

# 水理試験により得られる実測データの 解析・整理手法の高度化(その1)

—非定常水理試験データを用いた解析手法に関する基礎的検討—

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年3月

株式会社鴻池組

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

水理試験により得られる実測データの解析・整理手法の高度化(その1)

—非定常水理試験データを用いた解析手法に関する基礎的検討—

進士 喜英※

要 旨

本報告では現場試験により得られた実測データを用いて、非定常単孔式透水試験の解析手法に関する比較検討を行なった。比較対象としたのは、ボシュレフ法、クーパー法、ブレドホフト法、自動クーパー法である。これらの手法は片対数グラフにプロットした水位（または水圧）変化の直線の傾きから透水係数を求めるボシュレフ法と、標準曲線と実測した水位（または水圧）を同一グラフ上にプロットし、両者のマッチングにより透水係数や比貯留係数を求めるクーパー系手法に分類される。比較は各手法の理論背景、実測との比較を通して行われ以下の知見を得た。

①ボシュレフ法とクーパー系手法はどちらが有用であると一概に決めることはできず、両者は互いに補完し合う手法である。②試験方法は試験に要する時間制約のため地盤の透水係数によって選定されてきたが、解析手法は地盤と試験孔内の貯留性によって選定すべきであると考えられる。③オープンボアホールとクローズドボアホールを使った試験では、前者は注入時と回復時には、算定された透水係数に違いが認められたが、後者にはそのような明確な違いは観察されなかった。最後に、今後解決すべき課題をまとめた。

---

本報告書は、株式会社鴻池組が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究成果である。

契約番号：08C0786

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター技術開発課 中野勝志

※：土木本部土木設計部構造設計課

Integration of the analysis methods for observation data  
on in situ permeability tests

-Basic consideration on analysis methods for real data of unsteady permeability tests-

Yoshihide Shinshi※

Abstract

This paper reports results of comparative study of analysis methods for data of unsteady permeability test using a single bore-hole. The interest methods are Hvorslev's, Cooper's, Bredehoeft's and an auto-Cooper methods. These are categorized into two schemes; one is a graphical scheme using a slope of a linear line of data plots on a certain axis paper and another is matching scheme using type curves. Their theoretical backgrounds and applications to real data are compared and the followings are noted. (1) Hvorslev's method and Cooper's method are supplemented each other. (2) Although permeability is an index to select permeability test, storativity is a better index to select analysis method. (3) The injection and recovery tests often provide different permeabilities using an open borehole but similar permeabilities using a closed borehole. Finally, issues, which have to be resolved in near future, are proposed.

---

Work performed by Konoike Construction CO.,LTD. Under contract with Power Reactor and  
Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison:Geotechnics Development Section, Katsushi Nakano

※:Civil Engineering Department

## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法および解析手法	3
2. 1 試験方法	3
2. 2 解析手法	5
2. 2. 2 ボシュレフ法	5
2. 2. 2 クーパー法	11
2. 2. 3 ブレドホフト法	18
2. 2. 4 自動クーパー法	21
2. 3 解析結果の評価	29
2. 3. 1 ボシュレフ法の評価基準	29
2. 3. 2 マッチング法の評価基準	30
2. 3. 3 選定曲線の評価基準	31
2. 3. 4 手法による解析結果の差異	33
3. 解析データの概説および解析結果	35
3. 1 試験条件	35
3. 2 解析結果	36
3. 3 結果の評価	43
3. 4 考察	51
4. 今後の課題	52
4. 1 ボシュレフ法の孔内水頭	52
4. 2 不完全貫入井戸と地盤の貯留係数	53
4. 3 流れ場の確認	53
4. 4 スキン効果	53
4. 5 試験精度	54
4. 6 孔内水頭の回復	54
4. 7 観測井戸のある試験	55
5. おわりに	56
記号表	57
謝 辞	59
参 考 文 献	60
付 録	

## 目 次

図-2.1.1	単孔式現場透水試験試験孔	3
図-2.1.2	初期水頭差の決定手法	4
図-2.2.1	ボシュレフ法の試験孔	6
図-2.2.2	試験孔貯留項の定義	7
図-2.2.3	ボシュレフ法による解析プロット	8
図-2.2.4	ボシュレフ法による解析事例	10
図-2.2.5	クーパー法の試験孔	11
図-2.2.6	クーパー法の標準曲線群	14
図-2.2.7	クーパー法による解析フロー	15
図-2.2.8	クーパー法の解析事例	16
図-2.2.9	ブレドホフト法の標準曲線群	19
図-2.2.10	ブレドホフト法による解析フロー	20
図-2.2.11	クーパー法での目視マッチングの試行	22
図-2.2.12	マッチングポイントの選定	23
図-2.2.13	$\alpha^*$ とマッチングポイントの関係	23
図-2.2.14	マッチングポイントの選定と残差二乗和の関係	25
図-2.2.15	自動クーパー法による解析フロー	26
図-2.2.16	マッチングの残差	27
図-2.2.17	マッチング状況図(実測時間)	28
図-2.2.18	マッチング状況図(無次元時間)	28
図-2.3.1	ボシュレフ法に見られる地盤の貯留性の影響	30
図-2.3.2	クーパー法の標準曲線形状の違い	31
図-2.3.3	クーパー法の標準曲線の傾き	32
図-2.3.4	クーパー法の標準曲線の最大傾きと $\alpha$ の関係	32
図-2.3.5	ボシュレフ型の試験結果のクーパー法による解析	34
図-3.2.1	透水係数の解析結果	41
図-3.2.2	比貯留係数の解析結果	42
図-4.1.1	インターバル中央水頭に対する水頭比	52
図-4.7.1	非定常単孔式試験孔周辺での水頭変化	55

## 表 目 次

表-2.2.1	クーパー法の解析事例	.....	16
表-2.2.2	$\alpha^*$ とマッチングポイントの関係	.....	24
表-2.2.3	オラクル地区花崗岩でのパルス試験結果	.....	27
表-2.3.1	非定常型単孔式現場透水試験結果の解析手法の比較	.....	29
表-3.1.1	実測データの特性一覧	.....	35
表-3.2.1	ボシュレフ法による解析結果一覧	.....	37
表-3.2.2	クーパー法による解析結果一覧	.....	38
表-3.2.3	ブレドホフト法による解析結果一覧	.....	39
表-3.2.4	自動クーパー法による解析結果一覧	.....	40

## 付 図 目 次

付図－1	解析結果一覧図 (SN6006TA)	……………	付1
付図－2	解析結果一覧図 (SN6006KA)	……………	付2
付図－3	解析結果一覧図 (SN6014TA)	……………	付3
付図－4	解析結果一覧図 (SN6014KA)	……………	付4
付図－5	解析結果一覧図 (DH2066TB)	……………	付5
付図－6	解析結果一覧図 (DH2066KA)	……………	付6
付図－7	解析結果一覧図 (DH2096TA)	……………	付7
付図－8	解析結果一覧図 (DH2096KA)	……………	付8
付図－9	解析結果一覧図 (DH2120TA)	……………	付9
付図－10	解析結果一覧図 (DH2120KA)	……………	付10
付図－11	解析結果一覧図 (DH2131TB)	……………	付11
付図－12	解析結果一覧図 (DH2131KA)	……………	付12
付図－13	解析結果一覧図 (DH2160TB)	……………	付13
付図－14	解析結果一覧図 (DH2160KB)	……………	付14
付図－15	解析結果一覧図 (SN6060CA)	……………	付15
付図－16	解析結果一覧図 (SN6060KA)	……………	付16
付図－17	解析結果一覧図 (SN6070CA)	……………	付17
付図－18	解析結果一覧図 (SN6070KA)	……………	付18
付図－19	解析結果一覧図 (SN6076CA)	……………	付19
付図－20	解析結果一覧図 (SN6076KA)	……………	付20
付図－21	解析結果一覧図 (SN6082CA)	……………	付21
付図－22	解析結果一覧図 (SN6082KA)	……………	付22
付図－23	解析結果一覧図 (P100911)	……………	付23
付図－24	解析結果一覧図 (P100912)	……………	付24
付図－25	解析結果一覧図 (P101203)	……………	付25
付図－26	解析結果一覧図 (P101204)	……………	付26
付図－27	解析結果一覧図 (P101205)	……………	付27
付図－28	解析結果一覧図 (P101206)	……………	付28



## 1. はじめに

地盤の浸透特性である透水係数や比貯留係数を求める手法として現場透水試験法が知られている。代表的な現場透水試験には単孔式現場透水試験法(以下、単孔式試験法)と多孔式透水試験法(以下、揚水試験法)があるが、透水性の極めて低い深部地盤の浸透特性を対象とする場合には、揚水試験法では揚水あるいは注水井戸での水理インパクトをこれらの井戸から離れた観測井戸で適確に観測することができないことがあり、揚水試験法よりも単孔式試験法が適用されることが多い。

単孔式試験法の特徴は地下水流れ場に水理インパクトを与える井戸とその反応をみる観測井戸が兼用されているので試験設備が簡便になるに加えて、揚水試験法の持つ観測井戸での反応が観測できるか否かというリスクが少ないという利点が認められる。

さて、試験方法は定常法と非定常法に大別できる。定常法とは注水あるいは揚水し、定常状態に達した時の孔内水頭と流出入流量の観測結果から透水係数を評価するものである。しかしながら、ここで対象とする地盤は地下数百m以深に存在する透水性の極めて低い岩盤であるため、試験中に移動する地下水流量が微少であり、定常状態に至るまでに長い時間を要することと微少の揚水流量あるいは注水流量を一定に維持する装置設備の困難さを考慮すると、定常型試験は透水性の低い岩盤には適しているとは言えない。対して、非定常法とは瞬間的に孔内水頭を増加あるいは減少させることで周辺地盤と試験孔間に地下水流を発生させ、これによる逸散あるいは供給により孔内外水頭差が解消されるまでの孔内水頭の経時変化を観測し、結果を解析することで透水係数や比貯留係数を評価するものである。他にも、非定常法には孔内外水頭差を一定に維持するために供給あるいは除去すべき流量の経時変化、あるいは流出入流量を一定に保つために必要な孔内外水頭差の経時変化を用いて地盤の浸透特性を評価することも考えられるが、前者の非定常試験法の方が実施しやすく、定常法と比較しても前者の非定常試験法は試験に要する時間が比較的短いことや試験の容易さから低透水性地盤での適用性は高いと考えられる。

このように、高い適用性を有する非定常試験法ではあるが、その試験結果の解析方法となると未だ解決されない問題点が挙げられる。まず、我が国で適用されることの多い解析手法はボシュレフ(Hvorslev)法<sup>1)</sup>である。この解析手法は地盤工学会の地盤調査法<sup>2)</sup>にも紹介され、我国の地盤調査における代表的な非定常単孔式試験結果の解析方法として位置づけられている。ところが、この解析手法は地盤内の地下水流れを定常流とみなしているため、地盤の貯留性の影響が試験結果に反映された場合には適切に解析することができない。非常に興味深い特性であるが、地盤の貯留性の影響とは地盤の貯留性の大小に関係することは当然であるが、それだけでなく試験孔の貯留性も関係してくる。たとえば、地盤の貯留性が同じであっても、試験孔の貯留特性を示す貯留項が小さいほど地盤の貯留性の影響が現れてくるのである。具体的には、試験時間を短縮する目的で用いられることの多

いパルス試験の場合には、閉塞区間を有するためオープンボアホールよりも試験孔の貯留性が小さくなり、地盤の貯留性の影響を受け易くなり、ボシュレフ法の適用に支障をきたすことがある。

これに対して、Cooperら<sup>3,4)</sup>やBredehoeftら<sup>5)</sup>は地盤の貯留性を考慮した解析手法を提案している。これらの手法では地盤の貯留性を考慮した非定常地下水流れを扱っているため、貯留性の影響の見られる試験結果に適用することが可能となる。逆に言えば、貯留性の影響の小さな場合には適用性が劣ることも知っておきたい。このように、クーパー(Cooper)法やブレドホフト(Bredehoeft)法はボシュレフ法を補完する手法として位置づけることができるが、我国では適用された事例は極めて少ない。この理由についてはいくつか考えられるが、標準曲線を複数本用意しこれと観測データをマッチングさせるという作業の煩雑さが適用を遠ざけているとみなせる。しかしながら、深部岩盤の先駆的な研究が報告されているSKBレポート<sup>6)</sup>に取り上げられた単孔現場透水試験法のレビューとをヨーロッパの地盤で行われた試験結果に適用性の報告書には、Cooperらの方法は紹介されているが、ボシュレフ法にはまったく触れられていない。

このような背景から、既存の非定常単孔式試験法の解析手法が我国の地盤においてどの程度の適用性を有するかを吟味する必要があると考えられ、解析手法の比較検討を実施することとする。特に、本業務では動燃事業団によってこれまでに実施してこられた地下数百m深部を対象とした非定常単孔式現場透水試験結果を、ボシュレフ法、クーパー法、ブレドホフト法、そして筆者らの開発した自動クーパー法<sup>7,8,9)</sup>の4手法でそれぞれ解析し、各試験結果に対する解析手法の適用性を吟味する。さらに、試験方法および解析方法の問題点を抽出し、今後の研究課題として紹介する。

## 2. 試験方法および解析手法

はじめに、単孔式現場透水試験の概要を示し、試験結果の整理手法の比較として、ここでは各整理手法の理論的背景、解析方法などに焦点をあてて解説する。

### 2. 1 試験方法

ここでは、非定常単孔式現場透水試験法の基本原理を示す。

図-2.1.1に示すような試験孔を用いて以下の試験手順にしたがって試験を行う。

[試験手順]

- ①試験孔内の水頭を瞬時に上昇あるいは低下させる。
- ②試験孔内外の水頭差によって、内外に水流が生じ孔内水頭は初期状態(試験開始前)に戻りはじめる。
- ③この時の孔内水頭の経時変化を計測する。
- ④計測された孔内水頭と時間の関係を解析手法毎に要求されるグラフ用紙上のプロットを用いて解析し、透水係数そして手法によっては比貯留係数を評価できる。

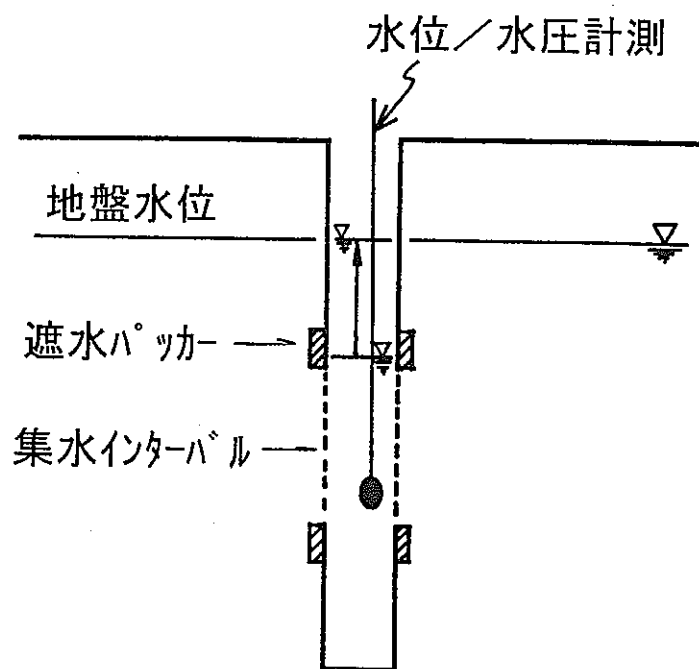


図-2.1.1 単孔式現場透水試験孔

試験では手順①における瞬時の水頭差の発生には、理論的には一定体積の水を孔内貯留から除去あるいは孔内へ注入することで実現できるが、実際にこれを行なうと孔内貯留水が振動するため適切な水頭観測ができない等の問題が生じる。本検討ではこの手法に関して言及することは検討対象範囲を逸脱するのでここでは深く触れることは避けるが、現在行われている手法では短時間にできる限り振動などが起こらないように静かに孔内水頭を変化させる手法がとられている。実際に行なわれている手法では図-2.1.2の模式図に示すように試験開始前から孔内水頭を計測し、孔内水を徐々に除去あるいは注入することで孔内水頭を変化させる。このような水頭差を生じさせる作業の前後を通じての孔内水頭計測結果から、ピーク水頭差を初期水頭差  $h_0$  とし、この時の時間を試験開始時間 ( $t = 0$ ) とする。

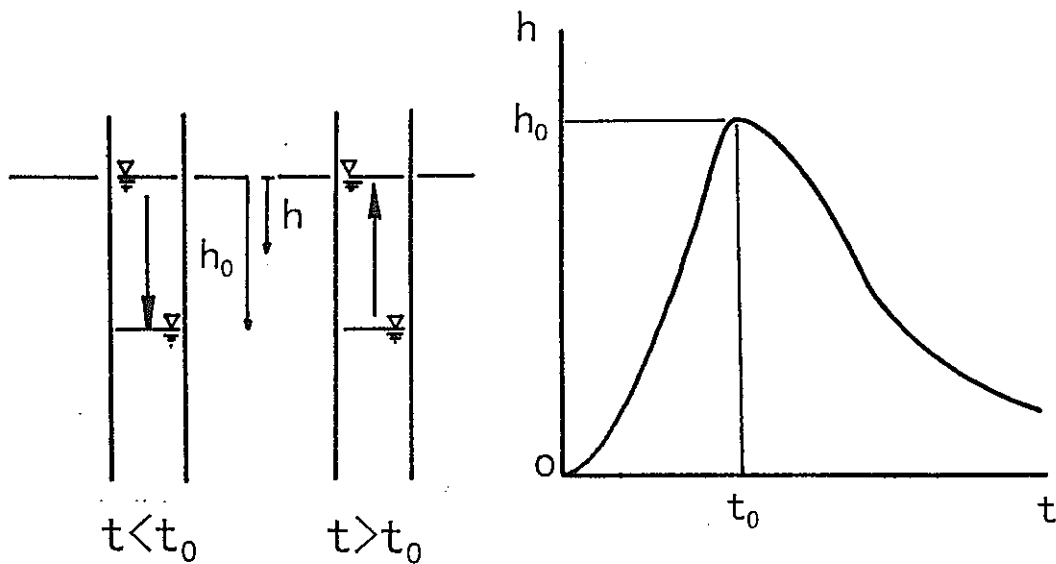


図-2.1.2 初期水頭差の決定手法

## 2. 2 解析手法

### 2. 2. 1 ボシュレフ法

ボシュレフ法<sup>1)</sup>はわが国では極めて一般的な単孔式現場透水試験結果の整理手法であり、地盤工学会による地盤調査法<sup>2)</sup>にも紹介されている手法である。本検討においてこの手法が他の三手法と異なるところは、試験結果のプロットにみられる直線部分の傾きを用いるという極めて簡便なこと、対象とする地下水流れが三次元放射状流であること、そして地盤内の地下水流れは定常流であることである。以下に、ボシュレフ法の理論展開と解析手順を示す。

#### (1) ボシュレフ法の理論展開

まず、ボシュレフ法は定常単孔式試験法であるパッカー法の解析式を基にして展開された非定常解析式であるピエゾメータ法の解析式を用いる。以下に西垣<sup>10)</sup>の紹介した誘導を参考にして理論的背景を概説する。

最初に無限の広がりを持つ三次元等方均質空間において無限小点が一定揚水流量あるいは一定注水流量  $q$  を受けた場合、定常時の点周囲の水頭変化を考える。この時の水頭低下量分布を示す理論式は、次式で与えられる事が知られている。

$$\begin{aligned}\nabla^2 h &= \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) h \\ &= 0\end{aligned}\quad (2.2.1)$$

ここで、 $h$  : 水頭低下量[L] (無限遠方では水位低下が無いとしている)、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  : 三次元直交座標[L]。

この無限小点に集中する地下水流れは三次元放射状流であり、中心点からの距離  $r$  を用いて座標軸を代表させることができ、次式の一般解を得る。

$$h = \frac{c}{r} \quad (2.2.2)$$

ここで、 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  [L]、 $c$  は定数。

式(2.2.2)には境界条件として、無限小点から距離  $r$  だけ離れた同心球面を通過する総流量は中心点での流量  $q$  に一致する次式の条件を与える。

$$q = -4\pi r^2 K \frac{dh}{dr} \quad (2.2.3)$$

ここで、 $K$  : 透水係数[L/T]

式(2.2.3)を式(2.2.2)に代入して定数  $c$  を求めると以下のようなになる。

$$c = \frac{q}{4\pi K} \quad (2.2.4)$$

よって、一般解(2.2.2)は次式の特解となる。

$$h = \frac{q}{4\pi Kr} \quad (2.2.5)$$

さて、実際の試験孔は図-2.2.1に示す集水インターバルを有することからインターバル上に無数の揚注水点が存在する数学モデルを想定する。インターバルを通過する総流量を $Q$ とし、インターバル上では等分布流入流量が認められると考え、インターバル長さ $L$ で除すことで等分布流量を仮定しこれを再度 $q$ と表示する。図-2.2.1を参照し、微小インターバル区間 $d\zeta$ を用いると次式となる。

$$q = \frac{Q}{L} d\zeta \quad (2.2.6)$$

このようにして決められた点源揚注水流量によって任意の位置で得られる水頭変化は次式の積分式を解くことで得られる。

$$\begin{aligned} h &= \frac{Q}{4\pi KL} \int_0^L \frac{d\zeta}{r} \\ &= \frac{Q}{4\pi KL} \int_0^L \frac{d\zeta}{\sqrt{(z-\zeta)^2 + \rho^2}} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

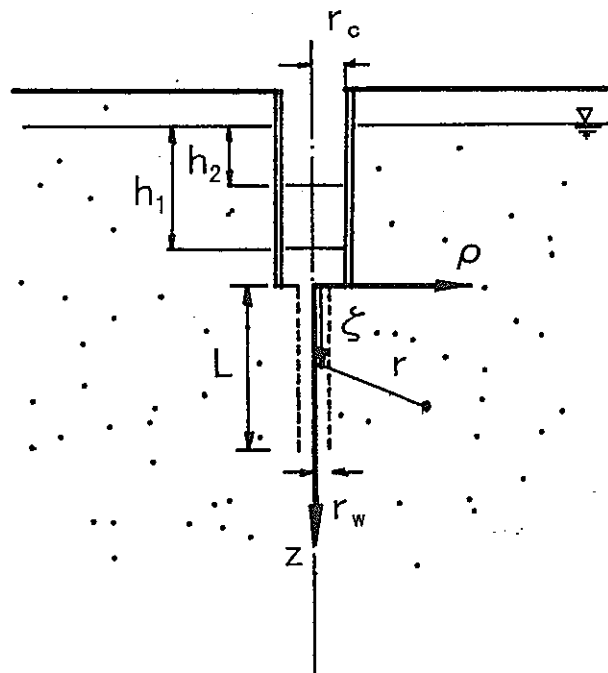


図-2.2.1 ポッシュレフ法の試験孔

式(2.2.7)中の積分はGradshteynらの積分公式集<sup>11)</sup>に見つけることができ、次式が誘導される。

$$h = \frac{Q}{4\pi KL} \left( \sinh^{-1} \frac{L-z}{\rho} + \sinh^{-1} \frac{z}{\rho} \right) \quad (2.2.8)$$

ここで、水頭評価点を試験孔の孔壁とすると、 $\rho = r_w$ とおくことができ次式となる。

$$h = \frac{Q}{4\pi KL} \left( \sinh^{-1} \frac{L-z}{r_w} + \sinh^{-1} \frac{z}{r_w} \right) \quad (2.2.9)$$

式(2.2.6)で仮定したようにインターバルに集まる流量が等分布の場合、インターバル孔壁での水<sup>①</sup>等分布は一定ではない。そこで、インターバル中央部 ( $z = L/2$ ) での水頭  $h = h_m$  を孔内水頭の代表水頭として式(2.2.9)を簡略化すると次式を得る。

$$h_m = \frac{Q}{2\pi KL} \left( \sinh^{-1} \frac{L}{2r_w} \right) \quad (2.2.10)$$

実際の単孔式透水試験では時間  $t = 0$  で初期水頭差  $h_0$  を与え、その後の孔内水頭回復量を観測するので、式(2.2.10)中の  $h_m$  が時間の関数である必要がある。このため、単位時間における流入出流量  $Q$  と孔内水頭変化を表す以下の関係式を導入する。

$$Q = -C_w \frac{dh_m}{dt} \quad (2.2.11a)$$

ここで、 $C_w$  は井戸貯留項であり、図-2.2.2を参照して以下のように定義される。

オープンホールの場合  $C_w = \pi r_c^2 \quad (2.2.11b)$

閉塞試験孔の場合:  $C_w = c_w \gamma_w V = c_w \gamma_w L \pi r_w^2 \quad (2.2.11c)$

ここで、 $c_w$  : 閉塞区間内の水の圧縮係数 [ $F^{-1}L^2$ ]、 $\gamma_w$  : 水の単位体積重量 [ $FL^3$ ]、 $V$  : 閉塞区間内の水の体積 [ $L^3$ ]。さらに、閉塞材料の圧縮性を考慮する場合には  $c_w$  が修正される。

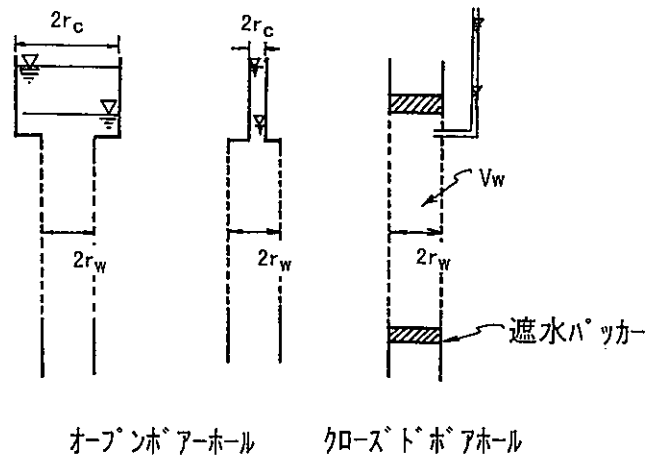


図-2.2.2 試験孔貯留項の定義

よって、式(2.2.10)は以下のように展開できる。

$$h_m = -\frac{C_w}{2\pi KL} \left( \sinh^{-1} \frac{L}{2r_w} \right) \frac{dh_m}{dt} \quad (2.2.12)$$

$$dt = -\frac{C_w}{2\pi KL} \left( \sinh^{-1} \frac{L}{2r_w} \right) \frac{dh_m}{h_m} \quad (2.2.13)$$

時間  $t = t_1 \sim t_2$  の間に  $h_m = h_1 \sim h_2$  に変化したとすると、次式となる。

$$t_2 - t_1 = \frac{C_w}{2\pi KL} \left( \sinh^{-1} \frac{L}{2r_w} \right) \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.2.14)$$

よって、水頭回復は以下の式で表現できる。

$$\ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right) = -\frac{2\pi KL}{C_w \left( \sinh^{-1} \frac{L}{2r_w} \right)} (t_2 - t_1) \quad (2.2.15)$$

一般に、知られている算定式<sup>2)</sup>は定義式(2.2.11b)を  $C_w$  として展開した場合である。

## (2) ポシュレフ法による解析手順

式(2.2.15)によれば横軸に時間そして縦軸に対数化した水頭値をプロットすると、図-2.2.3に示すように水頭と時間の関係が直線関係になり、その傾きが式(2.2.15)の時間項にかかる定数項となる。単孔式試験においてはこの定数項中の未知量は透水係数  $K$  に限定できるので、直線の傾きを知れば透水係数  $K$  を評価することができる。

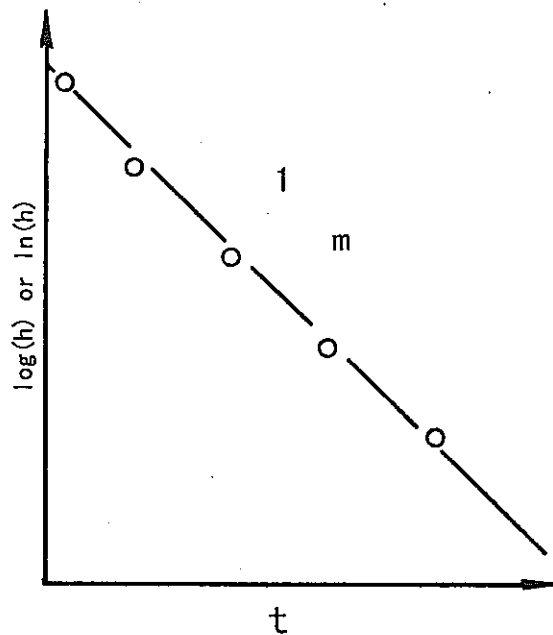


図-2.2.3 ポシュレフ法による解析プロット



また、一般に用いられることの多い試験孔の形状ではインターバル長  $L$  は試験孔半径  $r_w$  に比べて十分大きいと評価できるものであることから、関数  $\sinh^{-1}$  は以下の近似式に置き換えることが可能となる。

$$\sinh^{-1}(x) \approx \ln(2x) \quad \text{for } x > 4 \quad (2.2.16)$$

以下の手順で透水係数を評価する解析手順を示すことができる。

[解析手順]

- ① 試験結果を時間-対数化水頭軸上にプロットする。
- ② プロットに見られる直線部分の直線の傾き  $m$  を求める。
- ③ 次式によって透水係数  $K$  が評価できる。

$$\text{①の水頭対数が自然対数 } \ln: K = \frac{-mC_w (\sinh^{-1} \frac{L}{2r_w})}{2\pi L} = \frac{-mC_w \ln(\frac{L}{r_w})}{2\pi L} \quad (2.2.17a)$$

$$\text{①の水頭対数が常用対数 } \log: K = \frac{-2.3mC_w (\sinh^{-1} \frac{L}{2r_w})}{2\pi L} = \frac{-2.3mC_w \ln(\frac{L}{r_w})}{2\pi L} \quad (2.2.17b)$$

ボシュレフ法による解析事例を地盤調査法<sup>2)</sup> から図-2.2.4に引用した。

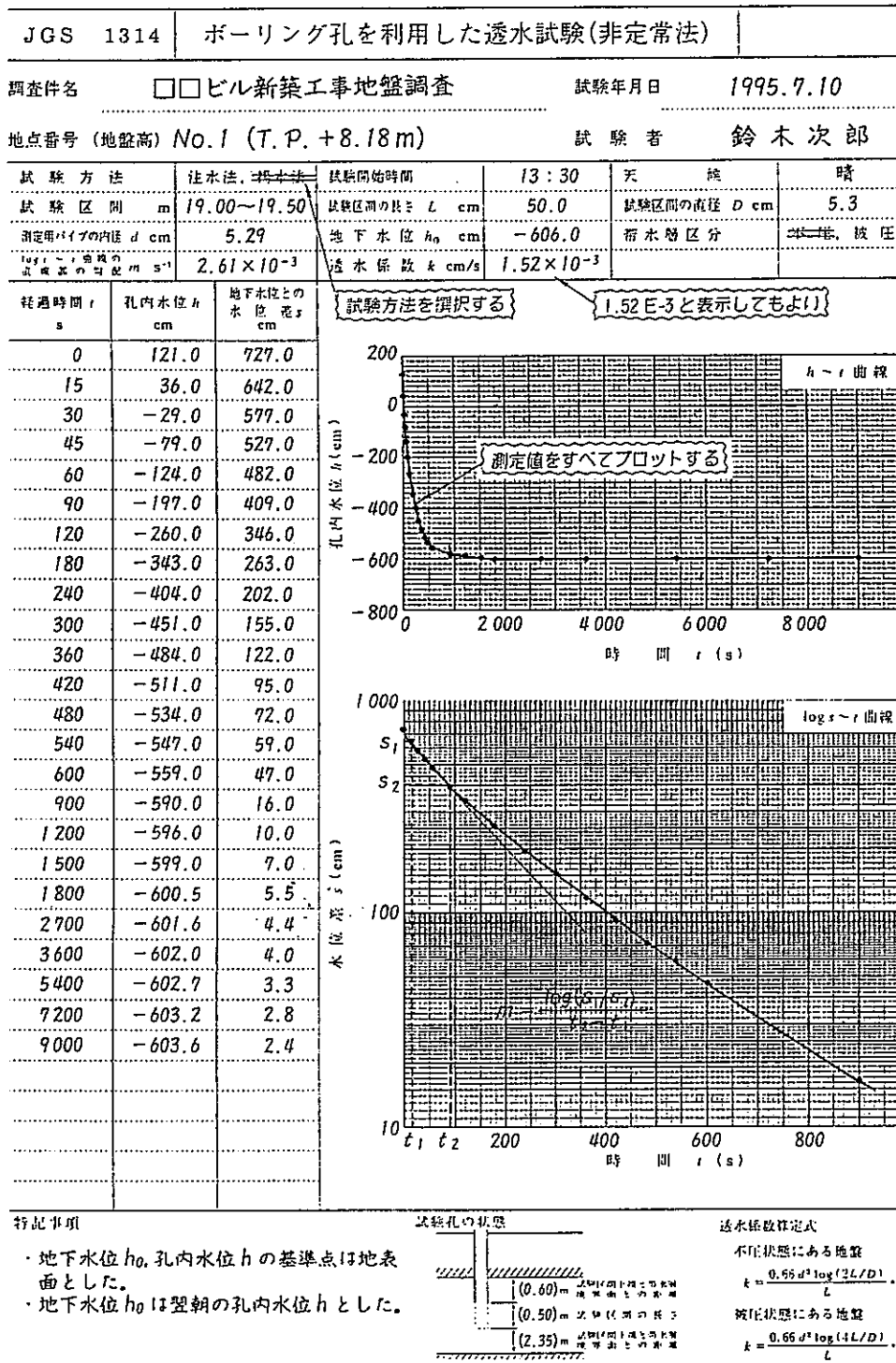


図-2.2.4 ボシユレフ法による解析事例(地盤工学会編地盤調査法<sup>2)</sup>から引用)

## 2. 2. 2 クーパー法

ボシユレフ法と比較すると、この方法は地盤の貯留性を考慮し、水平方向流れのみを扱う点異なる。地盤の貯留性の考慮は、スラグテストによる非定常挙動を試験孔内だけではなく地盤についても扱うことを意味する。クーパー法は以下の浸透方程式から誘導されている。

### (1) クーパー法の理論展開

Cooperら<sup>3, 4)</sup>は図-2.2.5に示す水平放射流場の拡散方程式を支配方程式として非定常単孔式透水試験結果の解析手法を提案した。

支配方程式

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.2.18)$$

ここで、 $h$  : 水頭低下量[L]、 $r$  : 試験孔中心からの距離[L]、 $T$  : 透水量係数[L<sup>2</sup>/T] =  $LK$ 、 $S$  : 貯留係数[-] =  $LS_s$ 、 $b$ および $L$  : 層厚でありインターバル長（完全貫入状態）、 $K$  : 透水係数[L/T]、 $S_s$  : 比貯留係数[1/L]

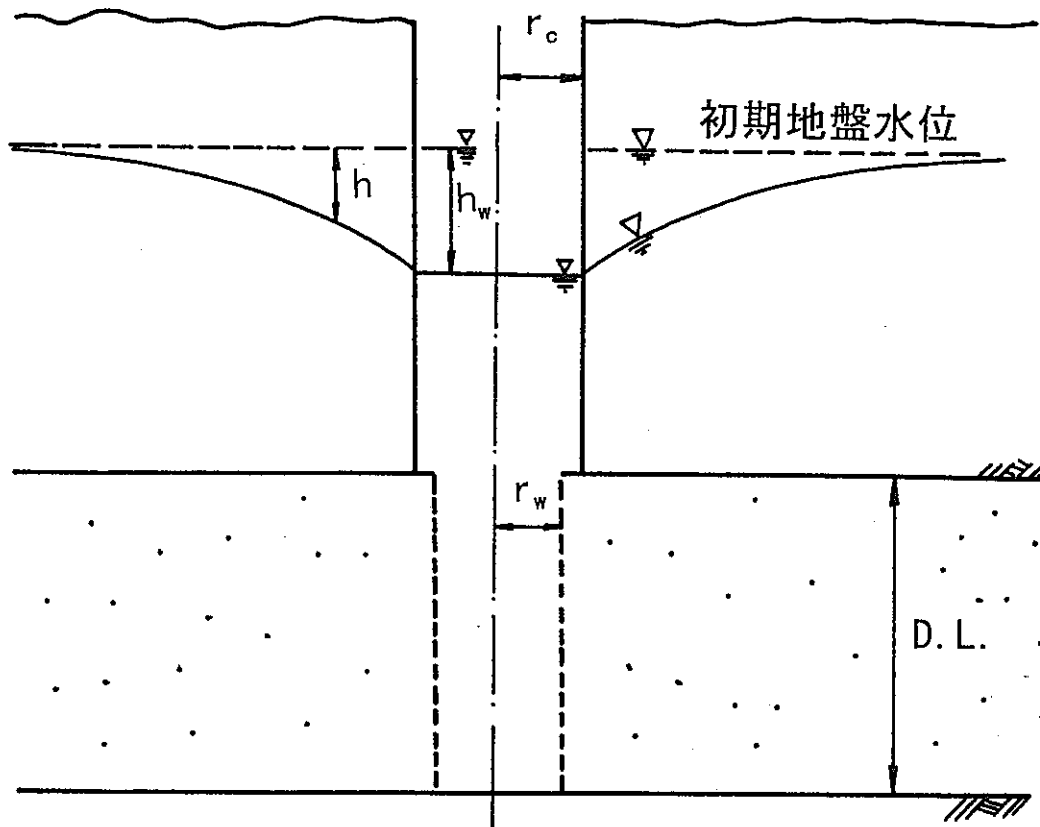


図-2.2.5 クーパー法の試験孔

初期条件として帯水層内の初期水頭低下量は0とする。

$$h(r, t = 0) = 0 \quad (2.2.19)$$

境界条件には以下の三境界条件が与えられる。

①無限遠方では水頭変化は生じない。

$$h(r, t) = 0 \quad \text{for } r \rightarrow \infty \quad (2.2.20)$$

②  $t = 0$ にて試験孔内での水頭低下量  $h = h_0$ とする。

$$h_w(t = 0) = h_0 \quad (2.2.21)$$

ここで、 $h_w(t)$  : 試験孔内水頭低下量

③試験中の孔内外の水頭差によって試験孔内と地盤間に地下水流が生じ、流入出流量に応じた試験孔内水頭変化がみられる。

$$2\pi Tr \frac{dh}{dr} \Big|_{r=r_w} = C_w \frac{dh_w}{dt} \quad (2.2.22)$$

ここで、 $C_w$ は(2.2.11b,c)で定義された試験孔の井戸貯留項である。

これらの関係をより汎用的な解として得るために無次元化表示を以下のように定義する。

$$h_D = h/h_0, r = r/r_w, t_D = \frac{Tt}{Sr_w^2}, \alpha = \frac{\pi r_w^2 S}{C_w}, \beta = \alpha t_D = \frac{\pi Tt}{C_w}$$

これらの無次元表示を用いて支配方程式、初期および境界条件を書き直すと以下となる。

$$\frac{\partial^2 h_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial h_D}{\partial r_D} = \frac{\partial h_D}{\partial t_D} \quad (2.2.24)$$

$$h_D(r_D, t_D = 0) = 0 \quad (2.2.25)$$

$$h_D(r_D, t_D) = 0 \quad \text{for } r_D \rightarrow \infty \quad (2.2.26)$$

$$h_{wD}(t_D = 0) = 1 \quad (2.2.27)$$

$$\frac{dh_D}{dr_D} \Big|_{r_D=1} = \frac{1}{2\alpha} \frac{dh_{wD}}{dt_D} \quad (2.2.28)$$

この方程式は、時間項についてラプラス変換することで解けることが知られている。以下に変換結果を示す。

$$\frac{\partial^2 \bar{h}_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{h}_D}{\partial r_D} = p \bar{h}_D - h_D(r_D, t_D = 0) \quad (2.2.29)$$

ここで、 $\bar{h}_D$  :  $h_D$ のラプラス変換、 $p$  : ラプラス変換パラメータ。

初期条件(2.2.25)を代入することで次式を得る。

$$\frac{\partial^2 \bar{h}_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{h}_D}{\partial r_D} - (\sqrt{p})^2 \bar{h}_D = 0 \quad (2.2.30)$$

式(2.2.30)は以下のベッセル関数による一般解を持つことが知られている<sup>12)</sup>。

$$\overline{h_D} = AI_0(\sqrt{pr_D}) + BK_0(\sqrt{pr_D}) \quad (2.2.31)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ は定数、 $I_0$ は第一種0次修正ベッセル関数、 $K_0$ は第二種0次修正ベッセル関数である。また、式(2.2.26)の境界条件のラプラス変換は以下となる。

$$\overline{h_D(r_D, t_D)} = 0 \quad \text{for } r_D \rightarrow \infty \quad (2.2.32)$$

式(2.2.31)に境界条件を導入する。まず、式(2.2.32)を導入すると以下となる。

$$\begin{aligned} \lim_{r_D \rightarrow \infty} \overline{h_D} &= \lim_{r_D \rightarrow \infty} AI_0(\sqrt{pr_D}) + BK_0(\sqrt{pr_D}) \\ &= A(\infty) + B(0) \end{aligned} \quad (2.2.33)$$

式(2.2.33)の式値が境界条件値0を満たすためには、 $A=0$ でなければならない。

$$A = 0 \quad (2.2.34)$$

$$\therefore \overline{h_D} = BK_0(\sqrt{pr_D}) \quad (2.2.35)$$

次に境界条件式(2.2.28)を導入する。

$$\left. \frac{dh_D}{dr_D} \right|_{r_D=1} = \left. \frac{dBK_0(\sqrt{pr_D})}{dr_D} \right|_{r_D=1} = -B\sqrt{p}K_1(\sqrt{p}) \quad (2.2.36)$$

$$\left. \frac{dh_D}{dr_D} \right|_{r_D=1} = \frac{1}{2\alpha} \{p\overline{h_{wD}} - h_{wD}(0)\} \quad (2.2.37)$$

ここで、 $K_1$ : 第二種1次ベッセル関数

$h_{wD}(0)$ は式(2.2.27)により、1であることから上記の関係は次式となる。

$$\begin{aligned} -B\sqrt{p}K_1(\sqrt{p}) &= \frac{1}{2\alpha} (pBK_0(\sqrt{p}) - 1) \\ \therefore B &= \frac{1}{pK_0(\sqrt{p}) + 2\alpha\sqrt{p}K_1(\sqrt{p})} \end{aligned} \quad (2.2.38)$$

よって、以下の解を得る。

$$\therefore \overline{h_D(r_D)} = \frac{K_0(\sqrt{pr_D})}{pK_0(\sqrt{p}) + 2\alpha\sqrt{p}K_1(\sqrt{p})} \quad (2.2.39)$$

これより試験孔壁 ( $r_D=1$ ) での水頭の式は次式となる。

$$\therefore \overline{h_{wD}} = \frac{K_0(\sqrt{p})}{pK_0(\sqrt{p}) + 2\alpha\sqrt{p}K_1(\sqrt{p})} \quad (2.2.40)$$

さて、式(2.2.39)の逆ラプラス変換はCarslaw and Jaeger<sup>13)</sup>によって以下のように解かれており、Cooperら<sup>3)</sup>もこれを引用している。

$$h_D = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-y^2 t_D} \frac{g(y) dy}{\Delta y} \quad (2.2.41a)$$

$$g(y) = J_0(yr_D)[yY_0(y) - 2\alpha Y_1(y)] - Y_0(yr_D)[yJ_0(y) - 2\alpha J_1(y)] \quad (2.2.41b)$$

$$\Delta y = [yY_0(y) - 2\alpha Y_1(y)]^2 + [yJ_0(y) - 2\alpha J_1(y)]^2 \quad (2.2.41c)$$

ここで、 $J_0$ : 零次第1種ベッセル関数、 $J_1$ : 一次第1種ベッセル関数

$Y_0$ : 零次第2種ベッセル関数、 $Y_1$ : 一次第2種ベッセル関数

特に、 $r_D = 1$ の時、以下のように簡略化できる。

$$h_D = \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty e^{-y^2 t_D} \frac{dy}{y\Delta y} \quad (2.2.42)$$

## (2) クーパー法による解析手法

式(2.2.42)をいくつかの $\alpha$ について解くと、 $\beta - h_D$ 曲線を $\alpha$ 毎に得ることができる。Cooperら<sup>3,4)</sup>は $\alpha = 10^{-10} \sim 10^{-1}$ 間でのオーダー毎の $\alpha$ に対する $h_D$ を数表で与えた。この数表をプロットすると図-2.2.6に示すようである。この標準曲線群を用いた標準曲線とのマッチングによる解析手順は以下に示すようであり、図-2.2.7のフローに沿って解説する。

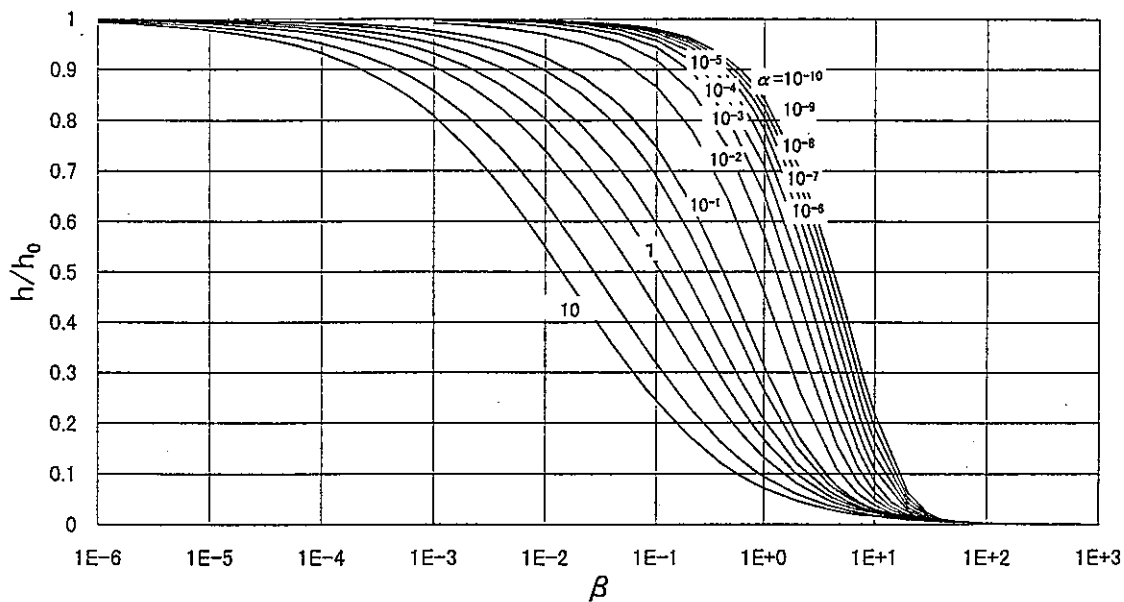


図-2.2.6 クーパー法の標準曲線群

[解析手順]

- ①図-2.2.6に示す対数化 $\beta-h_D$ 軸上にプロットした標準曲線群を用意する。
- ②単孔式試験結果は、対数化時間( $t$ )ー正規化水位低下量( $h/h_D$ )を標準曲線をプロットした座標軸と同じスケールをもつ座標軸にプロットする。
- ③このようにして得られた二枚のグラフ用紙を重ねあわせてマッチング作業を行なう。  
この時、水位低下量軸は標準曲線グラフも試験結果プロットグラフも0～1までの普通座標であるため互いに一致している。よって、マッチング作業では時間軸だけをスライドさせ、最もよく一致する標準曲線とプロットの組み合わせを探す。
- ④最もよく一致する組み合わせが選ばれたとき、マッチンググラフから曲線の値 $\alpha^*$ と任意マッチングポイントとして両時間軸の値 $\beta^*$ と $t^*$ を読みとる。
- ⑤以下の算定式を用いて透水量係数 $T$ と貯留係数 $S$ を評価する。

$$T = \frac{\beta^* C_w}{\pi \alpha^*} \quad (2.2.43a)$$

$$S = \frac{C_w \alpha^*}{\pi w^2} \quad (2.2.43b)$$

- ⑥透水係数 $K$ と比貯留係数 $S_s$ はさらに次式から評価する。

$$K = \frac{T}{L} \quad (2.2.44a)$$

$$S_s = \frac{S}{L} \quad (2.2.44b)$$

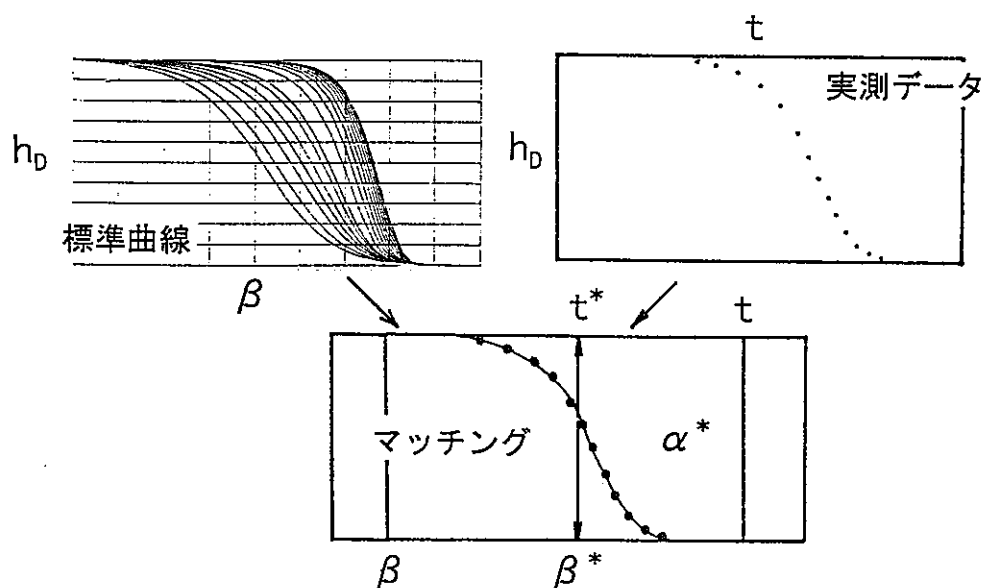


図-2.2.7 クーパー法による解析フロー

解析事例として、クーパーら<sup>3)</sup>の示した、事例を表-2.2.1および図-2.2.8に示す。

表-2.2.1クーパー法解析事例(Cooperら<sup>3)</sup>から引用)

t(sec)	h(m)	h/h <sub>0</sub>	t(sec)	h(m)	h/h <sub>0</sub>
0	0.560	1.000	33	0.149	0.266
3	0.457	0.816	36	0.140	0.250
6	0.392	0.700	39	0.131	0.234
9	0.345	0.616	42	0.122	0.200
12	0.308	0.550	45	0.108	0.193
15	0.280	0.500	48	0.093	0.166
18	0.252	0.450	51	0.089	0.159
21	0.224	0.400	54	0.082	0.146
24	0.205	0.366	57	0.075	0.134
27	0.187	0.334	60	0.071	0.127
30	0.168	0.300	63	0.065	0.116

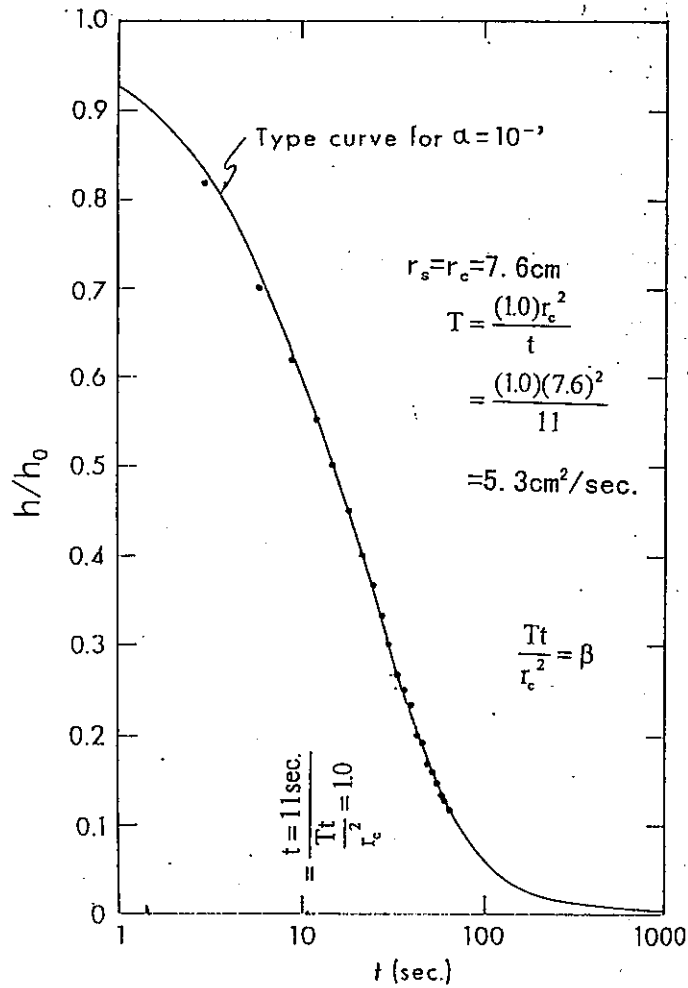


図-2.2.8 クーパー法の解析事例(Cooper<sup>3)</sup>から引用)



### (3) 表計算プログラムによるマッチング作業

クーパー法および事項で示すブレドホフト法では、一般に前節で示したように2枚のグラフ用紙を用いたマッチング作業が行なわれるが、部分的に拡大して詳細を確認したり、複数本の曲線が隣接する区間で一つの曲線に集中してマッチングを行ないたい、といった要求には紙上プロットでは融通がきかない。

そこで、パーソナルコンピュータの汎用アプリケーションにみられるグラフ作成機能を有した表計算プログラムの利用を紹介する<sup>14)</sup>。以下にその概要を説明する。

- ①標準曲線データとして、 $\beta - h_D$  (あるいは $\alpha\beta - h_D$ ) の関係をデータ入力する。
- ② $\log(\beta) - h_D$  曲線群をグラフ化し、画面上に出力する。
- ③試験データとして、 $t - h_D$  の関係をデータ入力する。
- ④ $t$  には任意の係数 $n$ を乗じた後、 $\log(n t) - h_D$  グラフを②と同じ座標軸上に表示する。
- ⑤係数 $n$ を徐々に変更すると画面上の試験データグラフが横軸に平行移動するので、最もよく一致する曲線とマッチング位置を探し出す。
- ⑥最適なマッチングが得られた時、係数 $n$ は次式を満たす。

$$\text{クーパー法} \quad n = \frac{\beta^*}{t^*} \quad (2.2.45a)$$

あるいは

$$\text{ブレドホフト法} \quad n = \frac{(\alpha\beta)^*}{t^*} \quad (2.3.28b)$$

⑦式(2.2.43a)あるいは後に示す式(2.2.47a)に代入することで透水量係数を算出する。

また、以下の特徴がある。

- 表示するグラフを選択できるので、集中していくつかのグラフとのマッチングを行える。
- 座標軸幅を変更、あるいはトリミングによる拡大によってマッチング部分を拡大表示できる。
- 試行結果として無次元時間と実測時間の比が得られるので、マッチングポイントを選んで各々の座標を読み取る手間と読み取り誤差が削減できる。

### 2. 2. 3 ブレドホフト法

ブレドホフト法<sup>5)</sup>は本質的にクーパー法と変わるところはないが、地盤の貯留性の影響が大きくみられた試験結果に対応した手法である。第1章でも触れたが、地盤の貯留性の影響がおおきく認められる試験結果では前節で示した $\alpha$ 値が大きくなり、クーパー法で与えた $\alpha=10^{-1}$ よりも大きな値の標準曲線が要求されることがあり、これに対応した手法としてブレドホフトらの方法が位置づけられる。ここで、 $\alpha$ が大きくなる場合の状況を簡単に示す。 $\alpha$ の定義式は式(2.2.23)にみられるものであり、 $\alpha$ が大きくなる場合は地盤の貯留係数 $S$ が大きい時だけでなく、井戸貯留項 $C_w$ が小さい場合にもみられる(なお、式(2.2.23)には試験孔インターバル半径 $r_w$ も関係してくるが、ここでいう $\alpha$ の大小はオーダー単位のものであり、 $r_w$ がオーダーに関与するほどに大きさの違う試験孔を用いることはない)。パルス法のように試験孔インターバル閉塞区間のパッカーや閉塞区間内の滞留水の圧縮性に基づいて $C_w$ が式(2.2.11c)によって決定される場合には、式(2.2.11b)によるスラグ法の場合とは異なり $C_w$ は数オーダー小さくなることから、同じ地盤でも $\alpha$ の値はパルス法では大きくなる。

また、ブレドホフト法ではマッチングという視覚に訴える技法であることを考慮して複数の標準曲線の違いが明確になるグラフ座標軸を採用している。さらに、 $\alpha$ 値が10以上では標準曲線形状がに違いが見られなくなることを考慮して、このグラフの推定式を別途提案している。

#### (1) ブレドホフト法の理論展開

ここでの理論展開は項(2.2.2)クーパー法で示したものと全く同一であるため重複を避けるが、最終的には式(2.2.41)および(2.2.42)が誘導される。

さらに、ブレドホフト法では $\alpha$ 値が大きくなると標準曲線の形状がに差がなくなること示し、次式の推定式を提案した。

$$h_D \cong e^{4\alpha\beta} \operatorname{erfc}[2(\alpha\beta)^{\frac{1}{2}}] \quad (2.2.46)$$

この式の有効範囲について、Bredehoeftら<sup>5)</sup>は明言していないが、彼らの示した標準曲線群が $\alpha=0.1\sim 10$ の範囲であることから、 $\alpha > 10$ が式(2.2.46)の適用範囲であると判断する。後節で示すマッチング技法によって式(2.2.46)で表される曲線と試験結果が一致した場合には、 $\alpha$ と $\beta$ を分離することができない。それゆえに、透水係数と貯留係数の積の形が得られることになり、別の情報からどちらか一方の値を導入しない限りは個々の係数を決定できない。

#### (2) ブレドホフト法の解析手法

クーパー法と同様の手法でマッチングすることで解析することができるが、図-2.2.9に示すように時間軸の取り方が図-2.2.6に示したクーパー法の標準曲線グラフとは若干異なっている。

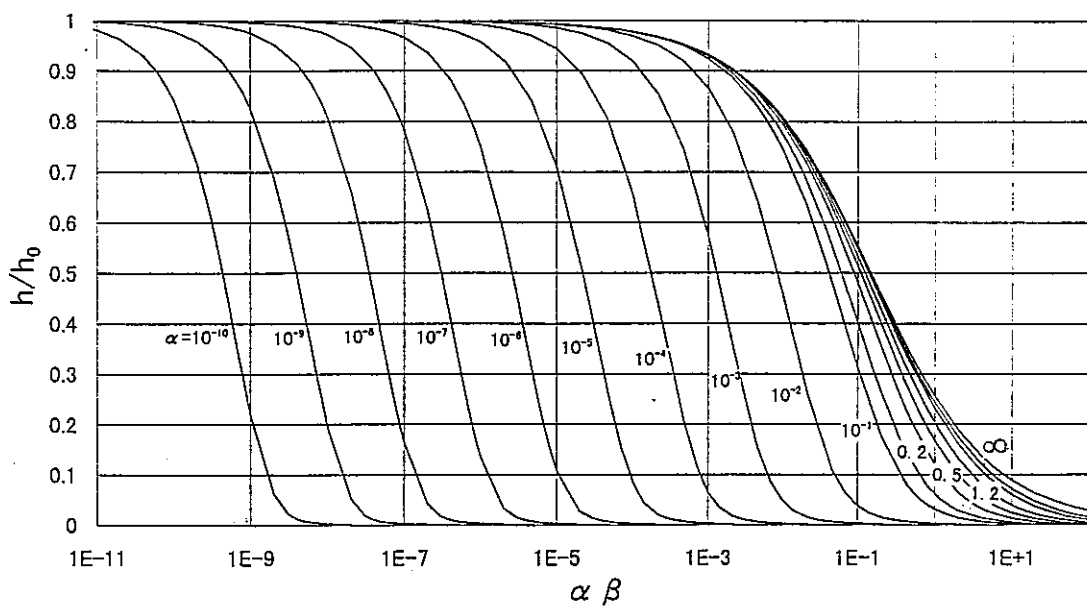


図-2.2.9ブレドホフト法の標準曲線群

解析手順は図-2.2.10に示すようであり、以下に解説する。

- ①図-2.2.9に示すように対数化 $(\alpha\beta) - h_D$ 軸上にプロットして標準曲線群を用意する。
- ②単孔式試験結果は、対数化時間 $(t) -$ 正規化水位低下量 $(h/h_0)$ を標準曲線をプロットした座標軸と同じスケールをもつ座標軸にプロットする。
- ③このようにして得られた二枚のグラフ用紙を重ねあわせてマッチング作業を行なう。  
この時、水位低下量軸は標準曲線グラフも試験結果プロットグラフも0～1までの普通座標であるため互いに一致しているので、マッチング作業では時間軸だけをスライドさせることで最もよく一致する標準曲線とプロットの組み合わせを探す。
- ④最もよく一致する組み合わせが選ばれたとき、マッチンググラフから曲線の値 $\alpha^*$ と任意マッチングポイントとして両時間軸の値 $(\alpha\beta)^*$ と $t^*$ をよみとる。
- ⑤以下の算定式を用いて透水量係数 $T$ と貯留係数 $S$ を評価する。

$$T = \frac{(\alpha\beta)^* C_w}{\pi^*} \quad (2.2.47a)$$

$$S = \frac{C_w \alpha^*}{\pi_w^2} \quad (2.2.47b)$$

⑥透水係数 $K$ と比貯留係数 $S_s$ はさらに次式から評価する。

$$K = \frac{T}{L} \quad (2.2.48a)$$

$$S_s = \frac{S}{L} \quad (2.2.48b)$$

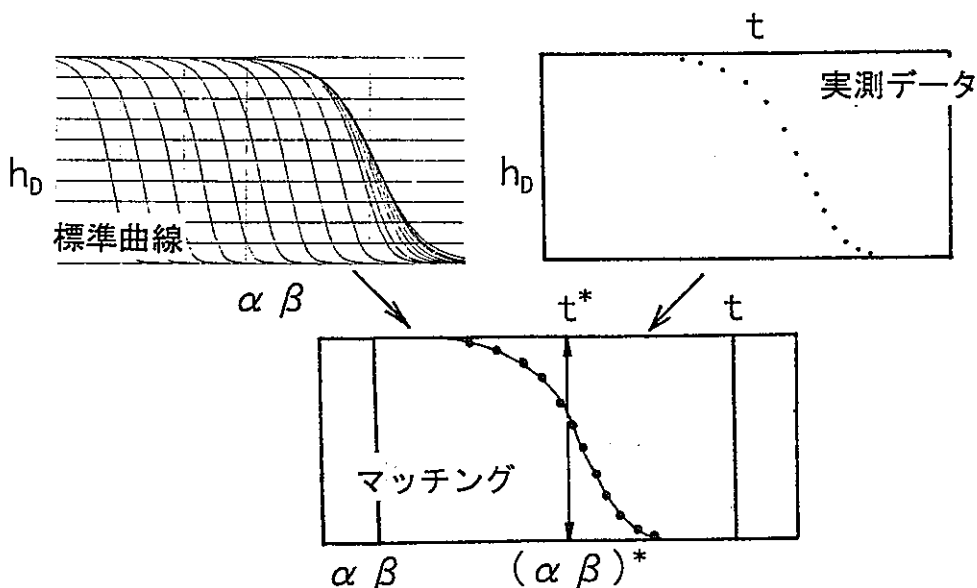


図-2.2.10 ブレドホフト法による解析フロー

## 2. 2. 4 自動クーパー法

自動クーパー法はクーパー法とブレドホフト法の問題点を解決する手法として進士ら<sup>7,8,9)</sup>によって提案された。ここでいうクーパー法およびブレドホフト法の問題点は以下のものである。

①Cooperら<sup>3,4)</sup>、Bredehoeftら<sup>5)</sup>の与えられた標準曲線はそれぞれ限られた $\alpha$ 値に対するものなので、解析結果もこれら $\alpha$ 値に依存する。

②視覚的に判断して、 $\alpha < 10^{-7}$ ではオーダー単位で異なる $\alpha$ 値に対しても曲線形状は極めて類似しているので最適マッチング曲線を目視で選ぶことが困難である。

③選ばれた曲線とのマッチングがどの程度の精度でなされているか定量的に評価しづらい。

そこで、これらの問題点を解決するために自動クーパー法として電子計算機プログラムによるマッチングの自動化手法を開発した進士らの手法<sup>9)</sup>を以下に示す。

### (1) 自動クーパー法の理論展開

自動クーパー法はクーパー法による手作業をパーソナルコンピュータで実施できるようにしたもので、解析理論は項(2.2.2)で示したものと全く同一である。さらに、ブレドホフト法もクーパー法とは理論展開が全く同じのものであり、対象となる $\alpha$ 値の範囲が異なるだけであるので、 $\alpha$ の対象範囲を広くとることで自動クーパー法は両手法に対応することが可能である。

まず、先にあげた最初の課題である「限られた $\alpha$ 値に対してしか標準曲線が求められていなかった」点に対しては、式(2.2.41a, b, c)にみられる0～無限大までの積分を区分求積法によって求めることができる<sup>7)</sup>。しかしながら、この手法では計算時間がかかるため、試行錯誤による自動マッチングプログラムに適した方法とはいえない。そこで、このような積分を行わない数値逆ラプラス変換技法によって所定の $h_D$ を算定することとする。

この技法は、Stehfest<sup>15)</sup>やCrump<sup>16)</sup>らの研究により大成されたもので、ラプラス変換された $\overline{h_D}$ 式(ここでは(2.2.39))から直接 $h_D$ を評価することができる。当検討で用いた数値逆ラプラス変換手法はde Hoogら<sup>17)</sup>の研究成果をもとに作製されたNumerical Visual社の提供するISMライブラリーに収められている科学計算ルーチンである。

次に、自動マッチングの概念を示す。

クーパー法でマッチングが必要なパラメータは、 $\alpha$ と $\beta$ であるが、双方それぞれについて所定の試行範囲内で選んだ値に対して $h_D$ 値を求めることも計算時間の要するものである。しかしながら、手作業によるマッチング作業を鑑みると、試験結果の全プロットと一致させようとはしないで、いくつかの代表的な点をまず選んだ標準曲線に合わせてみて、全体のプロットが曲線上に乗っているか否かを見ている(図-2.2.11参照)。

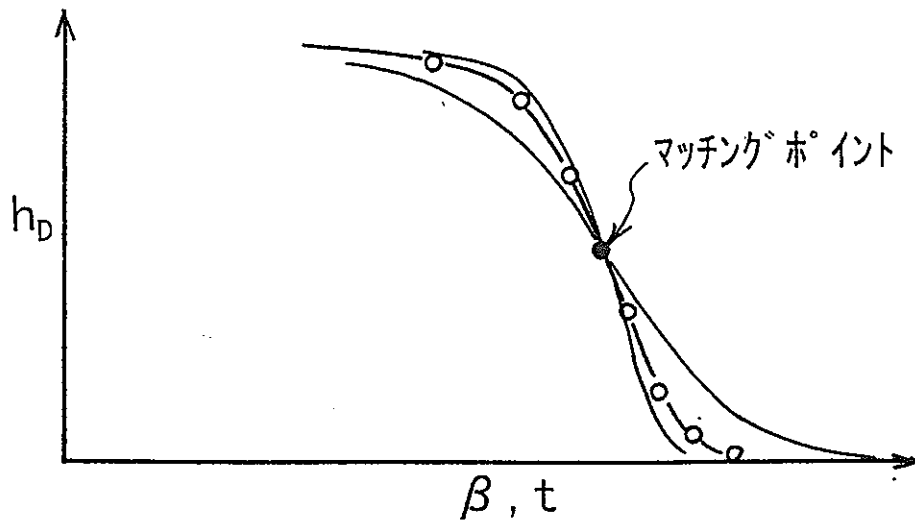


図-2.2.11 クーパー法での目視マッチングの試行

そこで、自動化手法でも「代表点は必ず選んだ標準曲線上にある」と仮定する。例えば、 $h_D=0.5$ では必ずマッチングさせるとするなら、図-2.2.12のようにして選ばれた曲線値  $\alpha^*$ に対する時間軸のマッチングポイント  $\beta^*$ と実測時間  $t^*$ は自ずと決まり、事前にこの時の  $\alpha^*$ と  $\beta^*$ の関係を知ることができる。この観点にたつて、5つの水位低下量を大評点として選んだ時の  $\alpha - \beta$ の関係を求めた。その結果を表-2.2.2および図-2.2.13に示す。この技法により、事前に試験データのマッチング水頭  $h_D$ ポイントを設定し、その時の時間  $t^*$ を求めておけば、自動マッチングにおけるパラメータのリサーチ範囲は、 $\alpha$ だけに依存するものに簡略化できることになる。

この関係から非常に重要な特性が伺える。すなわち、図-2.2.13に示すように  $\alpha^*$ の値が比較的小さい範囲では選ばれるマッチングポイントの  $\beta^*$ 値は  $\alpha^*$ の変動ほどには変化しない。結果として、式(2.2.43aおよび44a)に観られるように、 $\beta^*$ 値から求められる透水量係数  $T$ や透水係数  $K$ は、式(2.2.43bおよび44b)を用いて  $\alpha^*$ 値から求められる貯留係数  $S$ や比貯留係数  $S_g$ の変動ほどには違いがみられない。この特性については、Cooperら<sup>3)</sup>も、 $\alpha$ の数オーダーの違いは  $\beta$ の算定値すなわち透水係数値には数十%程度の違いにしか影響しないというコメントを示している。

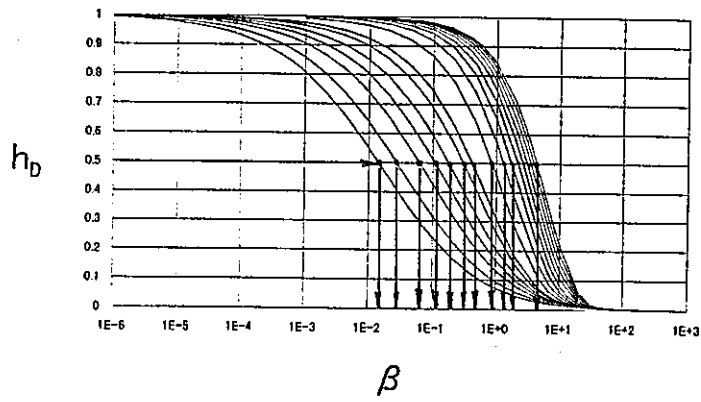
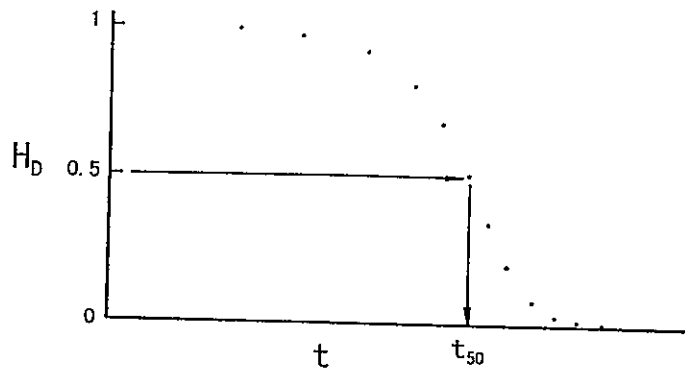


図-2.2.12 マッチングポイントの選定

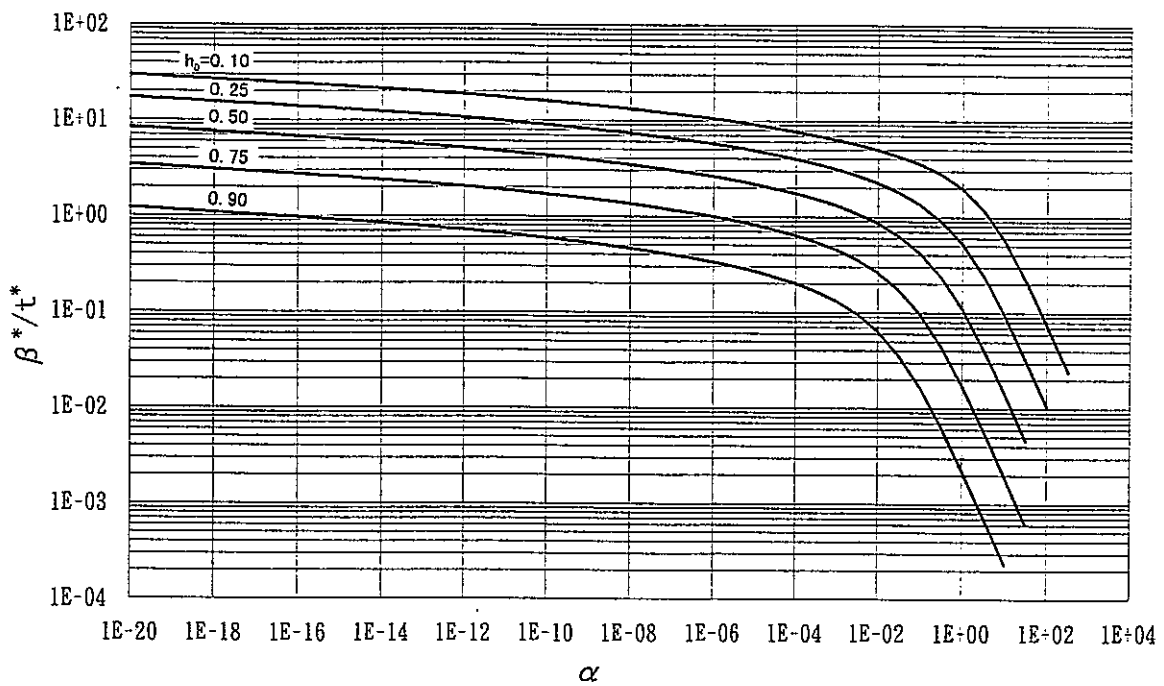


図-2.2.13  $\alpha^*$ とマッチングポイントの関係

表-2.2.2  $\alpha^*$ とマッチングポイントの関係

$\alpha/hD$	9.00E-01	7.50E-01	5.00E-01	2.50E-01	1.00E-01
1.00E-20	1.22E+00	3.40E+00	8.39E+00	1.72E+01	2.96E+01
3.16E-20	1.18E+00	3.31E+00	8.19E+00	1.68E+01	2.89E+01
1.00E-19	1.15E+00	3.23E+00	7.98E+00	1.64E+01	2.82E+01
3.16E-19	1.12E+00	3.15E+00	7.78E+00	1.60E+01	2.75E+01
1.00E-18	1.09E+00	3.06E+00	7.57E+00	1.56E+01	2.69E+01
3.16E-18	1.06E+00	2.98E+00	7.37E+00	1.52E+01	2.62E+01
1.00E-17	1.03E+00	2.89E+00	7.17E+00	1.48E+01	2.55E+01
3.16E-17	9.98E-01	2.81E+00	6.96E+00	1.44E+01	2.48E+01
1.00E-16	9.66E-01	2.72E+00	6.76E+00	1.40E+01	2.41E+01
3.16E-16	9.35E-01	2.64E+00	6.55E+00	1.36E+01	2.35E+01
1.00E-15	9.04E-01	2.55E+00	6.35E+00	1.32E+01	2.28E+01
3.16E-15	8.73E-01	2.47E+00	6.14E+00	1.28E+01	2.21E+01
1.00E-14	8.42E-01	2.38E+00	5.94E+00	1.23E+01	2.14E+01
3.16E-14	8.10E-01	2.30E+00	5.73E+00	1.19E+01	2.08E+01
1.00E-13	7.79E-01	2.21E+00	5.52E+00	1.15E+01	2.00E+01
3.16E-13	7.48E-01	2.12E+00	5.32E+00	1.11E+01	1.94E+01
1.00E-12	7.16E-01	2.04E+00	5.12E+00	1.07E+01	1.87E+01
3.16E-12	6.85E-01	1.95E+00	4.90E+00	1.03E+01	1.80E+01
1.00E-11	6.53E-01	1.86E+00	4.68E+00	9.82E+00	1.72E+01
3.16E-11	6.20E-01	1.77E+00	4.45E+00	9.31E+00	1.64E+01
1.00E-10	5.90E-01	1.69E+00	4.29E+00	9.02E+00	1.59E+01
3.16E-10	5.58E-01	1.61E+00	4.08E+00	8.61E+00	1.53E+01
1.00E-09	5.26E-01	1.52E+00	3.87E+00	8.19E+00	1.46E+01
3.16E-09	4.94E-01	1.43E+00	3.66E+00	7.78E+00	1.39E+01
1.00E-08	4.62E-01	1.35E+00	3.45E+00	7.36E+00	1.33E+01
3.16E-08	4.30E-01	1.26E+00	3.24E+00	6.94E+00	1.26E+01
1.00E-07	3.98E-01	1.17E+00	3.03E+00	6.52E+00	1.19E+01
3.16E-07	3.65E-01	1.09E+00	2.82E+00	6.11E+00	1.12E+01
1.00E-06	3.33E-01	9.95E-01	2.61E+00	5.69E+00	1.05E+01
3.16E-06	3.00E-01	9.06E-01	2.40E+00	5.27E+00	9.76E+00
1.00E-05	2.67E-01	8.16E-01	2.18E+00	4.84E+00	9.07E+00
3.16E-05	2.33E-01	7.26E-01	1.95E+00	4.41E+00	8.38E+00
1.00E-04	1.99E-01	6.34E-01	1.75E+00	3.98E+00	7.70E+00
3.16E-04	1.65E-01	5.42E-01	1.53E+00	3.55E+00	7.00E+00
1.00E-03	1.30E-01	4.48E-01	1.31E+00	3.12E+00	6.32E+00
3.16E-03	9.60E-02	3.54E-01	1.08E+00	2.69E+00	5.64E+00
1.00E-02	6.37E-02	2.60E-01	8.56E-01	2.25E+00	4.95E+00
3.16E-02	3.60E-02	1.72E-01	6.32E-01	1.80E+00	4.26E+00
1.00E-01	1.68E-02	9.71E-02	4.19E-01	1.35E+00	3.55E+00
3.16E-01	6.48E-03	4.48E-02	2.36E-01	9.14E-01	2.79E+00
1.00E+00	2.22E-03	1.72E-02	1.09E-01	5.26E-01	1.98E+00
3.16E+00	7.23E-04	5.87E-03	4.17E-02	2.44E-01	1.18E+00
1.00E+01	2.31E-04	1.91E-03	1.42E-02	9.38E-02	5.61E-01
3.16E+01	0.00E+00	6.09E-04	4.62E-03	3.20E-02	2.17E-01
1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.04E-02	7.41E-02
3.16E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.41E-02



次に、マッチング精度の指標について述べる。

マッチング精度の指標には、 $h_D$ の標準曲線値と実測プロット値の残差二乗和を用いることとした。さらに、汎用性を考慮して、残差二乗和を測定時間点数で除した平均値を用いることとする。残差最小二乗和を用いる場合、以下の点に注目する必要がある。先に示したように、マッチングポイントを事前に決める技法では、選ばれたマッチング水頭値で残差二乗和の意味が幾分異なる。例えば、図-2.2.14に  $h_D=0.5$ の場合と  $h_D=0.1, 0.9$ の場合の残差の模式図を示している。仮に、これら3ケースの最小残差二乗和が同じ時、どのマッチング結果を最良とみなすかかという問題が生ずる。 $h_D=0.5$ の場合には本質的に残差が±両側に分布する傾向を持つため最小残差二乗和は小さく算定される傾向をもつ。対して、 $h_D=0.1, 0.9$ の場合には残差はプラスかマイナスかどちらか一方にかたよる傾向を持つため、最小残差二乗和は大きく算定されがちである。以上の特性から、同程度の残差二乗和が算定された場合には、マッチング水頭  $h_D$ が0.5から離れた値をとるケースを良とすべきである。ただし、実際の試験では、 $h_D$ が1に近い部分および0に近い部分の試験結果はあまり精度が良くない傾向があることは認識しておくべきである。

上記の項目を考慮した自動解析プログラムが作製されている<sup>9)</sup>。

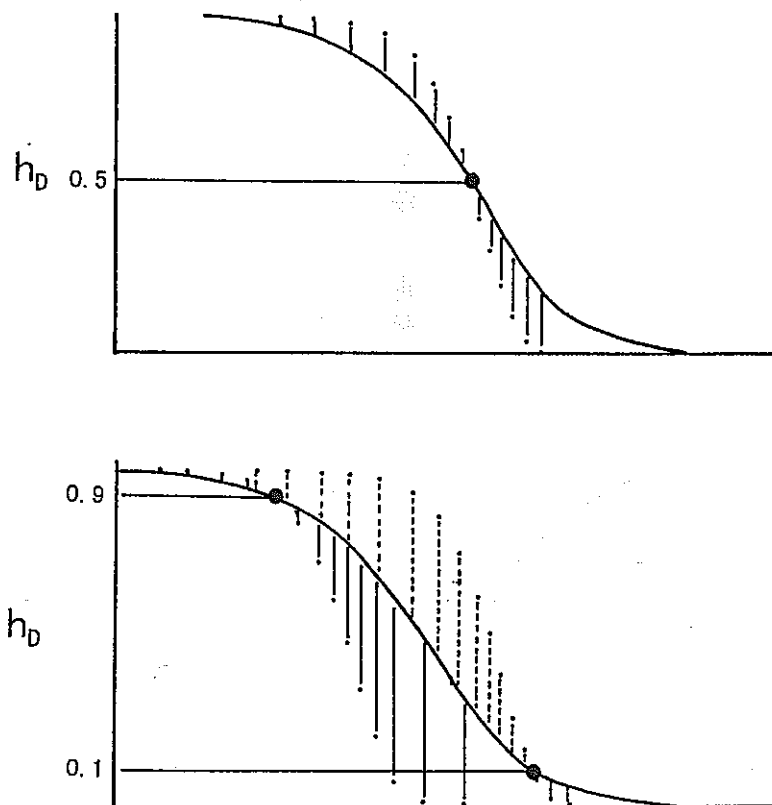


図-2.2.14 マッチングポイントの選定と残差二乗和の関係

(2) 自動クーパー法による解析手法

以下の手順に従って自動クーパー法による解析を行なうことができる。図-2.2.15の試験手順により、以下に解説する。

[試験手順]

- ①実測データからマッチング代表水頭低下量  $h_D$  を選び、この水頭値に対する観測時間  $t^*$  を算定する。
- ②  $\alpha$  のリサーチ範囲を指定する。計算精度を考慮すると  $10^{-20}$  ~ 10 の範囲であるが、実際の地盤情報により範囲をしぼることができる。
- ③所定のフォーマットに従って実測データ ( $t-h_D$ ) 関係を入力し、解析プログラムを実行する。
- ④計算結果として以下のものが算定される。  
 $\alpha$  の試行値に対するマッチング  $\beta^*/t^*$  値、測点平均残差二乗和、各実測時間に対する標準計算値  $h_D$
- ⑤  $\alpha$  - 測点平均残差二乗および  $\beta^*/t^*$  - 測点平均残差二乗をそれぞれプロットし、最小残差となる  $\alpha^*$  および  $\beta^*$  を決定する。
- ⑥式(2.2.43a,b) および式(2.2.44a,b) を用いて所定の浸透特性を評価する。

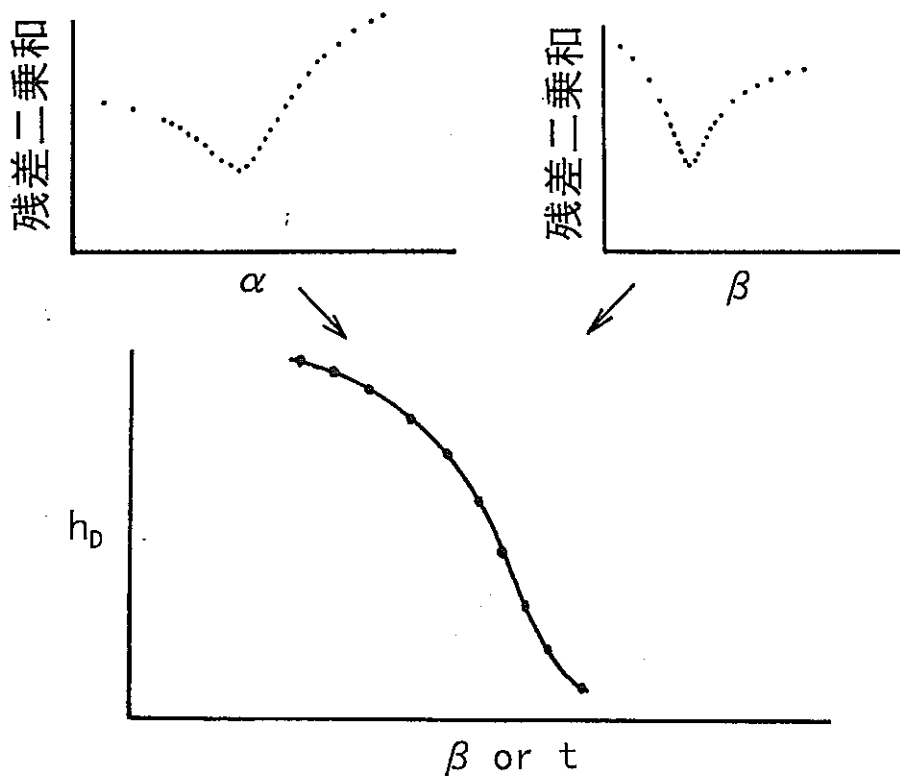


図-2.2.15 自動クーパー法による解析フロー

ここで自動クーパー法を用いた解析事例を示す。データはアメリカ合衆国アリゾナ州ツーソン市郊外のオラクル地区の花崗岩盤内で実施されたパルス試験<sup>8)</sup>である。表2.2.3に試験データを示し、図-2.2.16に解析結果である残差二乗和、図-2.2.17に実測時間軸でのマッチンググラフ、図-2.2.18に無次元時間 $\beta$ に対するマッチンググラフを示す。結果は以下のとおりである。

$$K=5.72 \times 10^{-10} \text{ (m/sec)}$$

$$S_s=1.29 \times 10^{-8} \text{ (1/m)}$$

表-2.2.3オラクル地区花崗岩でのパルス試験結果

t(sec)	$\Delta P_w / \Delta p_o$	t(sec)	$\Delta P_w / \Delta p_o$
1	1	33	.46
2	.92	36	.43
3	.89	42	.38
4	.86	48	.33
5	.80	54	.29
6	.79	60	.25
9	.73	66	.22
12	.68	72	.19
15	.63	78	.17
18	.59	90	.15
21	.56	105	.11
24	.52	120	.08
30	.49		

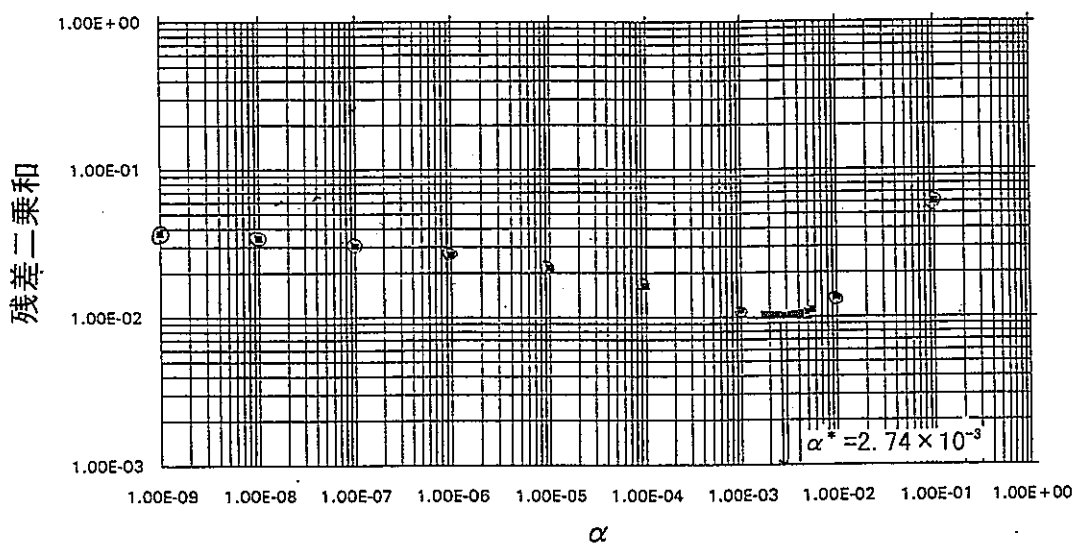


図-2.2.16 マッチングの残差二乗和

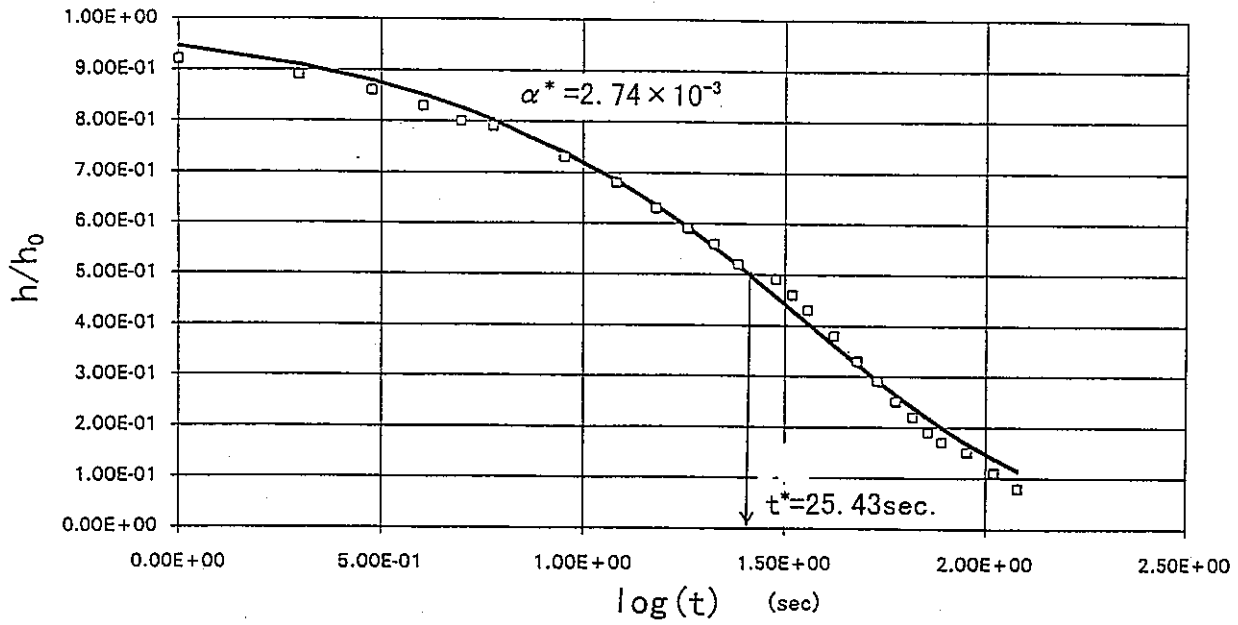


図-2.2.17 マッチング状況図(実測時間軸)

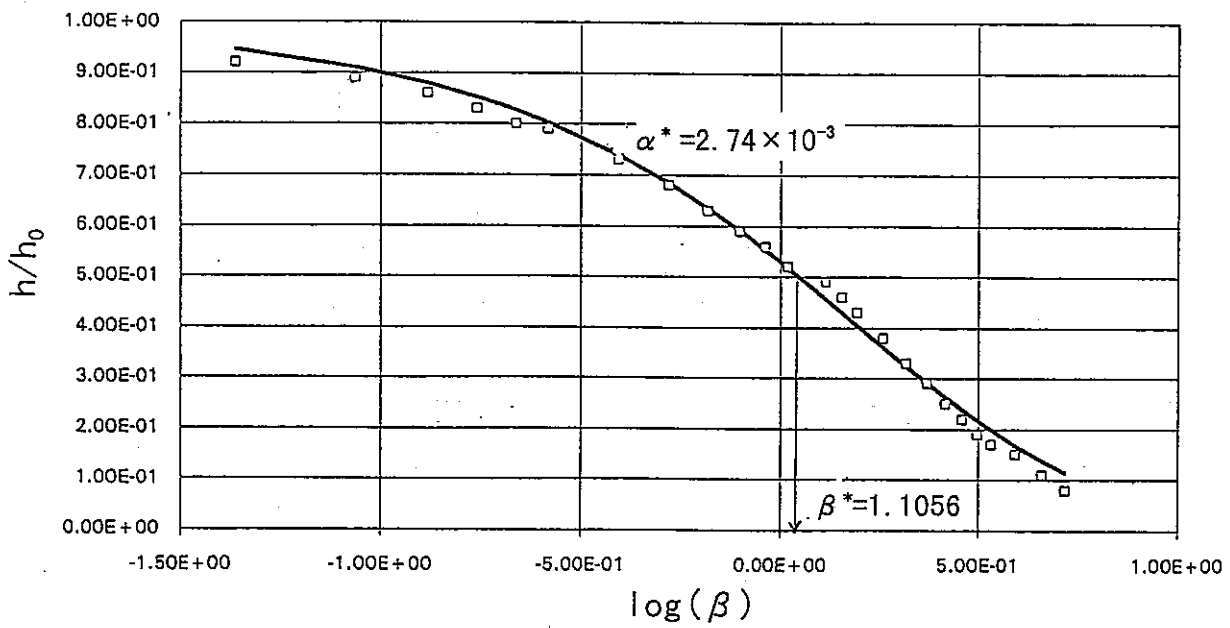


図-2.2.18 マッチング状況図(無次元時間軸)

## 2. 3 解析結果の評価

ここで比較検討を行った解析手法は、ボシュレフ法、クーパー法、ブレドホフト法、自動クーパー法の4手法であるが、表-2.3.1に示すように、ボシュレフ法とそれ以外の手法に大別できる。また、これまで透水試験法は透水係数の大小によって選ばれることが一般的であったが、ここでは貯留性の影響の大小が解析手法の選択に関与していることを示している。

表-2.3.1 非定常型単孔式現場透水試験結果の解析手法の比較

手法	ボシュレフ法	クーパー法	ブレドホフト法	自動クーパー法
流れ場	三次元放射流	二次元平面放射流	二次元平面放射流	二次元平面放射流
透水係数	○	○	○	○
比貯留係数	×	○ (オーダー単位)	○ (オーダー単位)	○
解析技法	プロット直線傾き	マッチング	マッチング	マッチング
技法の難易	直線が明確なら容易	経験が必要	経験が必要	容易
貯留性の影響	小さな貯留性に 有効	中程度の貯留性に 有効	大きな貯留性に 有効	中程度以上の貯留 性に有効

さて、試験データが得られれば上記の手法により透水係数あるいは手法によっては比貯留係数が算定できるが、その解析精度についてはこれまで検討されていない。そこで、当検討では以下の評価基準を提案する。また、ボシュレフ法とクーパー系手法の解析結果の相違について若干触れる。

### 2. 3. 1 ボシュレフ法の評価基準

図-2.3.1に示すように地盤の貯留性の影響が試験結果に見られると、プロットに直線部分が確定できなくなる。そこで、以下の手順で評価パラメータを設定する。

①試験精度を考慮して信頼のおけるデータ範囲を抽出する。後に示す実測データでは、 $t > 60 \text{ sec}$  かつ  $h > 1 \text{ m}$  を満たすものを解析対象と設定している。

②使用されたデータを、 $\ln(h) = a t + b$  あるいは  $\log(h) = a t + b$  に対する最小二乗近似を行い、パラメータ  $a$ 、 $b$  を決定する。ここで、 $a$  は式(2.2.17a, b)にみられるグラフの傾き  $m$  に一致するので、この直線近似結果を透水係数の算定に導入することができる。

③近似値を計測時間毎に算定し、これを実測値と比較し残差二乗和さらに汎用的に表現するために残差二乗和の測点数平均を求める。

④試験精度を水頭観測誤差 $\Delta h$ に集約させ、 $(\Delta h)^2$ を評価基準値として、③で求めた残差二乗和の測点数平均値と比較を行なう。

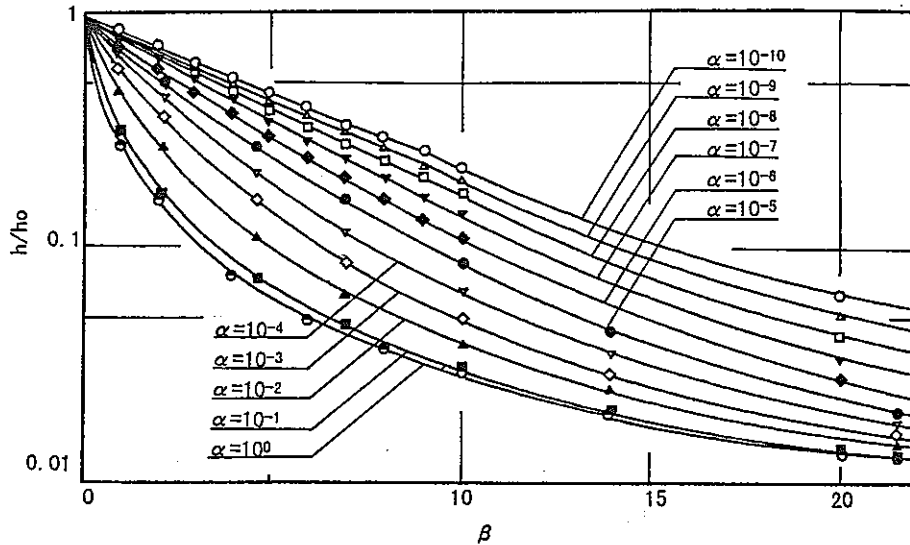


図-2.3.1 ボシュレフ法で見られる地盤の貯留性の影響<sup>18)</sup>

### 2. 3. 2 マッチング法の評価基準

マッチング精度を設定してマッチングの成否を評価する。ここでも標準値と実測値の残差を用いることとするが、限られた標準曲線データしか与えられていないクーパー法やブレドホフト法では残差を計算することが困難であるため、ここでの議論は自動クーパー法に限定する。

自動クーパー法では残差二乗和が計算されるので、試行パラメータとして扱われる $\alpha$ に対して最小残差二乗和を見つけ出し、この時の $\alpha^*$ および $\beta^*$ 、 $t^*$ の関係から解析が行なわれる。しかし、これはあくまでも数学的にグラフマッチングが良好である場合を探しているにすぎず、本来は試験精度を考慮した上で解析結果を評価すべきである。

さて、単孔式試験法における標準水頭値は初期水頭差 $h_0$ で除されており、実測値もこれに準じている。それゆえに、前項のボシュレフ法の評価基準で示したように直接試験精度 $\Delta h$ を導入することができない。以下の手順によって残差を評価する。

①自動クーパー法では、 $h_D = h/h_0$ での残差二乗和および測点平均残差二乗和を算出する。

②この残差に対応した試験精度  $\Delta (h/h_0)$  を定義する。

ここでは、 $\Delta (h/h_0) = \Delta h/h_0$  とする。

③測点平均残差二乗和と  $(\Delta h/h_0)^2$  を比較することでマッチングの精度を評価する。

### 2. 3. 3 選定曲線の評価基準

本検討で扱う標準曲線はこれまで示してきたように、 $\alpha$  の値によってその形状が酷似するものがある。これを精度よくマッチングさせるために自動化手法を導入するが、自動化であれ目視であれ同じコンセプトに基づいてマッチングを行なう限りには、類似形状のグラフ間でのマッチング結果の信頼性は決してよいものとはいえない。

図-2.3.2に示したグラフはクーパー法で用いる標準曲線を  $h_D=0.5$  で重なり合うようにシフトさせたものであるが、 $\alpha$  が大きい範囲と小さい範囲ではあきらかにそれぞれの範囲での曲線形状に区別が付きにくい。逆に、適切な範囲内であれば比較的識別のつき易い形状であることがわかる。

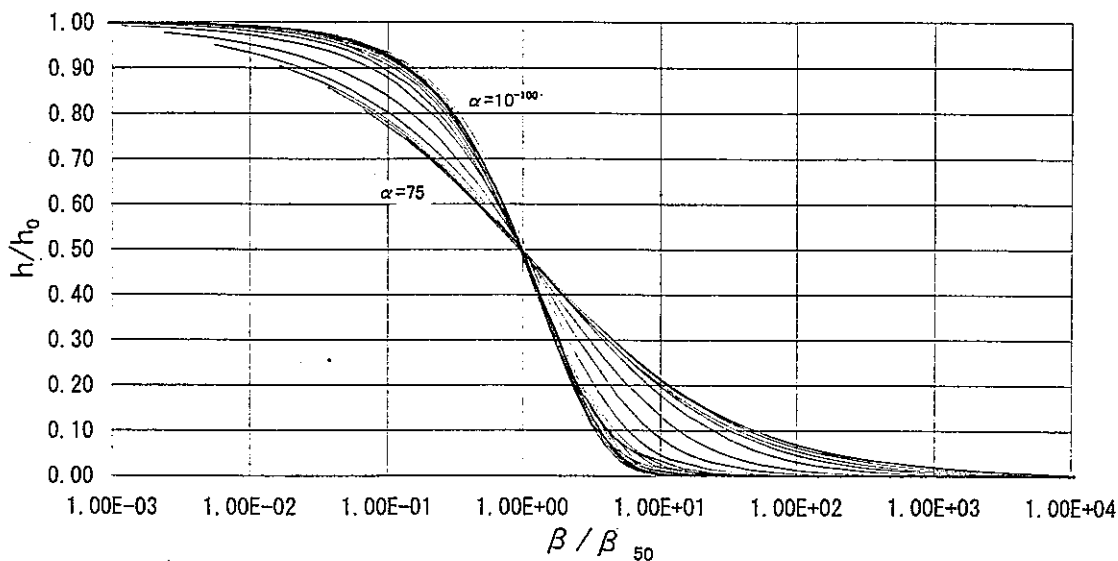


図-2.3.2 クーパー法の標準曲線形状の違い

曲線形状を定量的に評価する指標として曲線の傾きを求めた<sup>25)</sup>。図-2.3.3にこれを示す。曲線全域にわたって傾きを評価することもできるが、ここでは傾きの最大値で上記の特性を考えてみる。これは逆S字カーブとなる単孔式試験法の標準曲線では試験データのほぼ中央で最大傾きがみられ、試験精度からみても比較的良好な試験データ区間である。 $\alpha$ —最大傾きを示すグラフ<sup>25)</sup>を図-2.3.4に示した。これらのグラフから、 $\alpha$ の値に対する最大傾きがグラフ形状の違いを表すと考えると、グラフ形状に明瞭な違いが見られるのは、 $\alpha$ が以下の範囲にある場合であると判断できる。

$$1.0^{-5} < \alpha < 1.0 \quad (2.3.1)$$

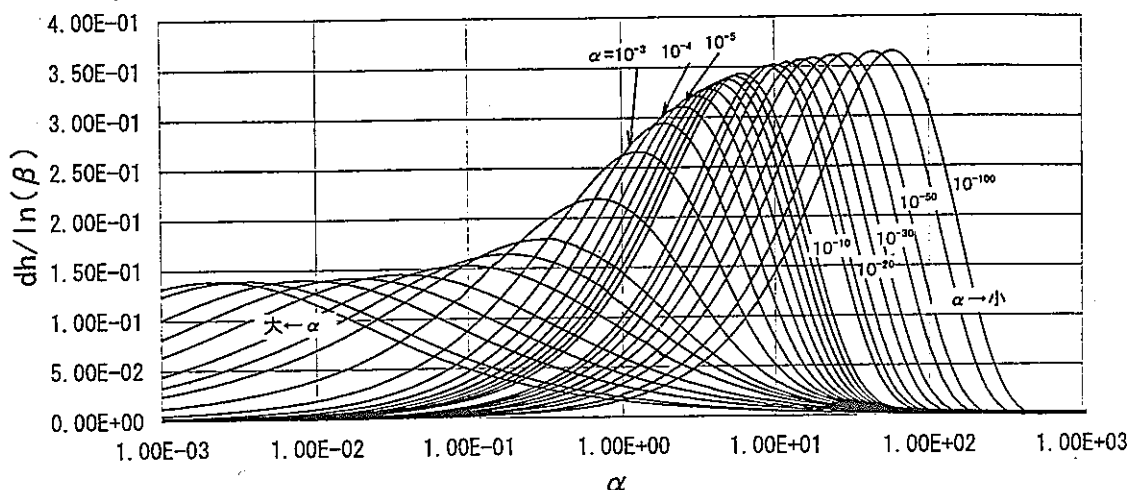


図-2.3.3 クーパー法の標準曲線の傾き

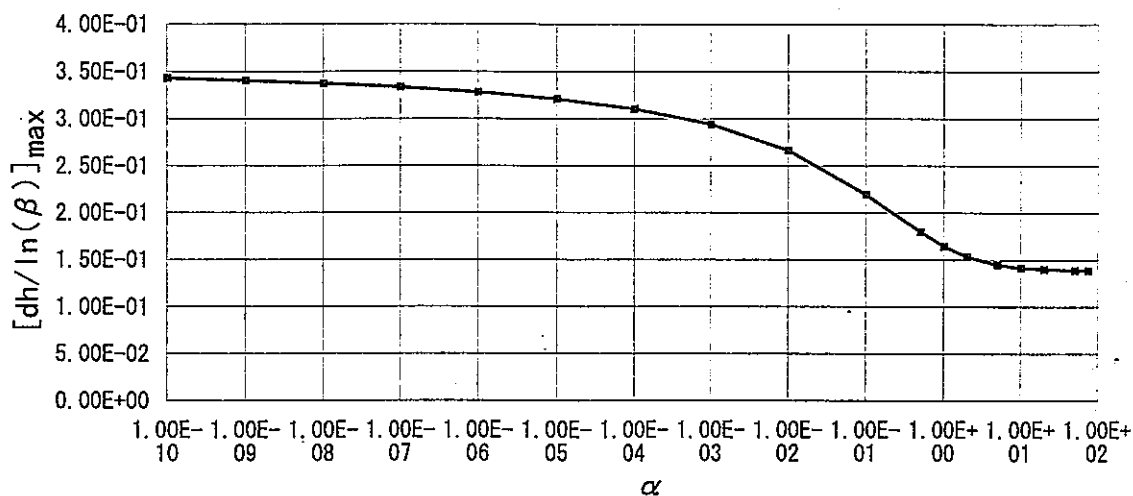


図-2.3.4 クーパー法の標準曲線の最大傾きと  $\alpha$  の関係



## 2. 3. 4 手法による解析結果の違い

ボシュレフ法とクーパー系手法の違いは表-2.3.1にまとめたが、この違いが解析結果にどのように反影するか検討した。

まず、式(2.2.15)で示されるボシュレフ法の理論に則した試験をシミュレートし、これを自動クーパーで解析した場合の結果を調べた。図-2.3.5に残差二乗和を示したが、試行パラメータ $\alpha$ の調査最小値(地盤の貯留性が小さい方向)に至っても残差二乗和に極値がみられない。しかしながら、項(2.2.4(1))で図-2.2.13を用いて説明したように、 $\alpha$ の選定に対して透水係数の算定結果は大きく影響されないことから、調査最小値の $\alpha$ を最適値としてみる。

このケースでは、 $\alpha=10^{-20}$ である。他の情報は以下のようなものである。

$$\beta^*/t^*=0.0183, L=10\text{m}, r_w=r_c=0.05\text{m}, h_o=10\text{m}$$

これより自動クーパー法の結果は $K=1.4 \times 10^{-5}(\text{m}/\text{sec})$ となる。これに対して、式(2.2.15)に入力したのは $K=10^{-6}(\text{m}/\text{sec})$ であり、1.4倍大きな値を評価している。

ボシュレフ法が三次元流れを扱うのに対してクーパー法は二次元平面流であるため浸透断面をクーパー法の方が小さく評価することから、結果的に透水係数を大きく評価することも一因である。この結果から、クーパー系手法で残差二乗和が小さい $\alpha$ に対して極値を示さない場合には、貯留性の影響が極めて少ないことからクーパー法の解析対象外であると判断し、ボシュレフ法の妥当性が優位とすべきである。

逆に、地盤の貯留性の影響が見られた場合を考える。図-2.3.1に示した地盤の貯留性の影響が見られたボシュレフ法のプロットでは、どのケースも同じ透水係数が設定されているのだが、貯留係数が大きいほどグラフの傾きが大きくなる傾向があり、ボシュレフ法でこれを解析すると透水係数が設定値よりも大きく算定されることがわかり、ボシュレフ法では解析が困難である。

以上の観点から、ボシュレフ法とクーパー系手法はそれぞれの守備範囲が自ずと決まっており、一概にどちらがよい手法であるとは言えないことを認識すべきである。

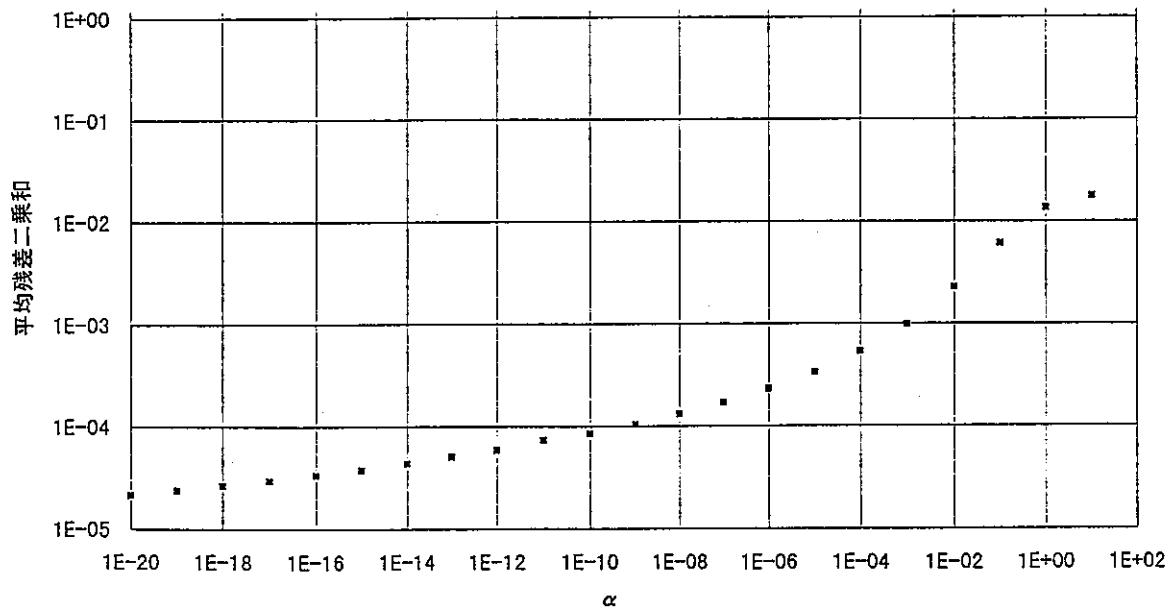


図-2.3.5 ボシュレフ型の試験結果のクーパー法による解析

### 3. 解析データの概説および解析結果

#### 3. 1 試験条件

単孔式現場透水試験データは14試験セット(1セットで注入と回復試験)である。

また、各試験データである水頭計測値が1m以下になると反応が鈍くなる傾向を示したため、解析に用いるデータは1m以上の水頭値に限った。また、事業団の試験経験から試験開始後60秒までの計測結果には遮水パッカーの変形の影響がみられるなどの傾向があることが分かっており、この部分のデータも解析対象から除外した。

表-3.1.1 実測データの特性一覧

データ名	岩種	試験孔	試験手法	インターバル長 L (cm)	インターバル半径 $r_w$ (cm)	ケーシング半径 $r_c$ (cm)
SN6006TA	堆積岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
SN6006KA	堆積岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
SN6014TA	堆積岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
SN6014KA	堆積岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
DH2066TB	堆積岩	オープンホール	注入	800	5.0	1.595
DH2066KA	堆積岩	オープンホール	回復	800	5.0	1.595
DH2096TA	堆積岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
DH2096KA	堆積岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
DH2120TA	堆積岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
DH2120KA	堆積岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
DH2131TB	堆積岩	オープンホール	注入	800	5.0	1.595
DH2131KA	堆積岩	オープンホール	回復	800	5.0	1.595
DH2160TB	堆積岩	オープンホール	注入	900	5.0	1.595
DH2160KB	堆積岩	オープンホール	回復	900	5.0	1.595
SN6060CA	結晶質岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
SN6060KA	結晶質岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
SN6070CA	結晶質岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
SN6070KA	結晶質岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
SN6076CA	結晶質岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
SN6076KA	結晶質岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
SN6082CA	結晶質岩	オープンホール	注入	250	5.0	1.595
SN6082KA	結晶質岩	オープンホール	回復	250	5.0	1.595
P100911	結晶質岩	クローズドホール	注入	250	5.0	0.048*
P100912	結晶質岩	クローズドホール	回復	250	5.0	0.048*
P101203	結晶質岩	クローズドホール	注入	250	5.0	0.026*
P101204	結晶質岩	クローズドホール	注入	250	5.0	0.026*
P101205	結晶質岩	クローズドホール	回復	250	5.0	0.026*
P101206	結晶質岩	クローズドホール	回復	250	5.0	0.026*

\*: 閉塞インターバルチャンバーの貯留項から算定した等価なケーシング半径

### 3. 2 解析結果

全解析結果を付録に示した。結果には以下のものを整理した。

- (a) ボシュレフ法による解析状況
- (b) クーパー法による解析状況
- (c) ブレドホフト法による解析状況
- (d) 自動クーパー法による最適解析状況
- (e) 自動クーパー法による  $\alpha$ -測点平均残差二乗和
- (f) 自動クーパー法による  $\beta$ -測点平均残差二乗和

また、表-3.2.1~4に解析結果の一覧表を示し、評価した透水係数と比貯留係数の分布図をそれぞれ図-3.2.1および図-3.2.2に示した。

表-3.2.1 ボシュレフ法による解析結果一覧

データ名	$-m$ (1/s)	$r_w$ (cm)	$r_c$ (cm)	$L$ (cm)	$K$ (cm/s)	$av$ (def2) (m2)
SN6006TA	2.1124E-4	5.0	1.595	250.0	9.6707E-6	3.36E-04
SN6006KA	3.5977E-4	5.0	1.595	250.0	1.6470E-5	3.09E-05
SN6014TA	1.5449E-4	5.0	1.595	250.0	7.0726E-6	5.10E-07
SN6014KA	5.6527E-5	5.0	1.595	250.0	2.5878E-6	3.66E-05
DH2066TB	7.5825E-5	5.0	1.595	800.0	1.4073E-6	2.34E-05
DH2066KA	2.4202E-3	5.0	1.595	800.0	4.4919E-5	4.07E-05
DH2096TA	2.1865E-4	5.0	1.595	250.0	1.0010E-5	2.61E-04
DH2096KA	1.5660E-4	5.0	1.595	250.0	7.1692E-6	1.11E-03
DH2120TA	7.6076E-5	5.0	1.595	250.0	3.4828E-6	3.01E-05
DH2120KA	1.9474E-3	5.0	1.595	250.0	8.9153E-5	7.99E-04
DH2131TB	1.2549E-4	5.0	1.595	800.0	2.3291E-6	4.01E-07
DH2131KA	7.7470E-3	5.0	1.595	800.0	1.4379E-4	6.46E-06
DH2160TB	1.6588E-4	5.0	1.595	900.0	2.8002E-6	5.75E-06
DH2160KB	6.4300E-4	5.0	1.595	900.0	1.0854E-5	1.44E-04
SN6060GA	1.1588E-5	5.0	1.595	250.0	5.3050E-7	2.35E-05
SN6060KA	1.6226E-4	5.0	1.595	250.0	7.4283E-6	2.12E-04
SN6070CA	1.9163E-3	5.0	1.595	250.0	8.7729E-5	3.66E-04
SN6070KA	1.3251E-3	5.0	1.595	250.0	6.0664E-5	3.45E-04
SN6076CA	9.5312E-5	5.0	1.595	250.0	4.3634E-6	2.75E-05
SN6076KA	4.3609E-4	5.0	1.595	250.0	1.9964E-5	6.13E-07
SN6082CA	3.9551E-6	5.0	1.595	250.0	1.8107E-7	3.32E-08
SN6082KA	1.0747E-4	5.0	1.595	250.0	4.9200E-6	2.35E-06
P100911	9.8419E-4	5.0	0.048	250.0	4.0806E-8	2.47E-04
P100912	1.1326E-3	5.0	0.048	250.0	4.6959E-8	1.24E-04
P101203	1.7119E-3	5.0	0.026	250.0	2.0825E-8	1.42E-04
P101204	1.8420E-3	5.0	0.026	250.0	2.2408E-8	1.86E-04
P101205	3.9394E-3	5.0	0.026	250.0	4.7922E-8	1.53E-04
P101206	4.0891E-3	5.0	0.026	250.0	4.9743E-8	1.15E-04

表-3.2.2 クーパー法による解析結果一覧

データ	n	$\alpha^*$	rw (cm)	rc (cm)	L (cm)	K (cm/s)	Ss (t/cm)
SN6006TA	4.50E-04	2.00E-01	5.0	1.595	250.0	4.5792E-6	8.1409E-05
SN6006KA	1.00E-04	2.00E+00	5.0	1.595	250.0	1.0176E-6	8.1409E-04
SN6014TA	4.50E-04	1.00E-03	5.0	1.595	250.0	4.5792E-6	4.0704E-07
SN6014KA	1.50E-04	1.00E-02	5.0	1.595	250.0	1.5264E-6	4.0704E-06
DH2066TB	3.40E-04	1.00E-03	5.0	1.595	800.0	1.0812E-6	1.2720E-07
DH2066KA	3.50E-02	1.00E-10	5.0	1.595	800.0	1.1130E-4	1.2720E-14
DH2096TA	4.90E-04	1.00E-01	5.0	1.595	250.0	4.9863E-6	4.0704E-05
DH2096KA	4.20E-06	5.00E+00	5.0	1.595	250.0	4.2740E-7	2.0352E-03
DH2120TA	5.50E-05	5.00E-01	5.0	1.595	250.0	5.5969E-7	2.0352E-04
DH2120KA	4.00E-02	1.00E-06	5.0	1.595	250.0	4.0704E-4	4.0704E-10
DH2131TB	1.60E-03	1.00E-09	5.0	1.595	800.0	5.0881E-6	1.2720E-13
DH2131KA	1.20E-01	1.00E-09	5.0	1.595	800.0	3.8160E-4	1.2720E-13
DH2160TB	1.50E-03	1.00E-06	5.0	1.595	900.0	4.2400E-6	1.1307E-10
DH2160KB	1.10E-02	1.00E-10	5.0	1.595	900.0	3.1094E-5	1.1307E-14
SN6060CA	2.00E-06	5.00E-01	5.0	1.595	250.0	2.0352E-8	2.0352E-04
SN6060KA	3.00E-03	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	3.0528E-5	4.0704E-14
SN6070CA	9.00E-03	5.00E-01	5.0	1.595	250.0	9.1585E-5	2.0352E-04
SN6070KA	2.00E-03	5.00E+00	5.0	1.595	250.0	2.0352E-5	2.0352E-03
SN6076CA	6.00E-04	1.00E-04	5.0	1.595	250.0	6.1057E-6	4.0704E-08
SN6076KA	6.00E-03	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	6.1057E-5	4.0704E-14
SN6082CA	1.00E-05	1.00E-03	5.0	1.595	250.0	1.0176E-7	4.0704E-07
SN6082KA	1.45E-03	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	1.4755E-5	4.0704E-14
P100911	1.00E-02	1.00E-05	5.0	0.048	250.0	9.2160E-8	3.6864E-12
P100912	1.00E-02	1.00E-05	5.0	0.048	250.0	9.2160E-8	3.6864E-12
P101203	2.00E-02	1.00E-06	5.0	0.026	250.0	5.4080E-8	1.0816E-13
P101204	2.00E-02	1.00E-05	5.0	0.026	250.0	5.4080E-8	1.0816E-12
P101205	3.50E-02	1.00E-04	5.0	0.026	250.0	9.4640E-8	1.0816E-11
P101206	3.50E-02	1.00E-04	5.0	0.026	250.0	9.4640E-8	1.0816E-11

表-3.2.3 ブレドホフト法による解析結果一覧

データ名	n	$\alpha^*$	rw (cm)	rc (cm)	L (cm)	K (cm/s)	Ss (1/cm)
SN6006TA	9.00E-05	2.00E-01	5.0	1.595	250.0	4.5792E-06	8.1409E-05
SN6006KA	2.00E-04	1.00E+00	5.0	1.595	250.0	2.0352E-06	4.0704E-04
SN6014TA	4.50E-07	1.00E-03	5.0	1.595	250.0	4.5792E-06	4.0704E-07
SN6014KA	1.50E-06	1.00E-02	5.0	1.595	250.0	1.5264E-06	4.0704E-06
DH2066TB	3.40E-07	1.00E-03	5.0	1.595	800.0	1.0812E-06	1.2720E-07
DH2066KA	3.50E-12	1.00E-10	5.0	1.595	800.0	1.1130E-04	1.2720E-14
DH2096TA	4.90E-05	1.00E-01	5.0	1.595	250.0	4.9863E-06	4.0704E-05
DH2096KA	6.00E-05	1.00E-01	5.0	1.595	250.0	6.1057E-06	4.0704E-05
DH2120TA	2.00E-05	2.00E-01	5.0	1.595	250.0	1.0176E-06	8.1409E-05
DH2120KA	4.00E-12	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	4.0704E-04	4.0704E-14
DH2131TB	1.00E-09	1.00E-06	5.0	1.595	800.0	3.1800E-06	1.2720E-10
DH2131KA	8.00E-08	1.00E-06	5.0	1.595	800.0	2.5440E-04	1.2720E-10
DH2160TB	1.30E-08	1.00E-06	5.0	1.595	900.0	3.6747E-05	1.1307E-10
DH2160KB	5.00E-08	1.00E-05	5.0	1.595	900.0	1.4133E-05	1.1307E-09
SN6060CA	1.00E-08	5.00E-01	5.0	1.595	250.0	2.0352E-10	2.0352E-04
SN6060KA	3.00E-13	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	3.0528E-05	4.0704E-14
SN6070CA	4.50E-03	5.00E-01	5.0	1.595	250.0	9.1585E-05	2.0352E-04
SN6070KA	1.00E-02	5.00E+00	5.0	1.595	250.0	2.0352E-05	2.0352E-03
SN6076CA	6.00E-08	1.00E-04	5.0	1.595	250.0	6.1057E-06	4.0704E-08
SN6076KA	6.00E-13	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	6.1057E-05	4.0704E-14
SN6082CA	1.00E-08	1.00E-03	5.0	1.595	250.0	1.0176E-07	4.0704E-07
SN6082KA	1.45E-13	1.00E-10	5.0	1.595	250.0	1.4755E-05	4.0704E-14
P100911	1.00E-07	1.00E-05	5.0	0.048	250.0	9.2160E-08	3.6864E-12
P100912	1.10E-08	1.00E-05	5.0	0.048	250.0	1.0138E-08	3.6864E-12
P101203	2.00E-08	1.00E-06	5.0	0.026	250.0	5.4080E-08	1.0816E-13
P101204	2.00E-07	1.00E-05	5.0	0.026	250.0	5.4080E-08	1.0816E-12
P101205	3.50E-06	1.00E-04	5.0	0.026	250.0	9.4640E-08	1.0816E-11
P101206	3.50E-06	1.00E-04	5.0	0.026	250.0	9.4640E-08	1.0816E-11

表-3.2.4 自動クーパー法による解析結果一覧

データ名	n	$\alpha^*$	h/ho	rw	rc (cm)	L (cm)	K (cm/s)	Ss (1/cm)	ho (m)	$(\Delta h/ho)^2$
				(cm)						$\Delta h=0.1m$
SN6006TA	4.61E-04	1.87E-01	0.50	5.0	1.595	250.0	4.6891E-6	7.6117E-5	3.99	6.28E-4
SN6006KA	2.20E-05	1.00E+01	0.75	5.0	1.595	250.0	2.2418E-7	4.0704E-3	1.80	3.09E-3
SN6014TA	9.48E-04	1.52E-05	0.90	5.0	1.595	250.0	9.6438E-6	6.1871E-9	3.37	8.81E-4
SN6014KA	1.90E-04	4.56E-03	0.90	5.0	1.595	250.0	1.9345E-6	1.8561E-6	7.92	1.59E-4
DH2066TB	3.92E-04	3.51E-04	0.90	5.0	1.595	800.0	1.2463E-6	4.4648E-8	12.98	5.94E-5
DH2066KA	6.96E-02	1.00E-20	0.50	5.0	1.595	800.0	2.2123E-4	1.2720E-24	8.37	1.43E-4
DH2096TA	4.02E-04	1.73E-01	0.50	5.0	1.595	250.0	4.0898E-6	7.0419E-5	9.64	1.08E-4
DH2096KA	3.50E-04	2.31E-01	0.75	5.0	1.595	250.0	3.5576E-6	9.4027E-5	8.80	1.29E-4
DH2120TA	7.61E-05	3.16E-01	0.75	5.0	1.595	250.0	7.7481E-7	1.2863E-4	9.26	1.17E-4
DH2120KA	1.58E-02	3.30E-04	0.50	5.0	1.595	250.0	1.6048E-4	1.3432E-7	11.22	7.94E-5
DH2131TB	3.51E-03	1.00E-20	0.50	5.0	1.595	800.0	1.1149E-5	1.2720E-24	10.83	8.53E-5
DH2131KA	2.35E-01	1.00E-20	0.25	5.0	1.595	800.0	7.4731E-4	1.2720E-24	14.88	4.52E-5
DH2160TB	2.77E-03	3.16E-12	0.75	5.0	1.595	900.0	7.8240E-6	3.5729E-16	8.28	1.46E-4
DH2160KB	5.27E-03	2.08E-05	0.50	5.0	1.595	900.0	1.4883E-5	2.3518E-9	5.02	3.97E-4
SN6060GA	1.27E-07	1.00E+01	0.90	5.0	1.595	250.0	1.2946E-9	4.0704E-3	7.35	1.85E-4
SN6060KA	2.05E-03	2.31E-08	0.50	5.0	1.595	250.0	2.0871E-5	9.4027E-12	8.18	1.49E-4
SN6070GA	5.42E-03	1.29E+00	0.10	5.0	1.595	250.0	5.5158E-5	5.2684E-4	8.06	1.54E-4
SN6070KA	1.12E-03	1.00E+01	0.25	5.0	1.595	250.0	1.1364E-5	4.0704E-3	7.50	1.78E-4
SN6076GA	5.43E-04	1.87E-04	0.50	5.0	1.595	250.0	5.5236E-6	7.6117E-8	6.40	2.44E-4
SN6076KA	1.20E-02	1.00E-20	0.50	5.0	1.595	250.0	1.2191E-4	4.0704E-24	6.12	2.67E-4
SN6082CA				5.0	1.595	250.0			8.77	1.30E-4
SN6082KA	2.92E-03	1.00E-20	0.50	5.0	1.595	250.0	2.9714E-5	4.0704E-24	7.76	1.66E-4
P100911	7.62E-03	1.54E-04	0.50	5.0	0.048	250.0	7.0250E-8	5.6771E-11	10.40	9.25E-5
P100912	1.16E-02	1.52E-06	0.50	5.0	0.048	250.0	1.0723E-7	5.6033E-13	9.10	1.21E-4
P101203	2.33E-02	1.00E-08	0.50	5.0	0.026	250.0	6.3068E-8	1.0816E-15	13.20	5.74E-5
P101204	1.45E-02	2.31E-04	0.10	5.0	0.026	250.0	3.9100E-8	2.4985E-11	11.90	7.06E-5
P101205	3.18E-02	2.31E-04	0.25	5.0	0.026	250.0	8.5939E-8	2.4985E-11	9.00	1.23E-4
P101206	2.93E-02	4.33E-04	0.25	5.0	0.026	250.0	7.9246E-8	4.6833E-11	6.70	2.23E-4



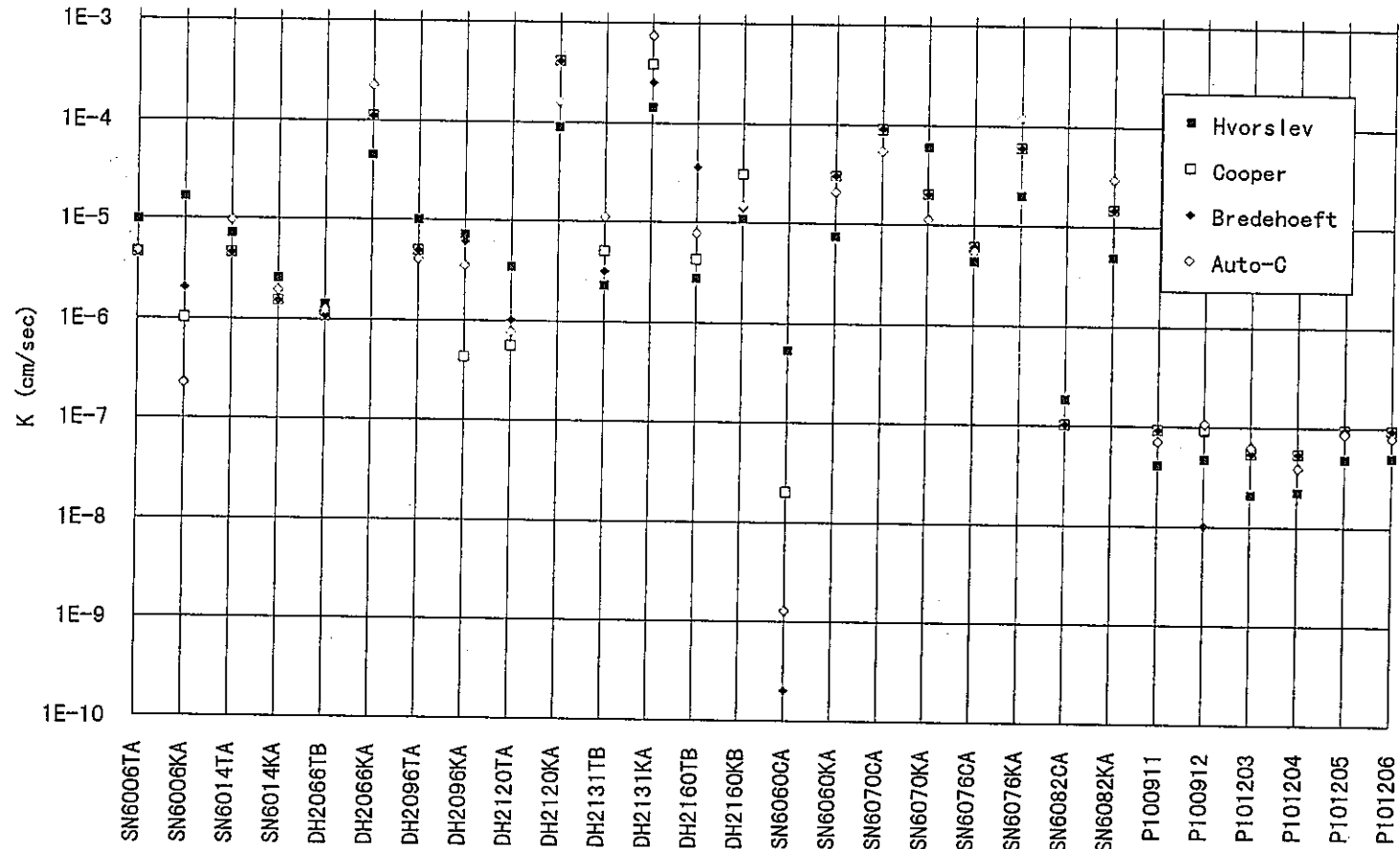


図-3.2.1 透水係数の解析結果

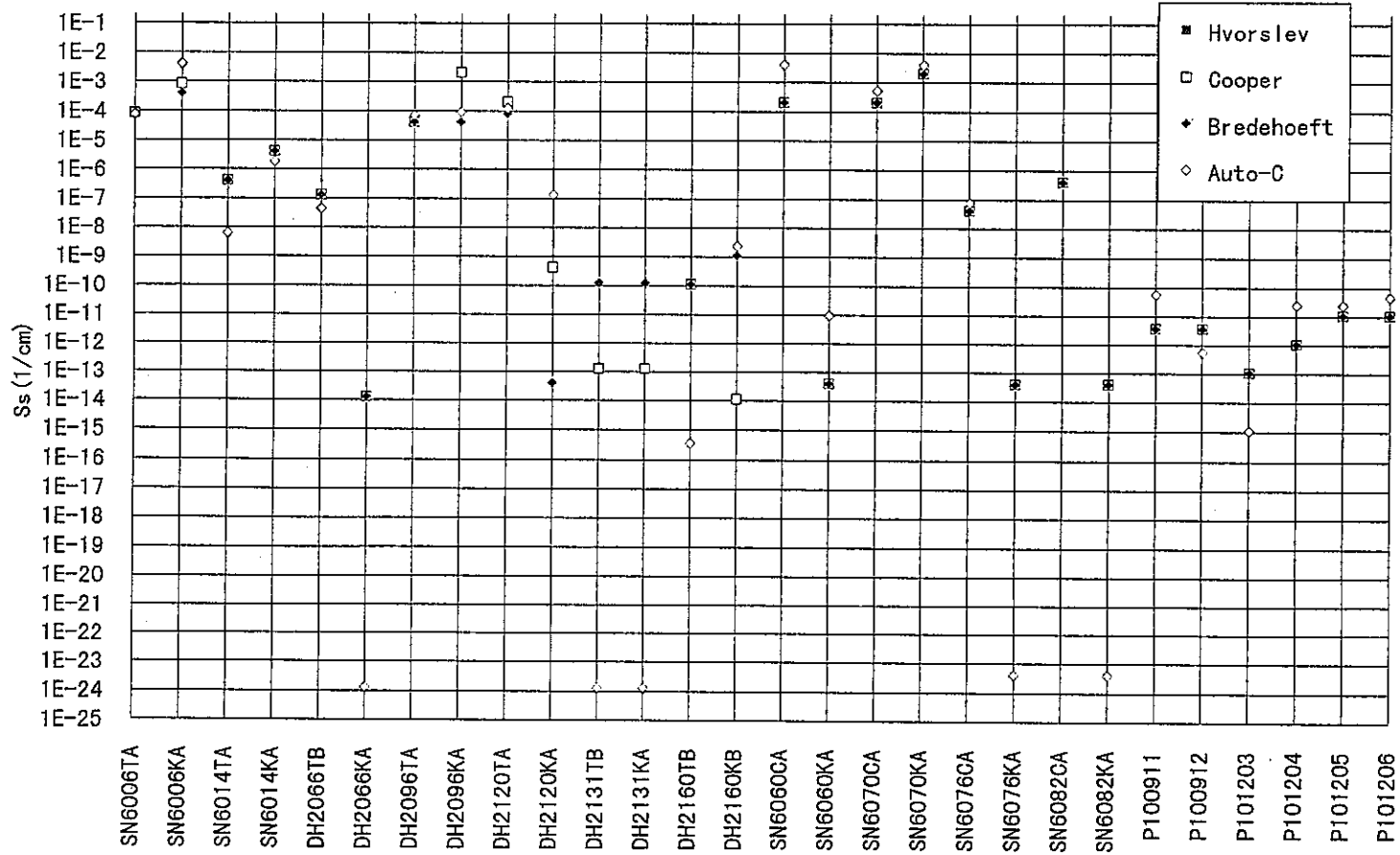


図-3.2.2 比貯留係数の解析結果

### 3. 3 結果の評価

次項の考察においては、節 2. 3 で示した評価基準に適用を試みるが、試験精度  $\Delta h$  は検討されていないので、ここでは  $\Delta h = 0.1\text{m}$  と設定した。

#### SN6006 シリーズ(TA, KA)

- ボシュレフ法ではKAの方がTAより小さな平均残差二乗和となった。これは、試験時間の早い部分での直線性が得られなかったことが原因と思われる、双方とも地盤の貯留性の影響がみられる。
- クーパー法、ブレドホフト法では比較的識別のつき易い範囲の曲線で一致している。
- 自動クーパー法では、最小残差二乗和はいずれも評価基準値以下であるが、基準値以下となる  $\alpha$  と  $\beta/t$  の範囲はそれぞれ、次のようである。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
SN6006TA	$4.6 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-2} \sim 10$
SN6006KA	$2.2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-4} >$	10	$0.2 <$

- 透水係数の算定結果は、ボシュレフ法がクーパー系手法によるものより大きく算定されているため、貯留性の影響がみられることから、自動クーパー法による結果が有意と判断する。よって以下の評価値である。

	最適 K (cm/s)	可能範囲 K (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
SN6006TA	$4.68 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-5}$	$7.61 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-3}$
SN6006KA	$2.24 \times 10^{-7}$	$7 \times 10^{-6} >$	$4.07 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-5} <$

#### SN6014 シリーズ(TA, KA)

- いずれの試験も試験期間が短く、水頭回復が少ない試験時間内での解析となった。
- ボシュレフ法による解析では評価基準も十分満たすものであり高い直線性が得られている。
- クーパー系手法でも良好な範囲で  $\alpha$  が選ばれている。
- 透水係数の算定結果は試験毎のばらつきが少なく、それぞれの試験毎で結果の平均がとれそうである。
- TAでは最適  $\alpha$  値が有効範囲の下限値付近であり、残差二乗和の分布にも明瞭な極値が認めにくいことから、TAは信頼性に乏しい。
- KAでは自動クーパー法の残差二乗和分布に明瞭な極値がみられる。

	最適 $\beta / t$	$\beta / t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
SN6014KA	$1.9 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4} \sim$ $3 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
SN6014TA	$7.07 \times 10^{-6}$	—	—	—
SN6014KA	$1.93 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-6} \sim$ $3 \times 10^{-6}$	$1.85 \times 10^{-6}$	$8.2 \times 10^{-7} \sim$ $4 \times 10^{-6}$

#### DH2066シリーズ(TB, KA)

- TBは試験時の回復水頭が初期水頭差の1/2程度で終了している。
- 両試験ともボシュレフ法では高い直線性が認められる。
- TBはクーパー系手法でも良好な解析がなされている。評価された透水係数は手法の違いがほとんどみられない。自動クーパーの可能なばらつき範囲は以下のものである。

	最適 $\beta / t$	$\beta / t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
DH2066TB	$3.9 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4} \sim$ $4.5 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$

- KAはクーパー系手法では最小の $\alpha$ 値まで解析検討を行なったが、残差二乗和の極値を得ることができなかった。これは地盤の貯留性の影響が小さくクーパー系の解析手法は適さないことを示している。よってKAはボシュレフ法の解析結果が適切と判断される。

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
DH2066TB	$1.24 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6} \sim$ $1.7 \times 10^{-6}$	$4.46 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8} \sim$ $7.6 \times 10^{-7}$
DH2066KA	$4.49 \times 10^{-5}$	—	—	—

#### DH2096シリーズ(TA, KA)

- いずれも、ボシュレフ法では試験開始後早い時間での直線性が劣り、全体の残差二乗和も評価基準を満たしていない。よって、地盤の貯留性の影響が大きいと判断できる。
- クーパー系の手法ではいずれも良好な $\alpha$ の範囲内でマッチングが行われていることから、このシリーズでは自動クーパー法による結果を採用する。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
DH2096TA	$4.02 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4} \sim$ $6.0 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 3 \times 10^{-1}$
DH2096KA	$3.50 \times 10^{-4}$	—	$2.31 \times 10^{-1}$	—

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K(\text{cm/s})$	可能範囲 $K(\text{cm/s})$	最適 $S_s(1/\text{cm})$	可能範囲 $S_s(1/\text{cm})$
DH2096TA	$4.08 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6} \sim$ $6.0 \times 10^{-6}$	$7.04 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5} \sim$ $1.2 \times 10^{-4}$
DH2096KA	$3.56 \times 10^{-6}$	—	$9.40 \times 10^{-5}$	—

#### DH2120シリーズ(TA, KA)

- TAは試験前半のデータしか観測されていない。
- TAはボシュレフ法では高い直線性を示すが、クーパー系手法では適切に解析できているとは言い難い。これは、得られた水頭変化形状がクーパー法の標準曲線のそれと異なることを意味している。よって、TAはボシュレフ法の直線性が高いことからボシュレフ法による結果を採用する。
- KAはボシュレフ法の直線性が悪く、地盤の貯留性の影響がみられる。
- KAはクーパー系手法では、目視によるクーパー、ブレドホフト法では小さな $\alpha$ 値でマッチングが行われているが適切であるとは言えない。対して自動クーパー法では良好なマッチングを示している。よって、自動クーパー法の結果をKAの評価値とする。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
DH2120KA	$1.58 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2} \sim$ $2.0 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5} \sim$ $2 \times 10^{-3}$

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K(\text{cm/s})$	可能範囲 $K(\text{cm/s})$	最適 $S_s(1/\text{cm})$	可能範囲 $S_s(1/\text{cm})$
DH2120TA	$3.48 \times 10^{-6}$	—	—	—
DH2120KA	$1.60 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4} \sim$ $2.0 \times 10^{-4}$	$1.34 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-8} \sim$ $8.1 \times 10^{-7}$

#### DH2131シリーズ(TB, KA)

- 両データセットともに、ボシュレフ法での評価基準を満たす結果である。
- クーパー系手法では、 $\alpha$ 値が検討最小限界にまで至っても最適ではなく、残差二乗和も極値をもたない。よって、クーパー系手法では解析できない。

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
DH 2 1 3 1 TB	$2.32 \times 10^{-6}$	—	—	—
DH 2 1 3 1 KA	$1.43 \times 10^{-4}$	—	—	—

#### DH 2 1 6 0 シリーズ (TB, KB)

- TBはボシュレフ法における直線性が高い。
- TBのクーパー系手法の結果は $\alpha$ 値が $10^{-10}$ 以下の値でマッチングしており、周辺の $\alpha$ 値との間に大きな差がみられず、評価基準を考慮すると、 $\alpha < 10^{-4}$ であればどの値でも残差二乗和は評価基準を満たす。これは、地盤の貯留性の影響が極めて少ないことが原因と考えられ、TBについてはボシュレフ法による結果を採用する。
- KBはTBほどにボシュレフ法の直線性は高くない。
- KBは比較的妥当な範囲内の $\alpha$ 値で残差二乗和の極値を持つことから、自動クーパー法による結果を採用する。

	最適 $\beta / t$	$\beta / t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
DH 2 1 6 0 KB	$5.27 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3} \sim$ $2.2 \times 10^{-2}$	$2.08 \times 10^{-5}$	$10^{-20} \sim 2 \times 10^{-3}$

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
DH 2 1 6 0 TB	$2.80 \times 10^{-6}$	—	—	—
DH 2 1 6 0 KB	$1.48 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-6} \sim$ $6.2 \times 10^{-5}$	$2.35 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-24} \sim$ $2.2 \times 10^{-7}$

#### SN 6 0 6 0 シリーズ (CA, KA)

- CAは水頭回復が20%にも達していない。
- CAはボシュレフ法の直線近似は良好であると判断でき、地盤の貯留性の影響が少ないと判断できるが、クーパー系手法による結果では貯留性の影響が大きすぎ、適切に解析できていない。
- CAのこのような挙動は取得したデータが適切でない、すなわち試験時間が早い時期すぎるデータでは適切な解析ができないと考えられ、評価不能とする。
- KAのボシュレフ法による直線性は悪い方ではない。
- KAのクーパー系手法による結果でも、地盤の貯留性による影響が小さいことがわかり、KAはボシュレフ法の結果を採用する。

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K(\text{cm/s})$	可能範囲 $K(\text{cm/s})$	最適 $S_s(1/\text{cm})$	可能範囲 $S_s(1/\text{cm})$
SN6060CA	—	—	—	—
SN6060KA	$7.42 \times 10^{-6}$	—	—	—

### SN6070シリーズ(CA, KA)

•どちらのデータも地盤の貯留性の影響を受けている。

•しかしながら、 $t < 60\text{sec}$ での水頭変動が大きく、他のデータセットとはかなり異なる挙動を示している。例えば、ボシュレフ法でいえば、他のデータセットでは試験早期の曲線部分のデータを捨て、その後の直線部分を採用する傾向があるが、このデータセットに関しては曲線部分のデータを採用したことになっている。他のデータセットとの比較を行なうことに疑問があるだろう。

•CAは比較的大きな $\alpha$ でマッチングしており、残差二乗和の分布も良好な極値を得ている。よって、CAは自動クーパーの結果を採用する。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
SN6070CA	$5.42 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3} \sim$ $7.0 \times 10^{-3}$	1.29	$5 \times 10^{-1} \sim 3$

•KAはクーパー系の手法では $\alpha$ 値の最大値まで調べても残差二乗和に極値がみられない。

また、ボシュレフ法の結果もよくないので、評価不能とする。

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K(\text{cm/s})$	可能範囲 $K(\text{cm/s})$	最適 $S_s(1/\text{cm})$	可能範囲 $S_s(1/\text{cm})$
SN6070CA	$5.51 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5} \sim$ $7.1 \times 10^{-5}$	$5.26 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4} \sim$ $1.2 \times 10^{-3}$
SN6070KA	—	—	—	—

### SN6076シリーズ(CA, KA)

•いずれもボシュレフ法では高い直線性を示しているが、CAはKAより直線性は劣る。

•CAのクーパー系手法での解析結果では、良好な $\alpha$ 値でマッチングがなされていることから、CAには自動クーパー法の結果を評価値とする。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
SN6076CA	$5.43 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4} \sim$ $1.5 \times 10^{-3}$	$1.87 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-3}$

•KAのクーパー系手法での解析では検討範囲の最小 $\alpha$ 値に至っても残差二乗和の極値は

得られていない。よって、KAにはボシュレフ法の結果を評価値とする。

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
SN6076CA	$5.52 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6} \sim$ $1.5 \times 10^{-5}$	$7.61 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-16} \sim$ $1.6 \times 10^{-6}$
SN6076KA	$1.99 \times 10^{-5}$	—	—	—

#### SN6082シリーズ(CA, KA)

•CAは10%も水頭が回復しておらず、解析するにはデータが少なすぎる。よってCAは評価不能とする。

•KAのボシュレフ法での直線性は比較的良好である。

•KAのクーパー系手法では検討範囲の最小  $\alpha$  値に至っても残差二乗和の極値がみられず、地盤の貯留性の影響がきわめて少なく、KAにはボシュレフ法の結果を採用する。

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_s$ (1/cm)	可能範囲 $S_s$ (1/cm)
SN6082CA	—	—	—	—
SN6082KA	$4.92 \times 10^{-6}$	—	—	—

#### P10091シリーズ(1, 2)

•ボシュレフ法によるグラフからわかるように、 $h > 1$  m範囲のデータが時間に対して階段状の変化を示している。試験装置の問題と思われる。

•これまでのスラグテストと比較すると解析手法の差が算定結果にみられない。

•いずれもボシュレフ法の直線性は悪い方ではない。

•P100911のクーパー系手法のマッチングは比較的良好な  $\alpha$  値で行われている。

•P100912のクーパー系手法のマッチングは幾分小さな  $\alpha$  でなされており、P100911より極値の信頼性は低い。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
P100911	$7.62 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3} \sim$ $10^{-2}$	$1.54 \times 10^{-4}$	$10^{-5} \sim 10^{-3}$
P100912	$1.16 \times 10^{-2}$	$9.0 \times 10^{-3} \sim$ $2 \times 10^{-2}$	$1.52 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-10} \sim 9 \times 10^{-5}$



•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K(\text{cm/s})$	可能範囲 $K(\text{cm/s})$	最適 $S_s(1/\text{cm})$	可能範囲 $S_s(1/\text{cm})$
P100911	$7.02 \times 10^{-8}$	$5.5 \times 10^{-8} \sim$ $9.2 \times 10^{-8}$	$5.67 \times 10^{-11}$	$3.6 \times 10^{-12} \sim$ $3.6 \times 10^{-10}$
P100912	$1.07 \times 10^{-7}$	$8.3 \times 10^{-8} \sim$ $1.8 \times 10^{-7}$	$5.60 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-14} \sim$ $3.3 \times 10^{-9}$

### P1012シリーズ(03~06)

- ボシュレフ法によるグラフからわかるように、 $h > 1 \text{ m}$ 範囲のデータが時間に対して階段状の変化を示している。試験装置の問題と思われる。
- ボシュレフ法の評価基準の  $10^{-4} (\text{m}^2)$  相当の平均残差二乗和を示しており、直線性が有意であるとは言えない。
- P101203は幾分小さな  $\alpha$  でマッチングを見せたが、他のケースはほぼ良好な範囲の  $\alpha$  でマッチングしている。
- これまでのスラグテストと比較すると解析手法の差が算定結果にみられない。
- 自動クーパー法の結果を評価値とする。

	最適 $\beta/t$	$\beta/t$	最適 $\alpha$	$\alpha$
P101203	$2.33 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2} \sim$ $3.0 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-8}$	$10^{-13} \sim 3 \times 10^{-6}$
P101204	$1.45 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2} \sim$ $1.6 \times 10^{-2}$	$2.31 \times 10^{-4}$	$10^{-4} \sim$ $8.0 \times 10^{-4}$
P101205	$3.18 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2} \sim$ $6.0 \times 10^{-2}$	$2.31 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-8} \sim 10^{-2}$
P101206	$2.93 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2} \sim$ $9.0 \times 10^{-2}$	$4.33 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-12} \sim$ $1.6 \times 10^{-2}$

•よって以下の評価値を採用する。

	最適 $K$ (cm/s)	可能範囲 $K$ (cm/s)	最適 $S_g$ (1/cm)	可能範囲 $S_g$ (1/cm)
P 1 0 1 2 0 3	$6.30 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-8} \sim$ $8.1 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^{-15}$	$1.0 \times 10^{-20} \sim$ $3.2 \times 10^{-13}$
P 1 0 1 2 0 4	$3.91 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-8} \sim$ $4.3 \times 10^{-8}$	$2.49 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-11} \sim$ $8.6 \times 10^{-11}$
P 1 0 1 2 0 5	$8.59 \times 10^{-8}$	$5.4 \times 10^{-8} \sim$ $1.6 \times 10^{-7}$	$2.49 \times 10^{-11}$	$3.2 \times 10^{-15} \sim$ $1.0 \times 10^{-9}$
P 1 0 1 2 0 6	$7.92 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-8} \sim$ $2.4 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-11}$	$3.2 \times 10^{-19} \sim$ $1.7 \times 10^{-9}$

### 3. 4 考察

第2章では理論的な観点から、第3章では実測値との比較からそれぞれボシュレフ法、クーパー法、ブレドホフト法、自動クーパー法の比較を行なったところ以下の知見が得られた。

- ① 4種類の解析法は、ボシュレフ法とクーパー系手法に分類でき、自動クーパ法はクーパー系手法を包括できる手法である。
- ② 試験精度を水頭観測誤差 $\Delta h$ に集約させて、実測値と近似値あるいは標準曲線値との残差と比較することで定量的に試験結果を評価することができる。
- ③ これまで、試験方法については試験に必要な時間を評価することから、透水係数の大きさを分類がなされてきたが、解析手法では地盤の貯留性と試験孔の貯留項を比較した $\alpha$ 値を用いた分類が有効である。ここでは、クーパー系手法が適切になされる $\alpha$ の範囲を $10^{-5} \sim 10$ とした。
- ④ これらの観点から、後に示す課題はあるものの、解析手法をボシュレフ法かクーパー系手法かどちらかを選ぶものではなく、両方の手法で解析した結果を見比べるという作業が有効である。

また、実測データに対しては以下の点を指摘する。

- ⑤ 現地での試験時間の制約もあろうが、試験孔内の水頭回復が十分に達成されていない試験があるが、地盤貯留性の影響などを考えると、ある程度回復するまでのデータを取得すべきである。
- ⑥ 傾向であるが、スラグ試験では注入のほうが回復によるものよりも透水係数が小さく評価される。この事象については、注入による目詰まりや地盤内への水侵入の困難さなどが従来より指摘されている。しかしながら、理論的には全く同じであると考えられるパルス試験ではこのような違いがほとんどみられない。
- ⑦ このため、同じ試験孔インターバルでスラグ試験とパルス試験を実施する必要があると考えられる。

#### 4. 今後の課題

今回実施した検討および文献調査によって今後解決すべきと考えられる課題を以下にまとめると。

##### 4. 1 ボシュレフ法の孔内水頭

項(2.2.1)で示したように、ボシュレフ法では試験孔に集まる地下水流は、インターバル長さにわたって等分布流量であるとし、さらにそれゆえに水頭分布が等分布(静水圧分布)にならないことからインターバル中央の水頭値を代表孔内水頭としている。実際には、孔内水頭は一定で、流入流量分布が一定ではないと考えられる。

実際条件に則した数学モデルの開発は今後の課題とするが、ここではインターバル中央での水頭値がどのような意味をもつものか示しておく。

式(2.2.9)が等分布流入量に対するインターバル上の水頭分布であり、式(2.2.10)がインターバル中央部での代表水頭値である。そこで、 $h$ を $h_m$ で除すと次式となる。

$$\frac{h}{h_m} = \frac{1}{2} \frac{\sinh^{-1} \frac{L-z}{r_w} + \sinh^{-1} \frac{z}{r_w}}{\sinh^{-1} \frac{L}{2r_w}} \quad (4.1.1)$$

いま、 $L=1\text{ m}$ 、 $r_w=0.1\text{ m}$ とすると図-4.1.1に示す $h/h_m$ 分布を得る。同図中に示した $\overline{h/h_m}$ は平均水頭であり、中央代表水頭の約90%となり、本来の意味で代表水頭を設定するならば平均水頭を設定すべきであろう。

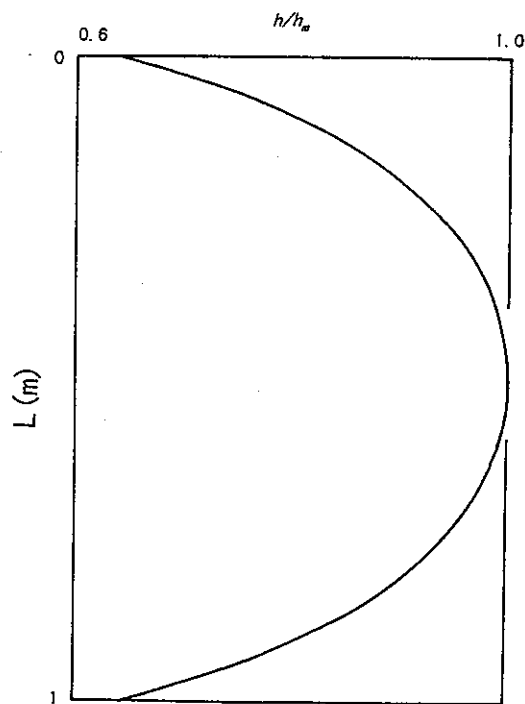


図-4.1.1 インターバル中央水頭に対する水頭比

#### 4. 2 不完全貫入井戸と地盤の貯留係数

本検討で、不完全貫入を考慮しかつ地盤の貯留性を考慮できる解析モデルの導入の必要性が判明した。これについてはこれまで適切な手法は提案されていなかったが、Hyderら<sup>19)</sup>がこの手法を提案した。彼らの手法では貫入率、地盤の透水性の異方性が考慮できるだけでなく、試験孔周辺のスキン効果も考慮できる。

現段階ではHyderらの手法でどの程度まで実測データを解析できるか不明であり、今後の課題として照査すべき研究成果であるが、論文に興味深い結果が示されている。これは、不完全貫入状態であっても、地盤の貯留性の影響が見られる場合には試験孔周辺の地下水しか移動がみられず、結果的に水平流しか発生しておらず従来のクーパー系手法による解析でも十分な精度で地盤浸透特性を評価できるというものである。

#### 4. 3 流れ場の確認

不完全貫入であれば三次元的な流れ場であると考えられるが、これは堆積岩層のような多孔質な透水場でのものであり、亀裂内浸透が卓越した結晶質岩層では貫入の状態を把握することも困難である。このため、ボーリングコアや他の地質学的情報を導入して流れ場を推定しなければならない。しかしながら、流れ場決定の最良の手法は試験結果である孔内水頭の変化からどのような流れ場であるかを評価するものである。

これに対して、定流量揚水時の水頭変化と流れ場の関係を確立したBaker<sup>20)</sup>の手法がある。定流量であるため非定常単孔式試験結果にはそのまま適用することはできないが、定流量揚水試験の併用などで流れ場を決定し、この情報を非定常単孔式試験結果に導入することが考えられる。

#### 4. 4 スキン効果

基本的に観測井戸を用いない単孔式試験法では井戸周辺の低あるは高透水層の存在がある場合にはこれを無視することができない。本検討で扱ったボシュレフ法やクーパー系手法ではスキン効果を考慮していないため、実測データに対してはスキン部分の浸透特性を含めた地盤の浸透特性あるいはスキン部分の浸透特性を評価してしまう懸念がある。

文献によればスキンは大別して2種類の定義がある。石油工学の分野では伝統的にスキン部分は厚さの無視できる膜状であると考えられてきた。これは、石油回収井戸の大きさに比べてスキン厚さが十分薄いと考えたためである。また、スキン厚さを考慮した考え方は地下水工学でみられ、Moench and Hsieh<sup>21)</sup>、Karasaki<sup>22)</sup>、そして先に示したHyderら<sup>19)</sup>の研究がこれにあたる。地盤調査に用いられる径10 cm程度の試験孔に対してはスキンの厚さを無視することができない。

これまでスキン効果は試験結果が地質学的情報と一致しない場合に、「スキン効果により適切な試験結果でない」といった類の説明に使われることが多かったが、今後は定量的に評価する技術を持つべきである。

#### 4. 5 試験精度

本検討では、試みに評価基準を導入することとしたため、さまざまな要因に由来する試験精度を水頭観測誤差 $\Delta h$ に集約させたが、これまで試験精度が試験結果にどの程度影響するかについてはあまり議論された形跡が無く、近年McElweeら<sup>26,27)</sup>研究によって数学的評価が示された。

このように数学的な展開は示されたが、実際の試験でどの程度の精度があるかは明確になっておらず、水頭観測に用いる水圧あるいは水位計のメーカー提供精度程度であろう。今後は、試験システム全体を評価した試験精度の決定方法が必要であろう。

#### 4. 6 孔内水頭の回復

従来、非定常単孔式透水試験はオープンボアホールによるスラグテストとして普及したが、近年低透水性地盤にも適用できるようにクローズドボアホールによるパルステストが提案され、低透水性地盤でも比較的短時間に試験が実施できるようになった。これは、試験孔の貯留項を小さくすることで見かけの透水係数を大きくとったことに他ならない。

それゆえに、節(2.1)で示したように初期水頭差を発生させる時間内に、地盤から試験孔内に地下水流入あるいは地盤への流出が既に生じている懸念が十分にある。しかも、現在とられている初期水頭差の決定手法は水頭変化のピークを押さえているにすぎず、実際に孔内貯留水の体積変化量と初期水頭差の比較は行なわれていない。

この課題に答える事例を文献にみることはできなかったが、この現象を一種の回復試験時の挙動ととらえることに解決の糸口を見出せると考える。すなわち、節(2.1)で示した $h = 0 \sim h_0$ までの水頭変化の間には一定流量 $Q$ で孔内貯留水を変化させ<sup>23)</sup>、 $h = h_0$ となった時点で $Q = 0$ とし、回復試験の重ねあわせの原理が適用できると考えられる。

#### 4. 7 観測井戸のある試験

単孔式透水試験はその名の通り単一の試験孔で実施する試験である。しかしながら、Butlerら<sup>24)</sup>が指摘するように地盤の貯留特性を的確に把握しようとするなら、別途観測孔での水頭変化を観測しこれを解析する方が信頼性が高い。Shinshi<sup>7)</sup>は非定常単孔式試験時の観測孔での水頭変化の標準曲線を図-4.7.1のように解析している。試験孔内の水頭変化と比べると、観測孔ではピークを持った水頭変化となっており、曲線の識別が明瞭である。

もっとも、透水性の極めて低い深部岩盤において観測孔がどの程度試験孔でのインパクトに反応するか不明であるが、地盤の貯留性を評価する方法として新しいものであり紹介した。

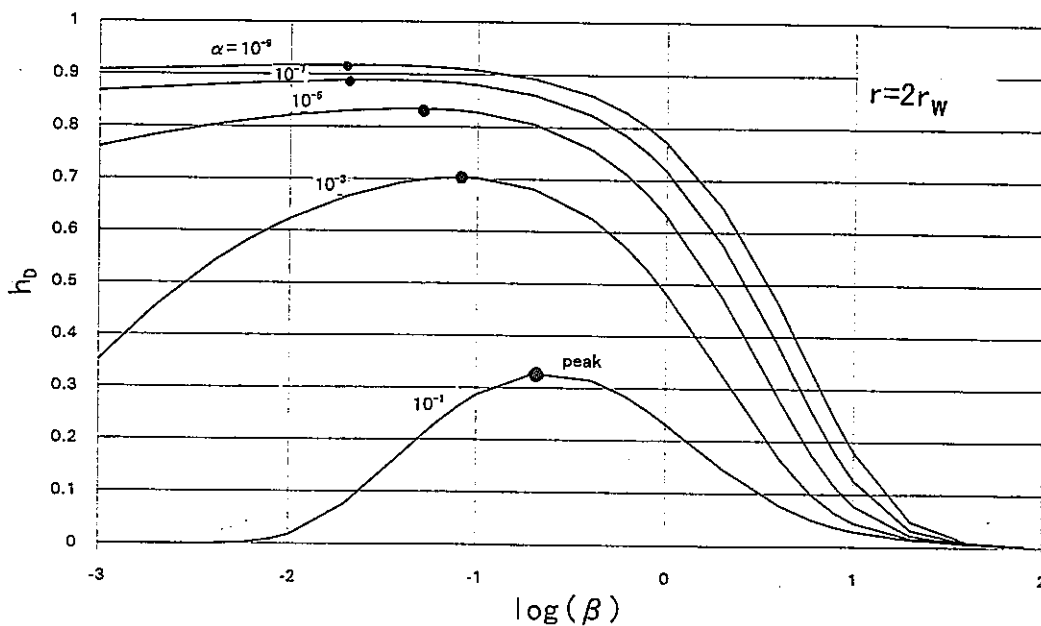


図-4.7.1 非定常単孔式試験孔周辺での水頭変化

## 5. おわりに

本検討では既存の非定常単孔式透水試験結果の解析手法を再考し、その特性をあきらかにし解析結果の評価基準を提案した。さらに、実際の試験データにこれらの解析手法を適用し、その結果を吟味した。これらの検討結果として、未だ解決されていない課題を抽出し、課題の解説と現段階でその解決に供すると思われる考え方や文献を紹介した。

本報告書を終わるにあたって、Butlerら<sup>24)</sup>の示した非定常単孔式試験の注意項目を以下に示す。

- ①一つの試験孔に対して少なくとも3回以上の試験を行なえ
- ②初期水頭差は二つ以上の異なる水頭差で実施せよ
- ③初期水頭差はできる限り瞬時に発生させよ
- ④適切なデータ収集機器を用いよ
- ⑤貯留係数を正確に得たいなら観測孔を用いよ
- ⑥試験サイトに適した解析手法を用いよ
- ⑦試験データの示す浸透挙動を吟味せよ
- ⑧設置状況を考慮した井戸構造パラメータを決定せよ

これらは皆目新しいものではないが、実際の試験や解析において実践しているとは言い難い内容である。

本報告書で示した課題の解決も含め、今後も単孔式試験法の改良を続けるべきであると考えらる。



## 記号表

$b$	帯水層厚さ[L]
$c_w$	水の圧縮係数[F <sup>-1</sup> L <sup>2</sup> ]
$C_w$	試験孔貯留項[L <sup>2</sup> ]
$erfc$	余誤差関数
$h$	水頭低下量[L]
$h_D$	無次元水頭低下量[-]
$\overline{h_D}$	ラプラス変換無次元水頭低下量[-]
$h_m$	試験孔インターバル中央部の水頭[L]
$h_o$	試験開始時孔内水頭低下量[-]
$h_w$	試験孔内水頭[L]
$I_o$	第一種0次修正ベッセル関数
$J_o$	第一種0次ベッセル関数
$J_1$	第一種1次ベッセル関数
$K$	透水係数[LT <sup>-1</sup> ]
$K_o$	第二種0次修正ベッセル関数
$K_1$	第二種修正1次ベッセル関数
$L$	試験孔インターバル長さ[L]
$m$	ボシュレフ法のグラフの傾き[T <sup>-1</sup> ]
$n$	無次元時間 $\beta$ と実時間 $t$ の比[T <sup>-1</sup> ]
$p$	ラプラス変換パラメーター
$q$	流量あるいは無限小点に集中する流量[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$Q$	流量あるいは試験孔に集まる総流量[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$r$	半径あるいは距離[L]
$r_c$	試験孔ケーシング内半径[L]
$r_D$	無次元距離[-]
$r_w$	試験孔インターバル半径[L]
$S$	地盤の貯留係数[-]
$S_S$	地盤の比貯留係数[L <sup>-1</sup> ]
$t$	試験開始後の経過時間[T]
$t^*$	マッチング時間[T]
$t_D$	無地時間[-]

$T$	地盤の透水量係数 [ $L^2T^{-1}$ ]
$V_w$	閉塞区間貯留水量 [ $L^3$ ]
$x$	三次元直交水平座標 [ $L$ ]
$y$	三次元直交水平座標 [ $L$ ]
$Y_0$	第二種 0 次ベッセル関数
$Y_1$	第二種 1 次ベッセル関数
$z$	三次元直交鉛直座標 [ $L$ ]
$\alpha$	無次元貯留係数比 [ $L$ ]
$\alpha^*$	マッチング無次元貯留係数比 [ $L$ ]
$\beta$	無次元時間 [ $L$ ]
$\beta^*$	マッチング無次元時間 [ $L$ ]
$\gamma_w$	水の単位体積重量 [ $FL^{-3}$ ]
$\zeta$	鉛直座標 [ $L$ ]
$\rho$	水平座標 [ $L$ ]

## 謝 辞

当業務を遂行するにあたり、岡山大学環境理工学部 西垣誠教授に貴重な助言をいただいたこと、そして実際に試験方法については大成基礎設計株式会社 平田洋一氏にご教授いただいたことをここに記し、感謝の意を表します。

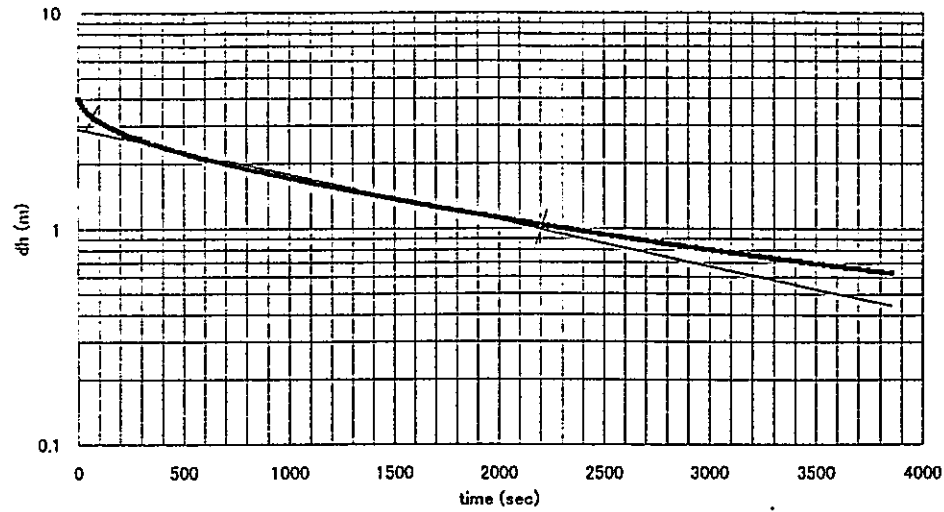
## 参考文献

- 1) Hvorslev, M., Time lag and soil permeability in ground-water observations, *Waterways, Experiment St. Corps of Eng., U.S. Army, No.36*, 1951.
- 2) 地盤工学会編、第7編地下水調査、地盤調査法、269-342、1995.
- 3) Cooper, H.H.JR., J.D.Bredehoeft, and I.S.Papadopoulos, Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, *Water Resources Research, Vol.3, No.1*, 263-269, 1967.
- 4) Papadopoulos, I.S., J.D.Bredehoeft, and H.H.Cooper, JR., On the analysis of 'Slug test' data, *Water Resources Research, Vol.9, No.4*, 1087-1089, 1973.
- 5) Bredehoeft, J.D. and S.S.Papadopoulos, A method for determining the hydraulic properties of tight formation, *Water Resources Research, Vol.16, No.1*, 233-238, 1980.
- 6) Almen, K.-E., J.-E. Andersson, L. Carlsson, K. Hansson, N.-A. Larsson, Hydraulic testing in crystalline rock. A comparative study of single-hole test methods, SKB technical report, 86-27, 1986.
- 7) Shinshi, Y., HWR603 Homework report 2, University of Arizona, unpublished, March, 1995.
- 8) 鴻池組、地盤の貯留性を考慮したスラグ試験結果の整理手法、1995.
- 9) 進士喜英、古田直、嶋村貞夫、濱野隆司、地盤の貯留性を考慮した単孔式透水試験結果の自動整理手法の開発、第51回土木学会年次講演会、Ⅲ、608-609、1996.
- 10) 西垣誠、単孔式原位置透水試験法の整理(その2)、地下水とポンプ、Vol.28, No.3, 15-24, 1986.
- 11) Gradshteyn, I.S. and I.M.Ryzhik, *Table of integrals, Series, and Products*, 5th ed., Academic Press, (in English), 1994.
- 12) Abramowitz, M. and I.A. Stegun, *Handbook of mathematical function*, Dover Publications, Inc., New York, 1970.
- 13) Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, 2nd ed., Oxford Science Publications, 1959.
- 14) Cleveland, T.G., Type-curve matching using a computer spreadsheet, *Ground Water, Vol.34, No.3*, 554-562, 1996.
- 15) Stehfest, H., Numerical inversion of Laplace transforms, *Commun. ACM, Vol.13, No.1*, 47-49, 1970.
- 16) Crump, K.S., Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approximation, *J. Assoc. Comp. mach., Vol.23*, 89-96, 1976.
- 17) De Hoog, F.R., J.H. Knight, A.N. Stokes, An improved method for numerical inversion of Laplace transform, *J. Sci. Stat. Comput., Vol.3, No.3, Sept.*, 357-366, 1982.
- 18) 西垣誠、貯留係数を考慮した単孔式透水試験法、地下水とポンプ、Vol.28, No.7, 1-7, 1986.
- 19) Hyder, Z., J.J. Butler, C.D. McElwee, and W. Liu, Slug test in partially penetrating wells, *Water*

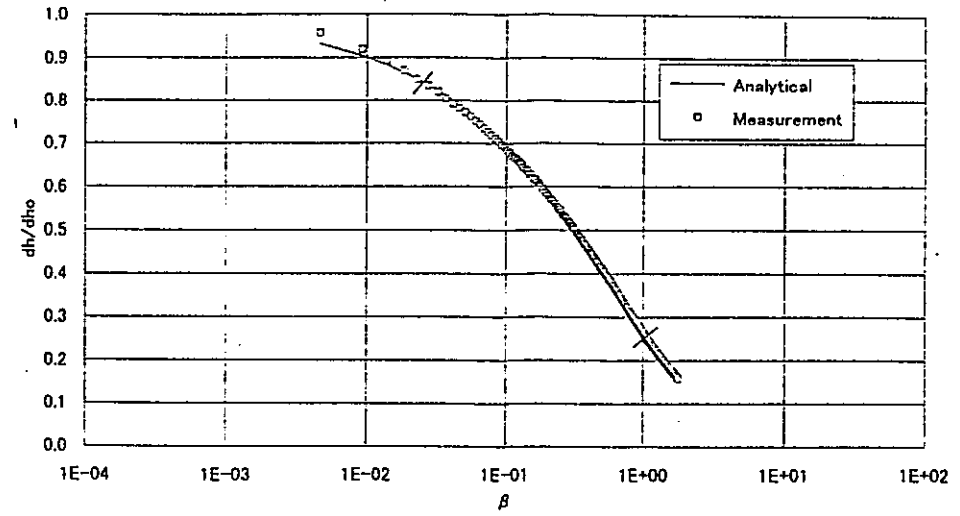
- Resources Research, Vol.30, No.11, 2945-2957, 1994.
- 20) Barker, J. A., A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, Water Resources Research, Vol.24, No.10, 1796-1804, 1988.
- 21) Moench, A. F. and P. A. Hsieh, Analysis of slug test data in a well with finite thickness skin, Proc. of Hydrology of rocks of low permeability, Committee of U.S.A. members of the International Association of hydrologists, Part 1, 17-29, 1985.
- 22) Karasaki, K., A systematized drillstem test, Water Resources Research, Vol.26, No.12, 2913-2919, 1990.
- 23) Papadopoulos, I.S. and H.H. Copper Jr., Drawdown in a large diameter, Water Resources Research, Vol.3, No.1, 241-244, 1967.
- 24) Butler, J.J., C.D. McElwee, and L. Wenshi, Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests, Ground Water, Vol.34, No.3, 480-490, 1996.
- 25) 鴻池組、大深度における非定常単孔式透水試験の解析結果、1995.
- 26) McElwee, C.D., G.C. Bohling, J.J. Butler, Jr., Sensitivity analysis of slug tests. Part 1. The slugged well, J. of Hydrology, Vol.164, 53-67, 1995.
- 27) McElwee, C.D., J.J. Butler, Jr., G.C. Bohling, W. Liu, Sensitivity analysis of slug tests. Part 2. Observation wells, J. of Hydrology, Vol.164, 69-87, 1995.

# 付 録

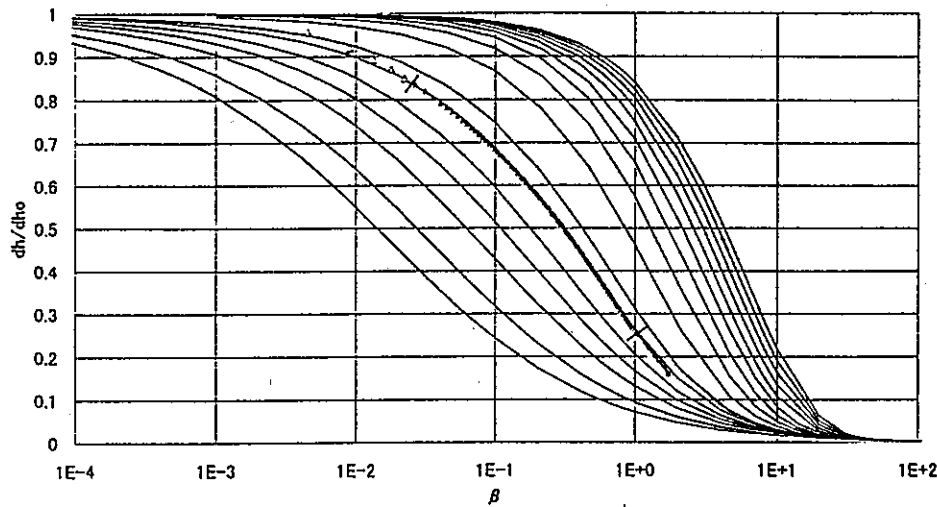
実測データの解析図



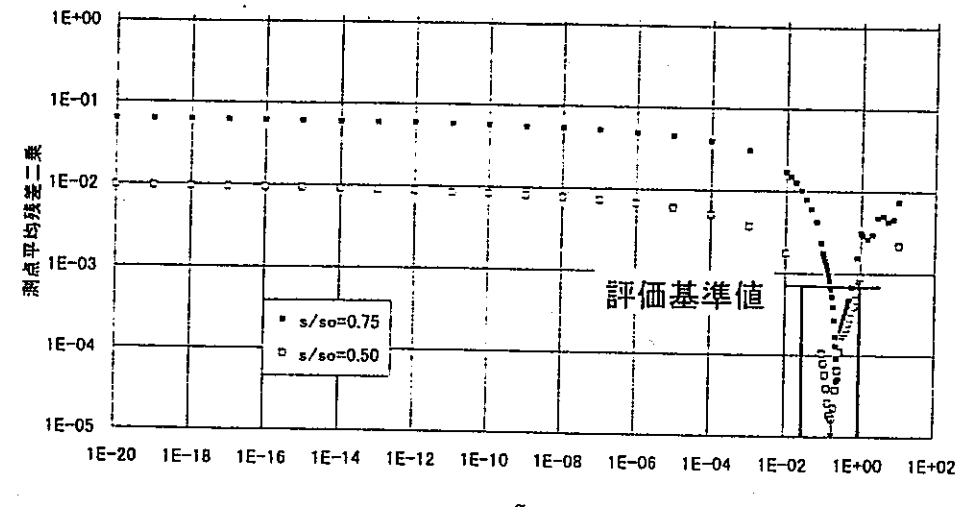
(a) ポシュレフ法による解析方法



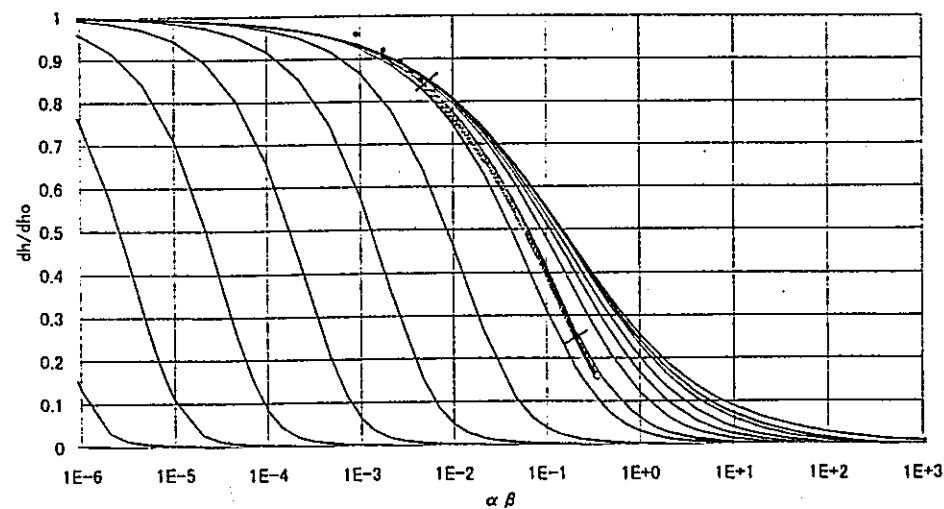
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



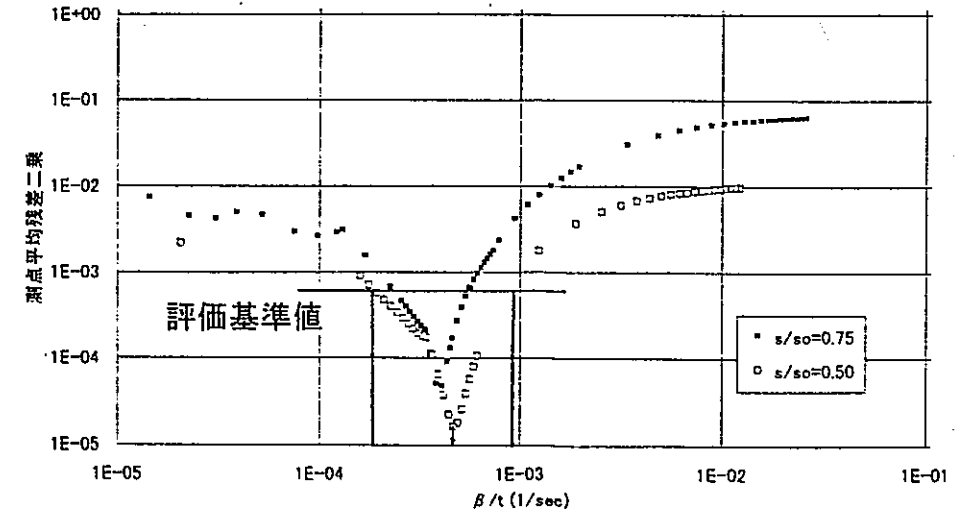
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

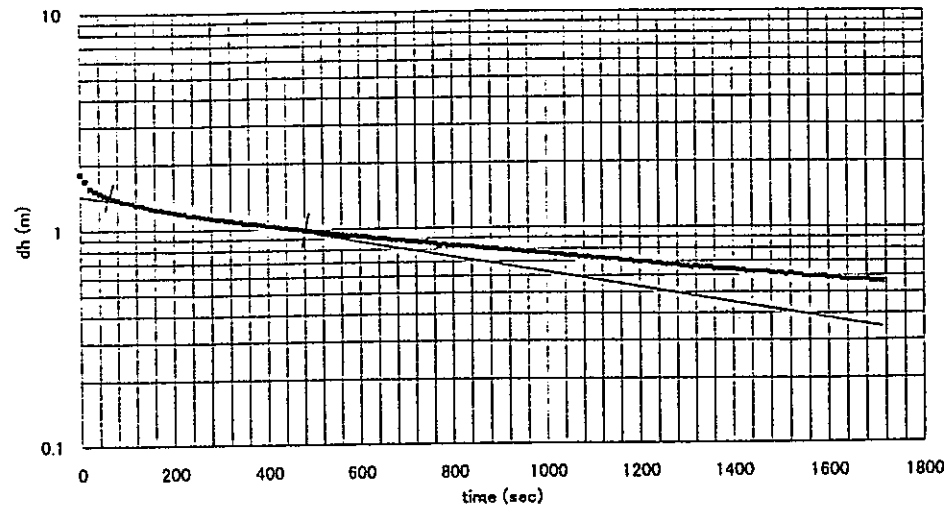


(c) ブドレホフト法による解析方法

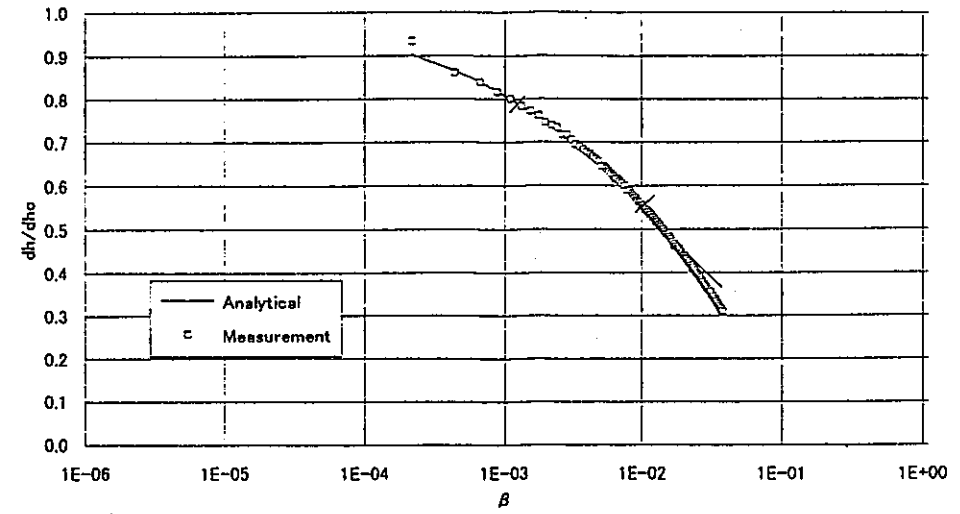


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

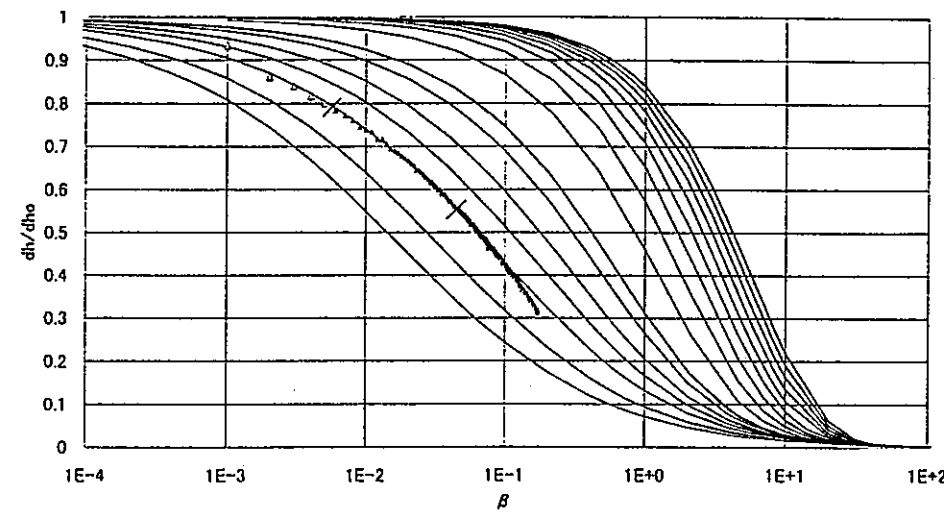
付図-1 解析結果一覧図 (SN6006TA)



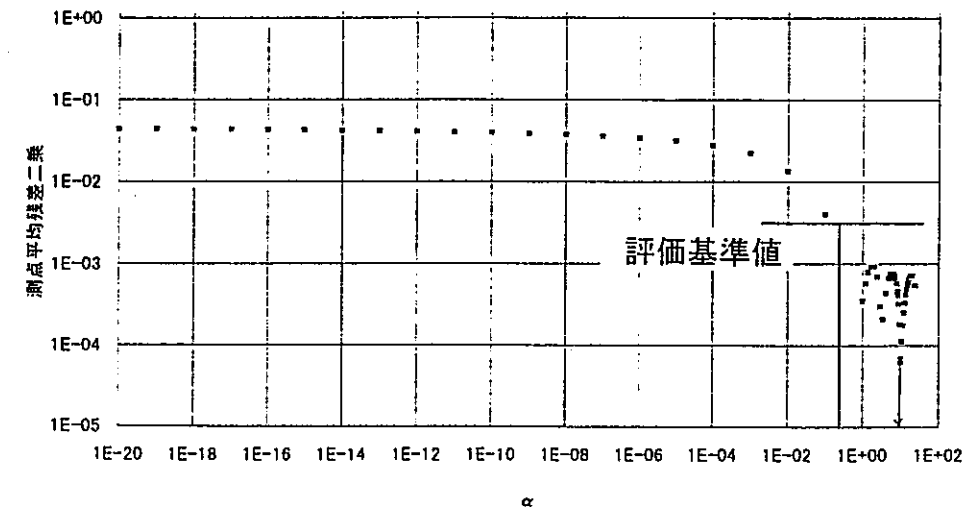
(a) ポシュレフ法による解析方法



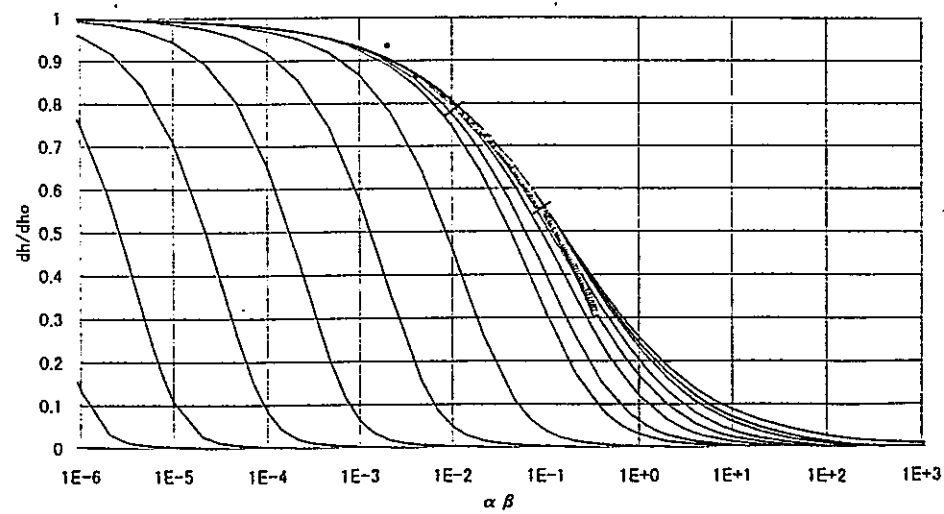
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



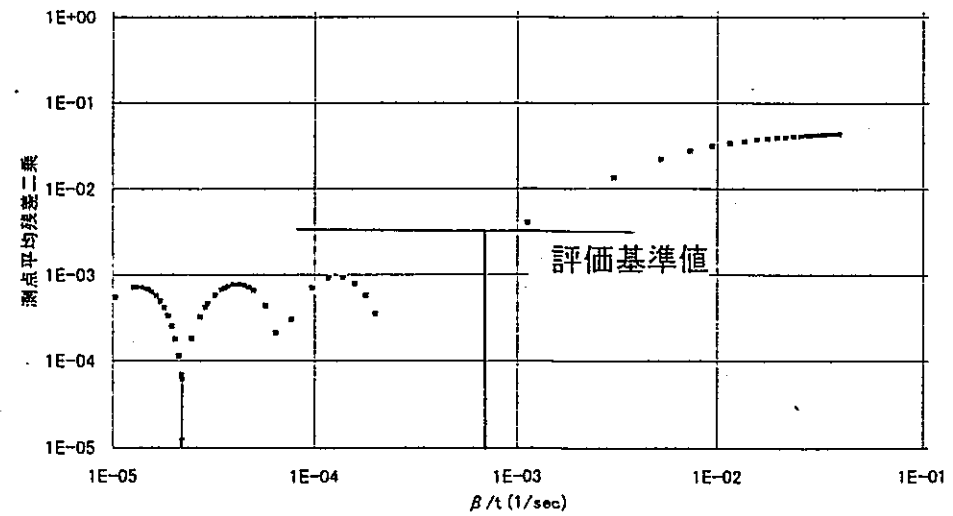
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による $\alpha$ -測点平均残差二乗和



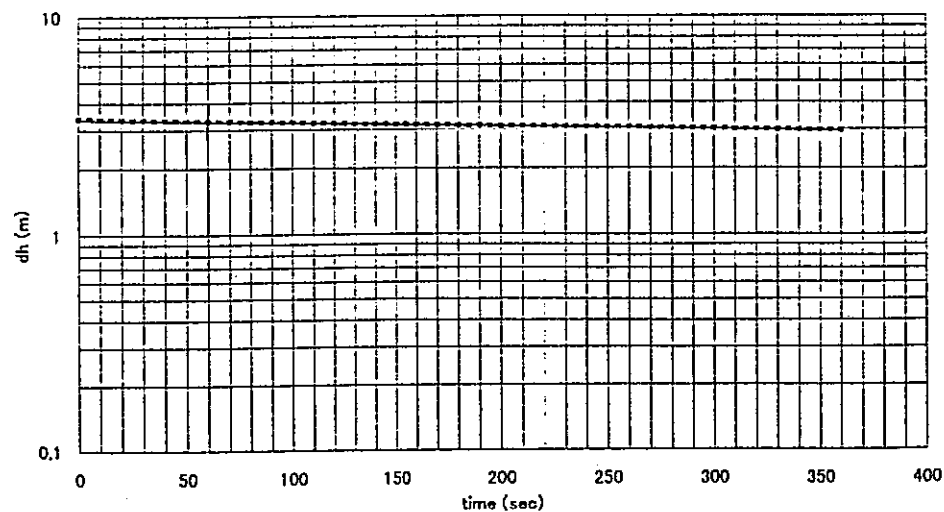
(c) ブドレホフト法による解析方法



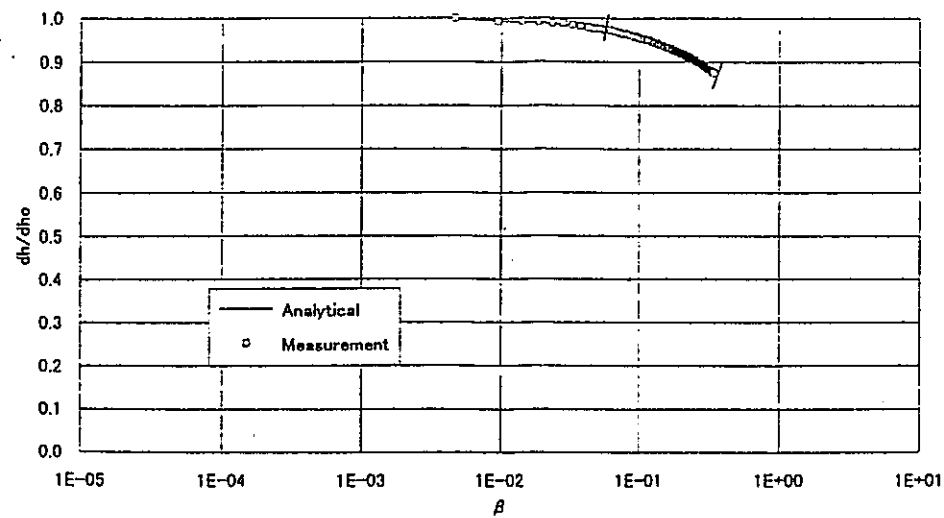
(f) 自動クーパー法による $\beta$ -測点平均残差二乗和

付図-2 解析結果一覧図 (SN6006KA)

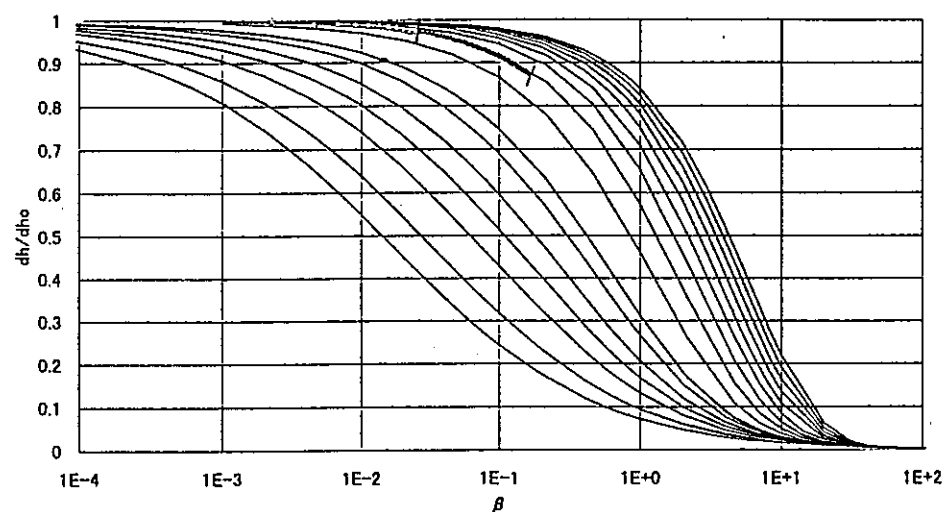




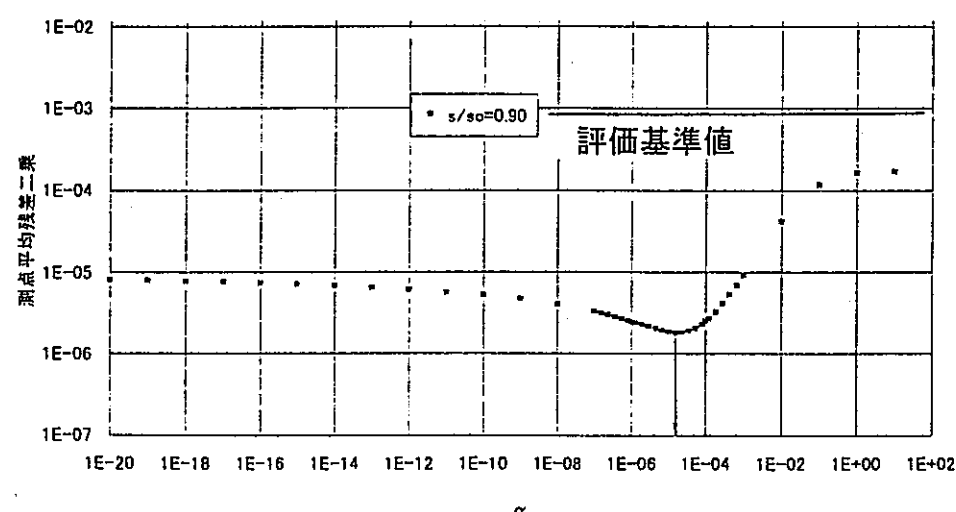
(a) ポシュレフ法による解析方法



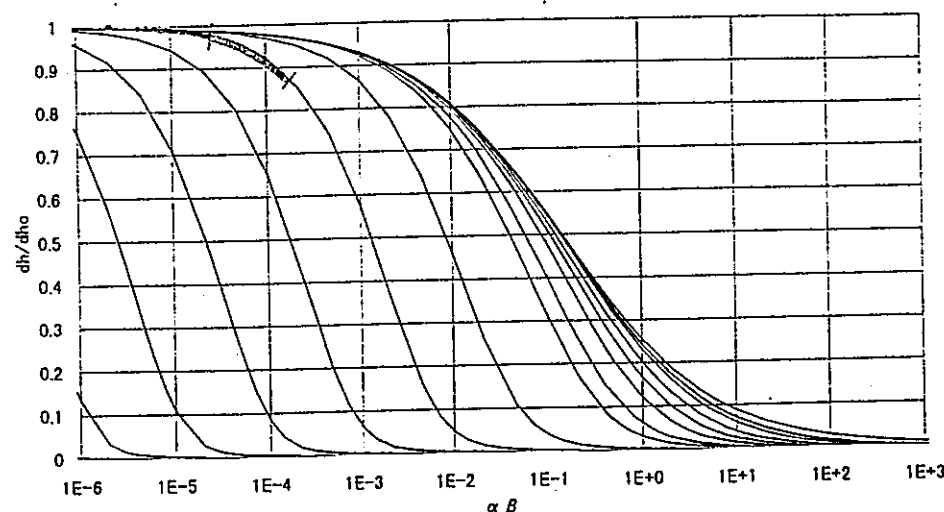
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



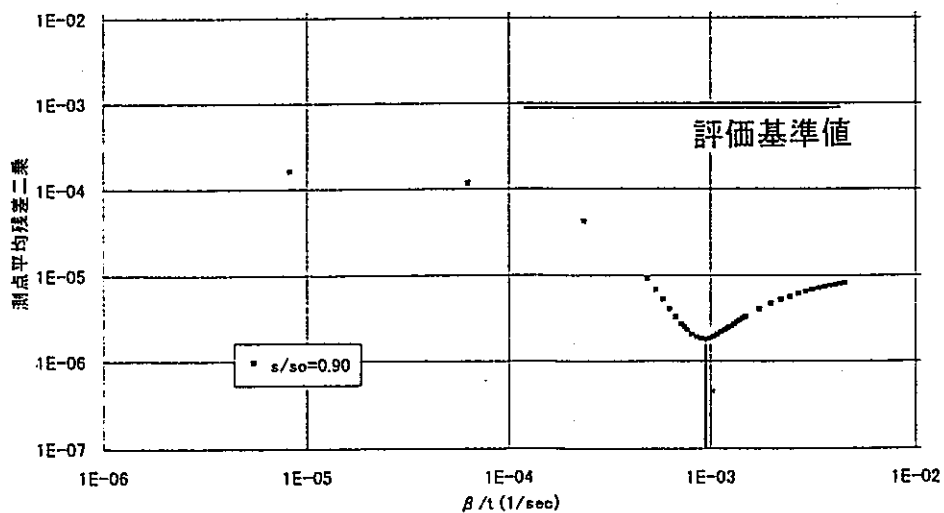
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

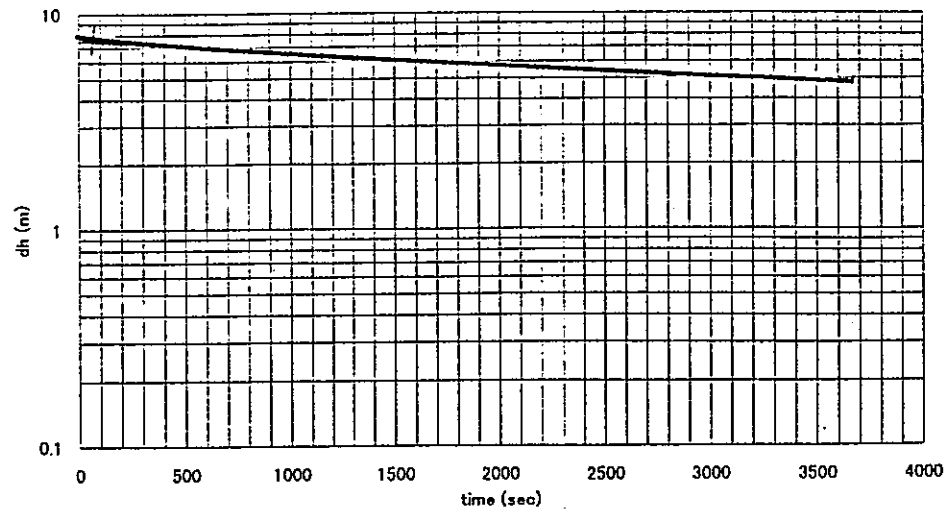


(c) ブドレフト法による解析方法

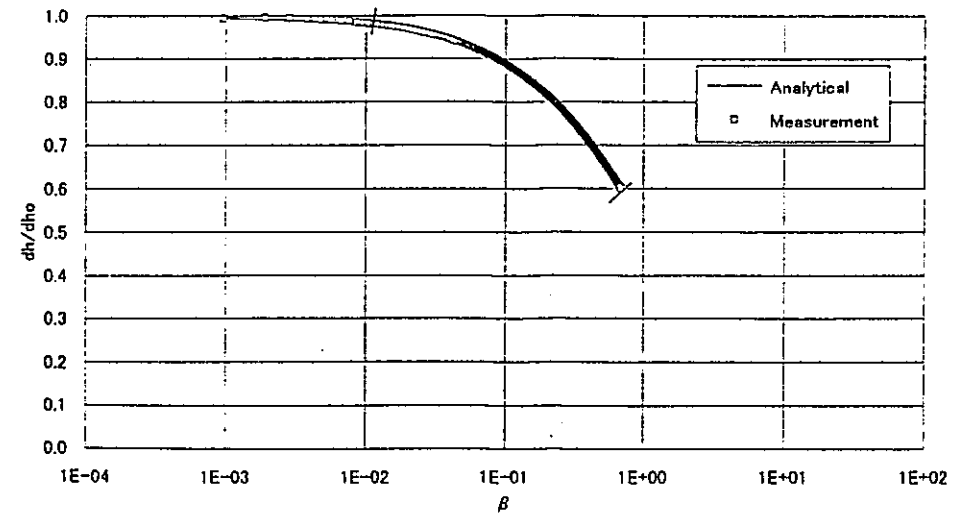


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

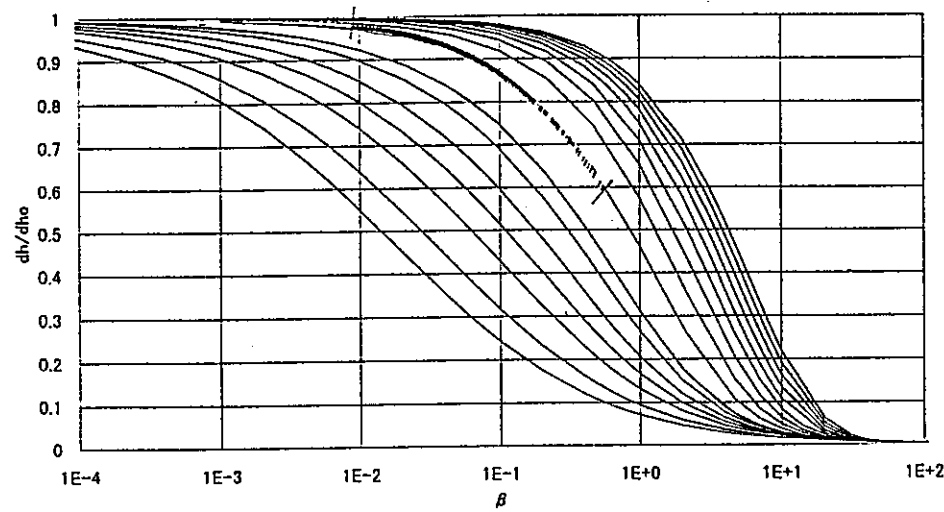
付図-3 解析結果一覧図 (SN6014TA)



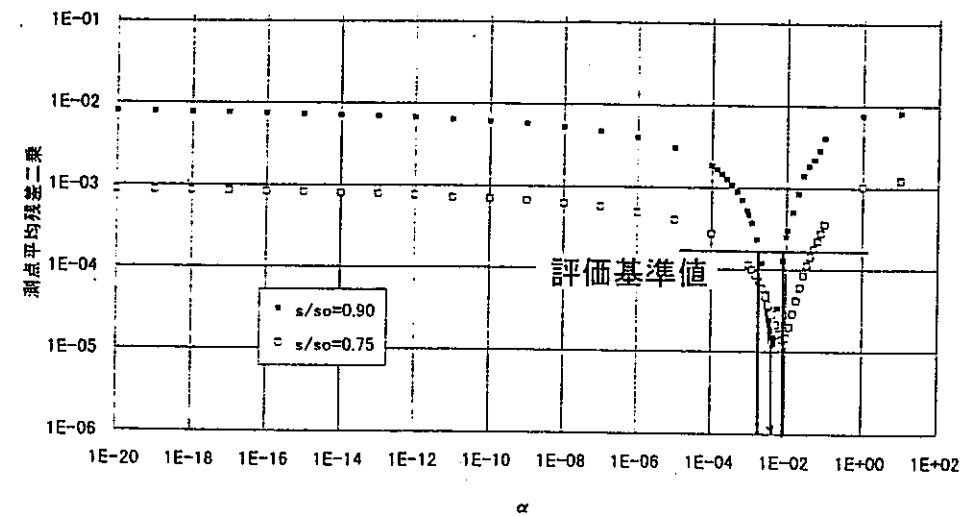
(a) ポシュレフ法による解析方法



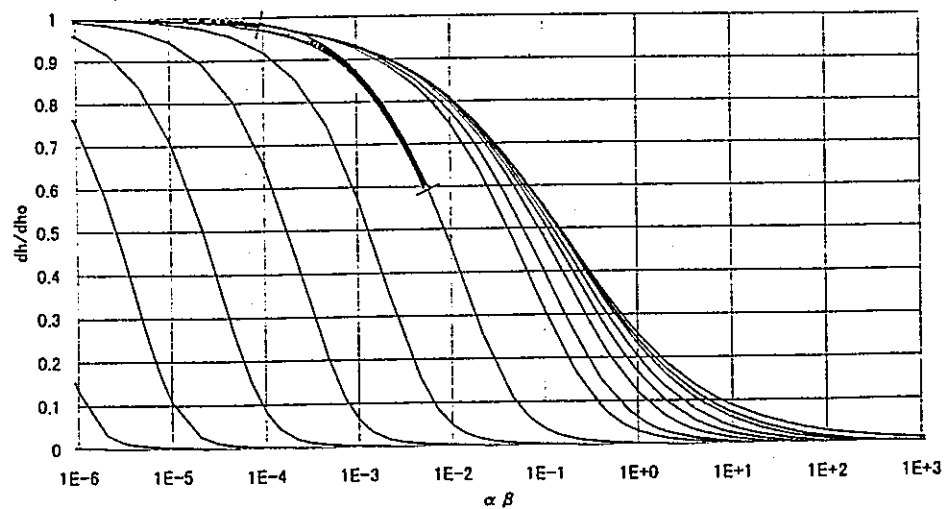
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



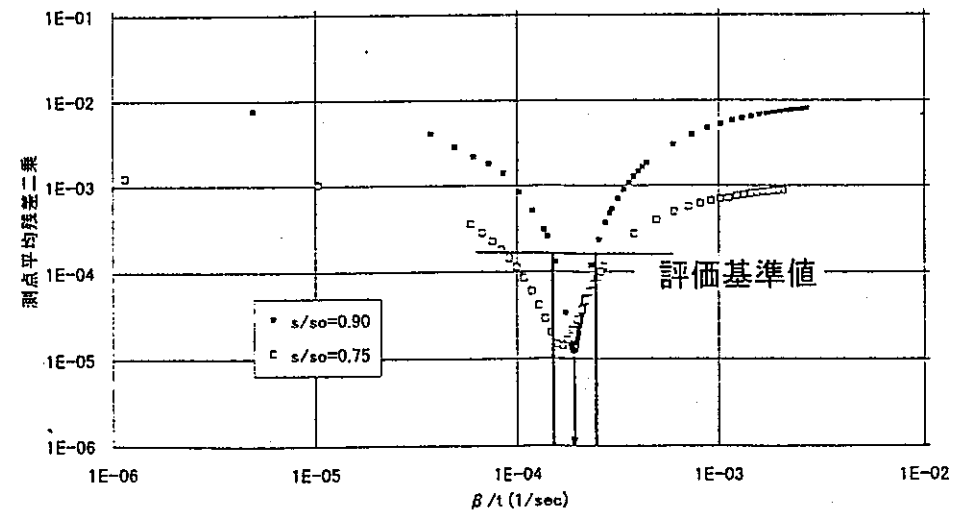
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による $\alpha$ -測点平均残差二乗和

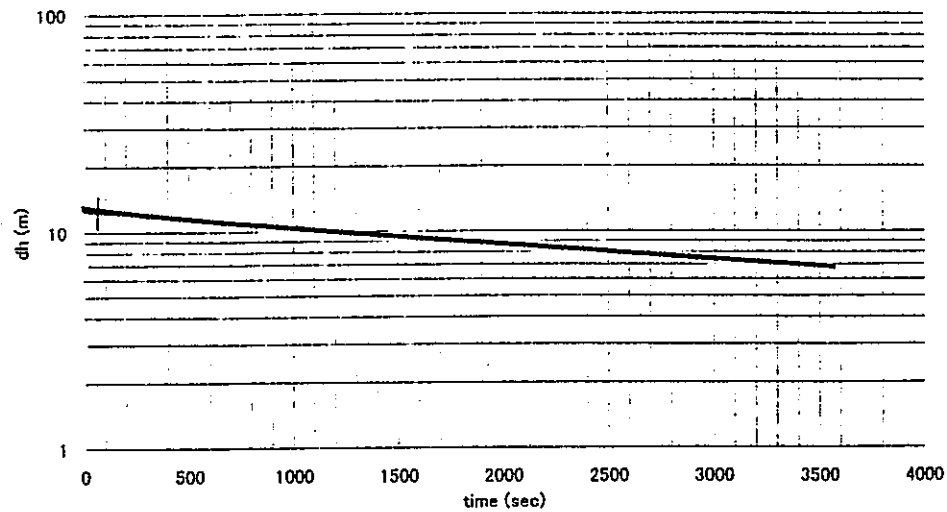


(c) ブドレホフト法による解析方法

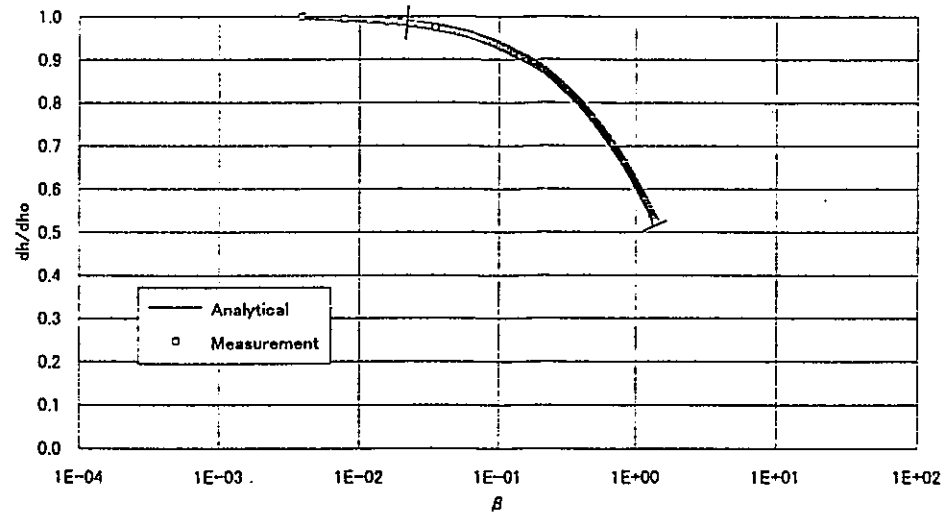


(f) 自動クーパー法による $\beta$ -測点平均残差二乗和

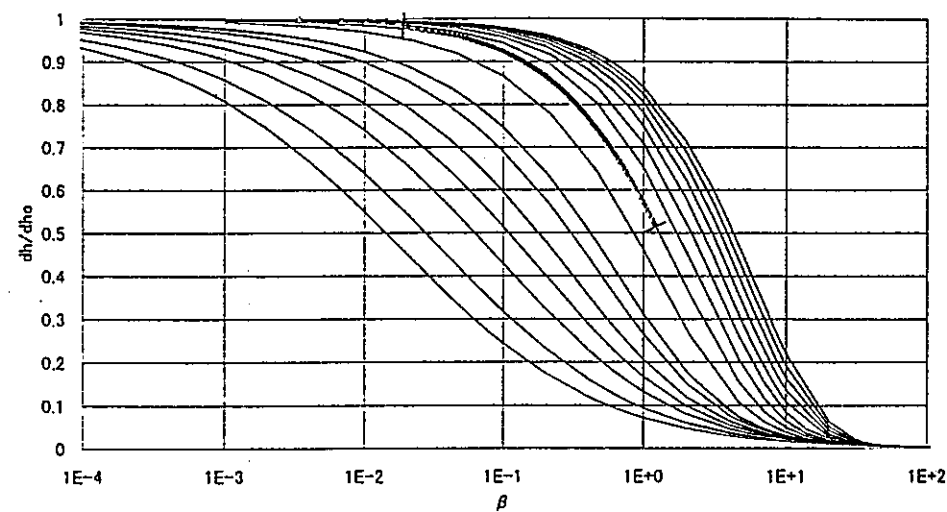
付図-4 解析結果一覧図 (SN6014KA)



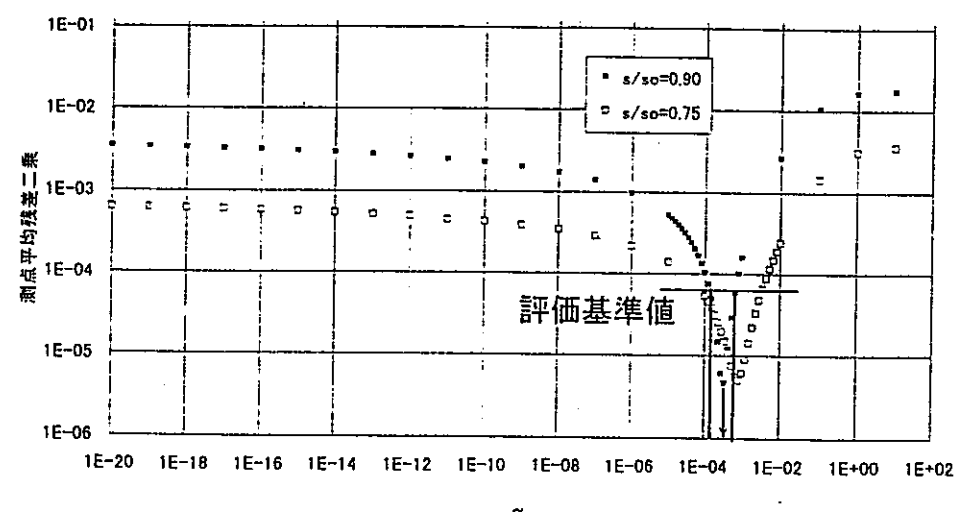
(a) ポシュレフ法による解析方法



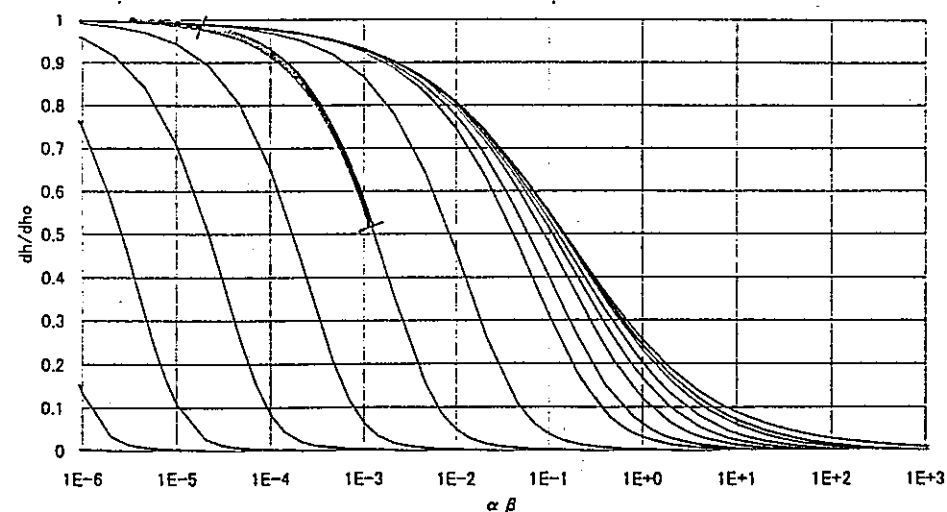
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



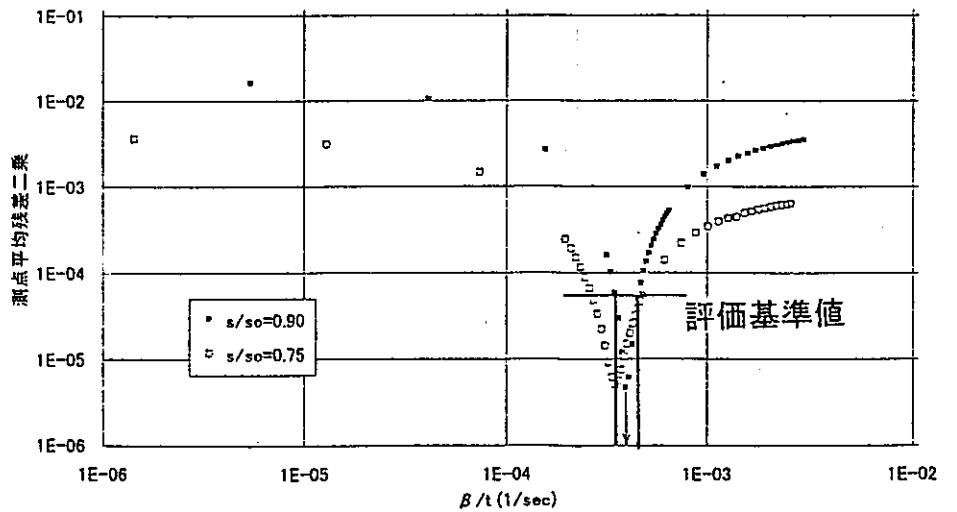
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

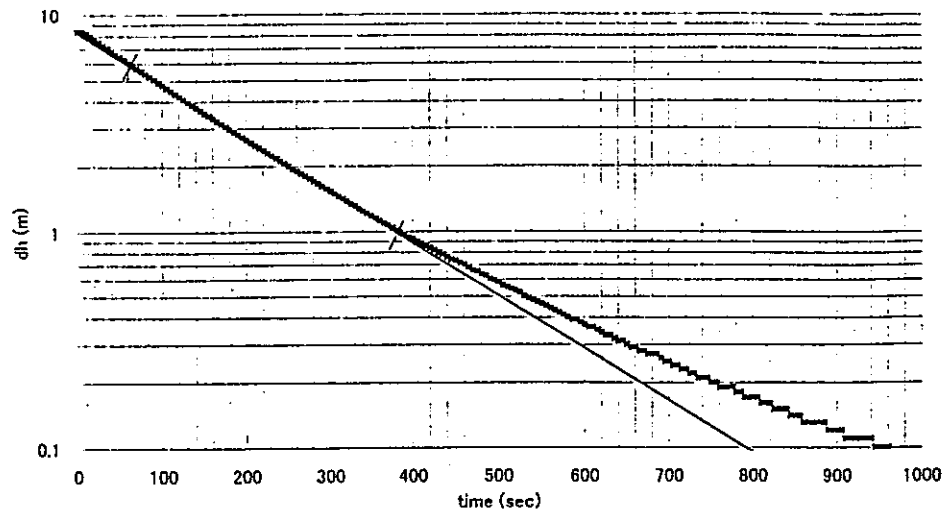


(c) ブドレホフト法による解析方法

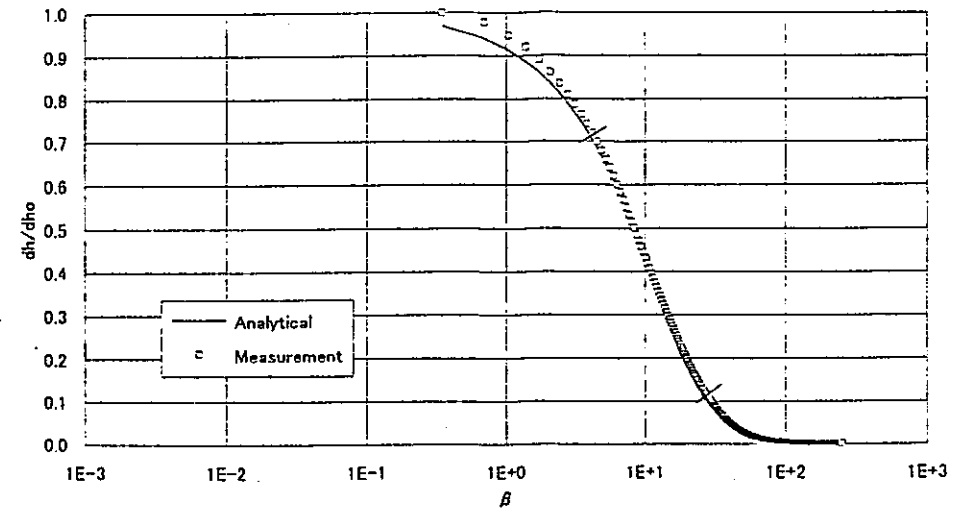


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

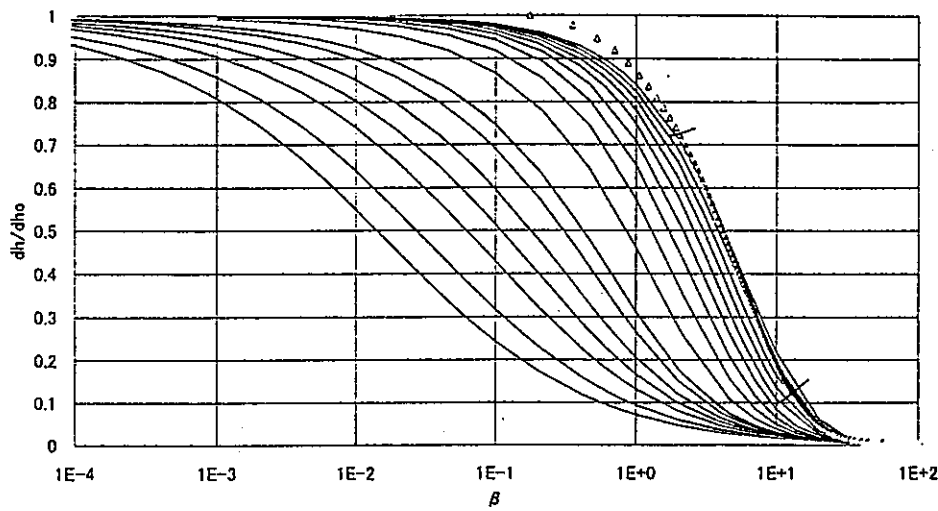
付図-5 解析結果一覧図 (DH2066TB)



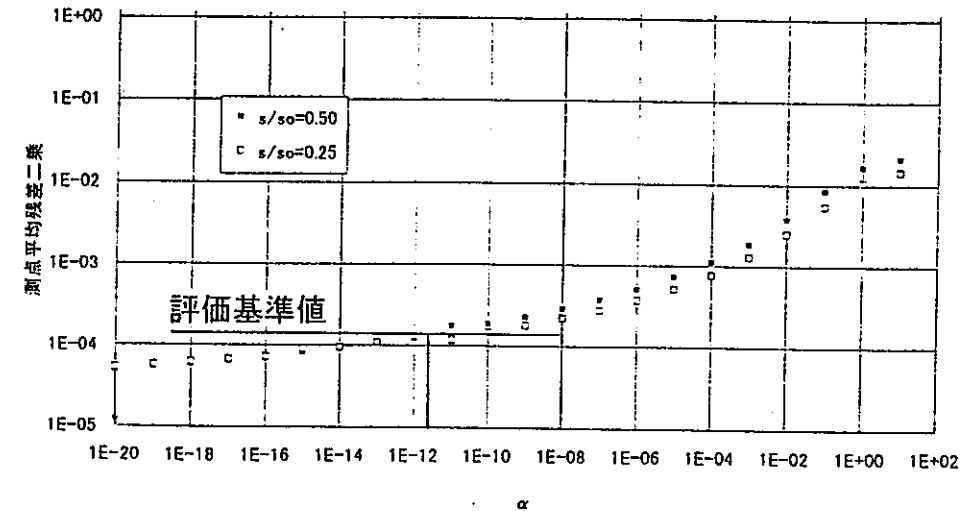
(a) ボシュレフ法による解析方法



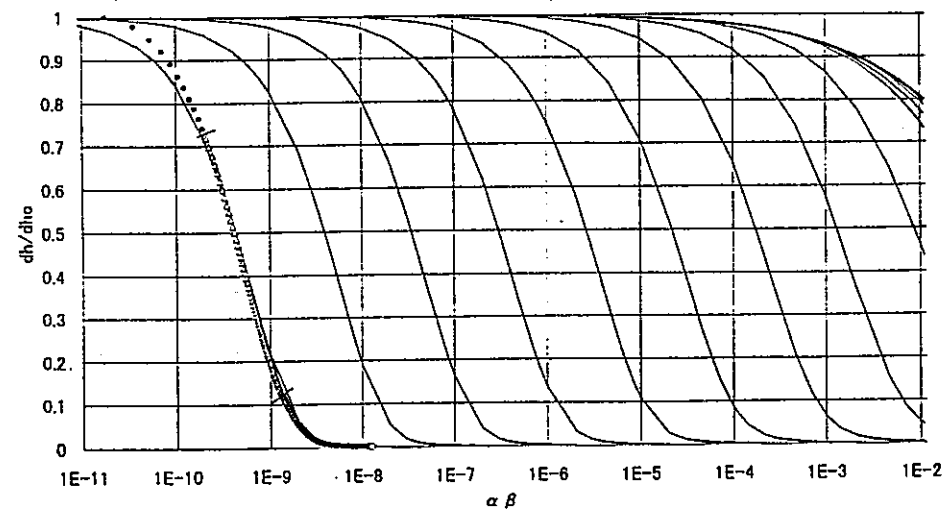
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



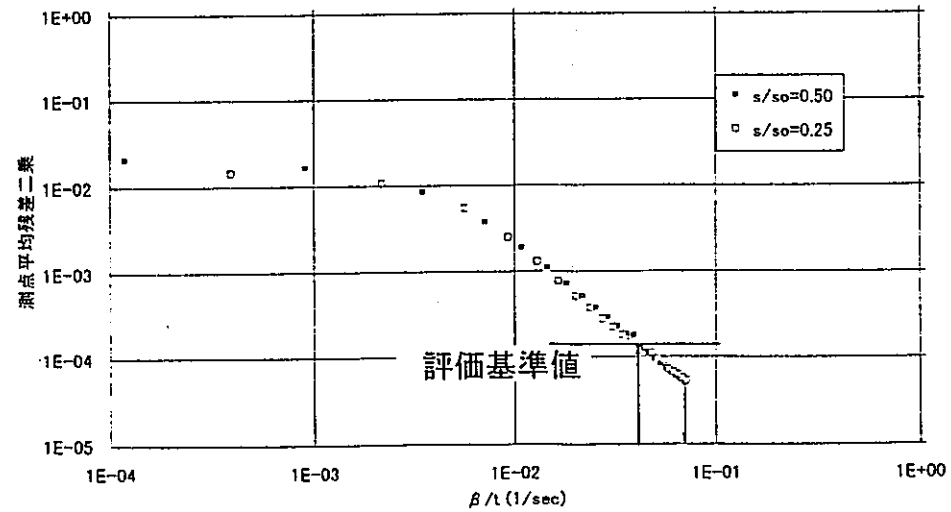
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

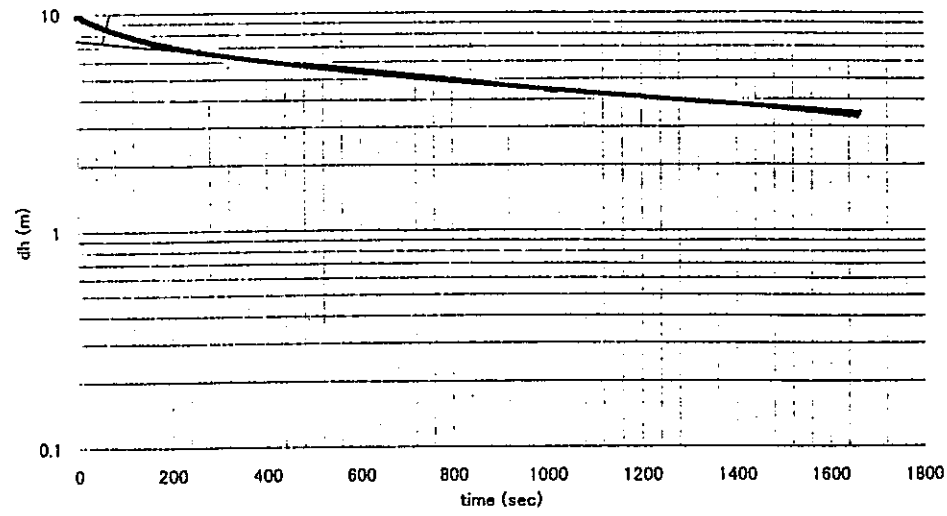


(c) ブドレホフト法による解析方法

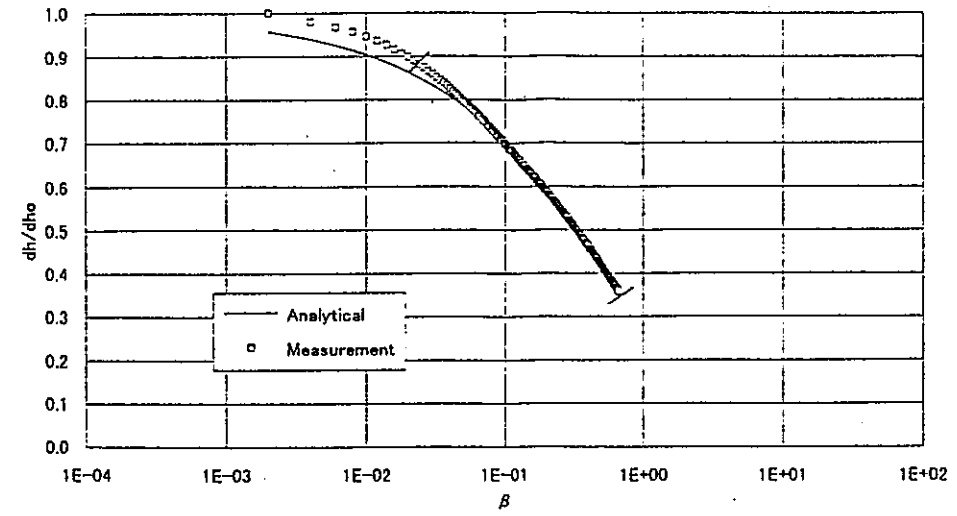


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

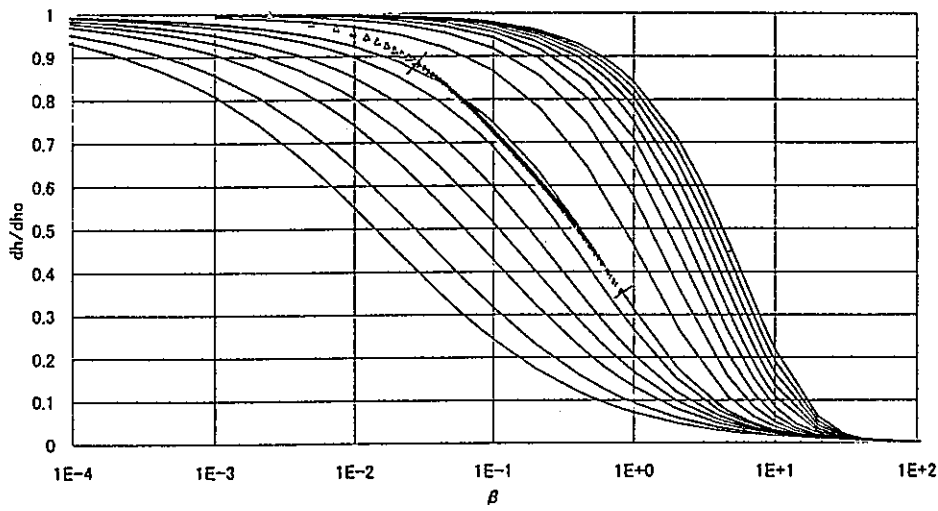
付図-6 解析結果一覧図 (DH2066KA)



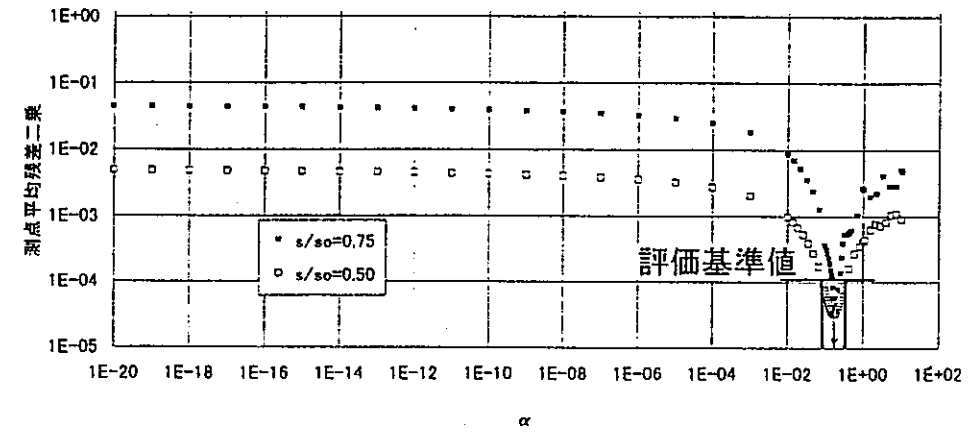
(a) ボシュレフ法による解析方法



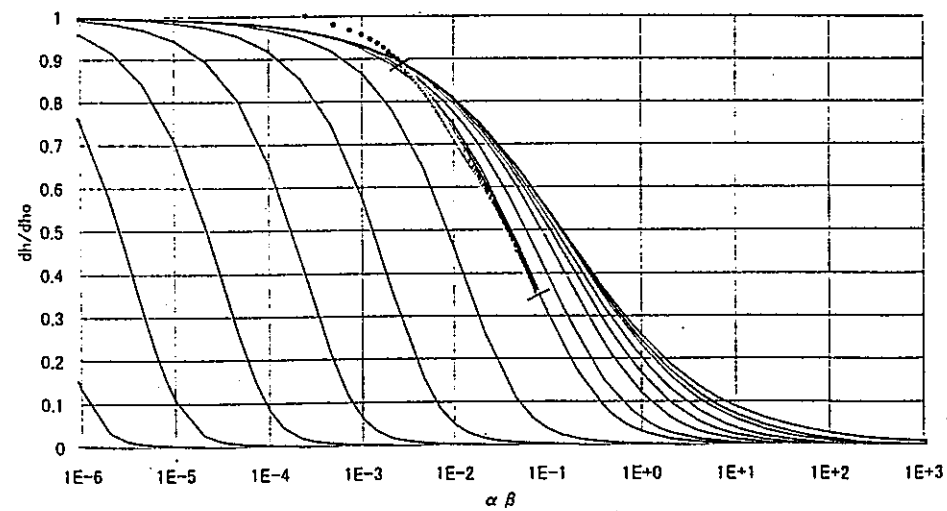
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



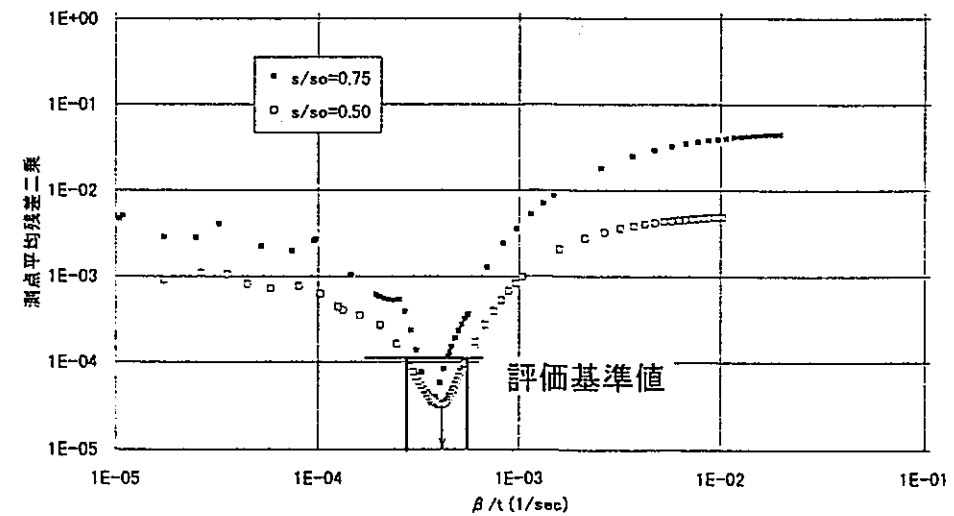
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による $\alpha$ -測点平均残差二乗和

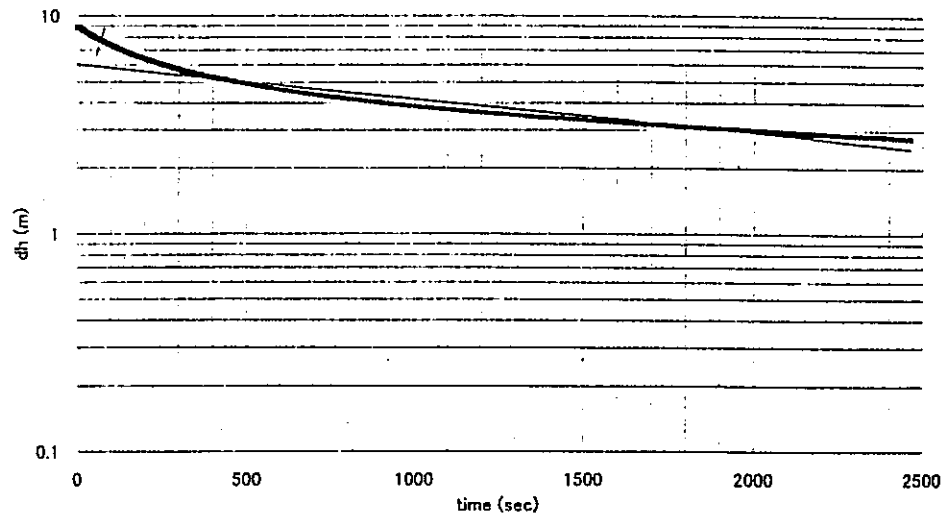


(c) ブドレホフト法による解析方法

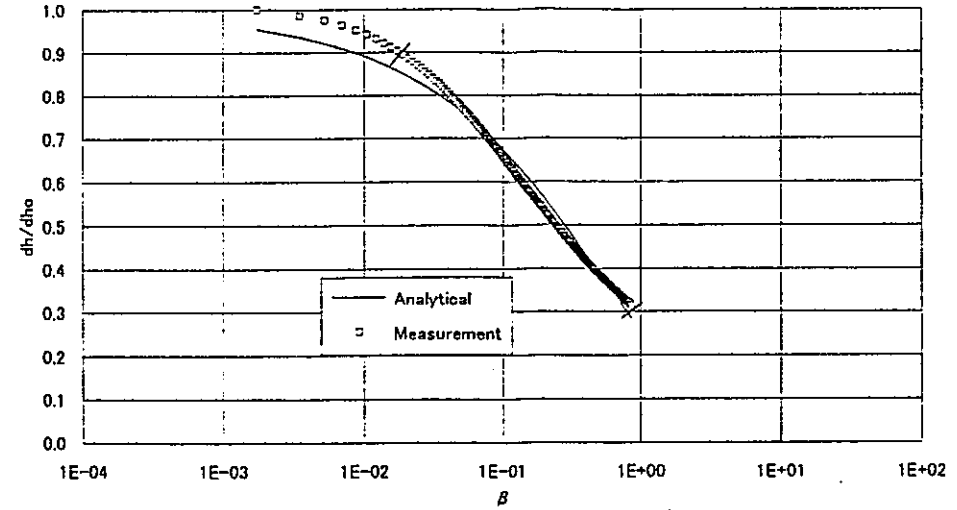


(f) 自動クーパー法による $\beta$ -測点平均残差二乗和

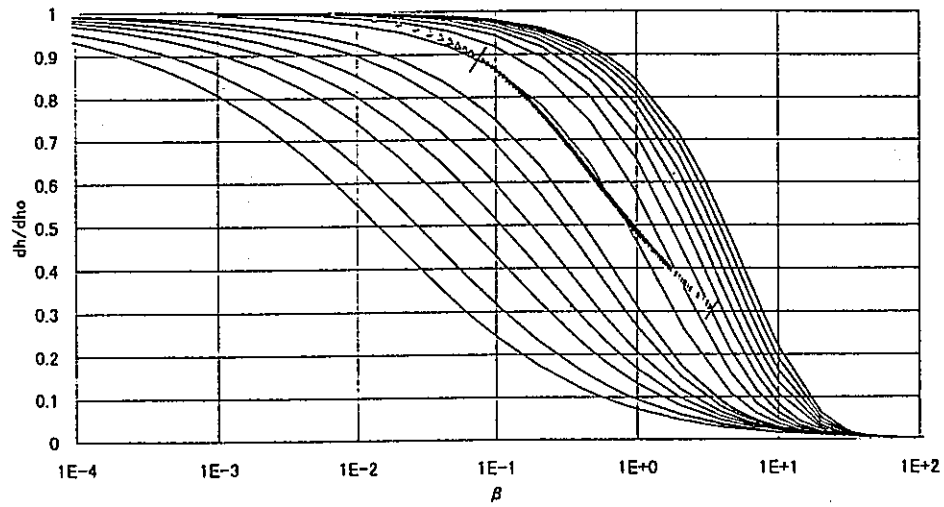
付図-7 解析結果一覧図 (DH2096TA)



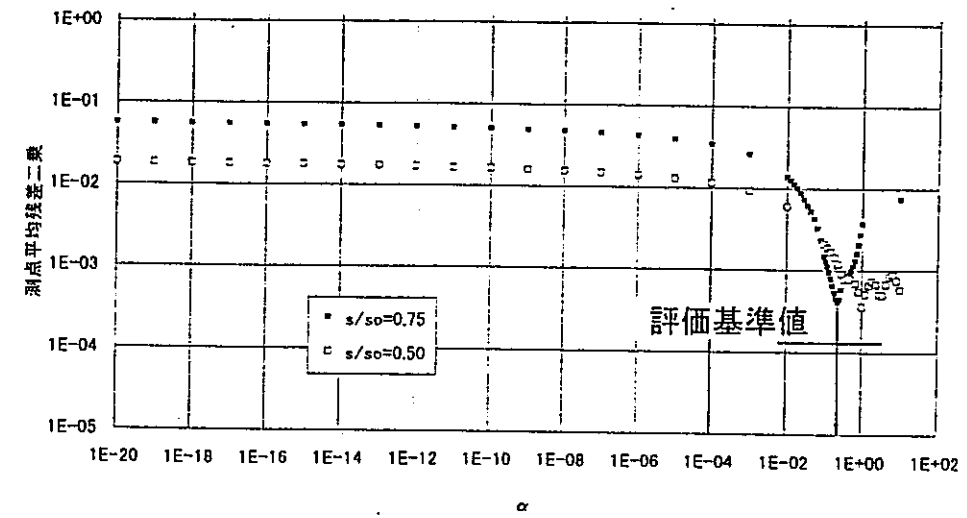
(a) ボシュレフ法による解析方法



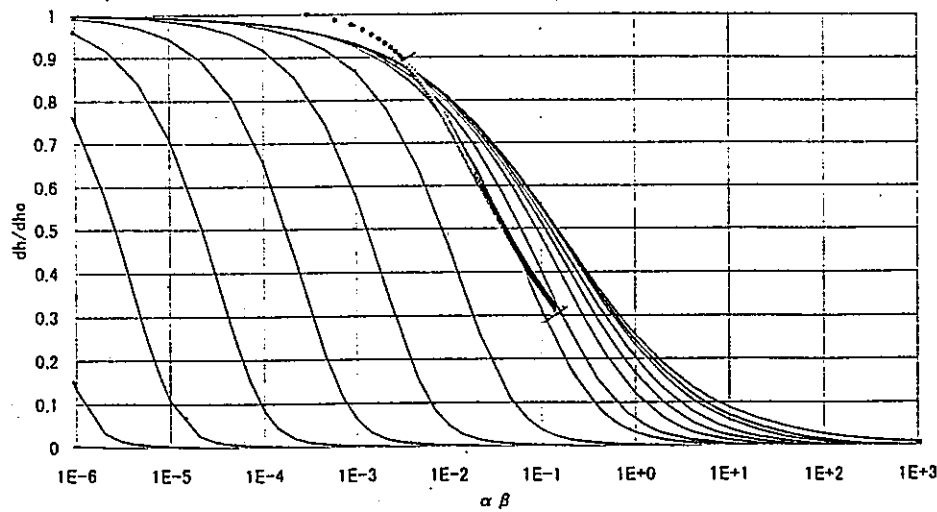
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



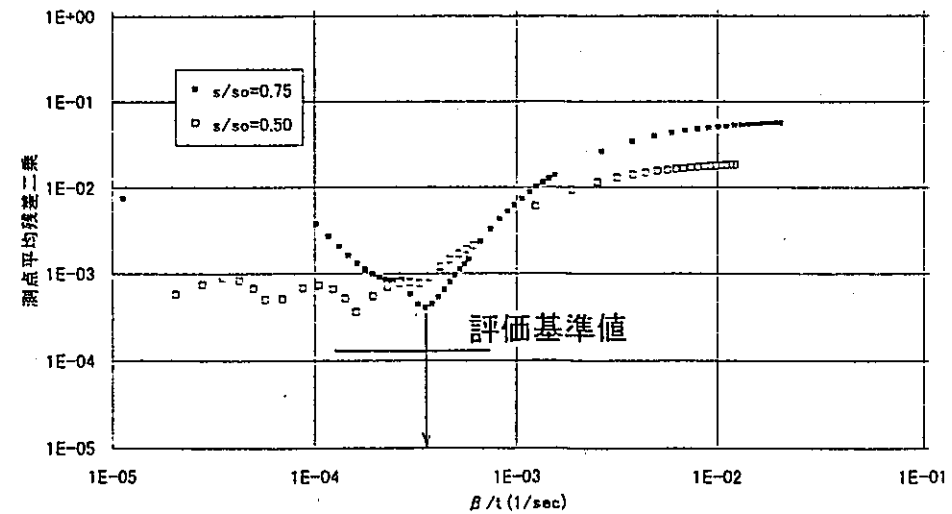
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

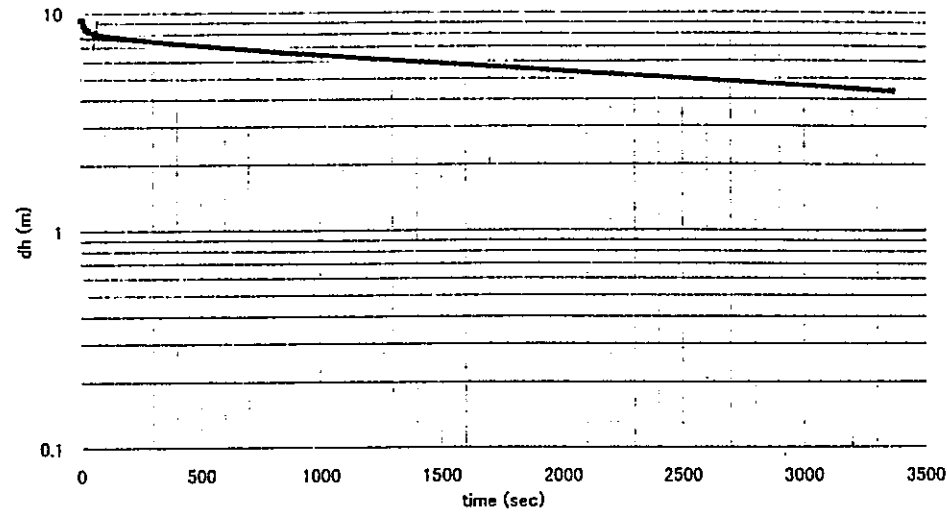


(c) ブドレフト法による解析方法

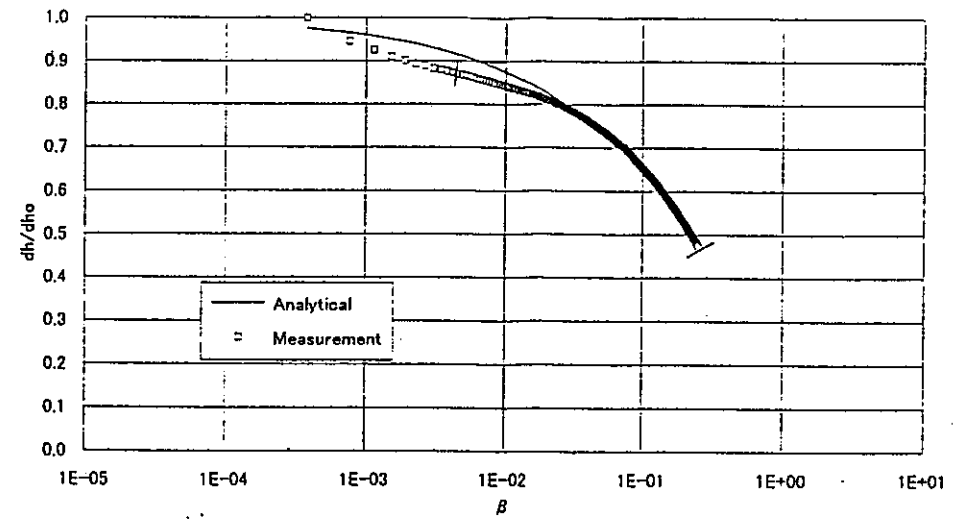


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

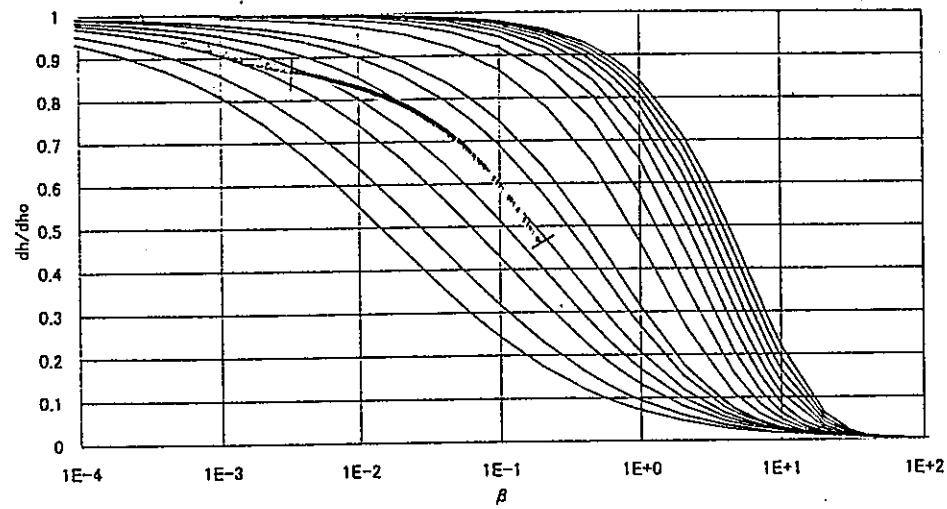
付図-8 解析結果一覧図 (DH2096KA)



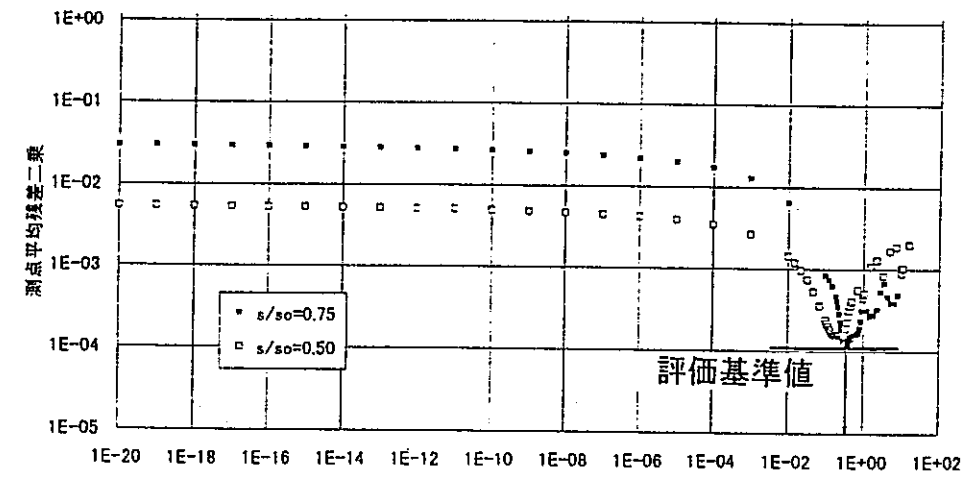
(a) ポシュレフ法による解析方法



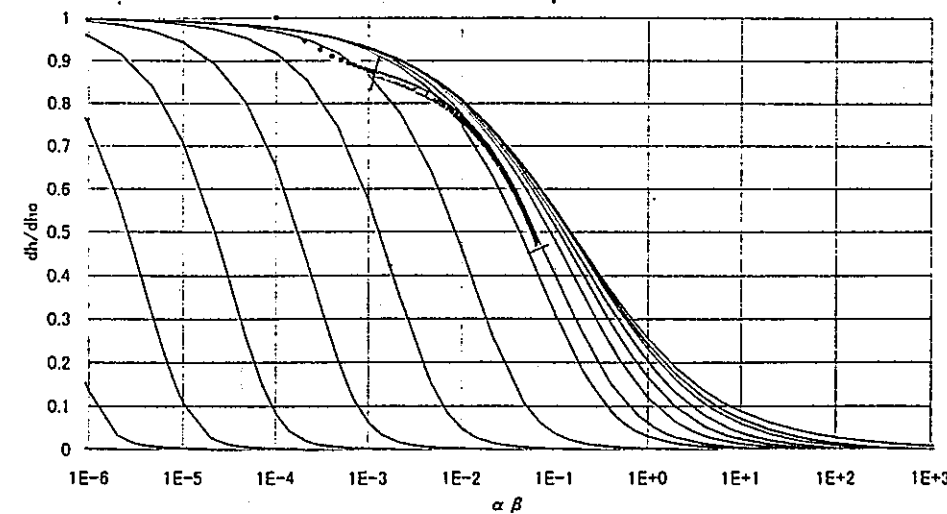
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



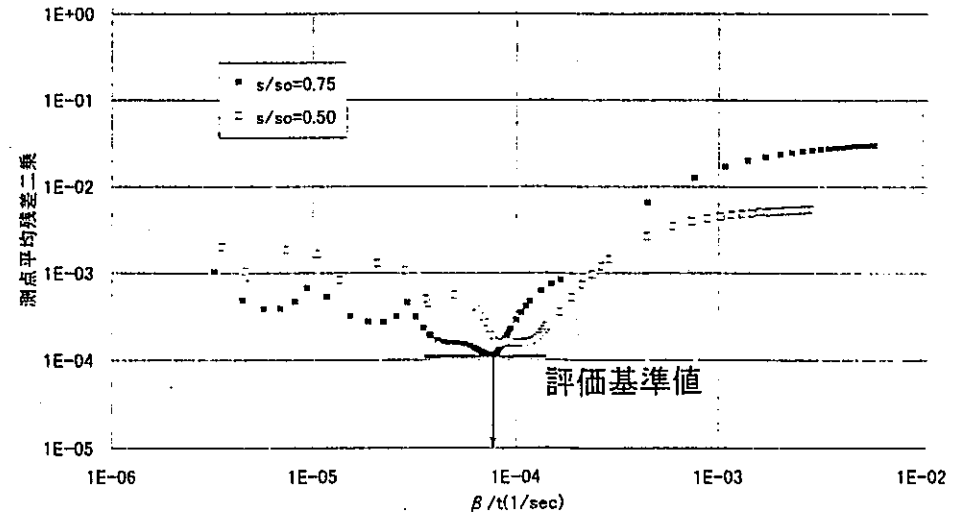
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

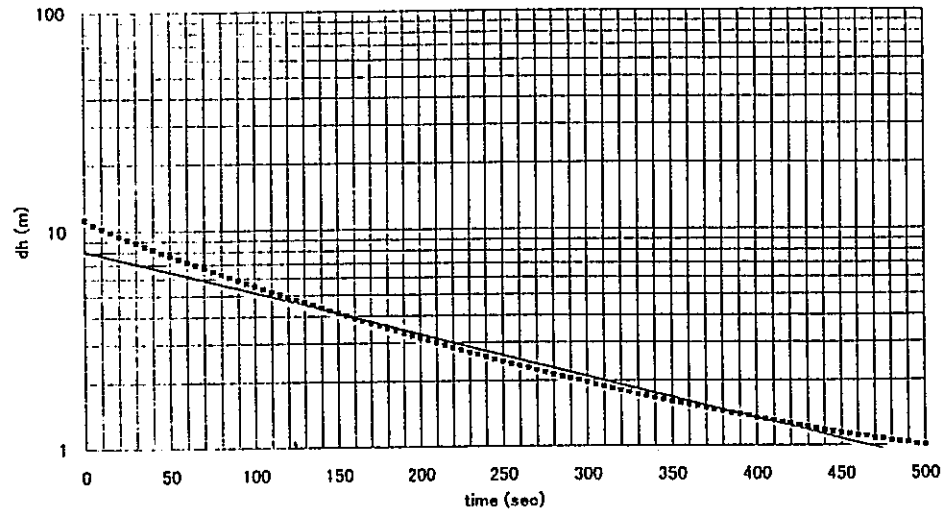


(c) ブドレホフト法による解析方法

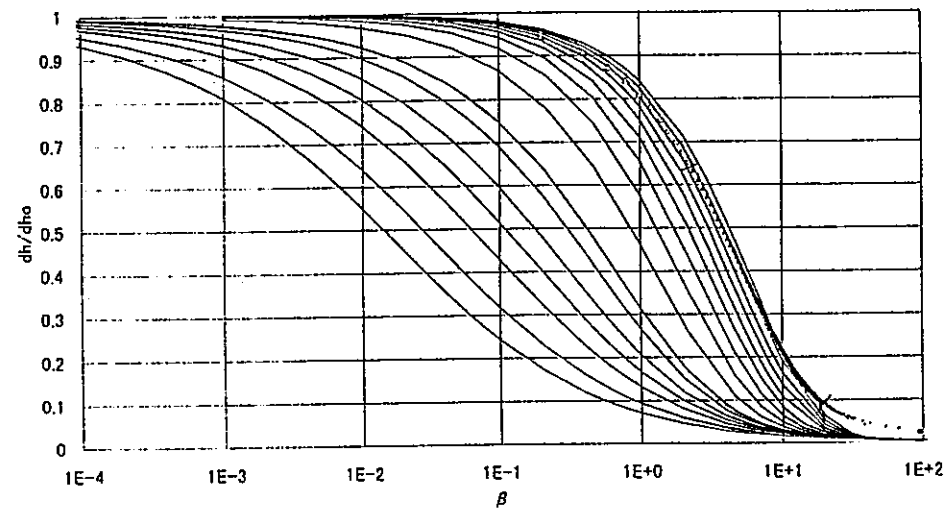


(f) 自動クーパー法による $\beta$  - 測点平均残差二乗和

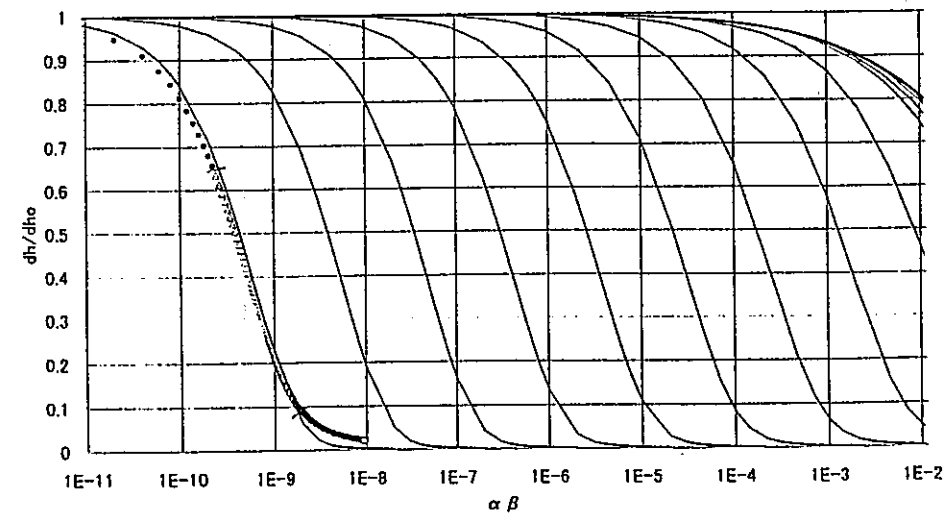
付図-9 解析結果一覧図 (DH2120TA)



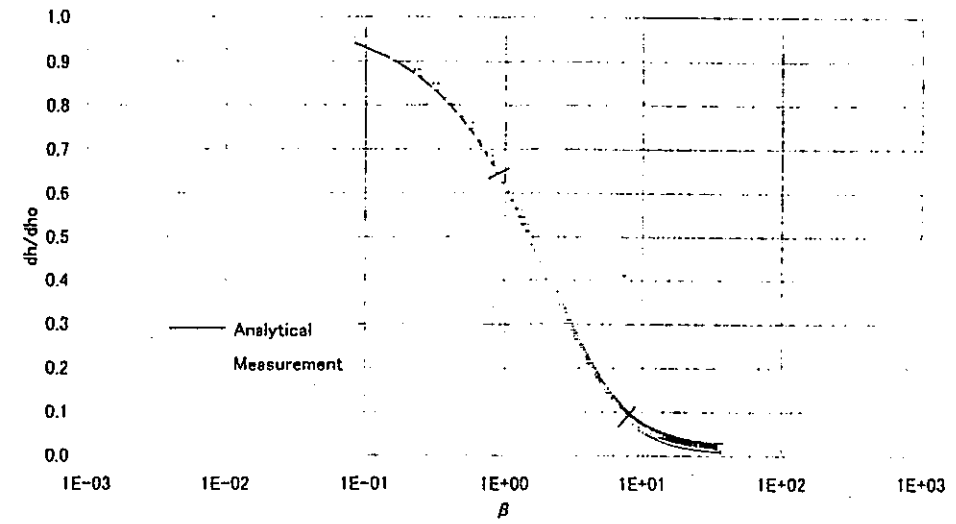
(a) ボシュレフ法による解析方法



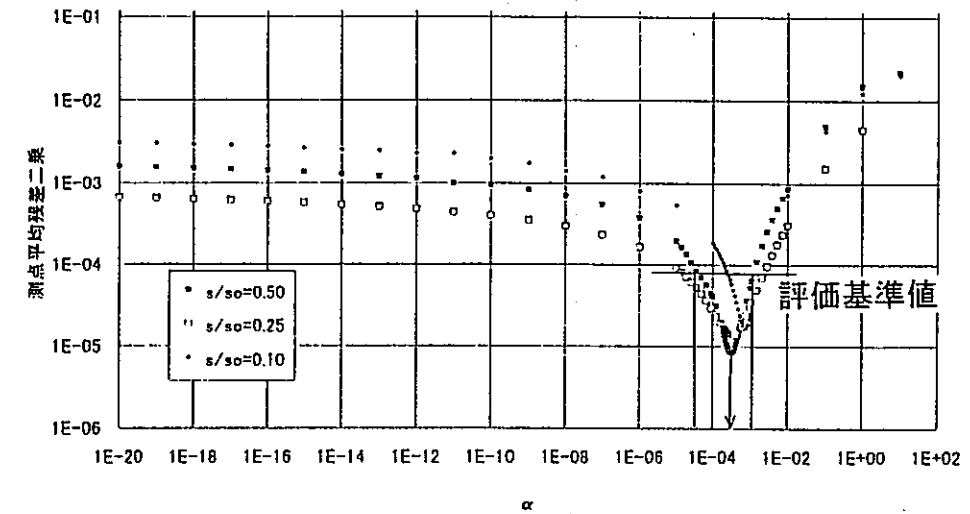
(b) クーパー法による解析方法



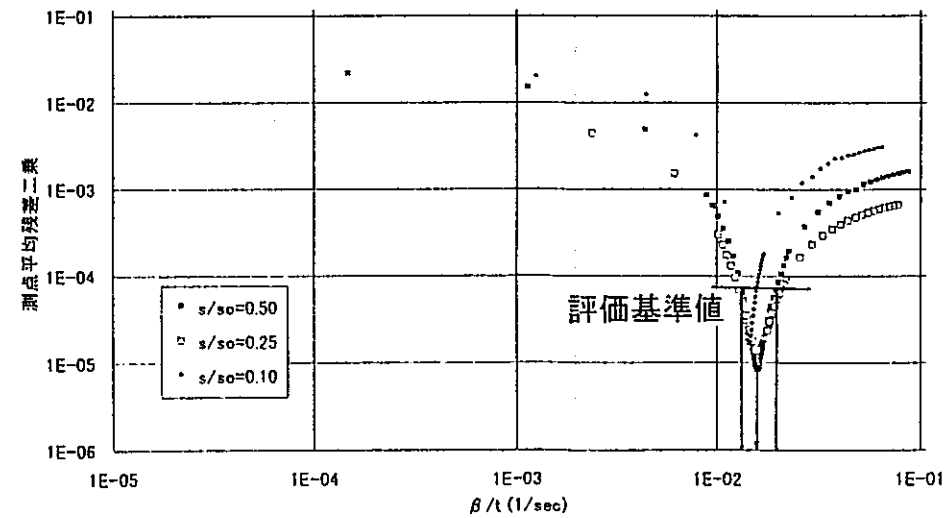
(c) ブドレホフト法による解析方法



(d) 自動クーパー法による最適解析状況



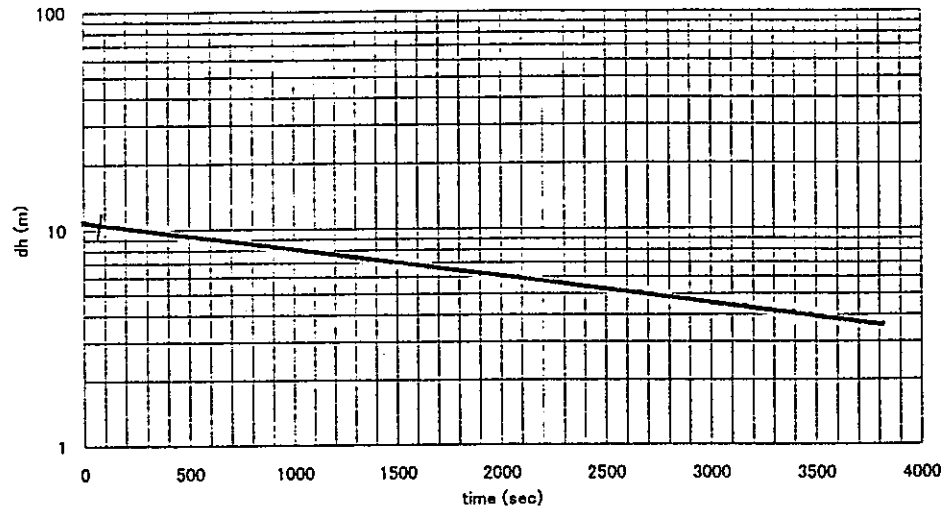
(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和



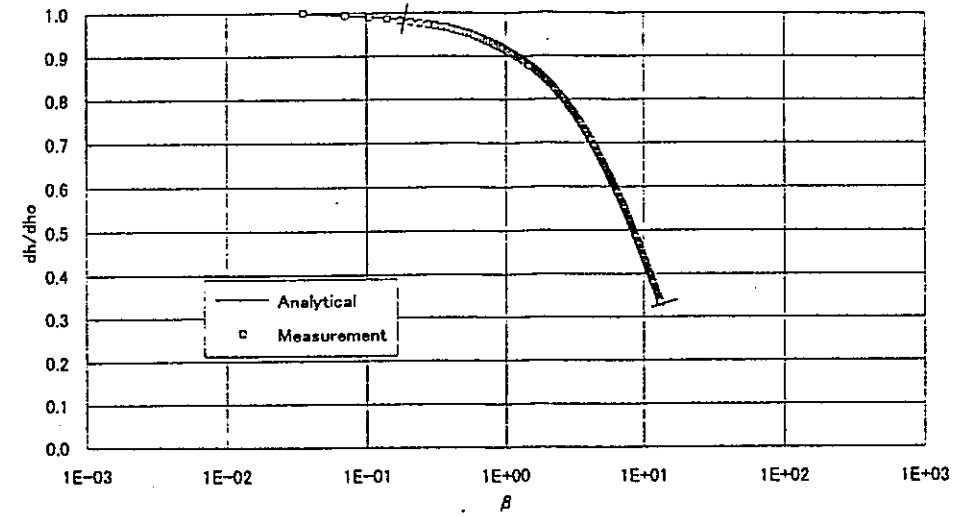
(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

付図-10 解析結果一覧図 (DH2120KA)

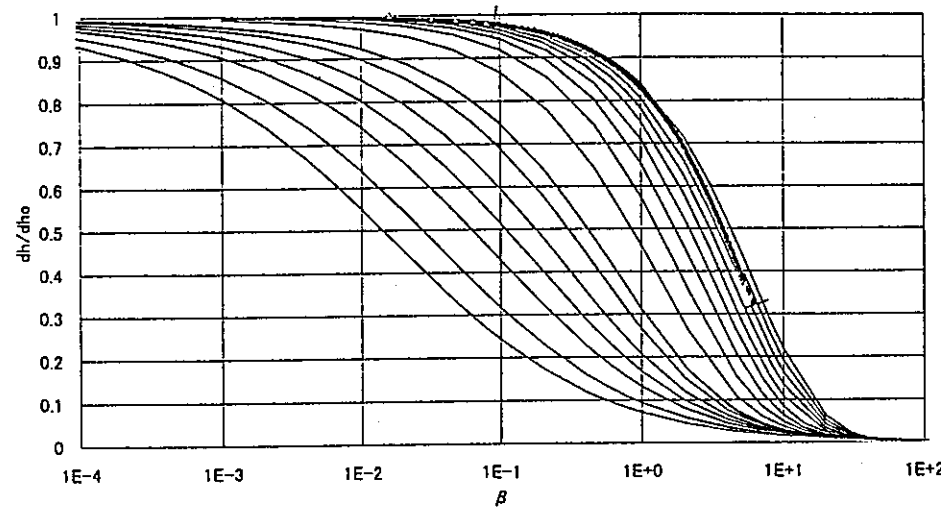




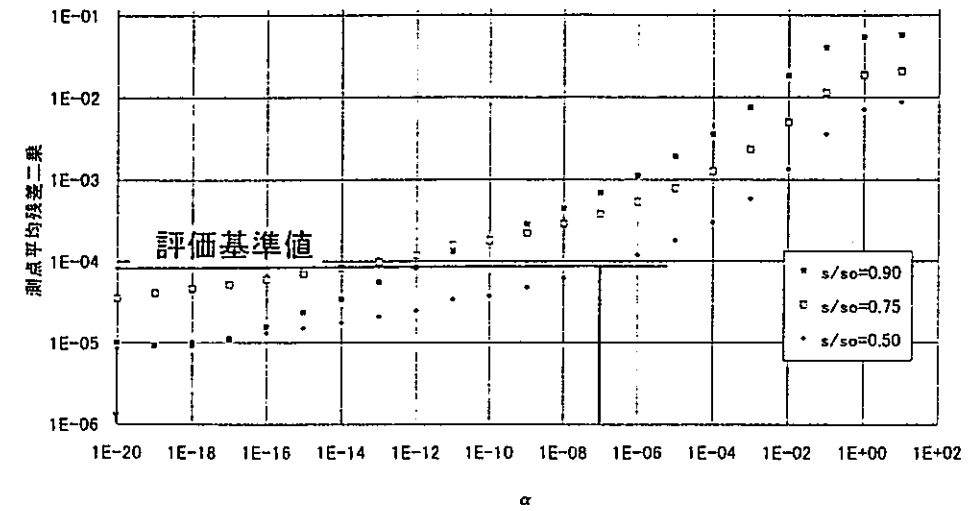
(a) ポシュレフ法による解析方法



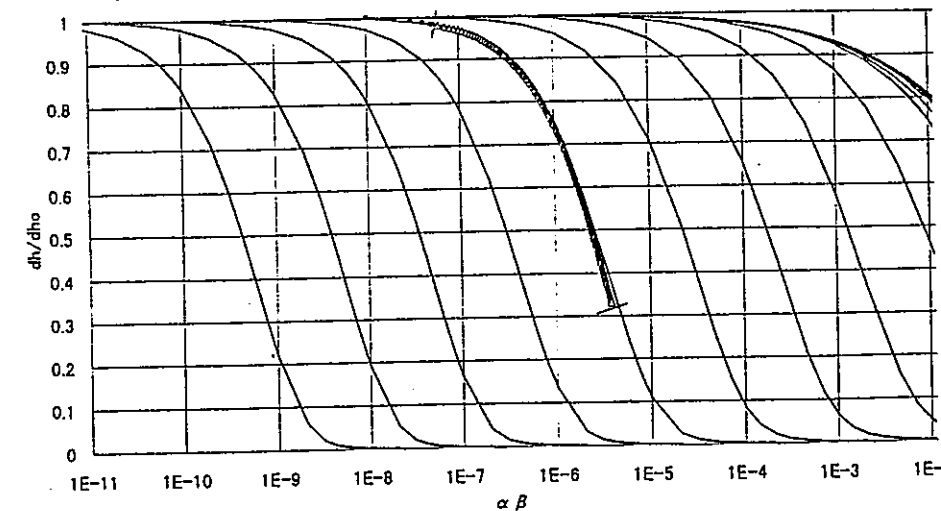
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



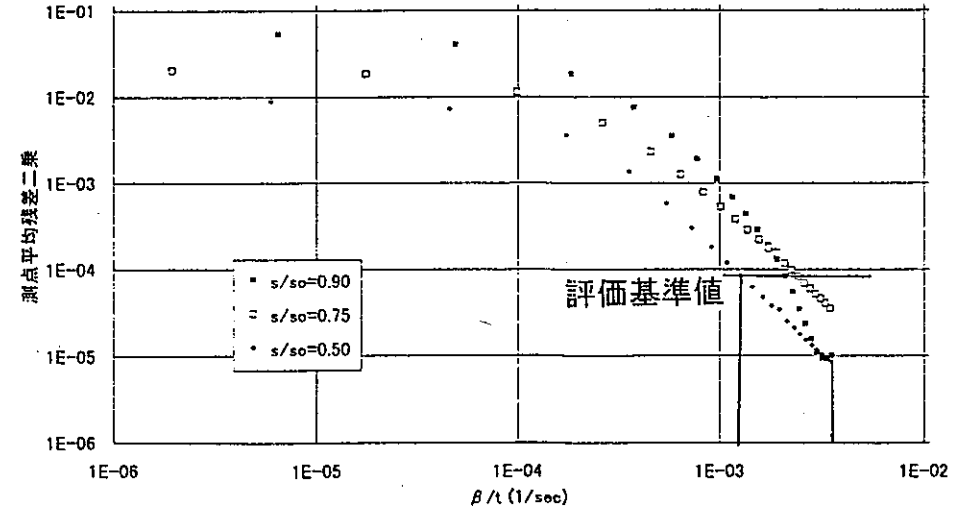
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

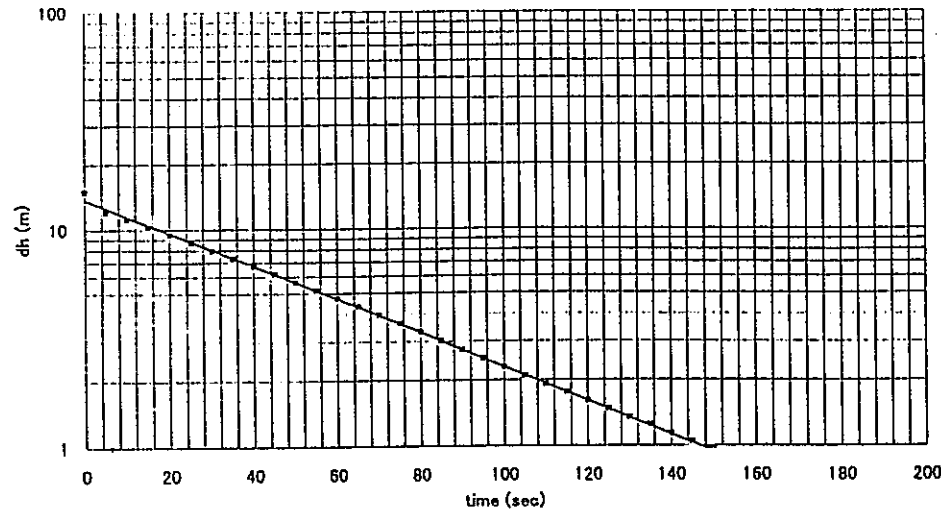


(c) ブドレホフト法による解析方法

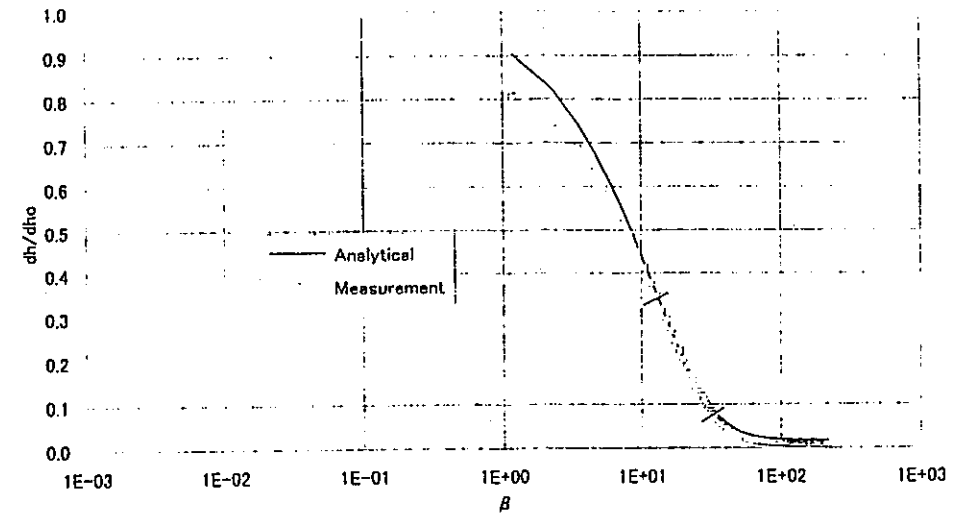


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

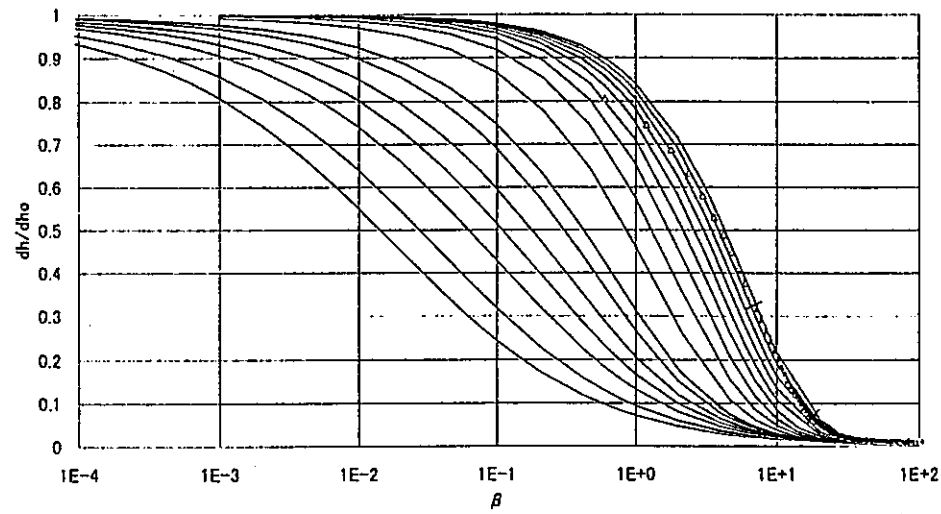
付図-11 解析結果一覧図 (DH2131TB)



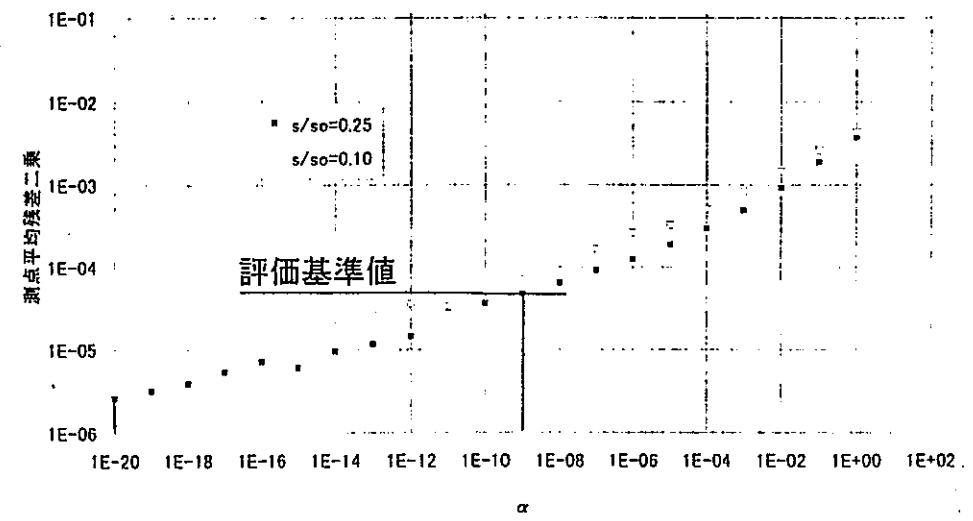
(a) ボシュレフ法による解析方法



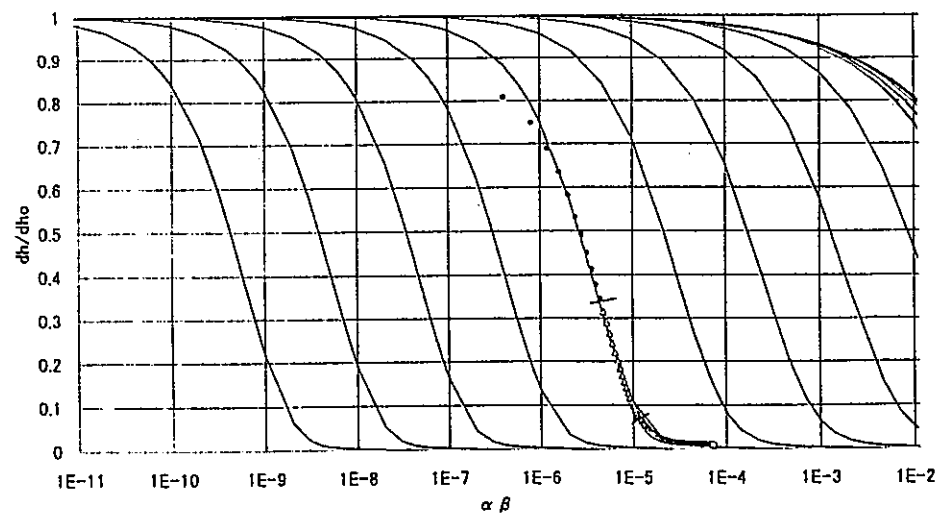
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



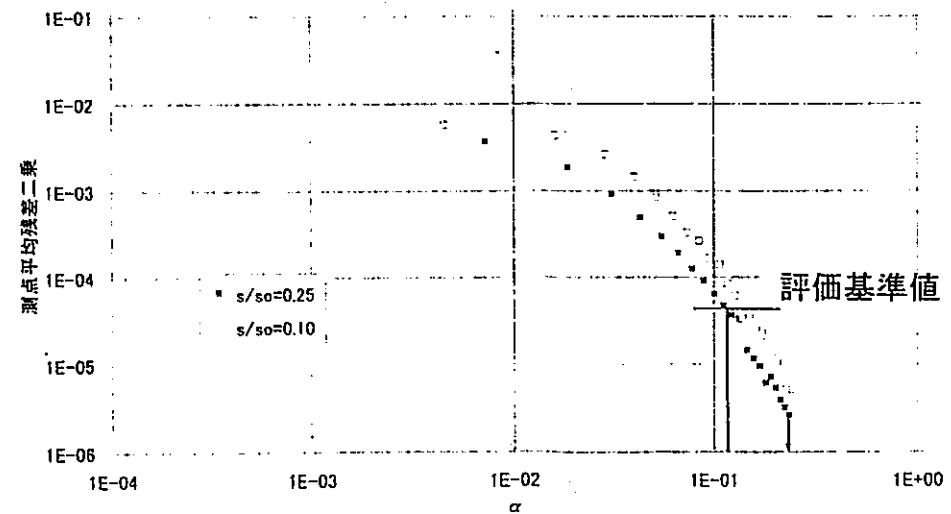
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

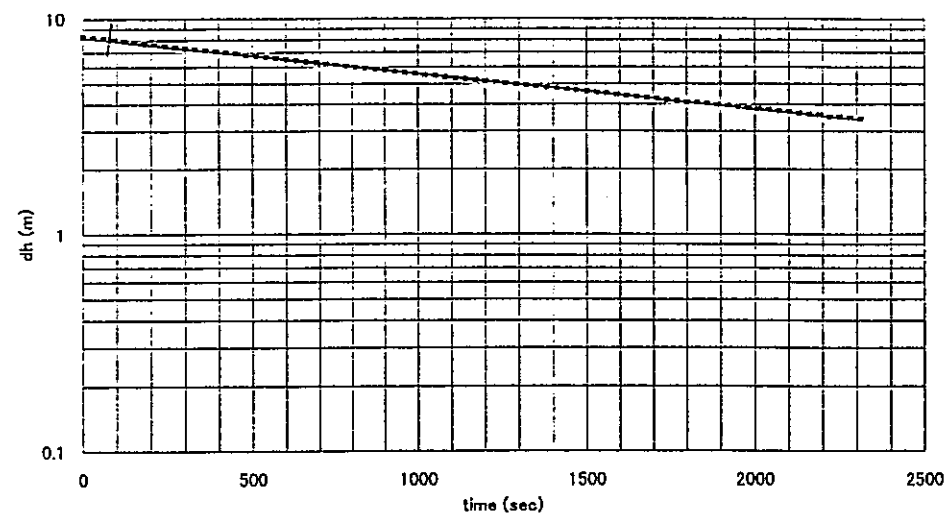


(c) ブドレホフト法による解析方法

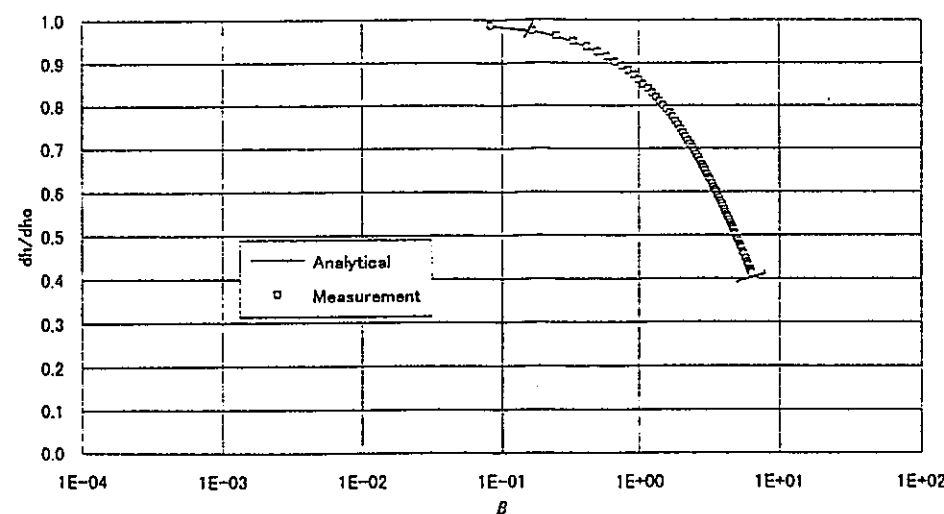


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

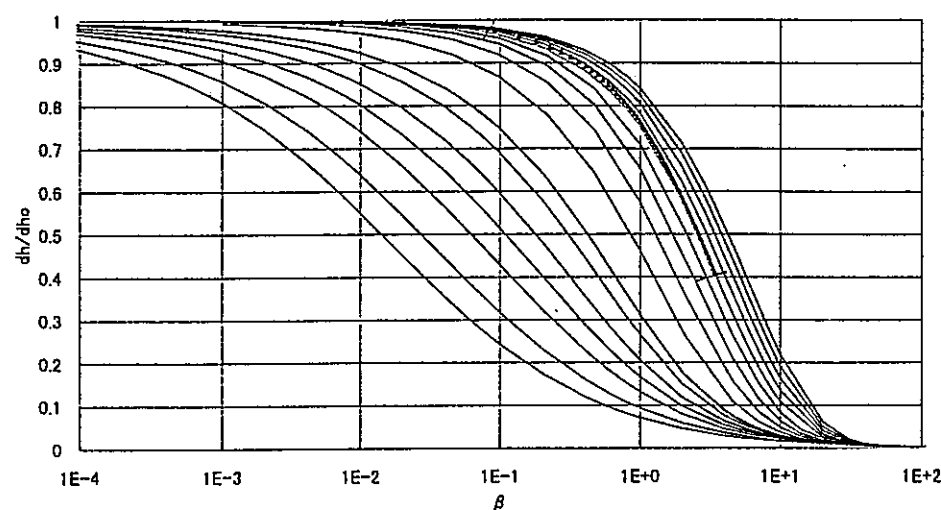
付図-12 解析結果一覧図 (DH2131KA)



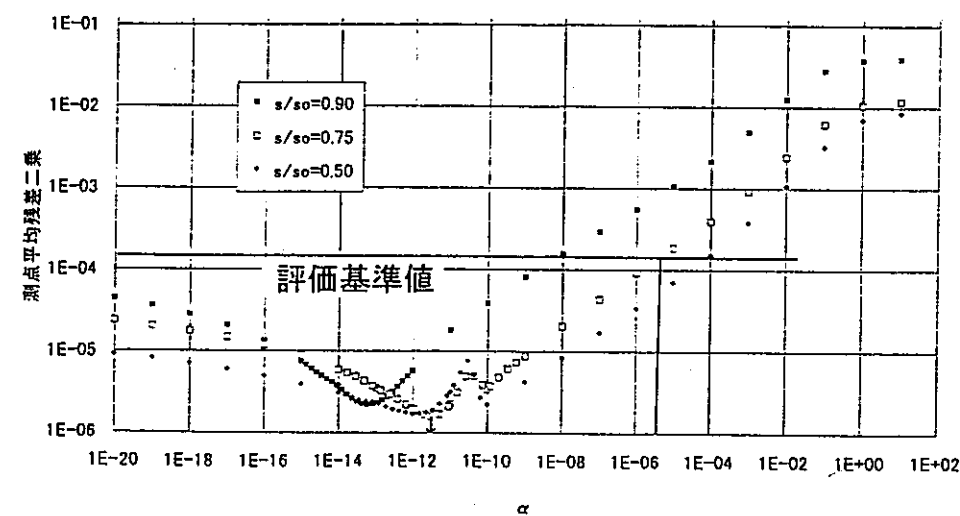
(a) ポシュレフ法による解析方法



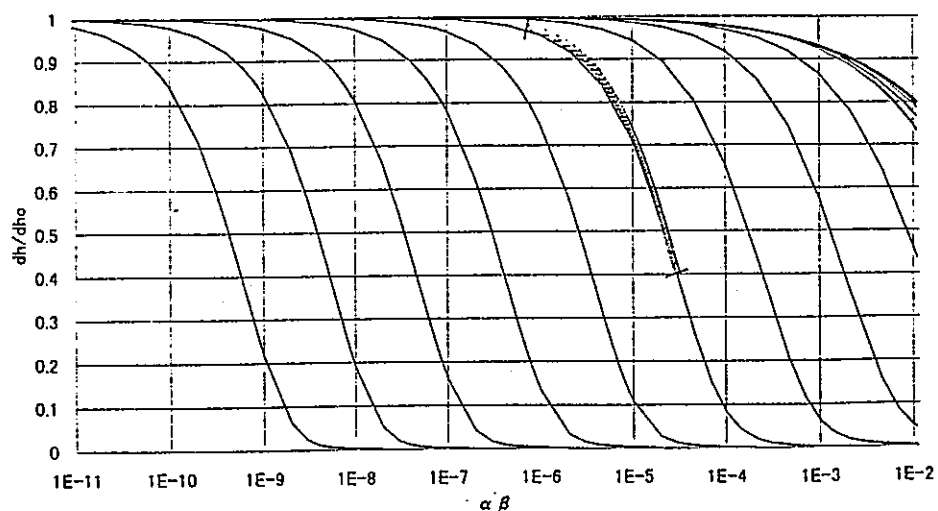
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



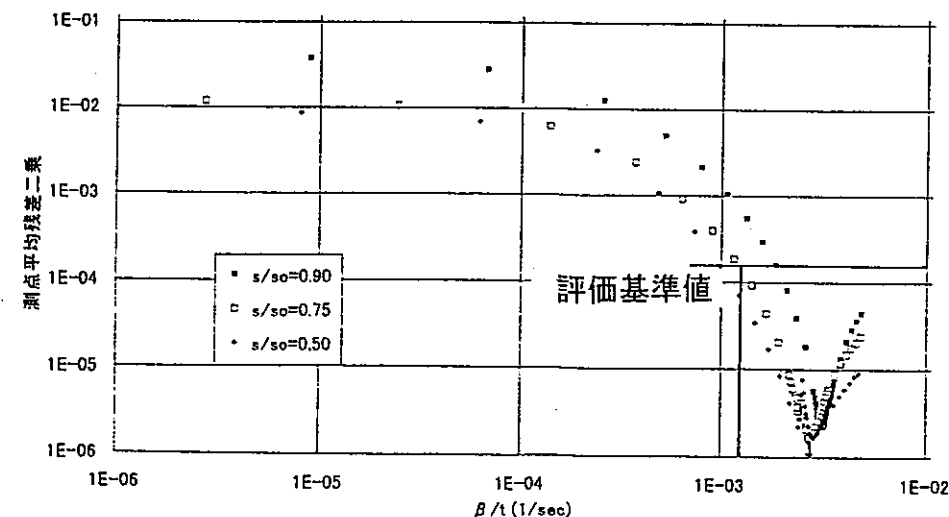
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

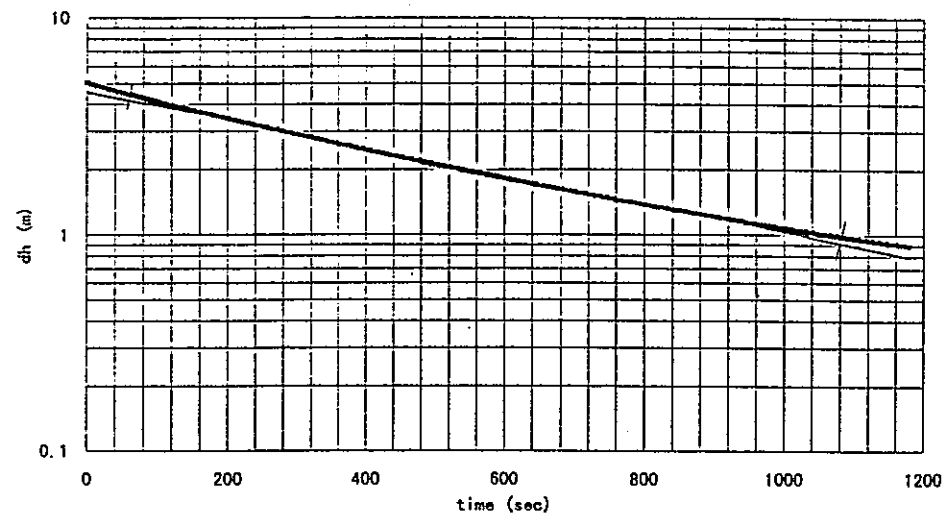


(c) ブドレホフト法による解析方法

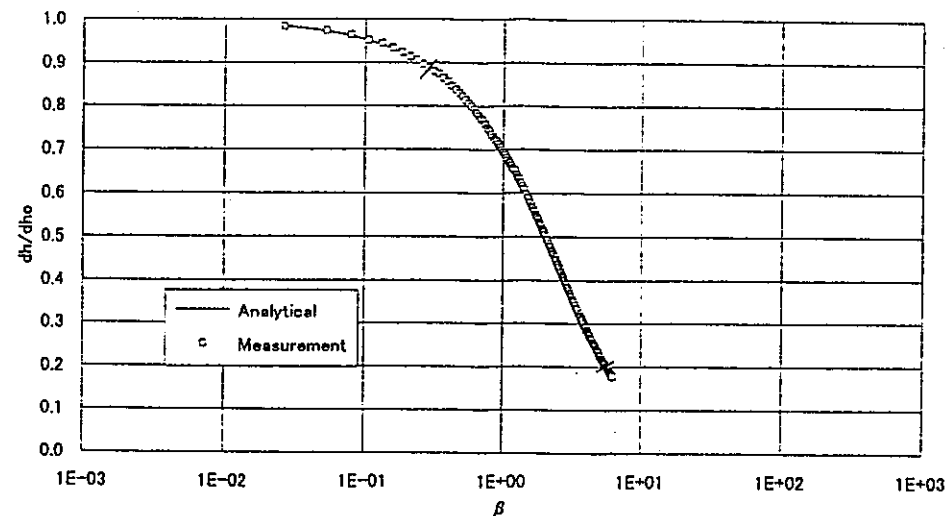


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

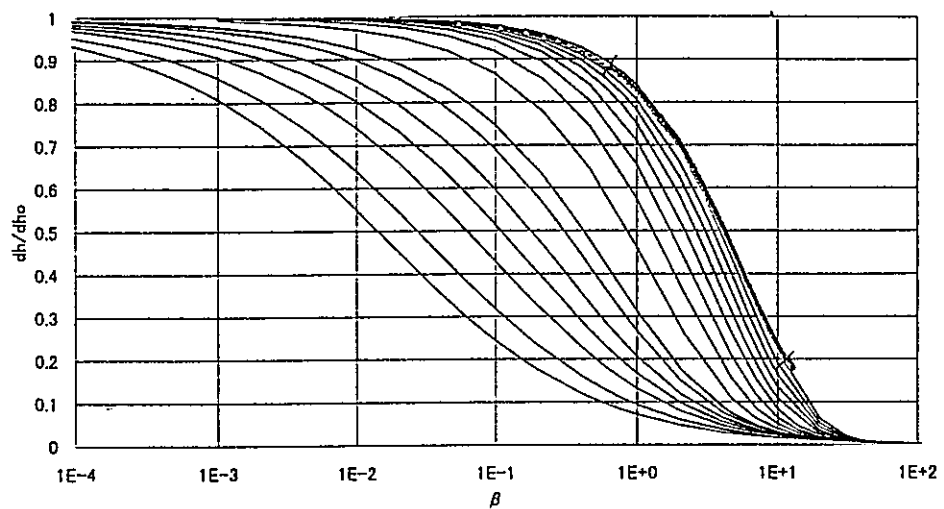
付図-13 解析結果一覧図 (DH2160TB)



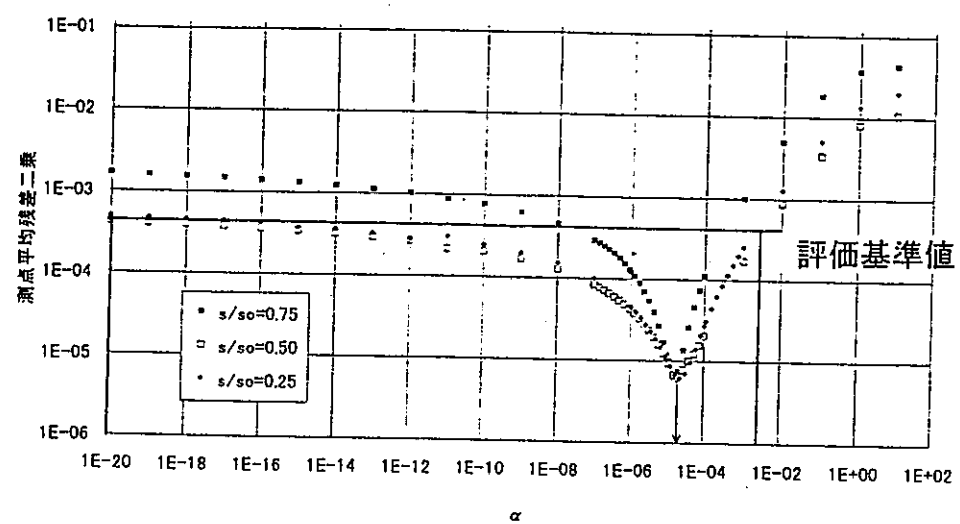
(a) ポシュレフ法による解析方法



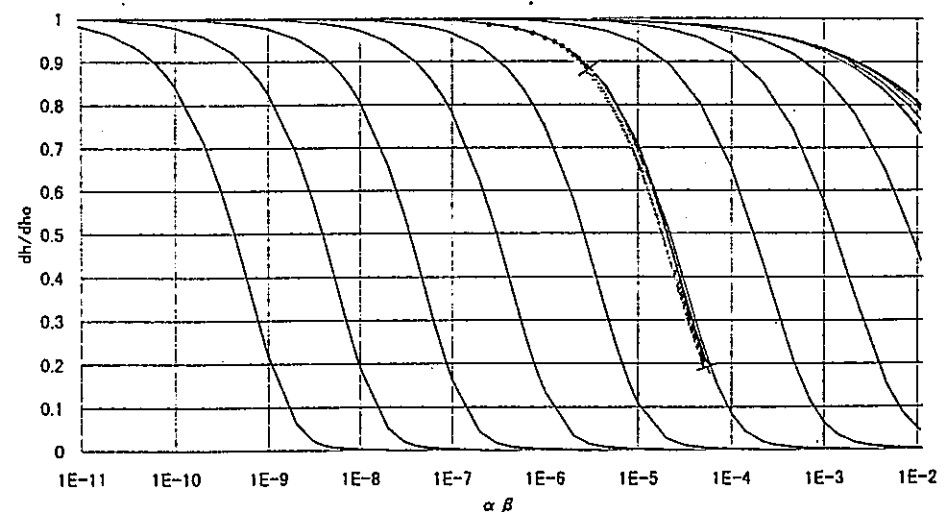
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



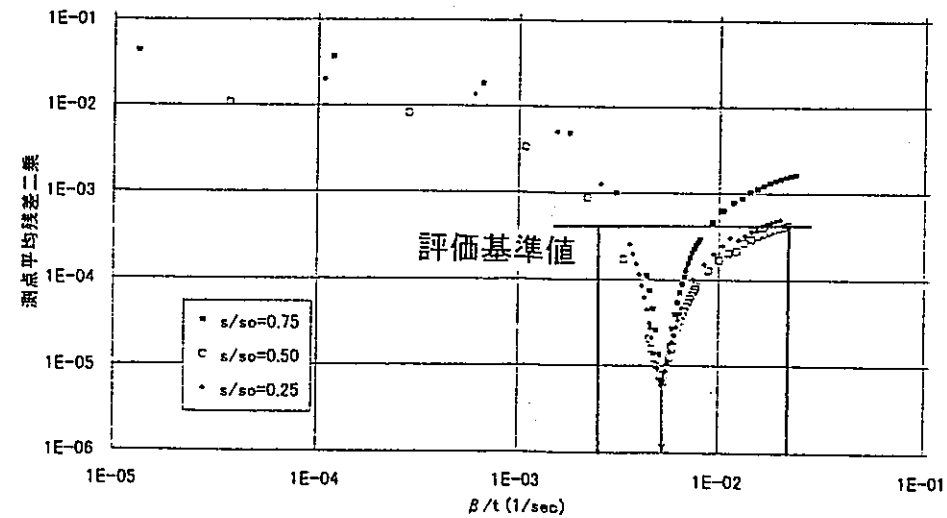
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

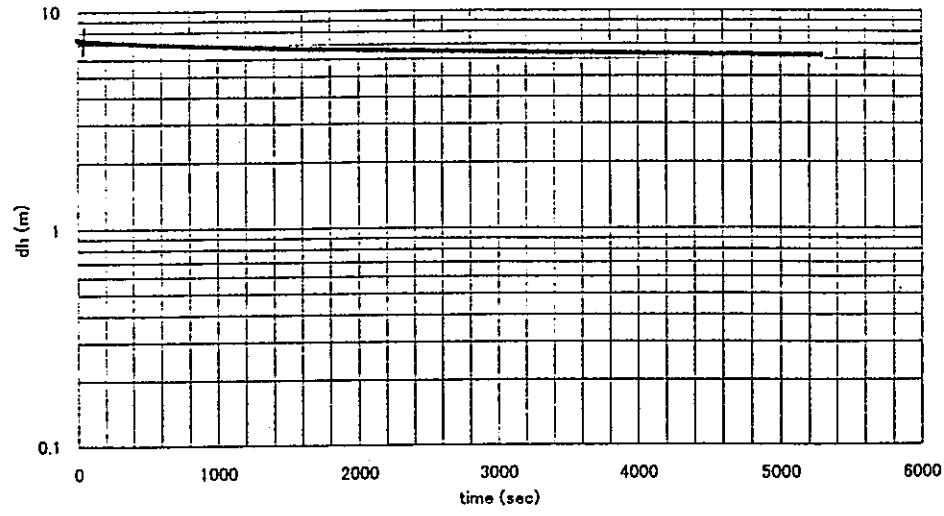


(c) ブドレホフト法による解析方法

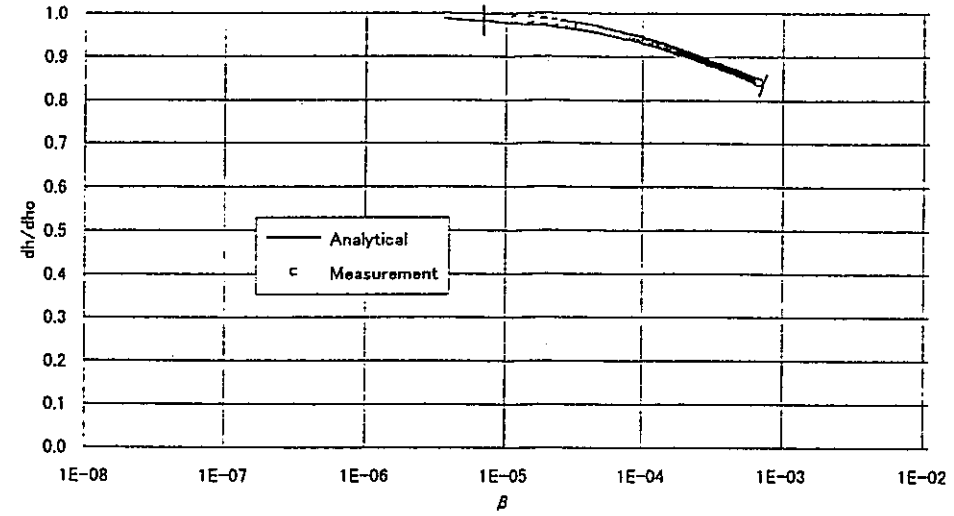


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

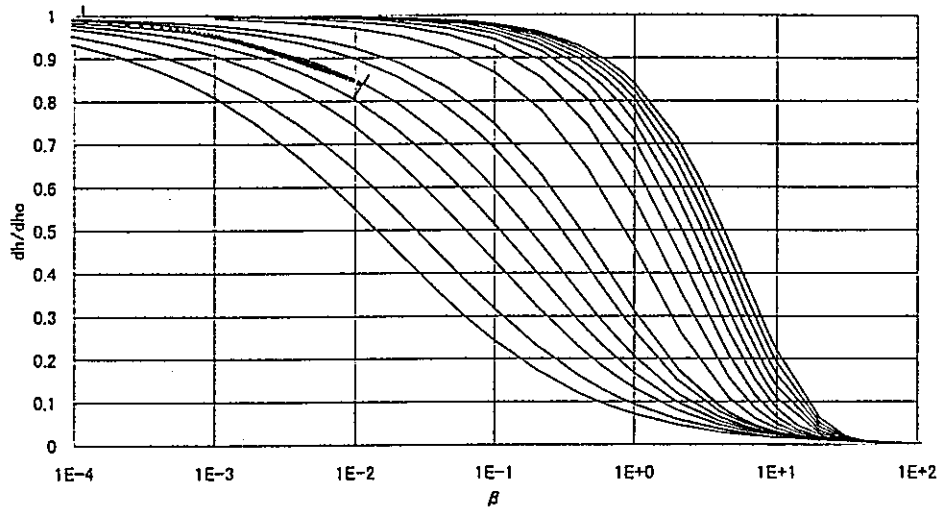
付図-14 解析結果一覧図 (DH2160KB)



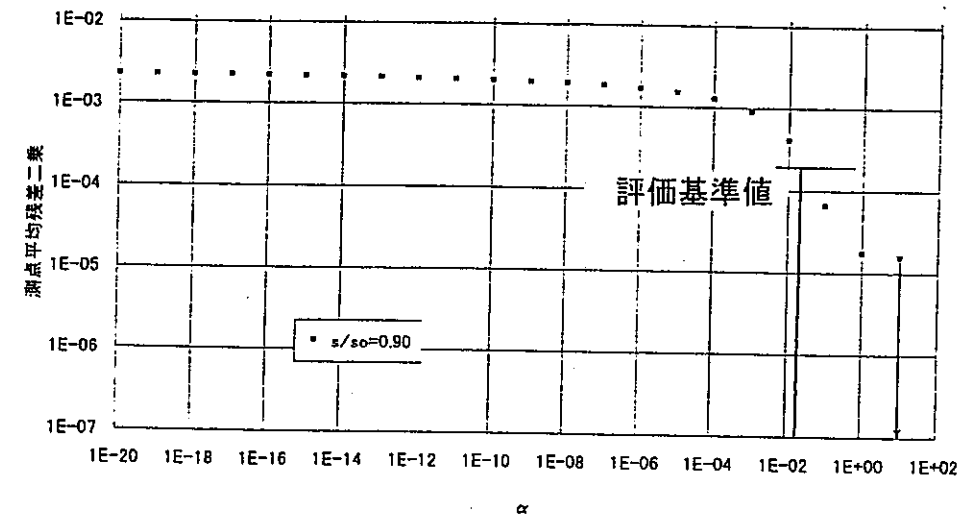
(a) ポシュレフ法による解析方法



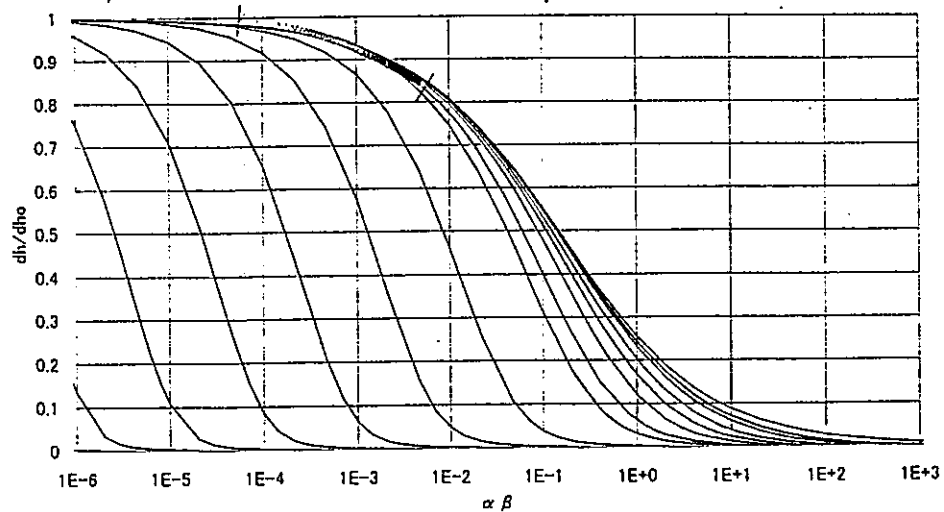
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



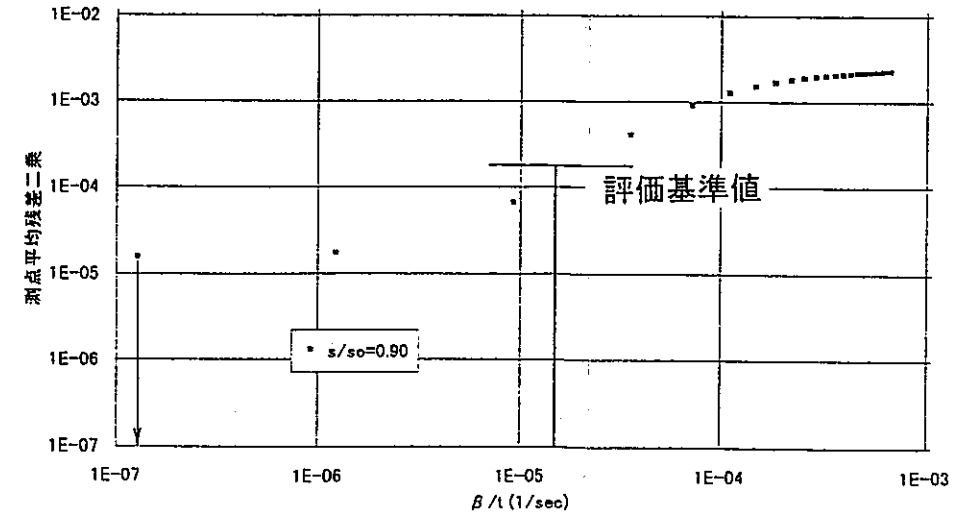
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

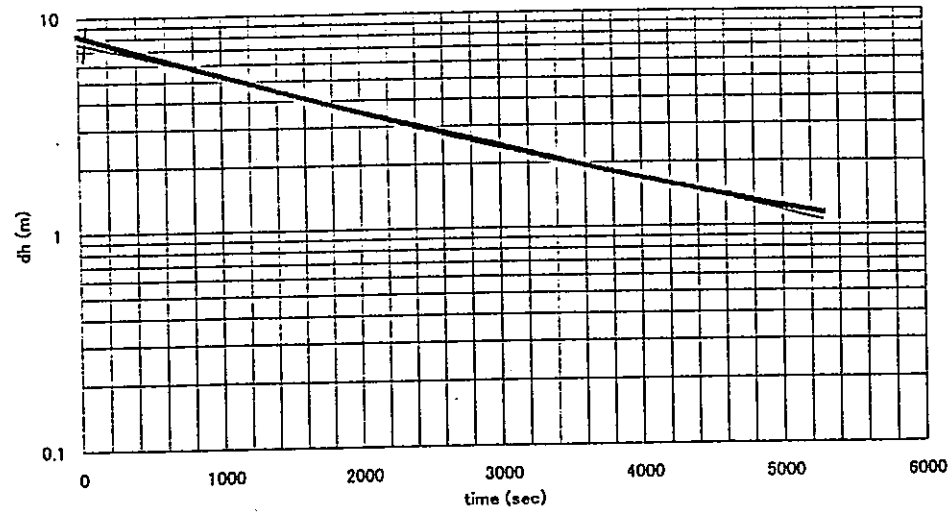


(c) ブドレホフト法による解析方法

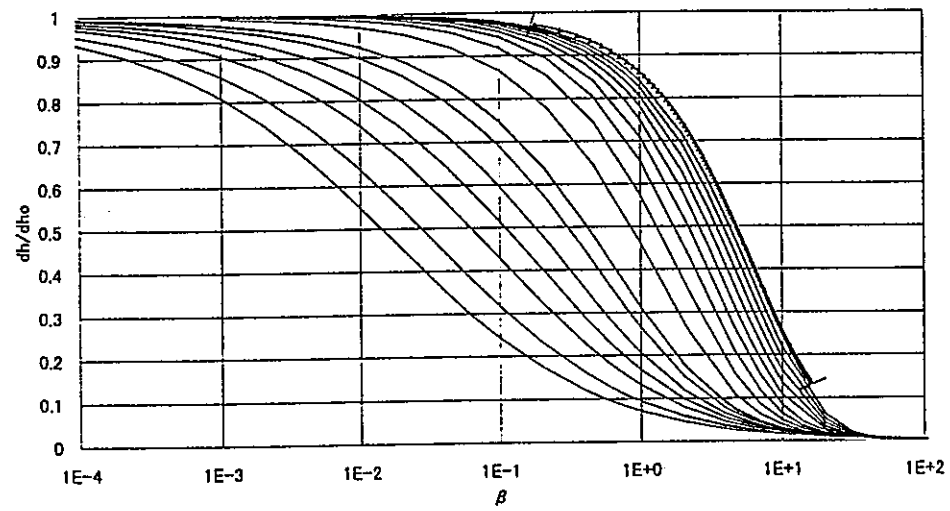


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

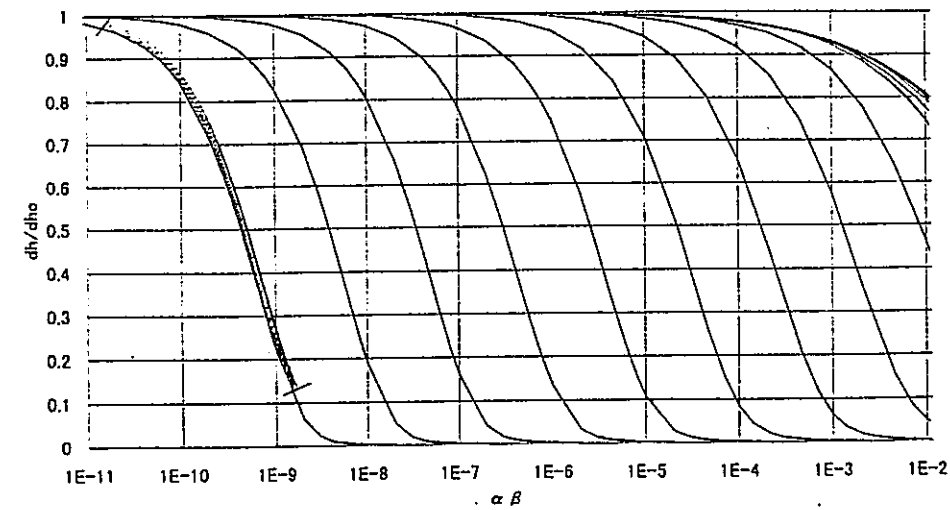
付図-15 解析結果一覧図 (SN6060CA)



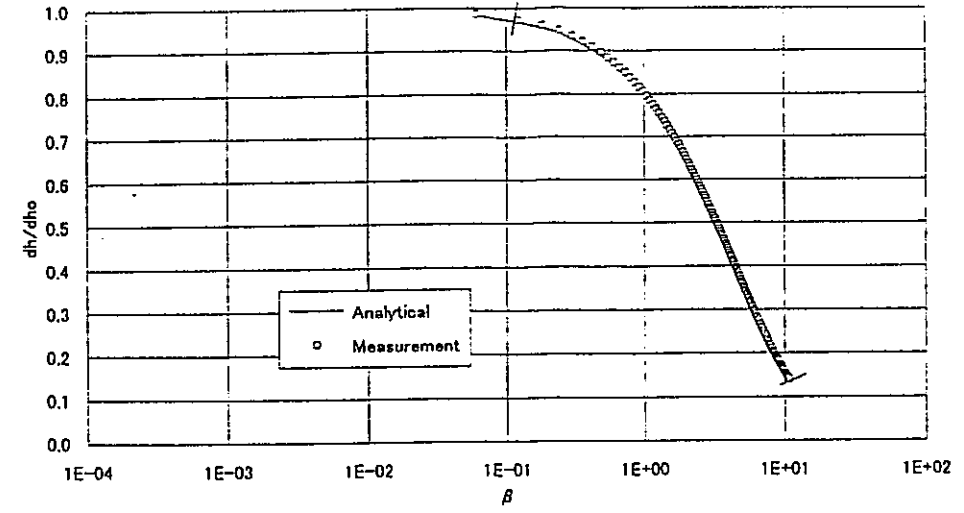
(a) ポシュレフ法による解析方法



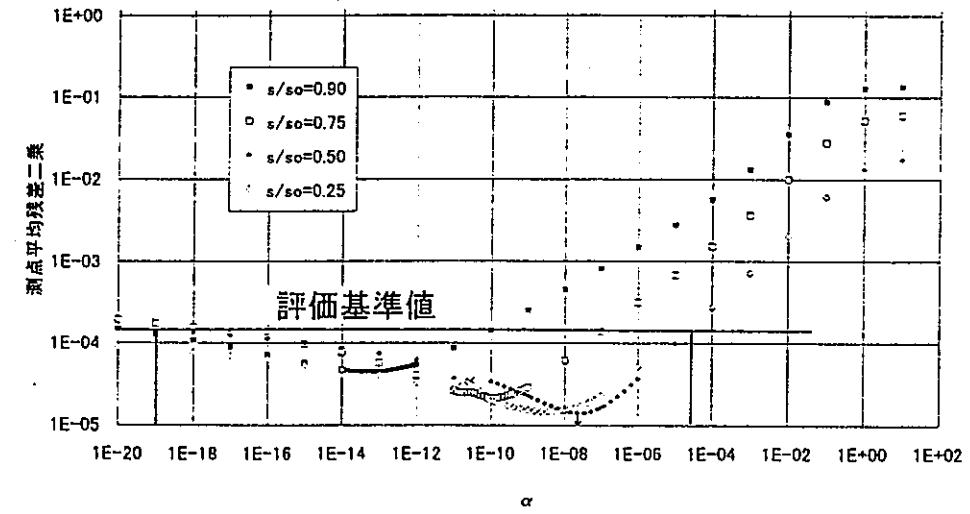
(b) クーパー法による解析方法



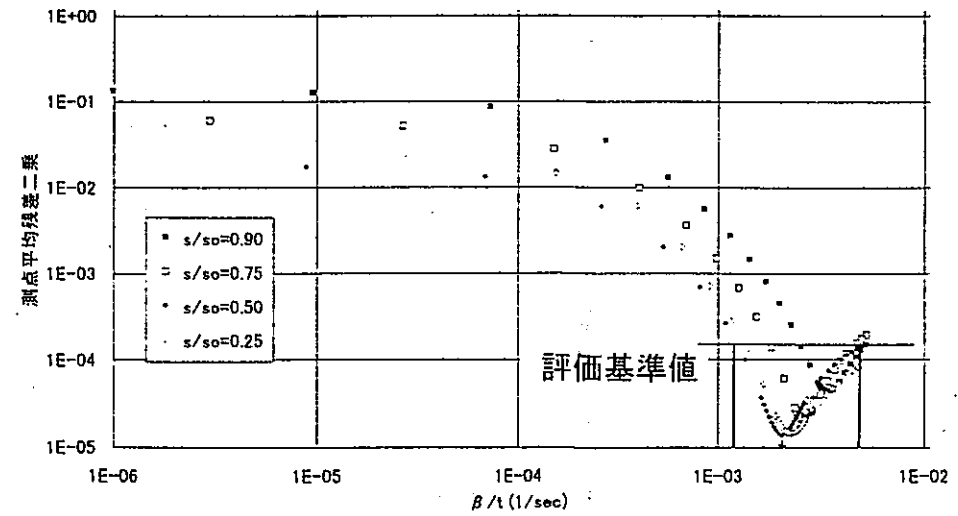
(c) ブドレホフト法による解析方法



(d) 自動クーパー法による最適解析状況

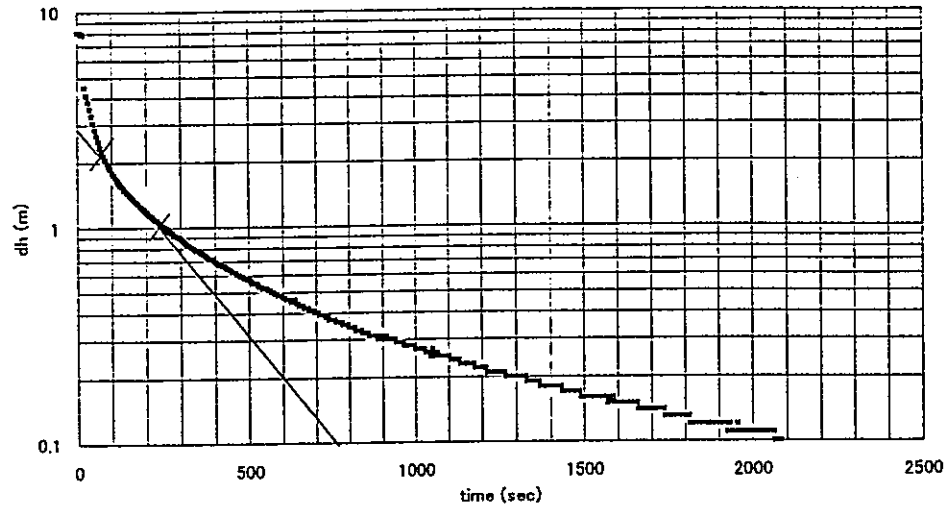


(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

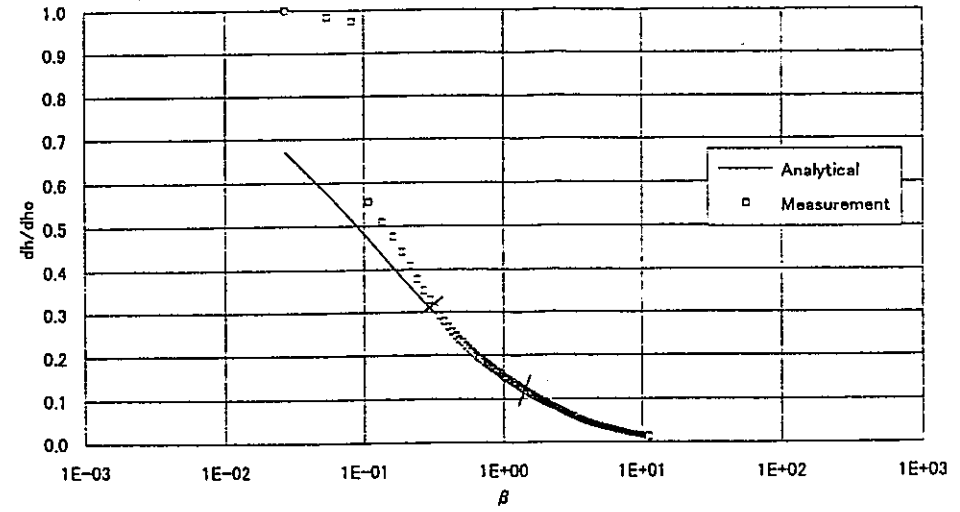


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

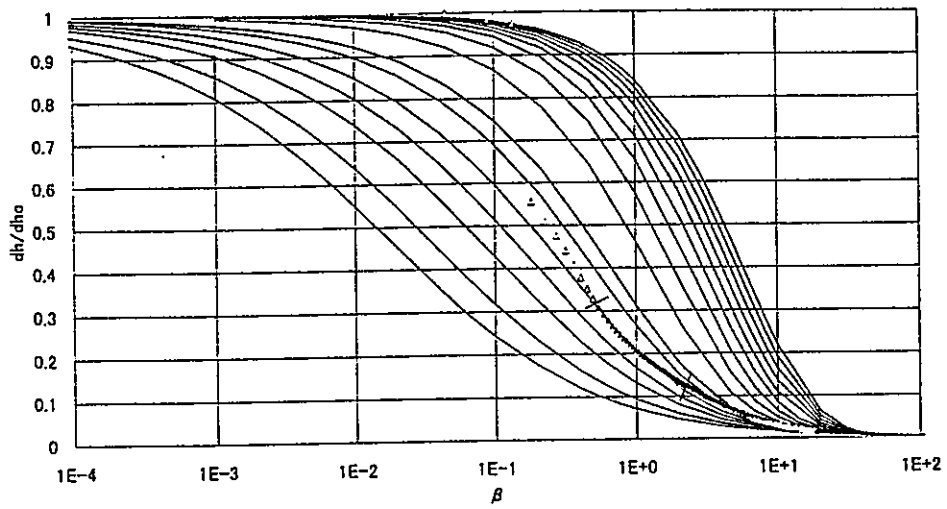
付図-16 解析結果一覧図 (SN6060KA)



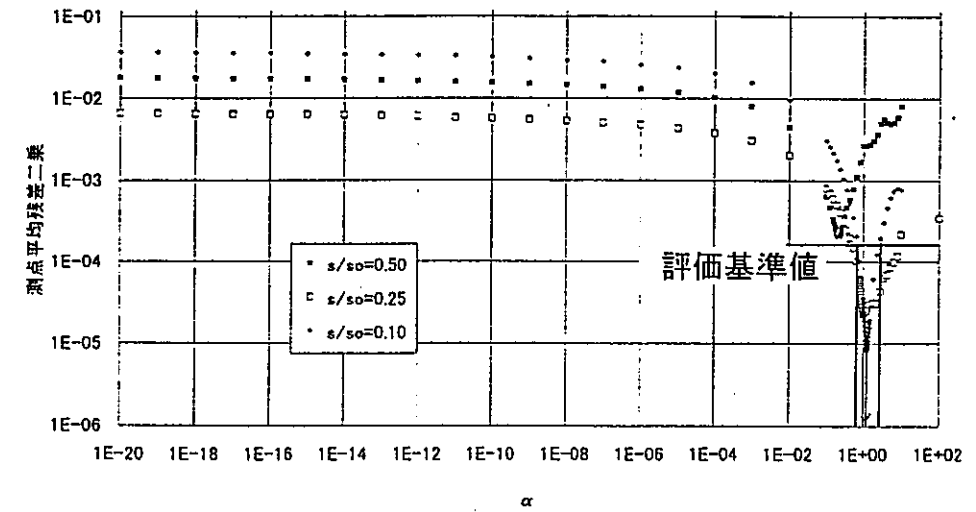
(a) ポシュレフ法による解析方法



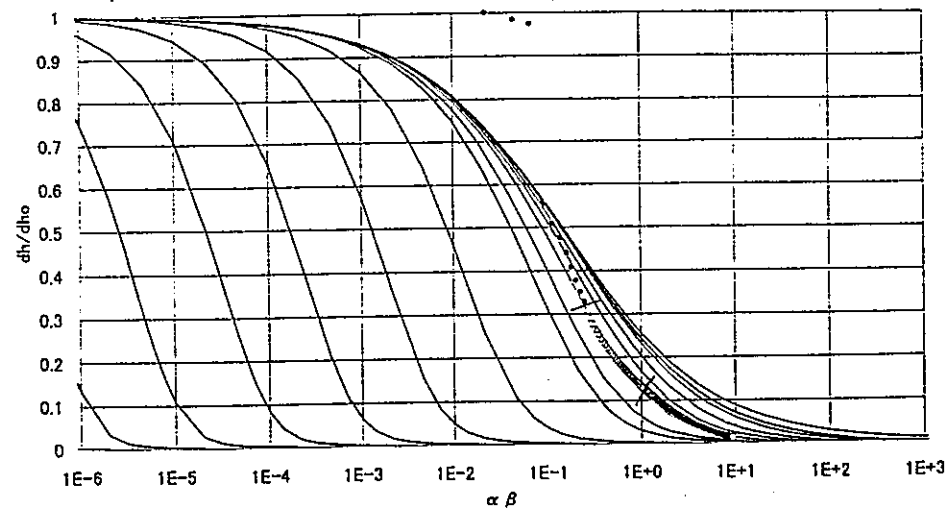
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



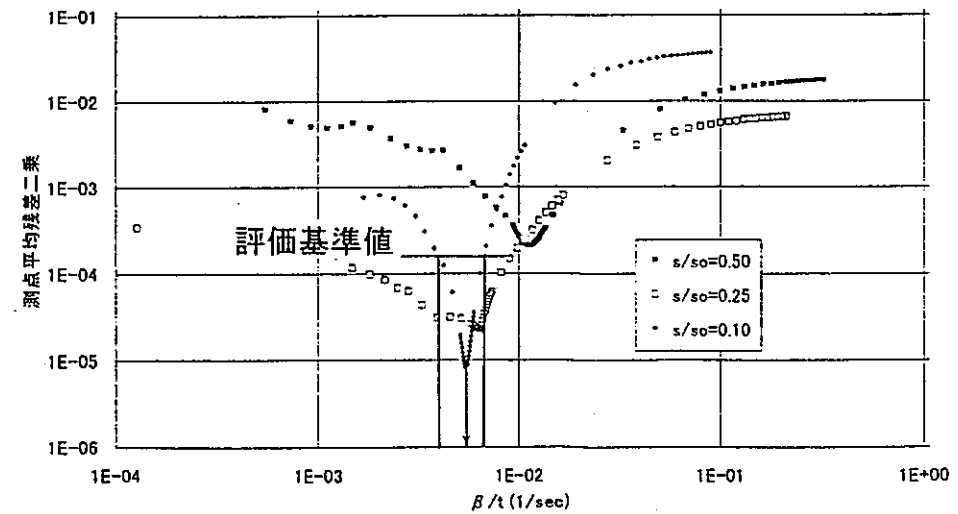
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による $\alpha$ -測点平均残差二乗和

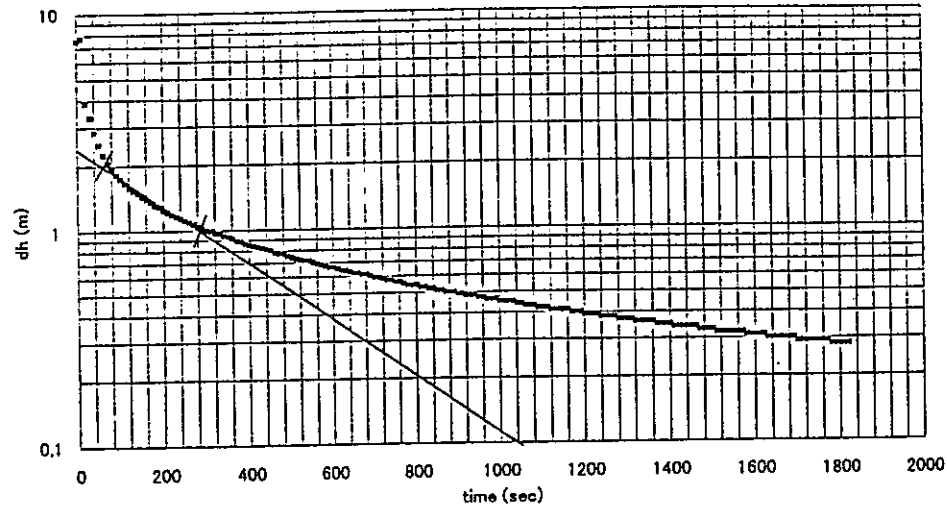


(c) ブドレホフト法による解析方法

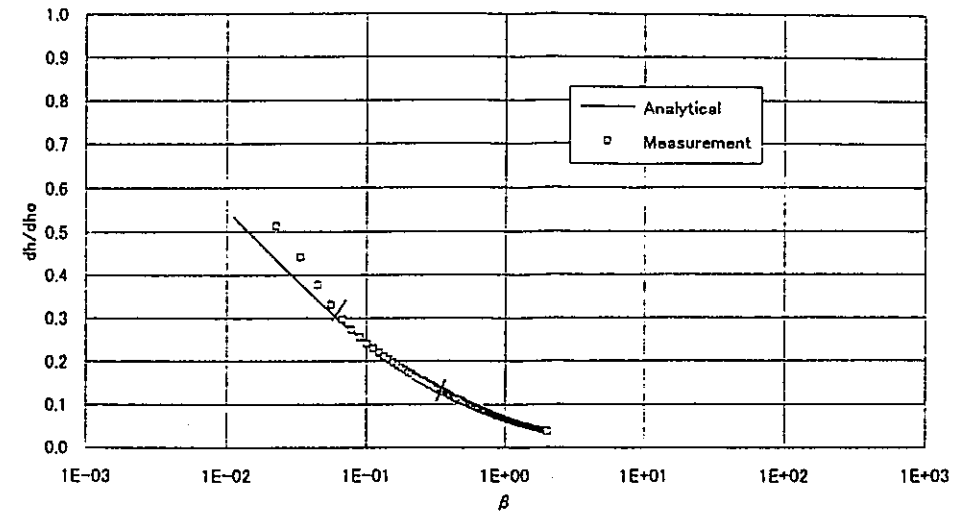


(f) 自動クーパー法による $\beta$ -測点平均残差二乗和

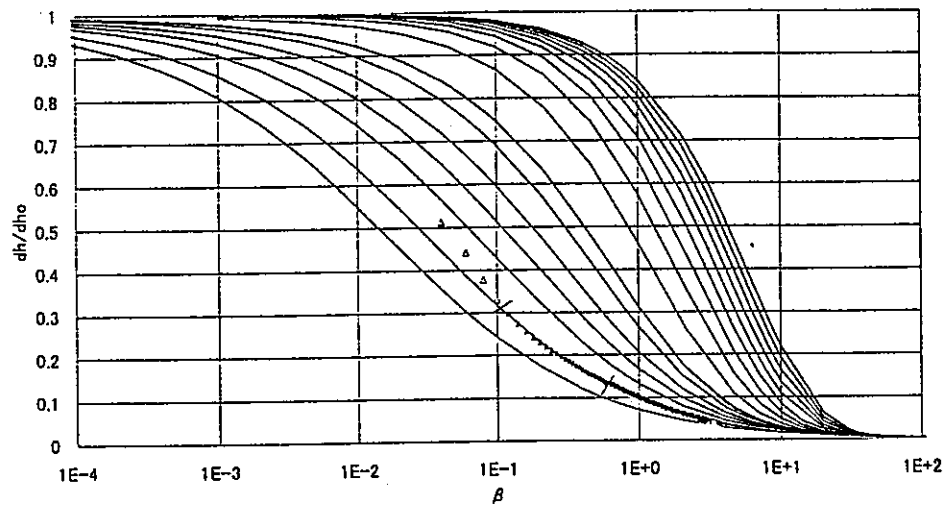
付図-17 解析結果一覧図 (SN6070CA)



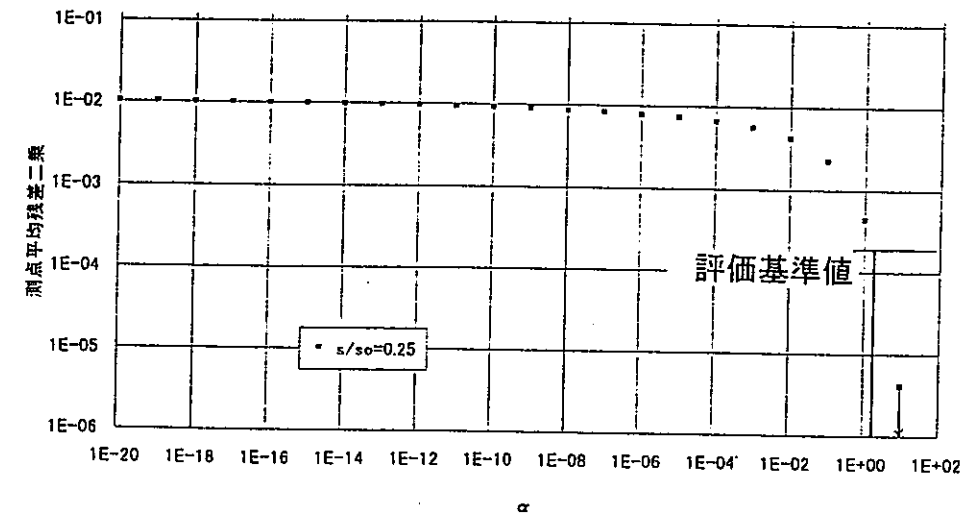
(a) ボシュレフ法による解析方法



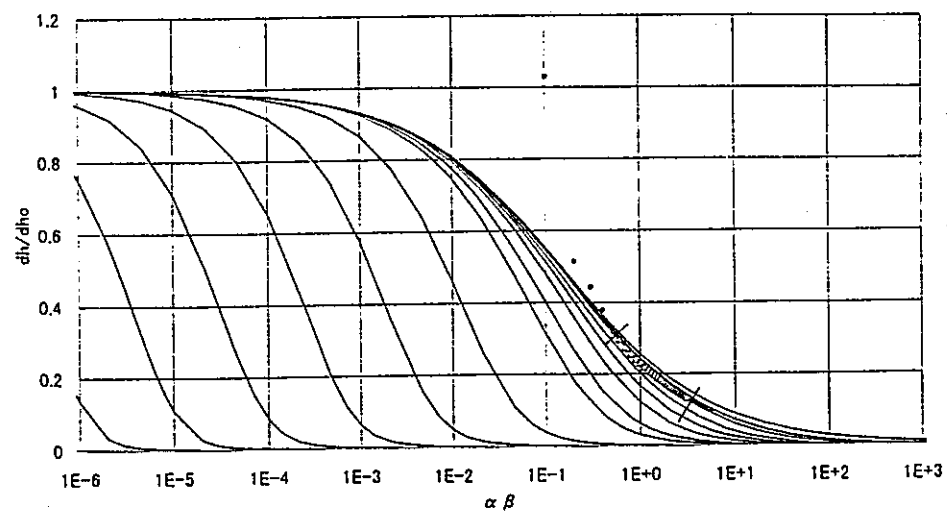
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



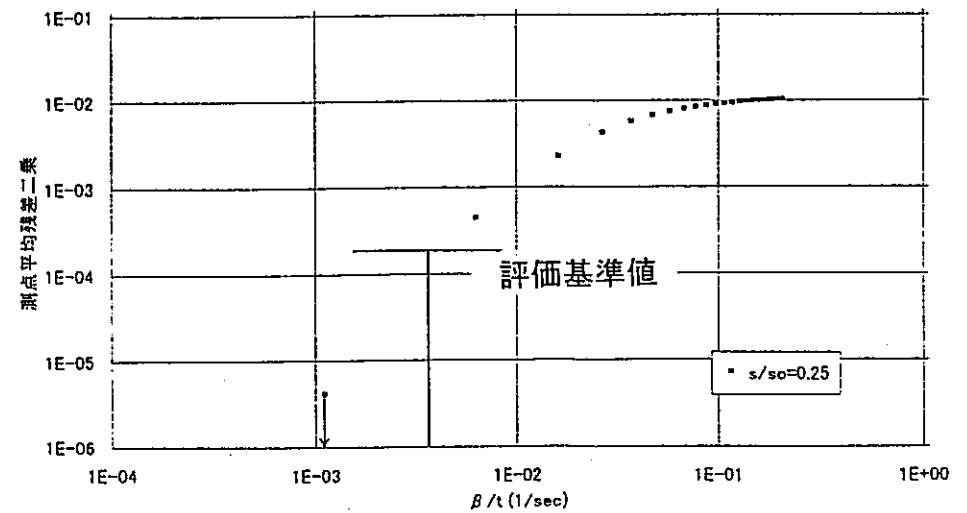
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による $\alpha$ -測点平均残差二乗和



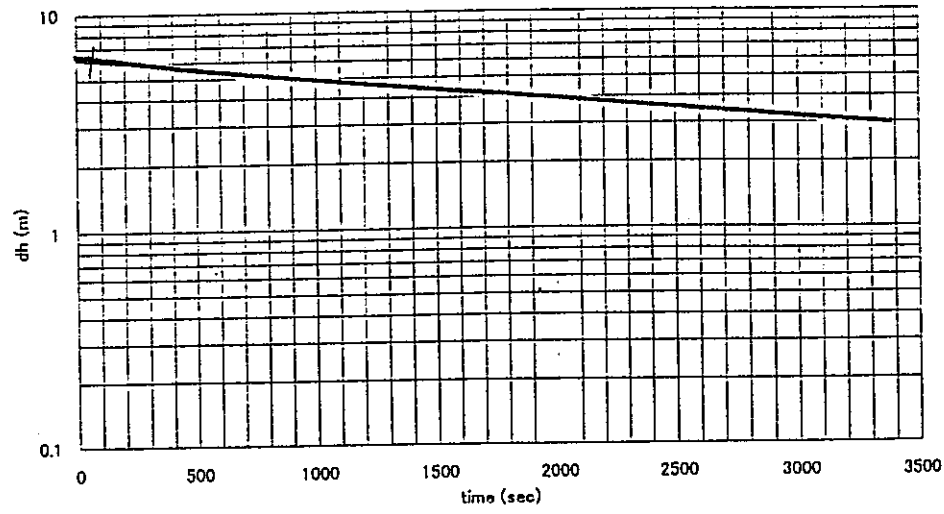
(c) ブドレホフト法による解析方法



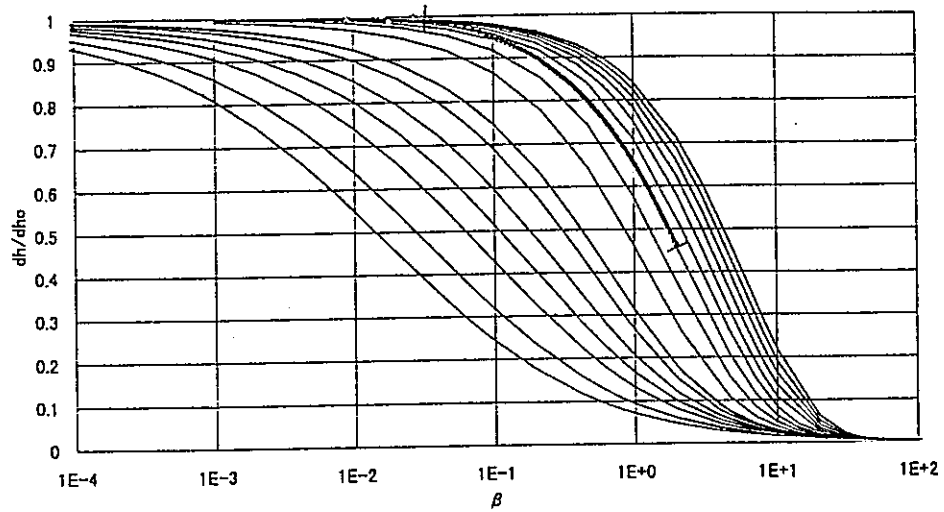
(f) 自動クーパー法による $\beta$ -測点平均残差二乗和

付図-18 解析結果一覧図 (SN6070KA)

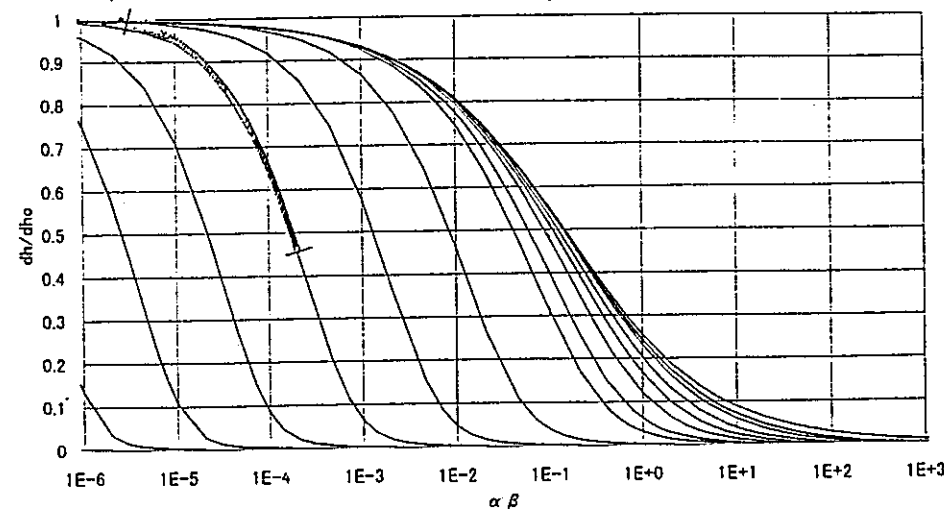




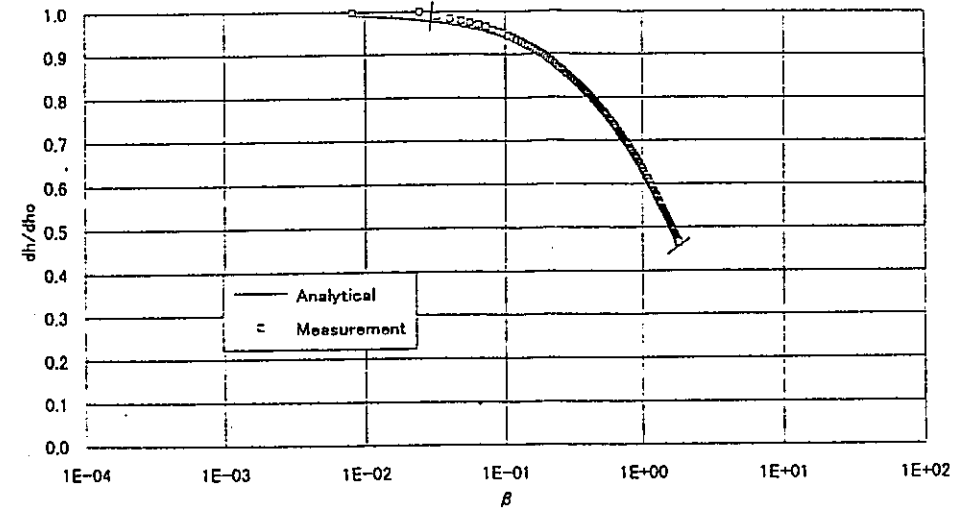
(a) ボシュレフ法による解析方法



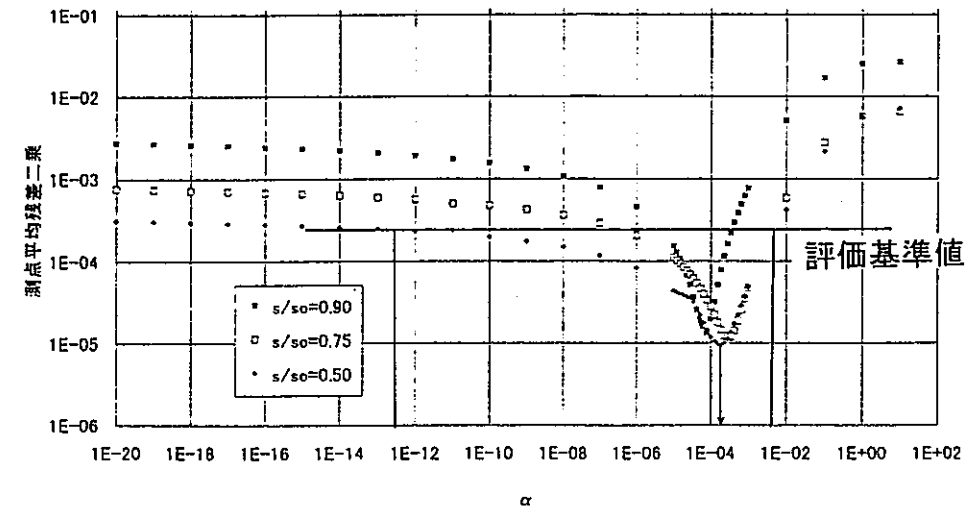
(b) クーパー法による解析方法



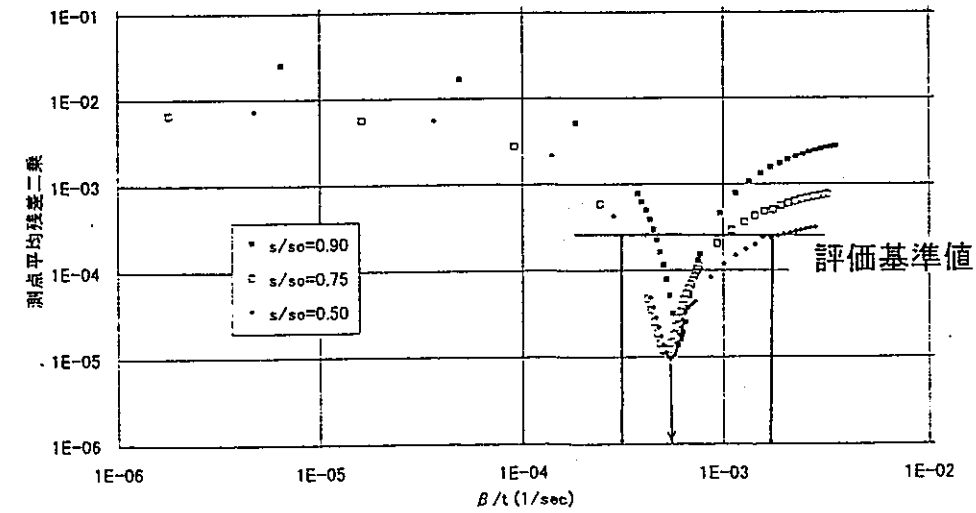
(c) ブドレホフト法による解析方法



(d) 自動クーパー法による最適解析状況

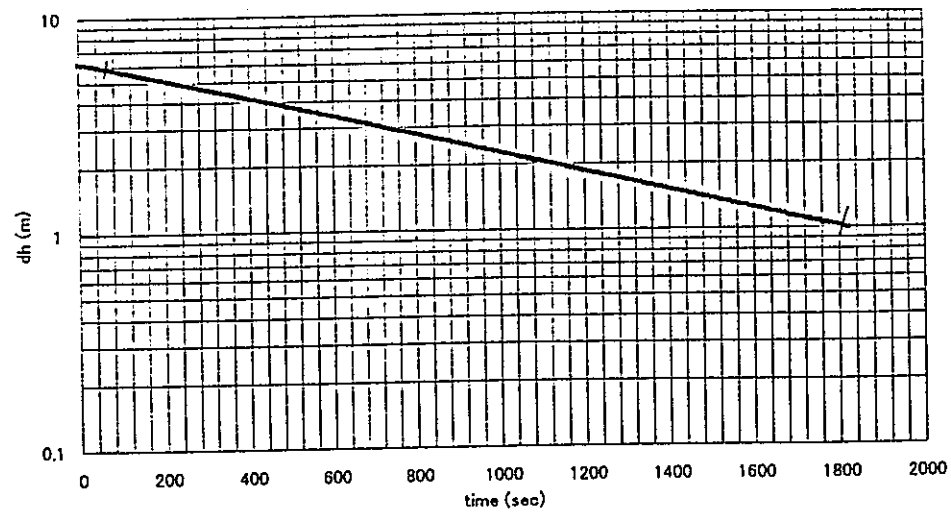


(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

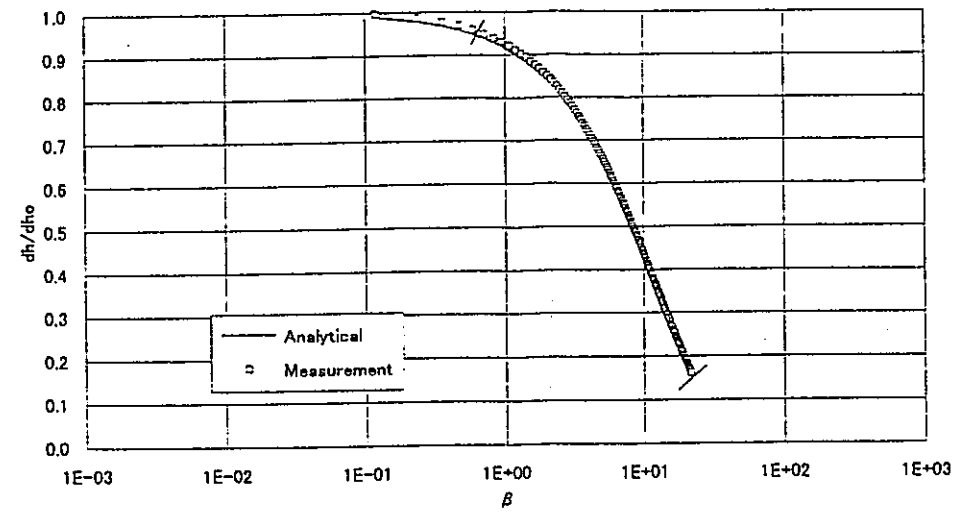


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

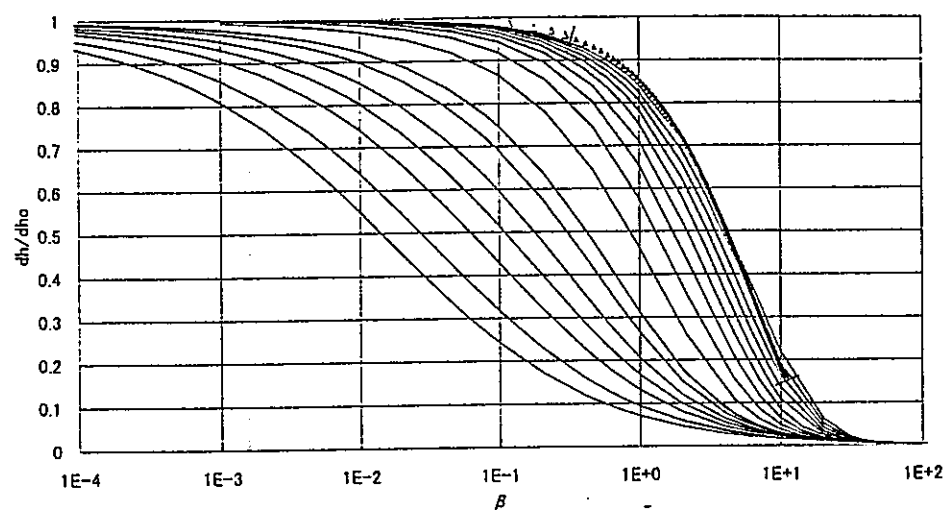
付図-19 解析結果一覧図 (SN6076CA)



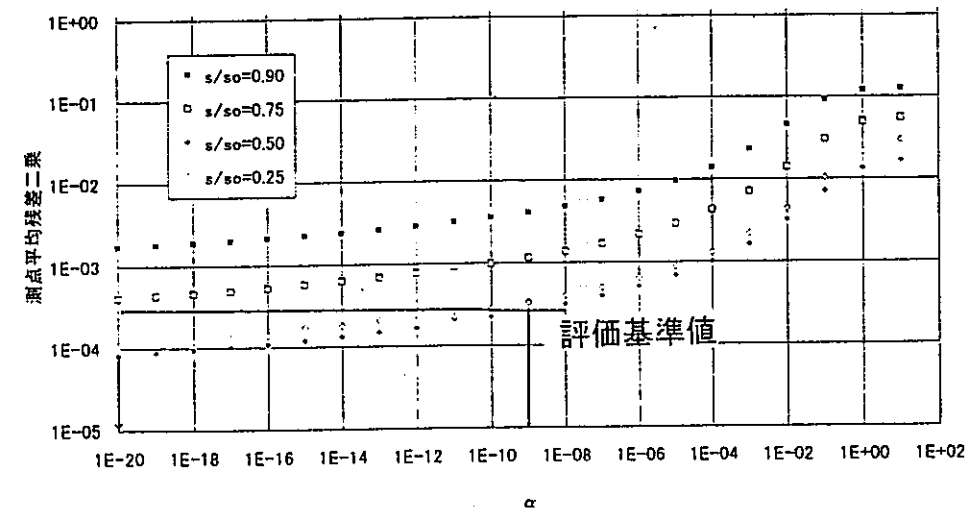
(a) ポシュレフ法による解析方法



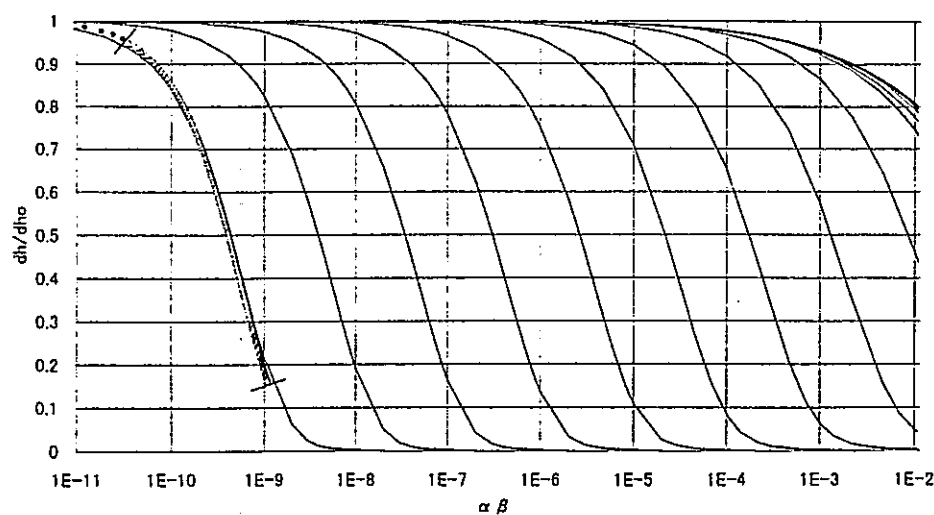
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



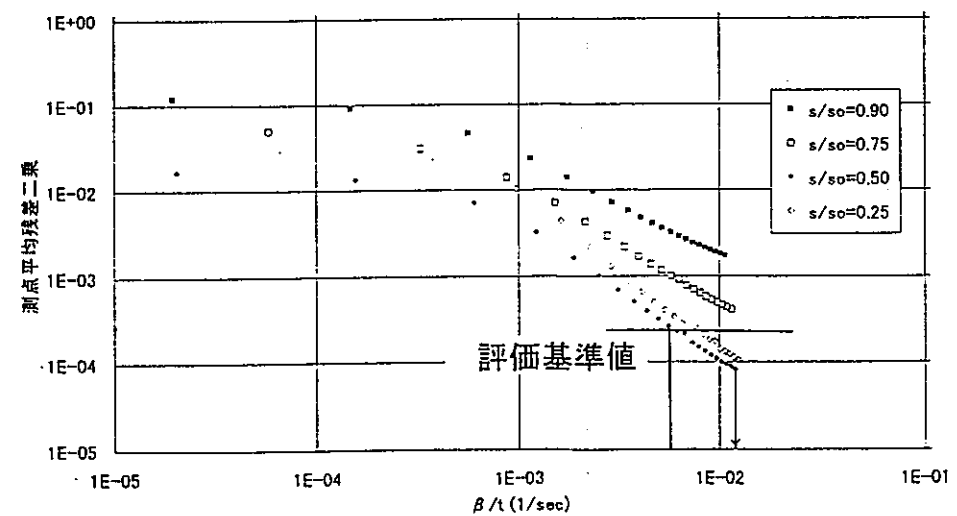
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

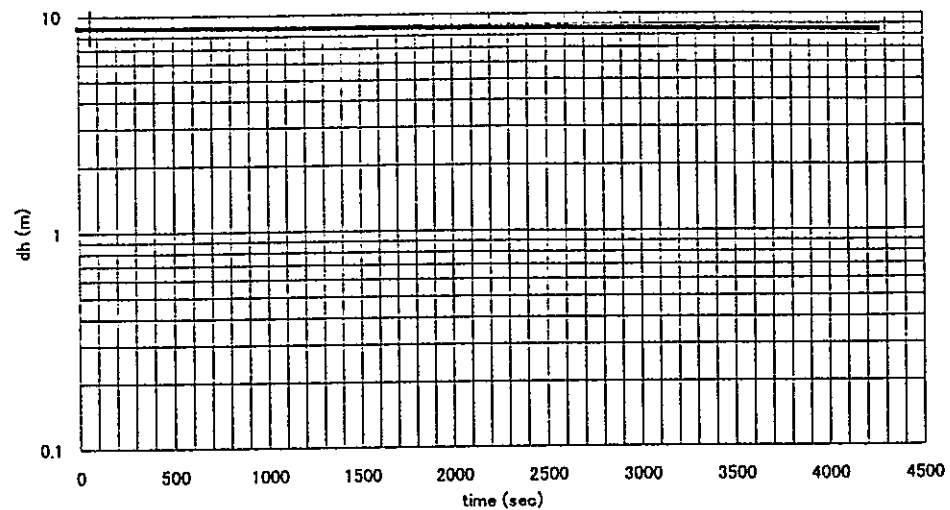


(c) ブドレホフト法による解析方法

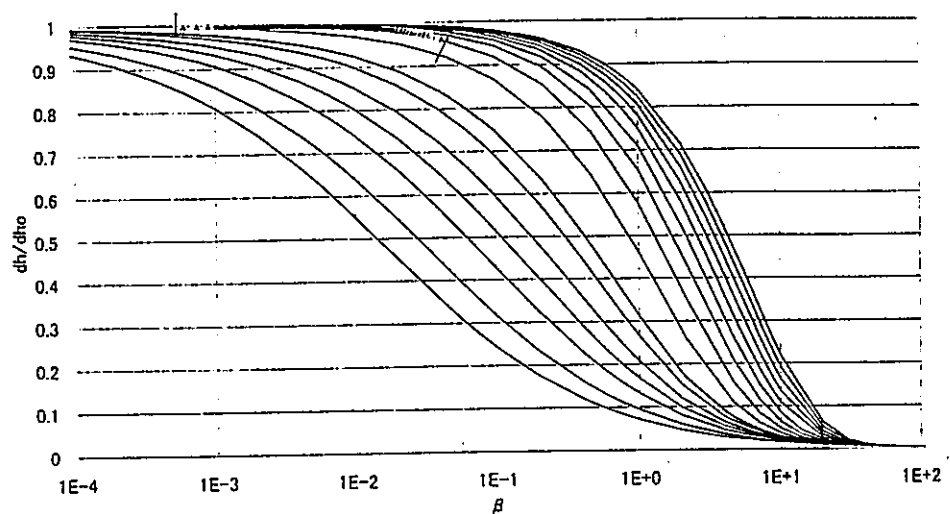


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

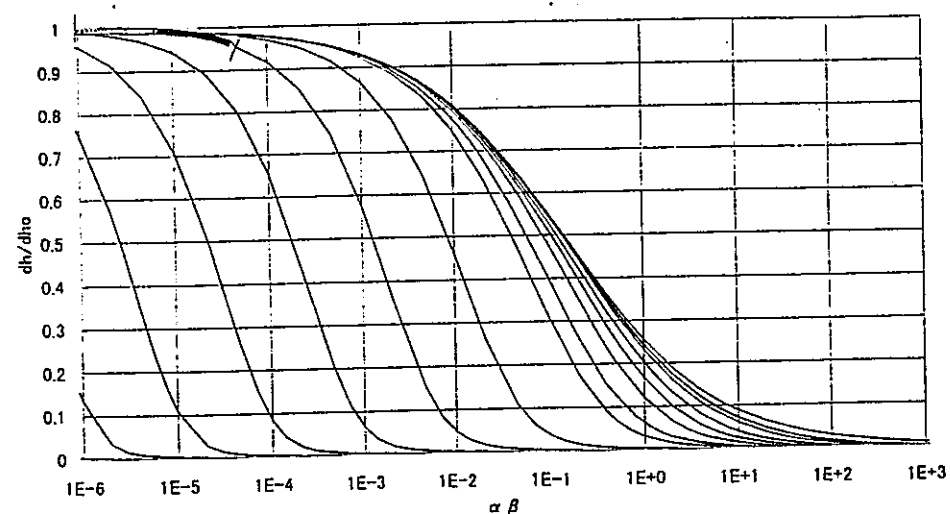
付図-20 解析結果一覧図 (SN6076KA)



(a) ポシュレフ法による解析方法

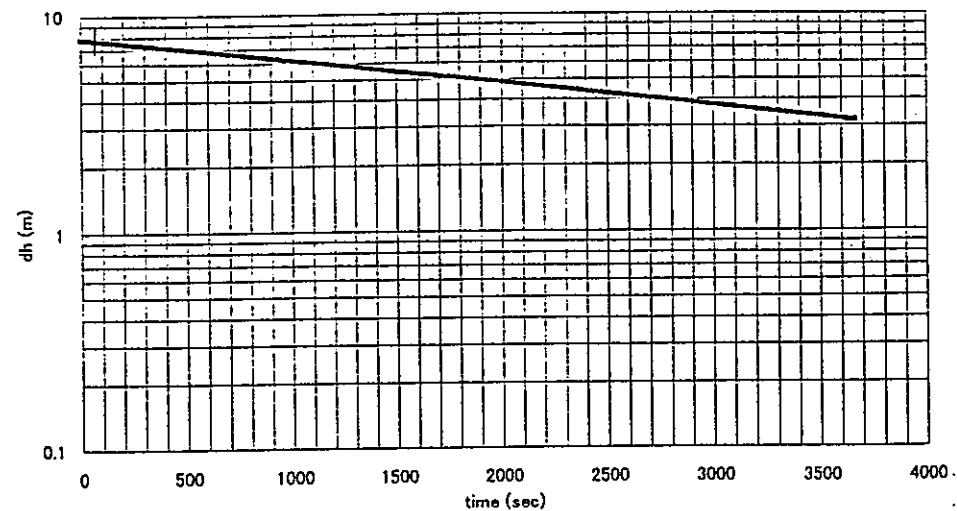


(b) クーパー法による解析方法

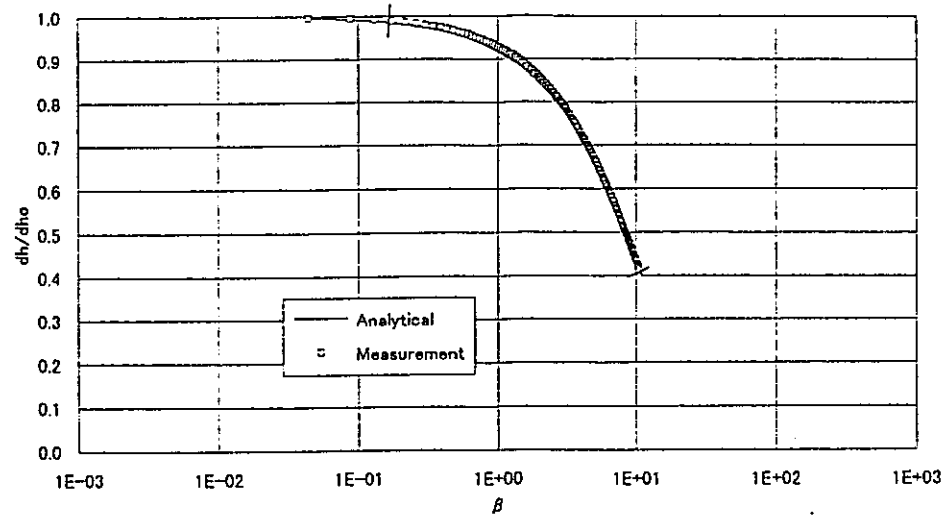


(c) ブドレホフト法による解析方法

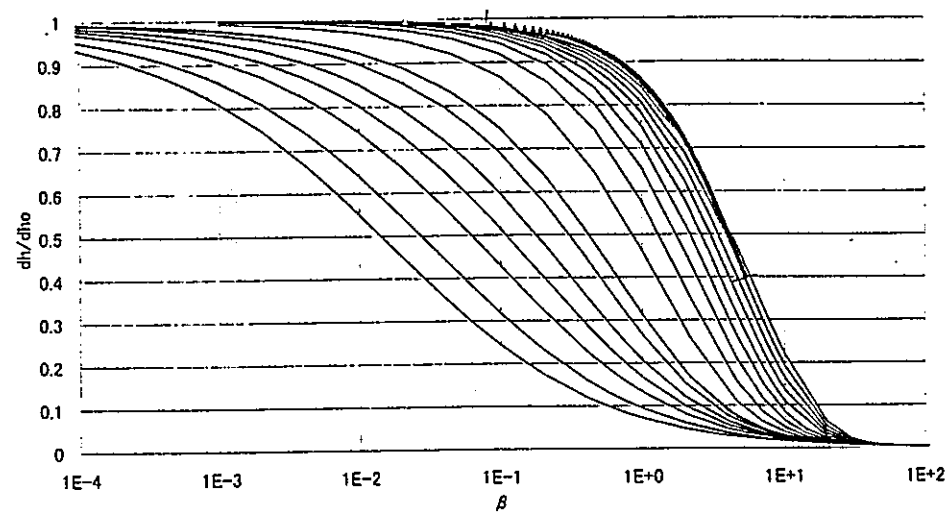
付図-21 解析結果一覧図 (SN6082CA)



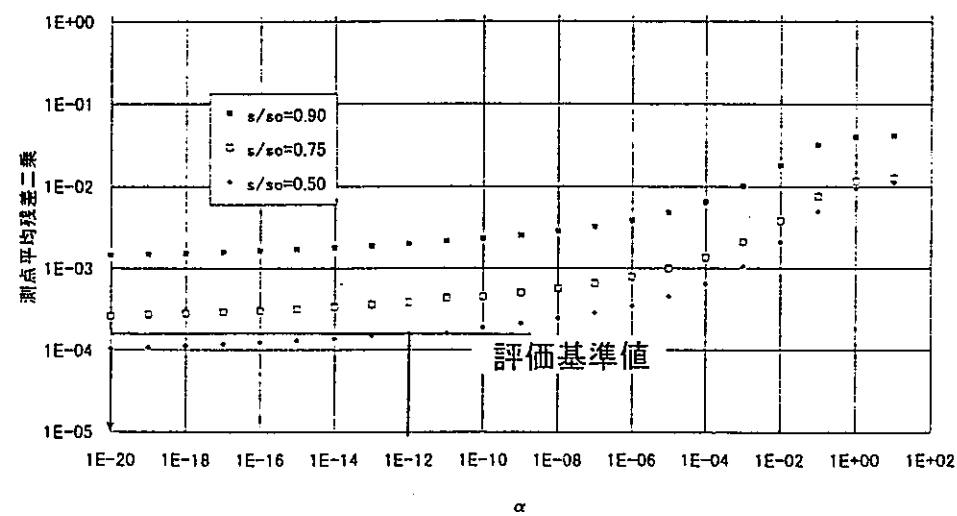
(a) ポシュレフ法による解析方法



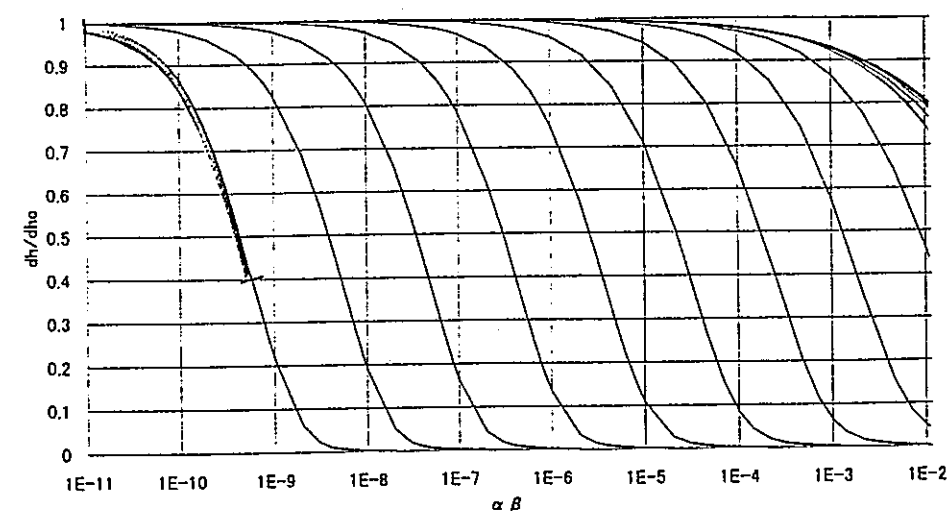
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



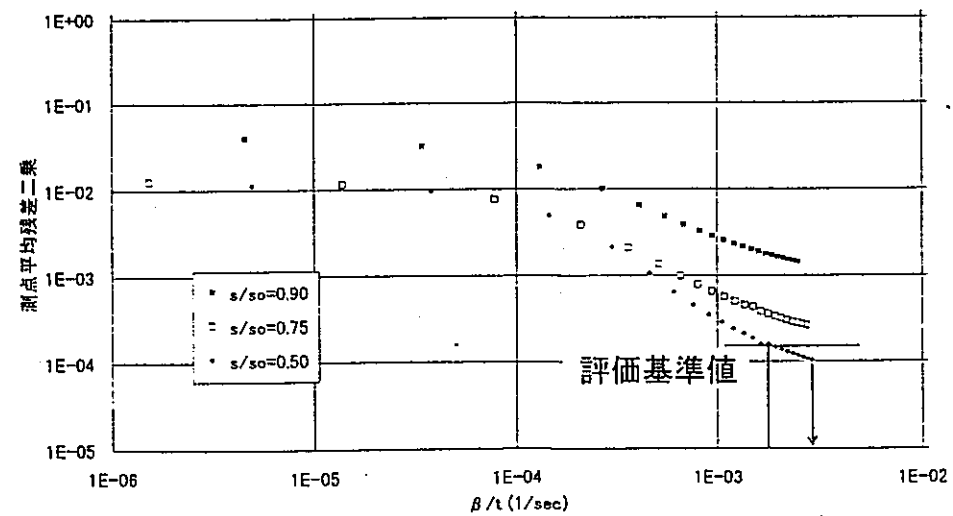
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

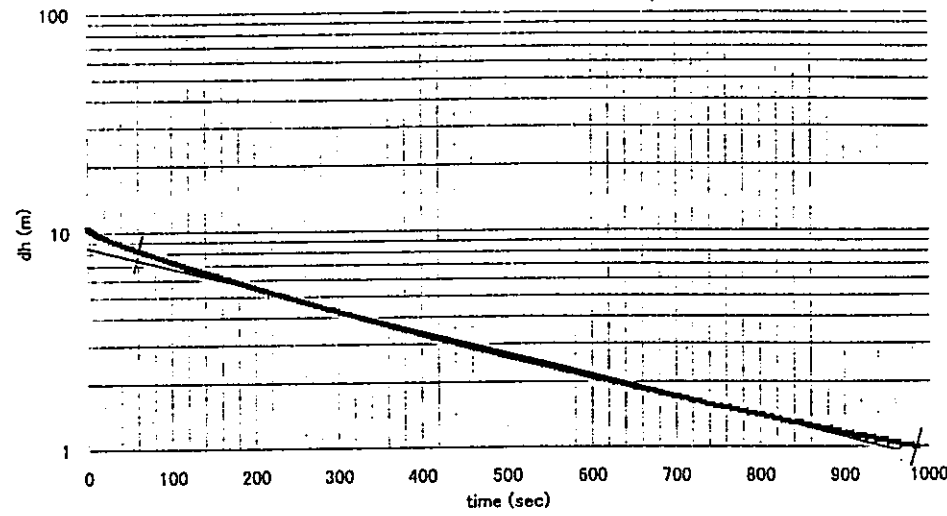


(c) ブドレホフト法による解析方法

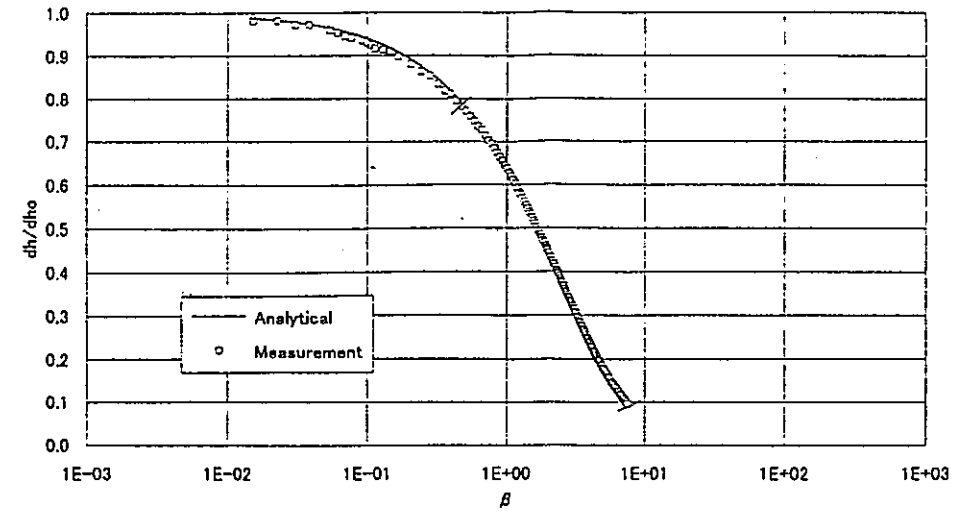


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

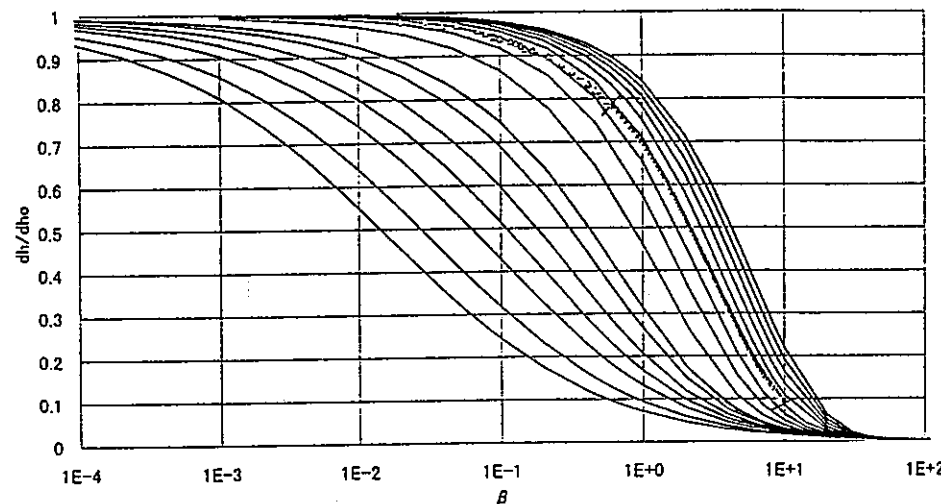
付図-22 解析結果一覧図 (SN6082KA)



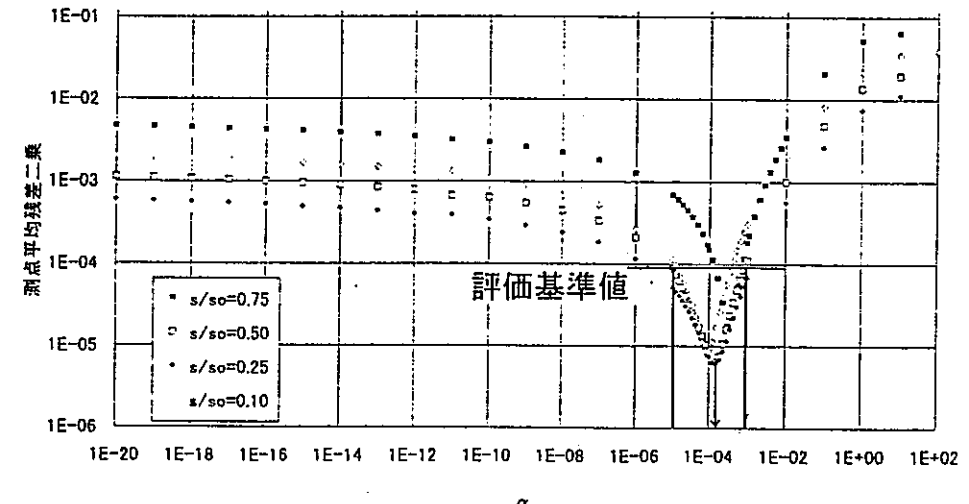
(a) ボシュレフ法による解析方法



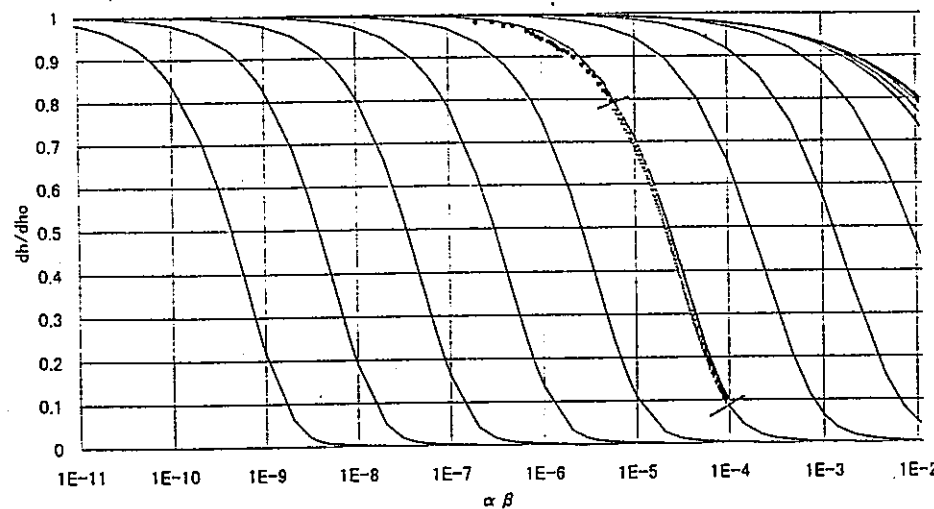
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



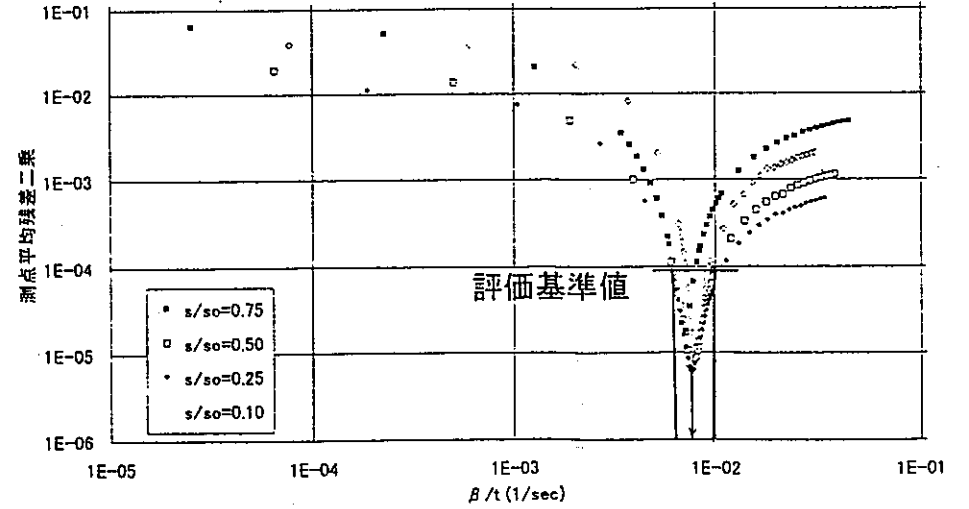
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

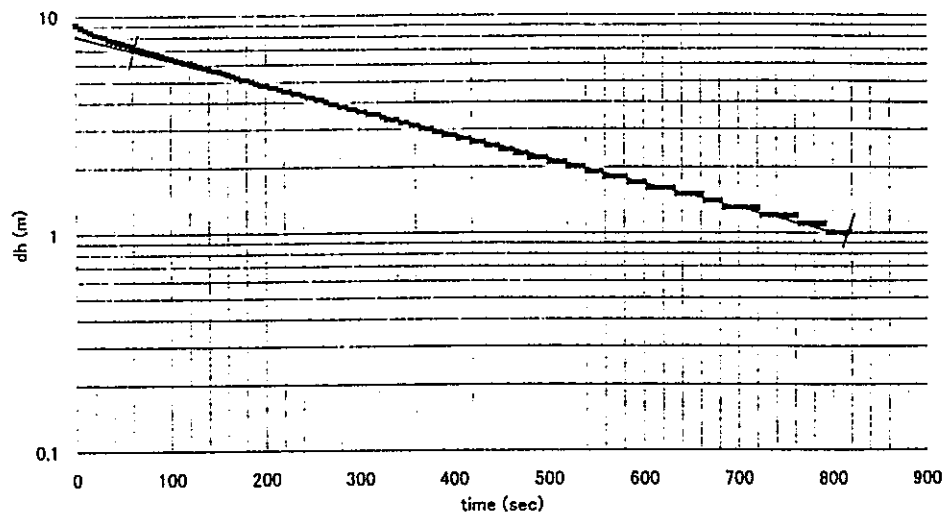


(c) ブドレホフト法による解析方法

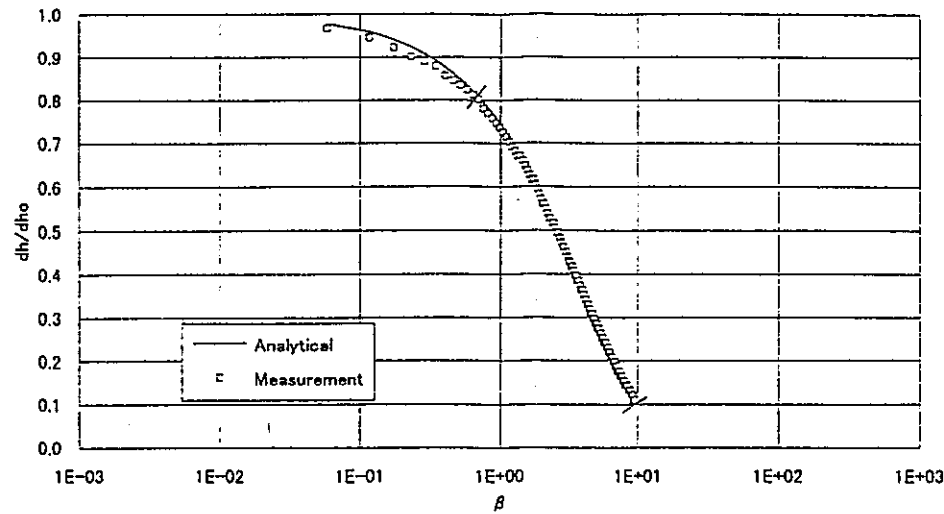


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

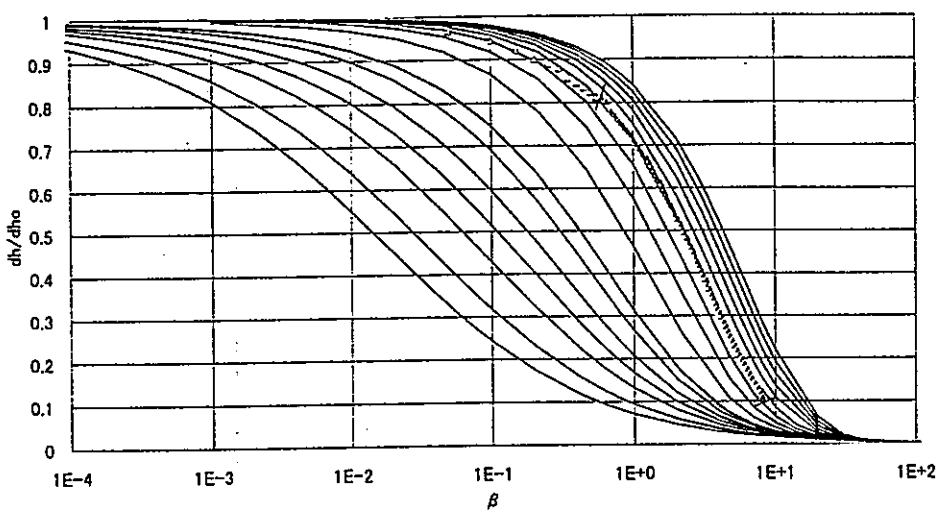
付図-23 解析結果一覧図 (P100911)



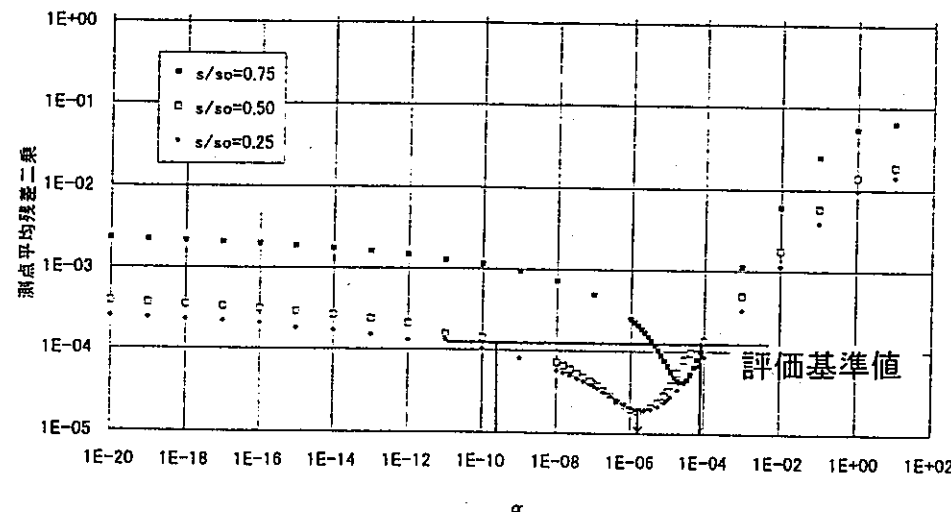
(a) ボシュレフ法による解析方法



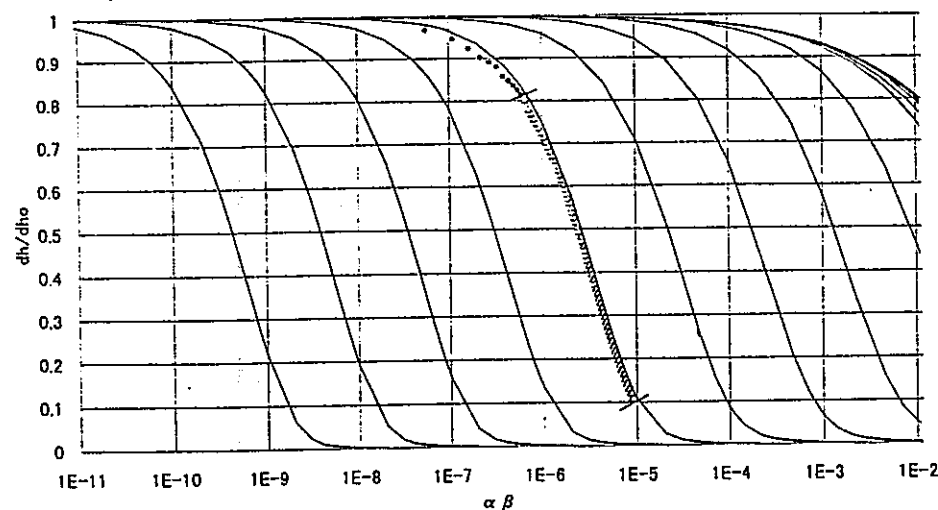
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



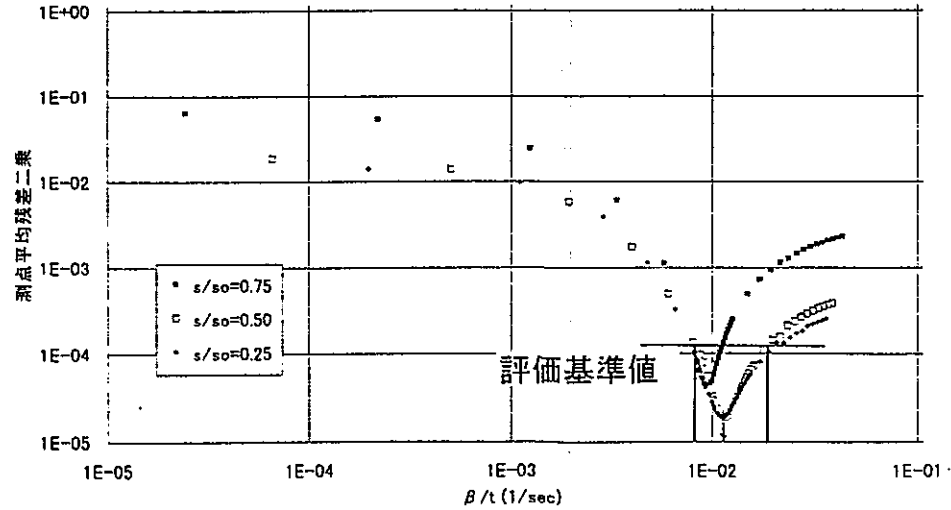
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

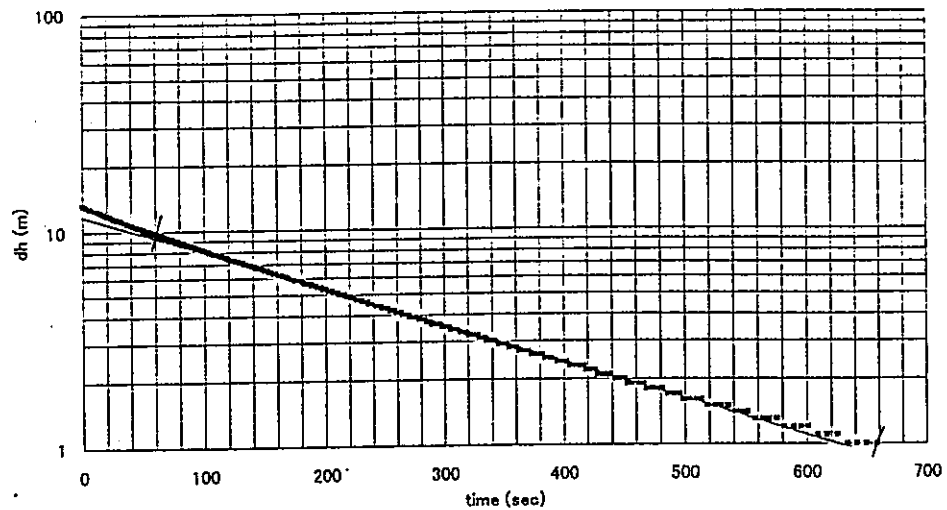


(c) ブドレホフト法による解析方法

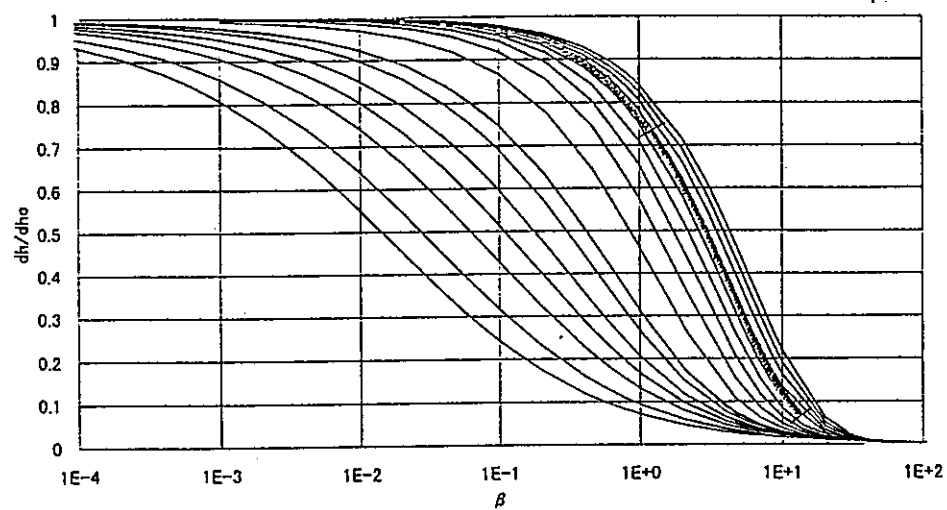


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

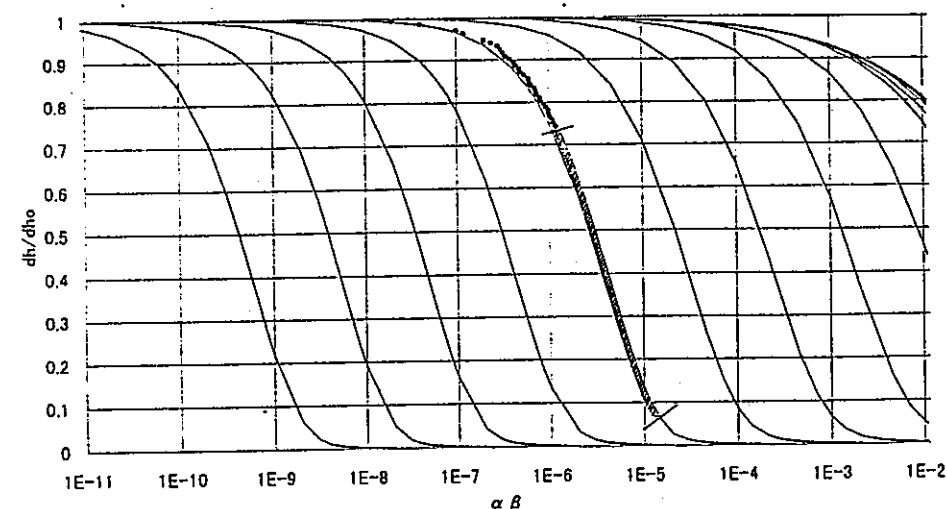
付図-24 解析結果一覧図 (P100912)



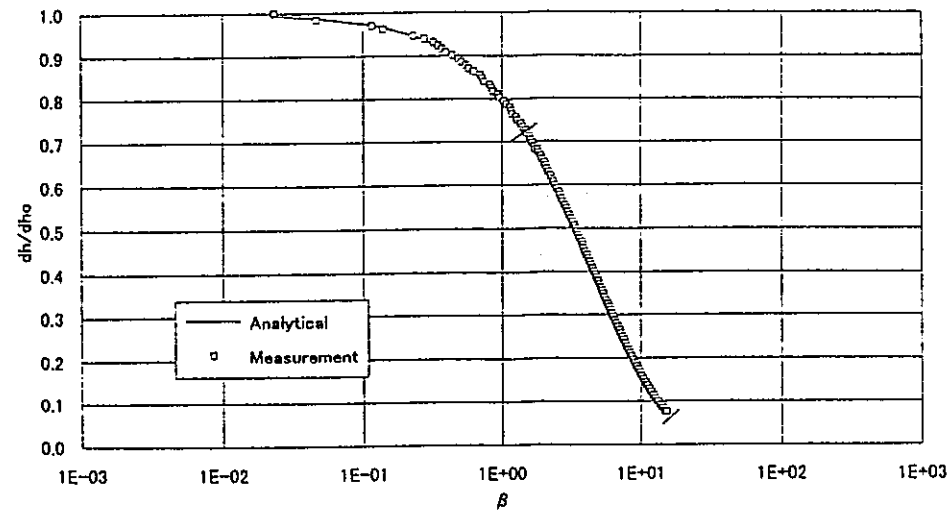
(a) ポシュレフ法による解析方法



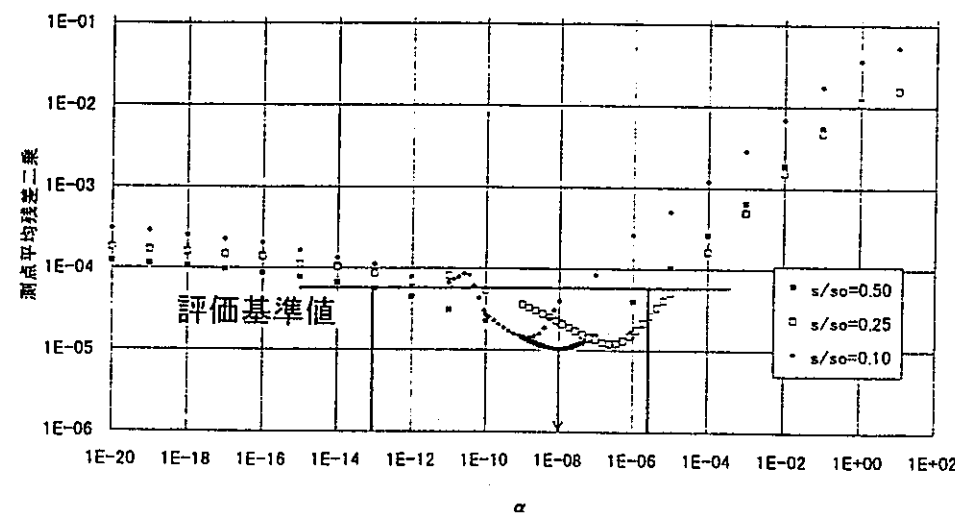
(b) クーパー法による解析方法



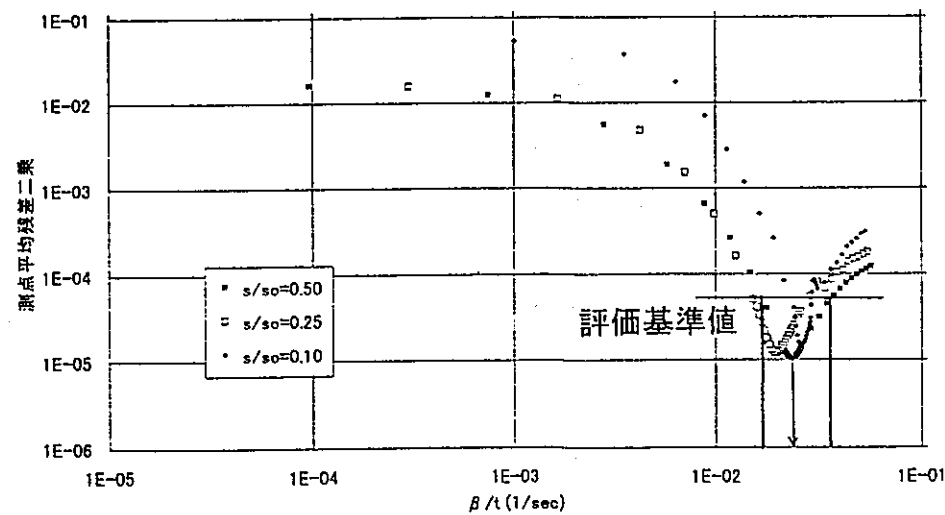
(c) ブドレホフト法による解析方法



(d) 自動クーパー法による最適解析状況

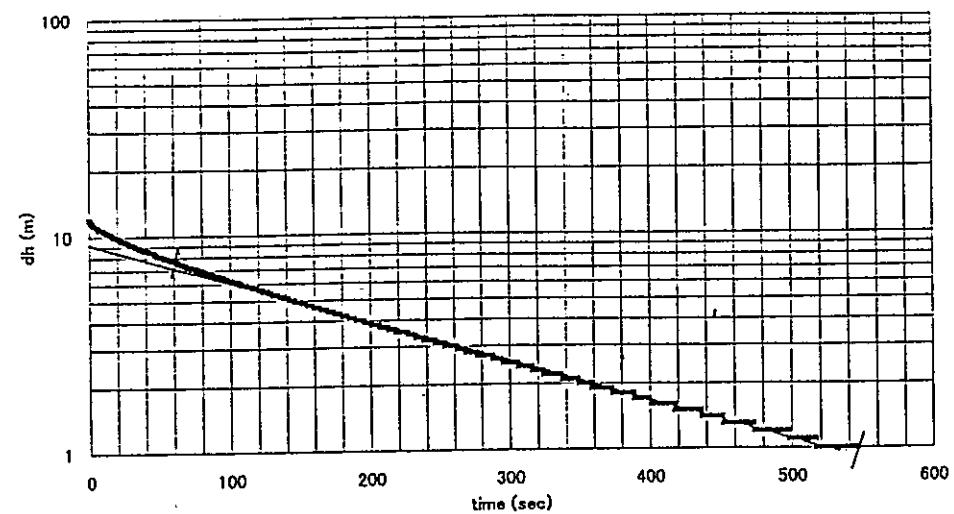


(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

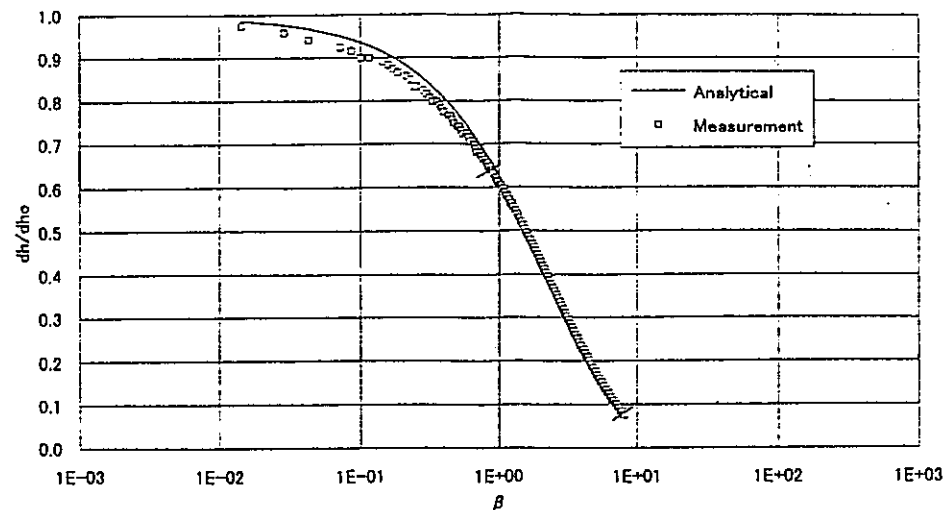


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

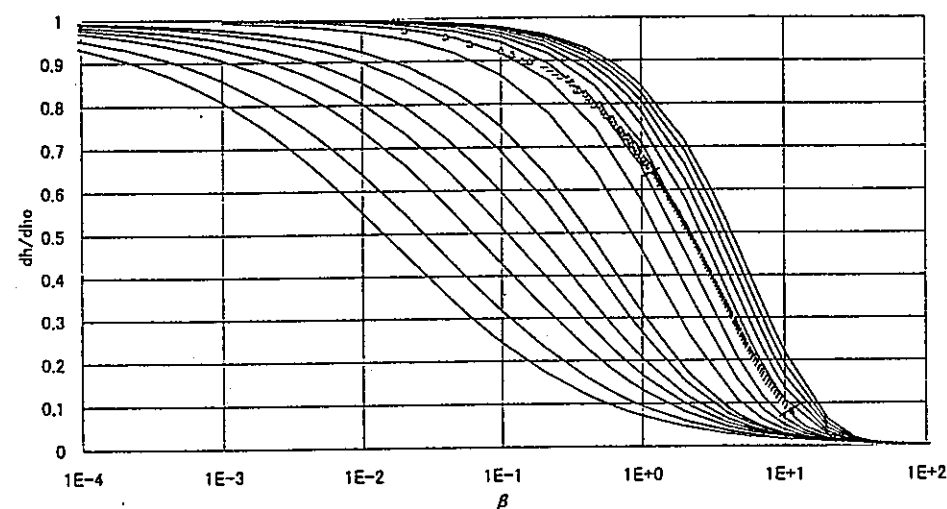
付図-25 解析結果一覧図 (P101203)



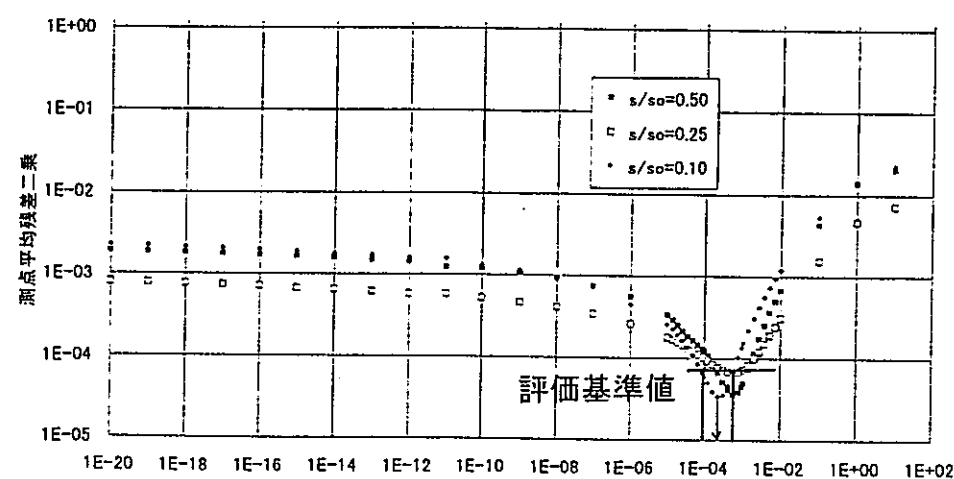
(a) ボシュレフ法による解析方法



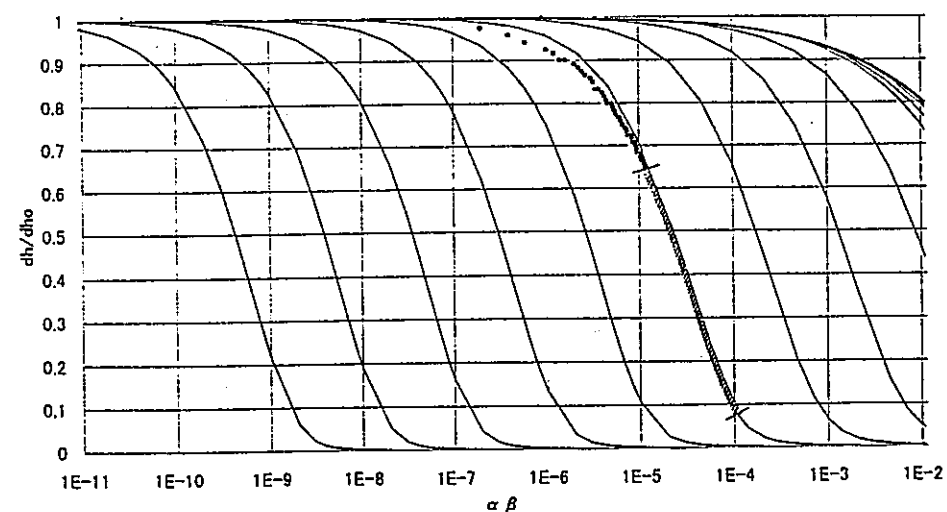
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



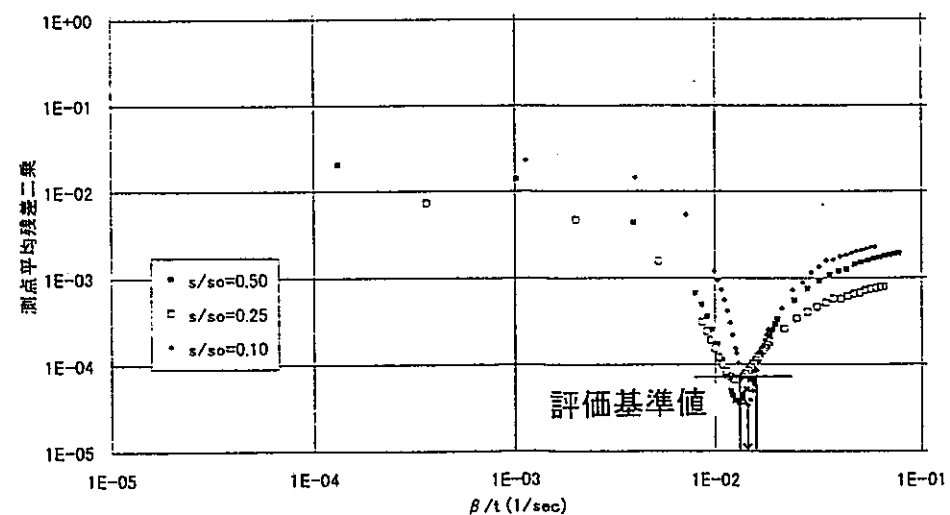
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和



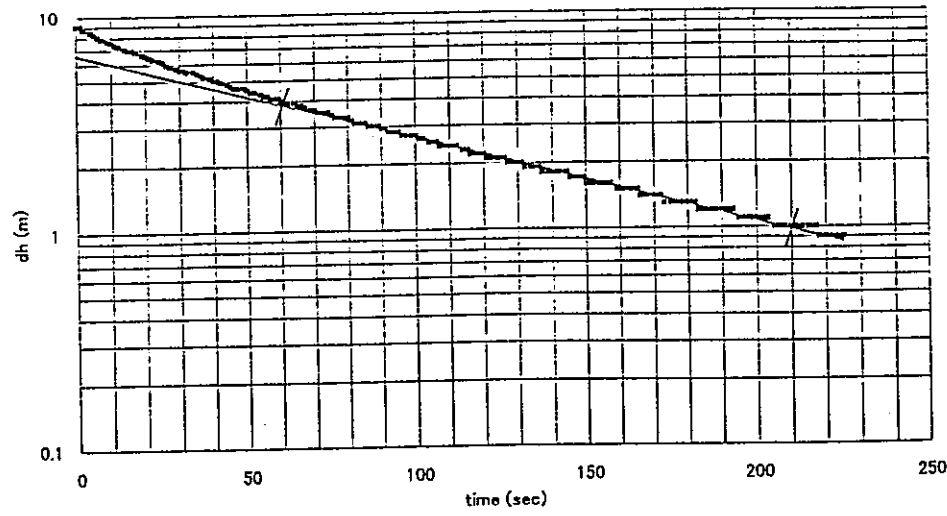
(c) ブドレホフト法による解析方法



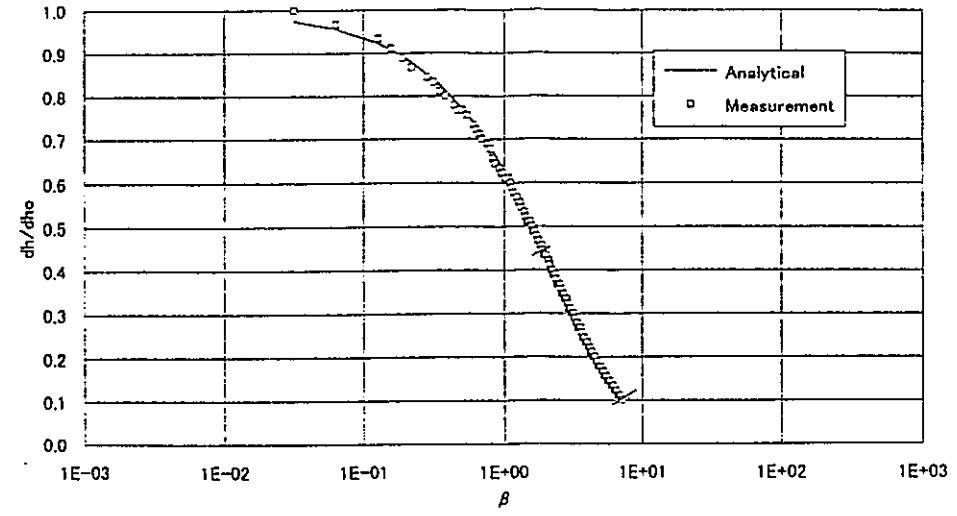
(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

付図-26 解析結果一覧図 (P101204)

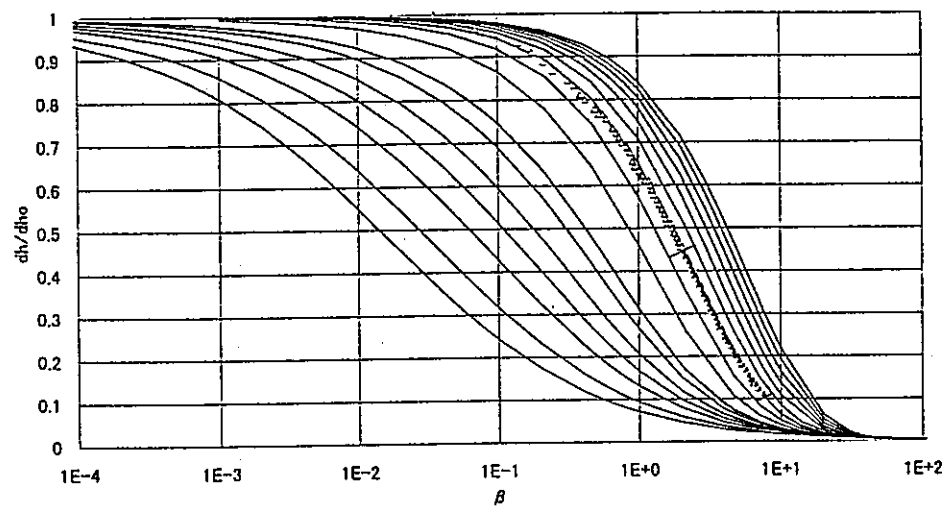




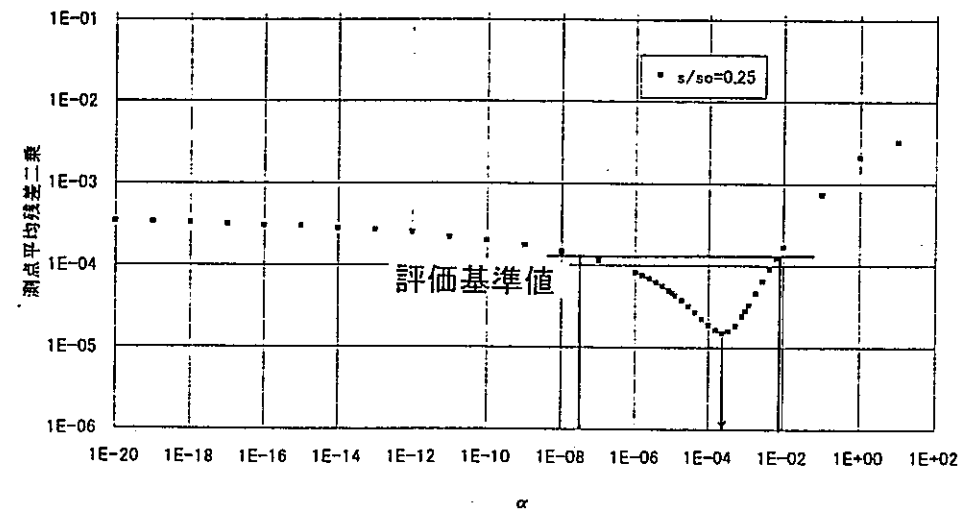
(a) ボシュレフ法による解析方法



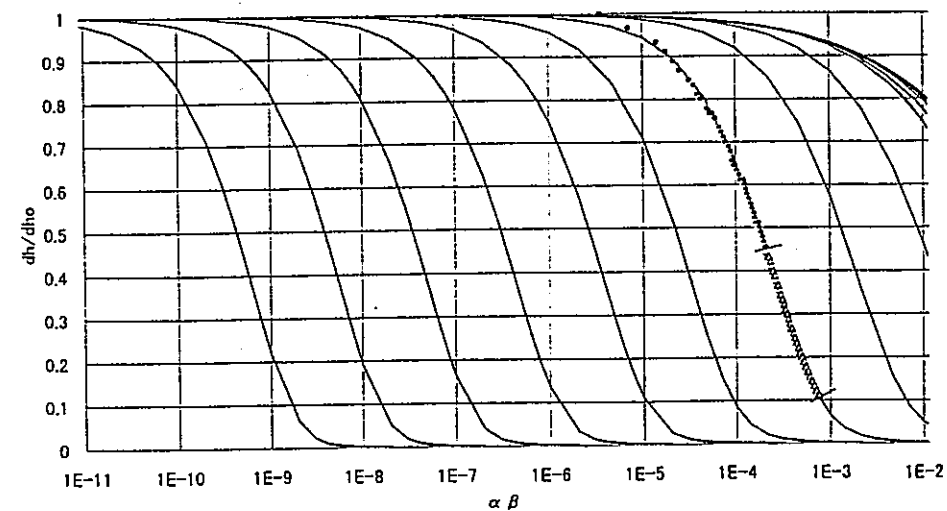
(d) 自動クーパー法による最適解析状況



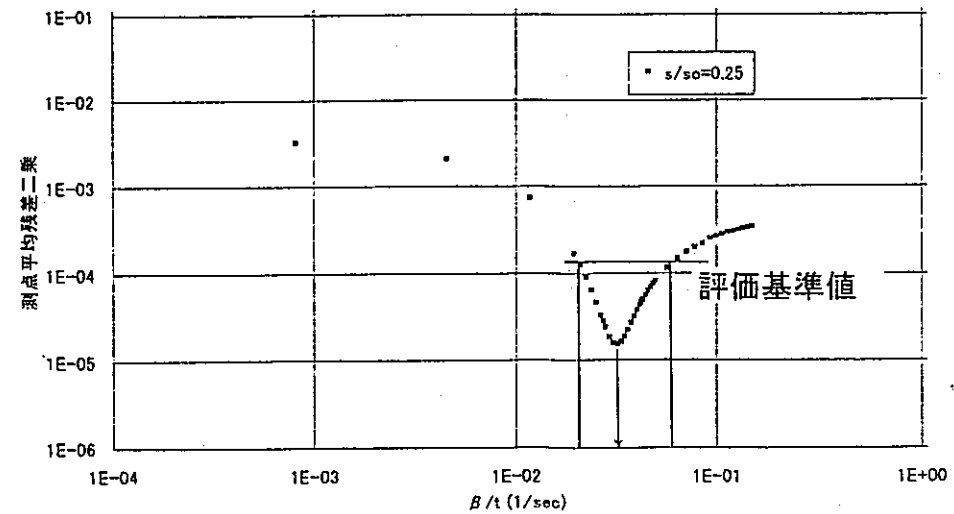
(b) クーパー法による解析方法



(e) 自動クーパー法による  $\alpha$  - 測点平均残差二乗和

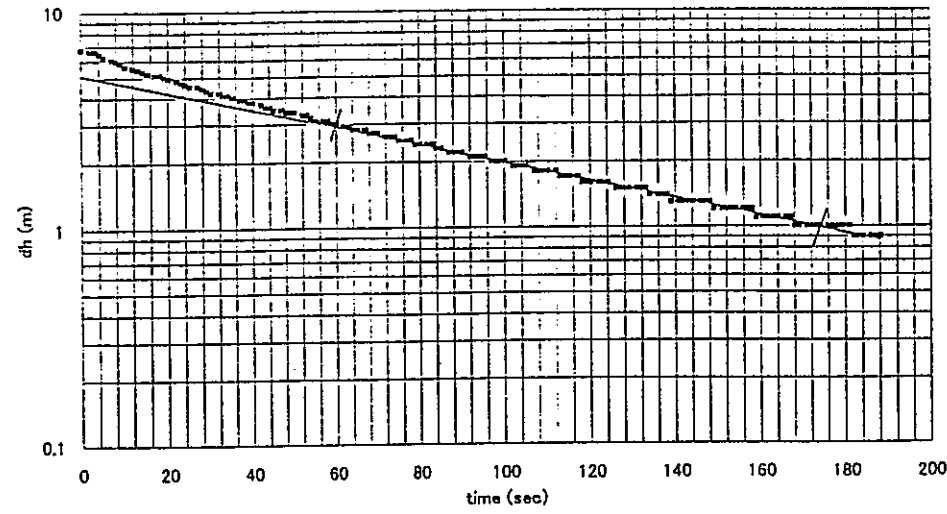


(c) ブドレフト法による解析方法

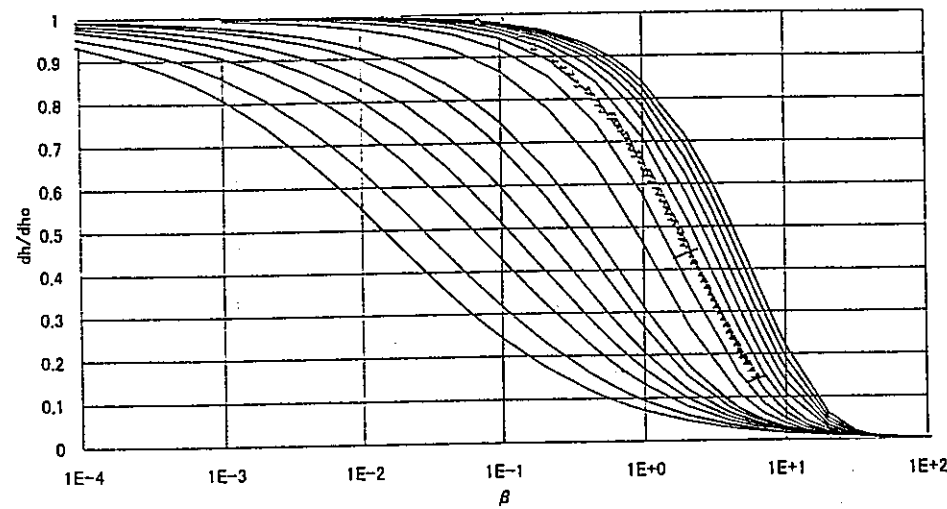


(f) 自動クーパー法による  $\beta$  - 測点平均残差二乗和

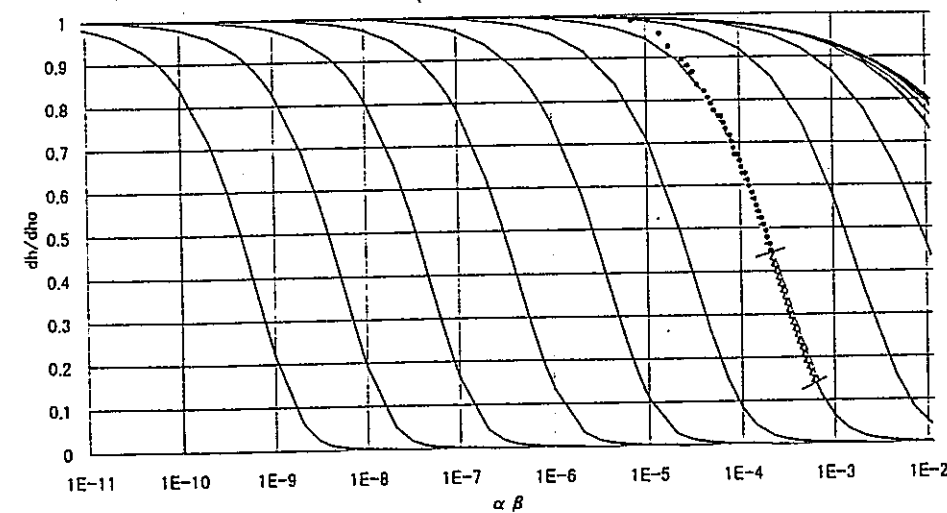
付図-27 解析結果一覧図 (P101205)



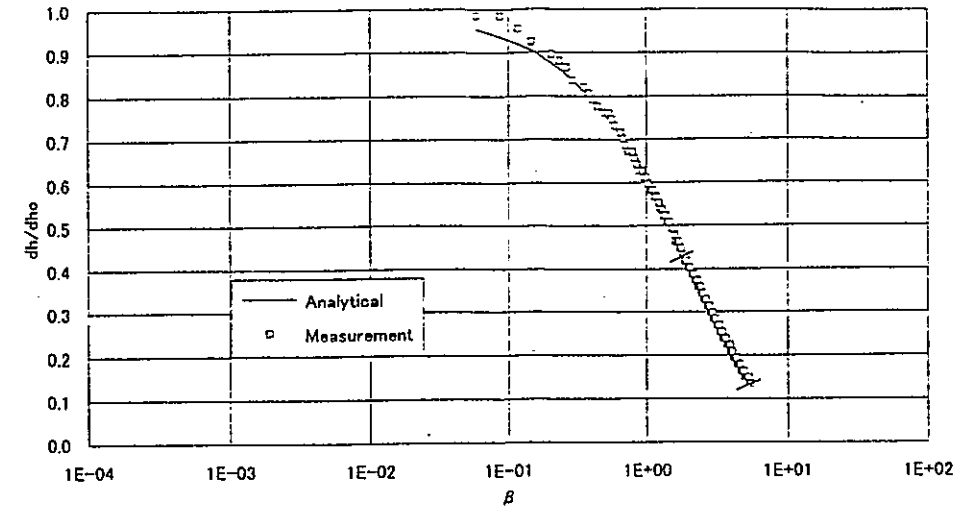
(a) ポシュレフ法による解析方法



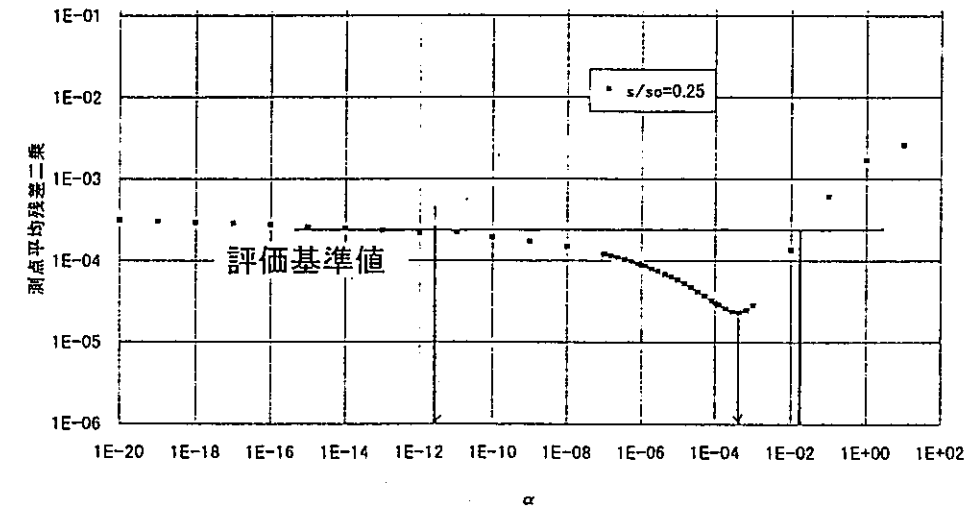
(b) クーパー法による解析方法



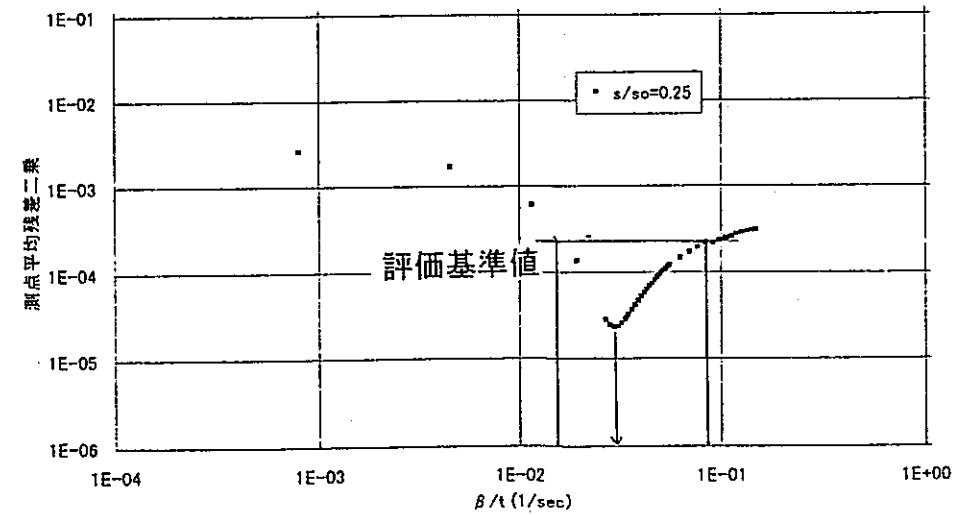
(c) ブドレホフト法による解析方法



(d) 自動クーパー法による最適解析状況



(e) 自動クーパー法による $\alpha$ -測点平均残差二乗和



(f) 自動クーパー法による $\beta$ -測点平均残差二乗和

付図-28 解析結果一覧図 (P101206)