図番号 （図*.*(*)）	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.3.17～20.a	Q_0 → Q_0=0	r_W=0	－	R→∞	無
図-2.3.17～20.b	Q_0 → Q_0=0	r_W=0	－	定水位	無
図-2.3.17～20.c	Q_0 → Q_0=0	r_W=0	－	不透水	無
図-2.3.17～20.d	Q_0 → Q_0=0	r_W=0	－	R→∞	非貯留
図-2.3.17～20.e	Q_0 → Q_0=0	r_W=0	－	R→∞	貯留定水位
図-2.3.17～20.f	Q_0 → Q_0=0	r_W=0	－	R→∞	貯留不透水
図-2.3.21～24.a	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	Cw=0	R→∞	無
図-2.3.21～24.b	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	Cw=0	定水位	無
図-2.3.21～24.c	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	Cw=0	不透水	無
図-2.3.21～24.d	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	Cw=0	R→∞	非貯留
図-2.3.21～24.e	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	Cw=0	R→∞	貯留定水位
図-2.3.21～24.f	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	Cw=0	R→∞	貯留不透水
図-2.3.25～28.a	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	無
図-2.3.25～28.b	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	定水位	無
図-2.3.25～28.c	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	不透水	無
図-2.3.25～28.d	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	非貯留
図-2.3.25～28.e	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留定水位
図-2.3.25～28.f	Q_0 → Q_0=0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	貯留不透水

※）Q_0：定量揚水　、l/b=0.25

非貯留：非貯留性漏水

貯留定水位：貯留性漏水（粘性土層上端部定水位）

貯留不透水：貯留性漏水（粘性土層上端部不透水）

c. （インターバル帯水層下端設置）

図番号 （図*.*(*)）	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.3. 32.b	Q_0	r_W≠0	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	無

※）Q_0：定量揚水　、d/b=0.75

d. （インターバル帯水層上端設置）

図番号（図*.*(*))	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.3.32,33.a	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	無
図-2.3.33.b	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	無
図-2.3.33.c	s_0	$r_W\neq0$	－	R→∞	無
図-2.3.34.a	Q_0	$r_W\neq0$	$\alpha=10^{-5}$	R→∞	非貯留
図-2.3.34.b	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	非貯留
図-2.3.34.c	s_0	$r_W\neq0$	－	R→∞	非貯留

※）Q_0：定量揚水　、s_0：定圧揚水　、d/b=0.0 、非貯留：非貯留性漏水

e. （異方性透水係数）

図番号（図*.*(*))	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.3. 35.b	Q_0	$r_W=0$	－	R→∞	無
図-2.3. 35.e	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	無

※）Q_0：定量揚水　、Kz/Kr=1/100

図番号（図*.*(*))	揚水条件	井戸条件	井戸貯留項値	遠方境界	漏水条件
図-2.3. 35.c	Q_0	$r_W=0$	－	R→∞	無
図-2.3. 35.f	Q_0	$r_W\neq0$	Cw=0	R→∞	無

※）Q_0：定量揚水　、Kz/Kr=1/1000

2．3．1 定量揚水：無限小井戸半径の場合

本検討が単孔式揚水試験を対象にしたものであることから、標題の無限小井戸径とみなせる揚水井戸、すなわち多孔式揚水試験の揚水井戸に用いられることの多い無限小径井戸条件下での議論は必要ない。しかし、試験結果の既存の整理方法はこの条件下で発達してきたものが多く、単孔式揚水試験についてもこれらの改良型となること、またこの条件下の揚水時の挙動は基本型として周知しておくべきものであることからここで簡単に解説する。

まず、無限小径井戸での定量揚水では、井戸径 r_w を 0 と設定するため、無次元化式(2.2.9)の適用に不合理が生じる。そこで、Raghavan[10)]が解説する以下の手順を適用して、 r_w を用いない表記とする。

$$4t_D/r_D{}^2 = \frac{4Tt}{Sr_w{}^2}\frac{r_w{}^2}{r^2} = \frac{4Tt}{Sr^2} = \frac{1}{u} \quad or \quad t_D/r_D{}^2 = \frac{Tt}{Sr^2} \qquad (2.3.1)$$

$$\frac{R_D}{r_D} = \frac{R}{r_w}\frac{r_w}{r} = \frac{R}{r} \qquad (2.3.2)$$

$$\frac{r_w}{B}r_D = \frac{r_w}{B}\frac{r}{r_w} = \frac{r}{B} \qquad (2.3.3)$$

(1)整理手法

①曲線一致法

この技法は標準曲線と実測データを同じスケールの両対数座標軸上でマッチングさせ、最良のマッチング状態での情報を用いて浸透特性および水理境界条件を評価する。以下に手順を示す。

手順[1] 標準曲線として無次元水位低下量－無次元時間の関係を得る。

手順[2] 観測水位低下量データと観測時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元水位低下量を、横軸に実測時間および無次元時間をそれぞれ同じスケールの両対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ互いに平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、複数の標準曲線がある場合には、最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5] このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 s_D*、無次元時間 $1/u$*

実測水位低下量 s *、実測時間 t*

$$T = K_r b = \frac{Q_0}{4\pi}\frac{s_D{}^*}{s^*} \qquad (2.3.4.1)$$

$$S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{4t^*}{(1/u)^*} \qquad (2.3.4.2)$$

複数本の標準曲線を持つ場合は、選んだ曲線値に対して以下の評価が成される。

(a)漏水性帯水層：非貯留性漏水層の場合

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：*(r/B)**

$$K' = \frac{K_r bb'}{r^2}\left(\frac{r}{B}\right)^{*2} \qquad (2.3.5)$$

(b)漏水性帯水層：貯留性漏水層の場合

$$\text{マッチング曲線指標：}\left[\frac{r}{B}\sqrt{\frac{S'}{S}}\right]^* \text{あるいは} \left[\frac{r}{4B}\sqrt{\frac{S'}{S}}\right]^* \qquad (2.3.6)$$

(c)有限遠方境界

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：*(R/r)**

$$R = \left(\frac{R}{r}\right)^* r \qquad (2.3.7)$$

(d)貫入率

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：*(l/b)**

一般に、インターバル長 *l* は既知量として与えられ、帯水層厚 b は不明である。

このような場合には*(l/b)**より b を算定することができる。

$$b = {l}/{(l/b)^*} \qquad (2.3.8)$$

②直線勾配法(Jacob-Cooper 法)

部分インターバル揚水井戸であっても、ある程度の揚水時間経過後の水位低下挙動は片対数軸上(*s-log(t)*)で一定の傾きで進む。次式で透水量係数が評価できる。

$$T = K_r b = \frac{2.3Q_0}{4\pi\Delta s} \qquad (2.3.9)$$

ここで、Δs は直線の傾き＝$\Delta s/\Delta \log(t)$

全層ストレーナ井戸による揚水では、直線分布の s=0 軸上の切片時間 t_0 を用いて貯留係数 S=Ssb が評価できる。部分インターバルによる揚水の影響は平行にズレた直線としてみられることから、貯留係数 S の評価にはさらなる考慮が必要である。

ただし、式(2.3.9)の適用で T=Krb を先んじて求め、この T 値が評価できるように水位低下量軸上のマッチング条件を式(2.3.4.1)の関係から求め、時間軸上のマッチングと最適曲線の選択の精度向上を期待する事ができる。

この整理手法に関しては、有限径井戸揚水で扱うので後に詳しく示す事とする。

(2)標準曲線の特性

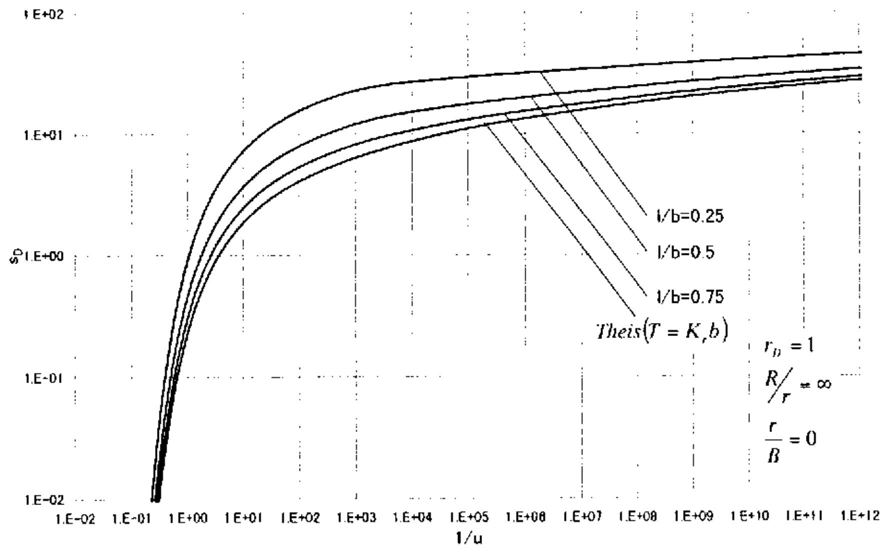
ここでは図-2.3.1 から図-2.3.4 の標準曲線についてその特徴を述べる。各図のレイアウトは以下の軸上の整理としている。

表-2.3.2 標準曲線一覧図レイアウト

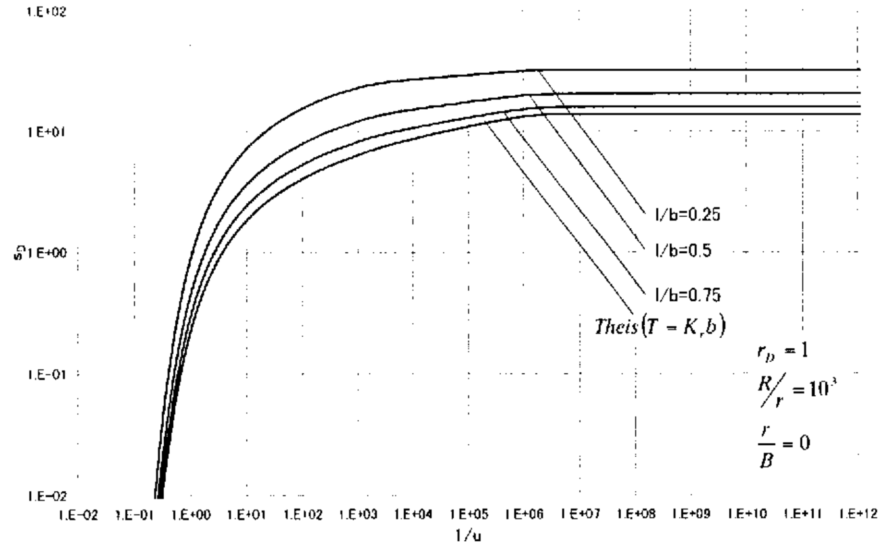
a.無限遠方境界非漏水	b.有限遠方定水位境界非漏水	c.有限遠方不透水境界非漏水
d.無限遠方境界非貯留漏水	e.無限遠方境界貯留漏水 漏水層上部定水位	f.無限遠方境界貯留漏水 漏水層上部不透水

ここで、s_D は式(2.2.9)の定義式により、s_{Dl} は $s_{Dl}=s_D \cdot l/b$ による。前者は水位低下量を全層厚 b に対して、後者はインターバル長 l に対してそれぞれ整理したものを表わす。水位低下量の評価地点 $r_D=1$ と標記したが、$r=r_W$ 相当の距離で深度方向に揚水井戸インターバル同等のストレーナを持つ観測井戸内の平均水位低下量を示すものである。

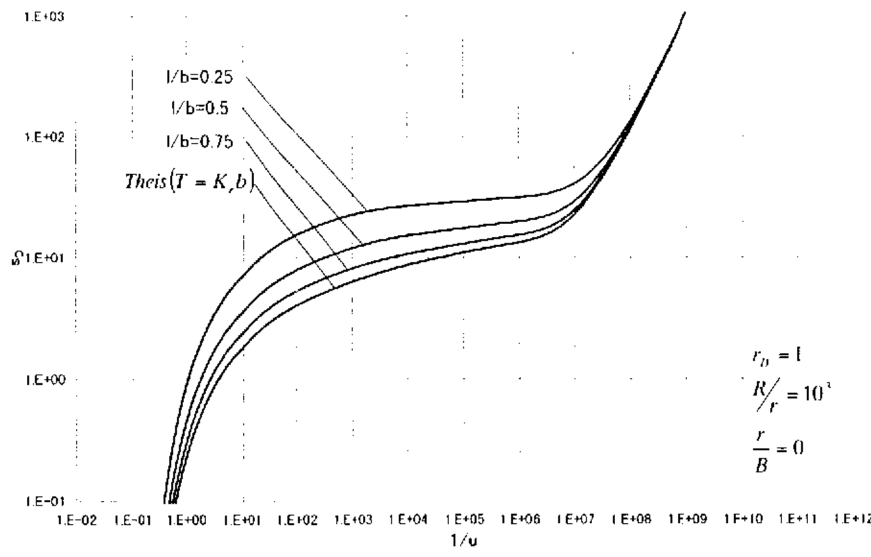
- 同一流量の揚水に対してはインターバル長が短いほど水位低下量は大きくなる。
- 片対数軸上では長時間揚水後は一定の傾きをもつ直線が認められ、その傾きは全層ストレーナ時(Theis:T=Krb)のそれに等しく、これより Jacob-Cooper 法によって透水量係数 T=Krb を評価できる。
- s_{Dl} の整理では比較的早い時間のグラフは Theis($T=K_r l$)曲線に一致している。
  これから、揚水初期にはインターバル周辺地盤の地下水挙動が支配的で、更に時間が進むとより広い範囲に影響し、帯水層全体へ影響が及ぶことがわかる。
- これらのことから、比較的早い時間の挙動に対しては Theis 曲線とのマッチングにより、$T=Krl$ および $S=Ssl$ を評価し、これらから Kr, Ss を算定する。Jcob-Cooper 法を用いて遅い時間のデーターから $T=Krb$ を評価し、b の推定あるいは Kr の検証を行うことができる。
- 片対数軸上の整理では、はらみだしがみられ、井戸貯留の影響を受ける場合との区別が必要である。両対数軸上でこの部分は傾き 1 の直線ではないので、井戸貯留の影響との区別ができる。



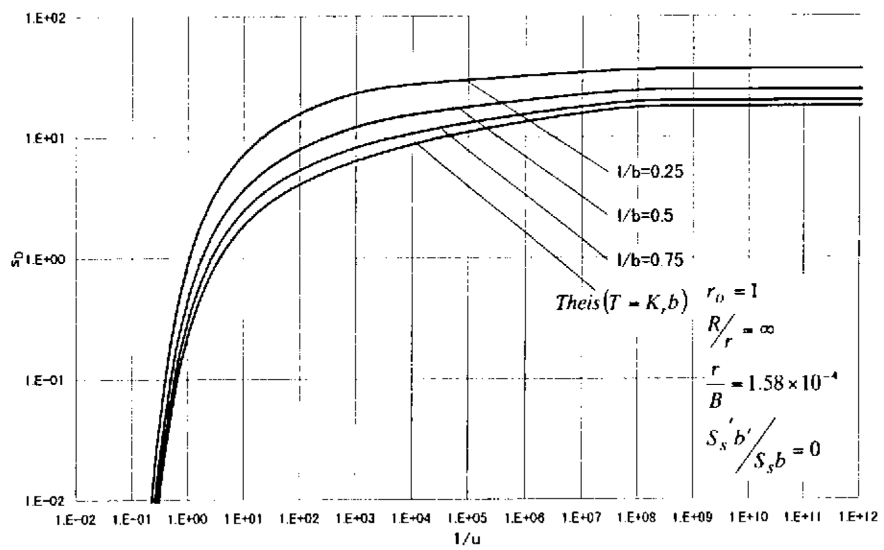
a.無限遠方境界



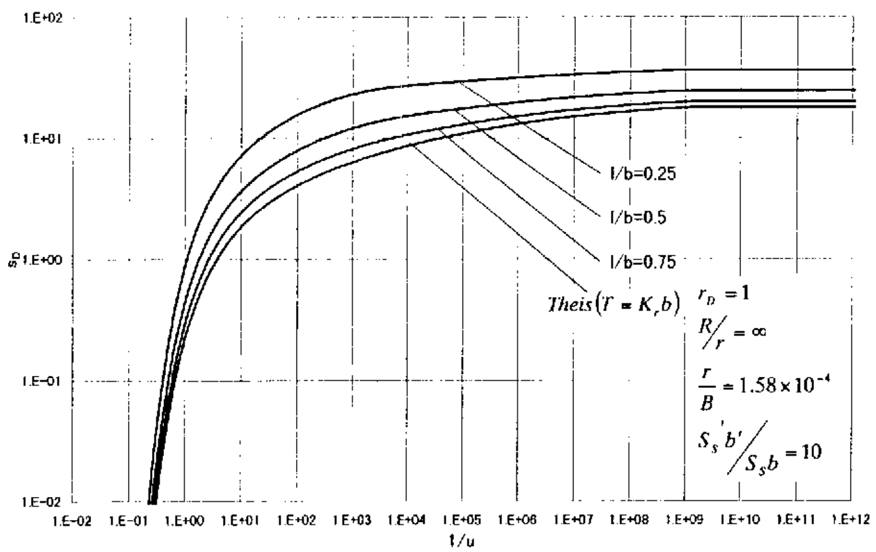
b.有限遠方定水位境界



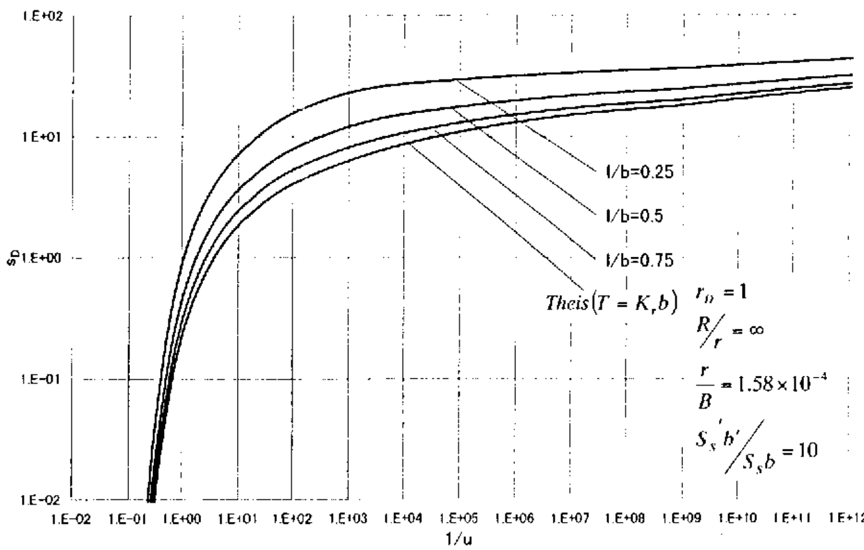
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



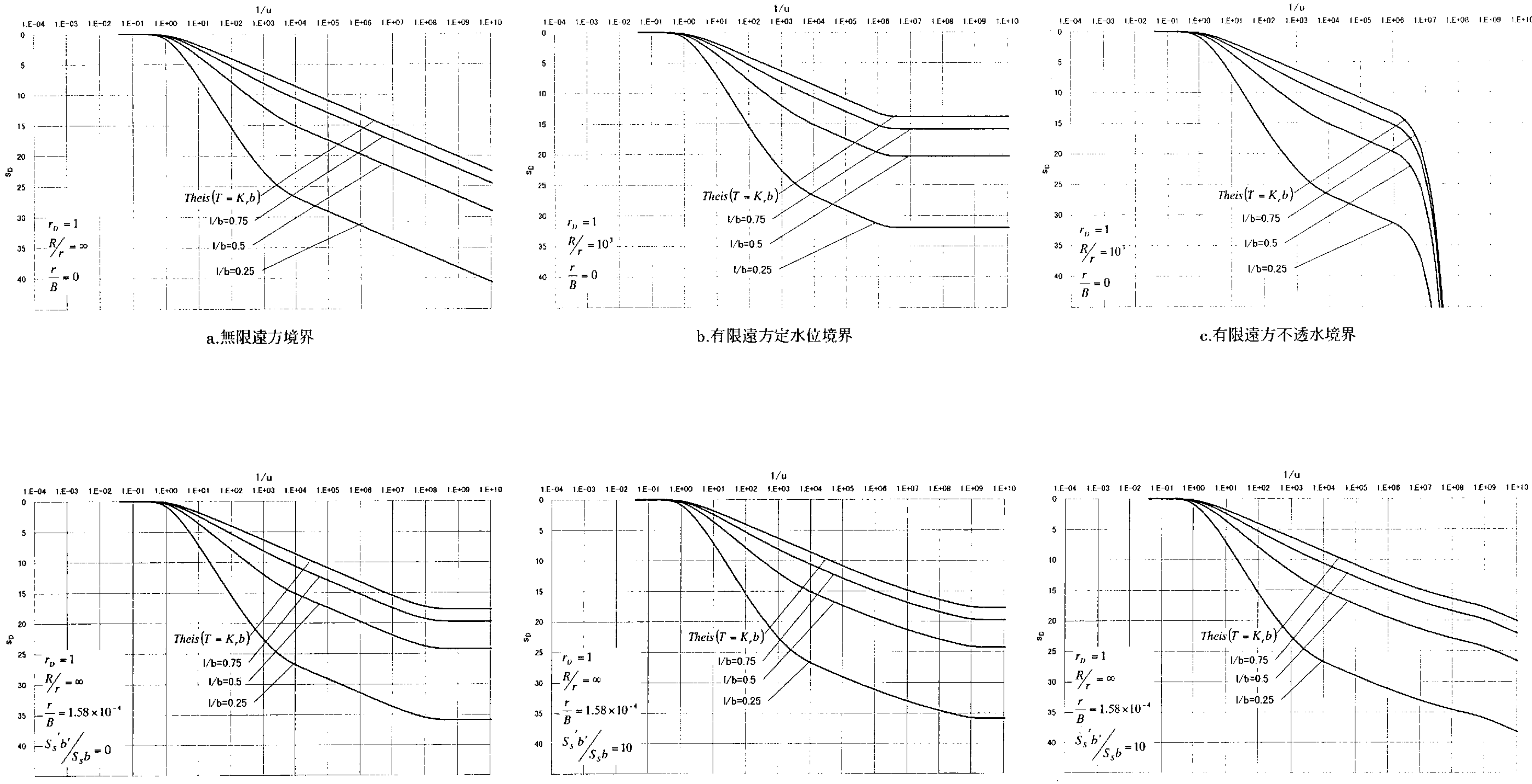
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

＊）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$　（式(2. 2. 9)参照）

横軸：$\dfrac{1}{u}=\dfrac{4K_r}{S_S}\dfrac{t}{r^2}$　（式(2. 3. 1)参照）

$l/b=0.25$ ・ $d/b=0.375$

図-2. 3. 1　無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線（両対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）



a.無限遠方境界　　b.有限遠方定水位境界　　c.有限遠方不透水境界

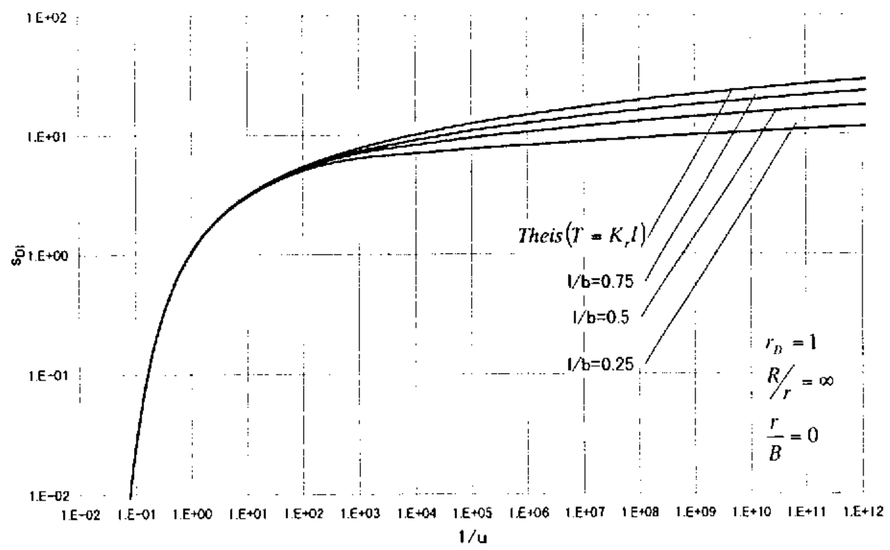
d.非貯留性漏水　　e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）　　f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q} s$　（式(2.2.9)参照）

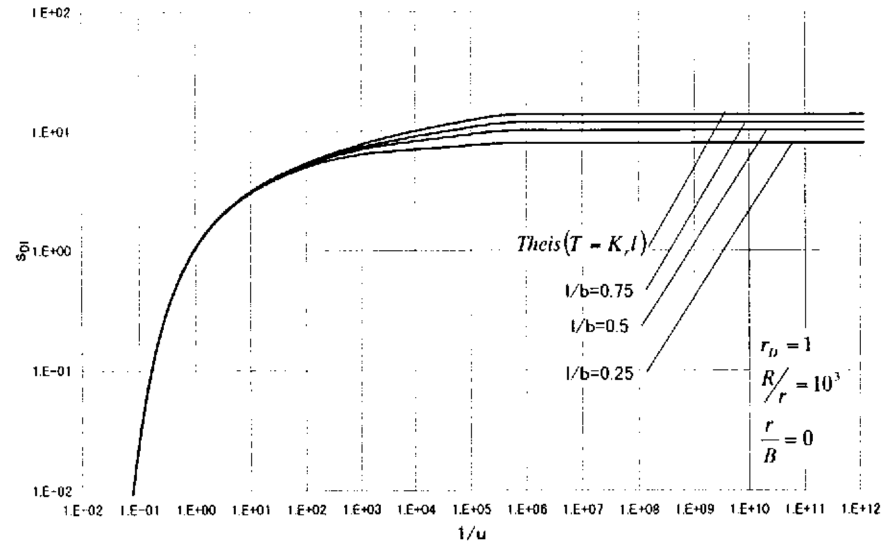
横軸：$1/u = \dfrac{4K_r}{S_s}\dfrac{t}{r^2}$　（式(2.3.1)参照）

$l/b = 0.25 \cdot d/b = 0.375$

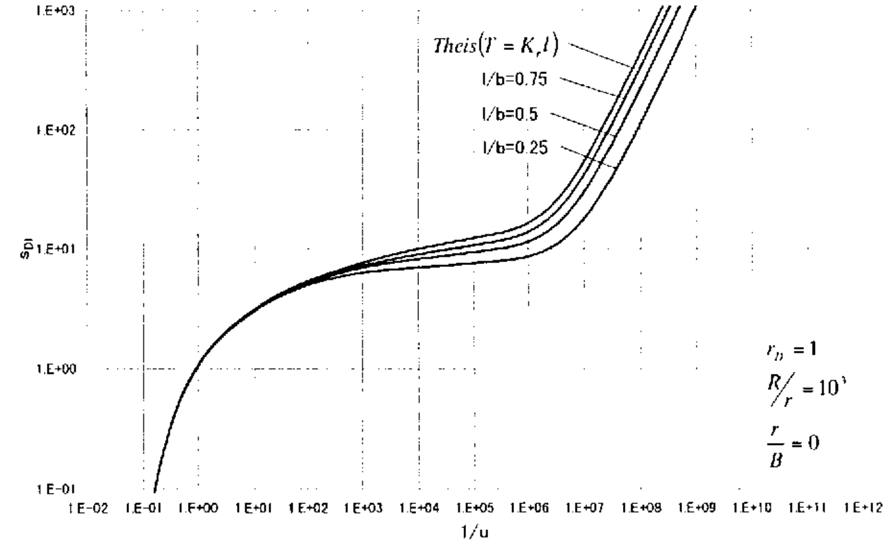
図-2.3.2　無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線（片対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）



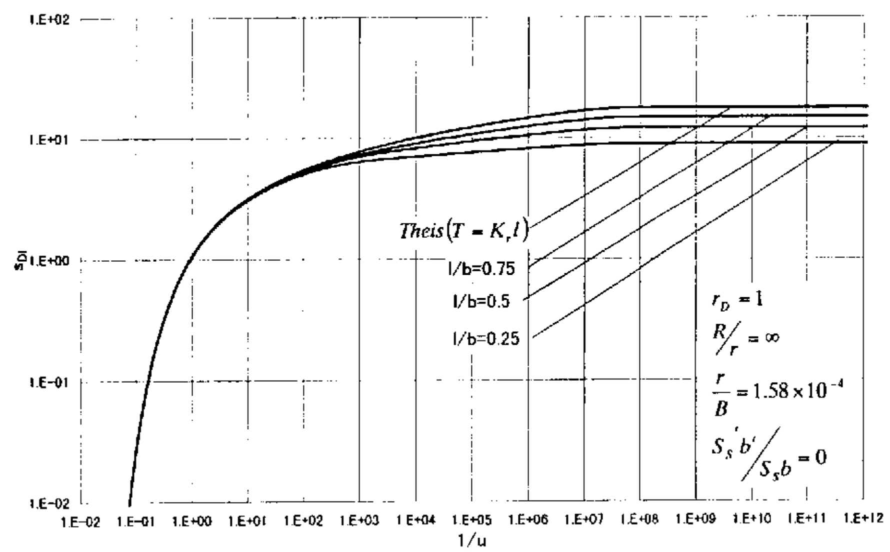
a.無限遠方境界



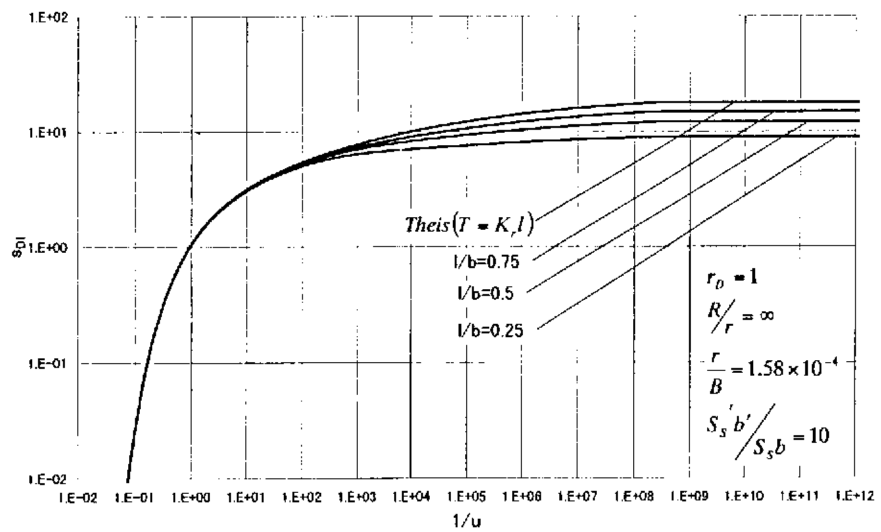
b.有限遠方定水位境界



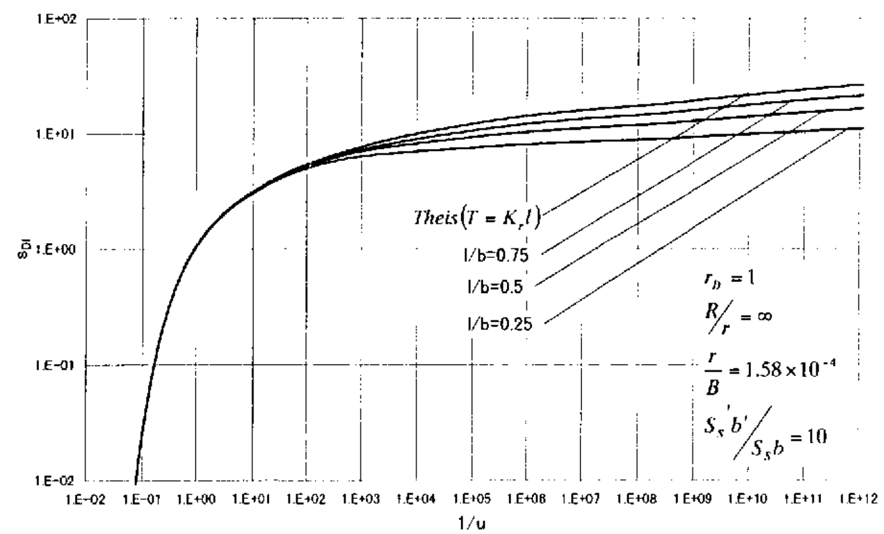
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



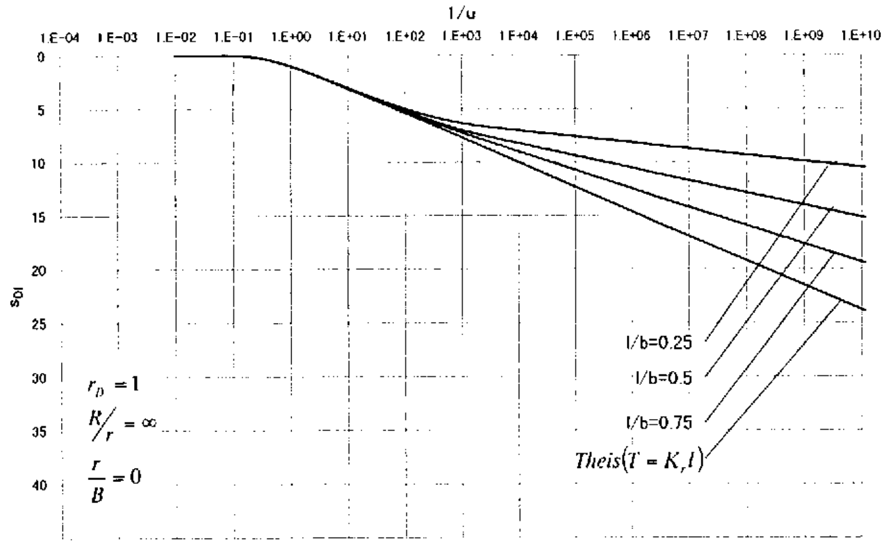
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_{Di}=\dfrac{4\pi K_r l}{Q}s$ （$s_{DI}=s_D\cdot l/b$, s_D：式(2.2.9)参照)

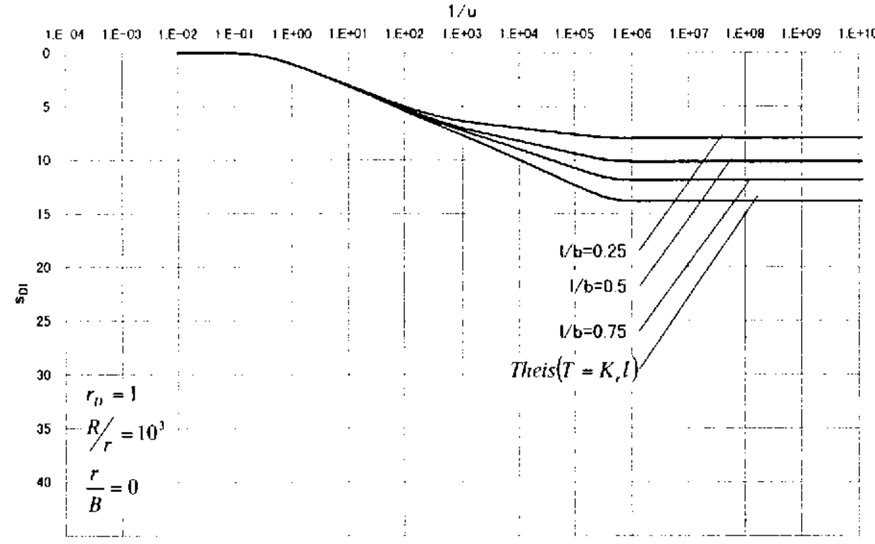
横軸：$1/u=\dfrac{4K_r}{S_s}\dfrac{t}{r^2}$ （式(2.3.1)参照）

$l/b=0.25$ ・ $d/b=0.375$

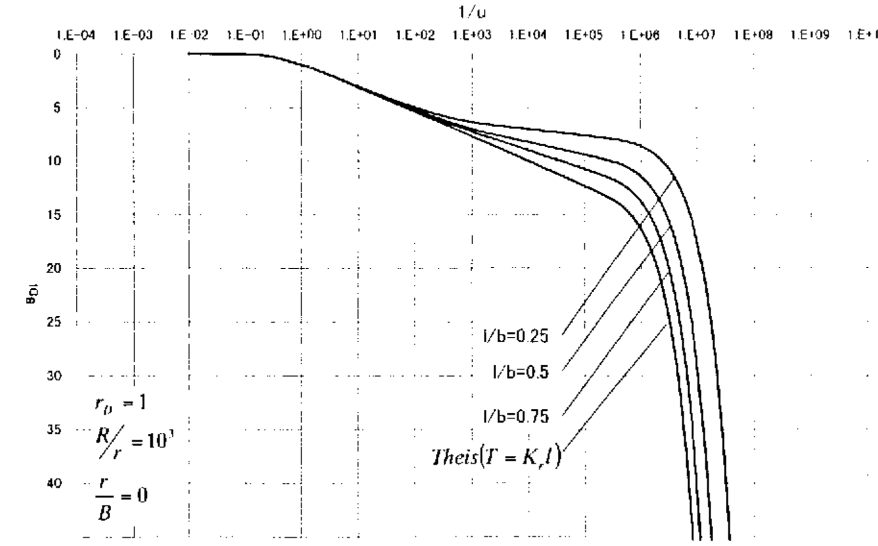
図-2.3.3　無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線（両対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）



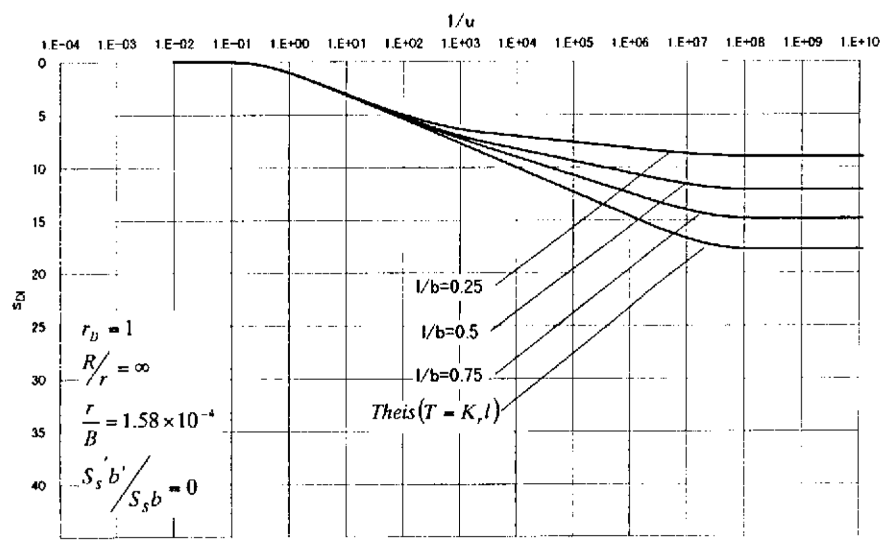
a.無限遠方境界



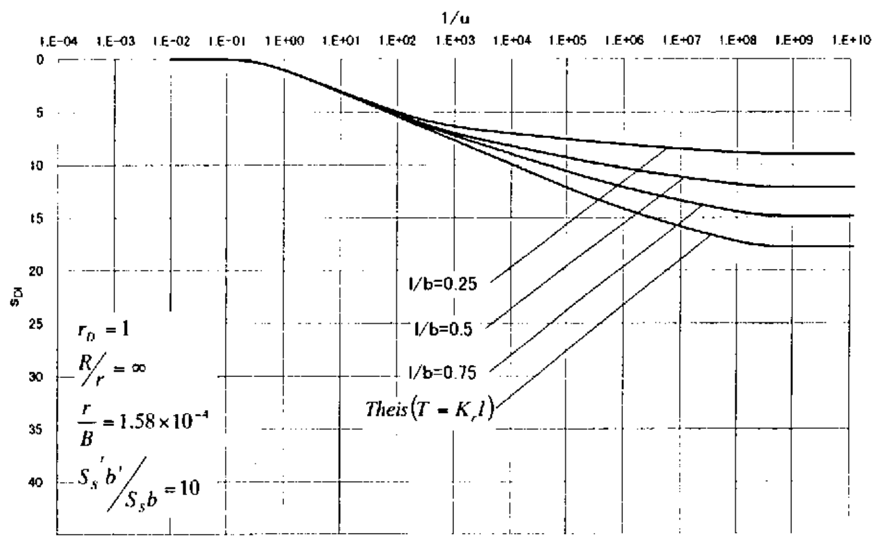
b.有限遠方定水位境界



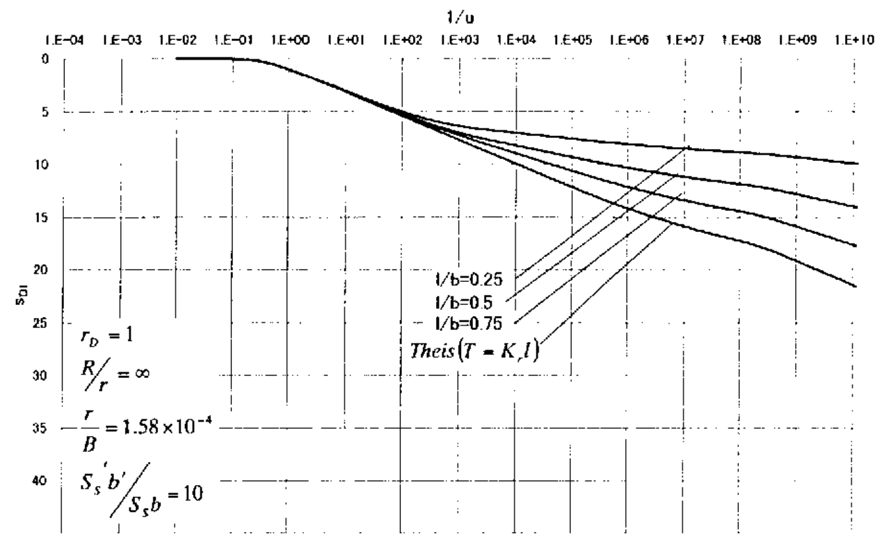
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_{Dl} = \dfrac{4\pi K_r l}{Q} s$ （$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$，s_D：式(2. 2. 9)参照）

横軸：$1/u = \dfrac{4K_r}{S_S}\dfrac{t}{r^2}$ （式(2. 3. 1)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

図-2. 3. 4　無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線（片対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）

２．３．２ 定量揚水：有限井戸半径の場合

単孔式揚水試験の場合、観測井と揚水井が共用されるため、井戸半径および井戸貯留の影響が無視できない。ここでは、井戸貯留項が無視できるケースと考慮するケースについてそれぞれ示す。

また、ここでの時間項 $1/u_W$は次式の定義による。

$$4t_D = \frac{4K_r t}{S_S r_w^{\ 2}} = \frac{1}{u_w} \qquad (2.3.10)$$

(1) 整理手法

①曲線一致法

この技法は標準曲線と実測データを同じスケール軸をもつ両対数座標軸上でマッチングさせ、最良のマッチング状態での情報を用いて浸透特性および水理境界条件を評価する。以下に手順を示す。

手順[1] 標準曲線として無次元水位低下量－無次元時間の関係を得る。

手順[2] 観測水位低下量データと観測時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元水位低下量を、横軸に実測時間および無次元時間をそれぞれ同じスケールの両対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、複数の標準曲線がある場合には、最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5] このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 s_D*、無次元時間 $1/u_w{}^*$

実測水位低下量 s *、実測時間 t*

$$K_r = \frac{Q_0}{4\pi b}\frac{s_D{}^*}{s^*} \qquad (2.3.11.1)$$

$$S_S = \frac{K_r}{r_W^2}\frac{4t^*}{(1/u_w)^*} \qquad (2.3.11.2)$$

標準曲線が、$s_{Dl} - 1/u_w$ である場合には、Kr は次式による。

$$K_r = \frac{Q_0}{4\pi l}\frac{s_{Dl}{}^*}{s^*} \qquad (2.3.11.3)$$

さらに複数本の標準曲線を持つ場合は、選んだ曲線値に対して以下の評価が成される。

(a)井戸貯留がある場合

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：α^*

$$S_S = \frac{\alpha^* C_W}{\pi r_W{}^2 b} \qquad (2.3.12)$$

上式の関係は以下のいくつかの利用が考えられる。

上式のまま用いるなら式(2.3.11.2)で求められる Ss 値の検証を行う。

Ss 値を既知とするなら井戸貯留項 Cw の評価を行う。

また、同様に帯水層厚 b の評価に用いることも可能である。

(b)漏水性帯水層：非貯留性漏水層の場合

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：$(r_W/B)^*$

$$\text{漏水層の鉛直成分透水係数：} K' = \frac{K_r b b'}{r_W^2}\left(\frac{r_W}{B}\right)^{*2} \qquad (2.3.13)$$

(c)漏水性帯水層：貯留性漏水層の場合

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：$(Ss'b'/Ssb)^*$

$$\text{漏水層の比貯留係数：} S_S' = \frac{S_S b}{b'}\left(\frac{S_S' b'}{S_S b}\right)^{*} \qquad (2.3.14)$$

(d)有限遠方境界

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：$(R_D=R/r_W)^*$

$$\text{有限影響圏半径：} R = \left(\frac{R}{r_W}\right)^{*} r_W \qquad (2.3.15)$$

(e)貫入率

マッチング曲線として選ばれた曲線の値：$(l/b)^*$

一般に、インターバル長 l は既知量として与えられ、帯水層厚 b は不明である。

このような場合には$(l/b)^*$より b を算定することができる。

$$b = l \Big/ \left(\frac{b}{l}\right)^{*} \qquad (2.3.16)$$

②直線勾配法

比較的遅い時間の片対数軸 *s-log(t)*上のプロットは直線にのり、これは Jacob-Cooper の直線に一致する。よって、先と同様に以下の評価式が適用できる。

$$T = K_r b = \frac{2.3Q_0}{4\pi\Delta s} \qquad (2.3.17)$$

ここで、Δs は直線の傾き＝$\Delta s/\Delta \log((t)$

全層ストレーナ井戸による揚水では、直線分布の s=0 軸上の切片時間 t_0 を用いて貯留係数 S=Ssb が評価できるが、部分インターバル井戸による揚水では貫入率 l/b が小さくなるほど全層ストレーナ井戸使用時の直線と平行にズレた直線を示す。このため、直線勾配法で貯留係数 S=Ssb を評価することはできない。この問題に対する解決策は西垣ら [11]が与えている。

$$S_S = 2.25K_r \exp\left(f_S\right)\frac{t_0}{r_W^2} \qquad (2.3.18.1)$$

ここで、

$$f_S = \frac{4b}{\pi\left(l-d\right)}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}K_0\left(\frac{n\pi r_W}{b}\right)\left[\sin\left(\frac{n\pi l}{b}\right)-\sin\left(\frac{n\pi d}{b}\right)\right]\cos\left(\frac{n\pi z}{b}\right) \qquad (2.3.18.2)$$

ただし、彼らの示した fs は多孔式揚水試験時のピエゾ水頭に対するものであるため、揚水井戸内水位低下量に対する適用には平均化など幾分考慮すべき点が残されている。

③組み合わせ手法

一般に、曲線一致法と直線勾配法はそれぞれ独立して実施し、両者の結果の平均などをとる場合が見られるが、これらを組み合わせることでマッチングの精度向上が期待できる。まず、マッチングに先んじて直線勾配法を実施し、透水係数のみ評価しておく。次に次式によって水位低下量軸方向のマッチング位置を評価する。

$$\frac{s_D{}^*}{s^*} = \frac{4\pi b K_r}{Q} \quad \text{あるいは} \quad \frac{s_{Dl}{}^*}{s^*} = \frac{4\pi l K_r}{Q} \qquad (2.3.19)$$

これにより、マッチングは時間軸方向の一方向と曲線選択となり、選択肢が減る事で解析精度の向上が期待できる。

(2)標準曲線の特性

ここでは標準曲線の図-2.3.5～図-2.3.12 についてその特徴を示す。

まず、図-2.3.5～2.3.8 は井戸貯留が無視できる(Cw=0 あるいは $\alpha=\infty$)場合であり、図-2.3.9～図-2.3.12 は井戸貯留項 $\alpha=10^{-5}$ を扱ったものである。各グラフのレイアウトは、無限小半径井戸の項で示した表-2.3.2 と同じものである。

また、井戸貯留を考慮しない C_W=0 の各ケースは s_D-$1/u_W$ 関係を図-2.3.5 は両対数軸、図-2.3.6 は片対数軸で、s_{Dl}-$1/u_W$ 関係を図-2.3.7 は両対数軸、図-2.3.8 は片対数軸でそれぞれ示したものである。井戸貯留を考慮する $\alpha=10^{-5}$ の場合には、s_D-$1/u_W$ 関係を図-2.3.9 は

両対数軸、図-2.3.10 は片対数軸で、s_{Dl}-$1/u_W$ 関係を図-2.3.11 は両対数軸、図-2.3.12 は片対数軸でそれぞれ示した。

①井戸貯留の無視できる場合：図 2.3.5～図 2.3.8

・同一の揚水流量に対してインターバル長が短いほど孔内水位低下量は大きくなる。

・片対数軸上では直線挙動が認められ全層ストレーナ井戸揚水時と平行な直線が得られることから、この直線部分に対する直線勾配法では透水量係数 T=Krb が評価できる。

・s_{Dl} による整理では、比較的早い時間でのインターバル長の違いが認められず一つの曲線で表現できるため、この部分のマッチング手法が容易に実施できる。この傾向が確認できるのは $1/u_W<10^2$ の範囲である。

・井戸貯留の無いケースであるが、部分インターバルの影響として片対数軸上のプロットには井戸貯留のある全層ストレーナ井戸揚水時の挙動に似たはらみだしが見られる。ただし、両対数軸上でこの部分は幾分直線性は示すが、傾き 1 ではなく両者の区別はここで認められる。

・全層ストレーナーと同様の傾向であるが、定水位有限影響圏半径のケースと非貯留性漏水のケースが類似している。また、貯留性漏水(漏水性上部定水位)のケースもこれらに酷似しているが、これは貯留係数比 $S_S'b'/S_Sb$ の影響が小さいケースにすぎないと考えられる。

・不透水性有限影響圏半径のケースで遅い時間の挙動は、s_D の整理の場合一つの線上にのり、その傾きは s_{Dl} の整理でも両対数軸上で傾き 1 を示す。

②井戸貯留を考慮した場合：：図 2.3.9～図 2.3.12

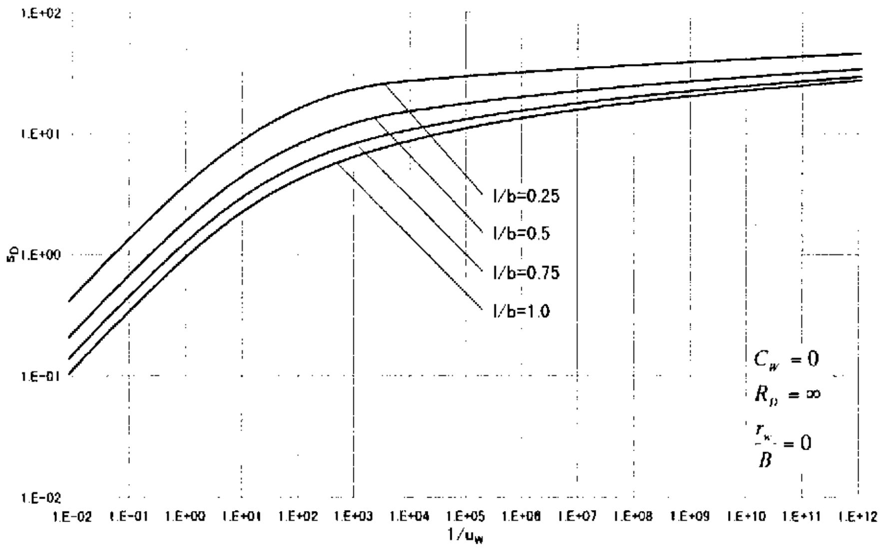
・同一の揚水流量に対してインターバル長が短いほど孔内水位低下量は大きくなる。

・井戸貯留の影響を受ける時間帯では、s_D の整理ではインターバル長によらず一線上にのり、s_{Dl} の整理においても両対数軸上のグラフは傾き 1 の直線を示す。この時間範囲は井戸貯留項 α に依存する。

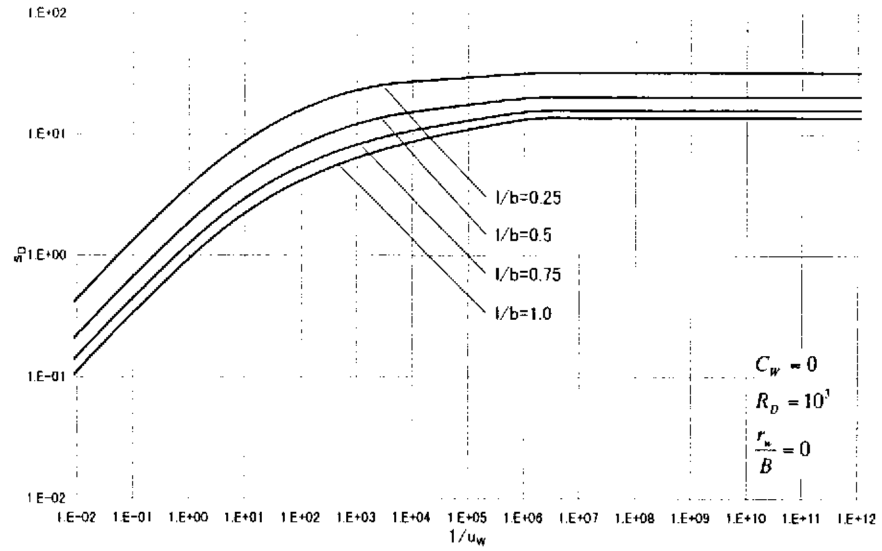
・部分インターバルの影響と井戸貯留の影響が共存しているが、この部分は両対数軸上では傾き 1 の直線であり、これらのケースでは井戸貯留の影響が卓越したと考えられる。

・全層ストレーナーと同様の傾向であるが、定水位有限影響圏半径のケースと非貯留性漏水のケースが類似している。また、貯留性漏水(漏水性上部定水位)のケースもこれらに酷似しているが、これは貯留係数比の影響が小さく出ているにすぎないと考えられる。

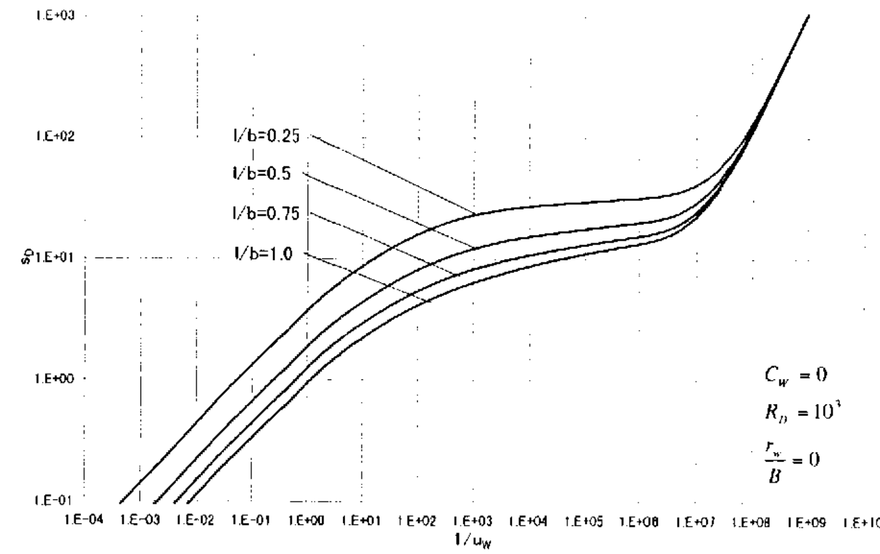
・不透水性有限影響圏半径のケースで遅い時間の挙動は、s_D の整理の場合一つの線上にのり、その傾きは s_{Dl} の整理でも両対数軸上で傾き 1 を示す。



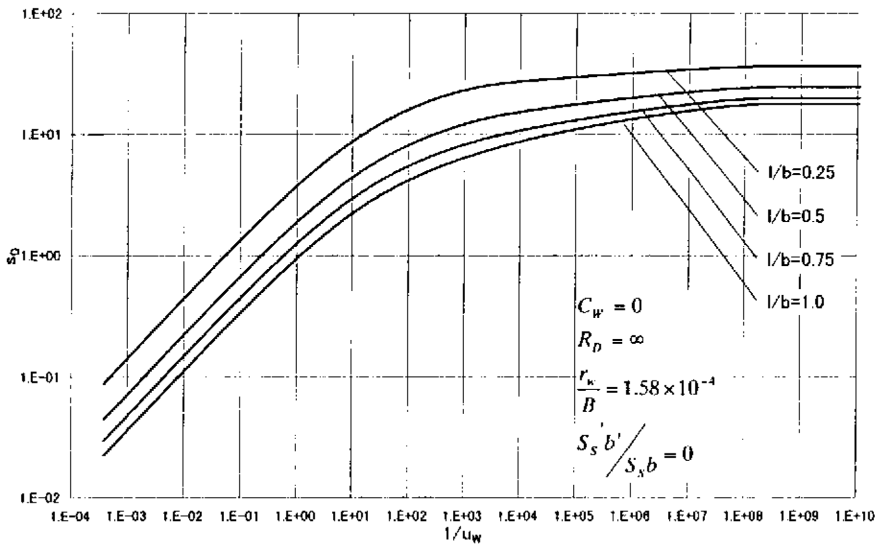
a.無限遠方境界



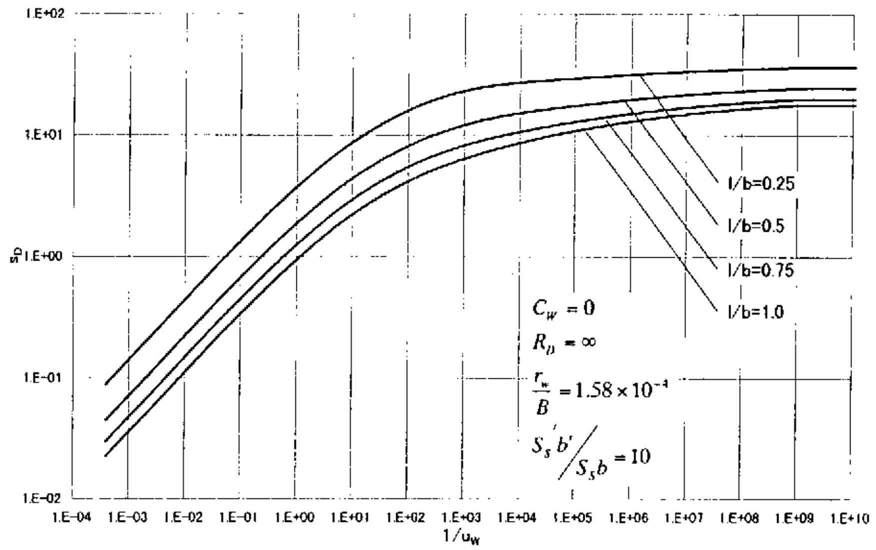
b.有限遠方定水位境界



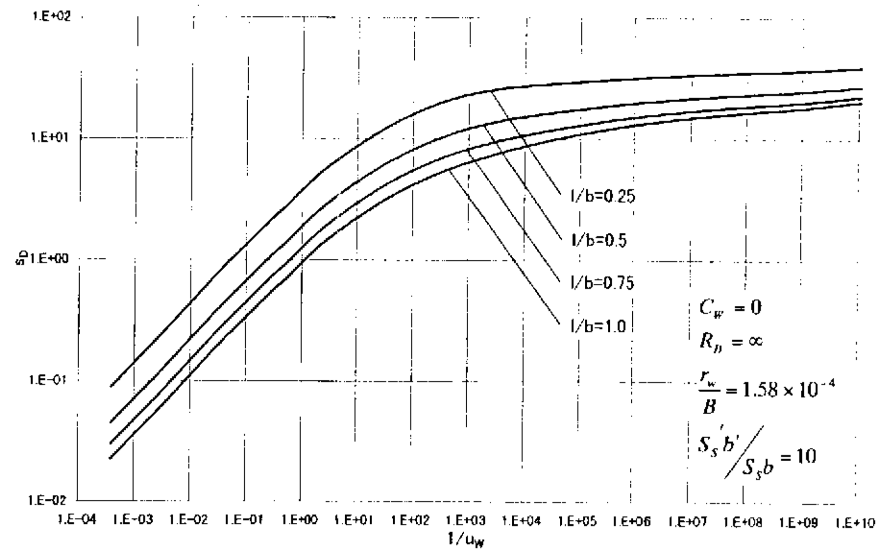
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



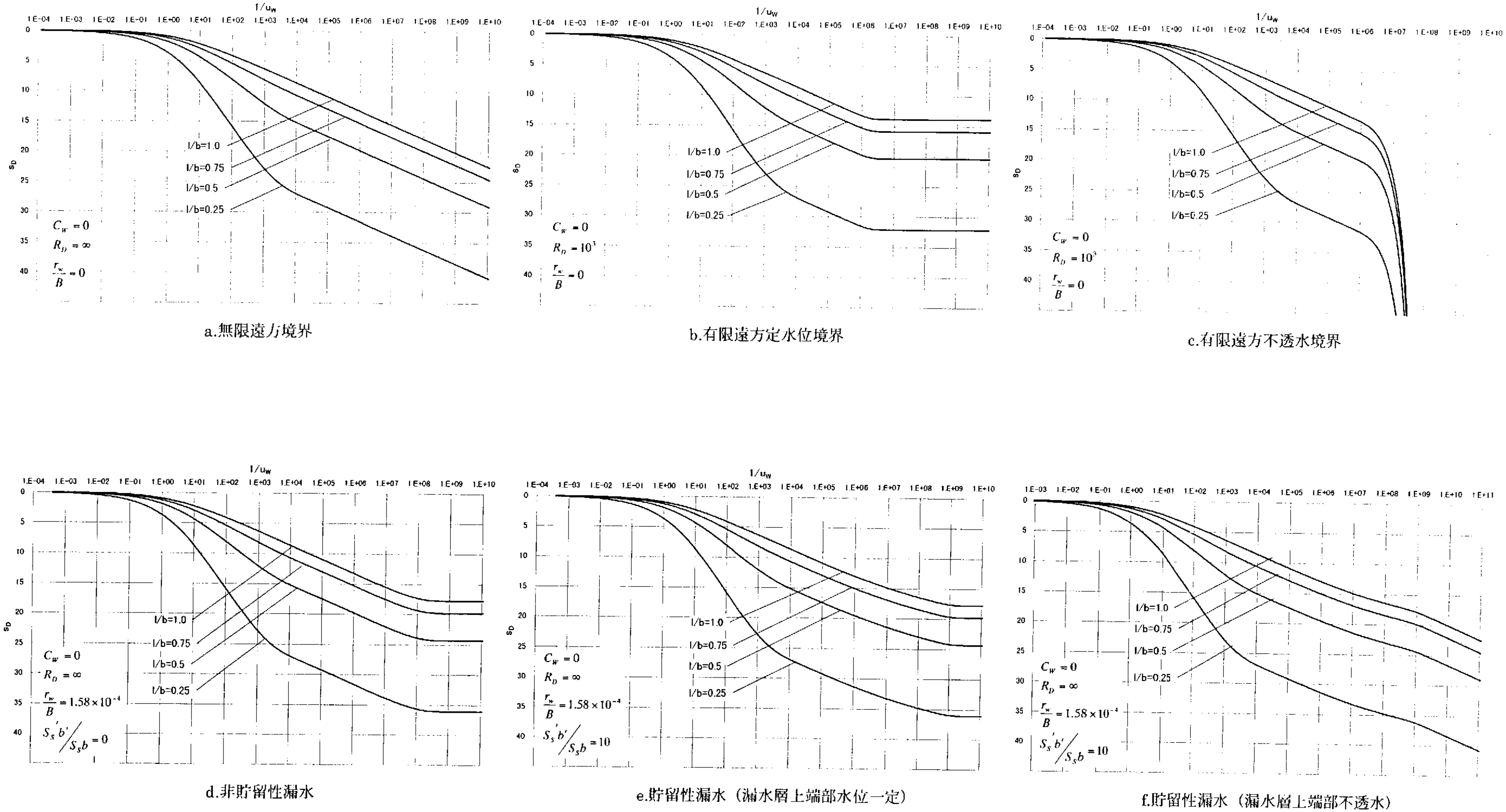
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$ （式(2.2.9)参照）

横軸：$1/u_w = \dfrac{4K_r}{S_s}\cdot\dfrac{t}{r_w^{\,2}}$ （式(2.3.10)参照）

$l/b = 0.25 \cdot d/b = 0.375$

図-2.3.5　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線（両対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）

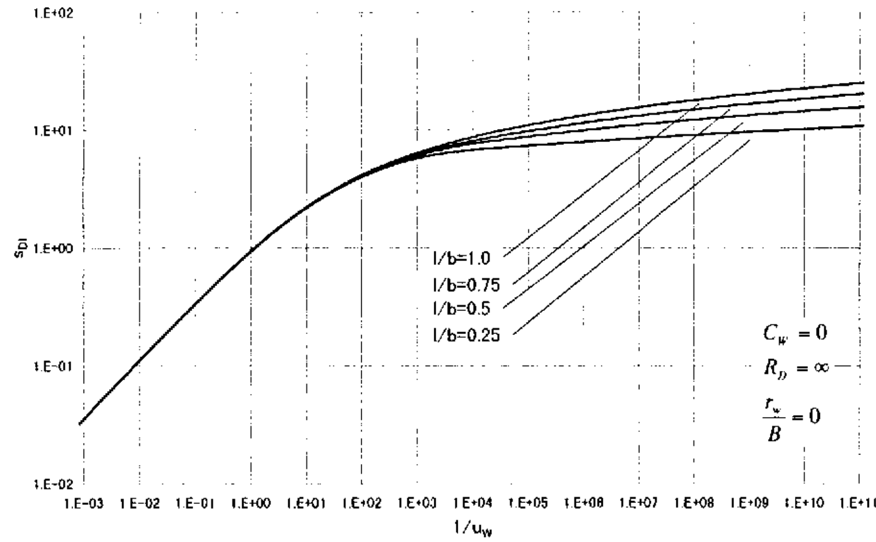


*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$ （式(2.2.9)参照）

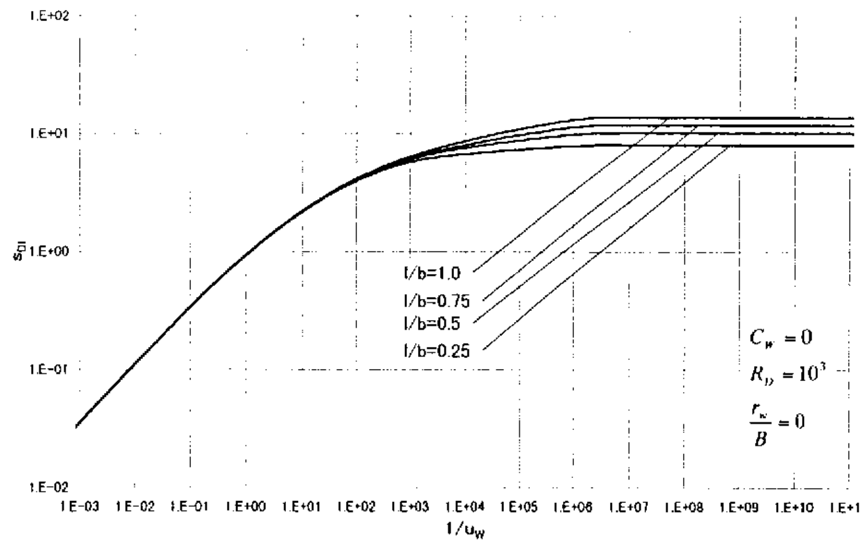
横軸：$\dfrac{1}{u_W} = \dfrac{4K_r}{S_s}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$ （式(2.3.10)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

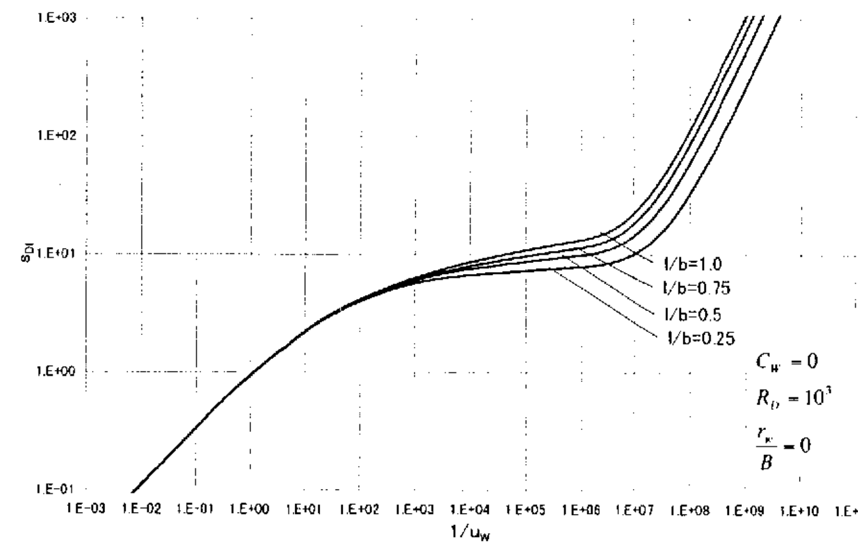
図-2.3.6 有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線（片対数で整理・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



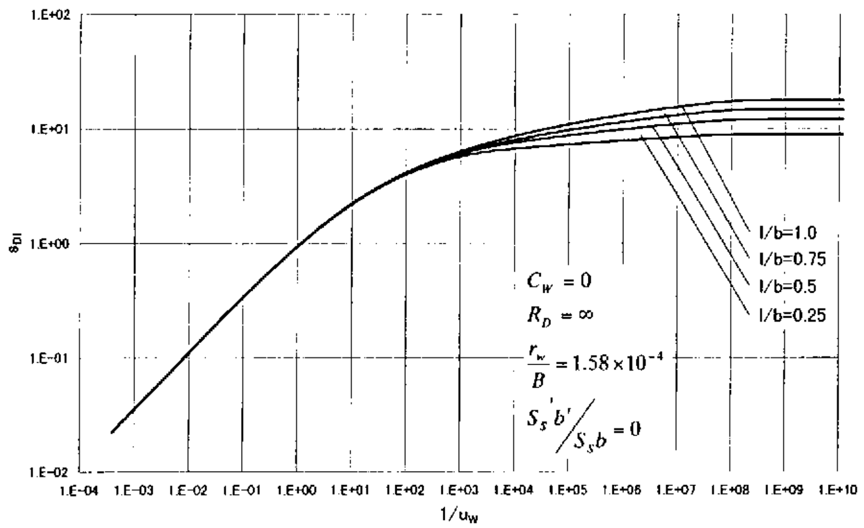
a.無限遠方境界



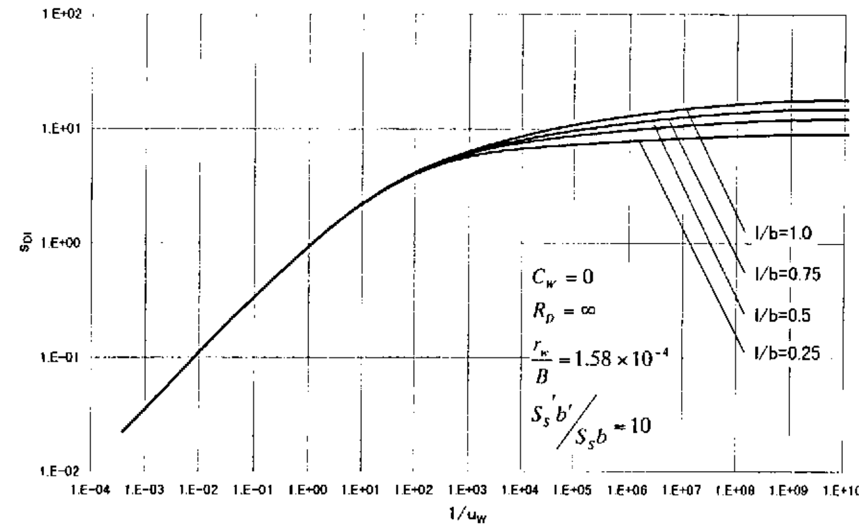
b.有限遠方定水位境界



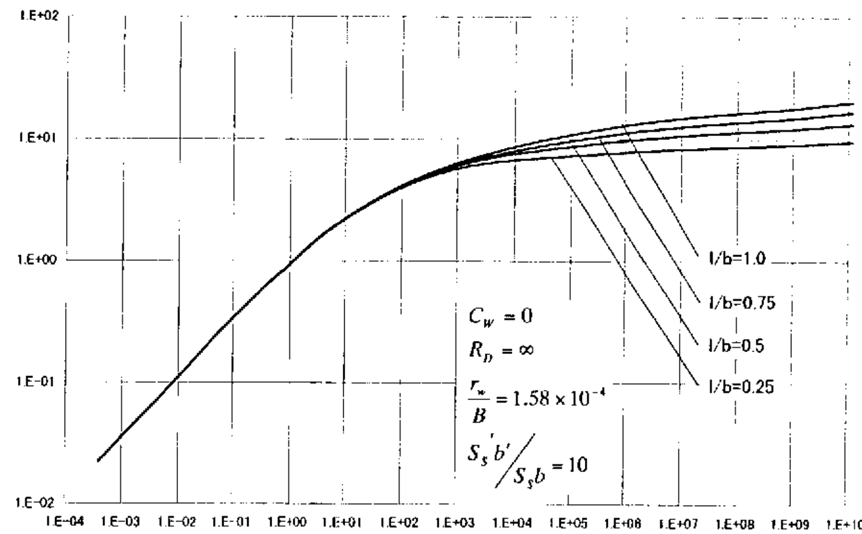
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



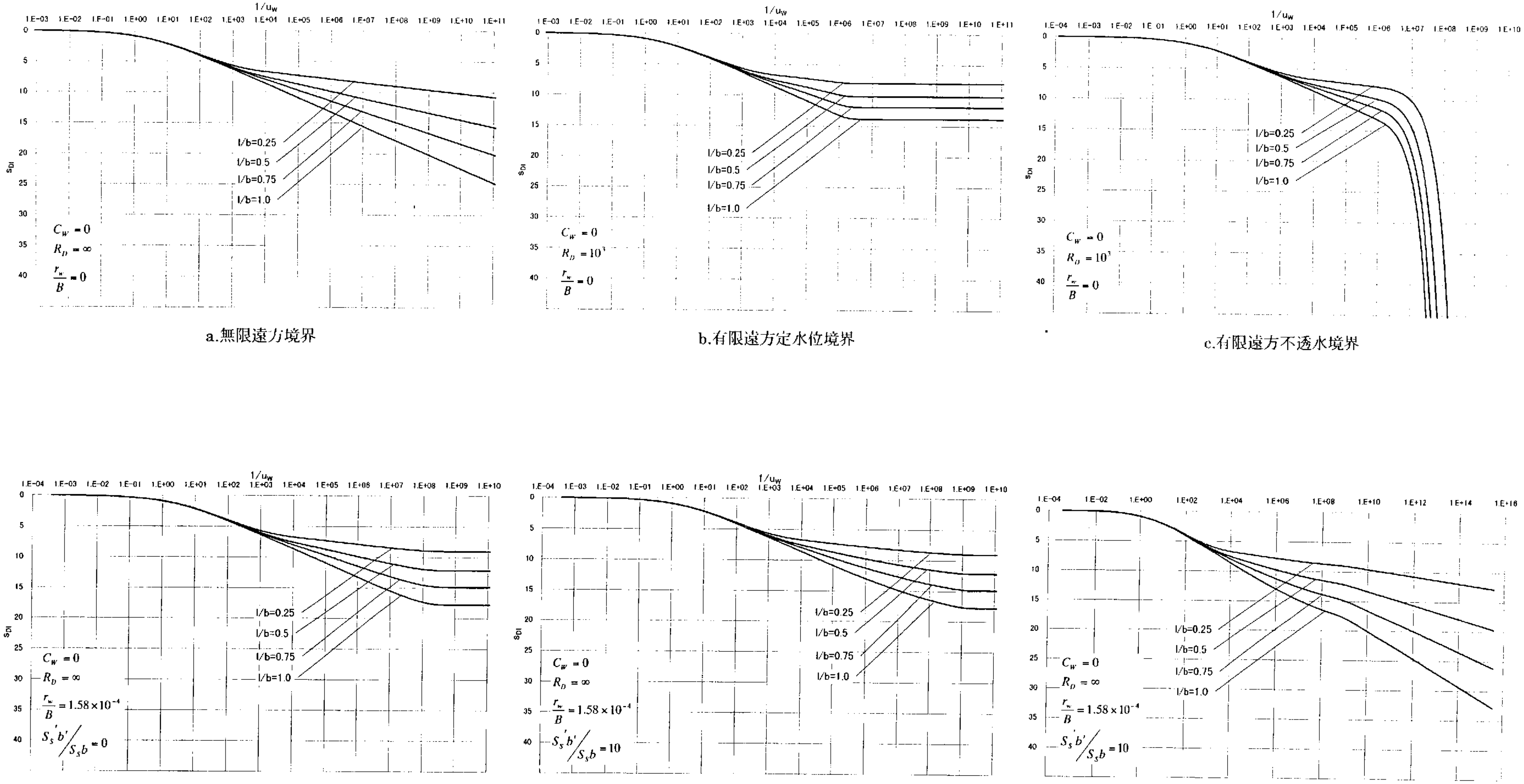
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_{Dl}=\dfrac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl}=s_D\cdot l/b$，$s_D$：式(2.2.9)参照）

横軸：$1/u_W=\dfrac{4K_r}{S_S}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$　（式(2.3.10)参照）

$l/b=0.25$・$d/b=0.375$

図-2.3.7　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線（両対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）



a.無限遠方境界　　b.有限遠方定水位境界　　c.有限遠方不透水境界

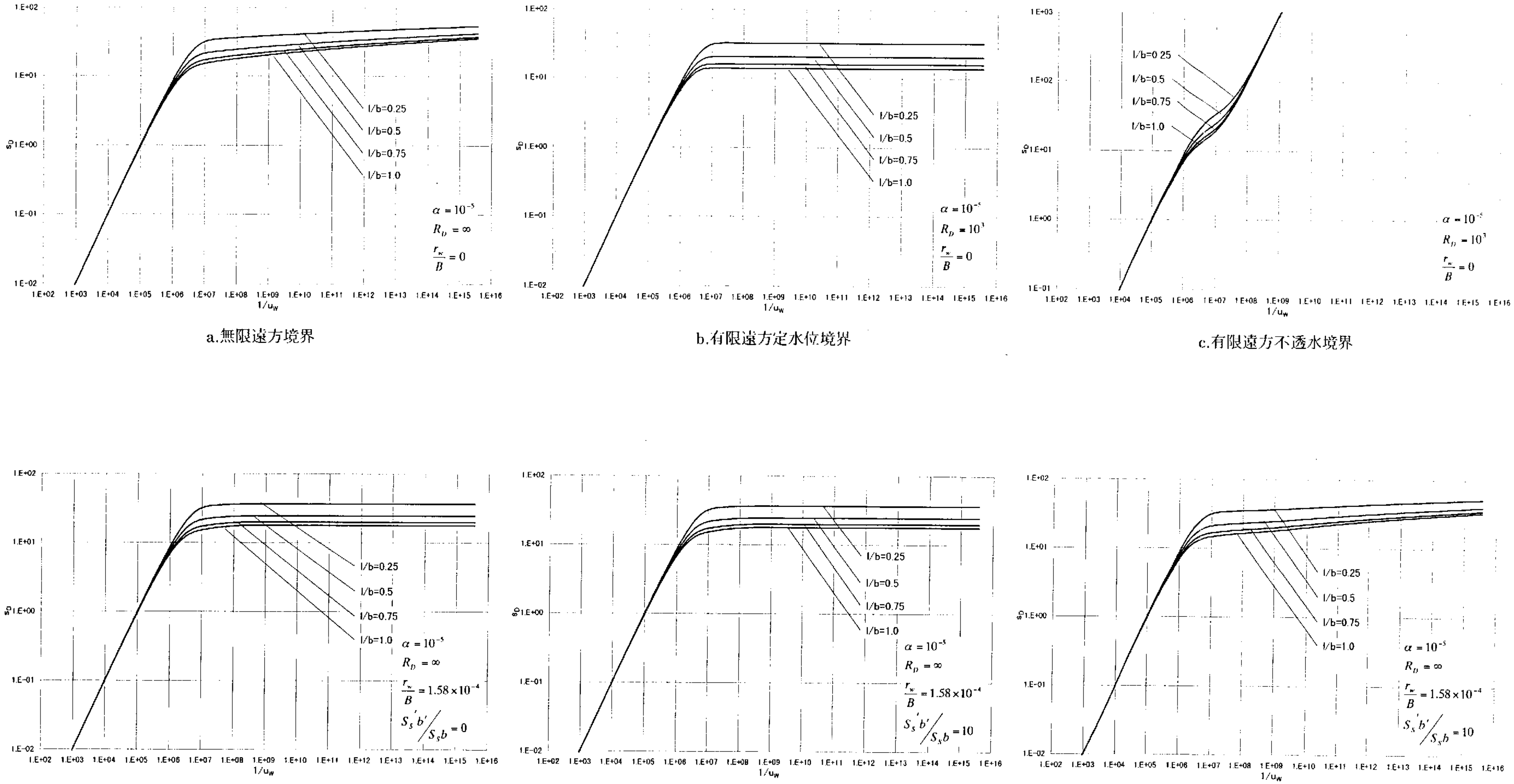
d.非貯留性漏水　　e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）　　f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_{Dl} = \dfrac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$, s_D：式(2.2.9)参照）

横軸：$1/u_W = \dfrac{4K_r}{S_S}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$（式(2.3.10)参照）

$l/b = 0.25$・$d/b = 0.375$

図-2.3.8　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線（片対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）



a.無限遠方境界　b.有限遠方定水位境界　c.有限遠方不透水境界

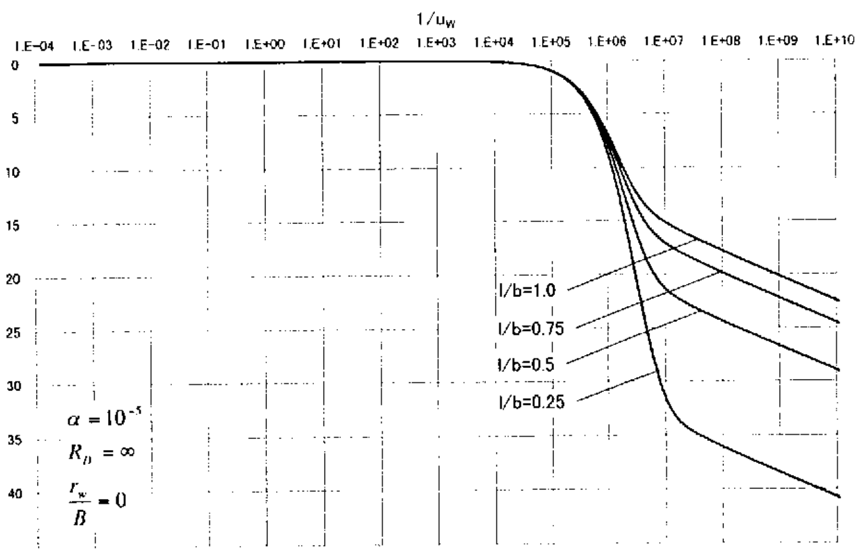
d.非貯留性漏水　e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）　f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$　（式(2. 2. 9)参照）

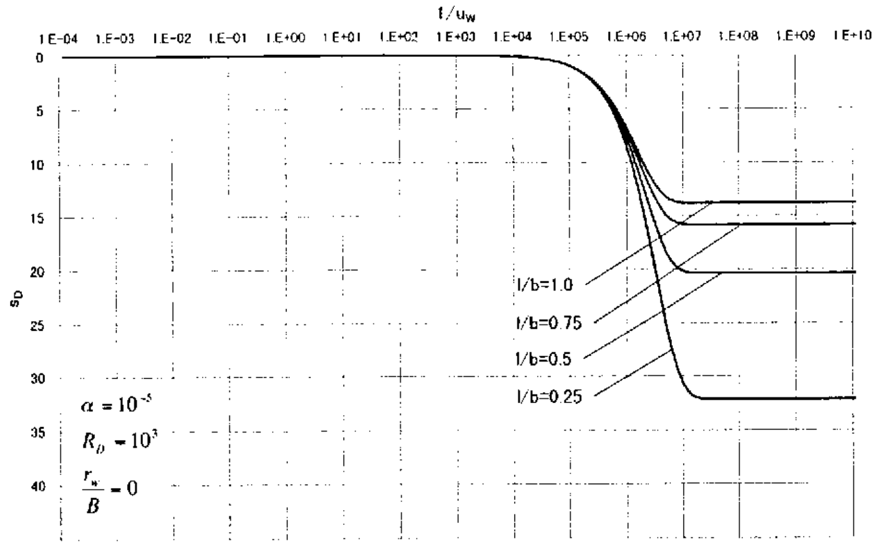
横軸：$1/u_w = \dfrac{4K_r}{S_s}\cdot\dfrac{t}{r_w^{\,2}}$　（式(2. 3. 10)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

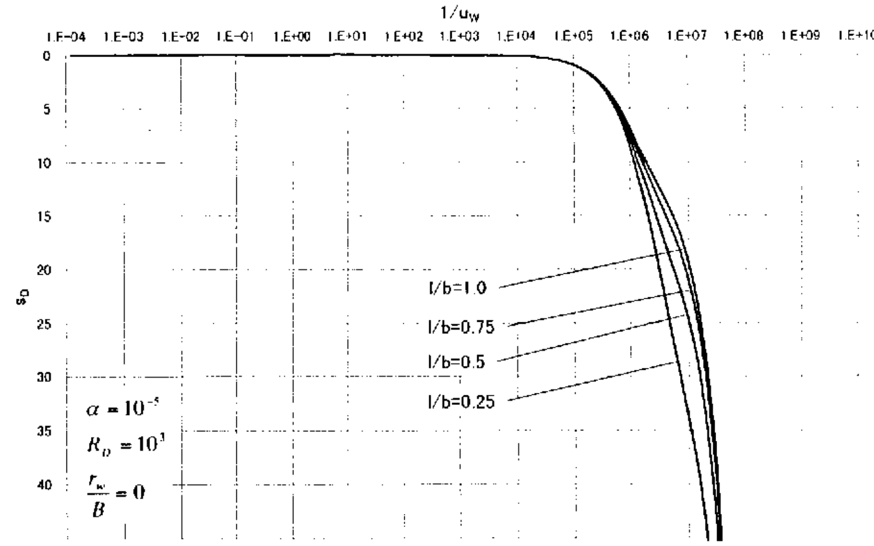
図-2. 3. 9　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の標準曲線（両対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）



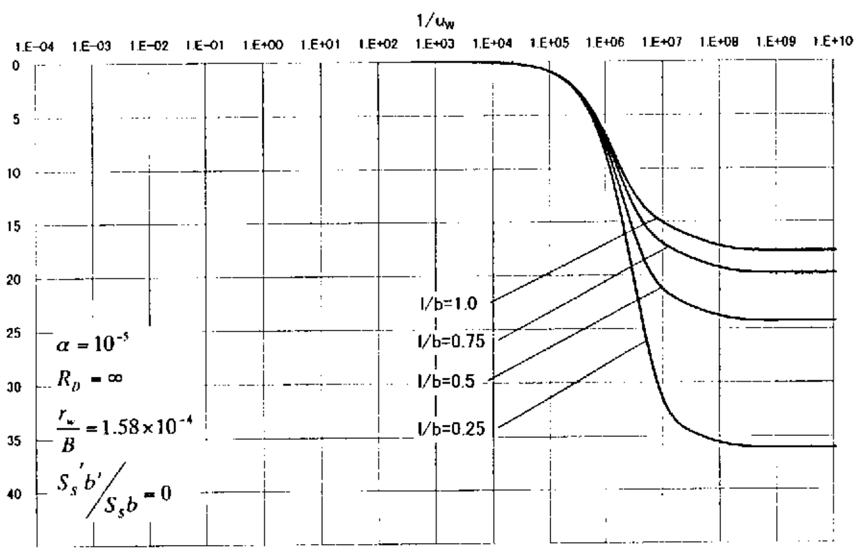
a.無限遠方境界



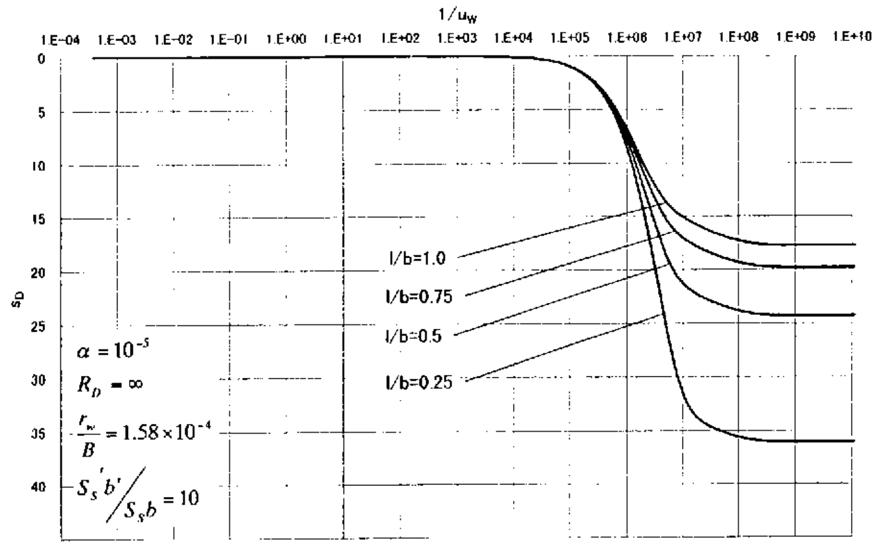
b.有限遠方定水位境界



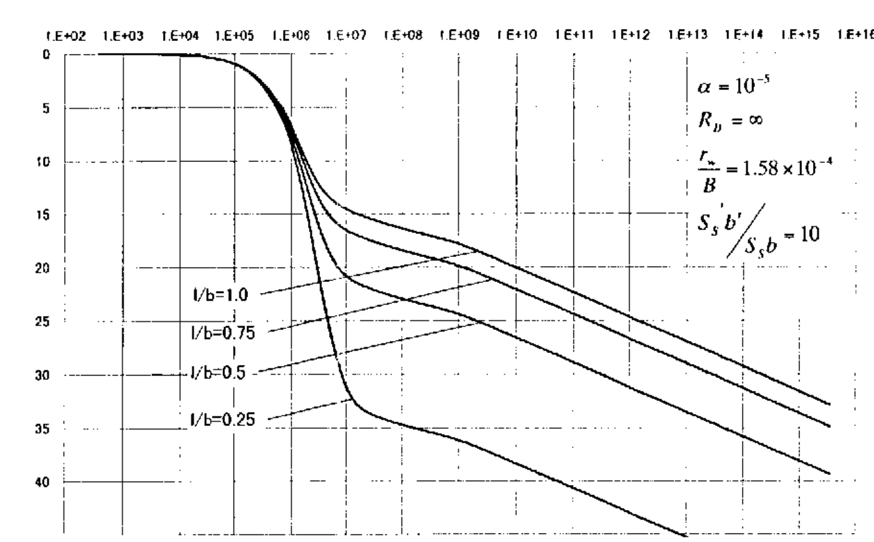
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



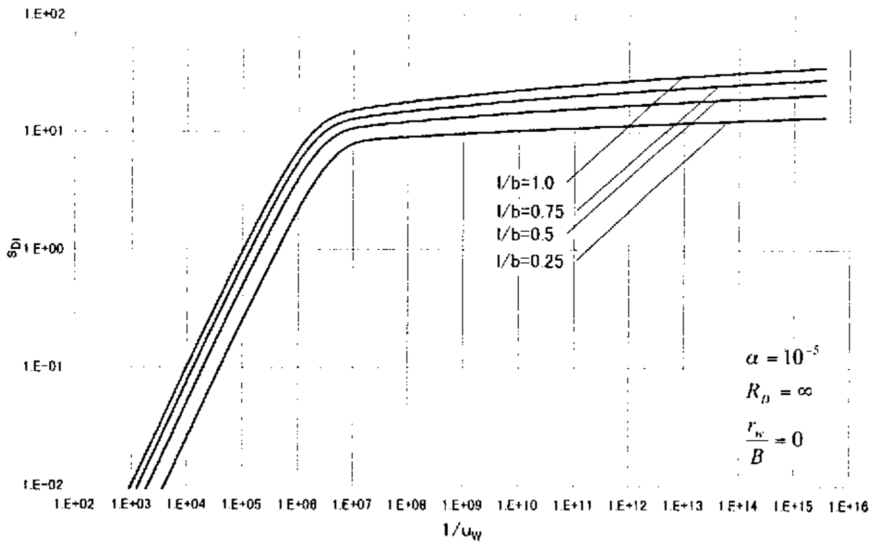
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$ （式(2.2.9)参照）

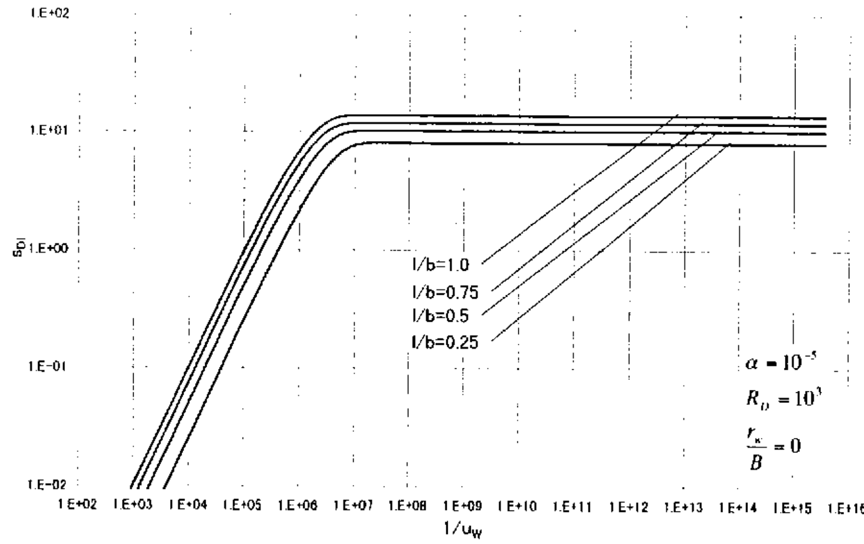
横軸：$1/u_W = \dfrac{4K_r}{S_S}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$ （式(2.3.10)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

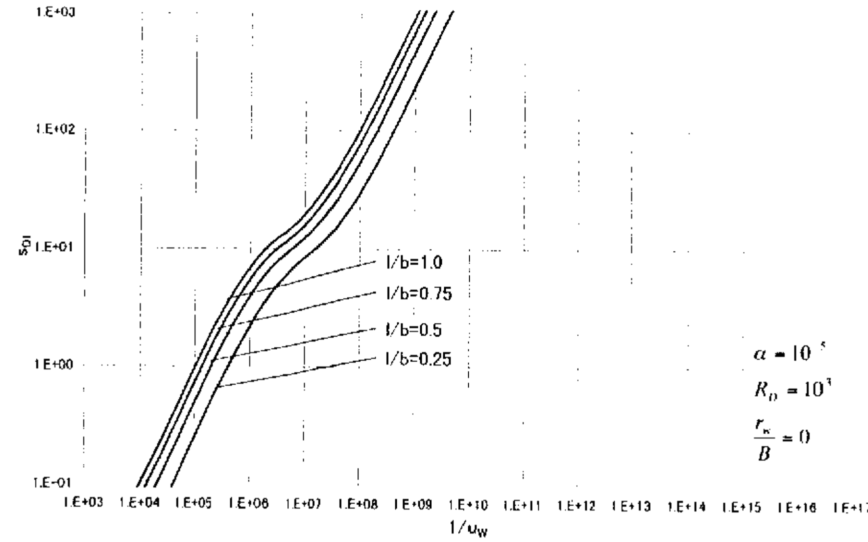
図-2.3.10　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の標準曲線（片対数で整理・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



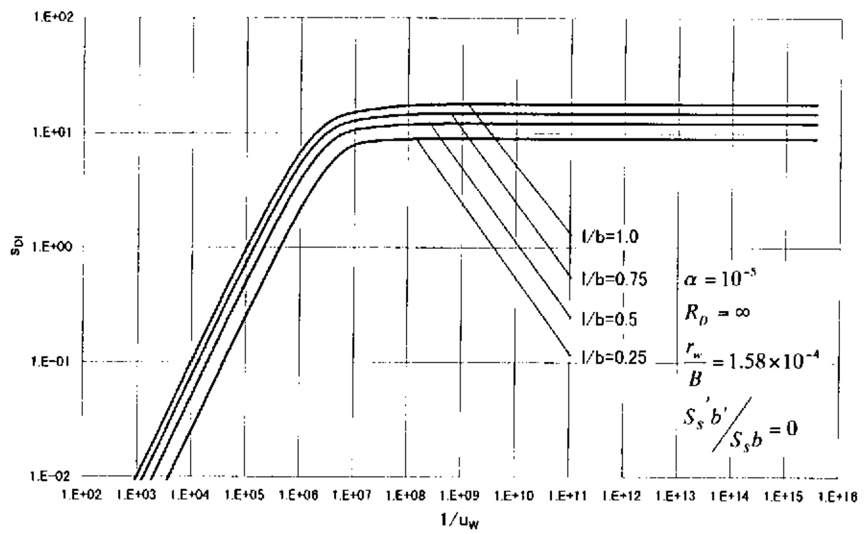
a.無限遠方境界



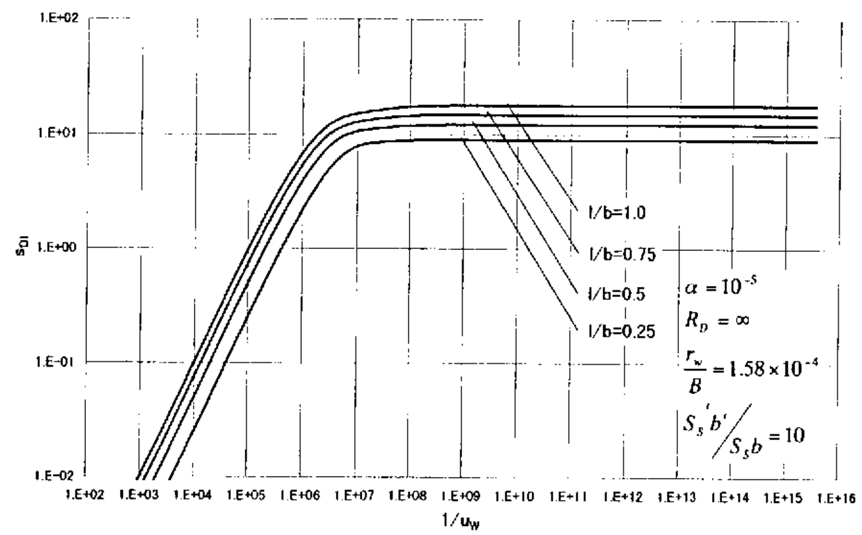
b.有限遠方定水位境界



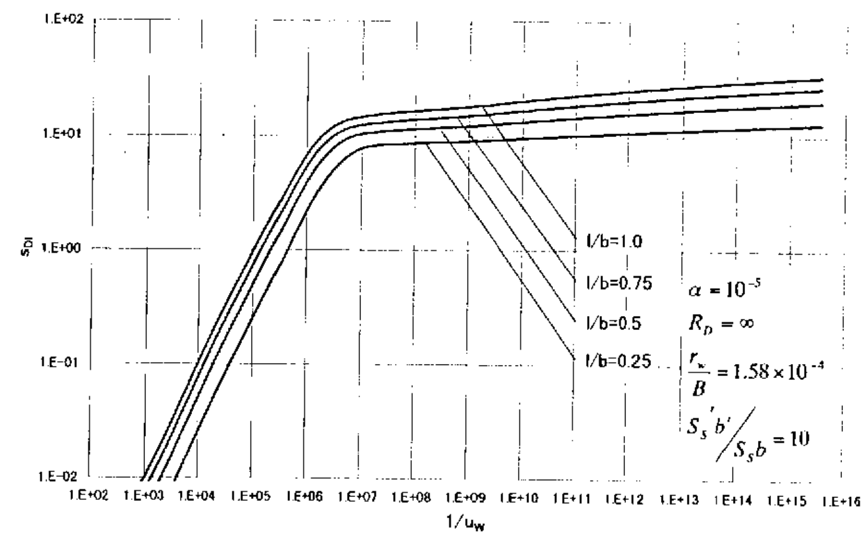
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



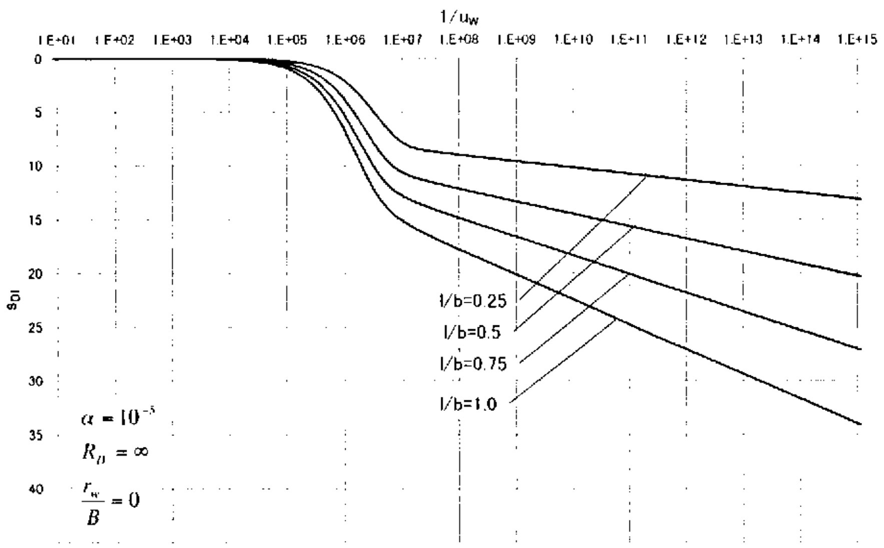
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_{Dl}=\dfrac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl}=s_D\cdot l/b$，$s_D$：式(2.2.9)参照）

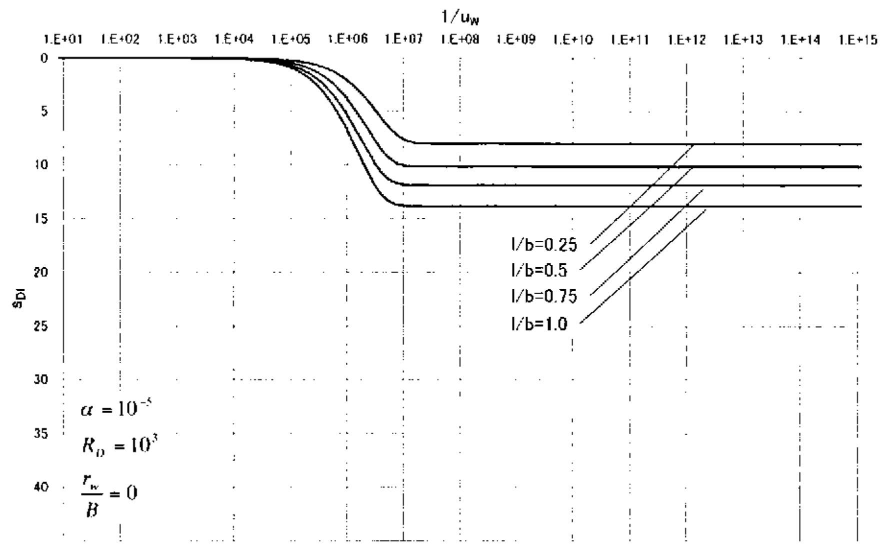
横軸：$1/u_W=\dfrac{4K_r}{S_S}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$（式(2.3.10)参照）

$l/b=0.25\cdot d/b=0.375$

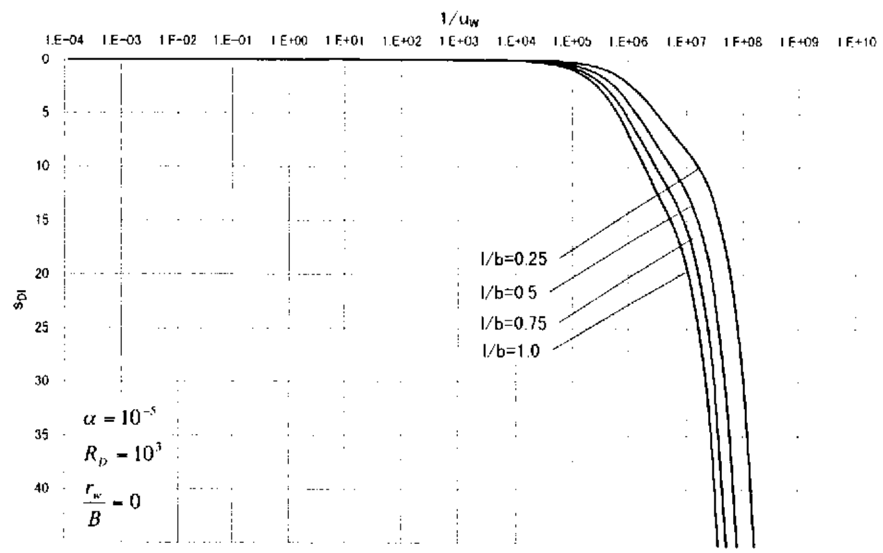
図-2.3.11　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の標準曲線（両対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）



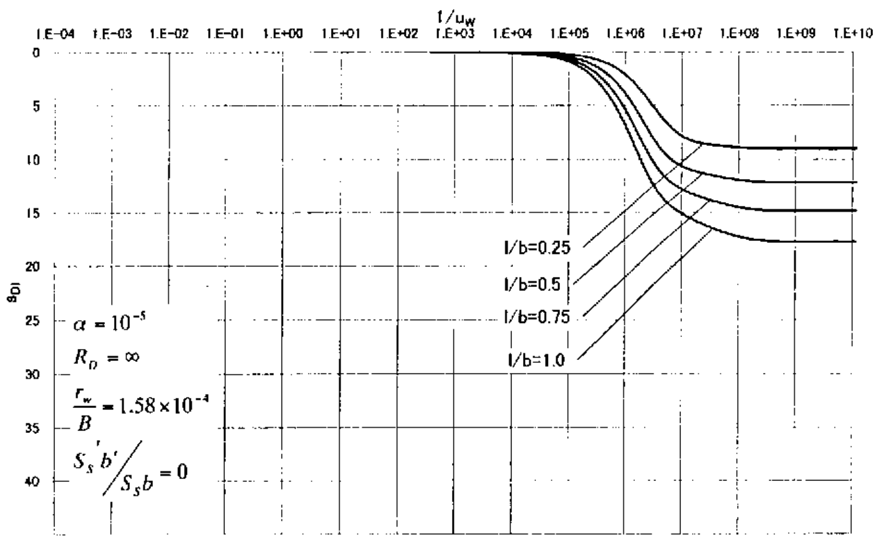
a.無限遠方境界



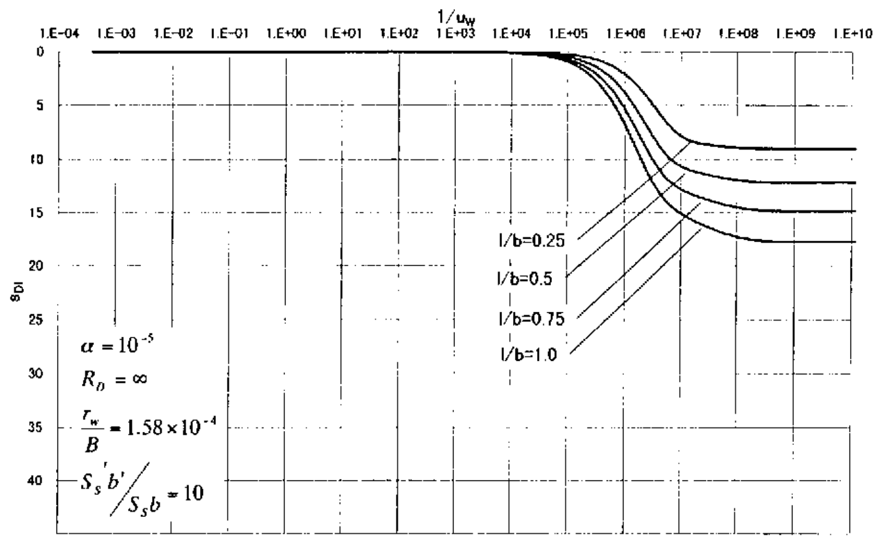
b.有限遠方定水位境界



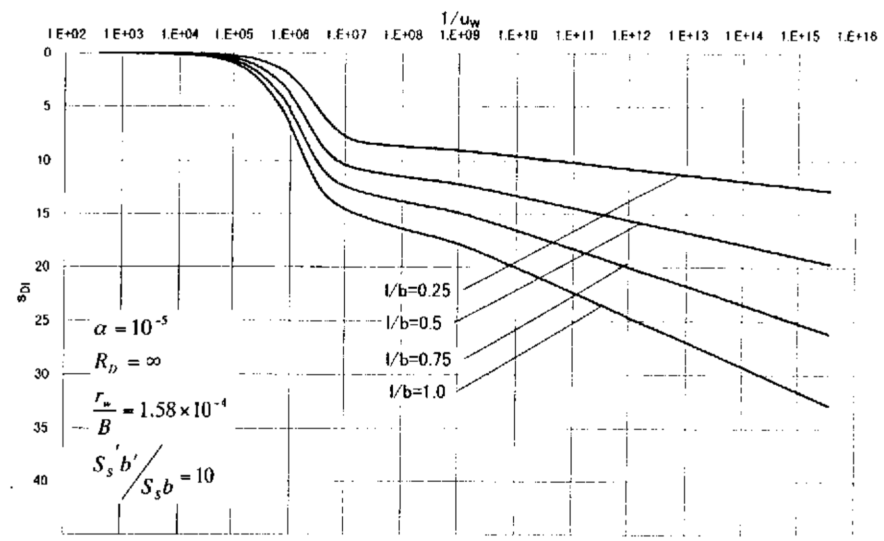
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_{Dl} = \dfrac{4\pi K_r l}{Q} \cdot s$ （$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$，s_D：式(2.2.9)参照）

横軸：$\dfrac{1}{u_W} = \dfrac{4K_r}{S_S} \cdot \dfrac{t}{r_W{}^2}$ （式(2.3.10)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

図-2.3.12　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の標準曲線（片対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）

２．３．３ 定圧揚水

定圧揚水試験は、水位低下量を一定に維持するのに必要な揚水流量を観測するものである。観測井での水位低下量を観測することもあるが、基本的には単孔試験を前提としている。

(1) 整理方法

①曲線一致法

この技法は標準曲線と実測データを同じスケール軸をもつ両対数軸上でマッチングさせ、最良のマッチング状態での情報を用いて浸透特性および水理境界条件を評価する。以下に手順を示す。

手順[1] 標準曲線として無次元揚水流量－無次元時間の関係を得る。

手順[2] 観測揚水流量データと観測時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元揚水流量を、横軸に実測時間および無次元時間をそれぞれ同じスケールの両対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ互いに平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、複数の標準曲線がある場合には、最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5] このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 Q_D*、無次元時間 t_D*

実測水位低下量 Q*、実測時間 t*

$$T = K_r l = \frac{1}{2\pi s_0}\frac{Q^*}{{Q_D}^*} \qquad (2.3.20.1)$$

$$S_S = \frac{K_r}{{r_w}^2}\frac{t^*}{(t_D)^*} \qquad (2.3.20.2)$$

・その他の条件のある場合

有限遠方境界あるいは漏水等の影響がみられる場合の整理法については知られていない。基本的には、これまで説明した定量揚水試験の考え方が適応できる。

②直線勾配法

漏水や有限遠方水理境界が無い場合には、片対数軸上$\left(1/Q_D - \log(t_D)\right)$では、ある程度の揚水時間経過後では一定の傾きで水位低下が進む。次式で透水量係数が評価できる。

$$T = K_r l = \frac{2.3}{4\pi s_0 m} \qquad (2.3.21)$$

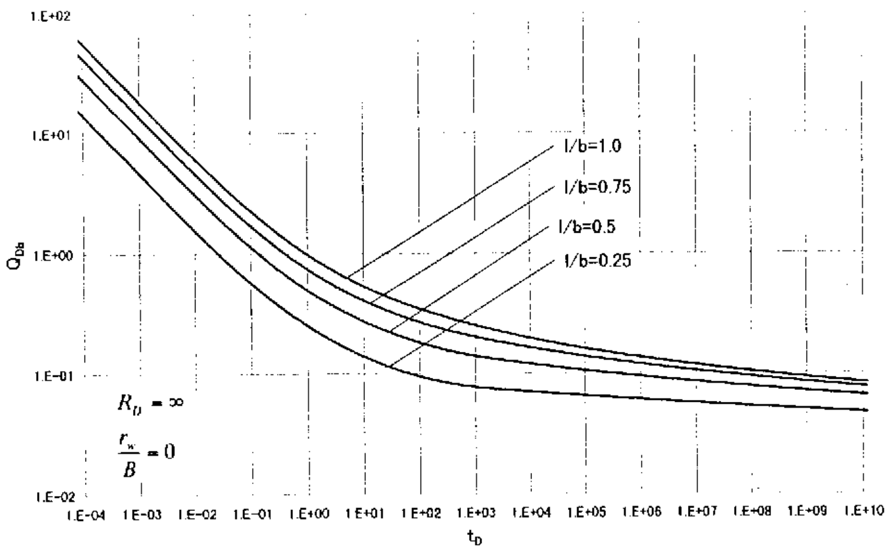
ここで、mは直線の傾き＝$\left({}^{1/Q_D}\big/_{\log(t_D)}\right)$

全層ストレーナー井戸では定量揚水試験の Jacob-Cooper 法同様に 1/Q=0 軸上の切片 to を用いて Ss を計算することができるが、部分インターバル揚水井戸での試験結果は定量揚水時の挙動と同様にこれを適用することはできない。この補正方法ついては一般に知られていない。

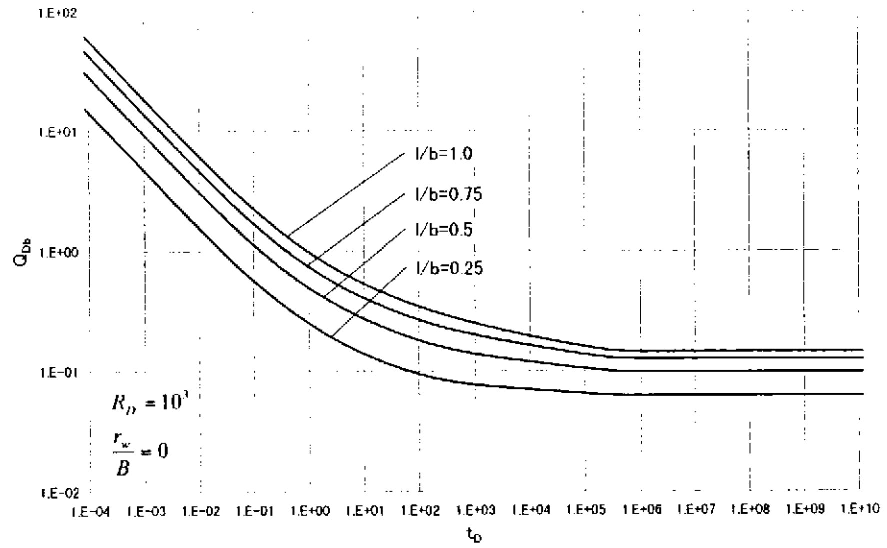
(2)標準曲線の特性

ここでは、図-2.3.13-図-2.3.16 について示す。各図のレイアウトは表 2.3.2 に示したレイアウト一覧に同じである。また、図-2.3.13 は $Q_{Db}(=Q_D \cdot l/b)$の両対数軸、図-2.3.14 は $1/Q_{Db}$ の片対数軸、図-2.3.15 は Q_D の両対数軸、図-2.3.16 は $1/Q_D$ の片対数軸上のプロットをそれぞれ示した。

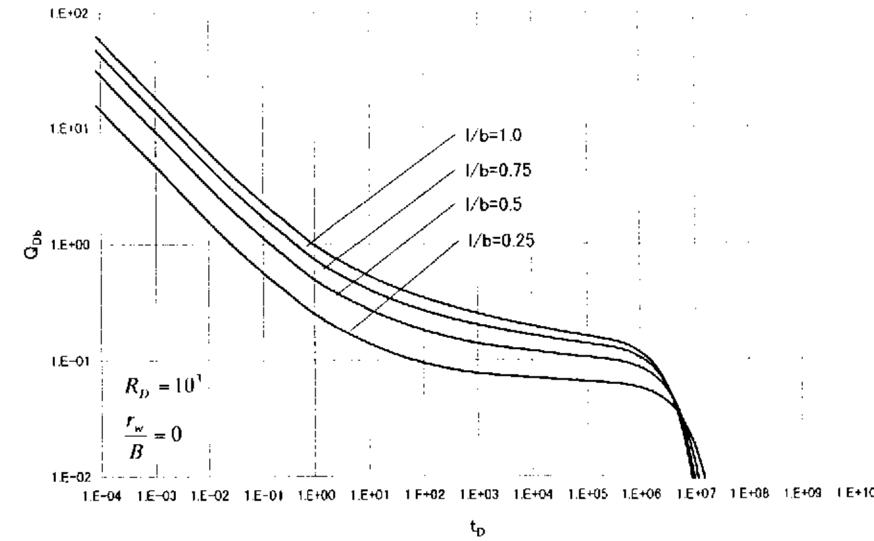
- 同じ孔内水位低下量であれば観測される揚水流量はインターバル長が大きいほど大きくなる。
- インターバル長に対して無次元化した Q_D と帯水層厚に対して無次元化した Q_{Db} による整理を比較すると、両対数軸での Q_D は比較的早い時間に同じ曲線にのり、ここではインターバル長の違いが見られない。
- 同様の比較で、片対数軸での 1/ Q_{Db} は遅い時間でみられる直線はインターバル長の違いに対して平行であることから、この傾きより T=Krb の評価ができる。
- 片対数軸での形状はインターバル長の影響を受けるとはらみだしのある形状となる。
- 定水位有限影響圏半径のケースと非貯留性漏水のケースではここでも大きな差違はみとめられない。



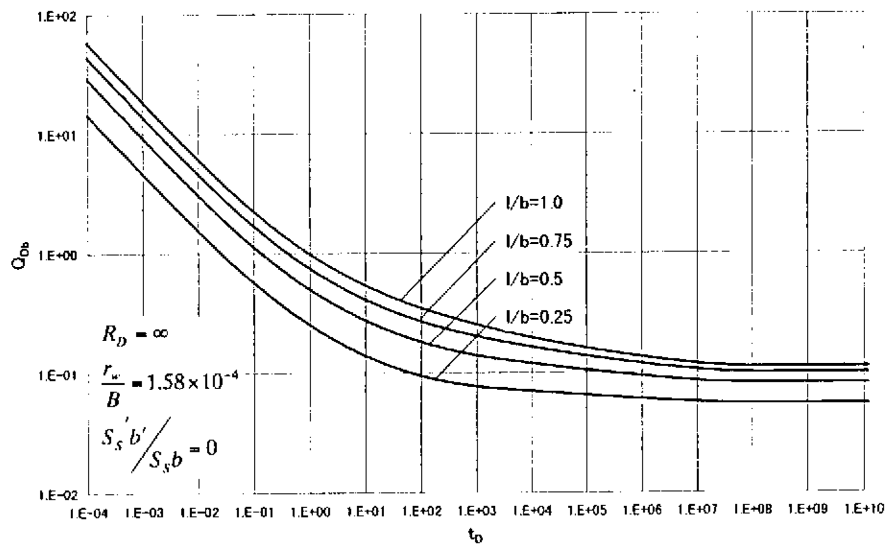
a.無限遠方境界



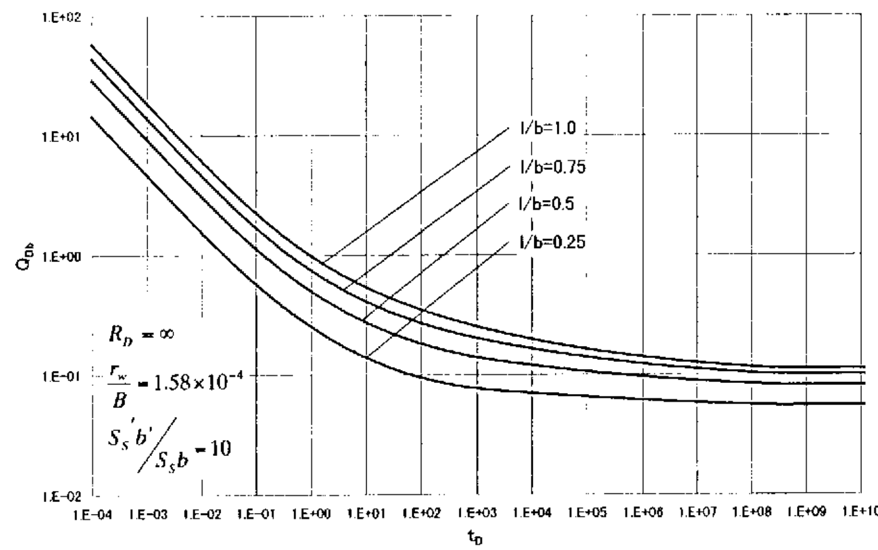
b.有限遠方定水位境界



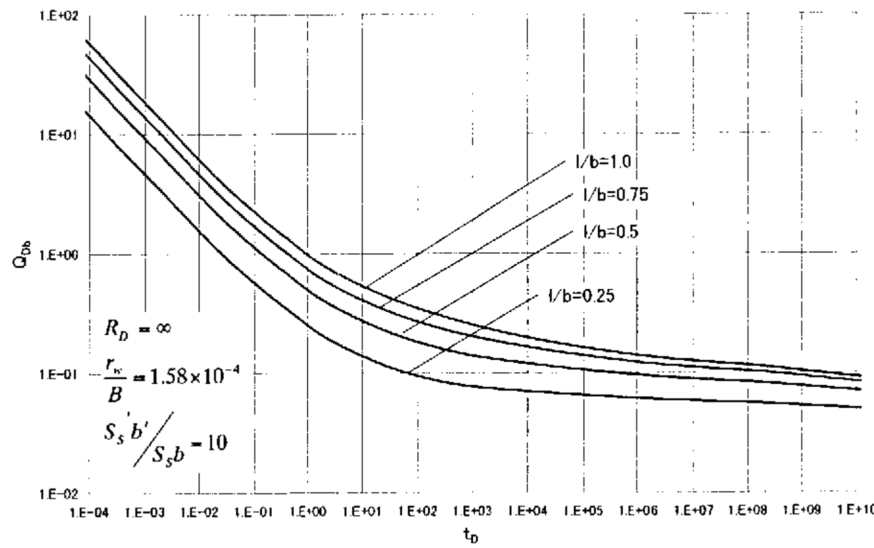
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



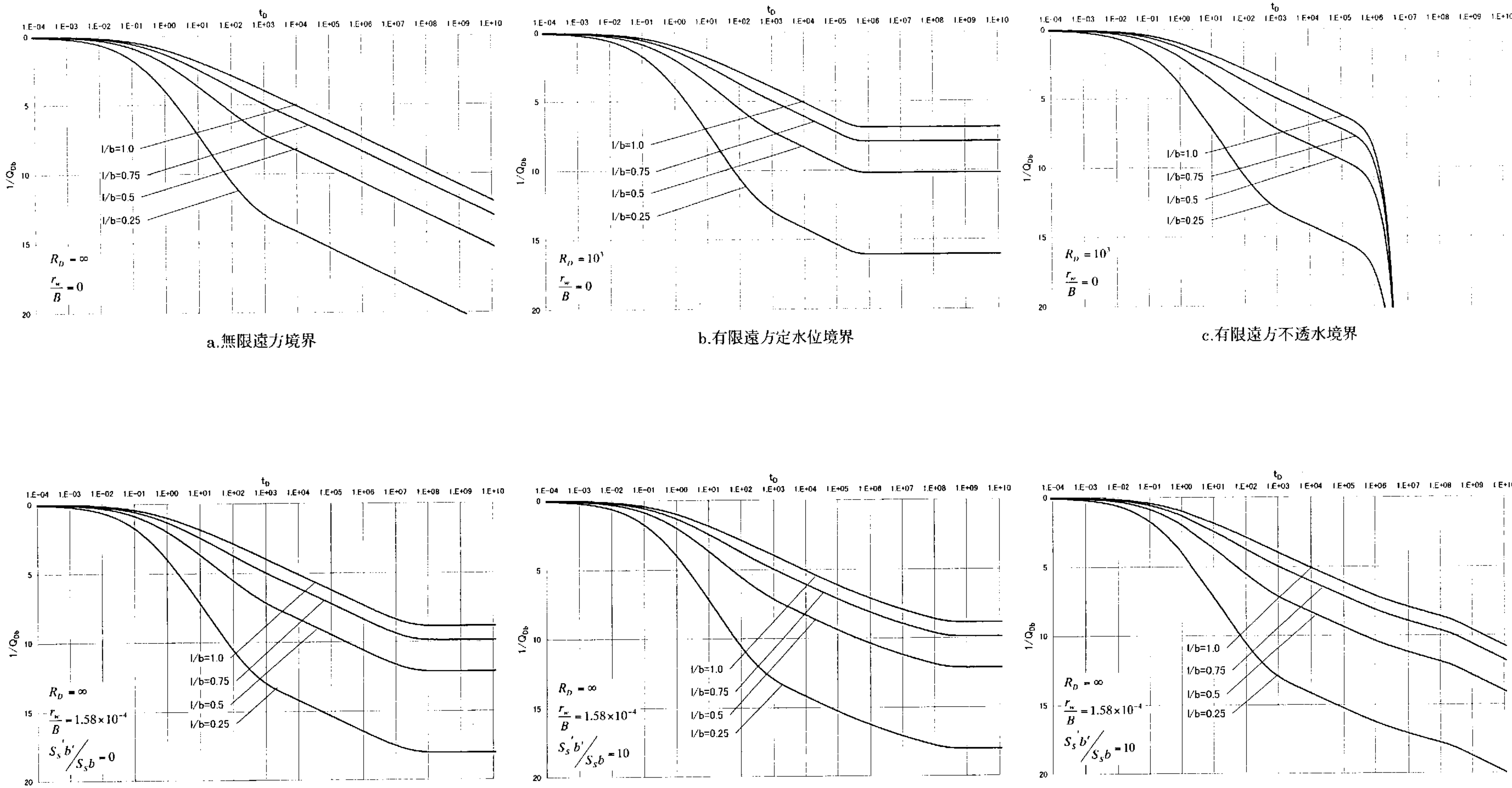
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$Q_{Db} = \frac{Q}{2\pi K_r s_0}\cdot\frac{1}{l}$ （$Q_{Db} = Q_D \cdot l/b$, Q_D：式(2.2.16.4)参照）

横軸：$t_D = \frac{K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r_W^{\,2}}$（式(2.2.9)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

図-2.3.13　定圧揚水時の標準曲線（両対数で整理・流量を帯水層厚bで無次元化）



a.無限遠方境界　b.有限遠方定水位境界　c.有限遠方不透水境界

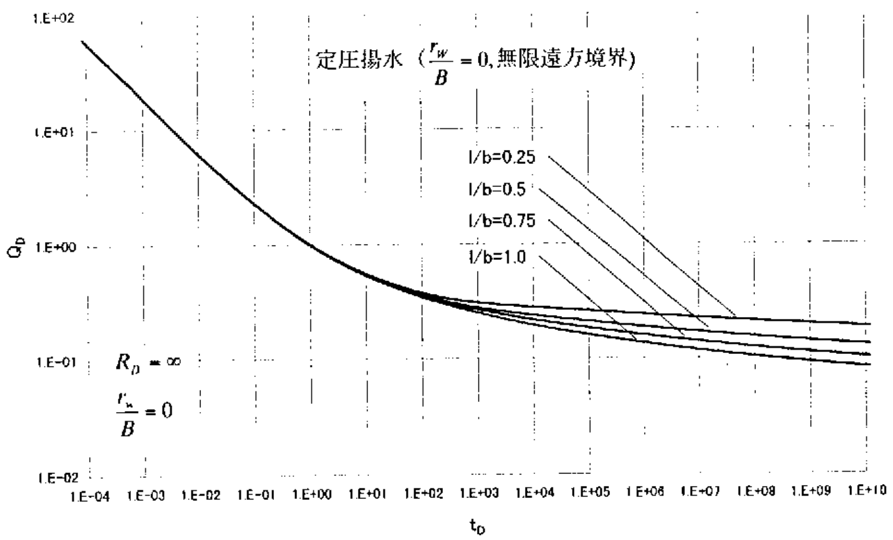
d.非貯留性漏水　e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）　f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$1/Q_{Db} = \dfrac{2\pi K_r s_0}{Q} \cdot l$　（$Q_{Db} = Q_D \cdot l/b$，Q_D：式(2.2.16.4)参照）

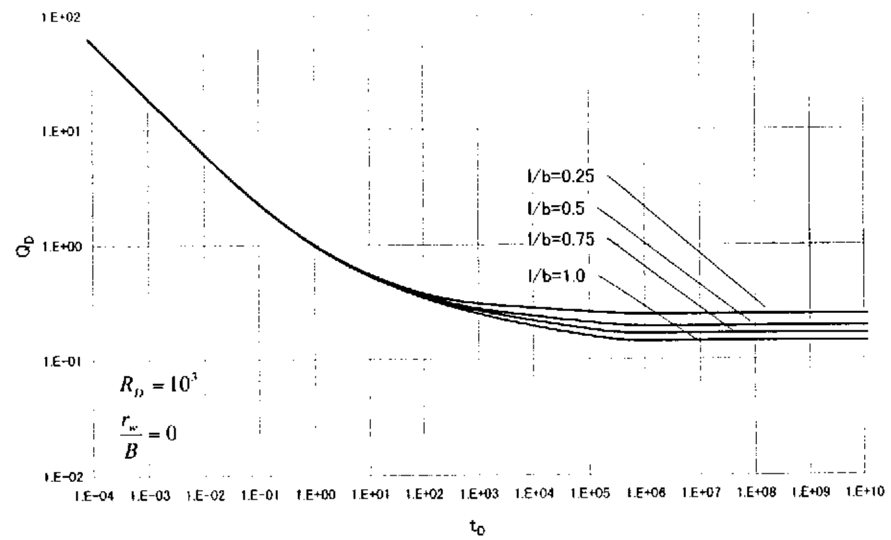
横軸：$t_D = \dfrac{K_r}{S_S} \cdot \dfrac{t}{r_W{}^2}$（式(2.2.9)参照）

$l/b = 0.25 \cdot d/b = 0.375$

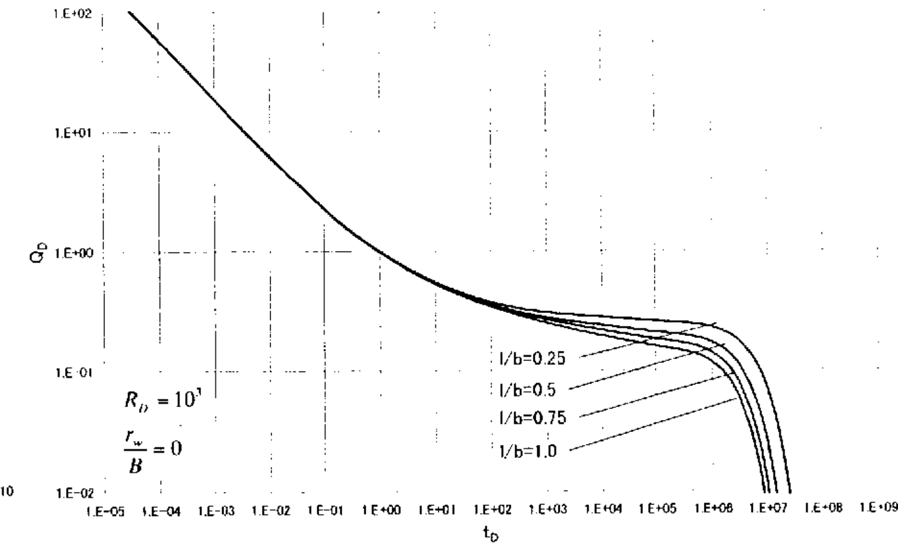
図-2.3.14　定圧揚水時の標準曲線（片対数で整理・流量を帯水層厚 b で無次元化）



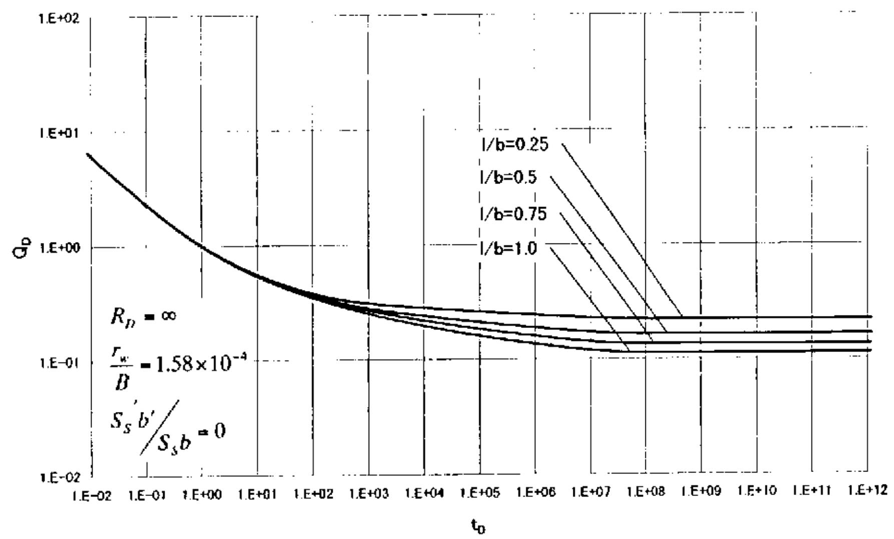
a.無限遠方境界



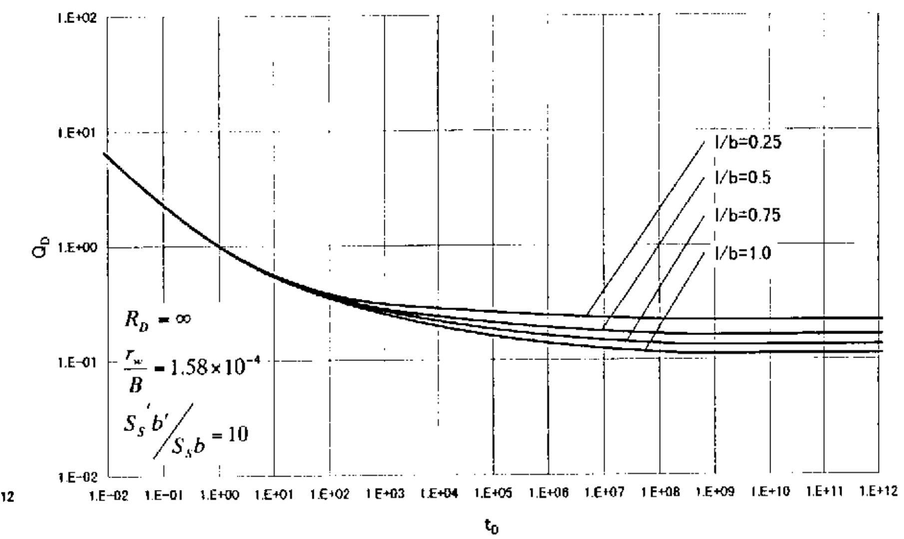
b.有限遠方定水位境界



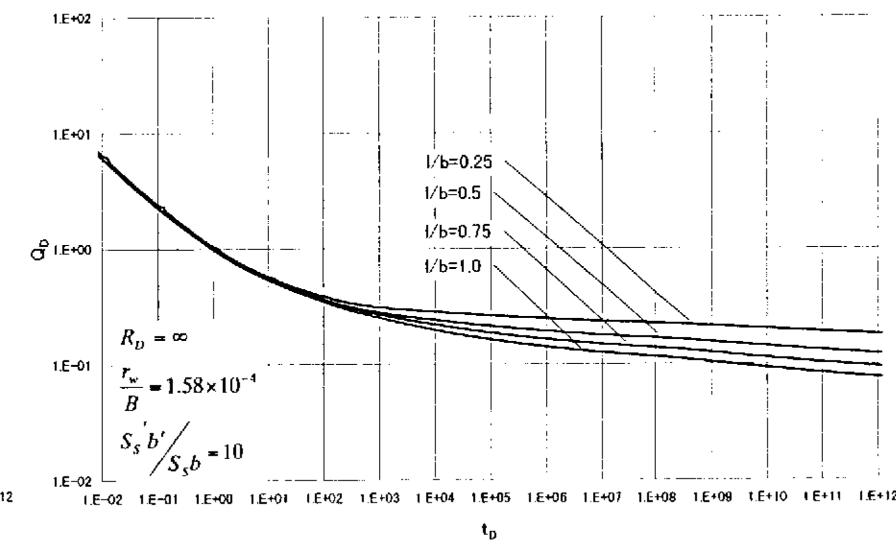
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



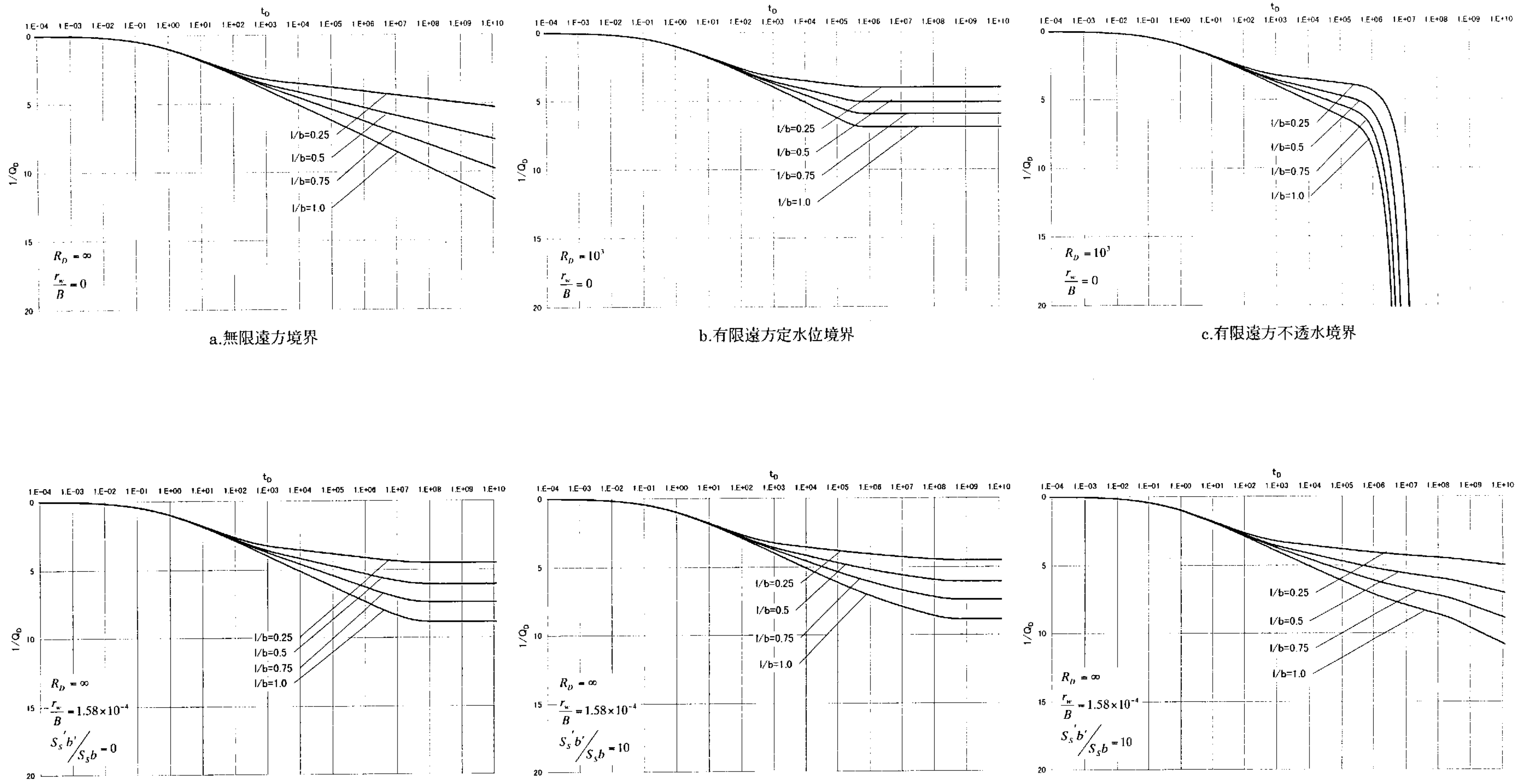
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$Q_D=\dfrac{Q}{2\pi K_r s_0}\cdot\dfrac{1}{l}$（式(2. 2. 16. 4)参照）

横軸：$t_D=\dfrac{K_r}{S_S}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$（式(2. 2. 9)参照）

$l/b=0.25$ ・ $d/b=0.375$

図-2. 3. 15　定圧揚水時の標準曲線（両対数で整理・流量をストレーナー長 l で無次元化）



a.無限遠方境界　b.有限遠方定水位境界　c.有限遠方不透水境界

d.非貯留性漏水　e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）　f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$1/Q_D=\dfrac{2\pi K_r s_0}{Q}\cdot l$　（Q_D：式(2.2.16.4)参照）

横軸：$t_D=\dfrac{K_r}{S_S}\cdot\dfrac{t}{r_W{}^2}$（式(2.2.9)参照）

$l/b=0.25$・$d/b=0.375$

図-2.3.16　定圧揚水時の標準曲線（片対数で整理・流量をストレーナー長 l で無次元化）

２．３．４ 回復試験：無限小井戸半径の場合

回復試験は定流量揚水を継続した後、揚水を停止し(停止時間 t_p)、その後の水位回復挙動を観測するものである。ここでも、無限小井戸半径における議論を行なうのは節(2.3.1)と同様に、従来から有限井戸半径の議論が少ないことと、無限小井戸半径での回復挙動が基本挙動とみなされているためである。

(1)整理手法

①曲線一致法１

我が国では回復試験法に対する曲線一致法は一般的ではないが、石油工学の分野ではRamey カーブとして知られる曲線とのマッチング手法が適用されている。この曲線は揚水挙動から回復挙動までを一連の揚水時間(t_D/r_D^2 あるいは $1/u$)に対して整理したもので、後に示す整理手法の時間軸のように停止前後の経過時間を区別する必要がない。

手順[1] 標準曲線として無次元水位低下量－無次元時間の関係を得る。

手順[2] 観測水位低下量データと観測時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元水位低下量を、横軸に実測時間および無次元時間をそれぞれ同じスケールの両対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ互いに平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、揚水停止時間 $1/u_p$(あるいは t_{pD}/r_D^2)毎の標準曲線から最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5] このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 s_D*、無次元時間 $1/u$* (あるいは，t_D/r_D^{2*})

実測水位低下量 s *、実測時間 t*

$$T = K_r b = \frac{Q}{4\pi}\frac{s_D *}{s *} \qquad (2.3.22.1)$$

$$S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{4t *}{\left(1/u\right)*} \quad \left(\text{あるいは} S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{t *}{\left(t_D/r_D^2\right)*}\right) \qquad (2.3.22.2)$$

最良マッチング曲線値 $1/u_p^*$(あるいは t_{pD}/r_D^{2*})と実測揚水停止時間 t_p^*は以下の関係を有する。

$$S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{4t_p *}{\left(1/u_p\right)*} \quad \left(\text{あるいは} S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{t_p *}{\left(t_{pD}/r_D^2\right)*}\right) \qquad (2.3.22.3)$$

式(2.3.22.2,3)の S_S は本来一致するものであるから、両者の比較から整理の精度を検討する。

②曲線一致法２

先述の曲線一致法１では揚水開始後の時間に対する水位低下量の標準曲線を利用したが、ここでは揚水停止後の経過時間$(1/u-1/u_p)$ あるいは$(t_D-t_{pD})/r_D^2$ に対する水位低下量の標準曲線を用いる。

手順[1] 標準曲線として無次元水位低下量－無次元揚水停止後時間の関係を得る。

手順[2] 観測水位低下量データと観測揚水停止後時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元水位低下量を、横軸に実測揚水停止後時間および無次元揚水停止後時間をそれぞれ同じスケールの対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ互いに平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、揚水停止時間 $1/u_p$ (あるいは t_{pD}/r_D^2)毎の標準曲線から最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5] このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 s_D*、無次元時間$(1/u-1/u_p)$* あるいは、$(t_D-t_{pD})/r_D^{2*}$

実測水位低下量 s *、実測時間$(t-t_p)$*

$$T = K_r b = \frac{Q}{4\pi}\frac{s_D{}^*}{s^*} \tag{2.3.23.1}$$

$$S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{4(t-t_p)^*}{(1/u-1/u_p)^*} \quad \left(あるいは S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{(t-t_p)^*}{\left[(t_D-t_{pD})/r_D{}^2\right]^*} \right) \tag{2.3.23.2}$$

最良マッチング曲線値 $1/u_p{}^*$(あるいは $t_{pD}/r_D{}^{2*}$)と実測揚水停止時間 $t_p{}^*$は以下の関係を有する。

$$S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{4t_p{}^*}{(1/u_p)^*} \quad \left(あるいは S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{t_p{}^*}{(t_{pD}/r_D{}^2)^*} \right) \tag{2.3.23.3}$$

式(3.3.232,3)の S_S は本来一致するものであるから、両者の比較から整理の精度を検討する。

③直線勾配法１[2),12)]（従来から一般によく用いられている手法）

片対数軸上$\left(s-\log\left\{\frac{t}{t-t_p}\right\}\right)$では直線になる区間があり、この部分の傾きを用いて$T$=$Krb$ を評価する。

$$T = K_r b = \frac{2.3Q_0}{4\pi m} \tag{2.3.24}$$

ここで、mは直線の傾き＝$\left(s \Big/ \log\left\{\frac{t}{t-t_p}\right\}\right)$である。

この手法では、Ss は算定できない。

④直線勾配法 2 [2),4)]

（西垣・高坂により比貯留係数 S_S を同定できるように直線勾配法 1 を改良した手法）

片対数軸上 $\left(\left(s_p - s\right) - \log\left\{\frac{t_p\left(t - t_p\right)}{t}\right\}\right)$ では直線になる区間があり、この部分の傾きを用いて T を評価する。

$$T = K_r b = \frac{2.3Q_0}{4\pi m} \qquad (2.3.25)$$

ここで、m は直線の傾き $= \left(\left(s_p - s\right) \middle/ \log\left\{\frac{t_p\left(t - t_p\right)}{t}\right\}\right)$ である。

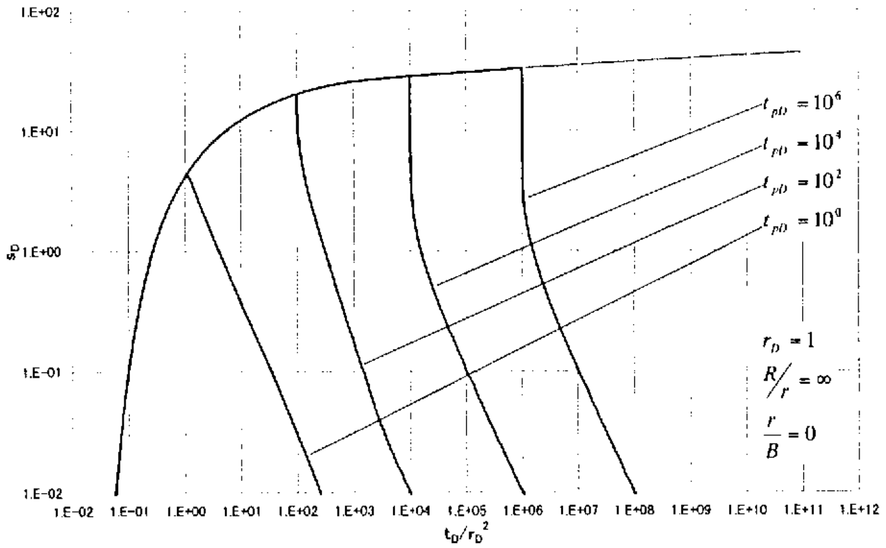
全層ストレーナー井戸では貯留係数 S=Ssb を評価することができるが、部分インターバル長の影響を受けると定量揚水時の直線勾配法の場合と同様の理由で貯留係数を評価することができない。

このように、③および④では透水係数しか評価できないが、前項 2.3.3 で示したように、直線勾配法から得られる透水係数の情報をマッチング法に与えることでマッチング精度を向上させることができる。

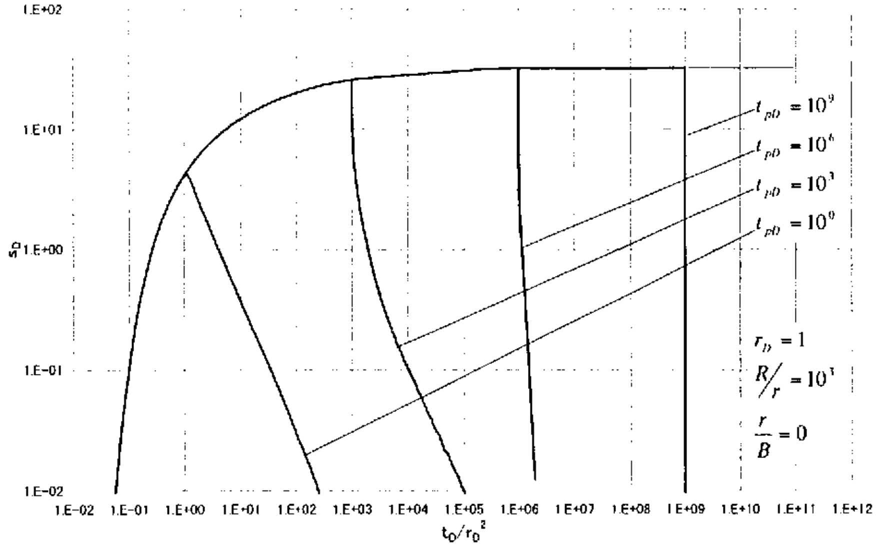
(2)標準曲線の特性

ここでは、図-2.3.17 から図-2.3.20 を示す。図-2.3.17 は s_D-t_D の両対数軸、図-2.3.18 は s_D-(t_D-t_{pD})の両対数軸、図-2.3.19 は直線勾配法 1 に対応した片対数軸、図-2.3.20 直線勾配法 2 に対応した片対数軸上のプロットをそれぞれ示す。

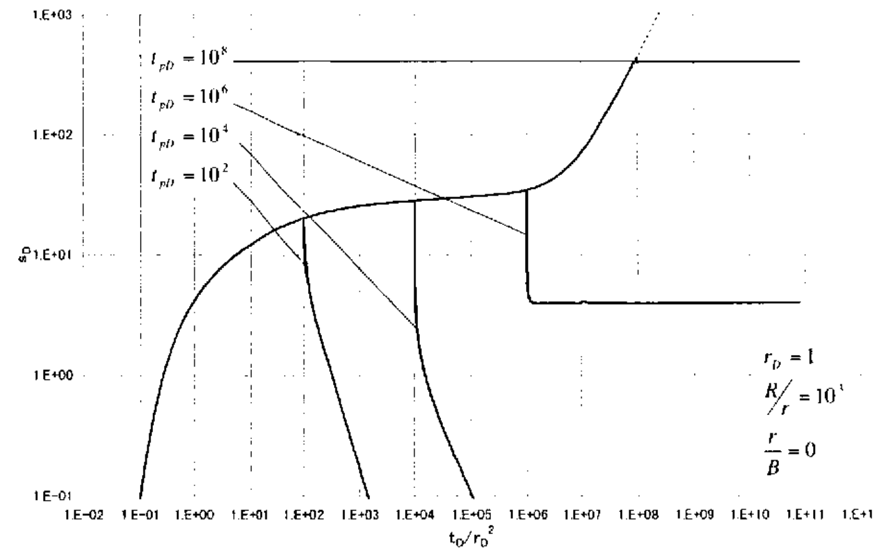
- 両対数軸の整理では全層ストレーナ井戸での試験と大きな差違は見られない。
- 直線勾配法 1 による整理では、十分な揚水時間経過後の回復挙動であれば、回復完了近傍のデータ群には直線性が認められ、この傾きから T=Krb を評価することができる。
- 漏水のある場合には同じく直線性は認められるが、s_D=0 軸への切片値が t_D/(t_D-t_{pD})=1 を通過しないことは、全層ストレーナ井戸での状況と同様である。
- 直線勾配法 2 では、回復途中に直線性を示し、この傾きから T=Krb を評価することができる。しかしながら、この手法では s_{rD}(=s_{pD}-s_D)=0 軸との切片から計算される Ss の評価を行うことはできない。これは部分インターバル長の影響であり、揚水時の直線勾配法の適用に難があるのと同様である。



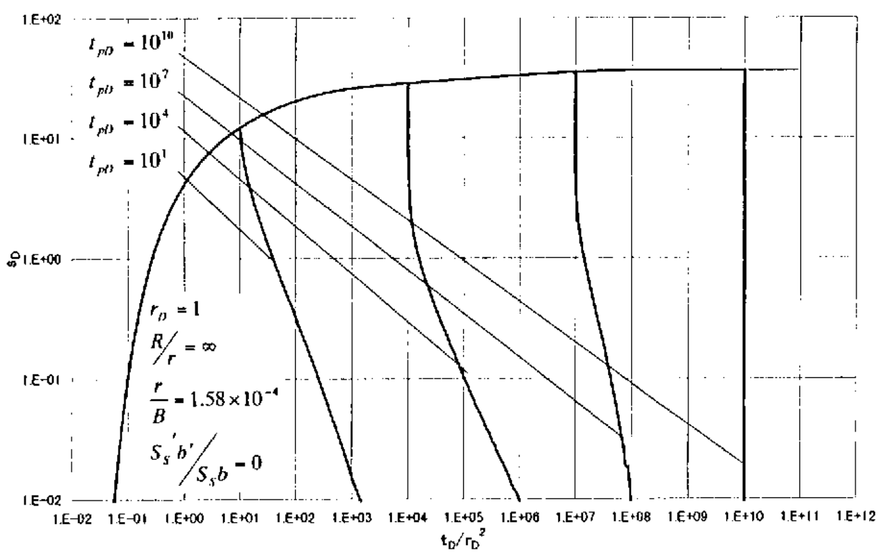
a.無限遠方境界



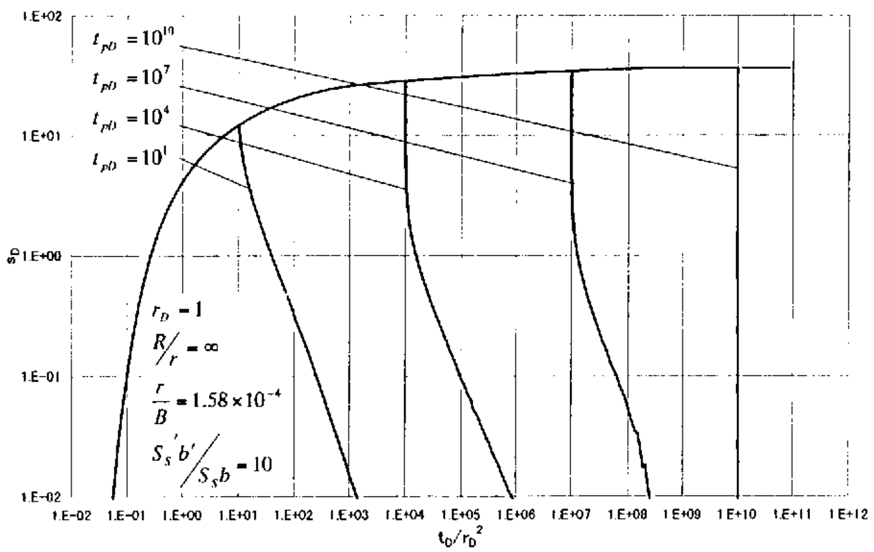
b.有限遠方定水位境界



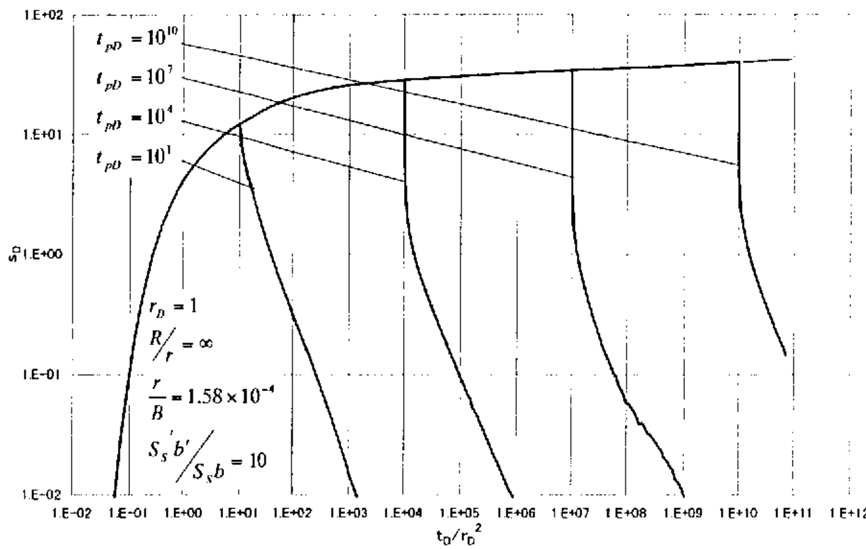
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



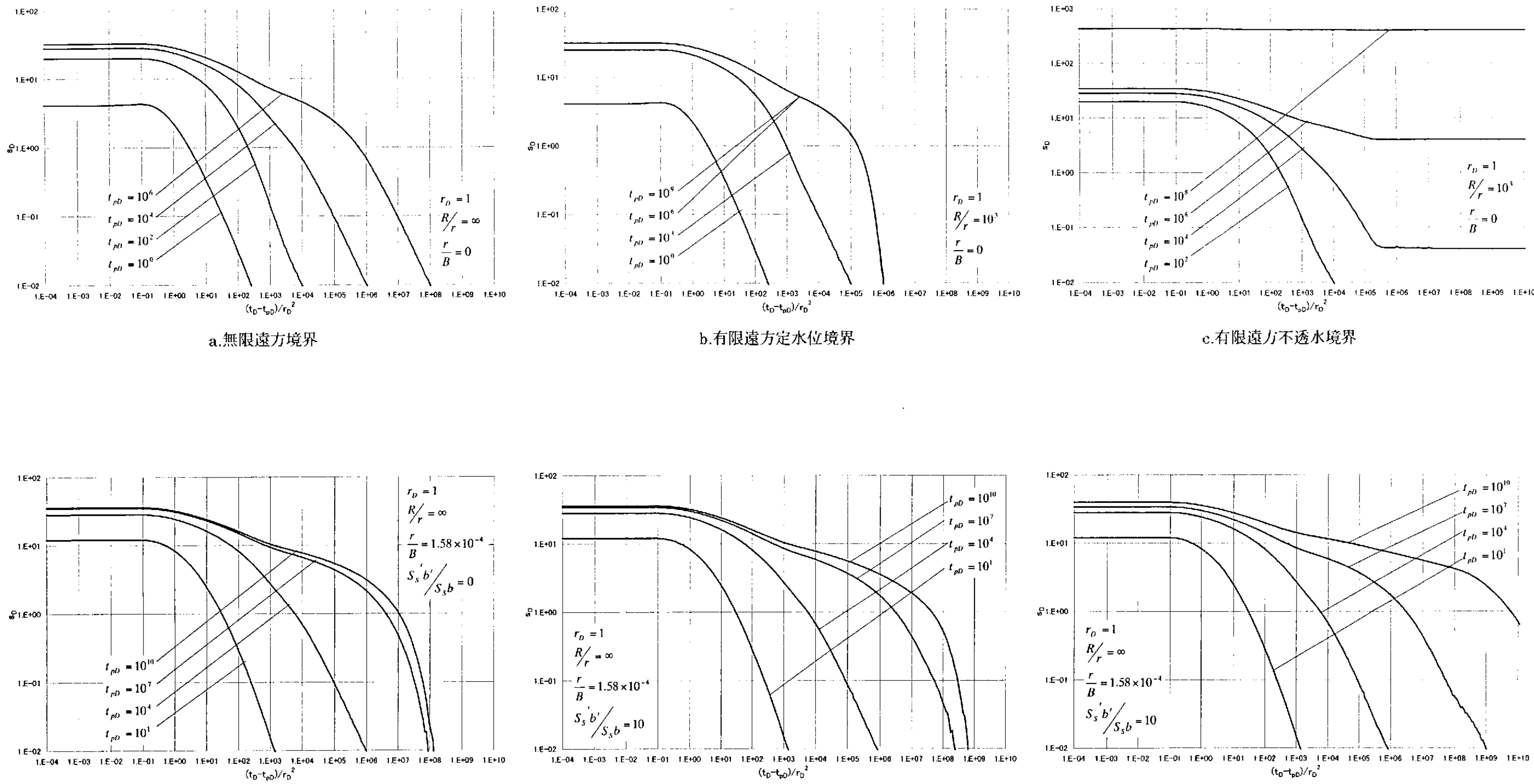
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q} s$　（式(2.2.9)参照）

横軸：$t_D / r_D{}^2 = \dfrac{K_r}{S_S}\dfrac{t}{r^2}$　（式(2.3.1)参照）

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

図-2.3.17　無限小径井戸による回復試験時の標準曲線（曲線一致法1・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



a.無限遠方境界　b.有限遠方定水位境界　c.有限遠方不透水境界

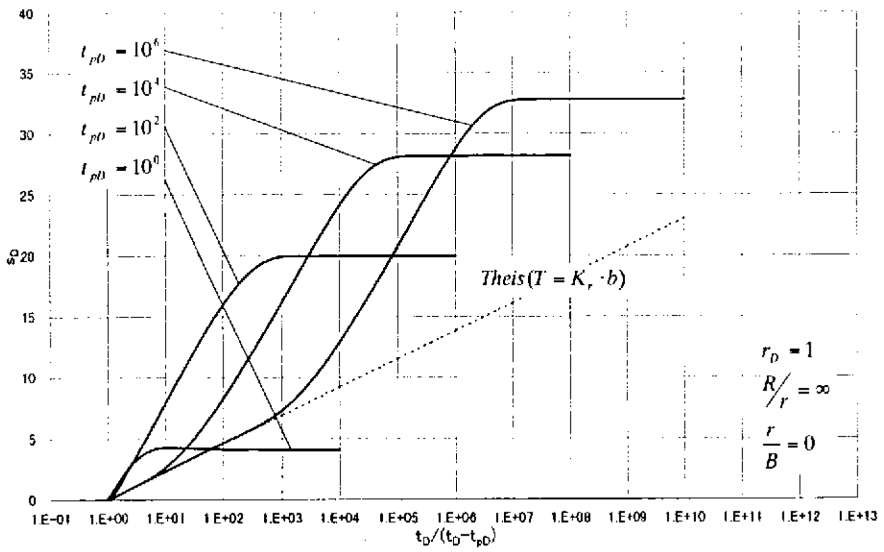
d.非貯留性漏水　e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）　f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q} s$ （式(2.2.9)参照）

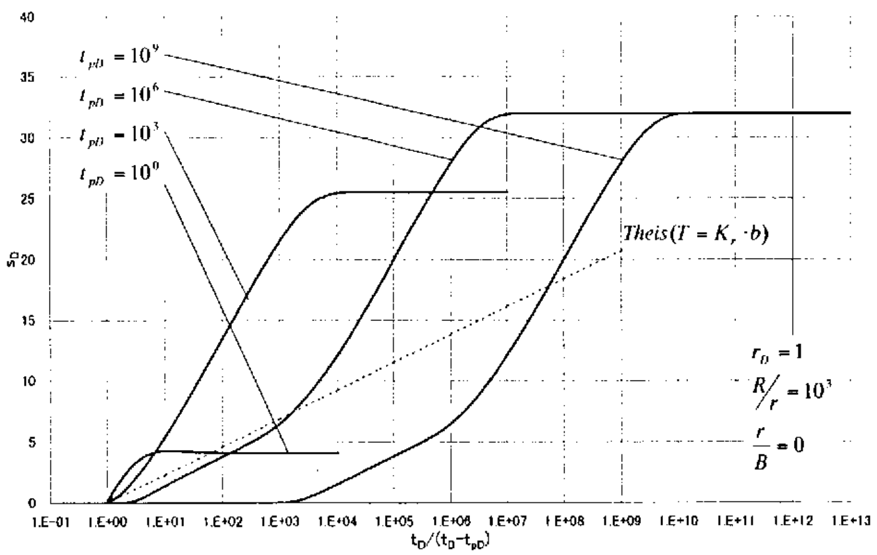
横軸：$(t_D - t_{pD}) / r_D^2 = \dfrac{K_r}{S_S} \dfrac{(t - t_p)}{r^2}$

$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

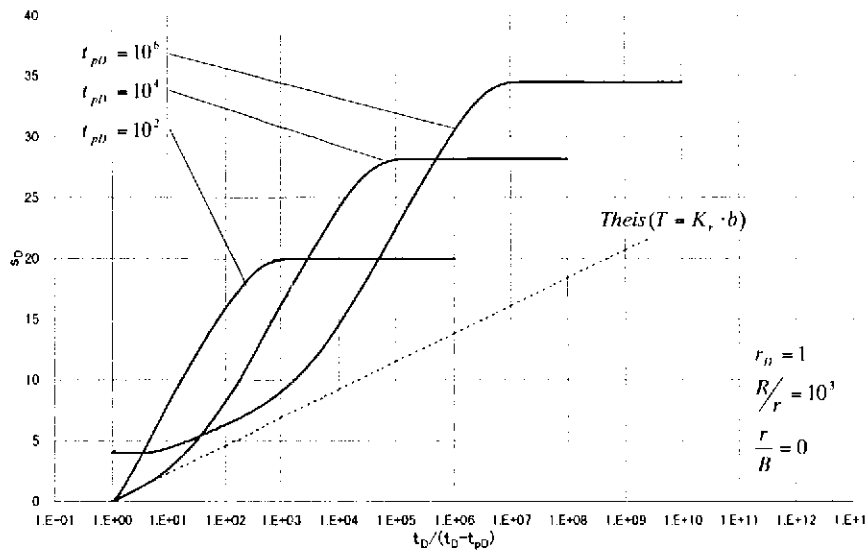
図-2.3.18　無限小径井戸による回復試験時の標準曲線（曲線一致法2・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



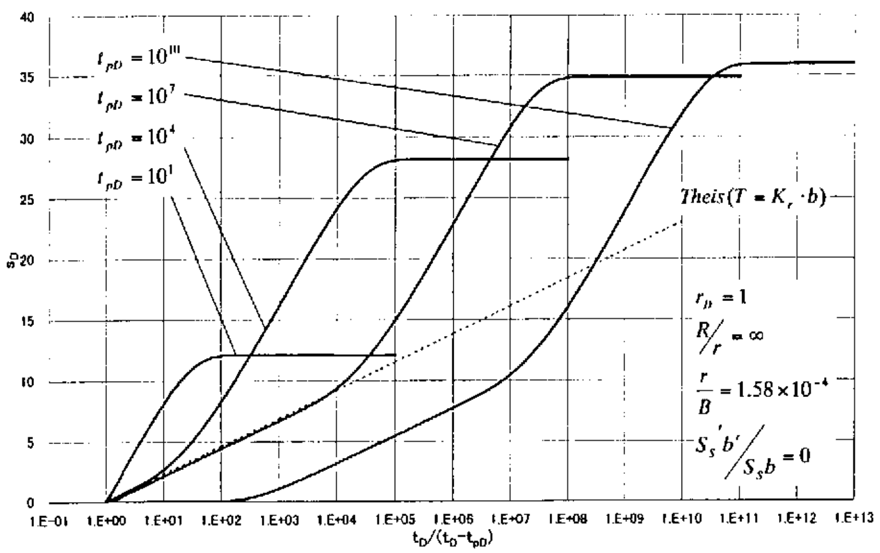
a.無限遠方境界



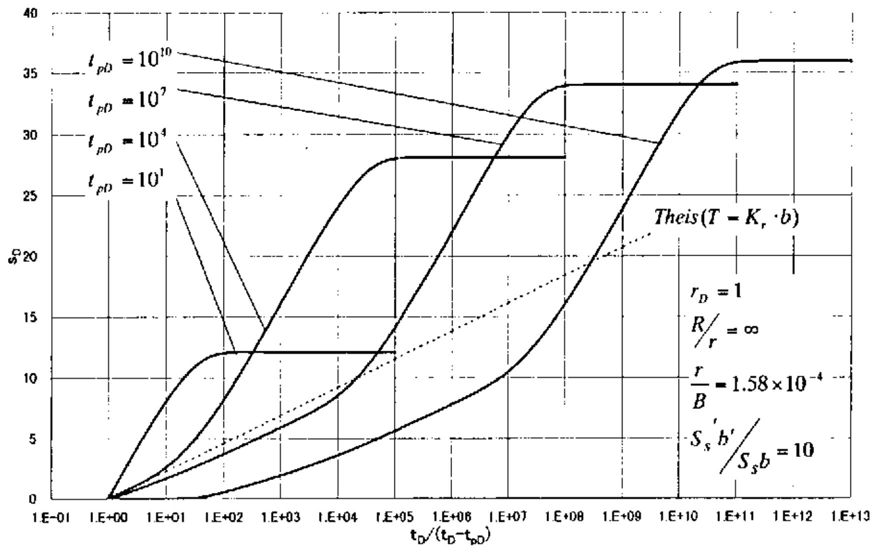
b.有限遠方定水位境界



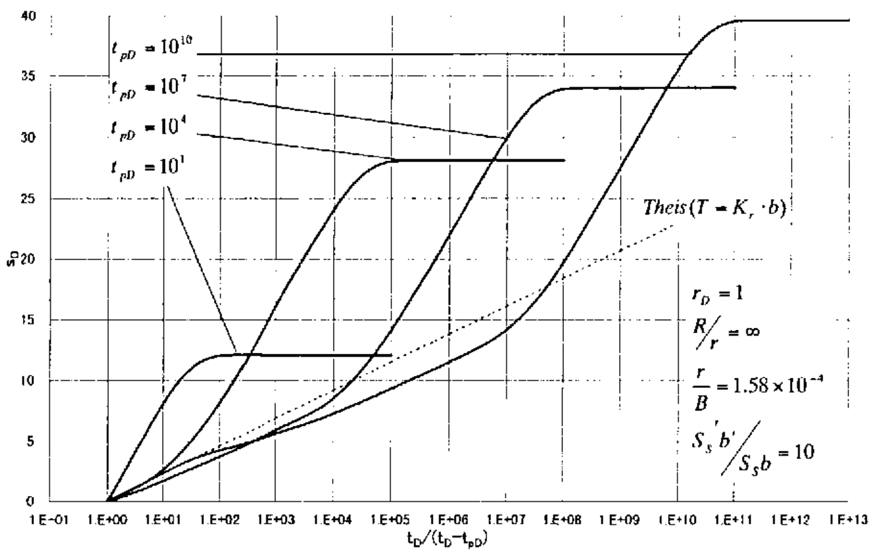
c.有限遠方不透水境界



d.比貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



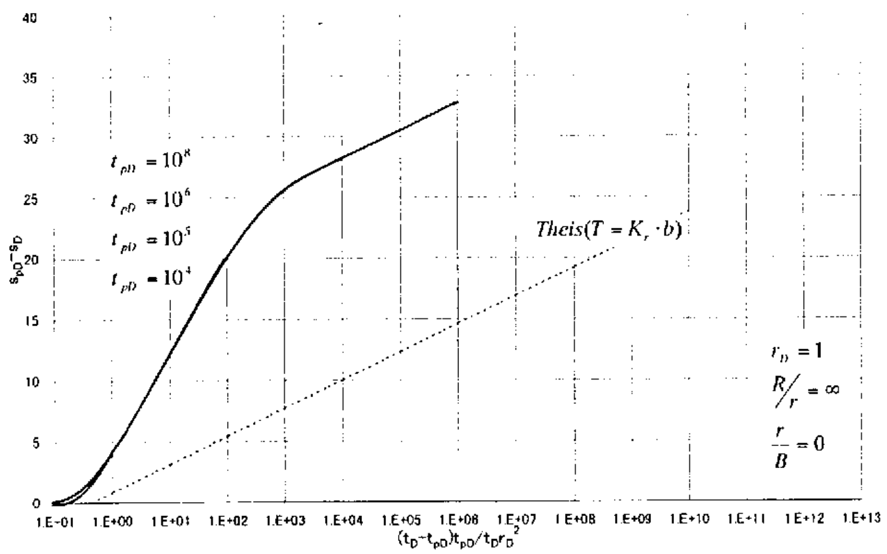
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$ （式(2.2.9)参照）

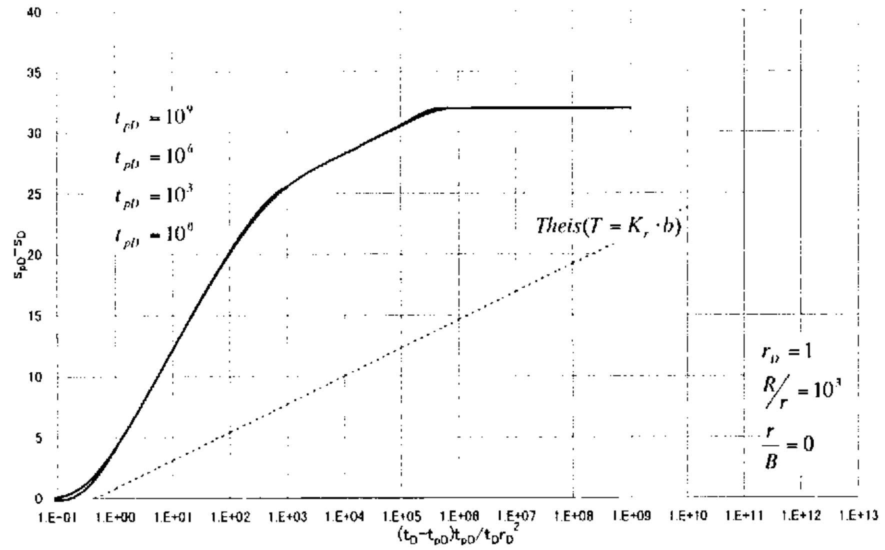
横軸：$t_D/(t_D-t_{pD}) = t/(t-t_p)$

$l/b=0.25$ ・ $d/b=0.375$

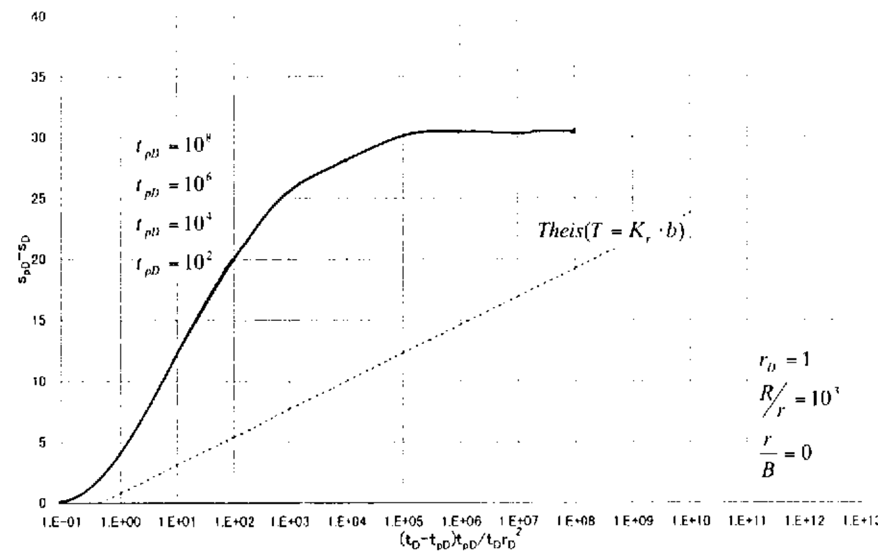
図-2.3.19　無限小径井戸による回復試験時の標準曲線（直線勾配法1・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



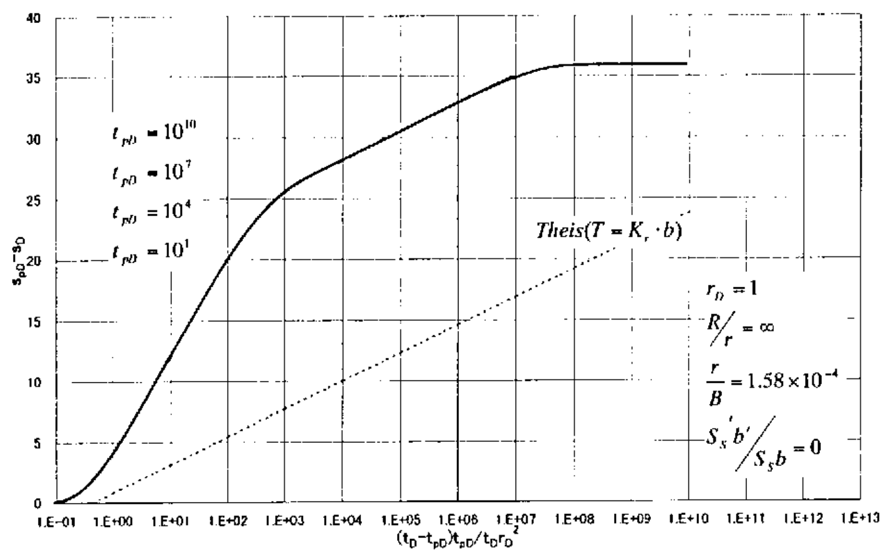
a.無限遠方境界



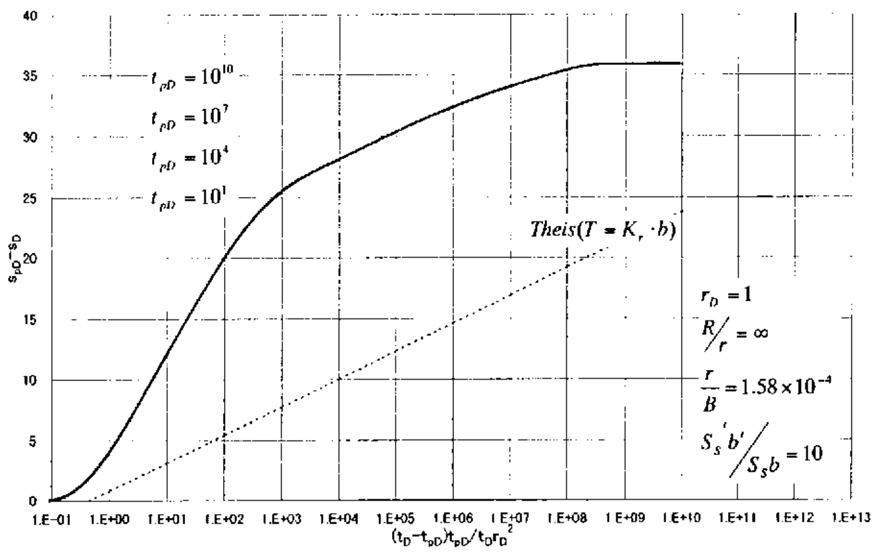
b.有限遠方定水位境界



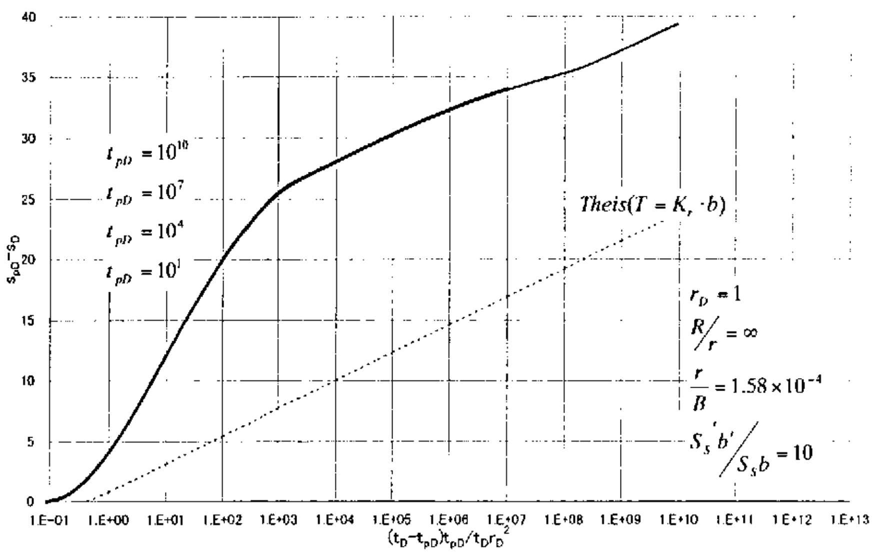
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D=\frac{4\pi K_r b}{Q}s$ （式(2.2.9)参照）

横軸：$(t_D-t_{pD})t_{pD}\Big/t_D r_D^2=\frac{K_r}{S_S}\frac{1}{r^2}\frac{(t-t_D)t_p}{t}$

$l/b=0.25$ ・ $d/b=0.375$

図-2.3.20　無限小径井戸による回復試験時の標準曲線（直線勾配法２・水位低下量を帯水層厚ｂで無次元化）

２．３．５ 回復試験：有限井戸半径の場合

回復試験は定流量揚水を継続した後、揚水を停止し(停止時間 t_p)、その後の水位回復挙動を観測するものである。

(1)整理手法

①曲線一致法１

我が国では回復試験法に対する曲線一致法は一般的ではないが、石油工学の分野ではRamey カーブとして知られる曲線とのマッチング手法が適用されている。この曲線は揚水挙動から回復挙動までを一連の揚水時間(t_D あるいは $1/u_W$)に対して整理したもので、後に示す整理手法の時間軸のように停止前後の経過時間を区別していない。

手順[1] 標準曲線として無次元水位低下量－無次元時間の関係を得る。

手順[2] 観測水位低下量データと観測時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元水位低下量を、横軸に実測時間および無次元時間をそれぞれ同じスケールの両対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ互いに平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、揚水停止時間 $1/u_{wp}$(あるいは t_{pD})毎の標準曲線から最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5] このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 s_D*、無次元時間 $1/u_W$*（あるいは、t_D*）

実測水位低下量 s *、実測時間 t*

$$T = K_r b = \frac{Q}{4\pi}\frac{s_D{}^*}{s^*} \qquad (2.3.26.1)$$

$$S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{4t^*}{(1/u_w)^*} \quad \left(\text{あるいは} S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{t^*}{(t_D)^*}\right) \qquad (2.3.26.2)$$

最良マッチング曲線値 $1/u_{wp}{}^*$(あるいは $t_{pD}{}^*$)と実測揚水停止時間 $t_p{}^*$は以下の関係を有する。

$$S_S = \frac{K_r}{r^2}\frac{4t_p{}^*}{(1/u_{wp})^*} \quad \left(\text{あるいは} S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{t_p{}^*}{(t_{pD})^*}\right) \qquad (2.3.26.3)$$

式(2.3.26.2,3)の Ss は本来一致するものであるから、両者の比較から整理の精度を検討する。

②曲線一致法２

先述の曲線一致法１では揚水開始後の時間に対する水位低下量の標準曲線を利用したが、ここでは揚水停止後の経過時間($1/u_W$-$1/u_{wp}$) あるいは(t_D-t_{pD})に対する水位低下量の標準曲線を用いる。

手順[1] 標準曲線として無次元水位低下量－無次元揚水停止後時間の関係を得る。

手順[2] 観測水位低下量データと観測揚水停止後時間を得る。

手順[3] (通常は)縦軸に観測値および無次元水位低下量を、横軸に実測揚水停止後時間および無次元揚水停止後時間をそれぞれ同じスケールの対数座標軸上にプロットし、実測データプロットと標準曲線プロットの２枚を用意する。

手順[4] ２枚のプロットを縦および横軸をそれぞれ互いに平行に保ちながら最適のマッチング状況を確保する。この時、揚水停止時間 $1/u_p$ (あるいは tp_D)毎の標準曲線から最も良く合う曲線を１つ選んでマッチングする。

手順[5]このようにして得られる両対数軸上の重なる１点の座標を以下のように評価する。

無次元水位低下量 s_D*、無次元時間$(1/u_W-1/u_{wp})^*$ あるいは、$(t_D-t_{pD})^*$

実測水位低下量 s *、実測時間$(t\text{-}t_p)^*$

$$T = K_r = \frac{Q}{4\pi}\frac{s_D{}^*}{s^*} \qquad (2.3.27.1)$$

$$S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{4(t-t_p)^*}{(1/u_w-1/u_{wp})^*} \quad \left(あるいは S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{(t-t_p)^*}{(t_D-t_{pD})^*}\right) \qquad (2.3.27.2)$$

最良マッチング曲線値 $1/u_{wp}{}^*$(あるいは $t_{pD}{}^*$)と実測揚水停止時間 $t_p{}^*$は以下の関係を有する。

$$S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{4t_p{}^*}{(1/u_{wp})^*} \quad \left(あるいは S_S = \frac{K_r}{r_w{}^2}\frac{t_p{}^*}{(t_{pD})^*}\right) \qquad (2.3.27.3)$$

式(2.3.27.2,3)の S_S は本来一致するものであるから、両者の比較から整理の精度を検討する。

③直線勾配法１

この手法は井戸貯留項が無視できない $C_W \neq 0$ のケースでは直線部分が明確に得ることが困難であるため適用し難い。この説明は第３章で触れているので参照されたい。

片対数軸上$\left(s-\log\left\{\frac{t}{t-t_p}\right\}\right)$では直線になる区間があり、この部分の傾きを用いて

$T=Krb$ を評価する。

$$T = K_r b = \frac{2.3Q_0}{4\pi m} \qquad (2.3.28)$$

ここで、mは直線の傾き＝$\left(s \Big/ \log\left\{\dfrac{t}{t-t_p}\right\}\right)$である。

④直線勾配法2

片対数軸上$\left(\left(s_p - s\right) - \log\left\{\dfrac{t_p\left(t-t_p\right)}{t}\right\}\right)$では直線になる区間があり、この部分の傾きを用いて$T$を評価する。

$$T = K_r = \frac{2.3Q_0}{4\pi m} \qquad (2.3.29)$$

ここで、mは直線の傾き＝$\left(\left(s_p - s\right) \Big/ \log\left\{\dfrac{t_p\left(t-t_p\right)}{t}\right\}\right)$である。

全層ストレーナー井戸では貯留係数 S=Ssb を評価することができるが、部分インターバル長の影響を受けると定量揚水時の Jacob-Cooper 法の場合と同様の理由で貯留係数を評価することができない。

⑤組み合わせ

上記のように、直線勾配技法では透水係数の評価までが適用の限界と考えられる。しかしながら、先んじて透水量係数を評価し、この情報を曲線一致法に導入することでマッチング精度の向上が期待できる。

(2)標準曲線の特性

ここでは、図-2.3.21～図-2.3.28 および図-2.3.29 を示す。

無限小井戸径の場合と同様に、回復時間が長くなると計算精度に由来すると考えられる誤差により若干ではあるが標準曲線に振動がみられるが、傾向は表現できている。

①井戸貯留項が無視できる場合：図 2.3.21～図-2.3.24

- 両対数軸の整理では全層ストレーナ井戸での試験と大きな差違は見られない。
- 直線勾配法 1 による整理では、十分な揚水時間経過後の回復挙動であれば、回復完了近傍のデータ群には直線性が認められ、この傾きから T=Krb を評価することができる。
- 漏水のある場合には同じく直線性は認められるが、s_p=0 軸への切片値が $t_D/(t_D-t_{pD})=1$ を通過しないことは、全層ストレーナ井戸での状況と同様である。
- 直線勾配法 2 では、回復途中に直線性を示し、この傾きから T=Krb を評価することができる。しかしながら、この手法では $s_r(=(s_p-s_D))=0$ 軸との切片から計算される Ss の評価を行うことはできない。これは部分インターバル長の影響であり、揚水時の Jacob-Cooper 法の適用に難があるのと同様である。

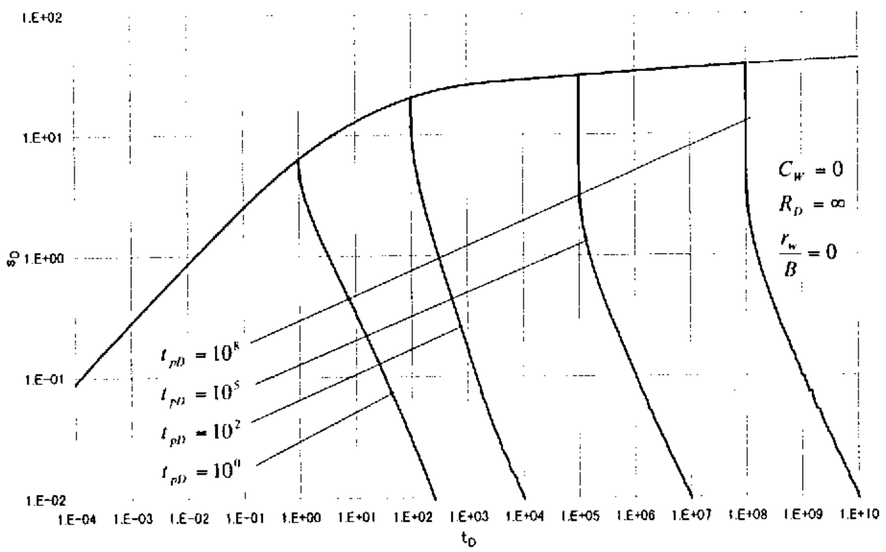
②井戸貯留項の影響がある場合：図 2.3.25～図-2.3.28 および図-2.3.29

・両対数軸の整理では全層ストレーナ井戸での試験と大きな差違は見られない。

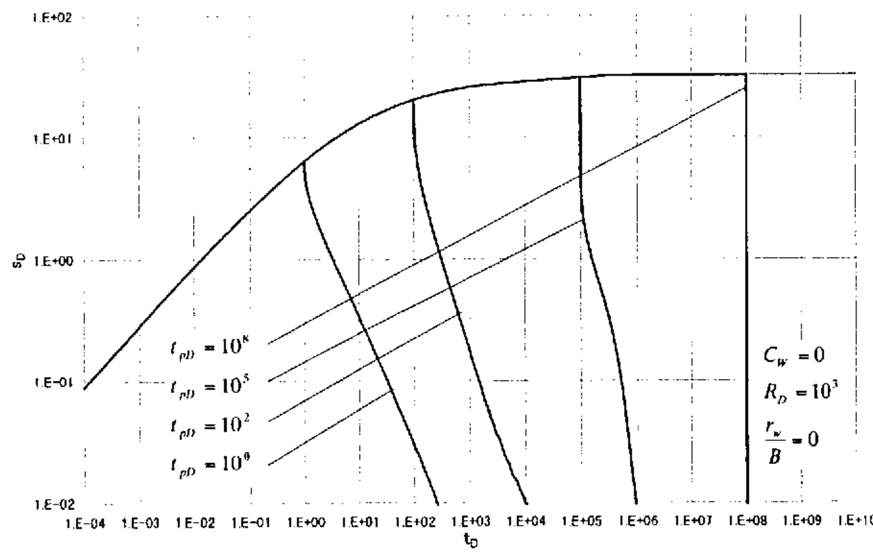
・直線勾配法 1 による整理では、十分な揚水時間経過後の回復挙動であっても、回復完了近傍のデータ群に直線性が認められない場合があり、透水係数の評価が行えない。

・直線勾配法 2 では、回復途中に直線性を示し、この傾きから T=Krb を評価することができる。しかしながら、この手法では $s_r(=(s_p\text{-}s))=0$ 軸との切片から計算される Ss の評価を行うことはできない。これは部分インターバル長の影響であり、揚水時の Jacob-Cooper 法の適用に難があるのと同様である。

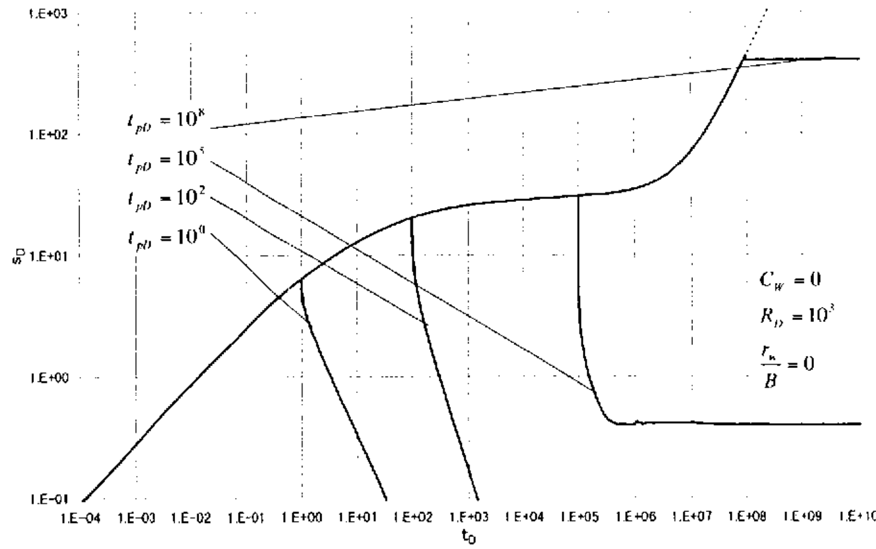
・また、井戸貯留のあるこれらの整理の中で、図-2.3.28 はＳ字カーブ状の挙動を示すが、透水量係数を示す直線部分が明瞭に現われず、逆にＳ字カーブ中ほどの部分の方が直線性が優位であるかの印象を受ける。この要因を確認するために、いくつかの井戸貯留項および無限小径井戸による回復試験を、無限遠方非漏水モデルの $t_{pD}=10^8$ で停止した挙動を直線勾配法 2 で整理した。図 2.3.29 にこれを示したが、これよりＳ字カーブ中ほどでみられる直線部は井戸貯留の影響を大きく受けている部分であることが分かる。



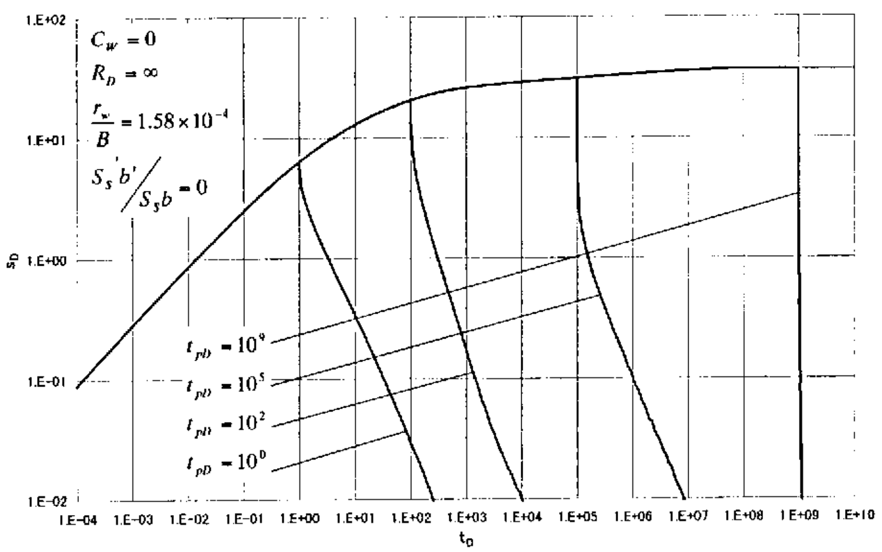
a.無限遠方境界



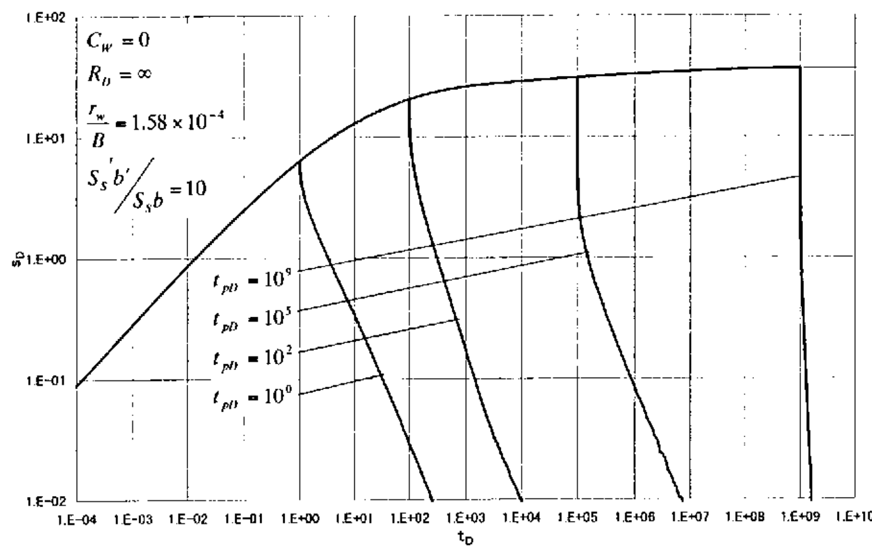
b.有限遠方定水位境界



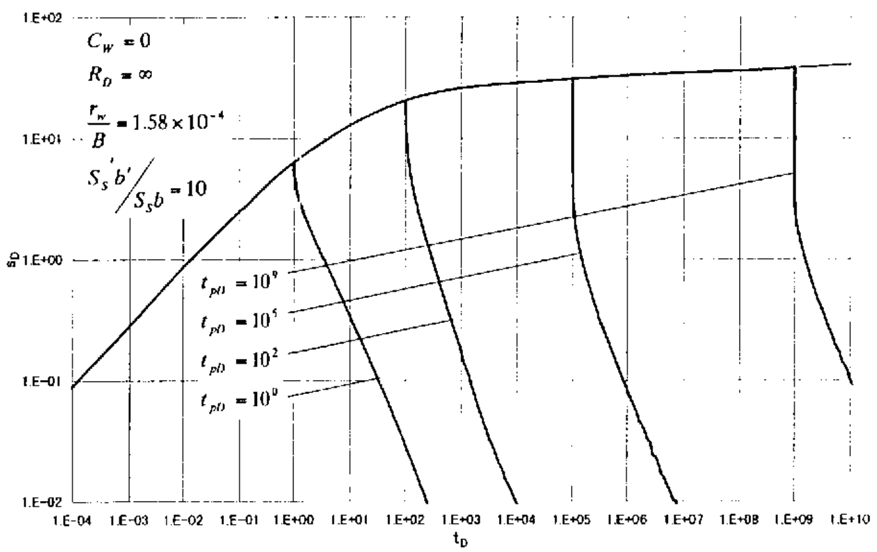
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



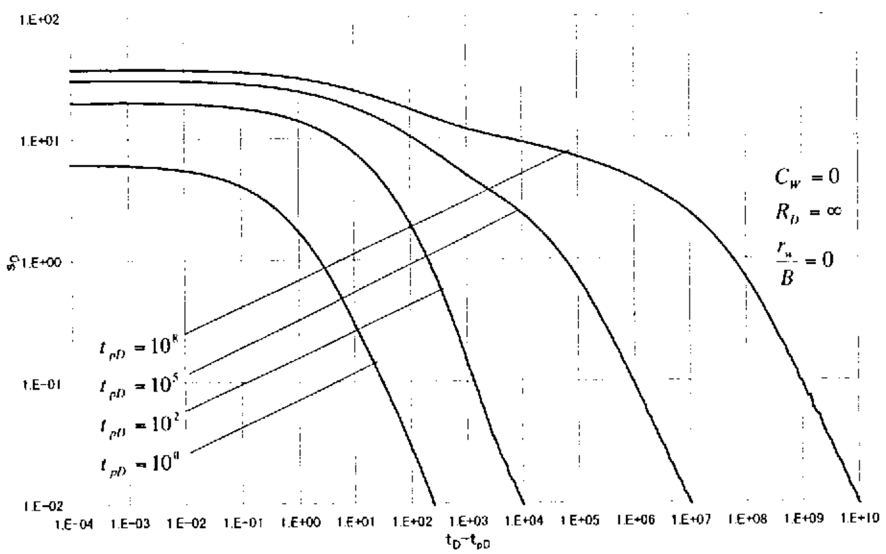
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q}s$（式(2. 2. 9)参照）

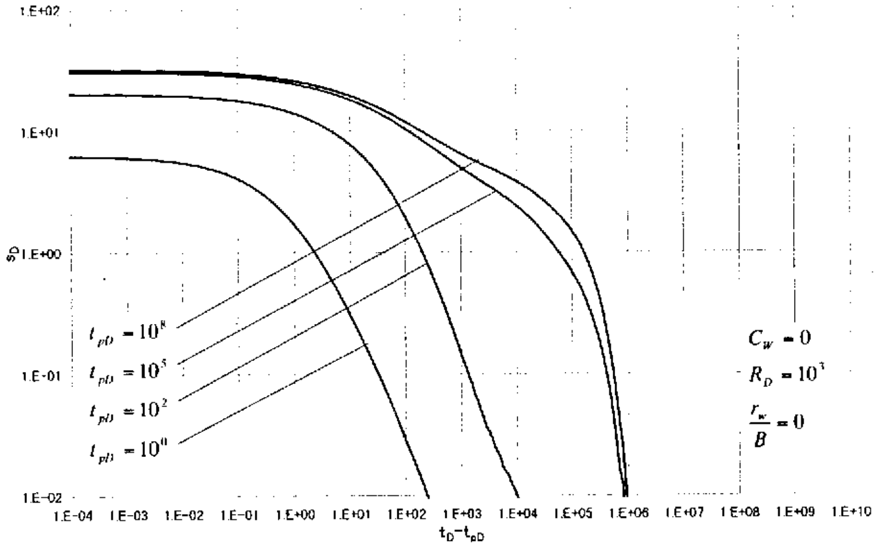
横軸：$t_D = \frac{K_r}{S_s}\frac{t}{r_W{}^2}$（式(2. 2. 9)参照）

$l/b = 0.25 \quad d/b = 0.375$

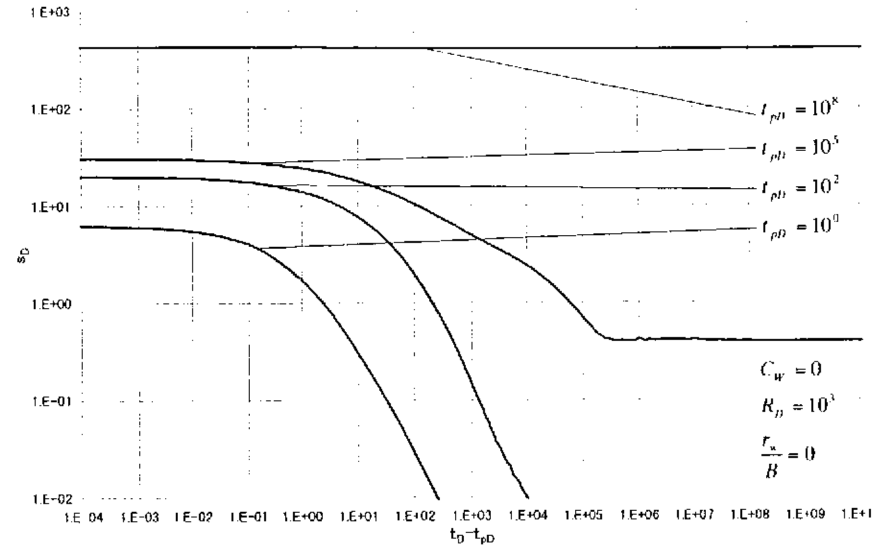
図-2. 3. 21　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留無し）の標準曲線（曲線一致法 1・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）



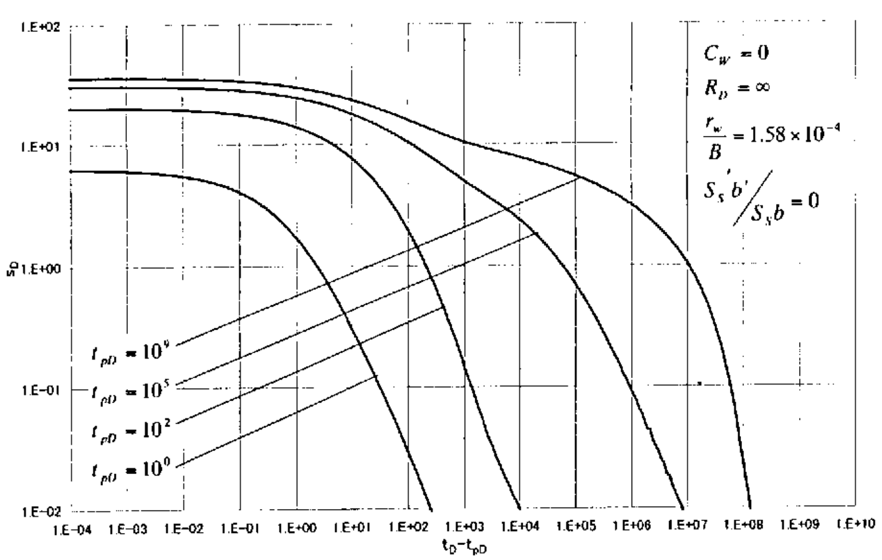
a.無限遠方境界



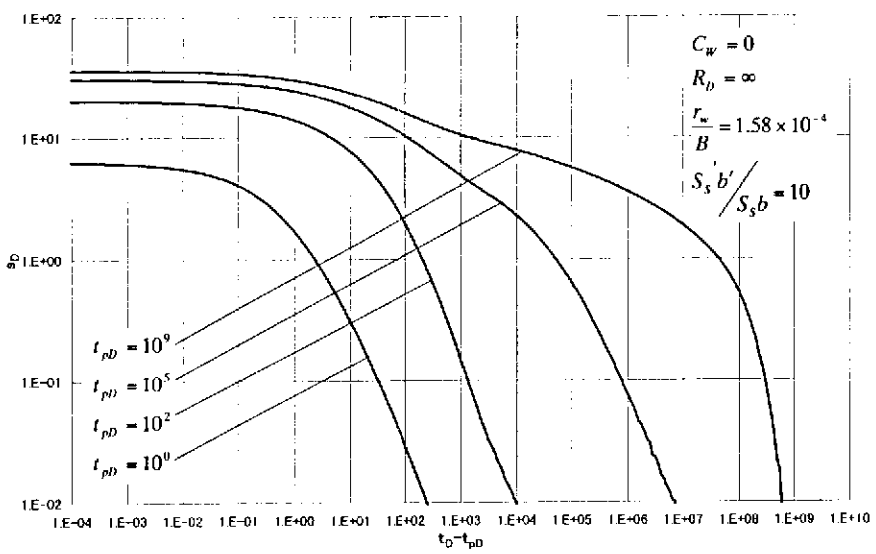
b.有限遠方定水位境界



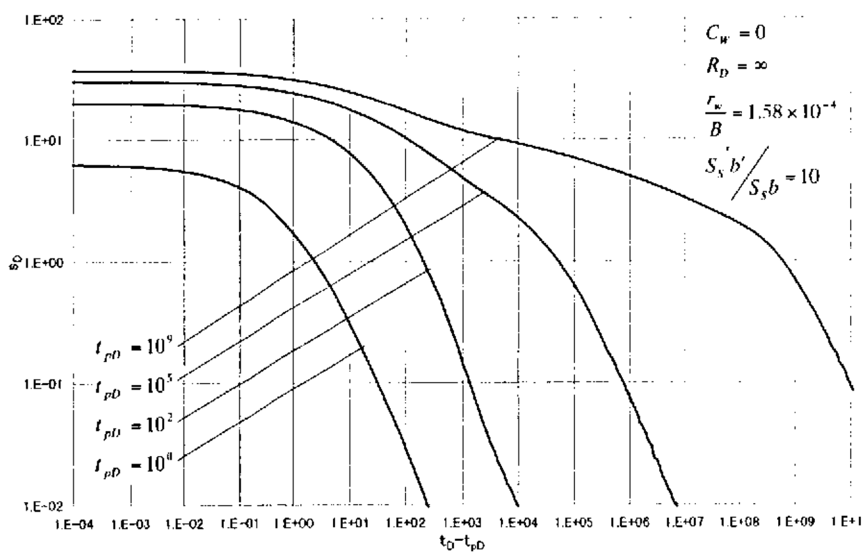
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



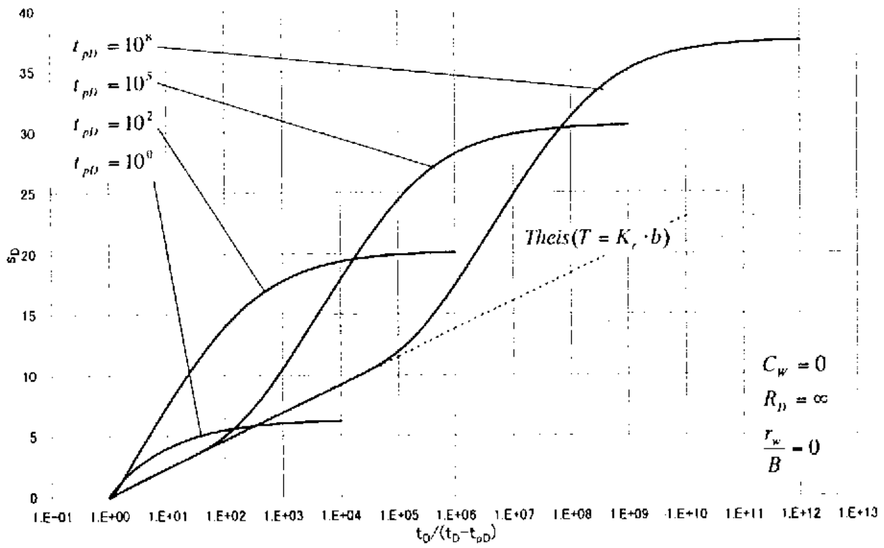
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q} s$ （式(2.2.9)参照）

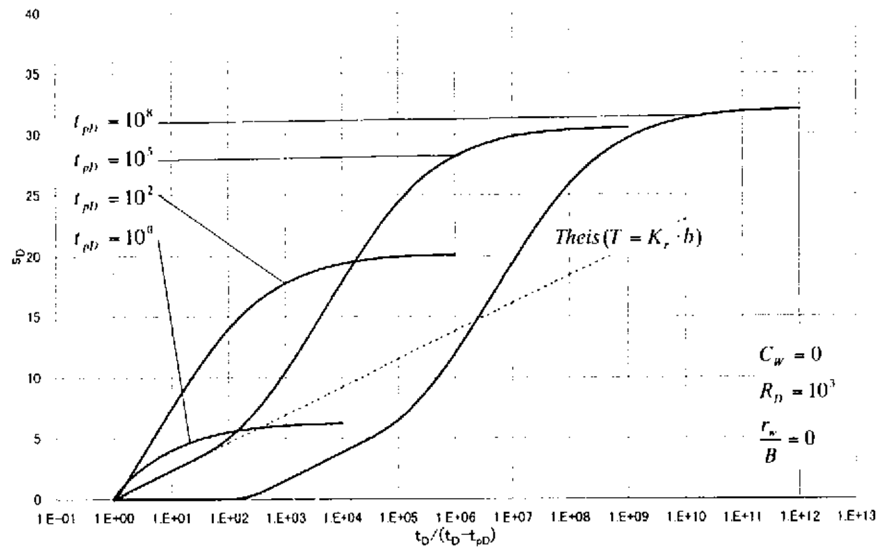
横軸：$(t_D - t_{pD}) = \frac{K_r}{S_S} \frac{(t - t_p)}{r_W{}^2}$

$l/b = 0.25 \quad d/b = 0.375$

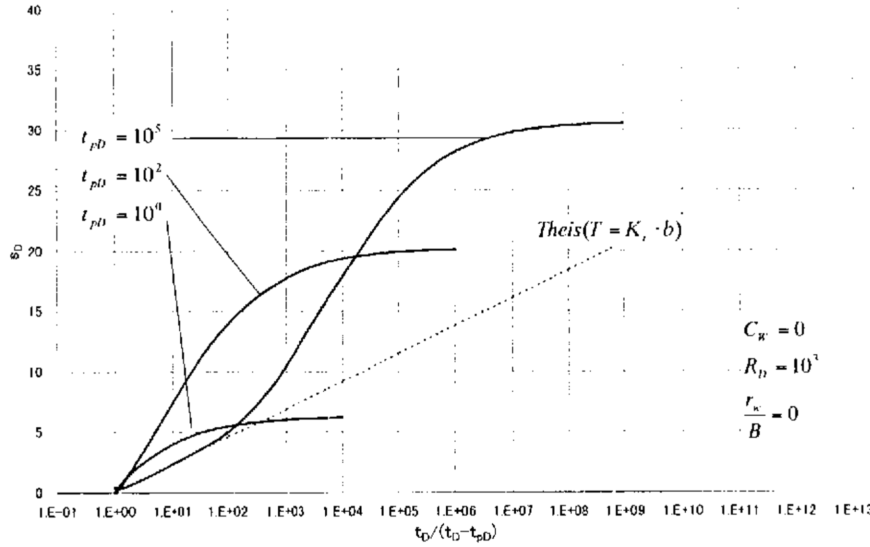
図-2.3.22　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留無し）の標準曲線（曲線一致法2・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



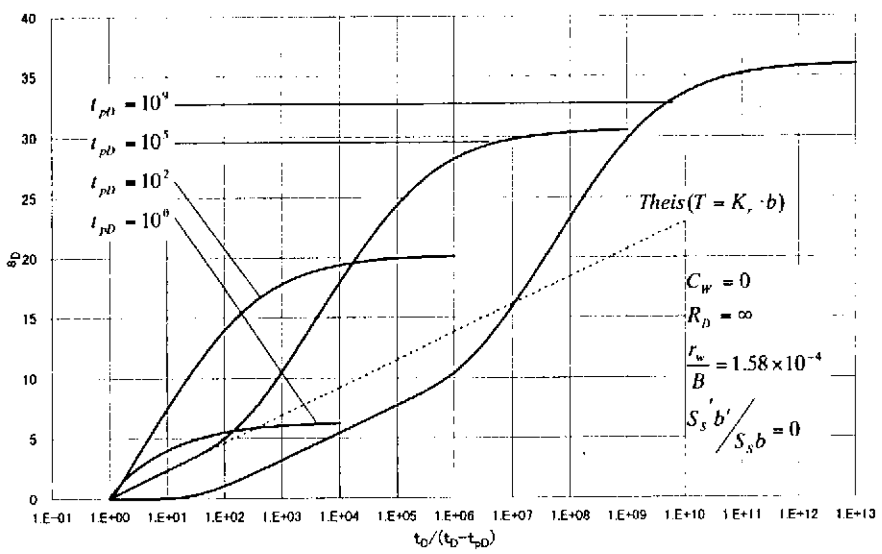
a.無限遠方境界



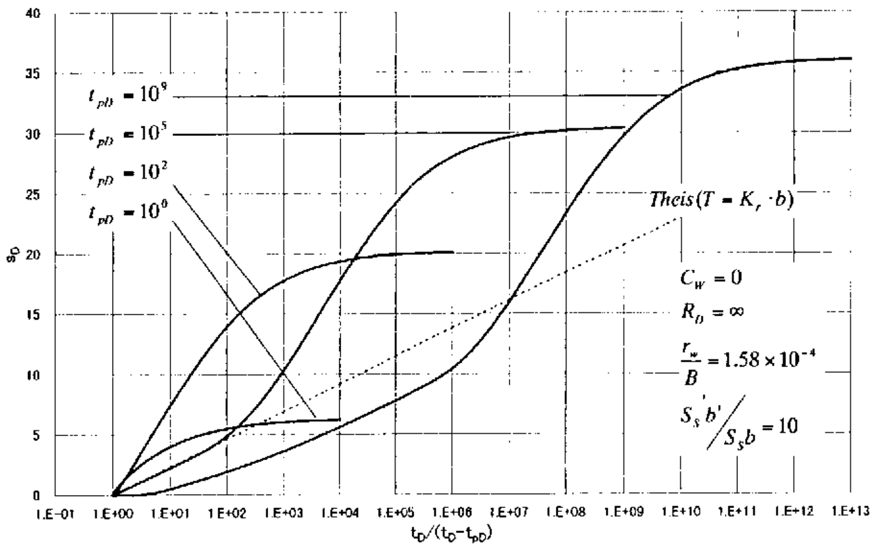
b.有限遠方定水位境界



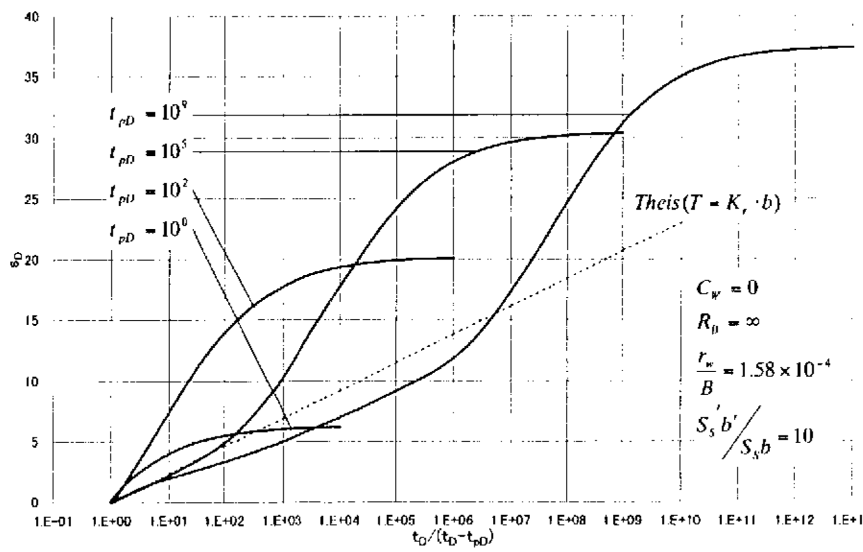
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



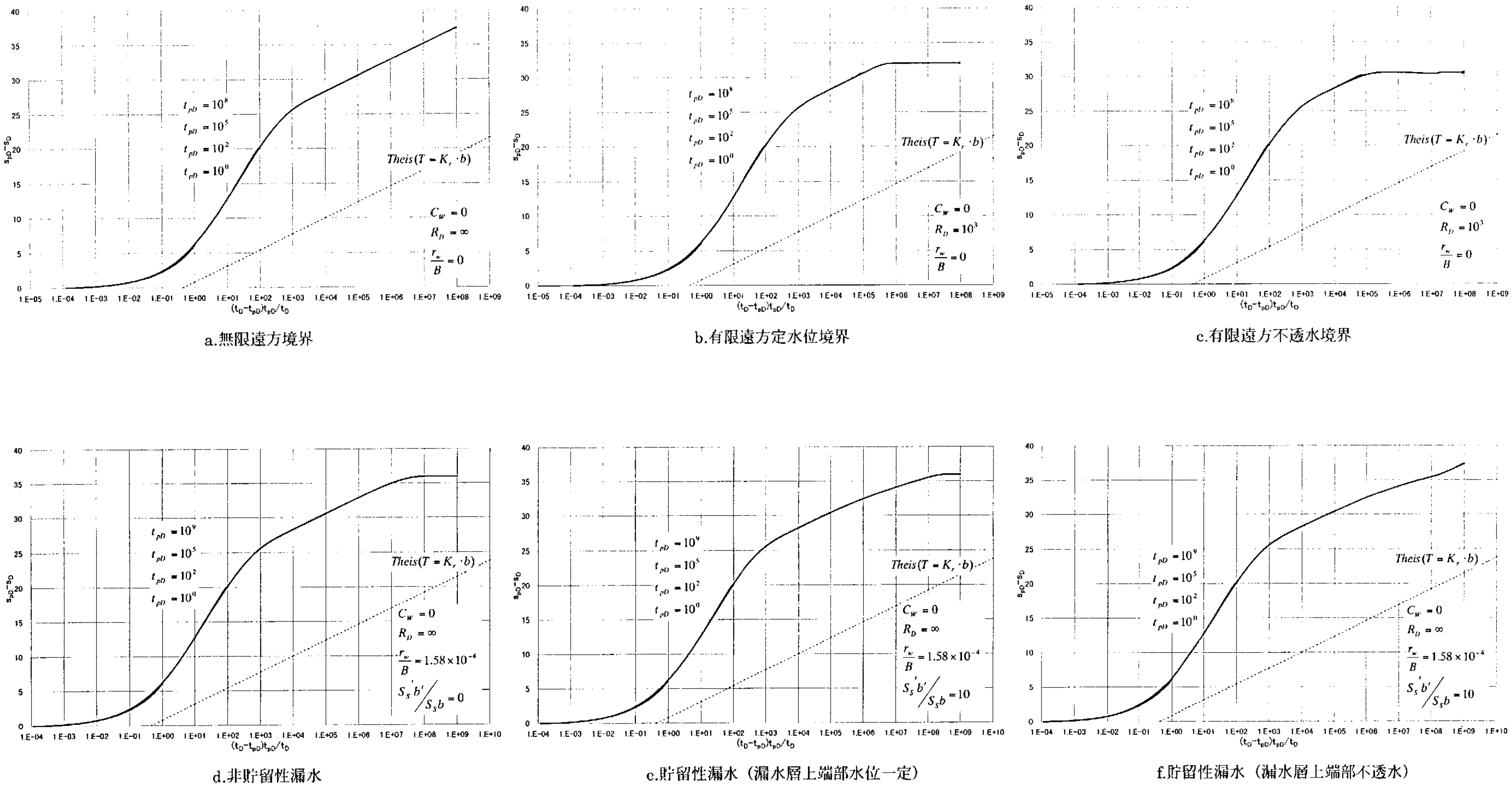
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$ （式(2.2.9)参照）

横軸：$t_D/(t_D-t_{pD})=t/(t-t_p)$

$l/b=0.25\quad d/b=0.375$

図-2.3.23　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留無し）の標準曲線（直線勾配法1・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）

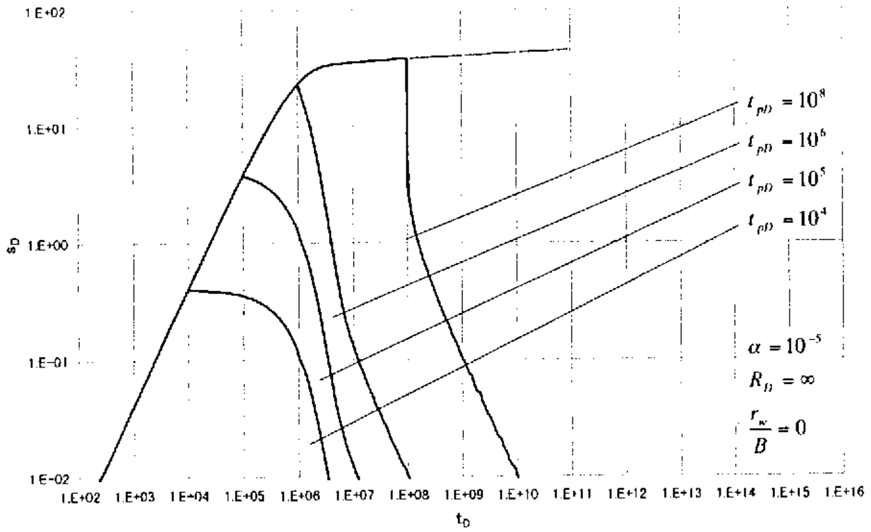


＊）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$（式(2.2.9)参照）

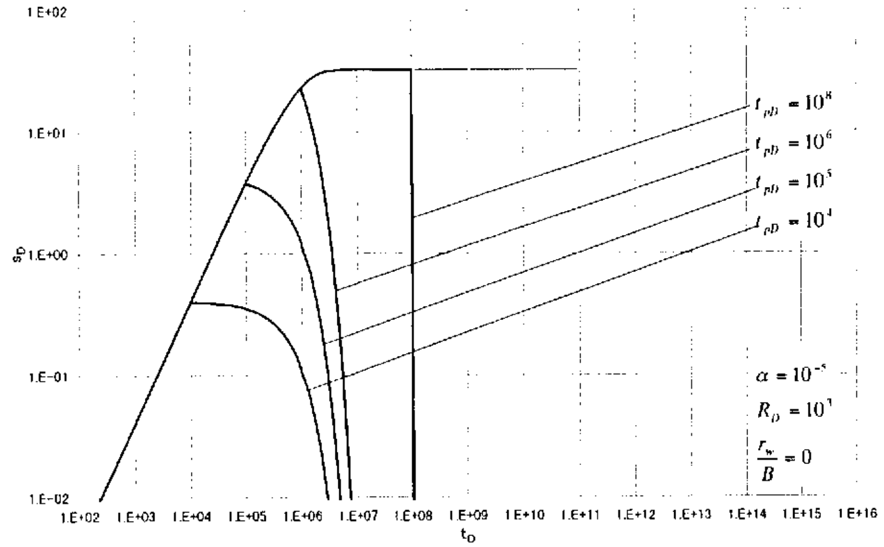
横軸：$(t_D-t_{pD})t_{pD}/t_D=\dfrac{K_r}{S_S}\dfrac{1}{r_W{}^2}\dfrac{(t-t_D)t_p}{t}$

$l/b=0.25\quad d/b=0.375$

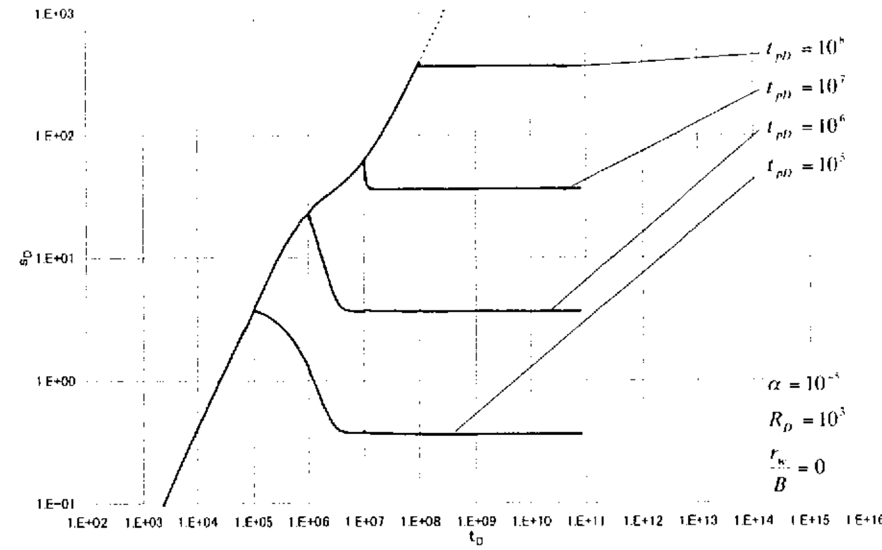
図-2.3.24　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留無し）の標準曲線（直線勾配法2・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



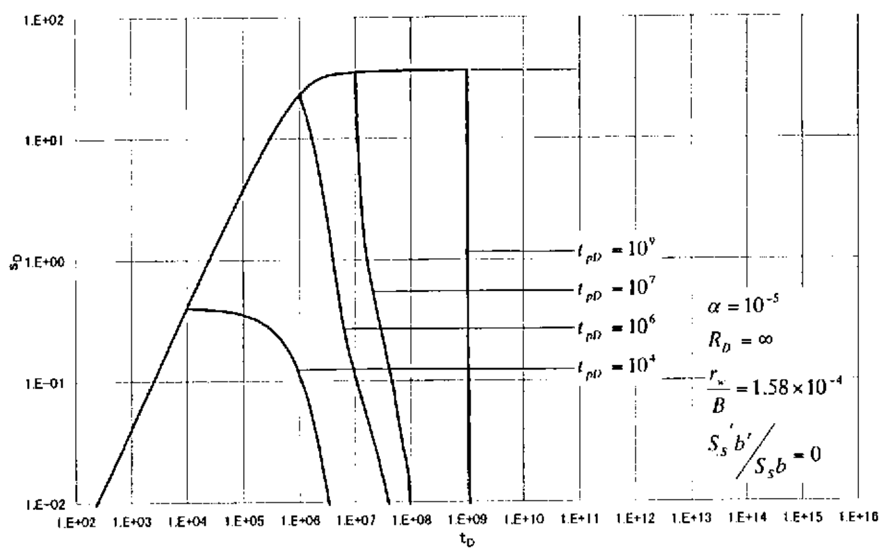
a.無限遠方境界



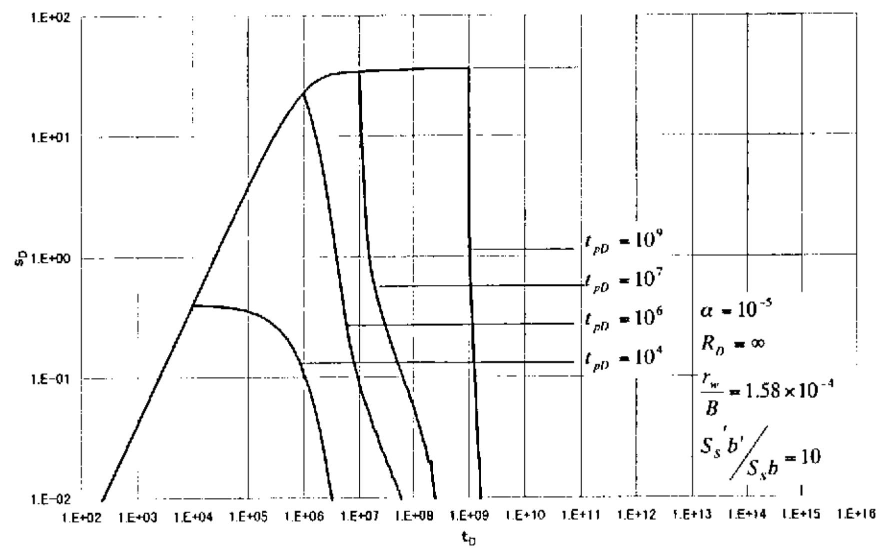
b.有限遠方定水位境界



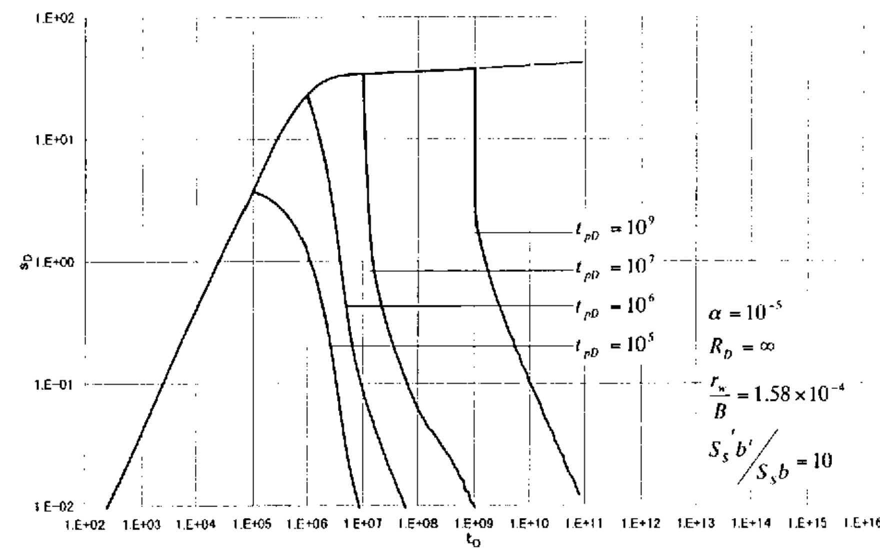
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



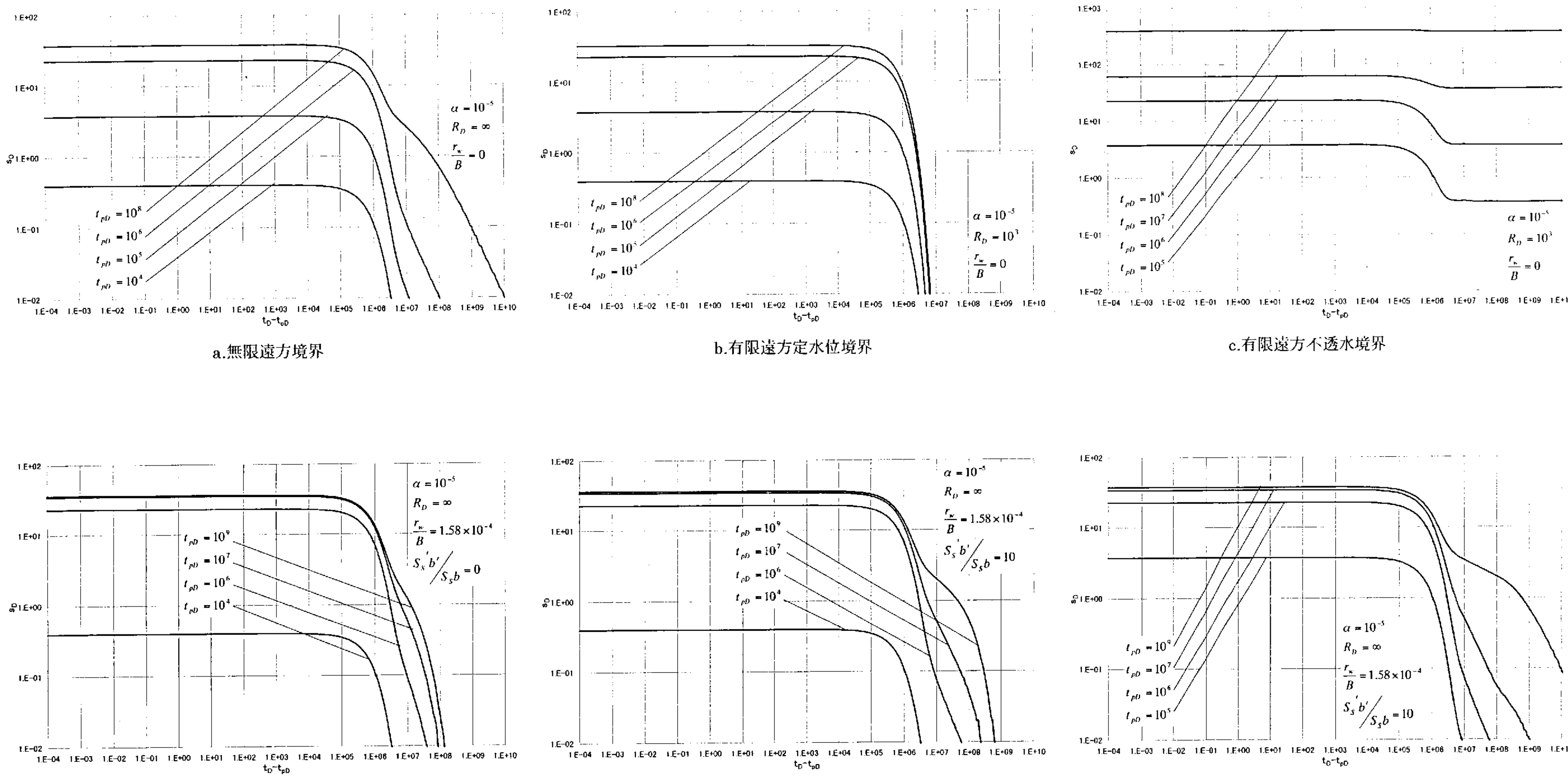
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$ （式(2.2.9)参照）

横軸：$t_D=\dfrac{K_r}{S_S}\dfrac{t}{r_w{}^2}$ （式(2.2.9)参照）

$l/b=0.25$ $d/b=0.375$

図-2.3.25 有限径井戸による回復試験時（井戸貯留有り）の標準曲線（曲線一致法1・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



a.無限遠方境界

b.有限遠方定水位境界

c.有限遠方不透水境界

d.非貯留性漏水

e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）

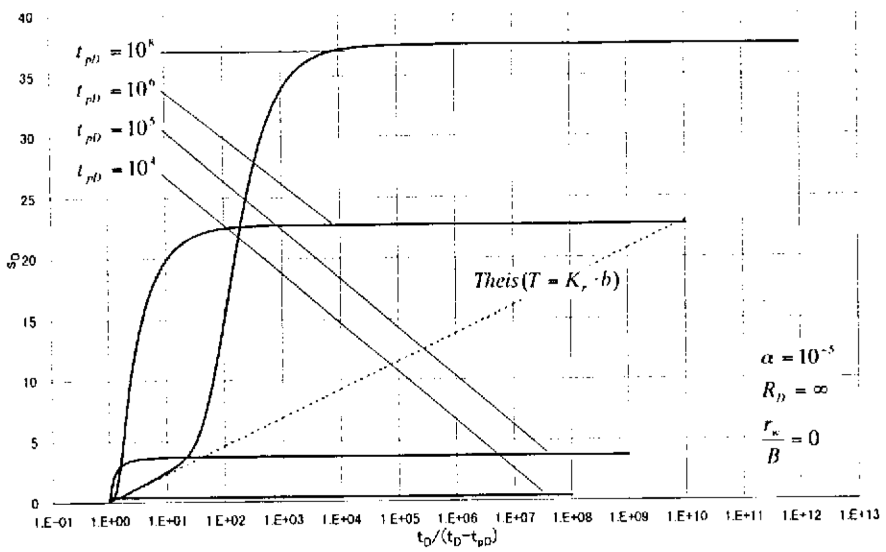
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q} s$ （式(2.2.9)参照）

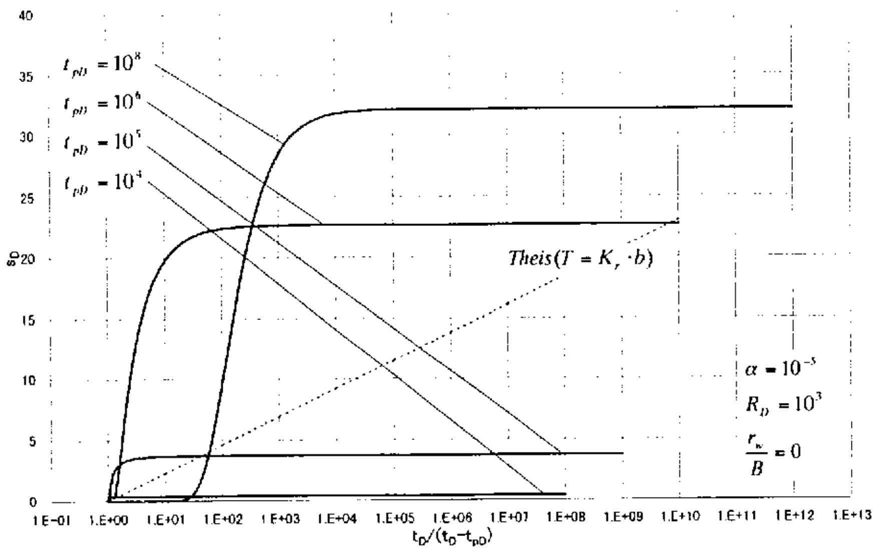
横軸：$(t_D - t_{pD}) = \frac{K_r}{S_S} \frac{(t - t_p)}{{r_W}^2}$

$l/b = 0.25 \quad d/b = 0.375$

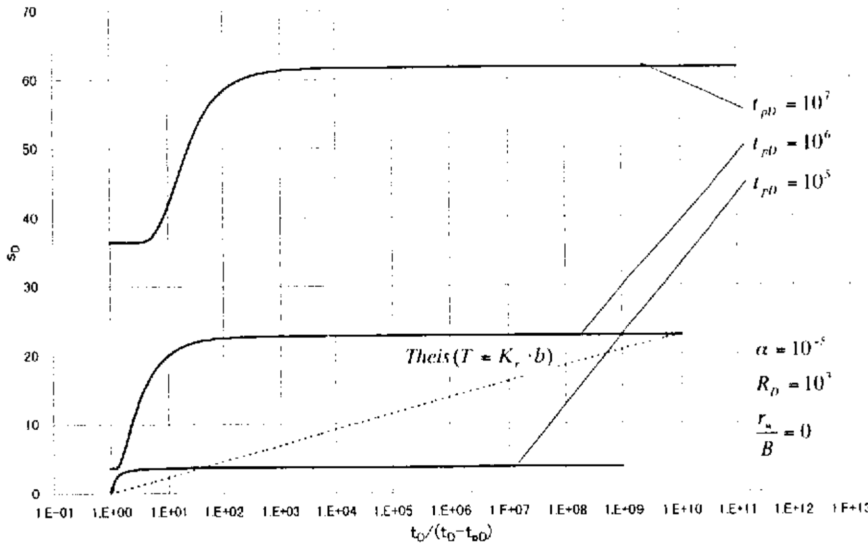
図-2.3.26　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留有り）の標準曲線（曲線一致法2・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



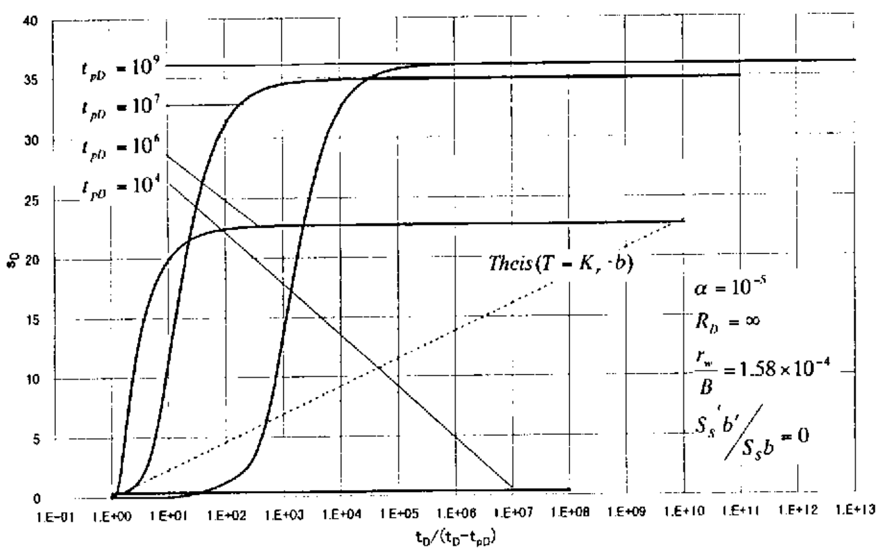
a.無限遠方境界



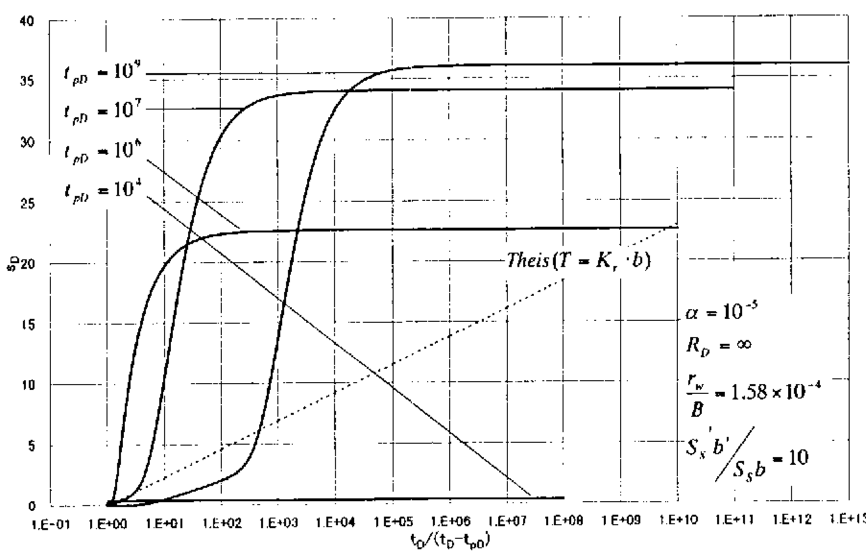
b.有限遠方定水位境界



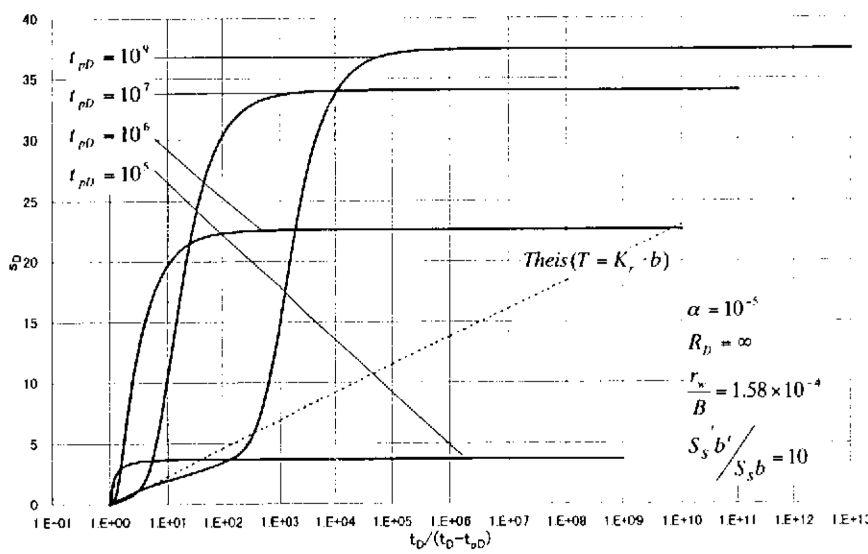
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



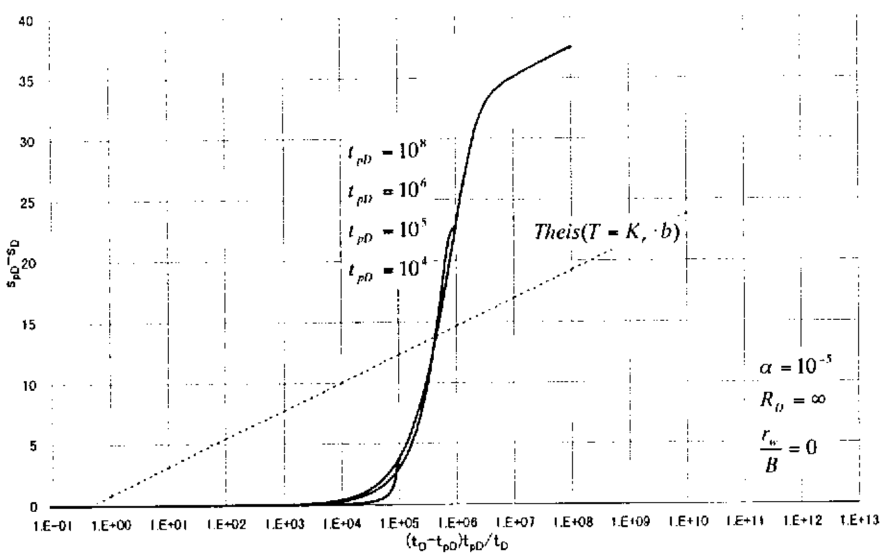
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$ （式(2.2.9)参照）

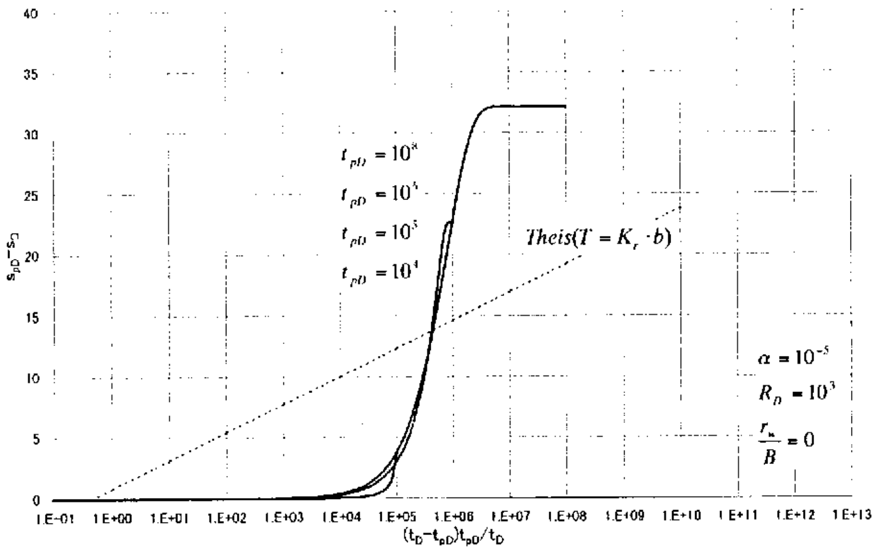
横軸：$t_D/(t_D-t_{pD})=t/(t-t_p)$

$l/b=0.25$　$d/b=0.375$

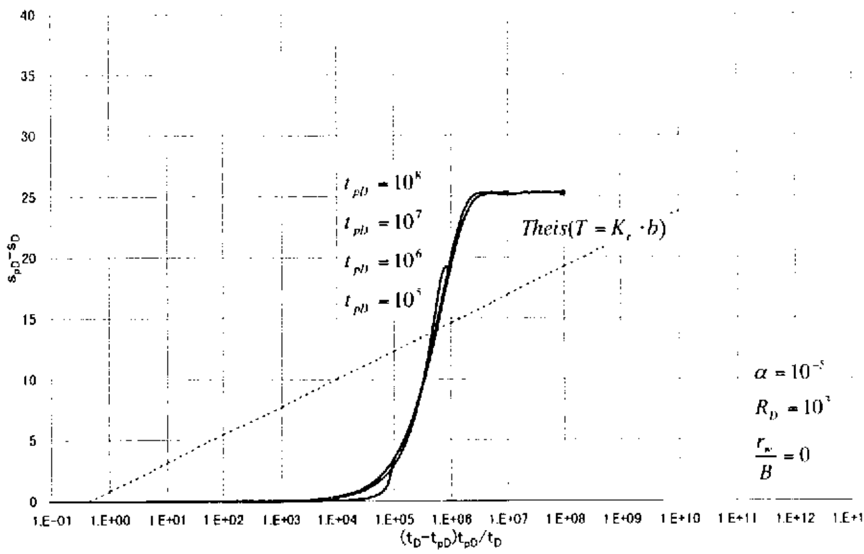
図-2.3.27　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留有り）の標準曲線（直線勾配法1・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



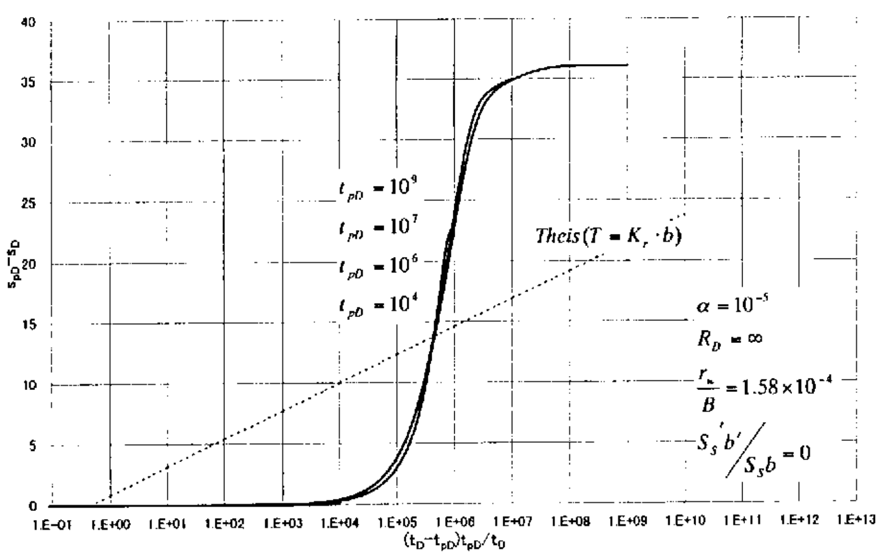
a.無限遠方境界



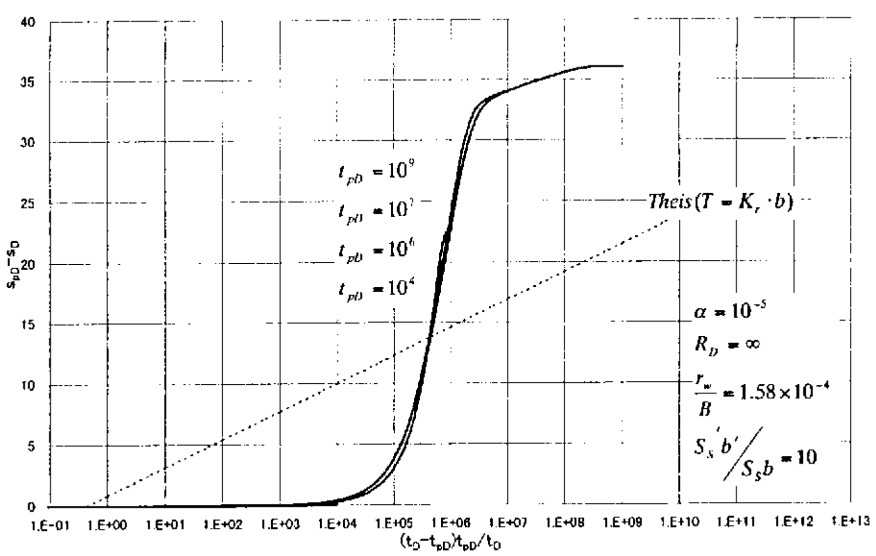
b.有限遠方定水位境界



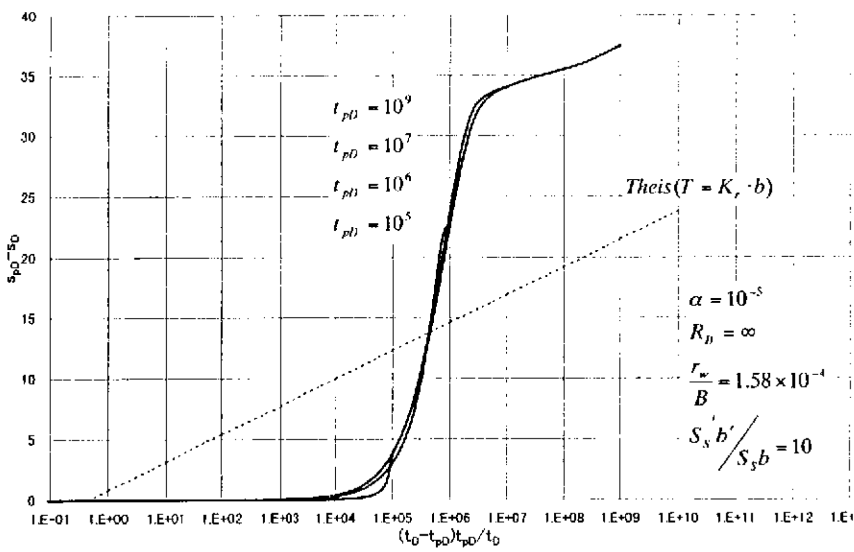
c.有限遠方不透水境界



d.非貯留性漏水



e.貯留性漏水（漏水層上端部水位一定）



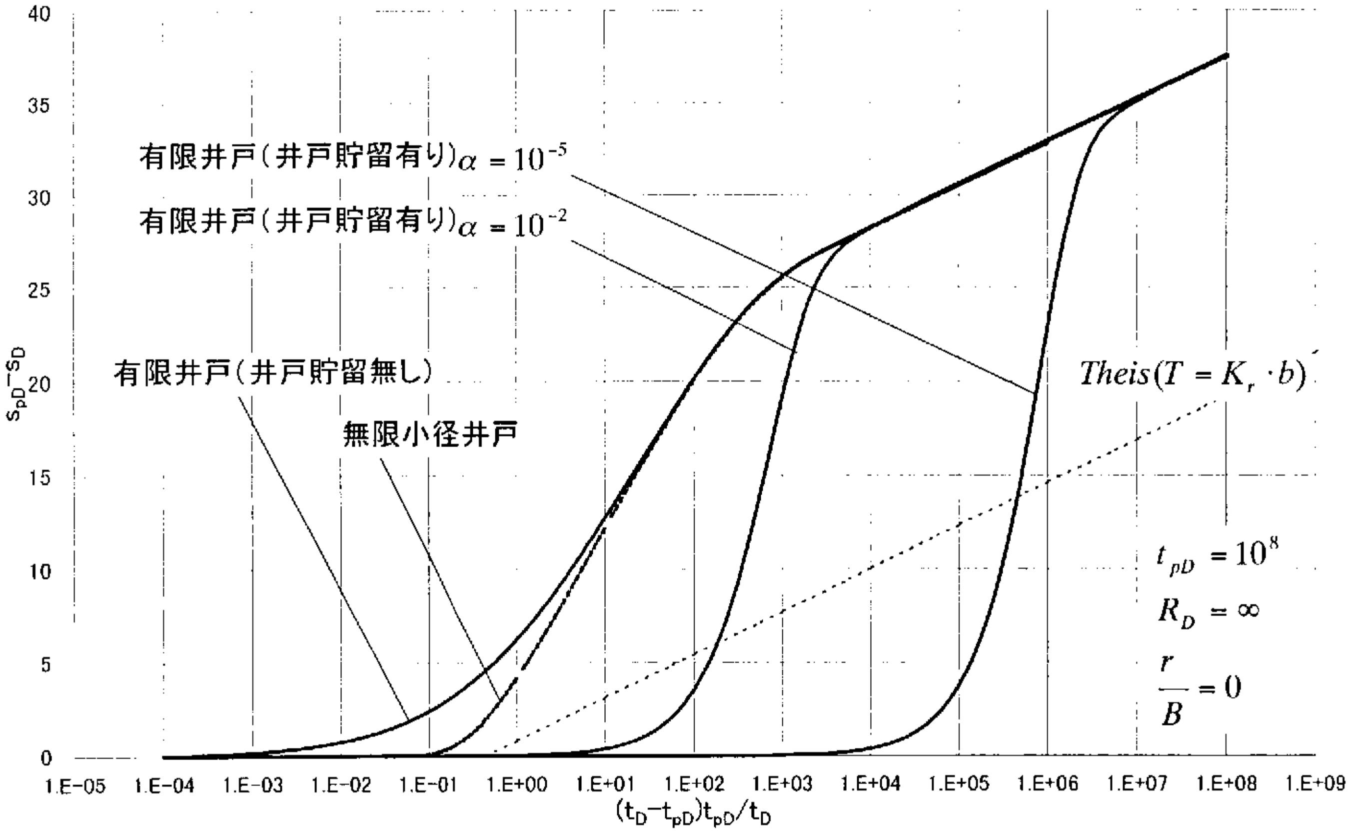
f.貯留性漏水（漏水層上端部不透水）

*）縦軸：$s_D=\dfrac{4\pi K_r b}{Q}s$（式(2.2.9)参照）

横軸：$\dfrac{(t_D-t_{pD})t_{pD}}{t_D}=\dfrac{K_r}{S_S}\dfrac{1}{{r_W}^2}\dfrac{(t-t_D)t_p}{t}$

$l/b=0.25$　$d/b=0.375$

図-2.3.28　有限径井戸による回復試験時（井戸貯留有り）の標準曲線（直線勾配法2・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



*）縦軸：$s_D = \dfrac{4\pi K_r b}{Q} s$（式(2.2.9)参照）・横軸：$(t_D - t_{pD})t_{pD}/t_D = \dfrac{K_r}{S_S}\dfrac{1}{r_W^2}\dfrac{(t-t_D)t_p}{t}$ ・$l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

図-2.3.29　回復試験における井戸貯留項の影響比較（直線勾配法２・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化）

２．３．６ その他の特性

これまで示した要因の他に、以下の条件が揚水試験結果に影響を与えると考えられる。

・インターバル位置の違い

・透水性の異方性

以下に各特徴について比較した標準曲線を示す。

(1) インターバル位置の違い

図-2.3.30 は同一長のインターバルを帯水層の上端部と下端部にそれぞれ設置した場合の違いを示したものである。図中 a は帯水層上端部、b は帯水層下端部にそれぞれ同一長インターバルを設置したものである。この場合、帯水層内に生じる地下水流は上下で全くの対称状態になるため、孔内水位低下量の挙動も両インターバル設置の違いを受けないことが推察され、図-2.3.30 の標準曲線にもこの特性が認められた。

また、図-2.3.31 および図-2.3.32 の図中 a～c の標記は表-2.3.3 のレイアウト表に示すものであり、(') を付記したものは帯水層中央部インターバル、(') の無いものは帯水層上端部インターバルによる結果を示す。両条件の違いによる影響は大きな差とはなっていないが、上端部設置の方が同じ流量を揚水すると孔内水位低下量が大きくなることが確認される。これはインターバル近傍および上下方向からの供給を考えると、帯水層上端部設置の場合は上方からの供給が不透水層の存在によって受けられないことに起因する。

表-2.3.3 インターバル設置位置（上端-中央）の比較一覧図レイアウト

a.定量揚水 (井戸貯留無し)	b. 定量揚水 (井戸貯留有り)	c. 定圧揚水

(2) 透水性の異方性

異方性透水係数の影響を確認するために、Kz/Kr=1, 1/100, 1/1000 の３条件に対する無限小径井戸および有限径井戸(ただし C_W=0)による非漏水性無限遠方境界地盤での揚水試験をシミュレートした。図 2.3.33 は s_D の両対数軸、図 2.3.34 は s_D の片対数軸、図 2.3.35 は s_{Dl} の両対数軸、図 2.3.36 は s_{Dl} の片対数軸、のそれぞれの整理である。

異方性度が大きくなる(Kz/Kr が小さくなる)と帯水層内の地下水流は部分インターバル揚水であっても水平流が卓越し、インターバル長を帯水層厚さとした時の流れに近づいていく。この特性は、s_{Dl} の整理し各図 2.3.35 および 2.3.36 における(a)→(b)→(c)または、(d)→(e)→(f)の順に水位低下量の差が小さくなっていくことで理解できる。

(3) 標準曲線の勾配

検討業務(その 2)[7] で簡単に触れたが、石油工学分野では揚水試験結果の観測値である水位低下量 s あるいは揚水流量 Q を既存のプロット様式(両対数あるいは片対数軸)で整理しただけでは確認することのできない挙動特性が、時間微分項、すなわち ds/dt あるいは dQ/dt の挙動をみることでその特性が明瞭にみられることを示している。このような時間微分項は以下に示すようにこれまで示してきた各種標準曲線プロットの曲線勾配に着目しているに他ならない。ここでは、時間微分項の算定公式と各種座標軸上での勾配への変換公式を

示し、これらを用いて得られた標準曲線勾配のプロットの特性を紹介する。

①時間微分項の評価

関数 f(t)の時間微分項 df/dt の Laplace 変換公式に以下の関係が見られる。

$$L\left(\frac{df}{dt}\right) = p\overline{f} - f(t=0) \qquad (2.3.30)$$

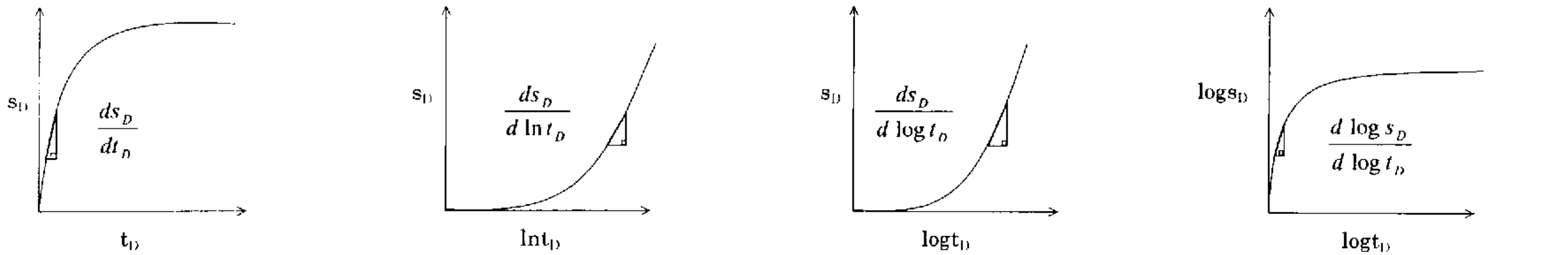
これまで示したように、Laplace 変換された関数 $\overline{f}$ の評価はなされているため、式(2.3.30)の右辺を評価すればこれまでの $\overline{f}$ を逆変換した技法をそのまま引用して以下のように df/dt の値を評価することができる。

$$L^{-1}\left(p\overline{f}\right) = \frac{df}{dt} \qquad (2.3.31)$$

尚、式(2.3.31)では初期時間の値である f(t=0)値をあらかじめ 0 と評価した。

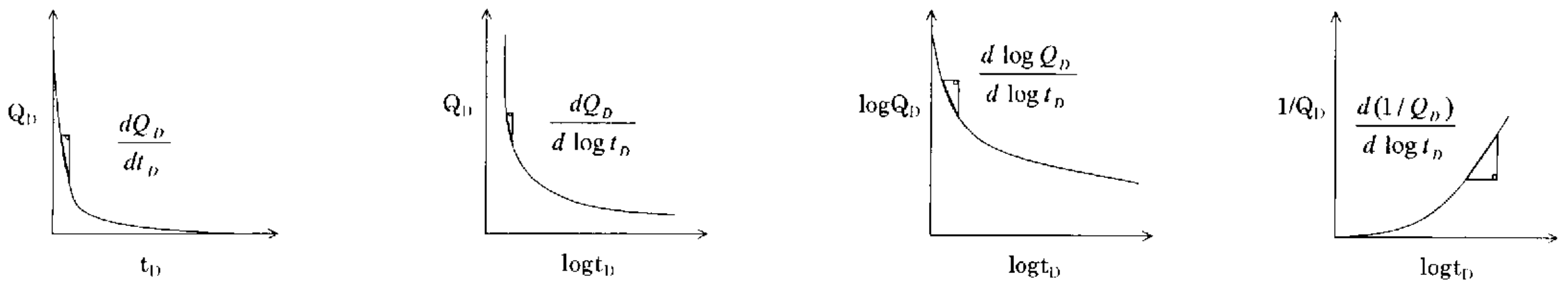
②標準曲線プロットにみられる勾配の定義

標準曲線プロット上での勾配として、座標軸目盛りの違い(普通軸、対数軸)により、図-2.3.30,31 に示す 4 種類の標準曲線勾配の特性を定義した。



$$L^{-1}\left(p\overline{s_D}\right)=\frac{ds_D}{dt_D}\quad(2.3.31)\qquad \frac{ds_D}{d\ln t_D}=\frac{ds_D}{dt_D}t_D\quad(2.3.33)\qquad \frac{ds_D}{d\log t_D}=\frac{2.3ds_D}{dt_D}t_D\quad(2.3.35)\qquad \frac{d\log s_D}{d\log t_D}=\frac{ds_D}{dt_D}\frac{t_D}{s_D}\quad(2.3.38)$$

図-2.3.30　定量揚水時の各勾配の定義



$$L^{-1}\left(p\overline{Q_D}\right)=\frac{dQ_D}{dt_D}\quad(2.3.31)\qquad \frac{dQ_D}{d\log t_D}=\frac{2.3dQ_D}{dt_D}t_D\quad(2.3.40)\qquad \frac{d\log Q_D}{d\log t_D}=\frac{dQ_D}{dt_D}\frac{t_D}{Q_D}\quad(2.3.43)\qquad \frac{d(1/Q_D)}{d\log t_D}=\left(\frac{-1}{Q_D{}^2}\right)\frac{2.3dQ_D}{dt_D}t_D$$

(2.3.45)

図-2.3.31　定圧揚水時の各勾配の定義

このようにいくつかの勾配を定義する必要がある。それぞれの勾配毎に逆 Laplace 変換を施すことも可能であるが、ここでは逆 Laplace 変換は試験時の観測値に対応する主変量 s_D および Q_D の時間微分 ds_D/dt_D および dQ_D/dt_D の変換までを逆 Laplace 変換し、その他の勾配値は以下に示す誘導によって理論的に評価することとする。

[定量揚水時の各勾配]

片(自然)対数軸上の勾配は以下の様に誘導できる。

まず、変数分離技法から次式が定義する。

$$\frac{ds_D}{d\ln t_D} = \frac{ds_D}{dt_D}\frac{dt_D}{d\ln t_D} \tag{2.3.32}$$

ここで、$y \equiv \ln(t_D)$とおき、これより $t_D = e^y$ を得、式(2.3.32)の右辺に代入すると片(自然)対数軸上の勾配は次式で定義することができる。

$$\begin{aligned}\frac{ds_D}{d\ln t_D} &= \frac{ds_D}{dt_D}\frac{de^y}{dy}\\ &= \frac{ds_D}{dt_D}e^y\\ &= \frac{ds_D}{dt_D}t_D \end{aligned}\tag{2.3.33}$$

片(常用)対数軸上の勾配は式(2.3.33)を以下のように流用できる。

$$\frac{ds_D}{d\log t_D} = \frac{2.3ds_D}{d\ln t_D} \qquad (\because \ln t_D = 2.3\log t_D) \tag{2.3.34}$$

上式右辺に式(2.3.33)を代入する。

$$\frac{ds_D}{d\log t_D} = \frac{2.3ds_D}{dt_D}t_D \tag{2.3.35}$$

両(常用)対数軸上での勾配は以下のように誘導できる。

$$\frac{d\log s_D}{d\log t_D} = \frac{ds_D}{d\log t_D}\frac{d\log s_D}{ds_D}$$

(2.3.36)

ここで、上式に式(2.3.35)を代入する。

$$\begin{aligned}\frac{d\log s_D}{d\log t_D} &= \frac{2.3ds_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{d\log s_D}{ds_D}\\ &= \frac{2.3ds_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{d\ln s_D}{2.3ds_D} \qquad (\because \ln s_D = 2.3\log s_D)\\ &= \frac{ds_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{d\ln s_D}{ds_D}\end{aligned}\tag{2.3.37}$$

$x \equiv \ln(s_D)$とおき，これより $s_D = e^x$ を得、式(2.3.37)の右辺に代入すると両(常用)対数軸上での勾配は次式で定義することができる。

$$\frac{d\log s_D}{d\log t_D}=\frac{ds_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{dx}{de^x}$$

$$=\frac{ds_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{1}{e^x}$$

$$=\frac{ds_D}{dt_D}\frac{t_D}{s_D} \qquad (2.3.38)$$

[定圧揚水時の各勾配の誘導]

片(常用)対数軸上の勾配は以下の様に誘導できる。

まず、変数分離技法から次式が定義する。

$$\frac{dQ_D}{d\log t_D}=\frac{dQ_D}{dt_D}\frac{dt_D}{d\log t_D}$$

$$=\frac{dQ_D}{dt_D}\frac{2.3dt_D}{d\ln t_D} \qquad \left(\because \ln t_D=2.3\log t_D\right) \qquad (2.3.39)$$

ここで、$y\equiv\ln(t_D)$とおき、これより $t_D= e^y$ を得、式(2.3.39)の右辺に代入すると片(常用)対数軸上の勾配は次式で定義することができる。

$$\frac{dQ_D}{d\log t_D}=\frac{2.3dQ_D}{dt_D}\frac{de^y}{dy}$$

$$=\frac{2.3dQ_D}{dt_D}e^y$$

$$=\frac{2.3dQ_D}{dt_D}t_D \qquad (2.3.40)$$

両(常用)対数軸上の勾配は以下の様に誘導できる。

$$\frac{d\log Q_D}{d\log t_D}=\frac{dQ_D}{d\log t_D}\frac{d\log Q_D}{dQ_D} \qquad (2.3.41)$$

ここで、上式に式(2.3.40)を代入する。

$$\frac{d\log Q_D}{d\log t_D}=\frac{2.3dQ_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{d\log Q_D}{dQ_D}$$

$$=\frac{2.3dQ_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{d\ln Q_D}{2.3dQ_D} \qquad \left(\because \ln Q_D=2.3\log Q_D\right)$$

$$=\frac{dQ_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{d\ln Q_D}{dQ_D} \qquad (2.3.42)$$

$x\equiv\ln(Q_D)$とおき，これより $Q_D= e^x$ を得，式(2.3.42)の右辺に代入すると両(常用)対数軸上での勾配は次式で定義することができる。

$$\frac{d\log Q_D}{d\log t_D}=\frac{dQ_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{dx}{de^x}$$

$$=\frac{dQ_D}{dt_D}t_D\cdot\frac{1}{e^x}$$

$$=\frac{dQ_D}{dt_D}\frac{t_D}{Q_D} \tag{2.3.43}$$

揚水流量 Q の逆数 1/Q の片(常用)対数軸上の勾配が次式で定義できる。

$$\frac{d(1/Q_D)}{d\log t_D}=\frac{d(1/Q_D)}{dQ_D}\frac{dQ_D}{d\log t_D}$$

$$=\left(\frac{-1}{{Q_D}^2}\right)\frac{dQ_D}{d\log t_D} \tag{2.3.44}$$

ここで、上式に式(2.3.40)を代入する。

$$\frac{d(1/Q_D)}{d\log t_D}=\left(\frac{-1}{{Q_D}^2}\right)\frac{2.3dQ_D}{dt_D}t_D \tag{2.3.45}$$

③標準曲線勾配の特性

ここでは、図-2.3.39 から図-2.3.46 の標準曲線勾配について、その特徴を述べる。
無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線勾配のグラフを図-2.3.39,40 に、有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留無し)の標準曲線勾配のグラフを図-2.3.41,42 に、そして有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留有り($\alpha=10^{-5}$))の標準曲線勾配のグラフを図-2.3.43,44 に、定圧揚水時の標準曲線勾配のグラフを図-2.3.45,46 に示す。尚、各標準曲線勾配のグラフ作成に用いた標準曲線は、無限遠方境界、漏水無の条件とした。

図-2.3.39,41,43,45 は標準曲線の各勾配を貫入率で整理したものであり、図-2.3.40,42,44,46 は各貫入率の勾配を勾配の種類で整理したものである。尚、定圧揚水時において $\frac{dQ_D}{dt_D}$, $\frac{dQ_D}{d\log t_D}$, $\frac{d\log Q_D}{d\log t_D}$ の勾配は負の値を取ることから、対数軸上で整理するため絶対値表示とした。

- 無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線勾配 $\frac{ds_D}{dt_D}$ は、貫入率に関わらず 1/u=1.0 付近でピークをとる曲線となり、早い時間及び、遅い時間でそれぞれ 1 つの曲線に重なる。(図-2.3.40-a)
- 無限小径井戸・有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留有り)の標準曲線勾配 $\frac{ds_D}{d\ln t_D}$, $\frac{ds_D}{d\log t_D}$ は、貫入率に関わらず早い時間及び、遅い時間でそれぞれ 1 つの曲線に重なり、最終的に $\frac{ds_D}{d\ln t_D}\rightarrow 1$, $\frac{ds_D}{d\log t_D}\rightarrow 2.3$ にそれぞれ収束する。(図-2.3.40-b,c,図-2.3.44-b,c)
- 無限小径井戸・有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留無し)・定圧揚水時の標準曲線勾配 $\frac{d\log s_D}{d\log t_D}$ は、貫入率に関わらず早い時間で 1 つの曲線に重なる。(図-2.3.40-d,図-2.3.42-d,図-2.3.46-d)

・有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留無し)の標準曲線勾配$\dfrac{ds_D}{dt_D}$は、貫入率に関わらず遅い時間で 1 つの直線に重なる。(図-2.3.42-a)

・有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留無し)の標準曲線勾配$\dfrac{ds_D}{d\ln t_D}$, $\dfrac{ds_D}{d\log t_D}$は最終的に$\dfrac{ds_D}{d\ln t_D}\to 1$, $\dfrac{ds_D}{d\log t_D}\to 2.3$ にそれぞれ収束する。(図-2.3.42-b,c)

・有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留有り)の標準曲線勾配$\dfrac{ds_D}{dt_D}$は、貫入率に関わらず早い時間では一定値($\dfrac{ds_D}{dt_D}=4\alpha=4.0\times10^{-5}$)を取り、遅い時間で 1 つの直線に重なる。(図-2.3.44-a)

早い時間で一定値($\dfrac{ds_D}{dt_D}=4\alpha$)をとるのは 式(2.2.15)が次のように展開されるからである。

$$r_D\left.\frac{ds_D}{dr_D}\right|_{r_D=1}=\left\{\frac{b}{2l\alpha}\frac{ds_{WD}(t_D)}{dt_D}-\frac{2b}{l}\right\}g_D(z_D) \tag{2.2.15}$$

早い時間での揚水は井戸内のみで行われ、井戸周辺の動水勾配は 0 と見なせるため

$$0\cong\left\{\frac{b}{2l\alpha}\frac{ds_{WD}(t_D)}{dt_D}-\frac{2b}{l}\right\}g_D(z_D)$$

$$\frac{b}{2l\alpha}\frac{ds_{WD}(t_D)}{dt_D}\cong\frac{2b}{l}$$

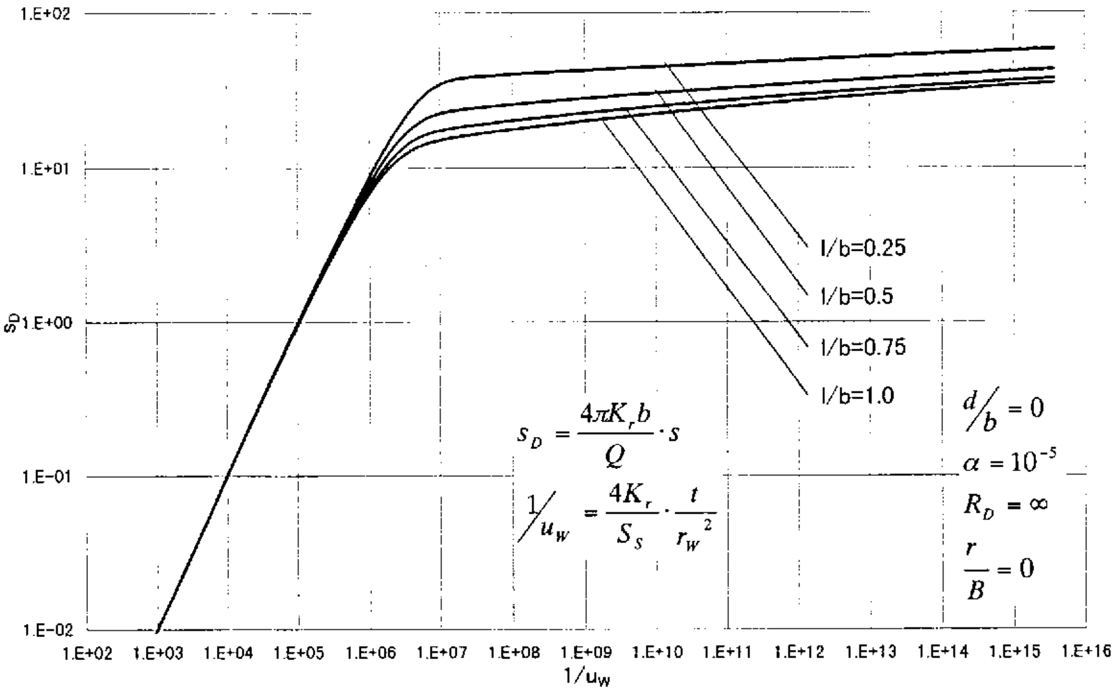
$$\therefore\frac{ds_{WD}(t_D)}{dt_D}\cong 4\alpha$$

・有限径井戸による定量揚水時(井戸貯留有り)の標準曲線勾配$\dfrac{d\log s_D}{d\log t_D}$は、貫入率に関わらず早い時間では$\dfrac{d\log s_D}{d\log t_D}=1.0$ の一定値を取る。(図-2.3.44-d)

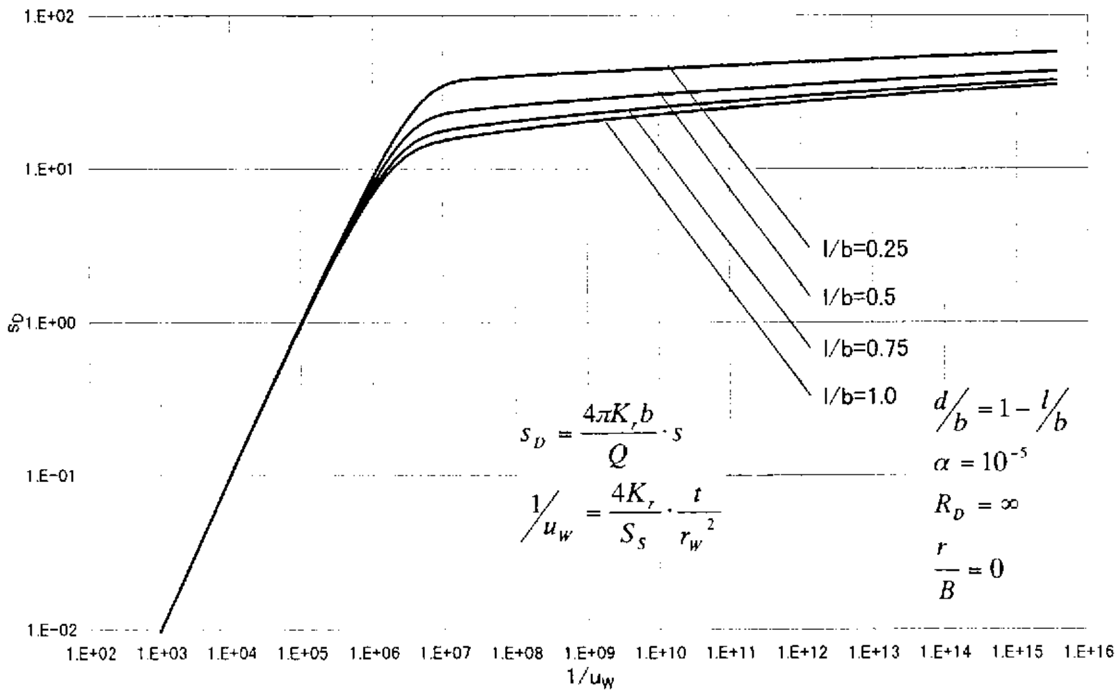
・定圧揚水時の標準曲線勾配$-\dfrac{dQ_D}{dt_D}$は、貫入率に関わらず早い時間及び、遅い時間でそれぞれ 1 つの直線に重なる。(図-2.3.46-a)

・定圧揚水時の標準曲線勾配$-\dfrac{dQ_D}{d\log t_D}$, $-\dfrac{d\log Q_D}{d\log t_D}$ は、貫入率に関わらず早い時間で 1 つの曲線に重なる。(図-2.3.46-b,c)

これまで曲線一致法に用いた標準曲線($\log(s_D)$-$\log(t_D)$)($\log(Q_D)$-$\log(t_D)$)のグラフと比較すると、これらの勾配の標準曲線を整理したグラフの方が、曲線の相違が明確に表れるため、曲線一致技法に適すると考えられる。

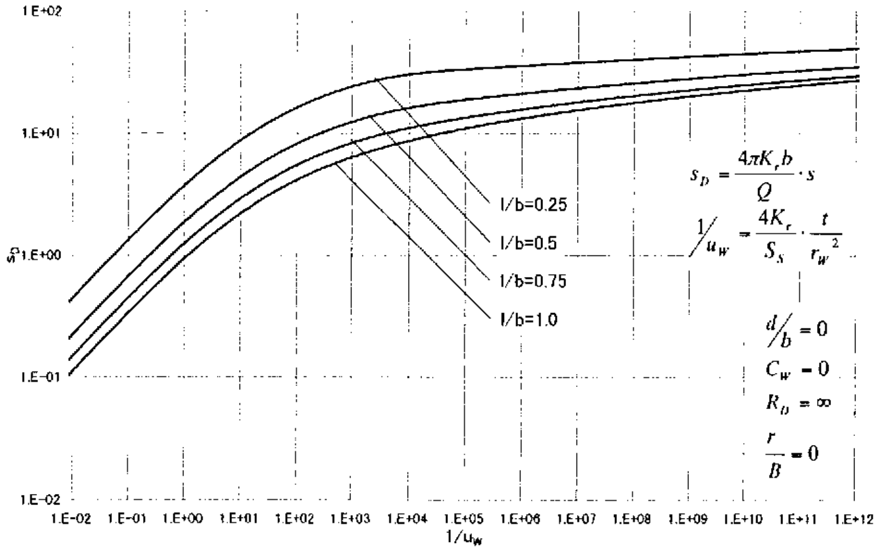


a.定流量揚水（井戸貯留有り）インターバル帯水層上端

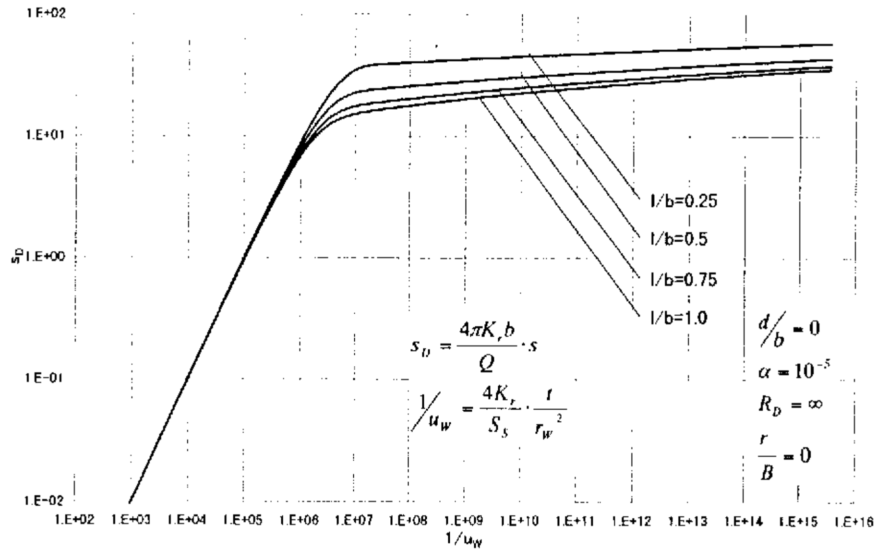


b.定流量揚水（井戸貯留有り）インターバル帯水層下端

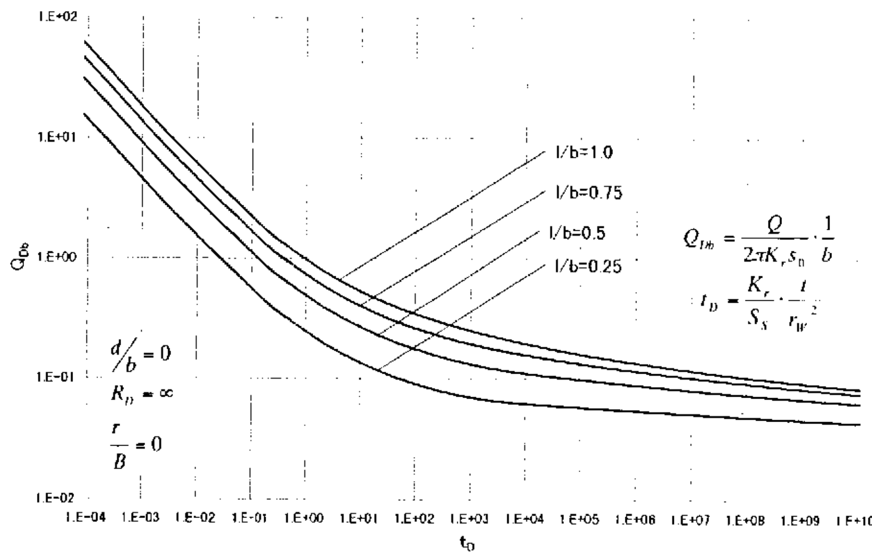
図-2.3.32　インターバル設置位置（上端-下端）の比較（無限遠方、漏水無し）



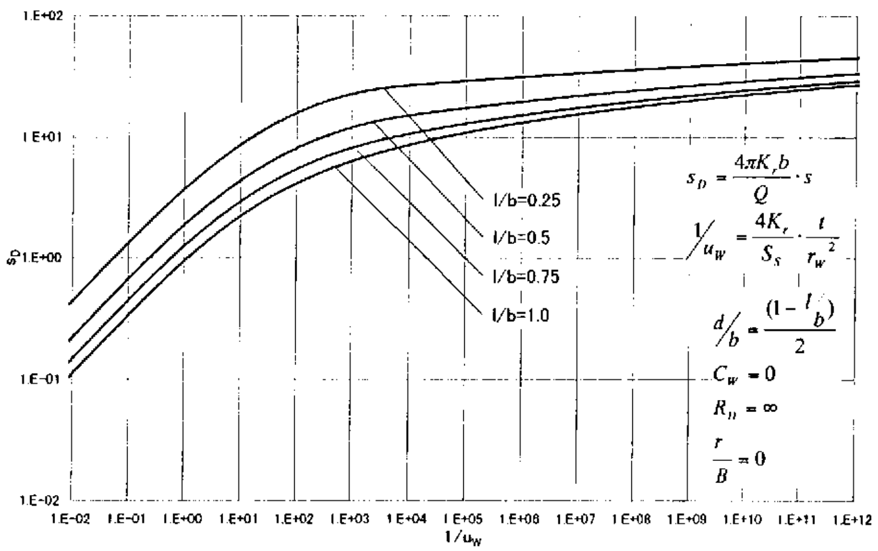
a. 定流量揚水（井戸貯留無し）：インターバル帯水層上端



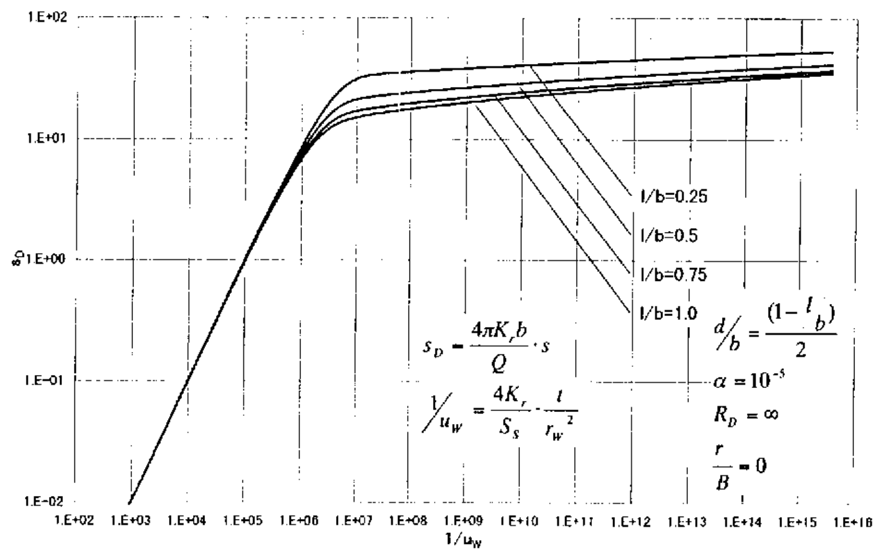
b .定流量揚水（井戸貯留有り）：インターバル帯水層上端



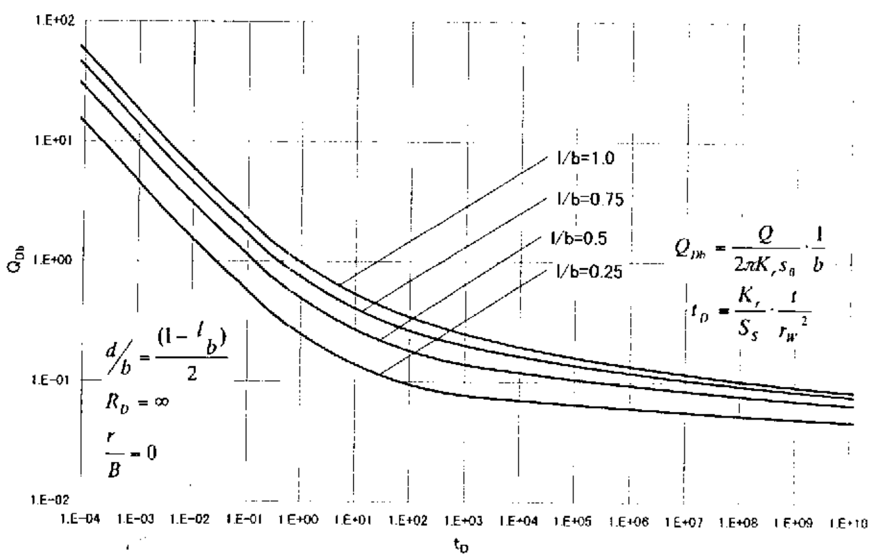
c .定圧揚水：インターバル帯水層上端



a'.定流量揚水（井戸貯留無し）：インターバル帯水層中央

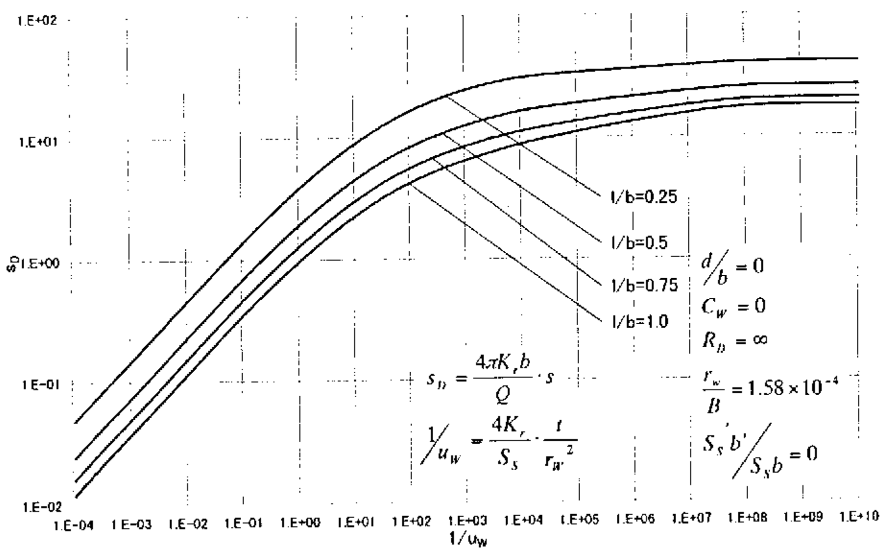


b'.定流量揚水（井戸貯留有り）：インターバル帯水層中央

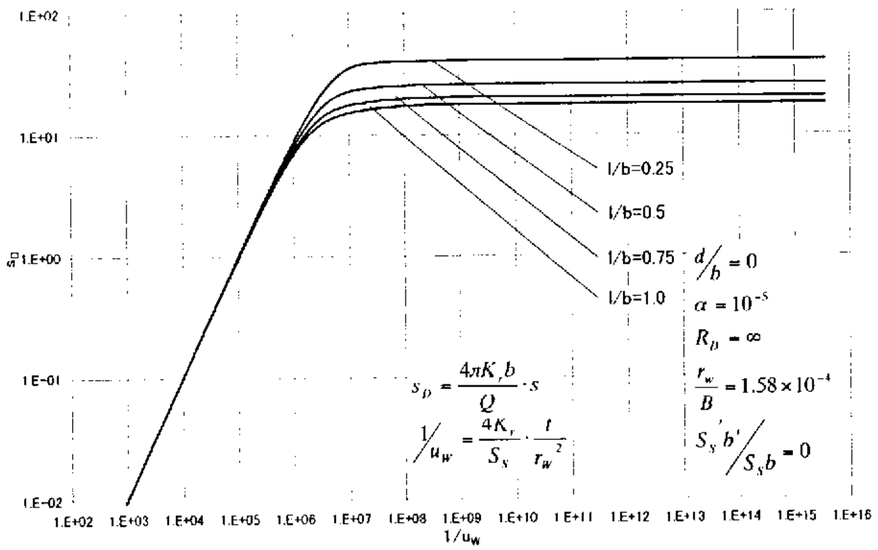


c'.定圧揚水：インターバル帯水層中央

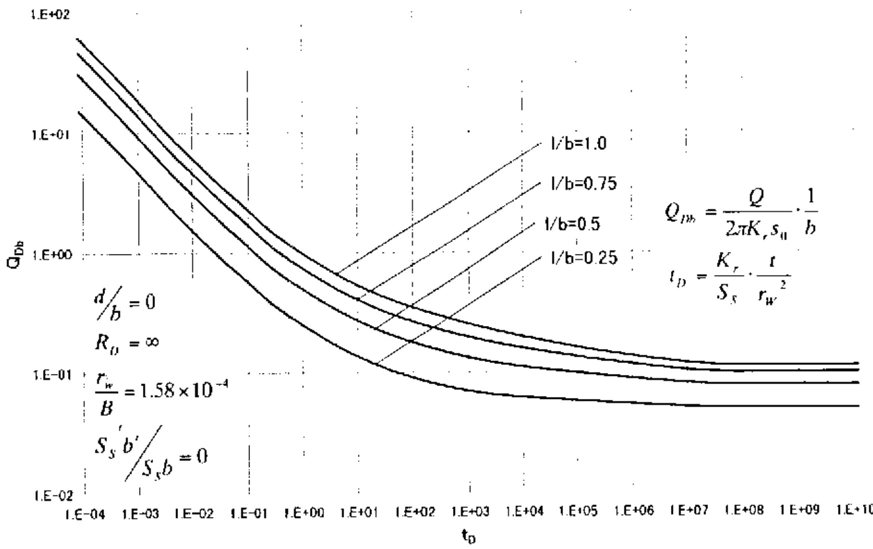
図-2.3.33 インターバル設置位置（上端-中央）の比較（無限遠方境界、漏水無し）



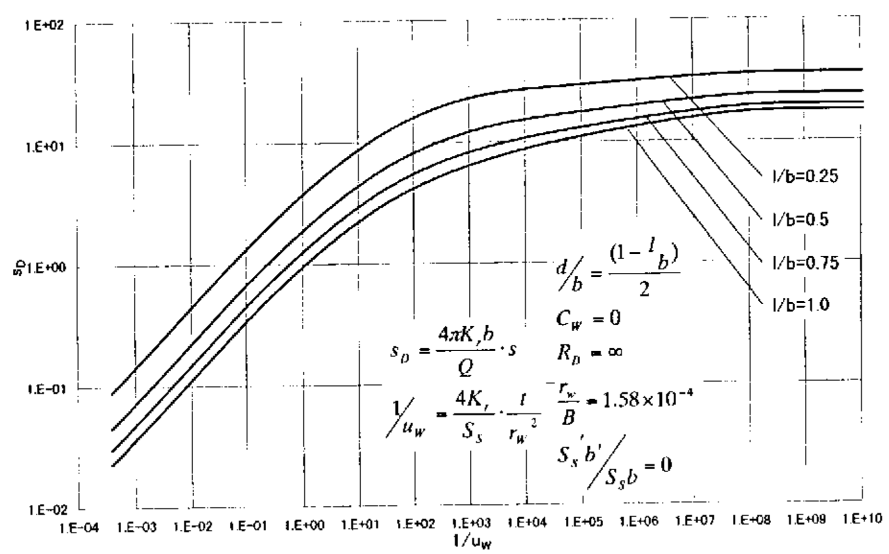
a.定流量揚水（井戸貯留無し）：インターバル帯水層上端



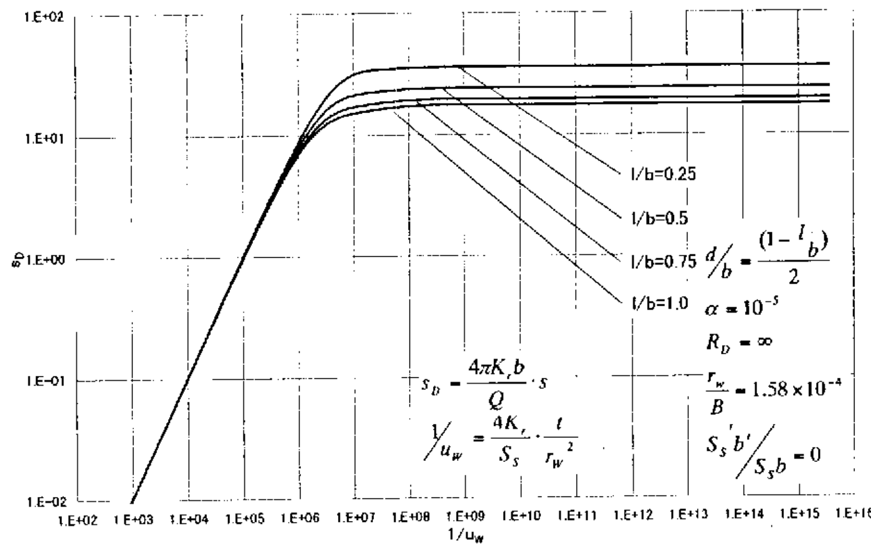
b.定流量揚水（井戸貯留有り）：インターバル帯水層上端



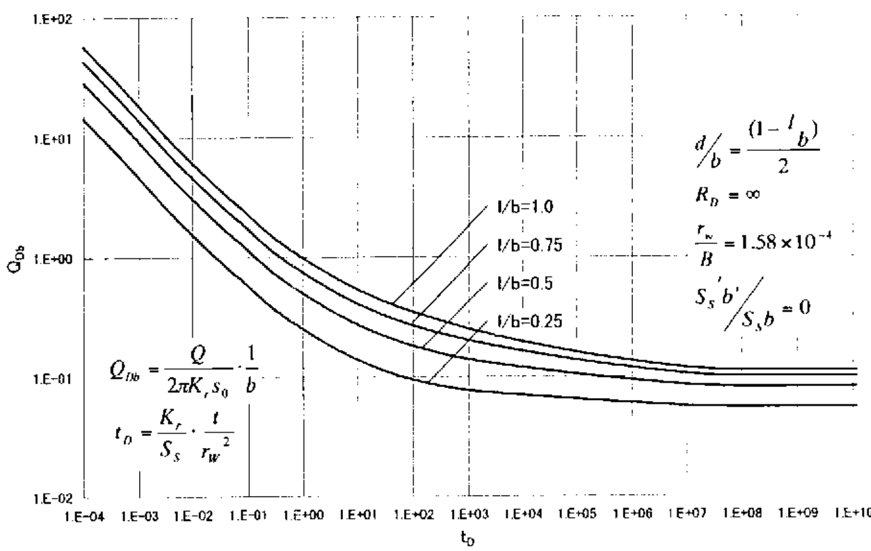
c.定圧揚水：インターバル帯水層上端



a'.定流量揚水（井戸貯留無し）：インターバル帯水層中央

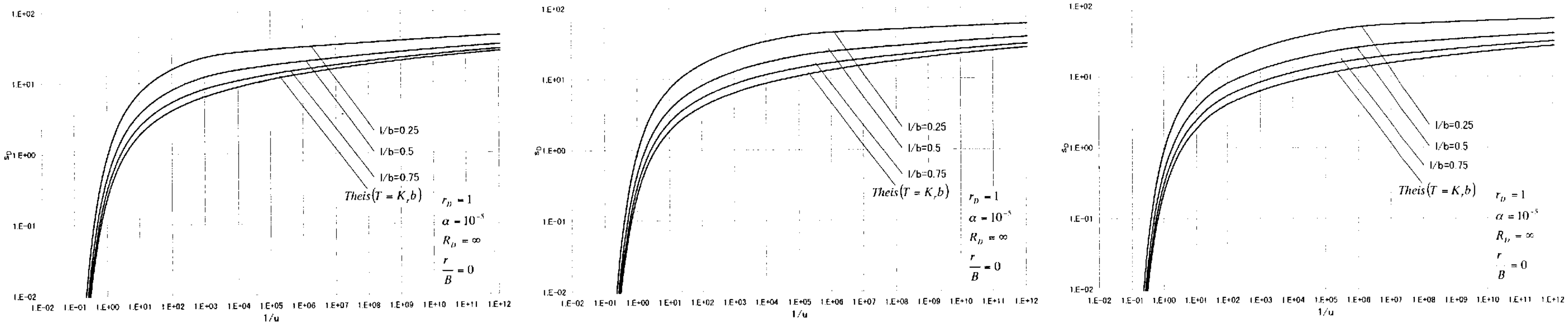


b'.定流量揚水（井戸貯留有り）：インターバル帯水層中央



c'.定圧揚水：インターバル帯水層中央

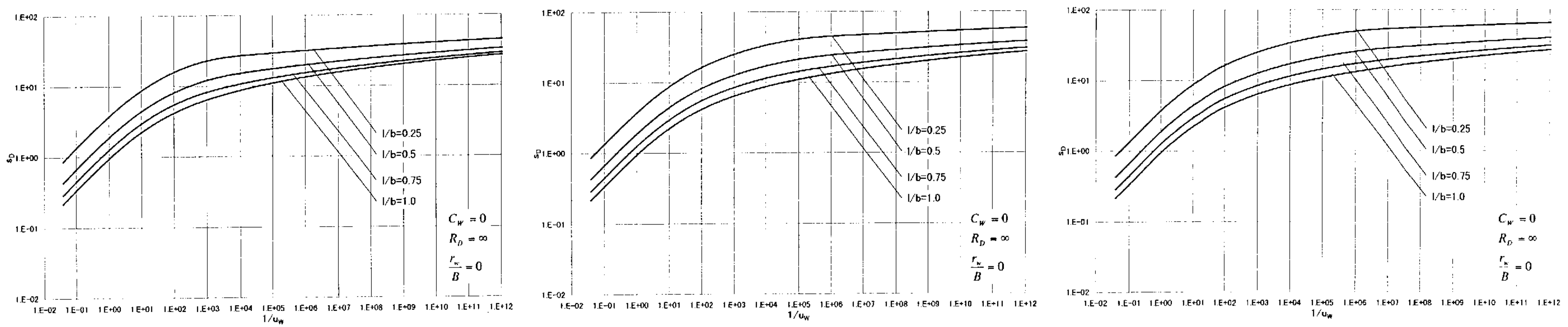
図-2.3.34　インターバル設置位置(上端-中央)の比較（無限遠方境界、非貯留性漏水）



a　$K_z/K_r = 1$　　b　$K_z/K_r = 1/100$　　c　$K_z/K_r = 1/1000$

*）縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$　(式(2.2.9)参照)・横軸：$1/u = \frac{4K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r^2}$　(式(2.3.1)参照)・　$l/b = 0.25$　・$d/b = 0.375$

無限小径井戸による定流量揚水時の標準曲線

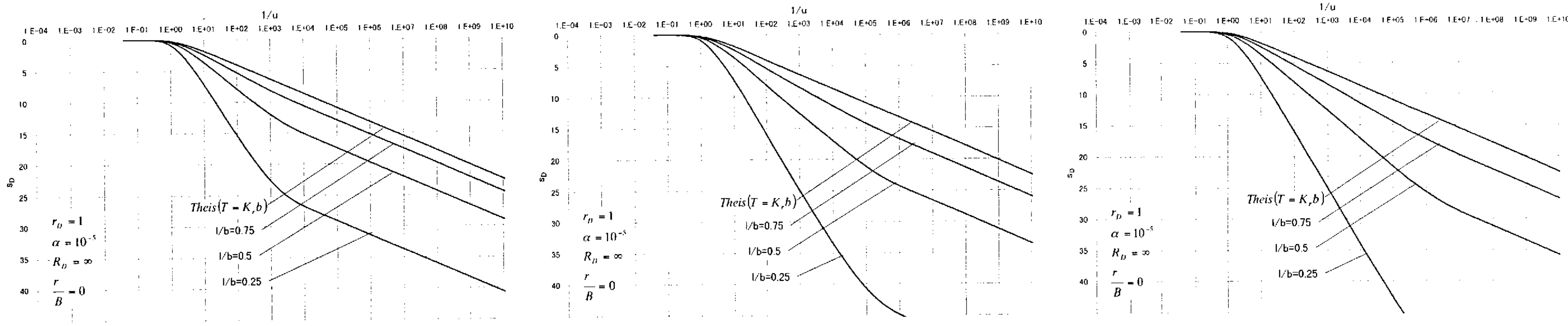


d　$K_z/K_r = 1$　　e　$K_z/K_r = 1/100$　　f　$K_z/K_r = 1/1000$

*）縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$　(式(2.2.9)参照)・横軸：$1/u_W = \frac{4K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r_W{}^2}$　(式(2.3.1)参照)・　$l/b = 0.25$　・$d/b = 0.375$

有限径井戸による定流量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線

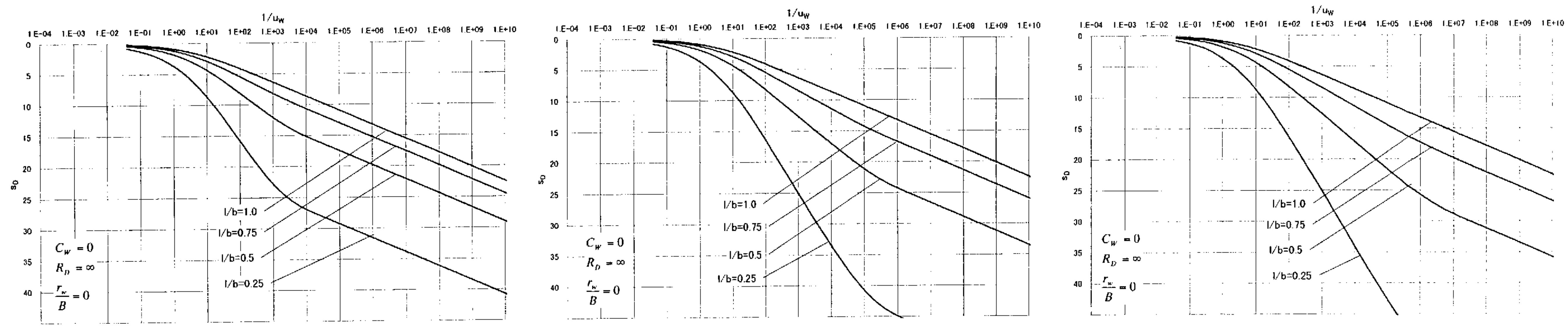
図-2.3.35　異方性の検証（(両対数で整理・水位低下量を帯水層厚 b で無次元化)



a $K_z/K_r = 1$ b $K_z/K_r = 1/100$ c $K_z/K_r = 1/1000$

*) 縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$ （式(2.2.9)参照）・横軸：$1/u = \frac{4K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r^2}$ （式(2.3.1)参照）・ $l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

無限小径井戸による定流量揚水時の標準曲線

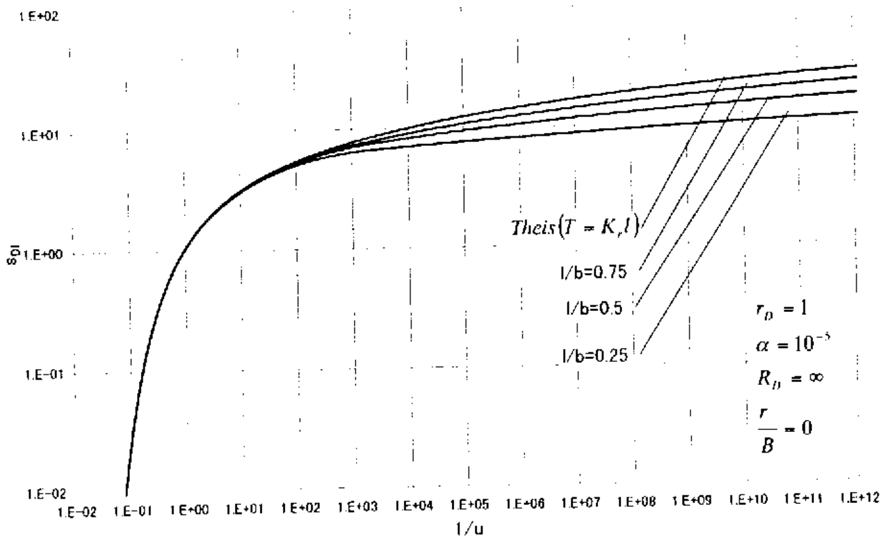


d $K_z/K_r = 1$ e $K_z/K_r = 1/100$ f $K_z/K_r = 1/1000$

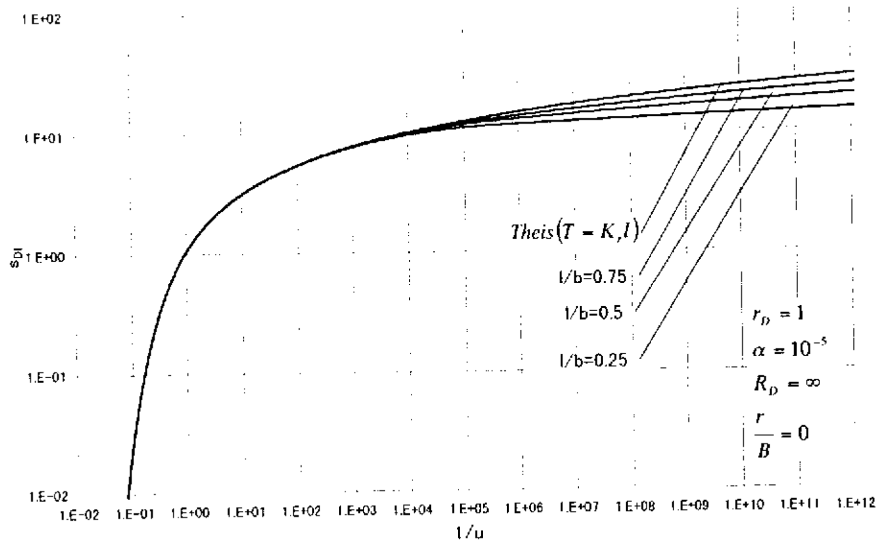
*) 縦軸：$s_D = \frac{4\pi K_r b}{Q}\cdot s$ （式(2.2.9)参照）・横軸：$1/u_W = \frac{4K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r_W^2}$ （式(2.3.1)参照）・ $l/b = 0.25$ ・ $d/b = 0.375$

有限径井戸による定流量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線

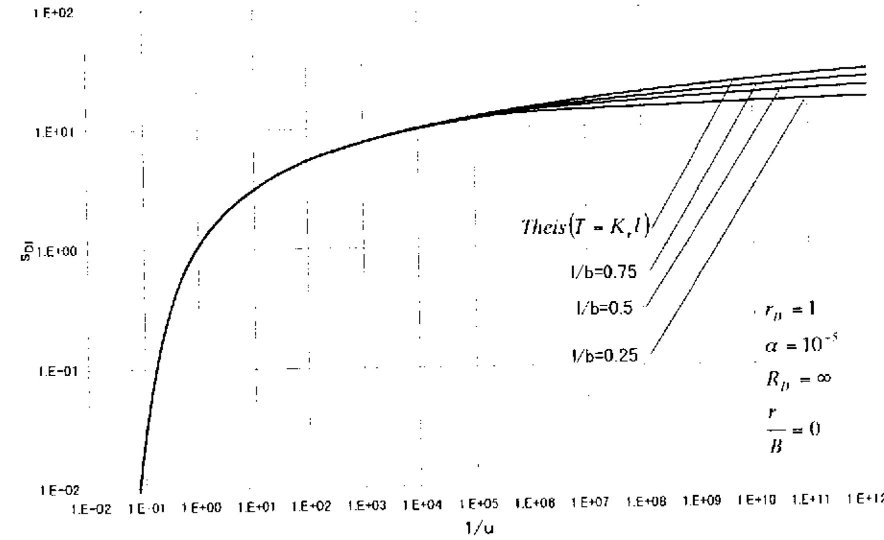
図-2.3.36 異方性の検証（(片対数で整理・水位低下量を帯水層厚bで無次元化）



a $K_z/K_r = 1$



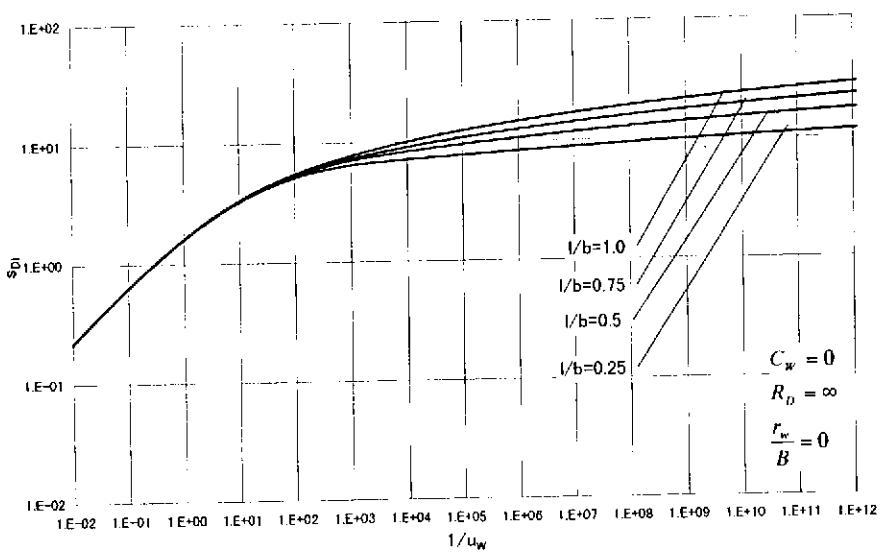
b $K_z/K_r = 1/100$



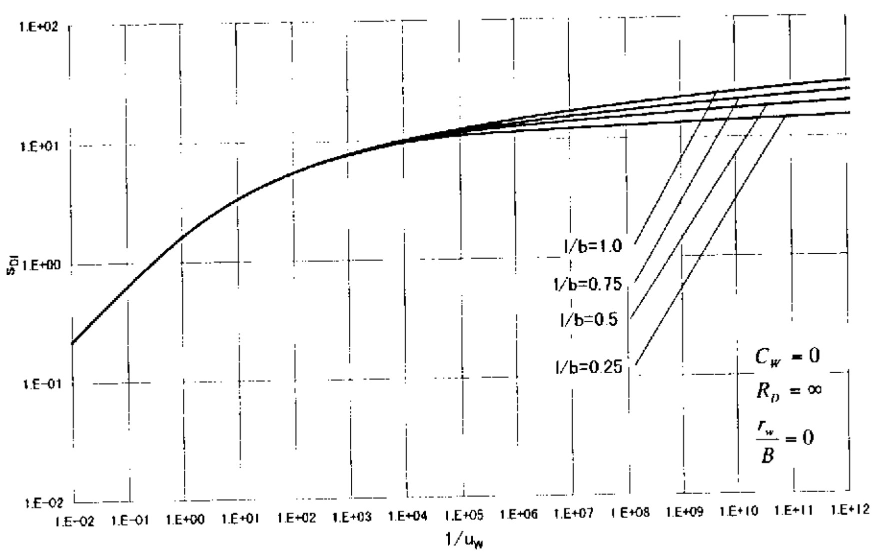
c $K_z/K_r = 1/1000$

*) 縦軸：$s_{Dl} = \frac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$, s_D：式(2.2.9)参照)・横軸：$1/u = \frac{4K_r}{S_S}\cdot\frac{t}{r^2}$（式(2.3.1)参照)・ $l/b = 0.25$ ・$d/b = 0.375$

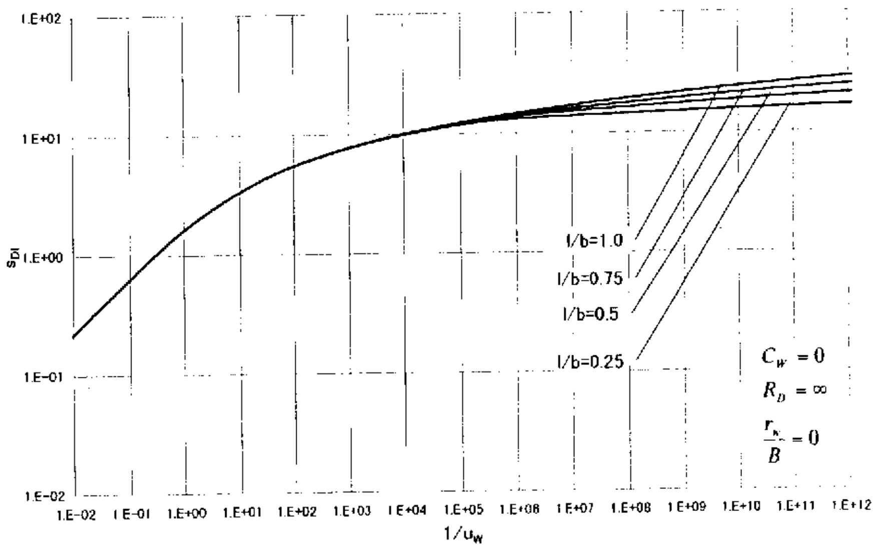
無限小径井戸による定流量揚水時の標準曲線



d $K_z/K_r = 1$



e $K_z/K_r = 1/100$

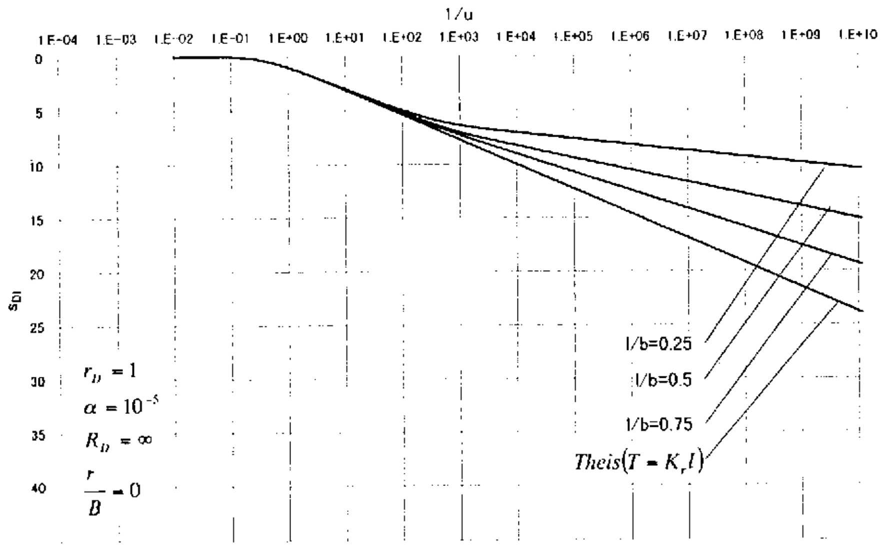


f $K_z/K_r = 1/1000$

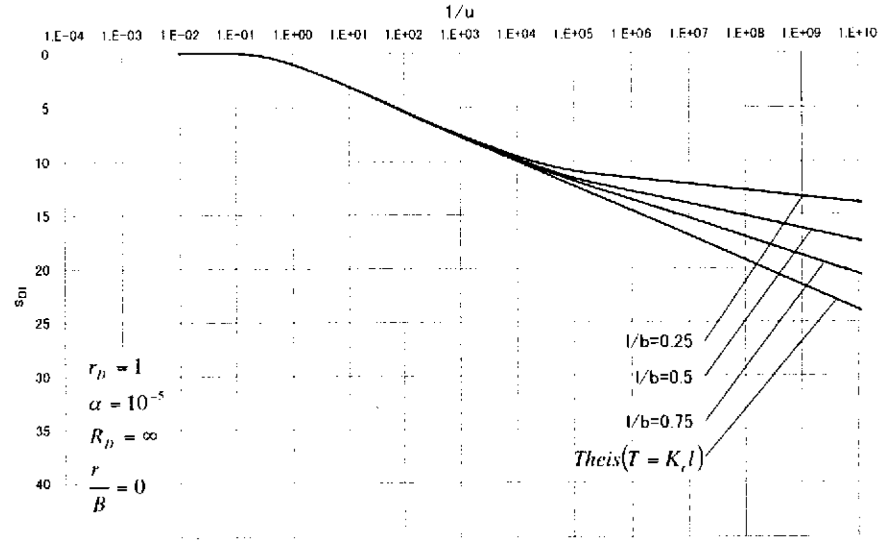
*) 縦軸：$s_{Dl} = \frac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$, s_D：式(2.2.9)参照)・横軸：$1/u_W = \frac{4K_r}{S_S}\cdot\frac{t}{r_W^2}$（式(2.3.1)参照)・ $l/b = 0.25$ ・$d/b = 0.375$

有限径井戸による定流量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線

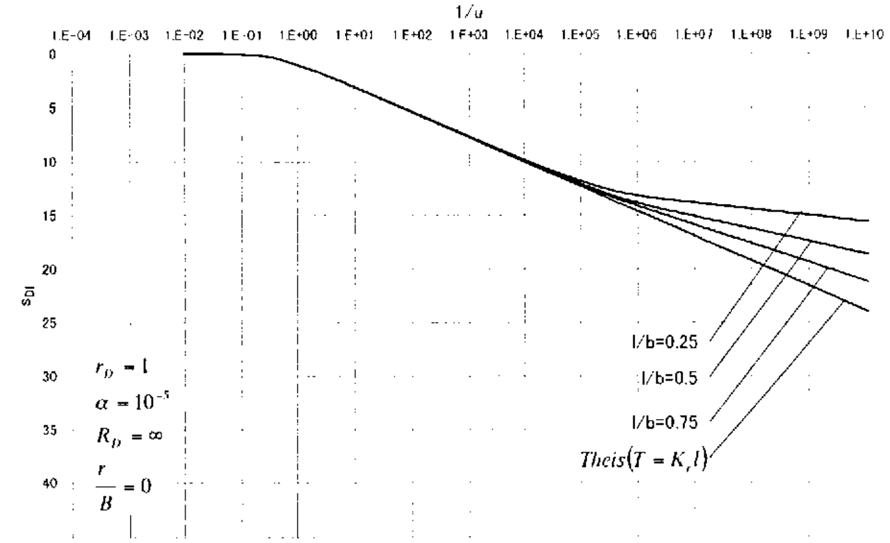
図-2.3.37 異方性の検証（両対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）



a $K_z/K_r = 1$



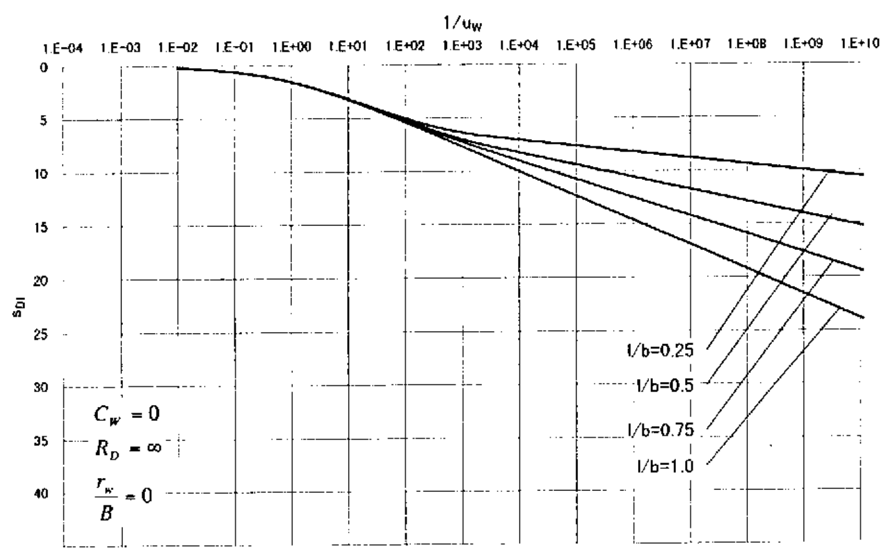
b $K_z/K_r = 1/100$



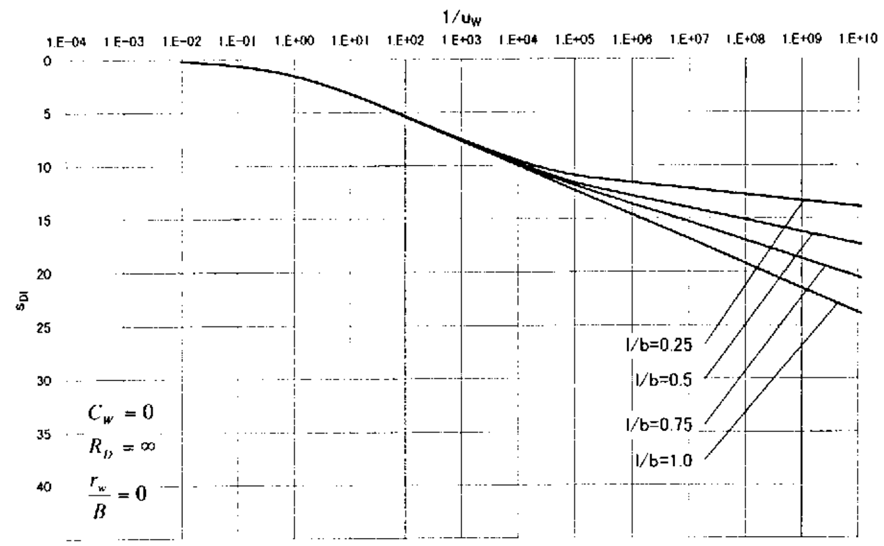
c $K_z/K_r = 1/1000$

*）縦軸：$s_{Dl} = \frac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$，$s_D$：式(2.2.9)参照）・横軸：$1/u = \frac{4K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r^2}$（式(2.3.1)参照）・ $l/b = 0.25$ ・$d/b = 0.375$

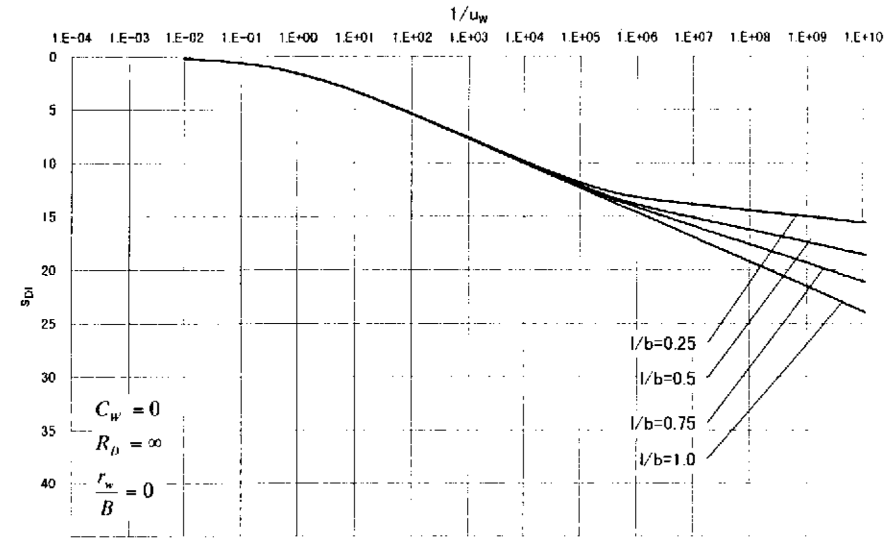
無限小径井戸による定流量揚水時の標準曲線



d $K_z/K_r = 1$



e $K_z/K_r = 1/100$

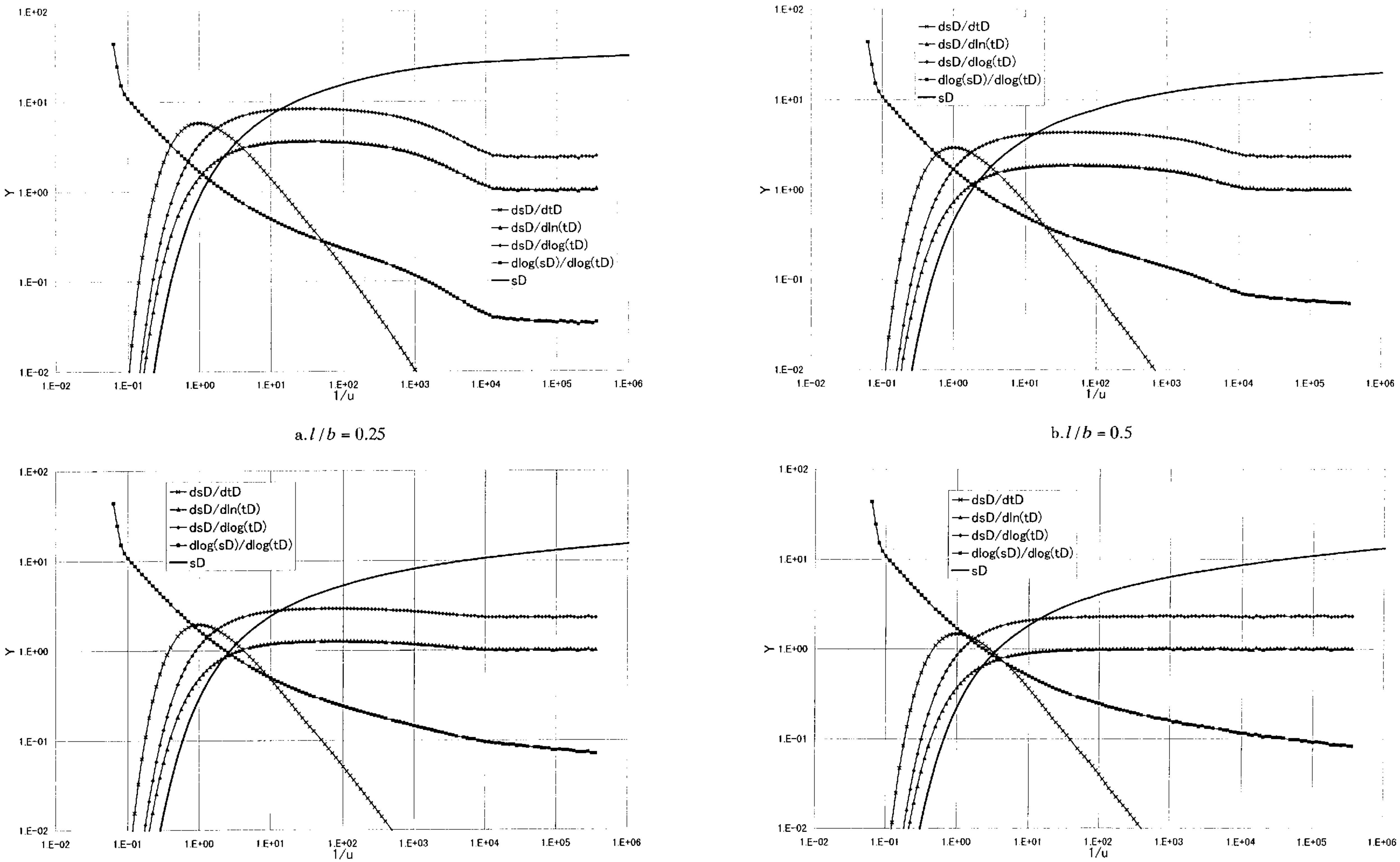


f $K_z/K_r = 1/1000$

*）縦軸：$s_{Dl} = \frac{4\pi K_r l}{Q}\cdot s$（$s_{Dl} = s_D \cdot l/b$，$s_D$：式(2.2.9)参照）・横軸：$1/u_W = \frac{4K_r}{S_s}\cdot\frac{t}{r_W^2}$（式(2.3.1)参照）・ $l/b = 0.25$ ・$d/b = 0.375$

有限径井戸による定流量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線

図-2.3.38 異方性の検証（片対数で整理・水位低下量をストレーナー長 l で無次元化）



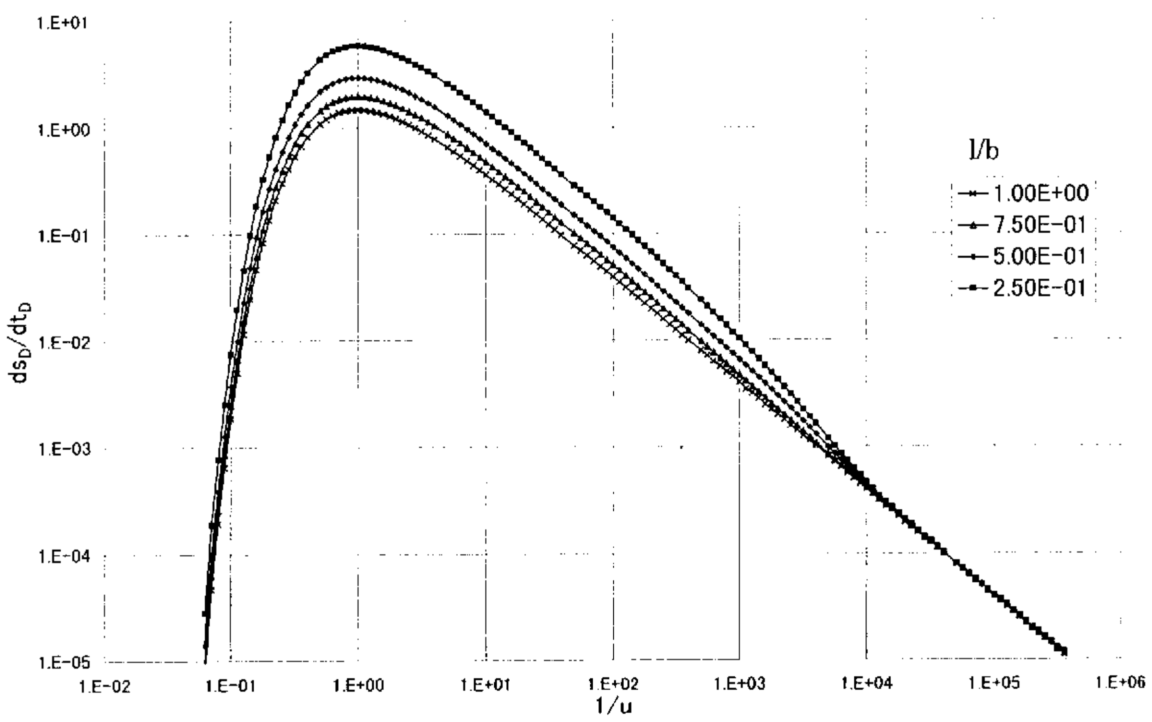
a. $l/b = 0.25$

b. $l/b = 0.5$

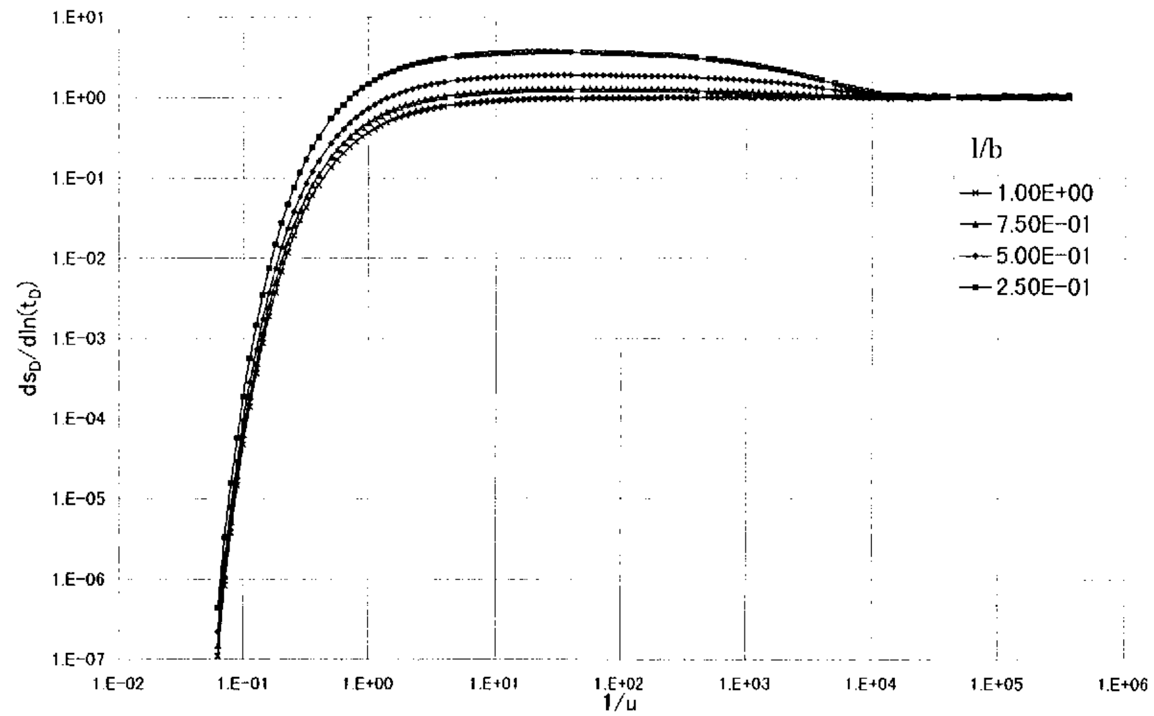
c. $l/b = 0.75$

d. $l/b = 1.0$

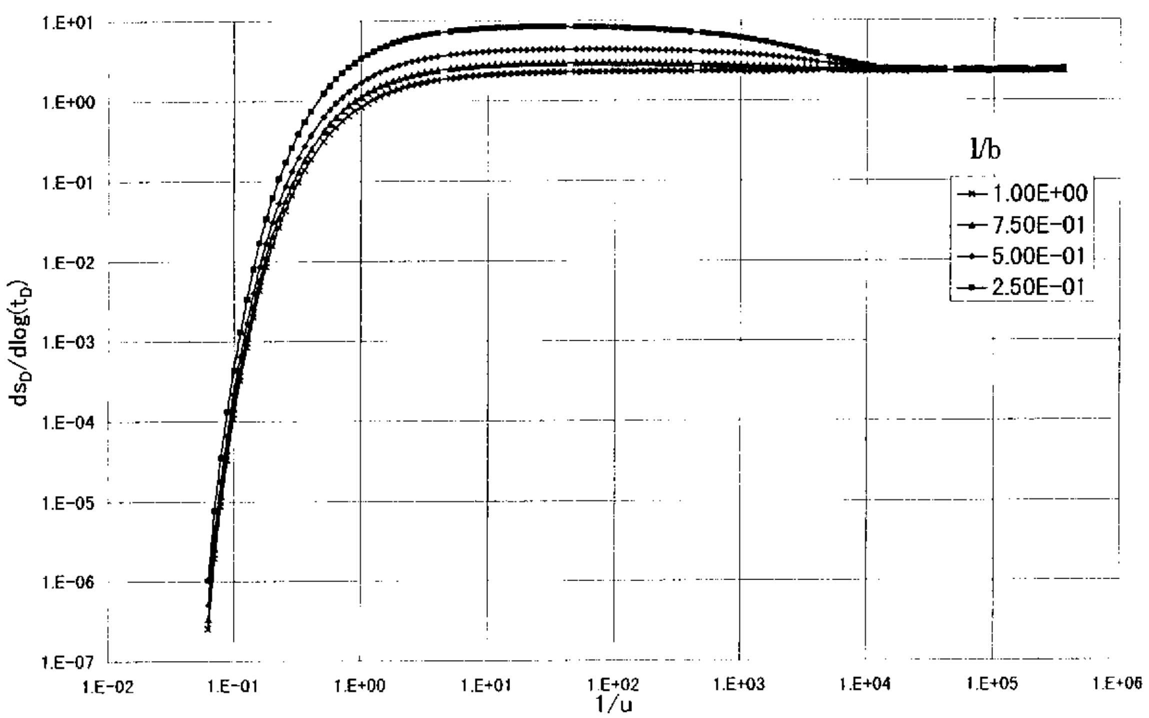
図-2.3.39　無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線勾配（無限遠方境界、漏水無し、貫入率で整理）



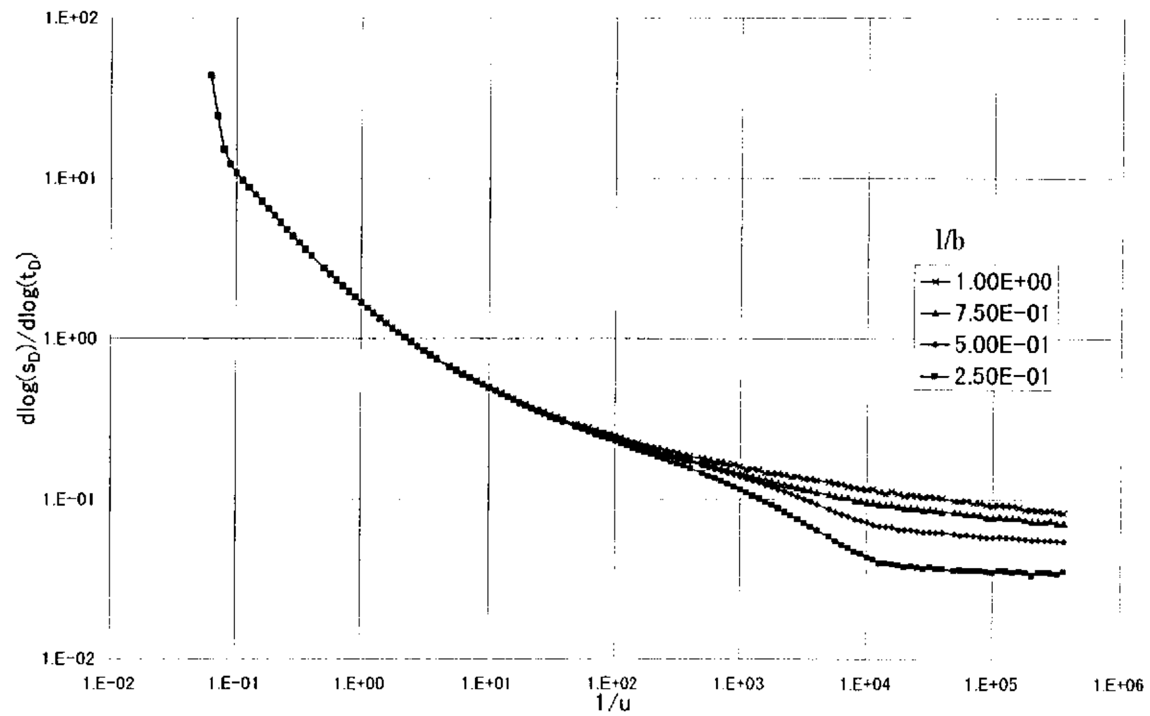
a.log(ds$_D$/dt$_D$) – log(1/u)



b.log(ds$_D$/dln(t$_D$)) – log(1/u)

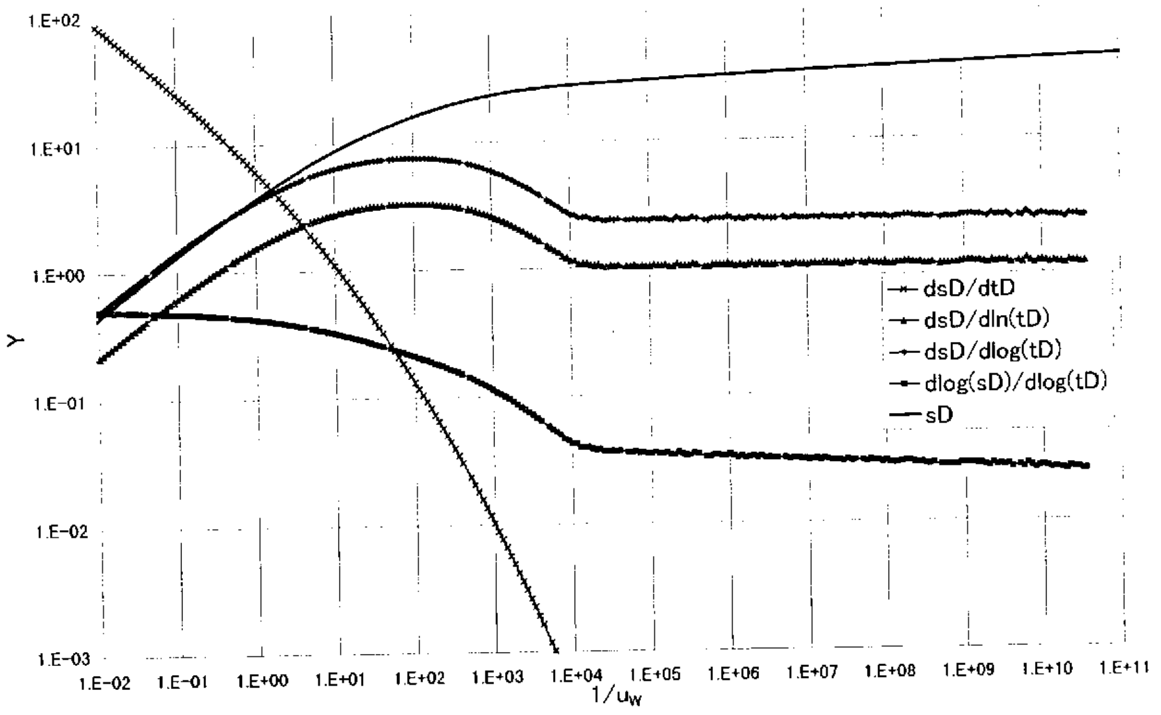


c.log(ds$_D$/dlog(t$_D$)) – log(1/u)

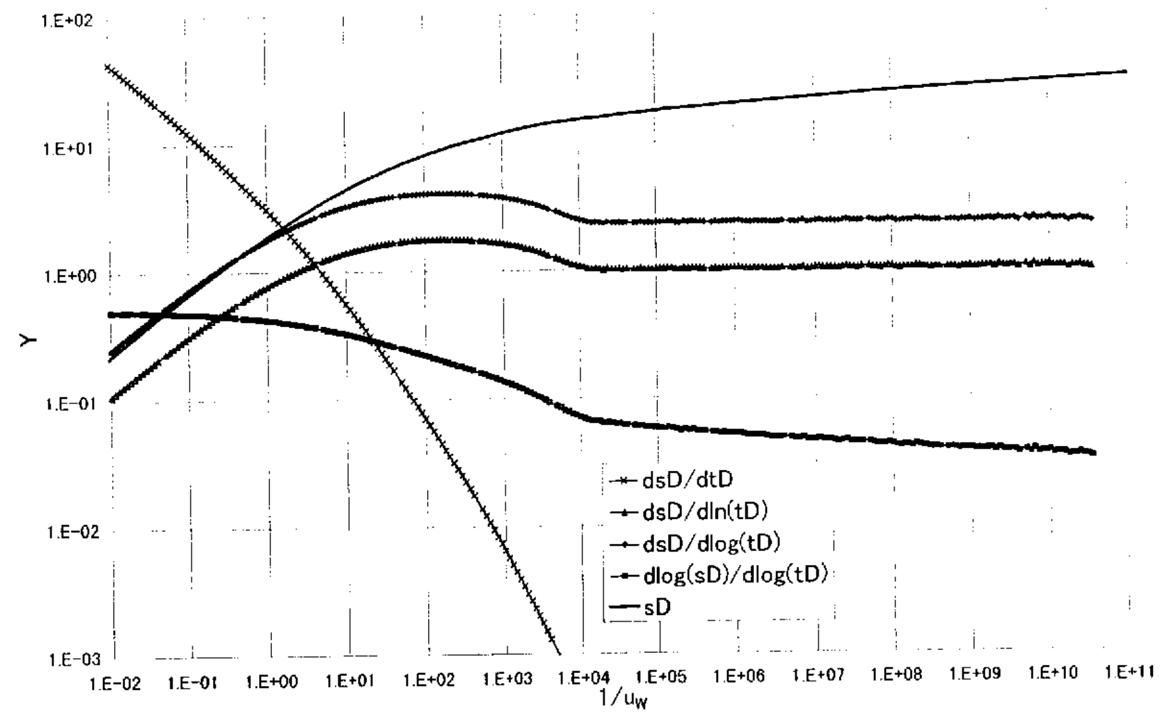


d.log(dlog(s$_D$)/dlog(t$_D$))– log(1/u)

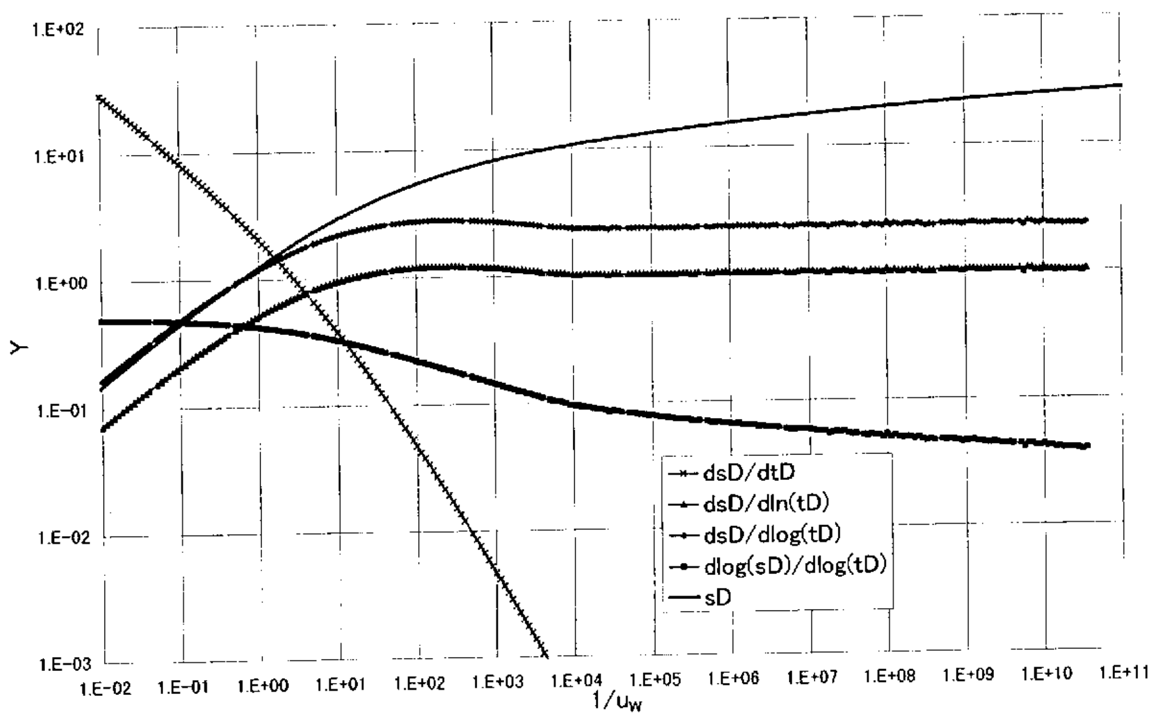
図-2.3.40　無限小径井戸による定量揚水時の標準曲線勾配（(無限遠方境界、漏水無し、勾配の種類で整理)



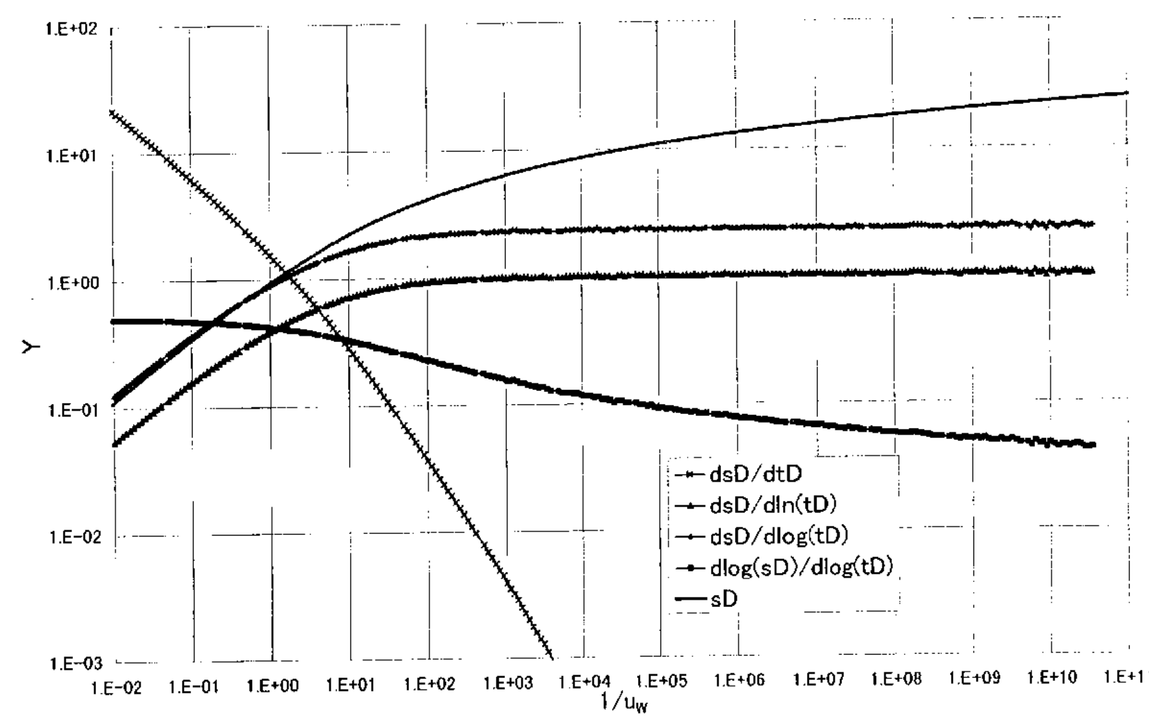
a. $l/b = 0.25$



b. $l/b = 0.5$

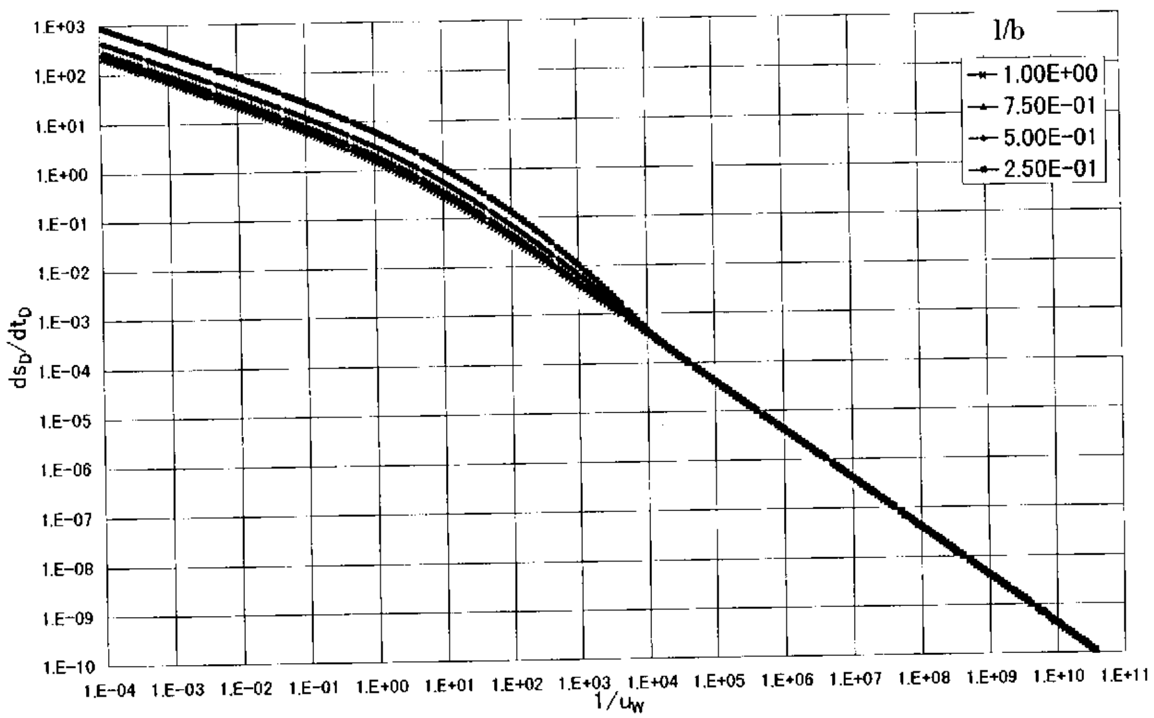


c. $l/b = 0.75$

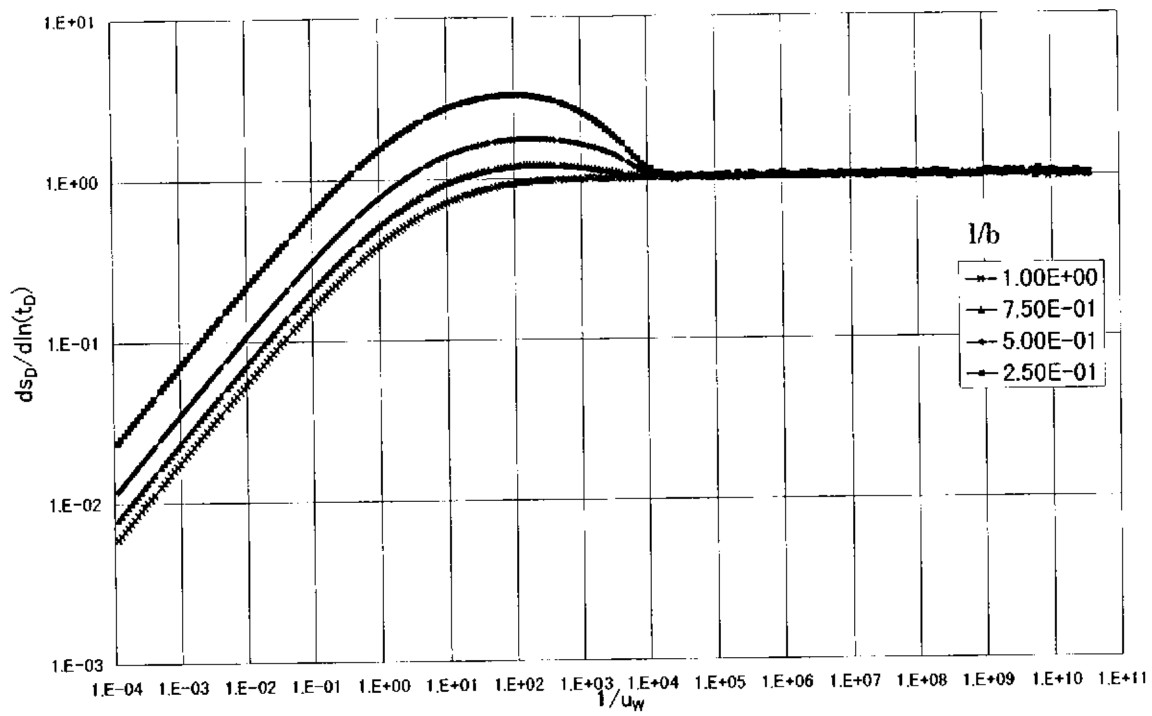


d. $l/b = 1.0$

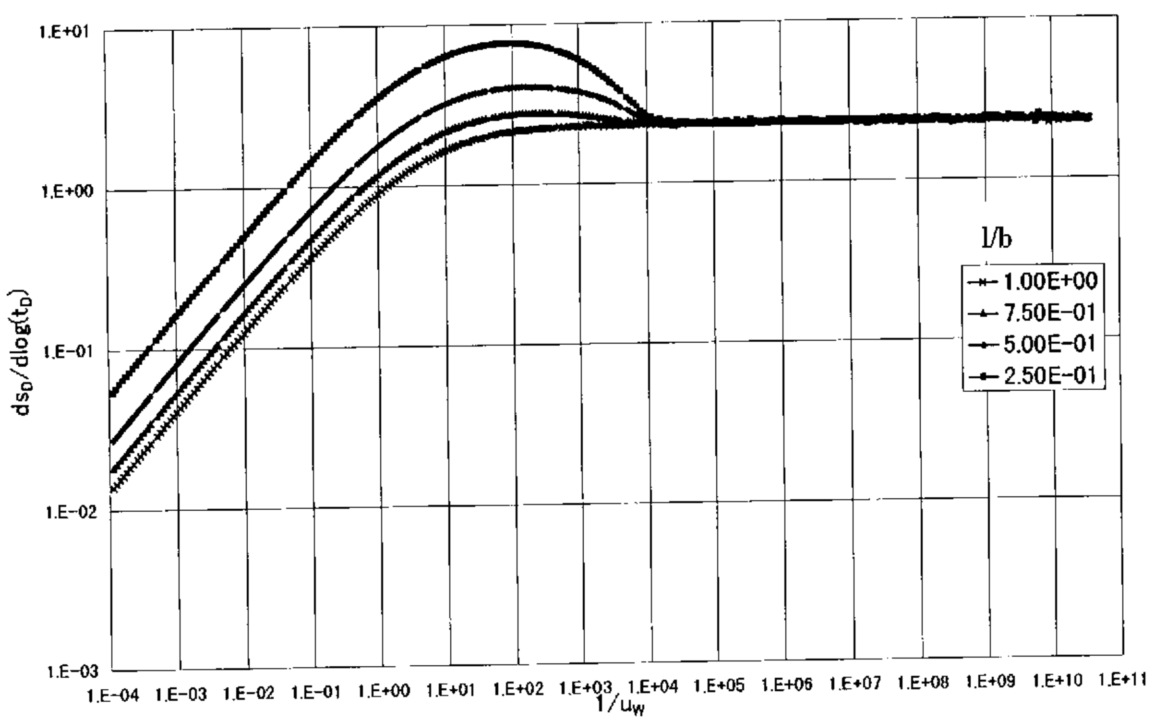
図-2. 3. 41　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線勾配（無限遠方境界、漏水無し、貫入率で整理）



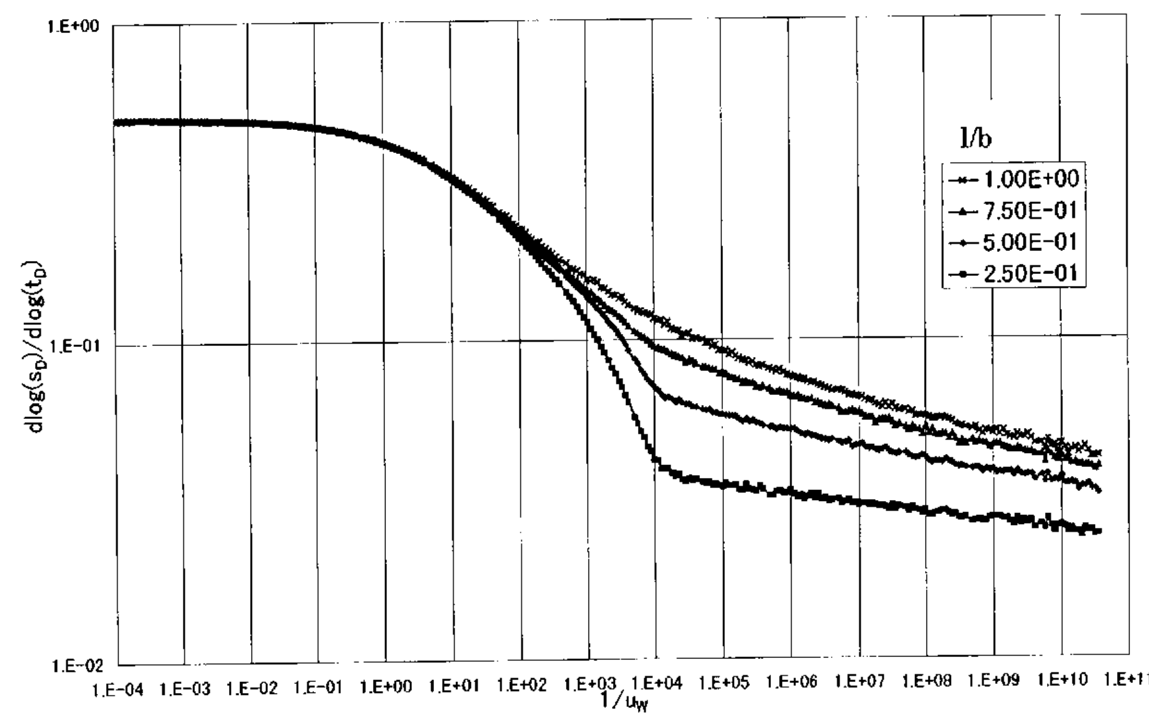
a.log(ds_D/dt_D) – log(1/u)



b.log($ds_D/d\ln(t_D)$) – log(1/u)

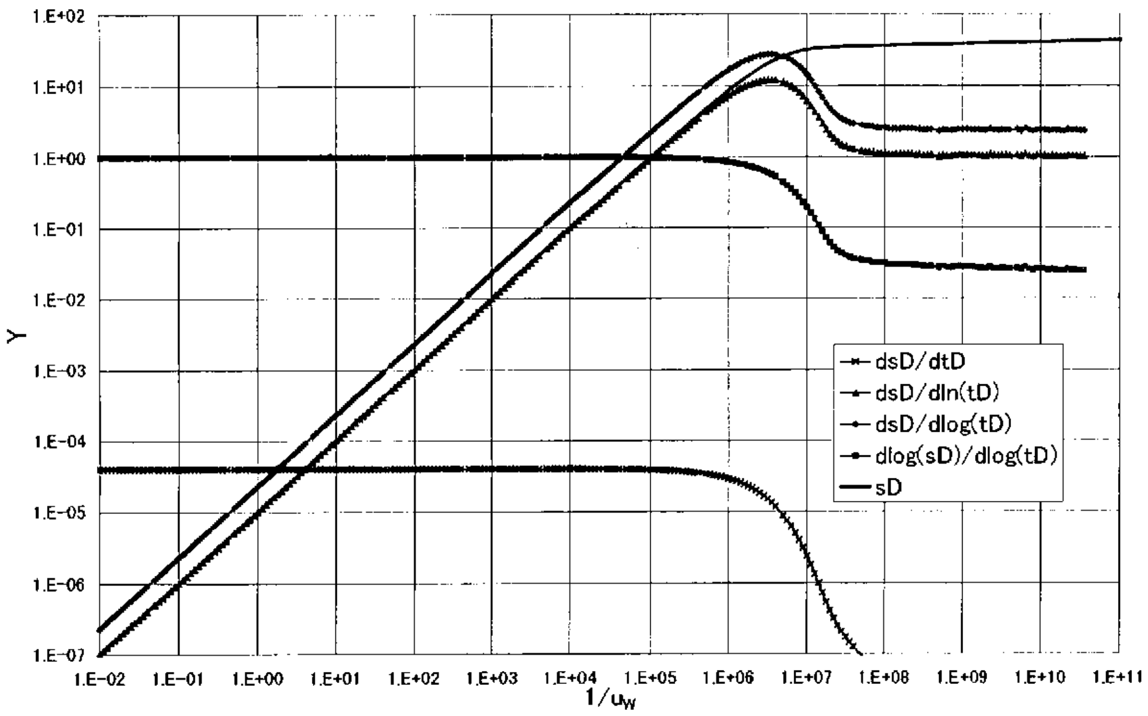


c.log($ds_D/d\log(t_D)$) – log(1/u)

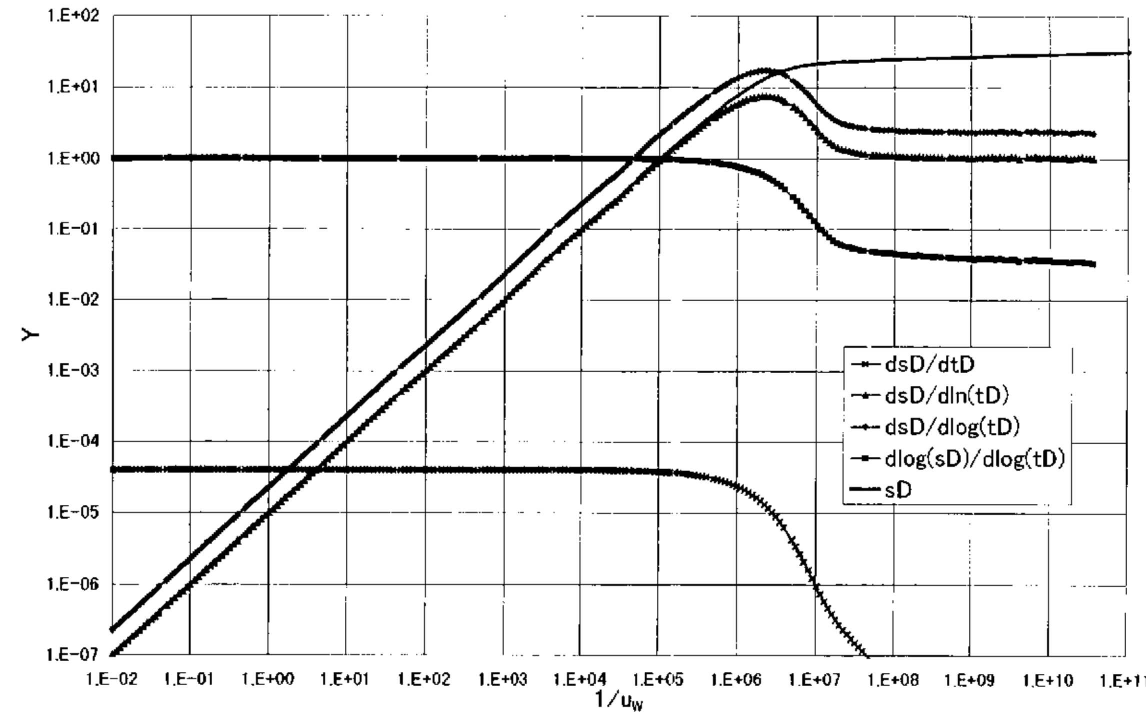


d.log($d\log(s_D)/d\log(t_D)$) – log(1/u)

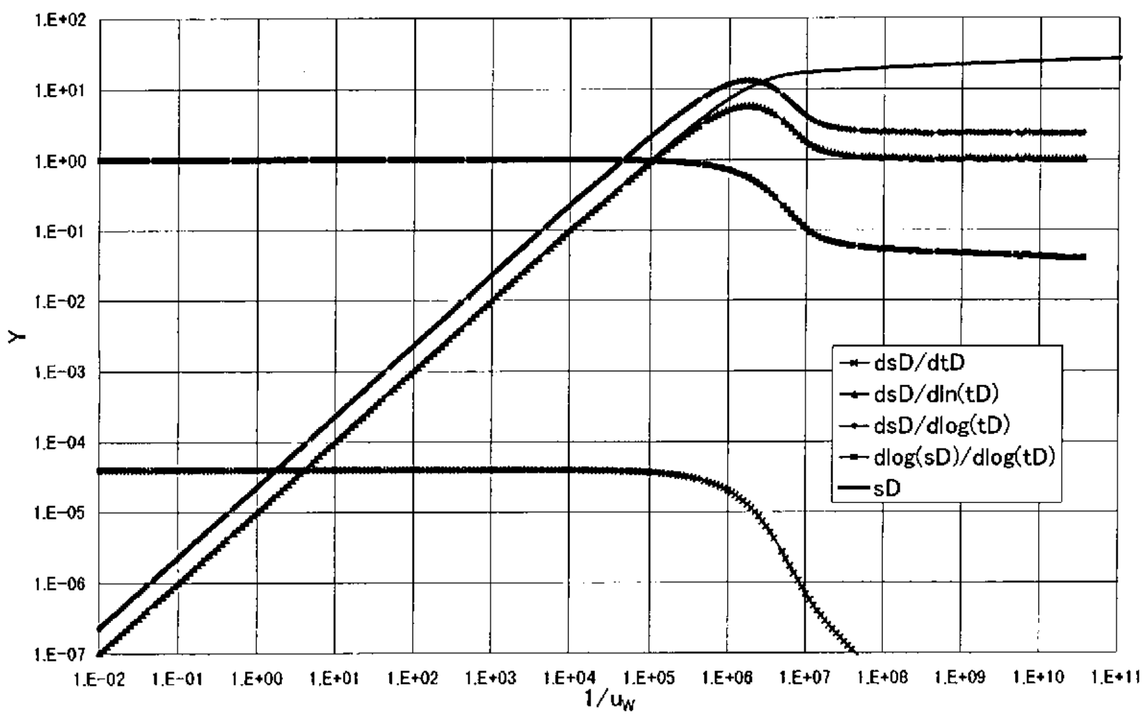
図-2.3.42 有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留無し）の標準曲線勾配 （無限遠方境界、漏水無し、勾配の種類で整理）



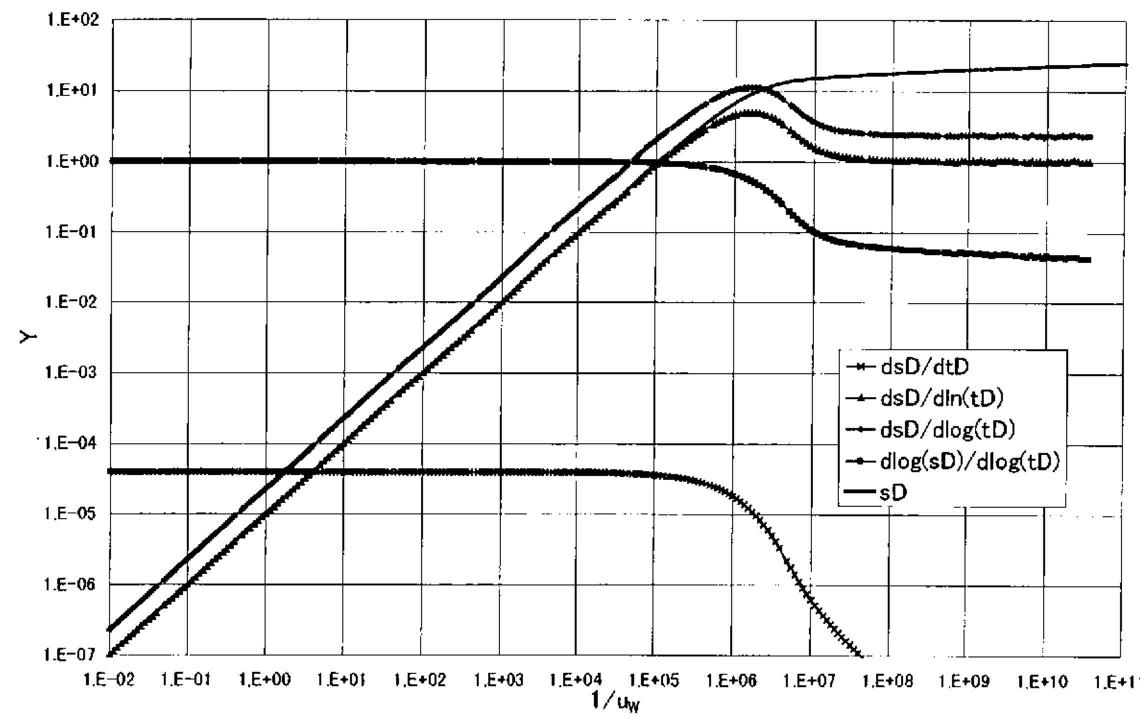
a. $l/b = 0.25$



b. $l/b = 0.5$

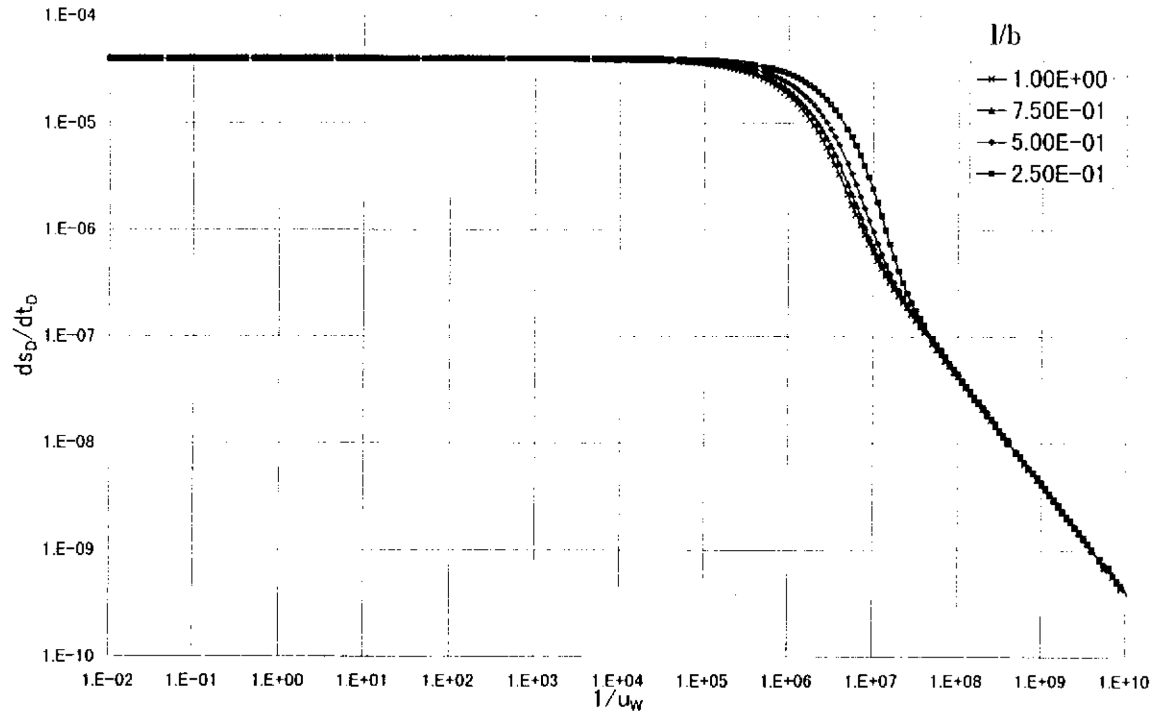


c. $l/b = 0.75$

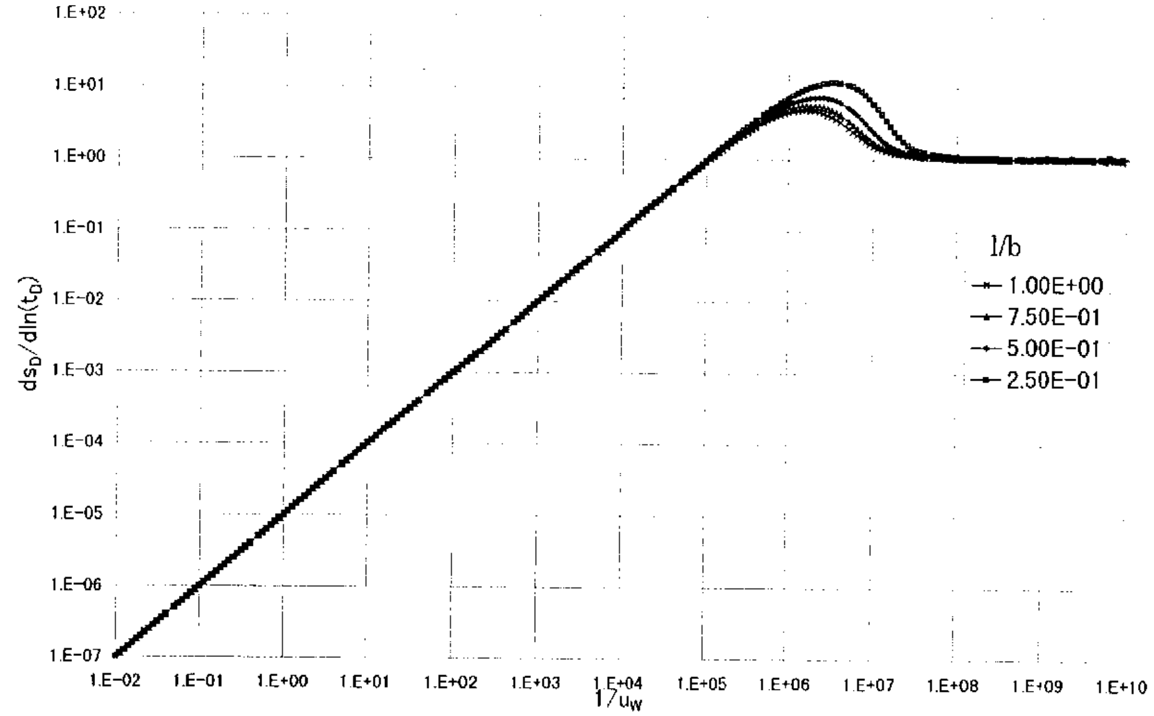


d. $l/b = 1.0$

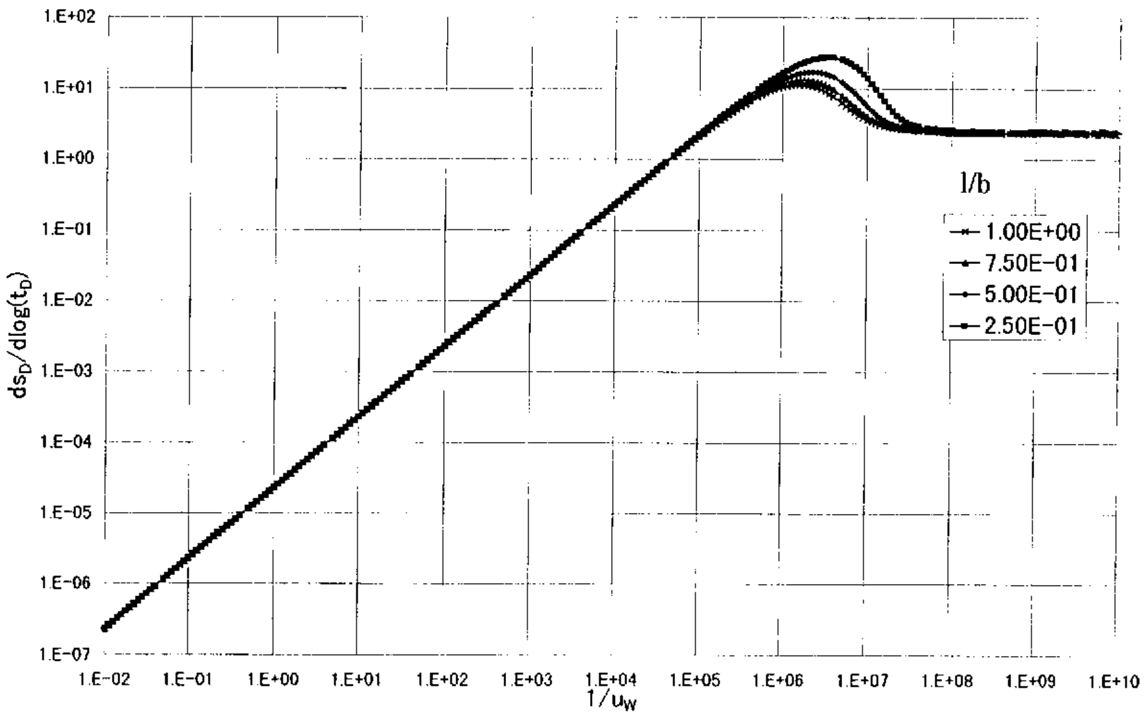
図-2.3.43　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の標準曲線勾配（無限遠方境界、漏水無し、貫入率で整理）



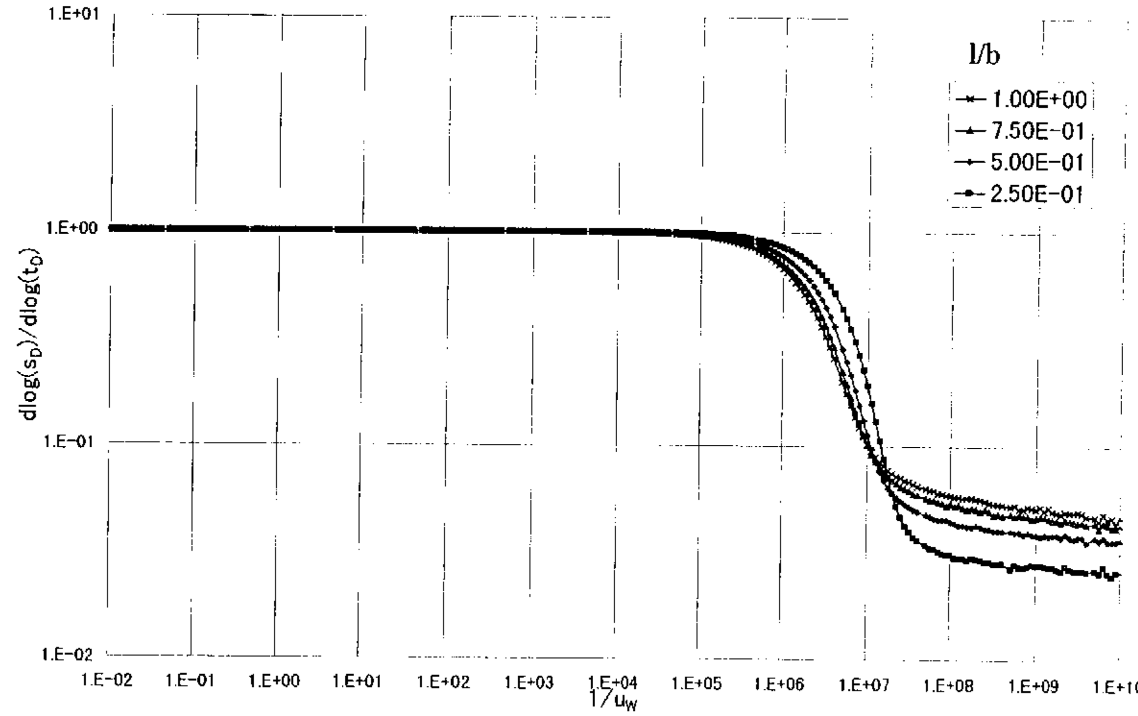
a.log(ds_D/dt_D) – log(1/u)



b.log($ds_D/dln(t_D)$)-- log(1/u)

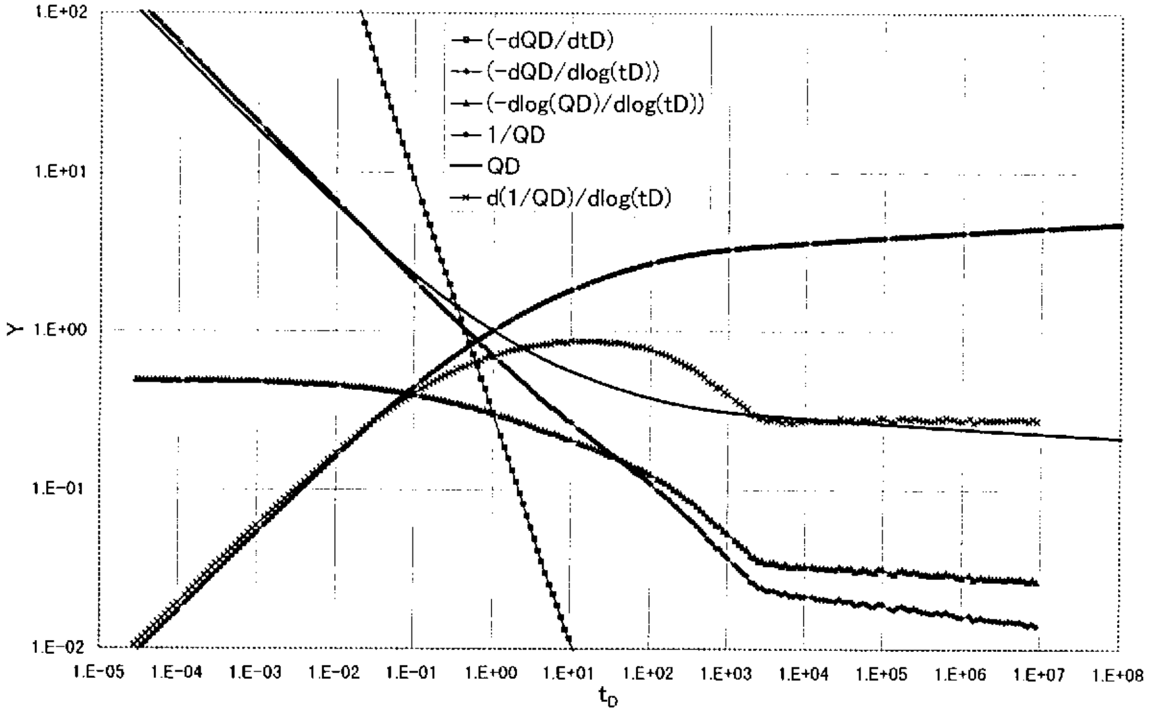


c.log($ds_D/dlog(t_D)$) – log(1/u)

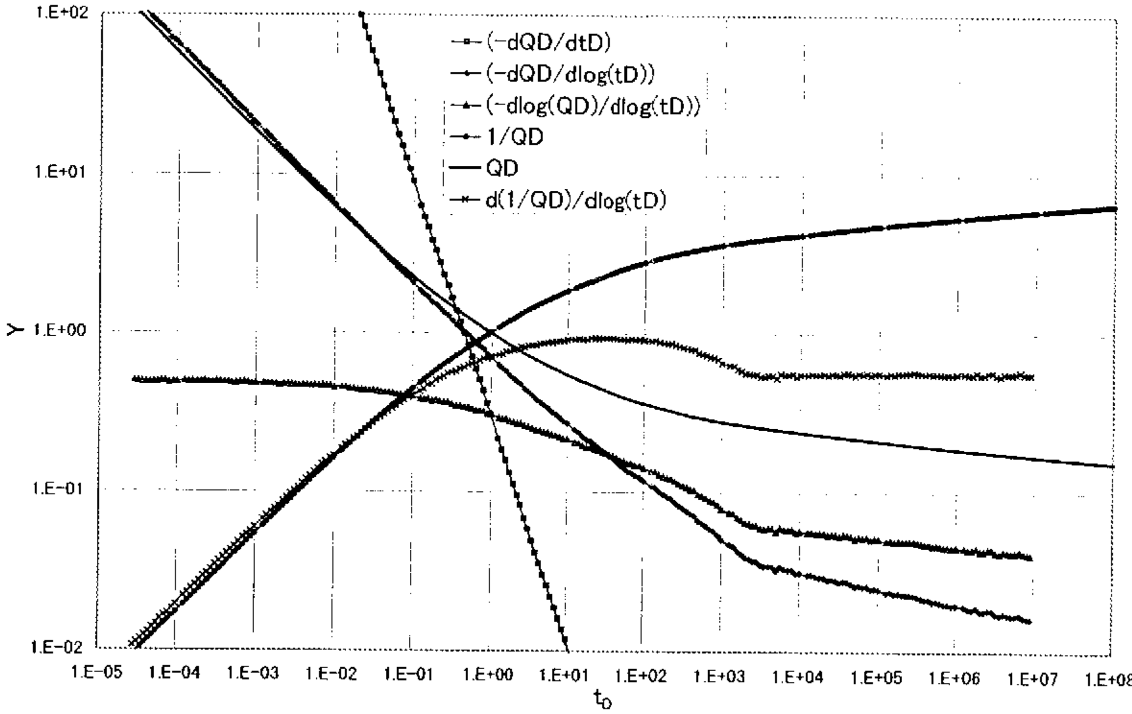


d.log($dlog(s_D)/dlog(t_D)$) – log(1/u)

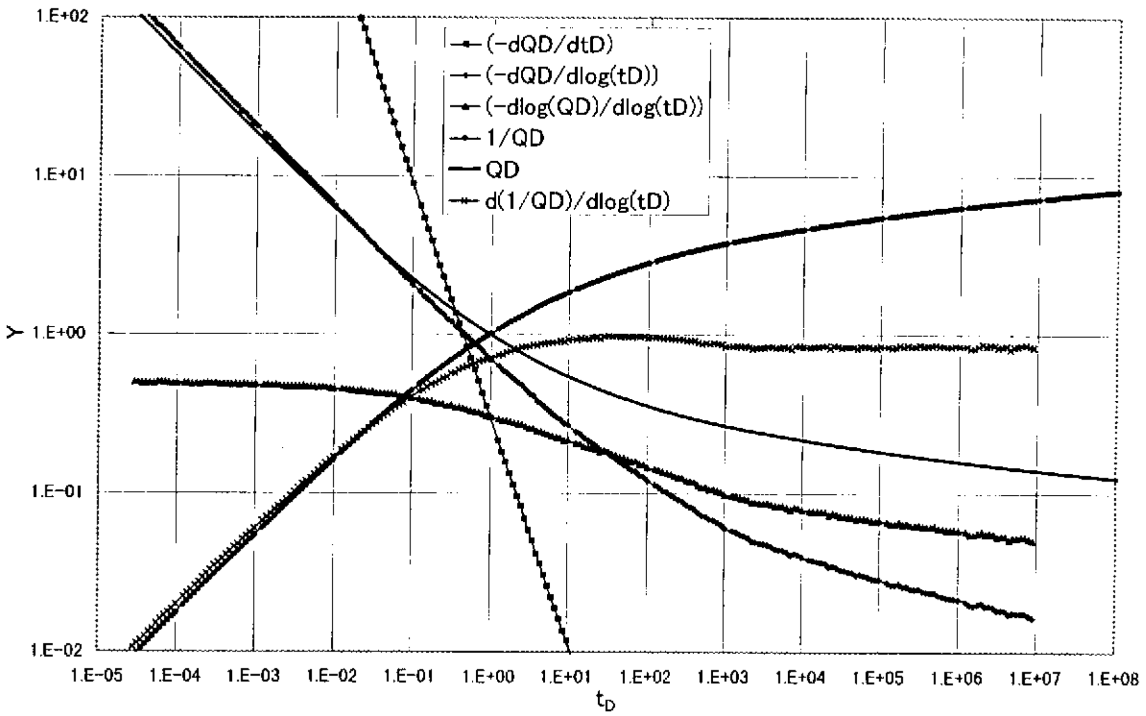
図-2. 3. 44　有限径井戸による定量揚水時（井戸貯留有り）の標準曲線勾配（無限遠方境界、漏水無し、勾配の種類で整理）



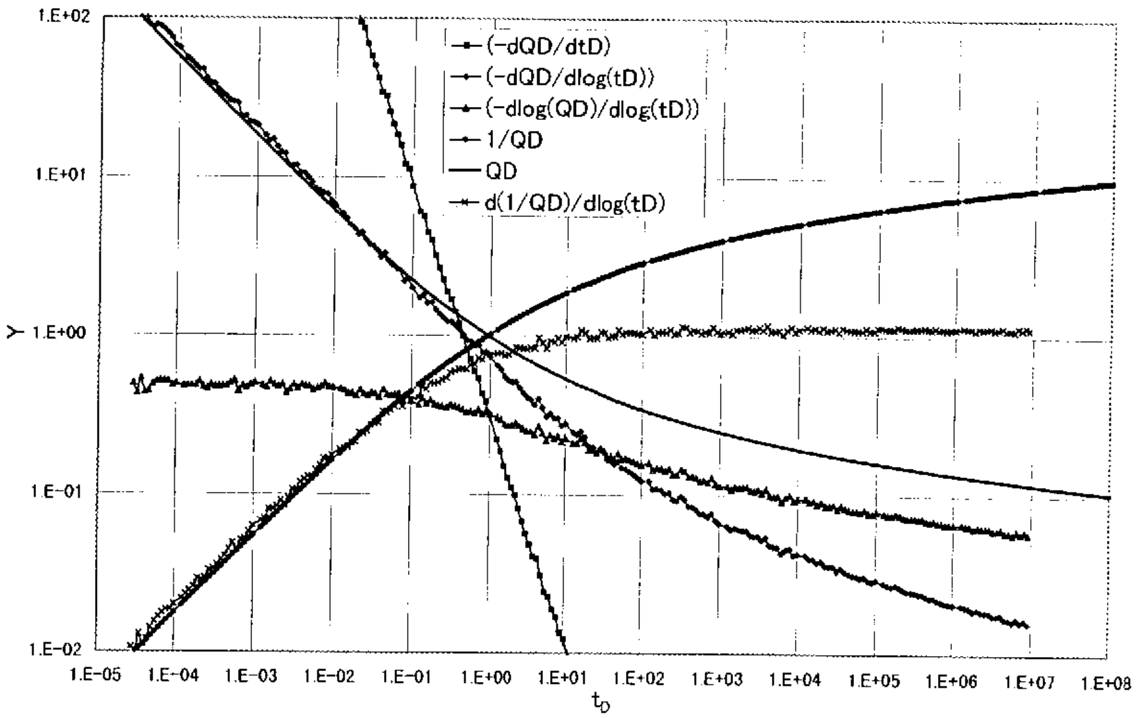
a. $l/b = 0.25$



b. $l/b = 0.5$

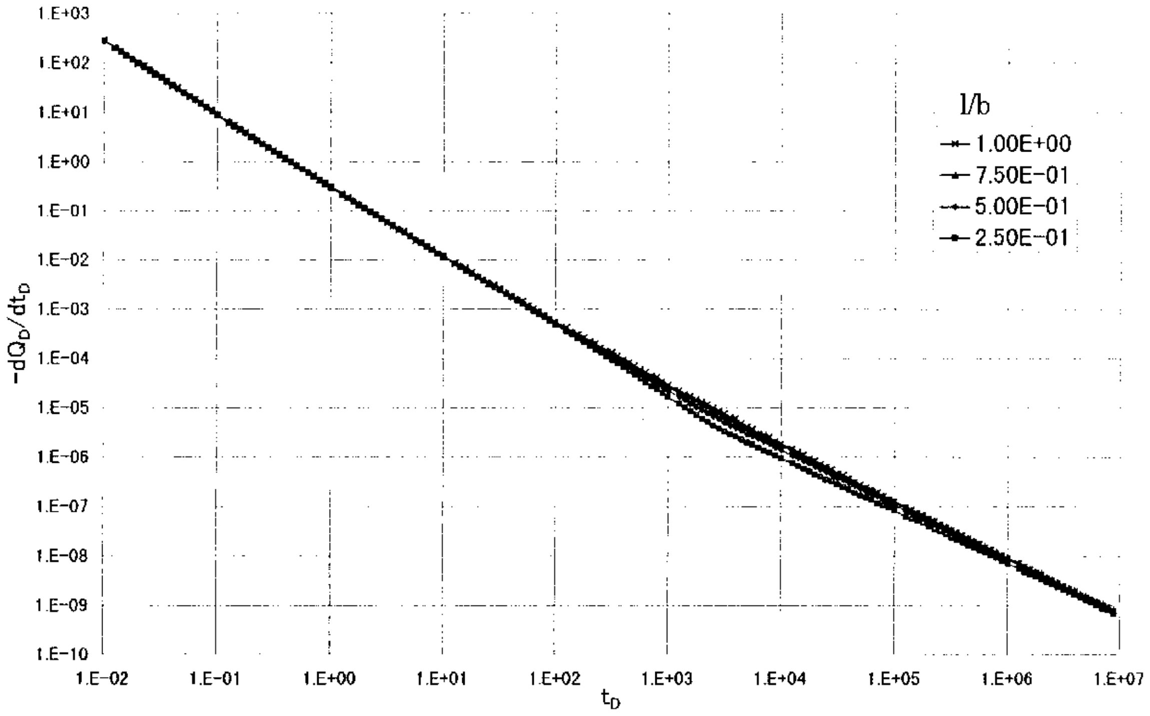


c. $l/b = 0.75$

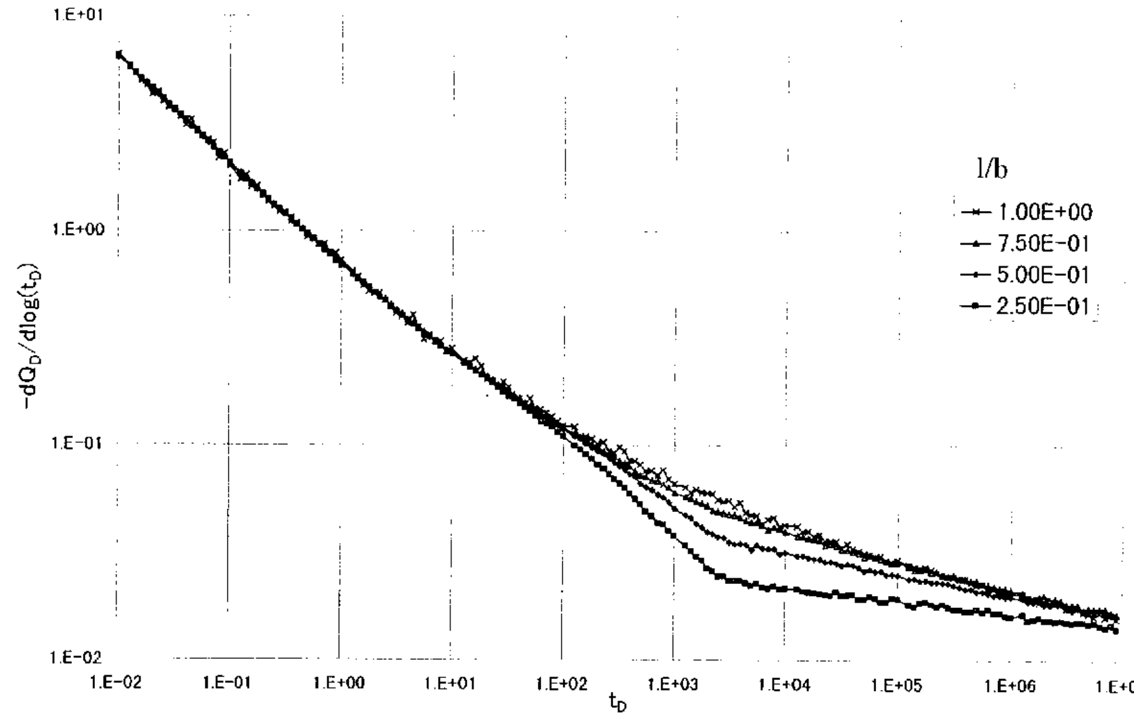


d. $l/b = 1.0$

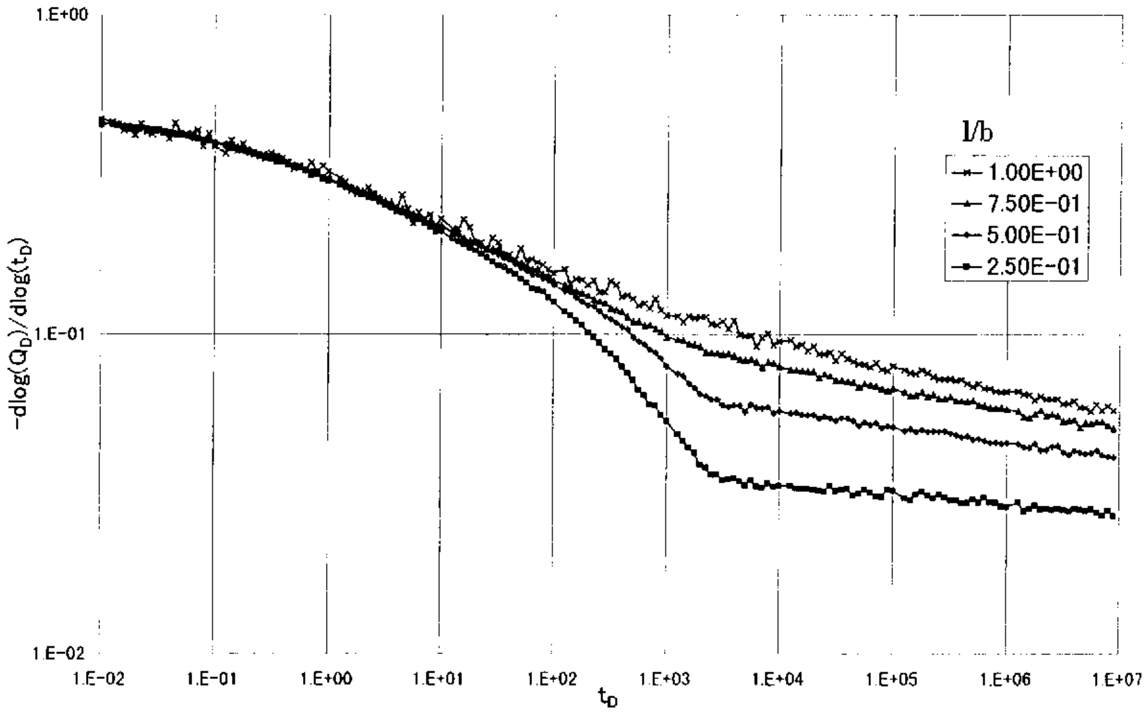
図-2.3.45　定圧揚水時の標準曲線勾配（無限遠方境界、漏水無し、貫入率で整理）



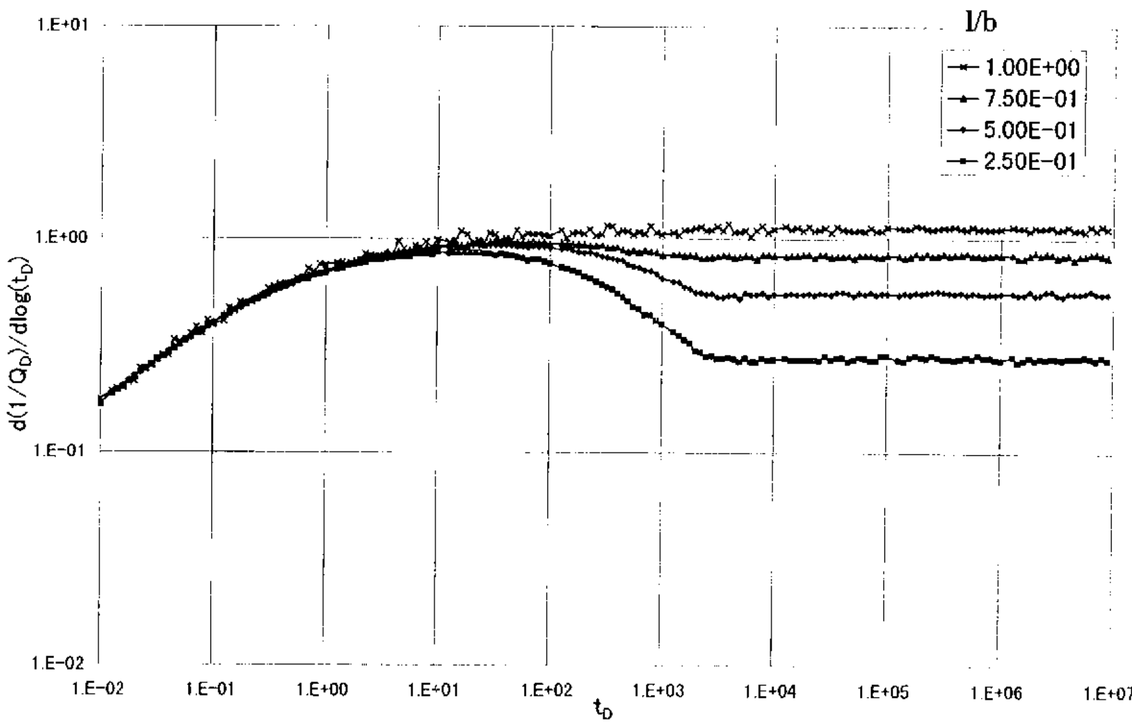
a.log(-dQ$_D$/dt$_D$) – log(t$_D$)



b.log(-dQ$_D$/dlog(t$_D$)) – log(t$_D$)



c.log(-dlog(Q$_D$)/dlog(t$_D$)) – log(t$_D$)



d.log(d(1/Q$_D$)/dlog(t$_D$))– log(t$_D$)

図-2.3.46　定圧揚水時の標準曲線勾配（無限遠方境界、漏水無し、勾配の種類で整理）

２．４ 単孔式揚水試験への提言

単孔による揚水試験でみられる試験結果の標準曲線の作成およびその特徴をまとめたが、ここではこれより得られた知見をまとめ、実際の試験実施および試験結果の整理に対する提言を試みる。

まず、昨年度行われた全層ストレーナー井戸による揚水試験時の検討業務（その２）[2)]を合せて考察すると単孔による揚水試験では以下の特徴があると考えられる。

(1)単孔による揚水試験の特徴

以下の特徴が確認されている。

○定量揚水：・井戸貯留の影響は両対数軸上の整理では傾き１の直線が確認できる。
・定水位影響圏、漏水層上端定水位境界の各条件では長時間揚水後に定常状態に達する。
・不透水影響圏境界条件では長時間揚水後に井戸枯れをおこし、この影響を受けると両対数軸上の整理では傾き１の直線が確認できる。
・部分インターバルが長いほど水位低下量は少なくなる。
・部分インターバル井戸で異方性透水性地盤の場合、異方性が強くなると（水平流が卓越すると）インターバル長を帯水層厚とした全層ストレーナ揚水時の挙動に漸近する。
・長時間揚水後には Jacob-Cooper 式が適用できる。直線部の傾きから算定される透水係数(この時、T=Krb)は、インターバル長には依存しないが、比貯留係数の評価は、全層ストレーナー時のみ有効である。また、これら二つの浸透特性以外の特性については Jacob-Cooper 法のみによって定量的に評価することは困難である。
・標準曲線とのマッチング手法では、Kr、Ss を評価することができる。影響半径、漏水層の浸透特性などの水理境界特性については、複数の標準曲線群から選ばれる最適曲線値から評価されるため、事前に対象とする特性の影響を表現する標準曲線をあらかじめ用意しておく必要がある。

○定圧揚水：・定水位影響圏、漏水層上端定水位境界の各条件では長時間揚水後に定常状態に達する。
・不透水影響圏境界条件では、長時間揚水後に揚水流量０となる。
・部分インターバルが長いほど、揚水流量は大きくなる。
・長時間揚水後には 1/Q-log(t)関係に Jacob-Cooper 式が適用できるが、直線部の傾きから算定される透水係数(この時、T=Krb)はインターバル長には依存しないが、比貯留係数の評価は全層ストレーナー時のみ有効である。また、これら二つの浸透特性以外の特性については Jacob-Cooper 法のみによって定量的に評価することは困難である。
・標準曲線とのマッチング手法では、Kr、Ss を評価することができる。

・他の特性については、複数の標準曲線群から選ばれる最適曲線値から評価されるため、事前に対象とする特性の影響を表現する標準曲線をあらかじめ用意しておく必要がある。

○回復試験：・我国では適用事例を見ないマッチング手法と標準曲線群を示した。

・標準曲線とのマッチング手法では、Kr、Ss を評価することができる。

・他の特性(影響圏半径、漏水層の浸透特性など)については、複数の標準曲線群から選ばれる最適曲線値から評価されるため、事前に対象とする特性の影響を表現する標準曲線をあらかじめ用意しておく必要がある。

・直線勾配法 1 および直線勾配法 2 は井戸関数(W(u))を Jacob-Cooper の直線近似で表す公式を用いて誘導している。このため、揚水を停止する時間、及びその後の回復挙動を評価する時間はそれぞれ揚水後及び停止後十分に時間の経過した範囲となるように設定する必要がある。

・定水位境界および漏水条件の影響を受けて定常状態に至ってからの回復挙動には、直線勾配法 1 の適用は不適であるが、直線勾配法 2 は良好である。しかしながら、部分インターバル長の影響を受けると、直線勾配法 2 における貯留係数の評価ができず、適用には問題がある。また、これら直線部分を用いた整理手法の適用では、より長い区間の直線部が有効であり、このためには、回復時に井戸貯留をできるだけ小さくする工夫が必要である。

○標準曲線勾配：標準曲線勾配値の種々のプロットを比較したところ、特に貫入率(l/b)の違いに対しては以下の特徴がみられた。

・定量揚水試験における水位低下量 s_D に対する時間微分 ds_D/dt_D, $ds_D/dln(dt_D)$および $ds_D/dlog(t_D)$は、揚水時間の比較的早い時間と遅い時間で貫入率に関係なく一つの曲線で表わすことができ、中間の時間では貫入率の違いが見られる。ただし、井戸貯留の無い、有限井戸径井戸の場合は、早い時間では貫入率の違いがみとめられる。

・同じく $dlog(s_D)/dlog(t_D)$は揚水時間の中間の時間までは一つの曲線で表わすことができるが、遅い時間では差違がみられる。

・定圧揚水試験における揚水流量 Q_D に対する時間微分 dQ_D/dt_D,は、揚水時間の比較的早い時間と遅い時間で貫入率に関係なく一つの曲線で表わすことができ、中間の時間では貫入率の違いが若干見られる。

・同じく$-dQ_D/dln(dt_D)$、$dlog(-Q_D)/dlog(t_D)$および $(-1/Q_D)/dlog(t_D)$は、揚水時間の比較的早い時間では一つの曲線で表わすことができるが、中間以降の時間では差違がみられる。

・勾配の標準曲線の形状は通常の標準曲線のそれと異なり、パラメータの特徴を反映し易いと考えられ、今後の利用に期待が持てる。

(2) 単孔による揚水試験への提言

揚水試験には以下の目的を持つ必要がある。

- 透水係数の評価
- 比貯留係数の評価
- 漏水／影響圏など境界条件の評価

これに対して、単孔揚水井戸のもつ井戸半径および井戸貯留の影響、さらには部分インターバル揚水井戸の影響は、試験結果の整理を複雑にする要因となっている。このため、よりよい揚水試験を実施する方針としては、以下の二つの考え方に立脚する必要がある。

一つは、極力影響のないあるいは定量的な要因を明確にした試験を行い、試験結果に影響する未知影響要因を削除するものである。例えば、他の試験や調査で得ることのできる情報は事前情報として極力取り込もうというものである。すなわち、井戸貯留項 C_W や比貯留係数 Ss は、室内試験などである程度把握することが可能である。また、透水層が明確であるなら、インターバルはこの層をターゲットに設置することで全層（あるいは完全）貫入状態とすることが可能である。

残る一つは、ここで示した標準曲線群の傾向から影響要因の影響が無いあるいは少なくなる範囲のデーターを整理するという方針である。種々の要因が重なり合った試験結果に Jacob-Cooper 法に代表される近似解法あるいは図式解法の適用には十分な注意が必要である。特に、所定のグラフ軸上プロットにみられる直線部分の傾きや座標軸との切片値を用いるこの種の手法では、単に直線部の抽出にのみ着目していると間違った部分を直線視してしまう、という過ちを犯す可能性が(多くのケースでありうる事が)確かめられた。この意味では、マッチング手法は、想定される影響要因を取り込んだ標準曲線が作成できるので、透水係数 Kr と比貯留係数 Ss の算定、および、組み合わされた影響要因を定量的に評価できる利点がある。当然、従来より指摘されているように、マッチング技法は目視による判定であることから人為誤差導入の問題があったが、近年では、標準曲線をデジタル処理することで計算機によるマッチング処理とその結果である観測値との残差を用いて表現するなどの技法が適用できるマッチング技術は飛躍的に向上していると考えられる。

３．定圧揚水後の回復試験データの解析手法に関する検討

３．１検討概要

揚水試験後の水位回復挙動から地盤の浸透特性を評価する回復試験は、一般に揚水試験で要求される種々の設定条件の管理が不要である事から、試験の実施が容易になり精度の高い試験結果が得られると考えられている。特に、揚水試験実施の観点から比較すると、現場における試験実施時には、定流量揚水では井戸内水位が低下していく（揚程が時間とともに大きくなっていく）状態での定流量の揚水や、井戸枯れにより試験が失敗に終わることに比べ、定圧揚水では、設定した管理水位内で揚水を行えばよいため、試験そのものも簡単であることから、今後は、実施される機会も増えると見込まれる。従って、定圧揚水後の回復挙動からの地盤定数推定方法を検討することは意義のあることと思われる。

しかし、定流量揚水からの回復に関する整理手法の知見は多いが、定圧（定水位）揚水からの回復のそれについては以下に示すように、理論的な取り扱いの問題から、十分な検討がなされていない現状にある。

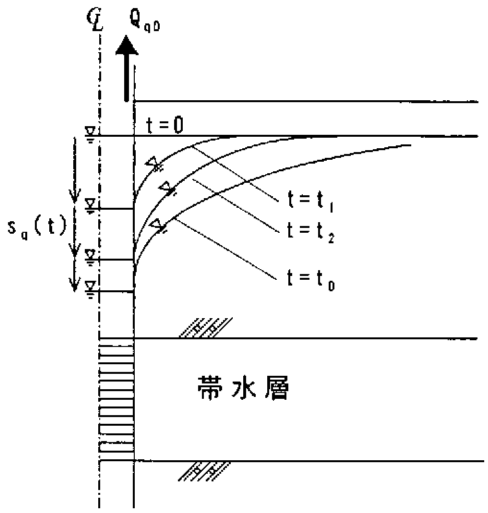
定流量揚水後の回復試験ではLaplace変換技法あるいはRaghavanが説明した鏡像法[10]の適用によって、回復時の挙動を極めて簡易に重ね合わせ式で表現できることが知られている。我が国では非定常状態からの回復試験から透水係数を推定する手法として Theis[1]や Horner[12]らの提案した方法(以下、従来法と呼ぶ)が一般に用いられており、また、西垣・高坂[4]の改良された方法(以下、改良法と呼ぶ)もその有用性が知られている。しかし、これらは定流量揚水後の回復挙動に対応したもので、揚水井内の圧力を一定にした揚水を行う定圧揚水後の回復挙動に対しては定流量揚水後の回復挙動で用いられている重ね合わせの技法を直ちに適用する事はできないためか、我が国での適用例は見られない。

ＳＫＢ技術レポート（86-27）[13]では、Uraiet ら[14]の論文を引用し、揚水停止直前の流量を用いて回復挙動を表現する方法を紹介しているものの、この方法が有効となるために必要な揚水時間について、十分な理論的説明はなされていない。

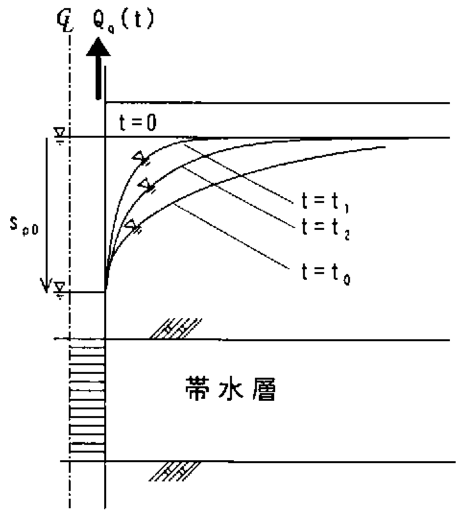
そこで本章では Uraiet らの手法をレビューし、その妥当性を確認し、特徴を解説する。

3．2　定圧揚水後の回復挙動の考え方と理論的検証

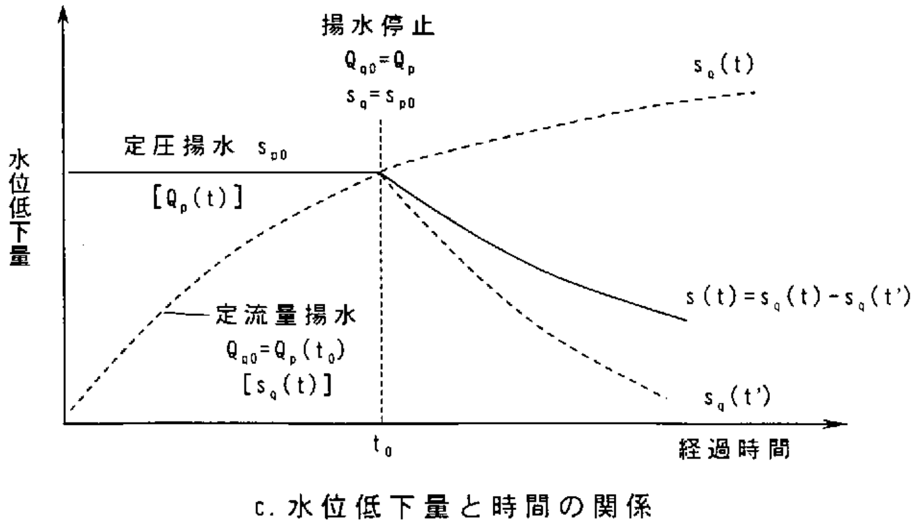
Uraiet ら[14)]は「定圧揚水を停止する直前の揚水流量Q_pを観測し、その後の回復挙動を観測した時、回復挙動はあたかもこの流量Q_pによる定流量揚水後の回復挙動として扱うことができる」という仮定から、定圧揚水試験後の回復試験結果に定流量揚水試験後の解析方法が適用できるとの考えを示した。すなわち、図 3.2.1, 図 3.2.2 に示すように、定圧揚水試験における停止時の揚水流量Q_pで同じ時間定流量揚水した場合と井戸内及び周辺の水頭分布が同じであれば、回復挙動は揚水方法によらない。ゆえに、定圧揚水試験後の回復挙動の解析を揚水停止時の揚水流量Q_pで定流量揚水したたものとして、井戸関数の重ね合わせを用いた定流量揚水試験後の回復試験の解析手法を適用し、帯水層定数の推定ができるということを示している。



a. 定流量揚水時の水頭変化挙動



b. 定圧揚水時の水頭変化挙動



c. 水位低下量と時間の関係

図 3. 2. 1　両揚水試験の揚水流量及び井戸内水位の関係

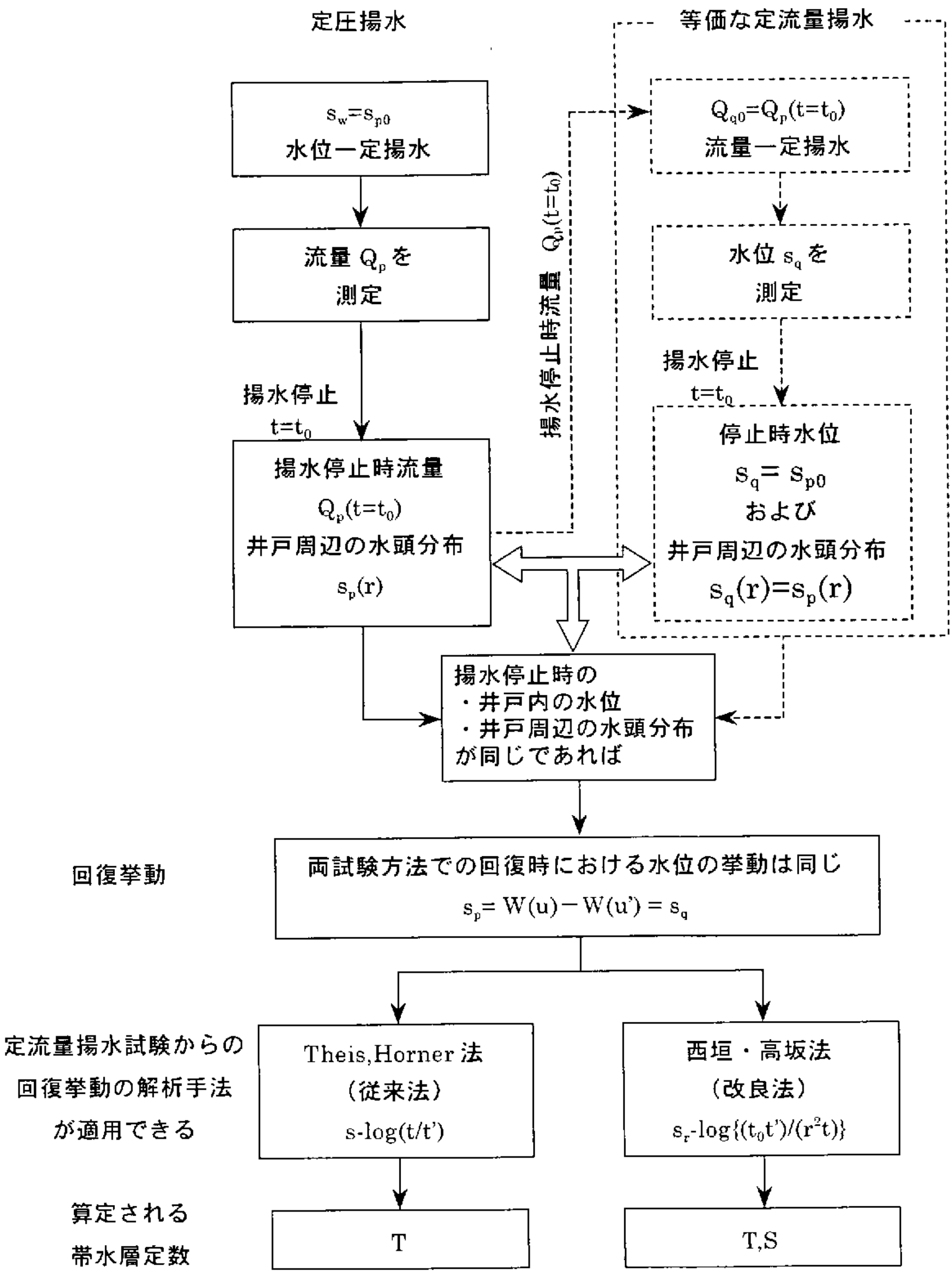


図 3. 2. 2　定圧揚水試験からの回復試験の解析フロー

Uraiet ら [14]の仮定の妥当性を検証するためには、定圧および定流量の両揚水試験の間で以下の事項を確認する必要がある。

(1) 揚水停止時の揚水流量と井戸内水位低下量が両揚水試験でそれぞれ一致する。

(2) 揚水停止時の井戸周辺水位低下量が両揚水試験で一致する。

この2事項を満たす条件を考える。

(1) は以下の関係式の成立をもって確認できる。

$$Q_p = Q_{q0} \quad \cdots\cdots \quad (3.2.1) \quad , \quad s_{p0} = s_q \quad at \ r = r_w \quad \cdots\cdots \quad (3.2.2)$$

ここで、

Q_p:定圧揚水時の揚水流量 , Q_{q0}:定流量揚水時の揚水流量

s_{p0}:定圧揚水時の井戸内水位低下量 , s_q: rでの定流量揚水時の水位低下量

このとき、Q_pおよびQ_{q0}は以下に示す式(3.2.4)、(3.2.5)で表すことができる。これを式(3.2.1)、(3.2.2)の関係に代入すると、式(3.2.6)が得られる。つまり, 式(3.2.6)を満たす場合に前述した確認事項(1)が成り立つこととなる。

定圧揚水時の揚水流量Q_pは式(3.2.3)のように表される。

$$Q_p = 2\pi T\left(r\frac{ds_p}{dr}\right)_{r=r_w} \quad \cdots\cdots \quad (3.2.3)$$

ここに、r:井戸中心からの半径方向の距離 $[L]$, r_w:井戸半径 $[L]$

s_p:rでの定圧揚水時の水位低下量 $[L]$, T:地盤の透水量係数 $[L^2T^{-1}]$

上式は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned}
Q_p &= 2\pi T\left(\frac{r}{r_w}\frac{ds_p}{d(r/r_w)}\right)_{r=r_w} \\
&= 2\pi T\left(r_D\frac{ds_p}{dr_D}\right)_{r_D=1}\left(\because r_D = \frac{r}{r_w}\right) \\
&= 2\pi Ts_{p0}\left(r_D\frac{d(s_p/s_{p0})}{dr_D}\right)_{r_D=1} \\
&= 2\pi Ts_{p0}\left(r_D\frac{ds_{pD}}{dr_D}\right)_{r_D=1}\left(\because s_{pD} = \frac{s_p}{s_{p0}}\right) \\
\therefore Q_p &= 2\pi T\cdot s_{p0}\left(r_D i_p\right)_{r_D=1} \quad \cdots\cdots \quad (3.2.4)
\end{aligned}$$

ここに、

s_{p0}:定圧揚水時の井戸内水位低下量 $[L]$, r_D:無次元化された半径$(r_D = r/r_w)$ $[-]$

i_p:定圧揚水時の井戸境界での動水勾配 $[-]$, s_{pD}:定圧揚水時の無次元水位低下量 $[-]$

また、定流量揚水時の揚水流量Q_{q0}は定流量揚水時の無次元水位低下量s_{qD}の定義より、次式のように表される。

$$Q_{q0} = \frac{4\pi T s_q}{s_{qD}} (\because s_{qD} = \frac{4\pi T s_q}{Q_{q0}}) \quad \cdots\cdots \quad (3.2.5)$$

ここに、

s_{qD}: rでの定流量揚水時の無次元水位低下量, s_q: rでの定流量揚水時の水位低下量

式(3.2.1), (3.2.2)の関係より、

$$2\pi T s_{p0} r_D i_p = \frac{4\pi T s_q}{s_{qD}}$$

$$\therefore i_p = \frac{2s_q}{s_{p0} r_D s_{qD}}$$

$$= \frac{2s_q}{s_{p0} s_{qD}} (\because r_D = \frac{r}{r_w} = 1)$$

$$i_p = \frac{2}{s_{qD}} (\because s_{p0} = s_q)$$

または、

$$i_p s_{qD} = 2 \quad \cdots\cdots \quad (3.2.6)$$

を満たす場合に前述した確認事項(1)が成り立つこととなる。

式(3.2.6)が満たされる揚水継続時間範囲を定圧と定流量揚水試験の理論解[2)]の比較で確認した結果を図 3.2.3 に示す。この時、定流量揚水において井戸半径は考慮した。式(3.2.6)が満たされる揚水継続時間範囲は井戸貯留に影響されるため、解を簡素にするために井戸貯留は無視した。

ここで、無次元時間$t_D = Kt/S_S r_w^2$, K:地盤の透水係数 $[LT^{-1}]$, S_S:地盤の比貯留係数$[L^{-1}]$ である。

図 3.2.3 より、$t_D \geqq 10^4$で$i_p s_{qD} \geqq 1.95$ すなわち、式(3.2.6)に示した$i_p s_{qD}$=2 を約 98%以上の割合で満たしており、両揚水試験の流量と井戸内水位低下量は$t_D \geqq 10^4$ の範囲で良く一致することがわかる。

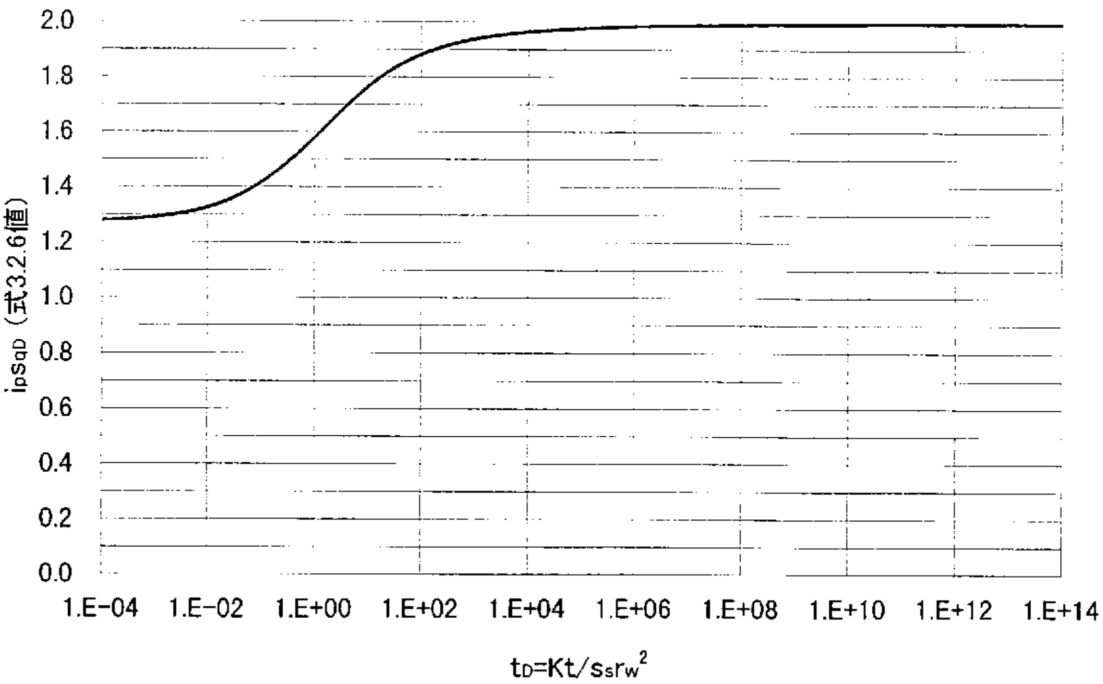


図 3. 2. 3　$i_p s_{qD}$ と t_D の関係

確認事項(2)は同(1)の検討で用いた両揚水試験の理論解 [2)] の水位低下量を比較することで確認することができる。図 3.2.4 に井戸周辺地盤の水位低下量分布の比較を示す。ここで、図 3.2.4 中の縦軸指標は両揚水試験の井戸周辺地盤の水位低下量と、定圧揚水試験における孔内水位との比（s_p/s_{p0} あるいは s_q/s_{p0}）で表したものであるが、理論解から得られる無次元量を用い以下の手順で求めた。

定圧揚水における無次元水位の定義より、

$$s_{pD} = \frac{s_p}{s_{p0}}$$

である。

次に、s_q/s_{p0} は次のように導かれる。揚水停止時における定圧揚水試験の揚水流量で同じ時間定流量揚水したとき、式(3.2.4)及び式(3.2.5)の関係は式(3.2.7)のようになる。

$$Q_p = 2\pi T \cdot s_{p0} \cdot i_p = \frac{4\pi T s_{q(r=rw)}}{s_{qD(r=rw)}} = Q_{q0}$$

$$\therefore \frac{s_{q(r=rw)}}{s_{p0}} = \frac{i_p \cdot s_{qD(r=rw)}}{2} \quad \cdots\cdots \quad (3.2.7)$$

ここに、

$s_{q(r=rw)}, s_{qD(r=rw)}$:定流量揚水時の井戸境界における水位低下量および無次元水位低下量

また、定流量揚水の井戸周辺の水位低下と井戸境界の水位低下の比は式(3.2.8)のように

表される。

$$\frac{s_q}{s_{q(r=rw)}}=\frac{\dfrac{4\pi T s_q}{Q_{q0}}}{\dfrac{4\pi T s_{q(r=rw)}}{Q_{q0}}}$$

$$=\frac{s_{qD}}{s_{qD(r=rw)}} \quad \cdots\cdots \quad (3.2.8)$$

ここに、

s_{qD}：r での定流量揚水時の無次元水位低下

よって(3.2.7)式，(3.2.8)式より、s_q/s_{p0} の関係式は式(3.2.9)のように導かれる。

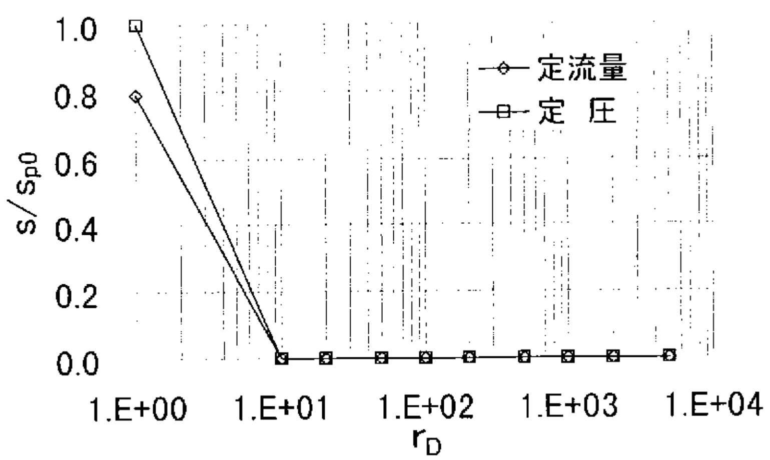
$$\frac{s_q}{s_{p0}}=\frac{s_{q(r=rw)}}{s_{p0}}\cdot\frac{s_q}{s_{q(r=rw)}}$$

$$=\frac{i_p\cdot s_{qD(r=rw)}}{2}\cdot\frac{s_{qD}}{s_{qD(r=rw)}}$$

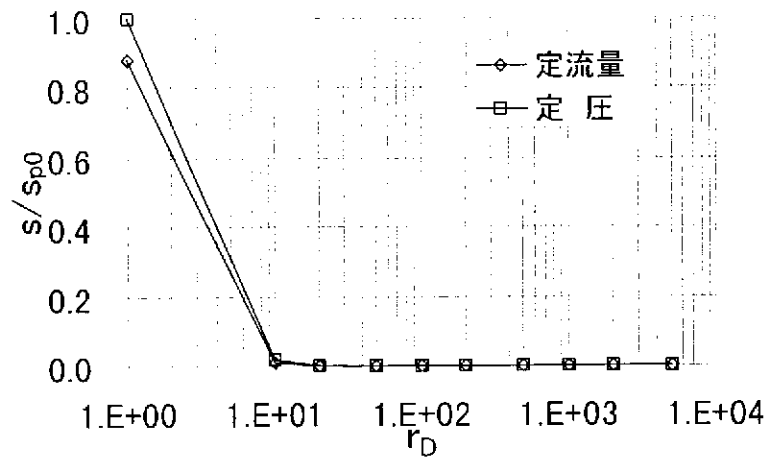
$$\frac{s_q}{s_{p0}}=\frac{i_p\cdot s_{qD}}{2} \quad \cdots\cdots \quad (3.2.9)$$

図 3.2.4 より、井戸周辺地盤の水位低下量分布比（s_p/s_{p0}，s_q/s_{p0}）は揚水継続時間 t_D の増加に伴い良く一致する傾向にあり、$t_D \geqq 10^4$ では両揚水試験における井戸周辺の水位低下量分布はほぼ一致していることがわかる。図 3.2.4 での両揚水方法の水位低下量の差を表したものが図 3.2.5 である。図 3.2.5 からも $t_D \geqq 10^4$ では両揚水試験における井戸周辺の水位低下量分布の差はごくわずかであることがわかる。図 3.2.4 および図 3.2.5 から、揚水継続時間が $t_D \geqq 10^4$ であれば、井戸内水位低下量の 2%以下の誤差で両揚水試験の水位低下量分布は良く一致しており、このことから揚水継続時間が $t_D \geqq 10^4$ を満たす場合の定圧揚水試験は、それと等価な定流量揚水試験で表現できることが確認できた。

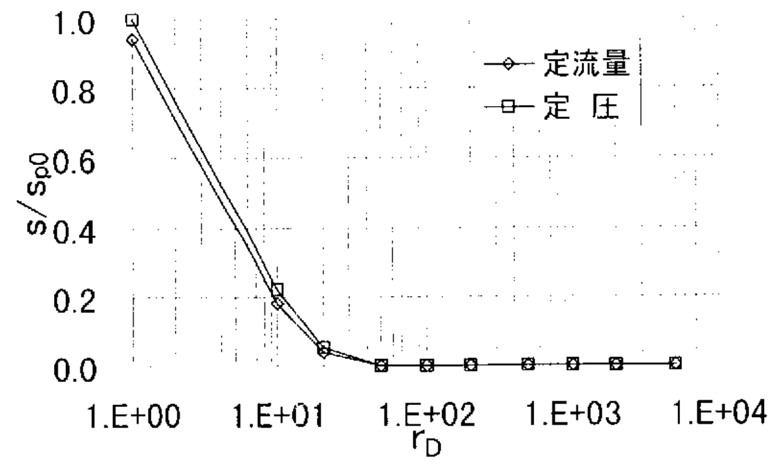
以上より「揚水継続時間が $t_D \geqq 10^4$ のとき、定圧揚水は揚水停止時の揚水流量 Q_p で定流量揚水した場合と井戸周辺の水頭分布が一致し、Q_p を等価定流量と定義するとその回復挙動は等価定流量 Q_p での定流量揚水後の回復とみなすことができ、簡易な重ね合わせ式で表現できる。」ことが理論的に検証できた。



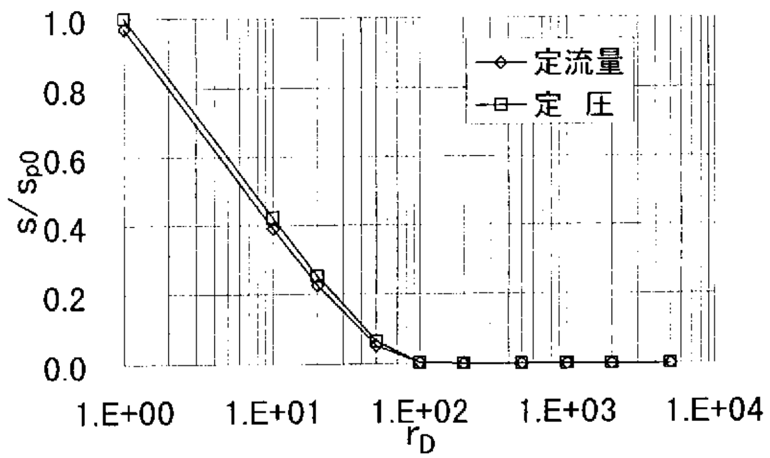
(a) $t_D=10^0$



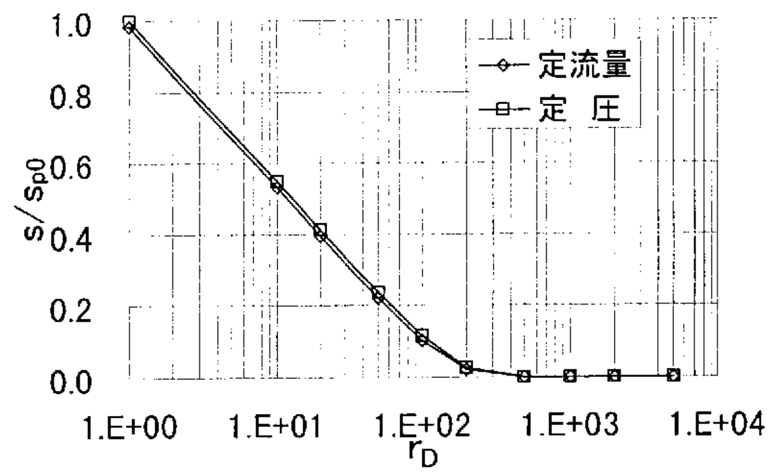
(b) $t_D=10^1$



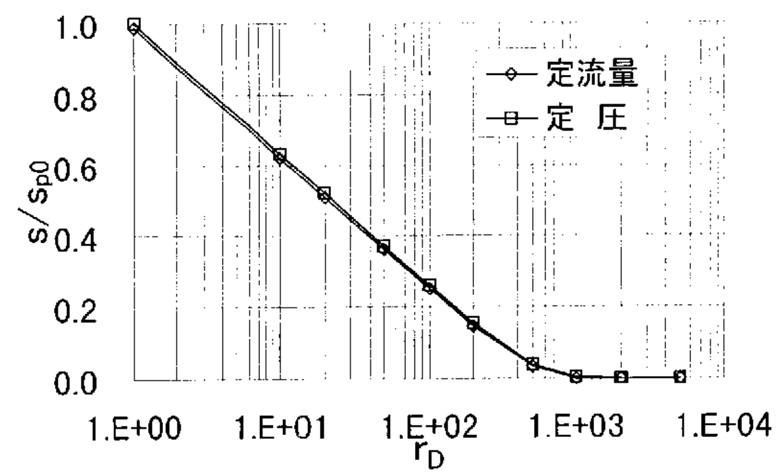
(c) $t_D=10^2$



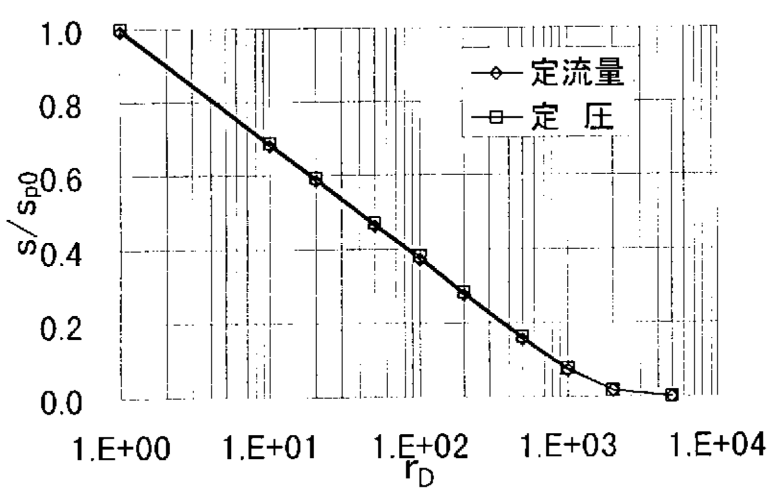
(d) $t_D=10^3$



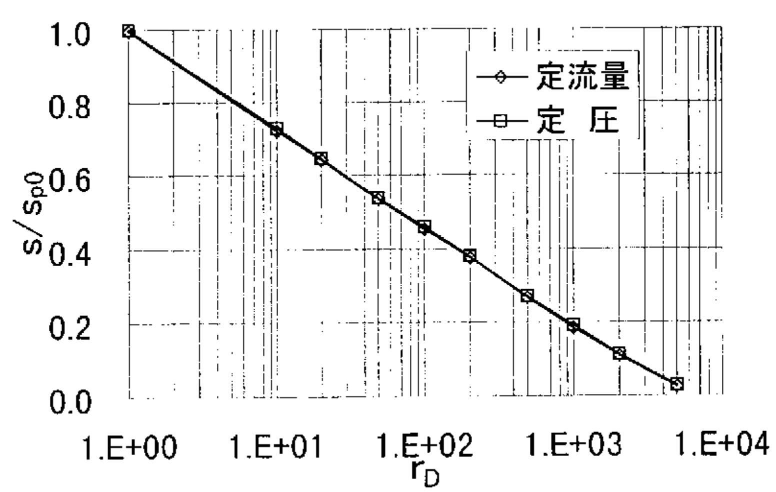
(e) $t_D=10^4$



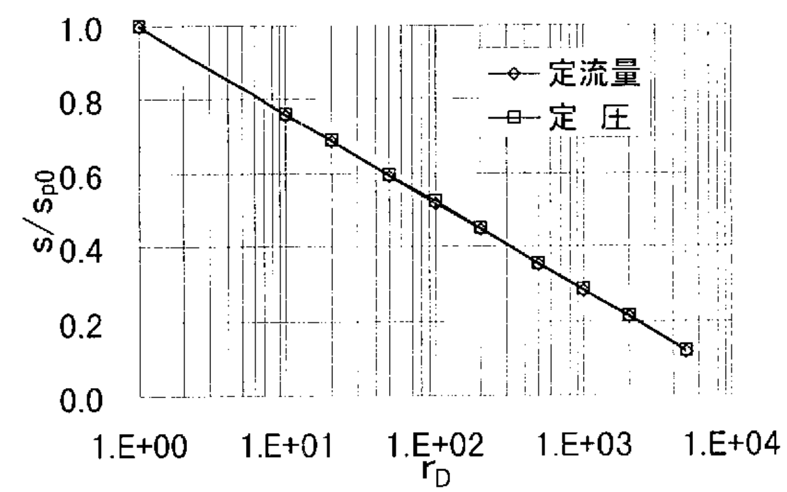
(f) $t_D=10^5$



(g) $t_D=10^6$



(h) $t_D=10^7$



(i) $t_D=10^8$

図 3.2.4　種々の揚水継続時間 t_D における井戸周辺の水位低下量分布（理論解析解）

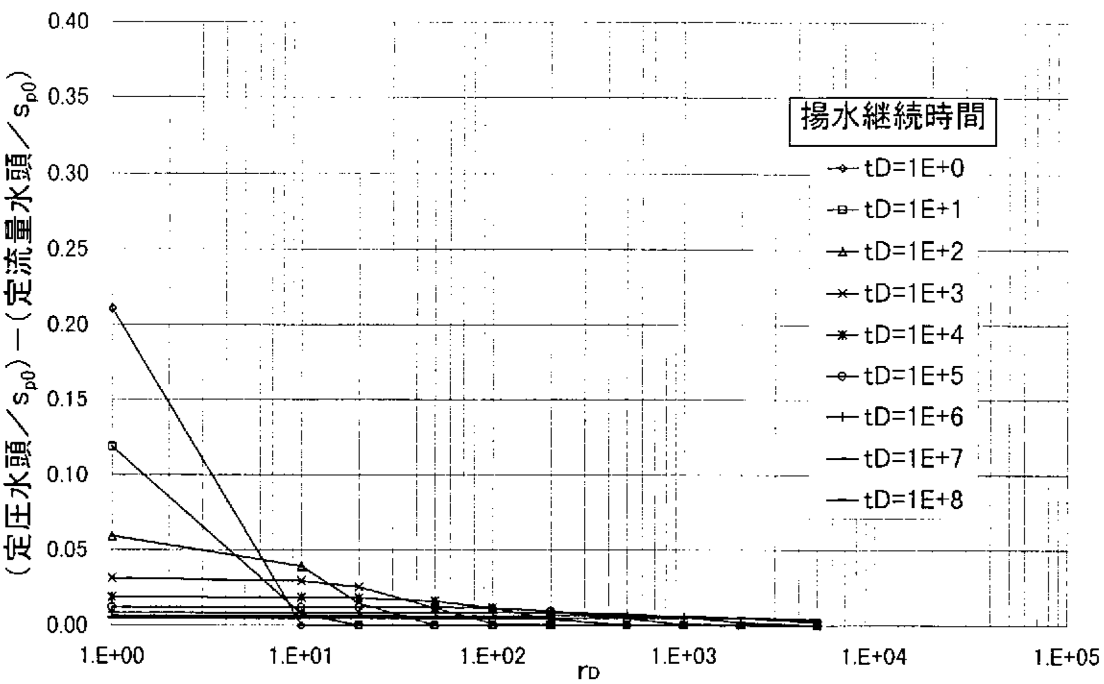


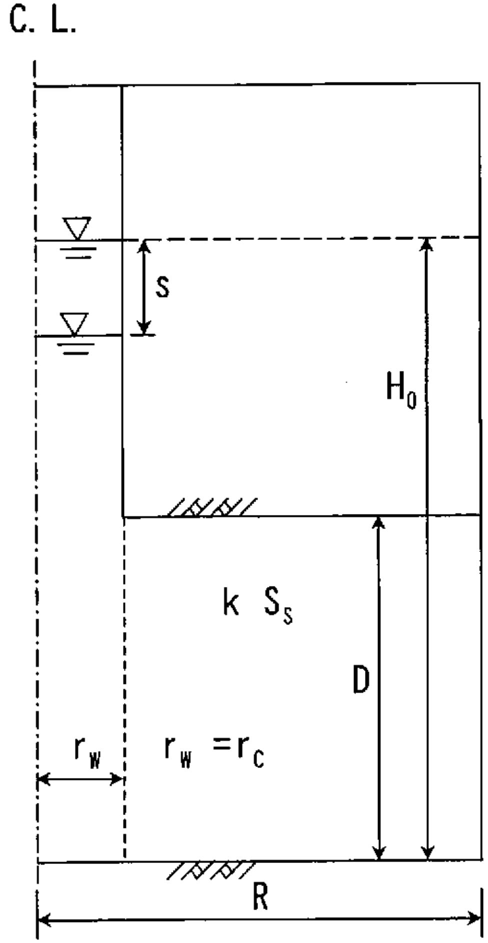
図 3.2.5 井戸周辺の水頭分布の差（理論解析解）

３．３　ＦＥＭを用いた数値的検証

前節で示した理論解の考え方の妥当性を確認するため、有限要素法を用いて定圧と定流量揚水試験の等価性を確認した。さらに、定圧揚水からの回復挙動をシミュレートし、得られた回復挙動に対して従来法[1,12]および改良法[4]の適用性を検証した。解析は図 3.3.1 示す井戸要素に井戸貯留項と等価な材質を与えた被圧帯水層モデル[15]を用いた。

３．３．１　両揚水試験による水位低下量の比較

両揚水試験の水位低下量を比較するために、図 3.3.1 に示したモデルを用いて定圧揚水試験をシミュレートし、種々の揚水継続時間 t_D 毎に観測される揚水流量とその時の水位低下量分布を得た。次に、この時の各継続時間毎の揚水流量での定流量揚水をシミュレートし、揚水停止時間における水位低下量分布を得た。このようにして得られた水位低下量分布を理論解[2]での検証と同様の軸指標で表したものを図 3.3.2 に示す。また、図3.3.2の水位低下量をさらに両揚水方法の低下量の差で表したものが図3.3.3である。図 3.3.2 および図 3.3.3 から、$t_D \geqq 10^4$ であれば、井戸内水位低下量の 2%以下の誤差で両揚水試験の水位低下量分布は良く一致している。このことから、揚水継続時間が $t_D \geqq 10^4$ を満たす場合の定圧揚水試験は、それと等価な定流量揚水試験で表現できることが数値的にも確認できた



帯水層透水係数 $k=10^{-2}$cm/s,　井戸部透水係数 $k'=10^{6}$cm/s

帯水層比貯留係数 $S_s=10^{-6}$1/cm,　井戸比貯留係数 $S_s'=10^{-3}$1/cm

影響圏距離 R=2km,

初期及び影響圏距離地点での水頭 H_0=20m

井戸半径 5cm,　帯水層厚 D=10m, 水位差 s_0=2m（定圧揚水）

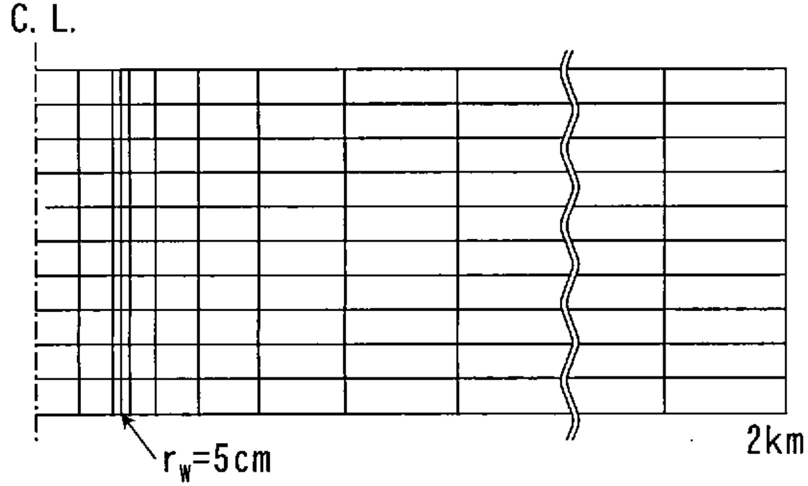
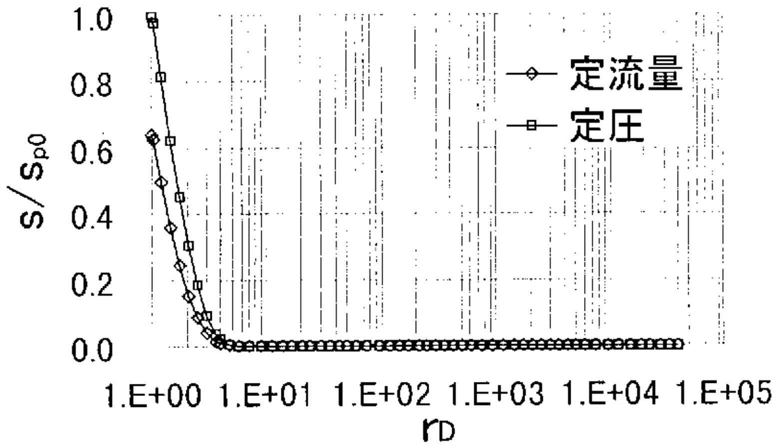
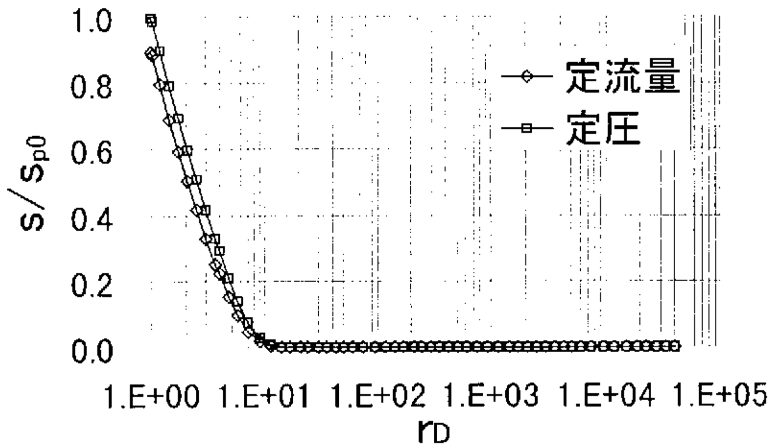


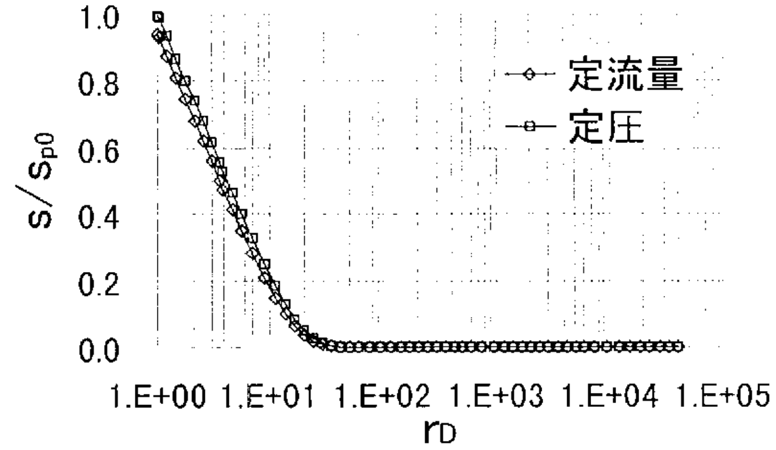
図 3. 3. 1　検証に用いたモデル



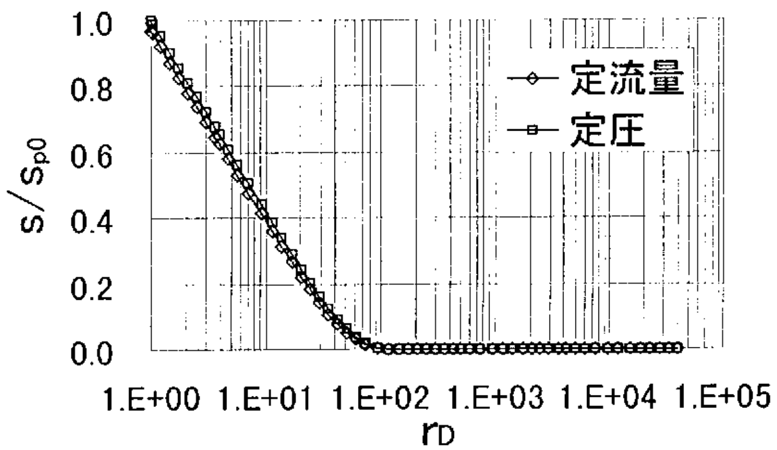
(a) $t_D=10^0$



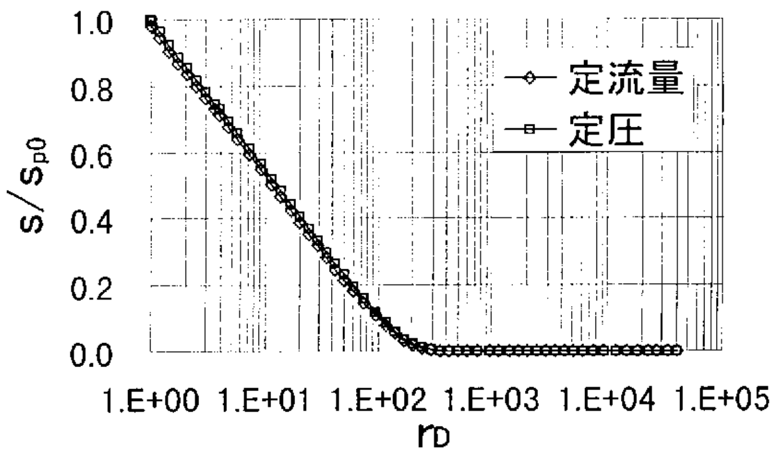
(b) $t_D=10^1$



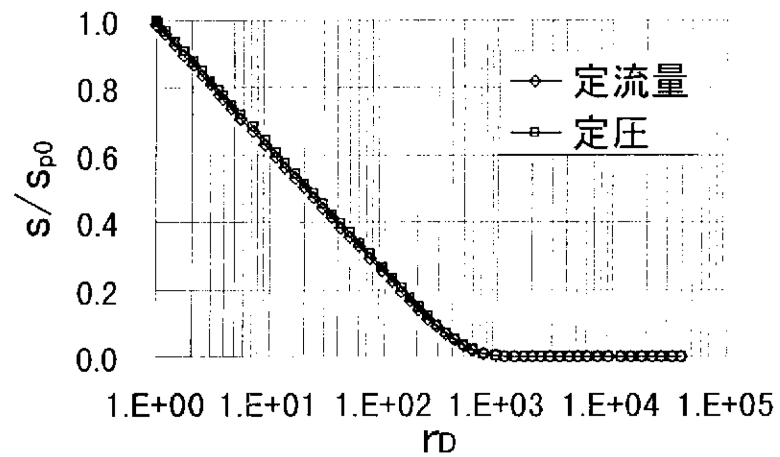
(c) $t_D=10^2$



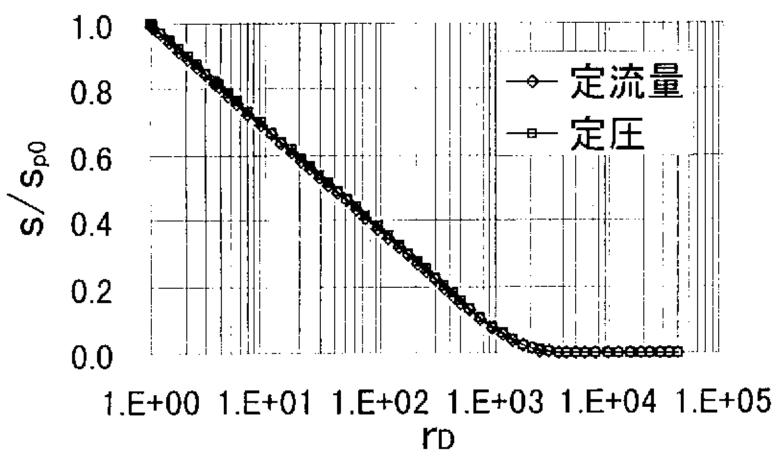
(d) $t_D=10^3$



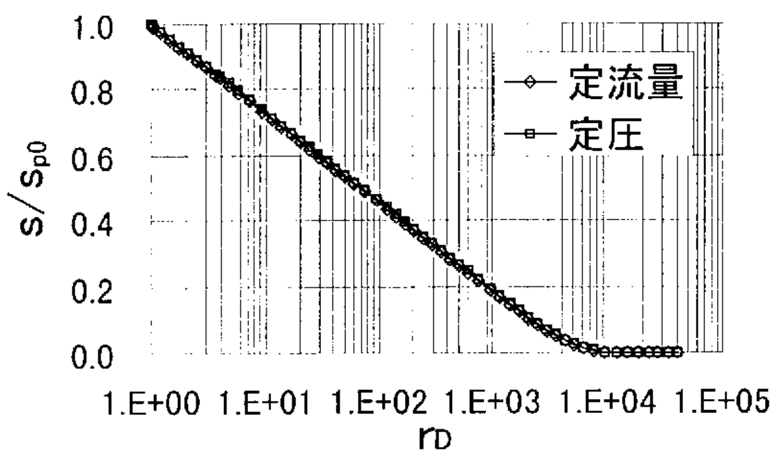
(e) $t_D=10^4$



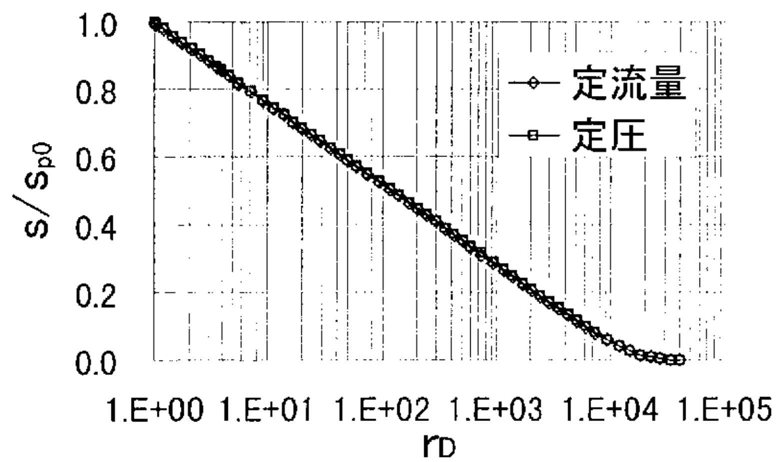
(f) $t_D=10^5$



(g) $t_D=10^6$



(h) $t_D=10^7$



(i) $t_D=10^8$

図 3. 3. 2　種々の揚水継続時間 t_D における井戸周辺の水位低下量分布（ＦＥＭ）

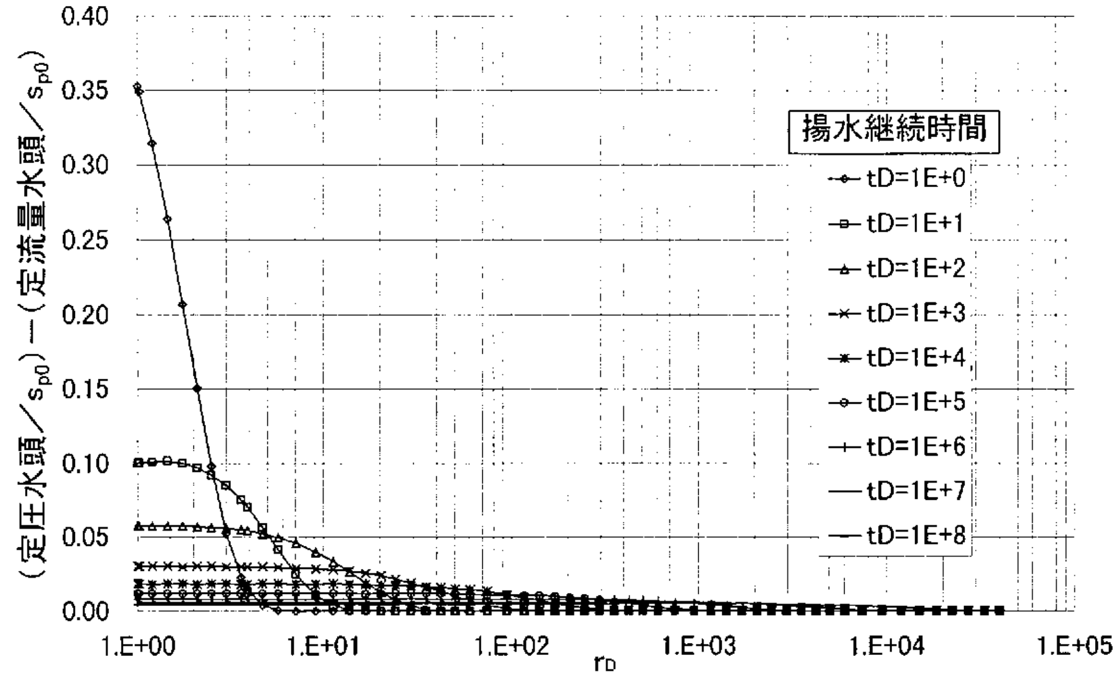
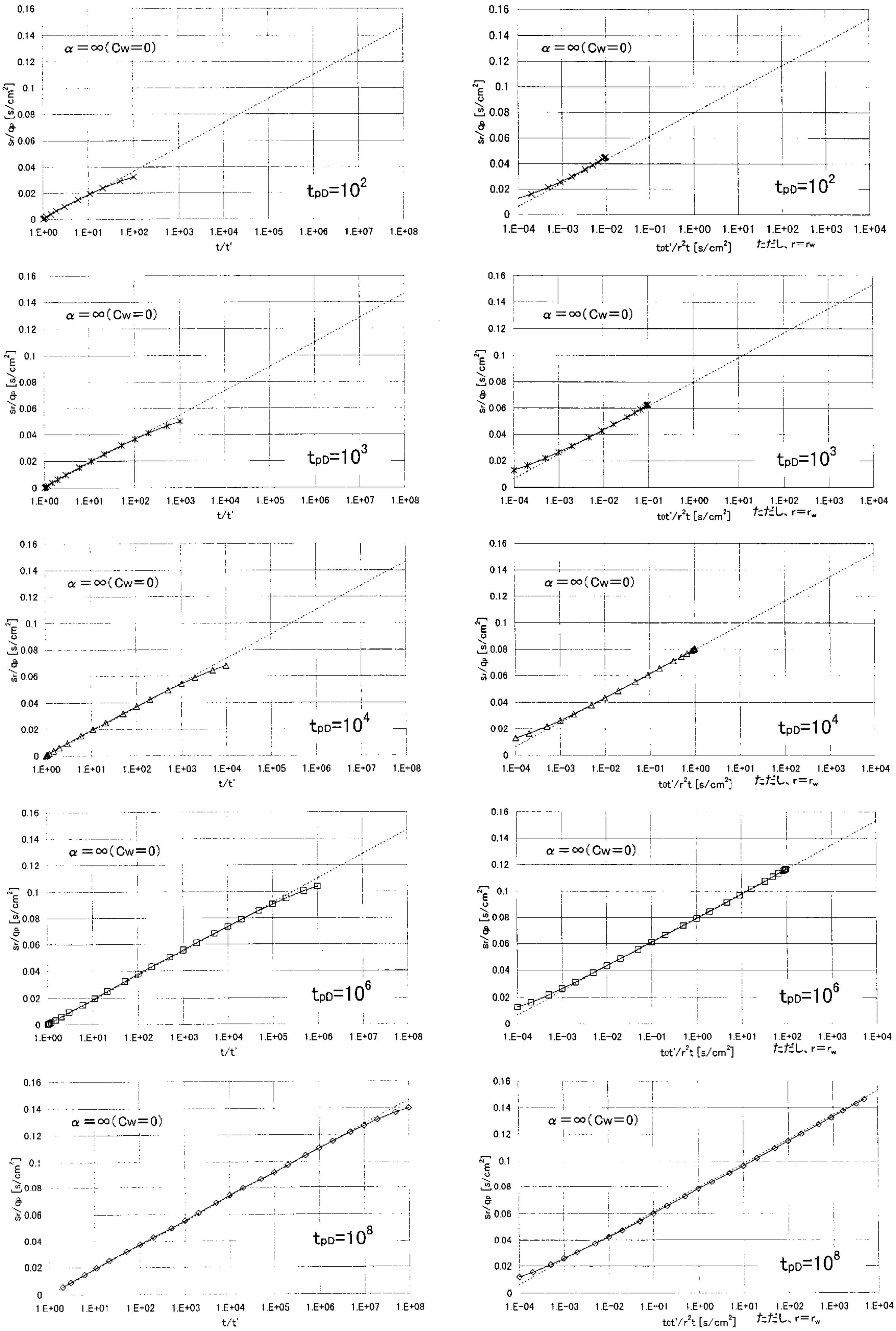


図 3. 3. 3　井戸周辺の水頭分布の差（ＦＥＭ）

３．３．２　定圧揚水後の回復試験結果の解析

定圧揚水後の回復試験のシミュレーションを行い、この結果を揚水井内の水位回復試験として従来法と改良法によってそれぞれ解析した。これまで述べたように、解析で用いる揚水流量は定圧揚水停止時に観測される揚水流量を用い、回復時における井戸貯留の有無による解析手法の適用性についても検討した。図 3.3.4 に井戸貯留が無視できる場合、図 3.3.5 に井戸貯留を無視できない場合、また (a)は従来法、(b)は改良法による解析結果をそれぞれ示す。図中の破線は各解析法での理論値を示し、この破線に実線部分（回復挙動）が重なれば図 3.3.1 に示した解析の入力値である浸透特性が評価できることを示す。ここで、揚水停止時間を t_{pD}（無次元）とした。

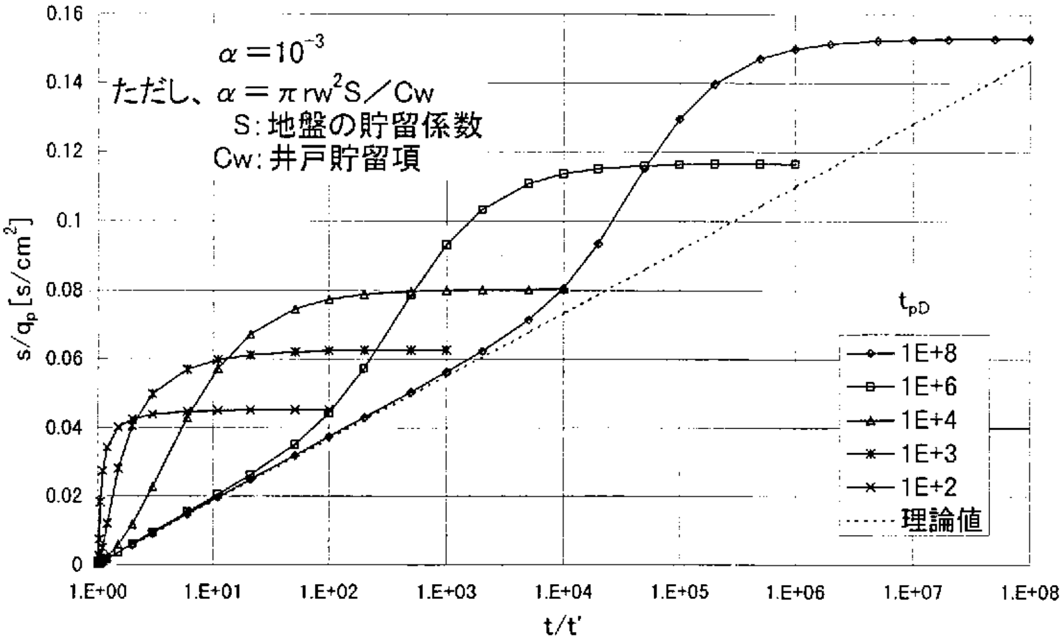


(a) 従来法　　　　(b) 改良法

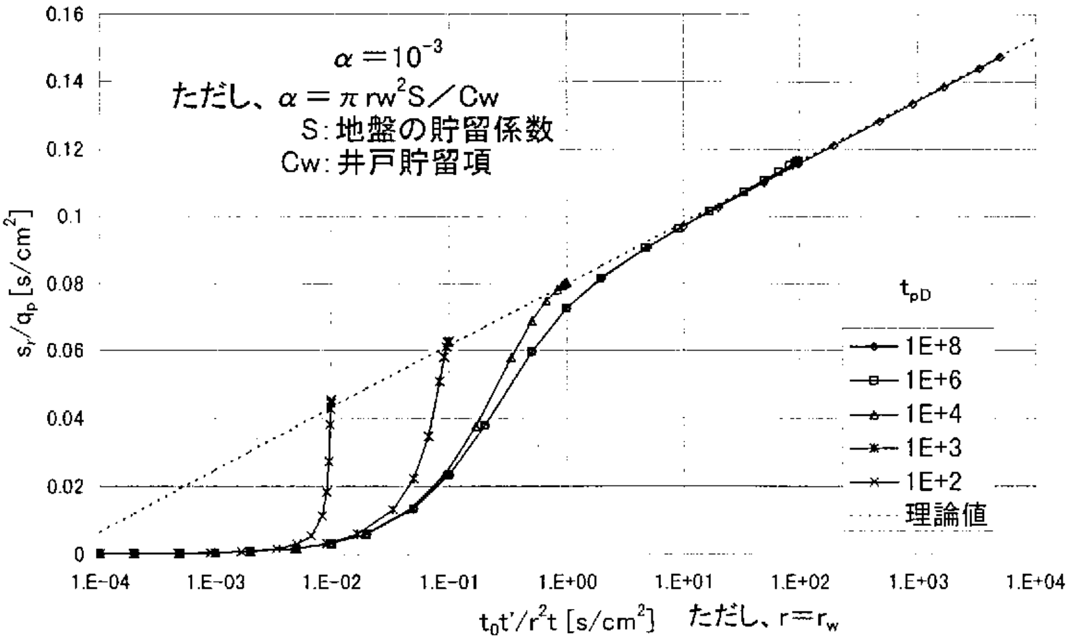
（t:揚水開始後経過時間,t':揚水停止後経過時間,$t_0=t-t'$,s_r:揚水停止時水位からの回復量)

ただし、図中の実線はシミュレーション値、破線は理論値を示す。

図-3.3.4　回復試験の解析（井戸貯留が無視できる場合）



(a) 従来法



(b) 改良法

(t:揚水開始後経過時間,t':揚水停止後経過時間,$t_0 = t - t'$,

s_r:揚水停止時水位からの回復量)

図 3. 3. 5　回復試験の解析（井戸貯留を無視できない場合）

図 3.3.4 ように井戸貯留が無視できるほど小さく(図 3.3.5 中に定義するαを$\alpha \to \infty$あるいは $C_W=0$)設定する事ができるなら、揚水停止時間が$t_{pD} \geqq 10^4$ の範囲でこれらの解析手法を十分に適用できることがわかる。これに対して井戸貯留の無視できない場合は、図 3.3.5 に見られるように回復試験開始後しばらくは、井戸貯留の影響である、いわゆる“はらみ出し”の挙動が明瞭に表れており、揚水停止時間が$t_{pD} \leqq 10^4$ のケースでは井戸貯留の影響がなくなる前に回復が終了するため、回復挙動に直線部分が見いだせない。この場合、これらの解析方法を適用するためには長時間の揚水後に回復挙動を観測する必要がある。解析可能となる最小の揚水停止時間はαに依存するため、揚水停止時間を事前に設定するにはさらに検討が必要である。図 3.3.6 に定圧揚水の回復シミュレーションから井戸貯留の影響のため帯水層定数の算定が困難であった例、図 3.3.7 に帯水層定数の算定ができた例を示す。

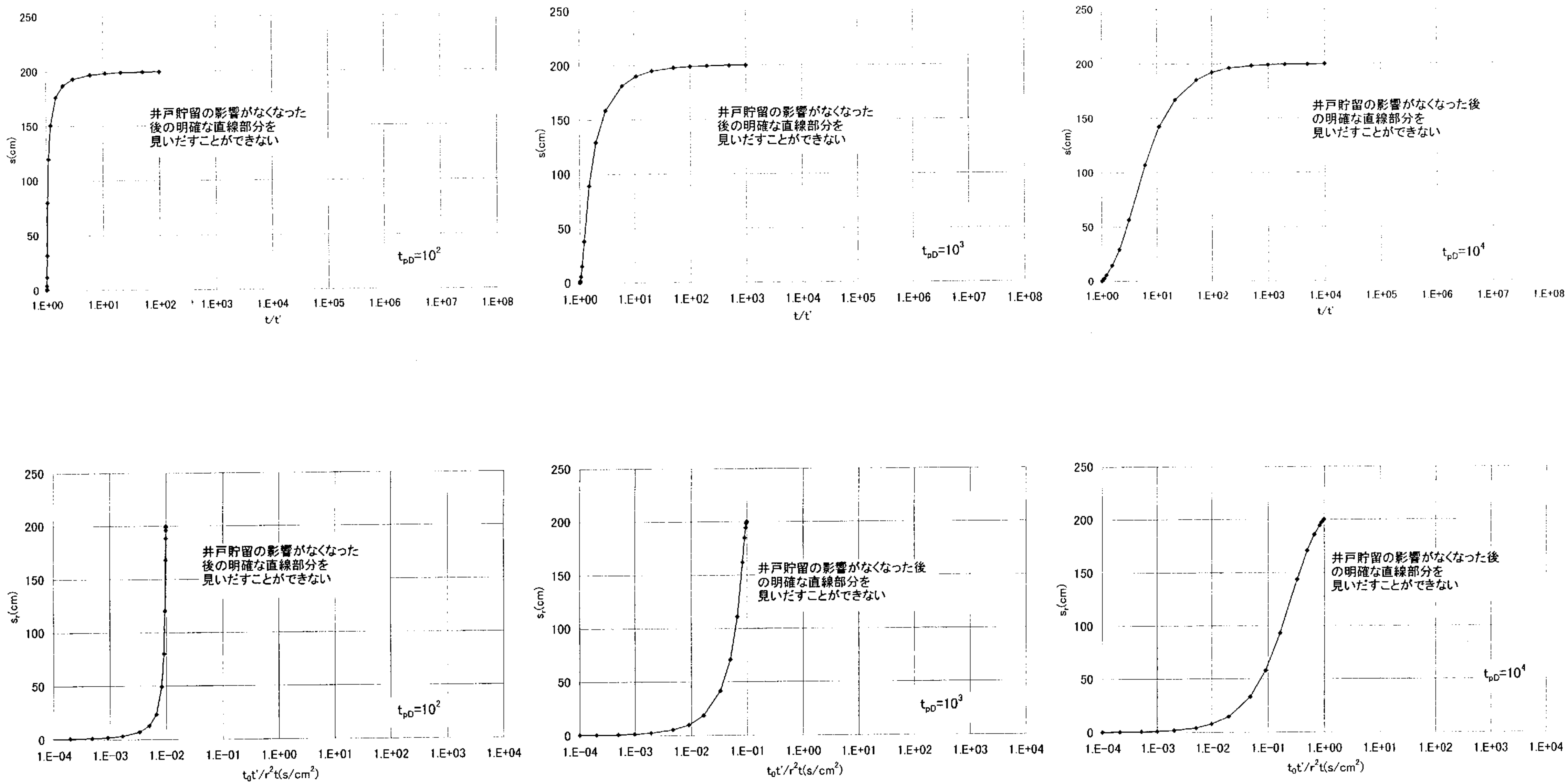


図 3. 3. 6　定圧揚水試験からの回復挙動の解析結果（帯水層定数の算定が困難であった例）

上段：従来法・下段：改良法　t_{pD}：揚水停止時間

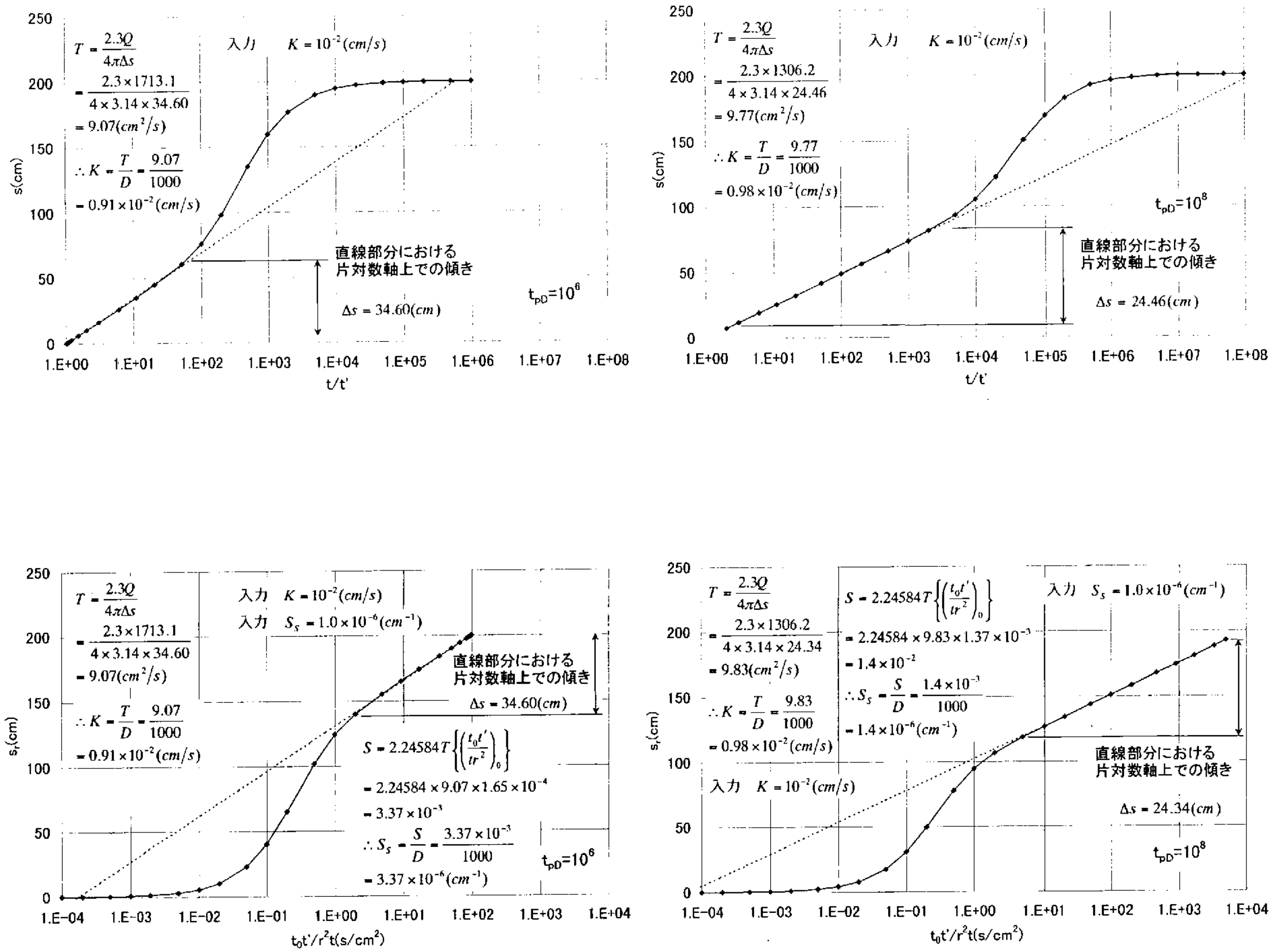


図 3.3.7 定圧揚水試験からの回復挙動の解析結果（帯水層定数の算定ができた例）

上段：従来法・下段：改良法　t_{pD}：揚水停止時間

3．4 考察

本検討では、Uraiet ら[14]の考え方をもとに、定圧揚水が定流量揚水と類似した井戸内水位低下量及び井戸周辺の水位低下量分布となる条件、および適用範囲を理論的に検討した。その結果、定圧揚水を揚水停止直前の流量による等価な定流量揚水で表現し、定圧揚水後の回復挙動を等価な定流量揚水の井戸関数の重ね合わせで表現できることの妥当性を示した。

また、ＦＥＭによる数値解析を用いて、定圧揚水を等価な定流量揚水で表現できる条件の確認を行うとともに定圧揚水からの回復をシミュレートし、得られた回復挙動に従来法[1,12]、および改良法[4]を適用した解析結果から、これらの方法が適用できることを確認した。さらに、揚水井内の回復試験においては井戸貯留の影響を受けるため、回復時の井戸貯留を無視できるほど小さくできる試験孔が試験精度の向上に有効であることを提案し、このような試験孔を用いることにより、揚水停止時間を$t_{pD} \geqq 10^4$と設定すれば適切にこれらの解析手法を適用できることを示し、また、揚水井の井戸貯留が無視できない場合には揚水停止時間の設定には今後さらに検討が必要なことを示した。

尚、表 3.4.1 に一般的な砂質地盤（ＦＥＭ解析モデル）と深層岩盤について無次元時間と実時間との対応の一例を示す。これより、一般的な砂質地盤はもとより一般的な深層岩盤においても実施可能な揚水時間でこれらの解析手法は適用できることがわかる。

表 3. 4. 1　無次元時間t_Dと実時間tの対応（例）

	t_D	10^0	10^2	10^4	10^6	10^8
砂質地盤 K=10^{-2}(cm/s) Ss=10^{-6}(cm^{-1})	t	0.0025sec	0.25sec	25sec	2500sec (42min)	250000sec (3days)
深層岩盤 K=10^{-8}(cm/s) Ss=10^{-9}(cm^{-1})	t	2.5sec	250sec	25000sec (7hours)	2.5×10^6sec (29days)	2.5×10^8sec (2894days)

（注）$t_D = \dfrac{Kt}{S_S r_w^{\,2}} \Leftrightarrow t = \dfrac{S_S r_w^{\,2}}{K} t_D$　ただし、r_wは解析モデル値 5(cm)とした。

また、上記のことから本検討における解析手法の適用性、信頼性向上のために有効な対策としては実施可能な揚水時間におけるt_Dができるだけ大きくなるようにしたり、回復時の井戸貯留の影響ができるだけ小さくなるようにすることが考えられる。

ある揚水時間tに対して無次元時間t_Dをできるだけ大きくするにはt_Dの定義式からも明らかなようにr_wを小さくとるしかないが、揚水試験装置等の設置のため試験孔そのも

のを小さくするにしてもおのずと限界がある。例えば、本検討における解析ケースの r_w=5(cm)をさらに小さくすることは現状では困難であると思われる。

一方、回復時の井戸貯留の影響を小さくするためにはいくつかの方法が考えられる。例えば、試験孔に径の小さなスタンドパイプ状の管を設置した二重構造とし、揚水停止と同時に試験孔を閉塞し回復挙動はスタンドパイプで計測すれば、井戸貯留の影響を低減することができる。すなわち本検討の井戸径 r_w =5(cm)に対し、スタンドパイプ径を 1/10 にあたる r_c =0.5(cm)とすれば、井戸貯留項の α あるいは Cw で 1/100 に低減できることになる。

もし、回復挙動を水位回復ではなくパッカーで閉塞した区間内の圧力変化で評価することができれば井戸径はほとんど無視（$r_c \fallingdotseq 0$）でき、井戸貯留の影響により回復初期に見られる“はらみ出し”の少ない、すなわち図 3.3.4 に示すような直線性の高い回復試験結果が得られることが期待できる。

以上が、直線勾配法による回復試験結果の整理を前提とした考察であるが、曲線一致法の適用では井戸貯留項を考慮する事も可能であり、もし、多変量パラメータの同定が良好に行われるのであれば、曲線一致法の適用も有効であることを検討するべきである。

また、実際の試験データへの解析手法適用に際しては、揚水試験時の流量は離散的な計測値となるため、揚水を停止した瞬間における揚水流量の評価方法の検討が必要である。

４．スキン現象に関する文献調査

４．１ 検討概要

単孔による非定常型透水試験や揚水試験では、インターバルに接する部分の地盤の透水性が試験結果に支配的である。このため、インターバル近傍に削孔時の孔壁安定のための比重液による泥膜などが残留するとインターバル周辺地盤の透水性が低下し、地盤の透水性を正しく評価することができない。また、削孔時の孔壁崩壊やゆるみによって周辺地盤の透水性が上昇する場合もあり、地盤の透水性を正しく評価することはできない。このようなインターバル周辺の局所的な透水性の変化はスキン効果(skin effect)あるいは、井戸損失(well loss)と呼ばれている。さらに、水位低下量に着目した概念であることから、

スキンのない理想的な場合の水位低下量と比較して、

大きくなる時、正のスキン効果

小さくなる時、負のスキン効果

とそれぞれ呼んでいる。

スキン現象を定量的に調査する目的の一つは、地下水や石油などの採水／採油井戸で効率的な産出を期待することである。この場合、正のスキン現象はできる限り排除することが望まれることから、井戸能力を低下する要因としスキン現象が議論される。また、調査･試験という観点では、土質地盤での実施が多くみられる多孔式揚水試験法では、単孔式透水試験法とは異なり、試験孔(ここでは揚水井戸を指す)は単に地下水系からの排水施設としてとらえ、所定のインパクト(揚水流量)が確保できれば試験孔内の水位低下量を試験結果として評価する必要がない場合もあり、スキン効果の解明は強く要求されない。当然、観測孔のスキン効果については議論となる場合があるが、複数本設置される観測孔では互いの孔内水位の反応を比較することによって観測結果の信頼性を評価することも可能である。

ところが、単孔式による種々の透水試験では、他に比較対象となる試験孔がなく、孔内水位変化と注／排水流量だけが観測結果であることから、スキンの影響を強く受ける。よって、その存在および効果の程度を評価することは極めて重要であり、既存の評価手法の適用性確認および新たな評価手法の開発が必要となっている。

そこで、現状で提案されているモデルを調査し、大深部岩盤の透水性評価方法に適用可能なスキンモデルの提案を試みる。ここでは、①薄層スキンモデル、②有限厚スキンモデル、③乱流モデルの 3 種類のスキンモデルについて解説し、その適用性について議論する。

4．2 薄層スキンモデル

次式で表わすことのできる孔内水位低下量と理論値の関係が想定できるとき、s_K をスキンファクターと称している[10)]。

$$s_W = \frac{Q}{4\pi T}\left(W\left(u_W\right) + s_K\right) \qquad (4.2.1)$$

薄層スキンモデルは、その扱いは次項の有限厚スキンモデルと大差ないが、s_K の定義が明確でない、あるいは定義し難いものである。つまり、削孔時の微細ずり(scale)、比重液のような高粘性流体(grease)、酸化生成物(oxide)などが原因となるいわゆる地盤の透水性を低下させる(正のスキン)効果に対応したものである。若干論点の混乱ともなるが、後に示す有限スキン厚の概念から、スキンファクターは以下のように定義されており、これを薄層スキンの式(4.2.1)の導入することが実際にはなされている。

$$s_K = 2\left(\frac{K}{K_S} - 1\right)\ln\left(\frac{r_S}{r_W}\right) \qquad (4.2.2)$$

ここで、　s_K：無次元化スキン損失項、

K：地盤の透水係数、　K_S：スキン層の透水係数、

r_W：井戸(ストレーナ部)半径、　r_S：スキン層外周半径

このモデルによる揚水試験時の水位低下の標準曲線を図 4.2.1 に示す。

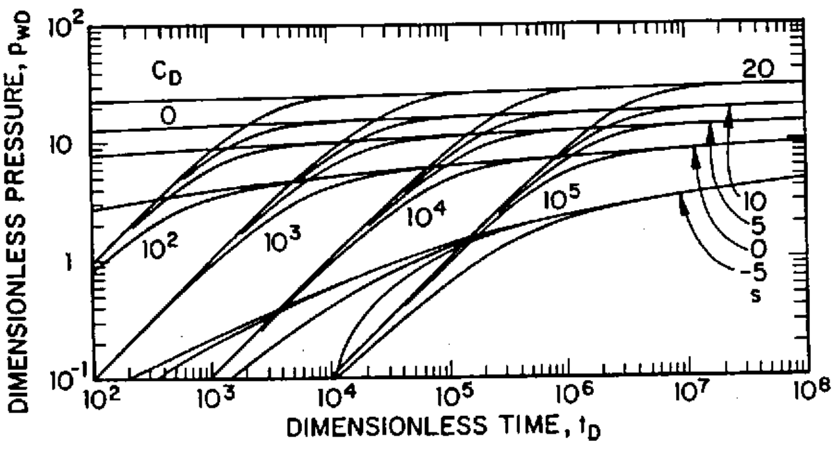


図 4. 2. 1 薄層スキンモデルによる水圧低下量の解

ここで、圧力低下量 p と水位低下量 s との関係は

$$s_{wD} = W(u_w) = 2p_{wD} \qquad (4.2.3)$$

さらに、式(4.2.1)を Jacob-Cooper 式で表わすと次式となる。

$$
\begin{aligned}
s_W &= \frac{Q}{4\pi T}\left(\ln\left(\frac{2.246Tt}{Sr_W^2}\right)+s_K\right) \\
&= \frac{Q}{4\pi T}\left[\ln\left(\frac{2.246Tt}{Sr_W^2\exp(-s_K)}\right)\right]
\end{aligned}
\qquad (4.2.4)
$$

このように、TとSを分離して求めようとすると、s_K は S あるいは r_W の評価に取り込まれ、適切に評価することができない。この対応として、石油工学では被圧帯水層の S、すなわち Ss は地盤と水の圧縮特性から評価できるとして s_K を分離する方法を取っている[10)]。

具体的には以下の評価法方をとることができる。

Jacob-Cooper 法によれば、S を求める手順を用いると以下となる。

$$
s_K = -\ln\left(\frac{2.246Tt_0}{Sr_W^2}\right) \qquad (4.2.5)
$$

ここで、t_0 は直線プロットの外挿直線の s=0 軸上切片時間

また、回復試験結果を用いる手法が提案されている[18)]。以下のように s_K はキャンセルされる。すなわち、式(4.3.2)の重ねあわせ式が適用できる。

$$
\begin{aligned}
s_W &= \frac{Q}{4\pi T}\left(W(u_W)+s_K\right)-\frac{Q}{4\pi T}\left(W(u_W')+s_K\right) \\
&= \frac{Q}{4\pi T}\left(W(u_W)-W(u_W')\right)
\end{aligned}
\qquad (4.2.6)
$$

ここで、u_W' は揚水停止後の経過時間の無次元化指標

式(4.2.6)による回復試験結果の整理では貯留係数を評価することができないが、西垣ら[4)]の改良法では、以下の算定式で s_K を評価することができる。

$$
\begin{aligned}
s_W(t_p)-s_W(t) &= \frac{Q}{4\pi T}\left(W(u_{Wp})-W(u_W)+W(u_W')\right) \\
&= \frac{Q}{4\pi T}\left\{\ln\left(\frac{2.246Tt_p}{Sr_W^2}\right)-\ln\left(\frac{t}{t-t_p}\right)+s_K\right\}
\end{aligned}
\qquad (4.2.7)
$$

上式で、T、Sが既知あるいはある程度推定ができる状態であればこれを代入し、次式が成立する揚水開始後の経過時間 t を選ぶ。

$$\frac{t}{t-t_p}=\frac{2.246Tt_p}{Sr_W^2} \qquad (4.2.8)$$

この時、式(4.2.7)中の自然対数項がキャンセルされ、次式によって s_K が評価できる。

$$s_K = s_W(t_p)-s_W(t) \qquad (4.2.9)$$

薄層スキンモデルの特徴は以下である。

① スキンの影響は、インターバル表面においてスキン面を境に、地山側の水位低下量を単にスキンファクター分だけ減ずることで井戸側の水位低下量を算定するだけであるため、スキンの影響は井戸内の水位低下量の補正にとどまっている。

②このため、$s_K<0$ となる場合には、地山側の水位低下量よりも井戸側の水位低下が単に少なくなることに、時間ごとの水面形状をプロットすると実現象とかけ離れた結果が算定されることになる。

③スキンファクターs_K の影響は、Jacob-Cooper の直線では、貯留係数の評価に関わる直線のズレにみられるが、直線勾配は非スキン状態の直線に平行であるため、透水量係数の評価にこのスキンモデルは関与しないと言える。しかしながら、曲線一致法を適用した場合には、透水量係数の評価にもスキンの影響が及ぶ可能性が高くなる。

④また、式(4.2.4)から有効井戸半径の概念が提案されている[19]。

$$r_{We}=r_W\exp(-s_K) \qquad (4.2.10)$$

$s_K>0 \qquad r_{We}<r_W$

$s_K=0 \qquad r_{We}=r_W$

$s_K<0 \qquad r_{We}>r_W$

有効井戸半径は、スキンの影響を受けた井戸内水位と同じ水位となる地盤内水位低下量を示す半径位置を井戸半径とするものである。この考え方は、多孔式揚水試験で各観測水位と揚水井戸内水位を対数距離軸に対して整理する場合には極めて有用であり、負のスキン効果に対しても適用できる解決策である。しかし、井戸半径を基準に整理することの多い単孔式揚水試験の整理では、その妥当性には議論の余地がみられる。

4．3 有限厚スキンモデル

前節では、薄層スキンモデルは Ks>K となる、いわゆる負のスキン効果に対して直接用いた場合には問題があることを指摘した。この原因は、薄層スキンモデルではスキンの影響がスキン部から井戸内部へ向かう範囲にのみ及び、スキン部から地盤へは及ばないことになる。実際には、スキン部を不均質モデルとして捉えると当然のことながらスキン部から地盤へもスキン部の影響が現われることは避けられない。文献では、有限厚スキンとして先に示した s_K の定義式(4.2.2)を紹介はしているが、具体的なモデル化を紹介していない。実際のところ、有限厚スキンモデル(finite thickness of skin)はスキン部分を非貯留性浸透(定常浸透)とする場合と貯留性浸透(非定常浸透)とする場合があり、これらを明確に区別してはいないことから、ここでは改めてこれを整理することとする。

4．3．1 非貯留スキンモデル

簡単のために、全層ストレーナー井戸による放射状流れを考える。

揚水井戸からスキン部の範囲は以下の定常式が提案できる。

$$T_1\frac{\partial^2 s_1}{\partial r^2}+T_1\frac{1}{r}\frac{\partial s_1}{\partial r}=0 \qquad r_W\le r\le r_S \qquad (4.3.1)$$

ここで、添字１はスキン領域を表わす。

これに対する境界条件は以下である。

$$2\pi rT_1\left.\frac{ds}{dr}\right|_{r=r_W}-C_W\frac{ds_W}{dt}=-Q_o \qquad (4.3.2)$$

$$s_W=s_1(r=r_W) \qquad (4.3.3)$$

$$s_W(t=0)=0 \qquad (4.3.4)$$

スキン部から地盤への範囲は以下の非定常式が提案できる。

$$T_2\frac{\partial^2 s_2}{\partial r^2}+T_2\frac{1}{r}\frac{\partial s_2}{\partial r}=S_2\frac{\partial s_2}{\partial t} \qquad r_S\le r \qquad (4.3.5)$$

$$s_2(r,t=0)=0 \qquad (4.3.6)$$

$$s_2(r\to\infty,t)=0 \qquad (4.3.7)$$

ここで、添字２はスキン領域を表わす。

また、スキン部と地盤の境界では以下の条件とする。

$$s_1(r_S,t)=s_2(r_S,t) \qquad (4.3.8)$$

$$\frac{ds_1(r_S,t)}{dr}=\frac{ds_2(r_S,t)}{dr} \qquad (4.3.9)$$

ここで示したモデルを用いて非スキンモデルを扱う場合、Ks=K と定義することで概ねその目的は達成できるが、$r_W\le r\le r_S$ の区間は定常式のままであり、厳密には間違ったモデル化がなされていることになる。しかし、r_W と r_S を互いにほぼ等しくとり(厳密に等しく取ると解が発散するので、わずかな差が必要である)、スキン部が定常モデルであってもその影響は大きくはないとみることで、その適用は行える。

4．3．2 貯留性モデル

前節の式(4.3.1)に以下の非定常式を適用することで、貯留性スキンモデルを誘導できる。

$$T_1\frac{\partial^2 s_1}{\partial r^2}+T_1\frac{1}{r}\frac{\partial s_1}{\partial r}=S_1\frac{\partial s}{\partial t}0 \qquad r_W \le r \le r_S \qquad (4.3.10)$$

境界条件などは項(4.3.1)と同一である。

正確なモデル化は不明であるが、有限スキンモデルによる水位低下量の計算事例として図-4.3.1 が紹介されている。この図と薄層スキンモデルによる図-4.2.1 を比較すると、スキンファクターが負の水圧低下量の挙動が大きく異なることがわかる。

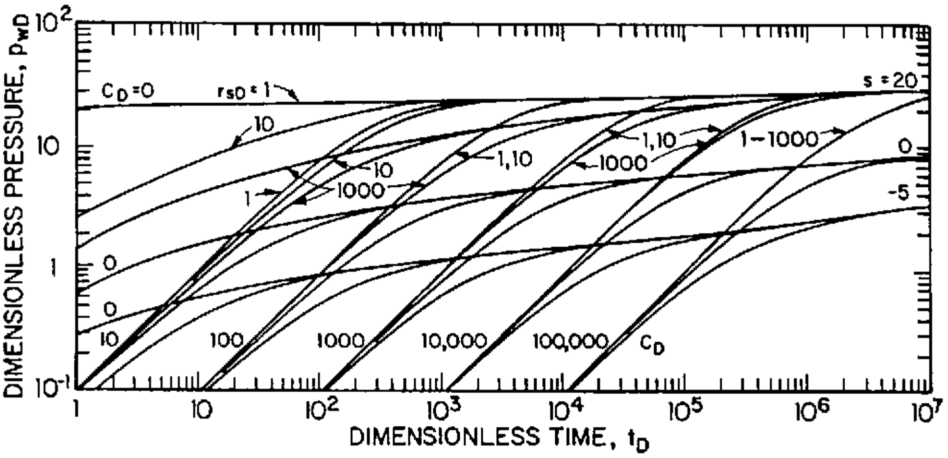


図-4. 3. 1 有限厚スキンモデルによる水圧低下量の解

式(4.3.10)を導入した有限層厚スキンモデルの理論解を誘導するとは、これまで極めて困難であったが、浸透方程式中にみられる時間項に Laplace 変化を施し、これを数値的に逆変換することで、このような複雑な理論解のデジタル値を得ることが可能となっており、Moench ら[16,17]や Hyder ら[8]がこのモデルを検討している。

４．４ 乱流モデル

先に述べたようにスキンには物理的に何らかの透水性の異なる膜やゾーンがあると考える方が理解しやすいが、結果としてスキンと同様の現象が起こる、いわゆる井戸損失の説明として用いられる乱流モデルについてここで説明する。一般に知られれているように、透水性の差違が無くとも、流れが層流域から乱流域に入ると流体と媒体接触面の摩擦抵抗が増加するため、層流状態で適用できる Darcy 則を適用した透水性は低く評価されることになる。このモデルは、非定常型透水試験や定圧揚水試験のように、試験孔内外に比較的大きな水位差がつけられる場合のスキン現象の説明に用いることができる。

この概念は井戸周辺の透水性と流れの非線型挙動を考慮した乱流域の揚水挙動を擬似的にスキンとして捉えるものとして、以下の関係式が提案されている[20]。

$$s_W = BQ + CQ^n \qquad (4.4.1)$$

定数 B,C およびｎの評価は段階揚水試験結果の整理によってなされる。乱流現象が無い場合には、C=0 と評価されることから、B は井戸損失のない場合の定常井戸理論式値(例えば、$\frac{1}{2\pi T}\ln\left(\frac{R}{r_W}\right)$)となる。また、べき乗数 n は実験や観測によって求められるもので、$0<n\leq 2$ の範囲内の実数値が提案されている。

具体的には、段階揚水試験結果から以下のようにして求めることができる。

①段階揚水試験結果の揚水流量 Q と孔内水位低下量 s_W の関係を得る。

②試験結果を次式で整理する。

$$\frac{s_W}{Q} = B + CQ^{n-1} \qquad (4.4.2)$$

特に、Jacob の提案する[20] n=2 を採用するなら、式(4.4.2)における sw/Q-Q 関係は普通軸上では直線関係となり、B は縦軸切片(Q=0)、C は直線傾きをそれぞれ示す。

また、べき乗数 n も未知量として同定するなら多変量(変量 B,C,n)分析を用いればよい。

このように、先に述べたスキンモデルと比較すると、単孔による透水試験での乱流モデルの同定は比較的容易に行えることがわかる。しかしながら、このモデルを水位低下量の予測に用いる際には、揚水流量と孔内水位低下量の関係が線形関係でないことから、線形関係を前提とする井戸理論は適用することができず、数値解などの非線型解析の適用に頼らざるを得ない。

また、乱流モデルは透水性の低下を対象としたモデルであるため、インターバル周辺地盤の透水性を大きく評価するケースには適用できない。

4．5 スキンモデル適用への提言

スキンモデルの適用性については以下の観点で検討する余地がある。

まず、スキンの影響がみられない試験法の導入が提案できる。例えば、回復試験を行い、その結果を Horner[12]や Theis[1]の提案する従来法で整理すると、スキンの影響はみられない。また、比較的長時間にわたる揚水挙動を整理する時、Jacob-Cooper 型の整理方法を用いるなら、直線勾配はスキンの影響を受けない(直線にはスキンの影響がみられるが)。乱流状態となる懸念の高い非定常型透水試験のスキン現象においても Butler[21]が紹介するように、初期の孔内外水位差をいくつかの高さに設定した試験結果に差違がなくなるデータを解析する方針を徹底することで、スキンの影響のない試験結果が得られる。

これらのことから、スキンの影響がみられる場合においても、適切な試験方法と整理手法を適用することで比較的精度よく透水係数を評価することができる。

逆に、スキンの影響を評価することが考えられる。ここではスキンが貯留係数と一体化されて評価されることに着目し、見かけの貯留係数を求めておき、実際の貯留係数は他の物理試験等から得ることとし、両者の関係からスキンを算定するというものである。

砂地盤のような材料を対象とすると物理試験による貯留係数の評価は不均質なバラツキという観点から困難であるが、亀裂性の岩盤等ではコアサンプリングおよび物理試験の精度も向上していることから、このようなアプローチは非現実的な考え方ではないだろう。

また、これらのモデル化の中では特に示されていなかったが、スキンの不均質性についての議論も必要である。数mにおよぶインターバル周辺にスキンが生じた場合、特にこれが削孔時の比重液の逸泥である時、井戸洗浄でインターバル区間の一部分の泥土が除去されるとその後の洗浄ではこの部分が主たる通水ゾーンとなり、残留部にまで洗浄が及ばない。このようなケースでは、スキン部を地下水が通過するのではなくインターバルの一部分を通過することから、有効インターバル長の再設定という考え方を導入した方が適正である。この意味では、本報告書第 2 章で扱った部分インターバル井戸による揚水試験あるいは検討業務(その 2)で扱った非定常型透水試験、それぞれの挙動の把握は重要な要因となる。

5．おわりに

単孔による揚水試験結果の整理手法の適用性について理論的なアプローチをもとに、検討を行なった。以下に、これらの検討結果から判明した事項を示す。

(1)部分インターバル揚水井戸による揚水試験結果の整理手法

部分インターバル揚水井戸による試験結果は、井戸半径、井戸貯留、漏水現象および影響圏半径などの条件が試験結果および整理方法におよぼす影響は検討業務(その 2)で述べたものと定性的には変わるところがないので、ここでは部分インターバル長およびその設置位置の違いによる影響について示す。

① インターバル長の違いは、主に揚水試験中の時間に対する挙動にみられる。すなわち、比較的早い時間にはインターバル周辺の地下水が、また長時間揚水後には帯水層全体にわたる地下水がそれぞれ揚水の影響を受ける。

② 揚水早期の観測値(水位低下あるいは揚水流量)の挙動は、インターバル長を帯水層厚さとする全層ストレーナ井戸揚水時のそれに一致する。この部分の整理には全層ストレーナー井戸の標準曲線とのマッチングが有効であり、ストレーナ長の違いを標準曲線に考慮する必要がないので用意する標準曲線のパラメーターを少なく設定することができる利点がある。

③ 比較的遅い時間の観測値は、片対数軸上で直線性を示す整理ができる場合があり、この直線の傾きから帯水層厚さに対する透水量係数を評価することができる。しかしながら、インターバル長の違いは全層ストレーナ時の直線とは平行移動する特性として現われるため、貯留係数の評価が困難となる。そこで、透水(量)係数をこれら直線部から評価し、この情報を標準曲線とのマッチングに導入し、マッチング精度を向上させる適用手順を紹介した。

④ 片対数軸上プロットには③で示した帯水層厚に対応した透水量係数を表わす傾き以外の直線がみられることがあり、これは部分インターバル長や井戸貯留などの特徴と認められる。このため、直線近似による透水量係数の評価には全揚水時間のなかで最終の直線部分であること、すなわち揚水の影響が帯水層全体に至っていることを確認できるほど長期にわたる揚水を行うことを必要とする。

⑤ 部分ストレーナー井戸の影響は片対数軸上でのはらみだし挙動として現われ、この軸上プロットだけでは井戸貯留の影響との区別が付き難い。しかしながら、両対数軸上では井戸貯留の影響は傾き 1 の直線となるが、部分インターバルにはこの特性は見られないことから、この区別が両者の違いを明確にする。

⑥インターバルの設置位置の比較として、帯水層中央部と上端部を検討したとこころ、上端部設置では中央部に比べて集水範囲であるインターバル上部帯水層部からの供給がみられず、この影響が集水流量の低減となって認められた。ただし、この場合の影響は、大きなものではない。

(2)定圧揚水試験後の回復試験結果の整理方法

定圧揚水が特に揚水流量の少ない大深度地盤における揚水試験時の試験条件管理に適用し易いことを示し、我が国での実施例の少ない定圧揚水試験後の回復試験結果整理法の妥当性を検討した。

① 定圧揚水終了時に観測されるポンプ停止直前の揚水流量と井戸内水位低下量の関係が定量揚水での関係と同一視できることを理論的に説明し、この特徴を用いて定圧揚水試験後の回復試験結果を既存の定量揚水後の回復試験結果の手法で整理できることを示した。

② 定圧揚水試験では揚水井の井戸半径は考慮しているが井戸貯留は考慮する必要がない。しかしながら、回復時には井戸貯留の影響を受けることから、回復時にはこれを削減する試験技術の適用が有益であることを示した。

③ この手法が有効になるために必要な揚水期間は無次元化時間 $t_D>10^4$ であることを誘導したが、先に示した井戸貯留の影響が大きくなるほどこの時間も大きく設定してやる必要がある。また、実次元でこの時間を評価したところ、十分実施可能は試験期間であることが推察された。

(3)インターバル周辺のスキンモデルの調査

インターバル周辺の地盤にみられるスキンモデルを調査し、その特徴をまとめた。

① スキンのモデルにはいくつかあるが、実現象でみられるスキンの発生要因から考えると、有限厚スキンと乱流モデルに集約できる。

② 有限厚スキンはスキン部の地下水挙動が非貯留性か貯留性でその計算労力が異なるが、適用の汎用性を考えると、非貯留性有限厚スキンモデルの適用が望ましく、このモデルによる理論的解法の事例も既にみられることから、現実的である。

③ スキンモデルの導入の目的には、スキンのない試験範囲のデータを整理するかスキンを定量的に評価するかの方策が考えられ、これらに対する現状を若干まとめた。

検討業務(その２)および本検討業務から、揚水試験の観測結果に与える種々のパラメーターの影響を定量的にモデル化することができ、これを以下のように活用することを課題として示す。

揚水試験結果の整理手法は標準曲線一致法と直線勾配法に大別できるが、標準曲線にはいくつかの例外はあるものの、複数のパラメーターの影響を漏れなく加味することができるので、適切な同定技法を適用することで透水係数や比貯留係数といった基本的な浸透特性だけでなく境界条件などを定量的に評価できる可能性が高まる。また、標準曲線勾配の形状は通常の標準曲線よりも、パラメーターの特徴を反映し易いと考えられ、今後の利用に期待が持てる。一方、直線勾配法は試験結果のプロットから直線部分を選定することが困難であることと、直線の切片値が種々のパラメーターの影響を受けるため事前に定性的あるいは定量的にこれらの関係を把握しておく必要がある。このため、理想条件から逸脱するような試験データへの直線勾配法の適用にはパラメーターの影響特性を十分に理解しておく必要がある。標準曲線一致法でもこれらの知見は必要であるが、曲線作成時のモデ

ル選択に関わるものであり、モデル化もパラメータの一つとした多変量パラメータを同定する技法を用いた自動マッチング手法などを用いることで、比較的簡単かつ精度良く試験結果の整理が可能となる見込みがある。

記号表

「2．部分インターバル試錐孔による揚水試験」

a：実数[－]：(節 2.2.1)

b：実数[－]：(節 2.2.2)

b：帯水層厚さ[L]

b'：漏水性粘性土層厚さ[L]

B：漏水因子[L]

c_1：定数

c_2：定数

c_1'：定数

c_2'：定数

Cw：井戸内貯留項[L^2]

d：ストレーナケーシング管長[L]

g_D：boxcar 関数

$f(t)$：揚水強度関数[－]

f_D：fの無次元化[－]

i：$\sqrt{(-1)}$

I_0：第1種0次修正ベッセル関数[－]

I_1：第1種1次修正ベッセル関数[－]

K：帯水層の透水係数[LT^{-1}]

K'：漏水層の透水係数（鉛直方向成分のみ）[LT^{-1}]

K_0：第2種0次修正ベッセル関数[－]

K_1：第2種1次修正ベッセル関数[－]

K_r：帯水層の水平方向成分透水係数[LT^{-1}]

K_z：帯水層の鉛直方向成分透水係数[LT^{-1}]

l：インターバル長[L]

m：片対数紙上直線の傾き[－]

p：Laplace 変換パラメーター

Q_0：一定揚水流量[L^3T^{-1}]

$Q(t)$：定圧揚水時の湧水流量関数[$L^3 T^{-1}$]

Q_D：インターバル長に対する Q の無次元化[－]

Q_{D_b}：帯水層厚に対する Q の無次元化[－]

r：井戸中心からの半径方向距離[L]

r_D：rの無次元化(式(2.2.9))[－]

r_w：井戸ストレーナ部半径[L]

r_{wD}：r_wの無次元量(＝1)[－]

R：有限影響圏半径距離[L]

R_D：Rの無次元量[－]

s：初期状態からの水頭低下量[L]

s'：漏水性粘性土層内水頭低下量[L]

s_0：孔内一定水位低下量[L]

s_D：帯水層厚に対する s の無次元化(式(2.2.9))[－]

s_D'：s'の無次元化(式(2.2.9))[－]

s_{DI}：インターバル長に対する s の無次元化(式(2.2.9))[－]

s_p：揚水停止時の水位低下量[L]

s_{pD}：s_pの無次元化[－]

s_u'：漏水層上端水位低下量[L]

s_w：井戸内平均水位低下量[L]

s_{wD}：s_wの無次元化 [－]

S：帯水層の貯留係数[－]

S'：漏水層の貯留係数[－]

Ss：帯水層の比貯留係数[L^{-1}]

Ss'：漏水性粘性土層の比貯留係数[L^{-1}]

t：揚水開始後の経過時間[T]

t_0：片対数軸上直線の $s=0$ 軸切片 t の[T]

t_D：tの無次元化(式(2.2.9))[－]

t_p：揚水停止時間[T]

t_{pD}：t_pの無次元化[－]

T：帯水層の透水量係数[L^2T^{-1}]

u：無次元時間(式(2.3.1))[－]

u_p：無次元揚水停止時間[－]

u_w：無次元時間(式(2.3.10))[－]

z：帯水層上端からの鉛直方向距離(下向き正)[L]

z'：帯水層上端からの鉛直方向距離(上向き正)[L]

z_D：zの無次元化(式(2.2.9))[－]

z'_D：z'の無次元化(式(2.2.9))[－]

α：貯留性比(式(2.2.9))[－]

β : Hantush の漏水特性

$$=\frac{r}{4B}\sqrt{\frac{S'}{S}}$$

λ : 帯水層の浸透特性[−]

λ': 漏水層の浸透特性(式(2.2.30))[−]

Δs : 片対数軸上直線の傾き[L]

Ω : 式 (2.2.49)

$\overline{F}$: 変量 F の Laplace 変換[−]

Fc^{-1} : 逆 Fourier 変換

＊ : マッチングで得られた
座標値を示す[−]

「3．定圧揚水後の回復試験データの解析手法に関する検討」

C_W：井戸内貯留項[L^2]

D：帯水層厚さ(図-3.3.1) [L]

H_0：初期及び影響圏距離地点での水頭

(図-3.3.1) [L]

i_p：定圧揚水時の井戸境界での動水勾配[－]

k：帯水層透水係数(図-3.3.1) [LT^{-1}]

k'：井戸部透水係数(図-3.3.1) [LT^{-1}]

K：地盤の透水係数[LT^{-1}]

Q_p：定圧揚水時の揚水流量[L^3T^{-1}]

Q_{q0}：定流量揚水時の揚水流量[L^3T^{-1}]

r：井戸中心からの半径方向距離[L]

r_D：rの無次元化[－]

r_w：井戸ストレーナ部半径[L]

R：有限影響圏半径距離(図-3.3.1) [L]

s：初期状態からの水位低下量[L]

s_0：水位差(図-3.3.1) [L]

s_p：r での定圧揚水時の水位低下量[L]

s_{pD}：s_pの無次元化[－]

s_{p0}：定圧揚水時の井戸内水位低下量[L]

s_q：r での定流量揚水時の水位低下量[L]

s_q：r での定流量揚水時の水位低下量[L]

(図-3.3.4)

s_{rD}：s_qの無次元化[－]

S：地盤の貯留係数[－]

Ss：地盤の比貯留係数[L^{-1}]

t：揚水開始後の経過時間[T] (図-3.3.4)

t'：揚水停止後経過時間[T] (図-3.3.4)

t_D：tの無次元化[－]

t_p：揚水停止時間[T]

t_{pD}：t_pの無次元化[－]

T：地盤の透水量係数[L^2T^{-1}]

α：貯留性比[－]

Δs：片対数軸上直線の傾き[L]

K：地盤の透水係数[LT-1]
K_s：スキン層の透水係数[LT-1]
r_w：井戸ストレーナ部半径[L]
r_s： スキン層外周半径[L]
r_{we}： 仮想の井戸半径[L]
s_w：井戸内平均水位低下量[L]
s_k：無次元化スキン損失項 [−]
S：地盤の貯留係数[−]
Ss：地盤の比貯留係数[L-1]
t：揚水開始後の経過時間[T]
t_p：揚水停止時間[T]
T：帯水層の透水量係数[L2T-1]
u_p：無次元揚水停止時間[−]
u_w：無次元時間 [−]

参考文献

1)Theis, C.V., The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater torage, Trans. Amer. Geophys. Union, 2, pp.519～524, (1935)

2)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実験と情報の整理、動力炉•核燃料開発事業団契約業務報告書、JNC TJ7440 98-008、(1998)

3)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, pp.559～569, (1952)

4)西垣誠、高坂信章、井戸半径を考慮した揚水試験における水位低下特性とその解析方法、土質工学会論文報告集、Vol.24、No.4、pp.194～204、(1984)

5)Stehfest,H., Numerical inversion of Laplace transforms, Commun. ACM, Vol.13, No.1, pp.47～49, (1970)

6)Crump,K.S., Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approxmation, J.Assoc. Comp. Mach., Vol.23, pp.89～96, (1976)

7)Hantush,M.S., Hydraulics of Wells, Advances in Hydroscience, edit. by V.T.Chow, Academic Press, (1964)

8)Hyder,Z., J.Butler, McElwee,C.D., and Liu,W., Slug tests in pertially penetrationg wells, Water Resources Research, Vol.30, No,.11, pp.2945～2957,(1944)

9)西垣誠、竹下祐二、有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析手法、講習会テキスト「浸透問題の数値解析法」、土質工学会中国支部、(1987)

10)Raghavan, R., Well test analysis, PTR Prentice Hall, p.558, (1993)

11)西垣誠、進士喜英、不完全貫入井による揚水試験結果からの被圧帯水層厚野算定法、土木工学会論文報告集、Vol.26 、No.4 、pp.197～204 、(Dec . 1986)

12)Horner, D.R.Pressure Buildup in Wells, Proc. Third World Pet. Cong., E.J.Brill, Leiden 2, pp.503～521,(1951)

13)Karl-Erik Almen , Jan-Erik Andersson , Lief Carlsson , Kent Hansson , Nils-Ake Larrson : Hydraulic testing in crystalline rock . A comparative study of single-hole test methods , SKB-86-27 , (1986)

14)Uraiet, A.A., and Raghavan, R., Pressure Buildup Analysis for a Well Produced at Constant Bottomhole Pressure, Jour.Pet.Tech., October, pp.1813～1824,(1981)

15)進士喜英、嶋村貞夫、浜野隆司、井戸貯留項と等価な井戸材質モデル、第 31 回地盤工学研究発表会, pp.2155～2156, (1996) 16)Moench,A.F., P.A. Hsieh, Analysis of slug test data in a well with finite-thickness skin, Mem. IAH Int. Congr. Hydrogeol. Rock Low Permeability, Vol.17, No.2, pp.17～29, (1985)

17)Moench, A, A.Ogata, Analysis of constant discharge wells by numerical inversion of Laplace transform solutions, in Groundwater Hydraulics, Water Resour. Monogr., Vol.9, edited by J.Rosenshein and G.D.Bennett, pp.146～170, AGU, Washinton, D.C., (1984)

18)Kruseman,G.P., Ridder,N.A., Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd edition, ILRI publication 47, p.375, (1990)

19)Neuman,S.P., Class note HWR603, Department of Hydrology and Water Resouces, University of Arizona, (1993)

20)Jacob, C.E., Drawdown test to determine effective radius of artesian well, ASCE, Transaction, paper# 2321, pp.1047-1070, (1946)

21)Butler, J.J.Jr., The design, performance, and analysis of slug test, Lewis Publishers, p.252, (1997)

22)Butler, J.J.Jr., Slug tests with Observation Wells : Extension of Hyder et al.(1994) Solution to Case of Head in an Observation Well , Kansas Geological Survey Open-File Report #95-43 , (1995)