地盤と建設
Vol. 21, No. 1, 2003

室内エアパルステストによる浸透特性逆解析の信頼性評価の試み

Reliability Evaluation of Permeability Inversion Using Laboratory Air Pulse Test Data

増本　清　Kiyoshi MASUMOTO（島根大学総合理工学部）
錦織信吾　Shingo NISHIKORI（元島根大学学生）

不均質な地下の流体挙動を予測するために逆解析が行われるが，その信頼性が問題となる．逆解析結果およびそれに基づいた予測結果の信頼性を評価する手法としてブートストラップ法の適用が提案され，数値実験による検討が行われている．本研究はこの手法を検証することを目的として，手始めに，砂岩平板を用いた室内エアパルス試験から得られた圧力データを使用して，ブートストラップ法による逆解析結果および予測計算結果の信頼性評価法に関する検討を行った．その結果，計算圧力値の90%信頼区間幅の中に計測圧力値は収まらないものの，ブートストラップ法による予測の信頼性指標PCI90と，実際の計測値と予測結果との予測誤差の間に相関性があることが示された．このことから，浸透特性逆解析問題において，ブートストラップ法は計測形態や逆解析モデルを相対的に評価する上で有効なツールとなる可能性が示された．

キーワード：浸透特性，室内試験，エアパルス試験，逆解析，信頼性評価，（IGC：D-4, G-7）

1．はじめに

地下の不均質な水理特性を考慮した地下水モデルを構築するために，水理特性に関する情報を取得する必要があり，様々な水理試験が行われる．Tosaka et al.[1]は非定常圧力データを多量に取得するハイドロパルステスト（複数孔を利用した非定常透水試験）を提案し，逆解析手法により水理特性分布を推定する方法を示している．しかし，複雑な不均質性に対処する上で，未知パラメータ設定法などの逆解析におけるモデル設定法が問題となる．また，知りたい不均質性を十分に反映したデータを取得するための適切な計測法を示す必要があるが，計測法の妥当性を評価することは難しく，その方法論は確立していない．この問題に対処するために，逆解析結果やその予測の信頼性を定量的に評価することが必要となる．その一つとして，ブートストラップ法の適用が提案され，数値実験による検討が行われている[2),3)]が，実データによる検討までは行われていない．そこで本研究は，室内モデル実験により砂岩板を用いてエアパルステストを行い，得られたデータの逆解析により作成されたモデルによる予測の信頼性評価を試み，ブートストラップ法の適用可能性を検討した．なお，流体として空気を用いるのは，室内試験が比較的容易なことと，不飽和帯域を対象とする場合など，水より空気を用いるパルステスト法が想定されているためである[4),5)]．

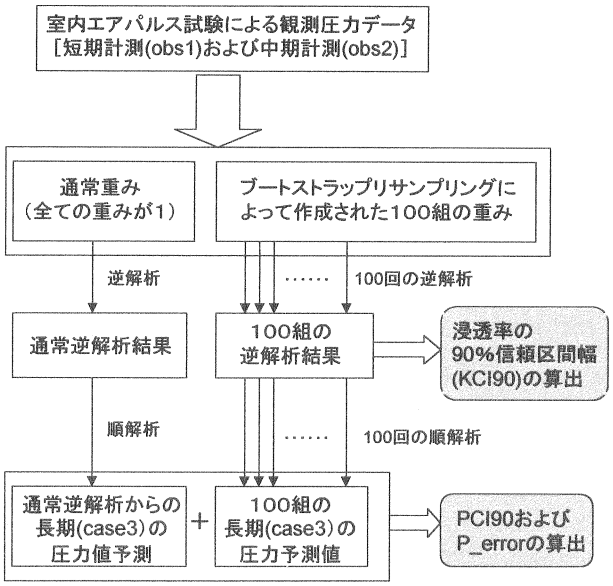


図-1　ブートストラップ法による逆解析結果と予測計算の信頼性指標の算出法

2．方法

2.1　信頼性評価法の概要

浸透特性逆解析結果および予測計算結果の信頼性を評価する方法としてブートストラップ法を応用した方法[3)]を用いる．以下にその概要を示す．

ブートストラップ法（Bootstrap method, Efron (1979)[6)]）は，未知の確率分布を持つ推定量の誤差や信頼区間を数値的に評価する方法であり，モンテカルロ法の一種である．これを応用して，逆解析により得られた不均質な浸透特性の信頼性や，逆解析結果に基づいた予測値の信頼性を評価する方法が増本[3)]により提案されている．その手順を図-1に示す．増本[3)]では観測データを

正解のモデルのシミュレーションにより作成し，数値実験（流体は水）を行い，正解のモデルとの比較検討をおこなっている．本研究では，2.2節で示す室内実験（流体は空気単相）で得られた圧力観測データを用いて，図-1の手順にしたがって逆解析結果および予測計算結果の信頼性指標を計算する．逆解析結果の信頼性指標として，未知パラメータ毎にブートストラップ法による90%信頼区間幅KCI90を算出する．

$$KCI90_m = K_m^6 - K_m^{95} \tag{1}$$

m:未知パラメータ番号,
$K^6{}_m$:m番目の未知パラメータの推定浸透率のうち，大きいほうから6番目の浸透率値,
$K^{95}{}_m$:m番目の未知パラメータの推定浸透率のうち，大きいほうから95番目の浸透率値

また，逆解析結果にもとづいた予測計算の信頼性指標PCI90は，時間ステップ毎の90%信頼区間幅の2乗和を観測点ごとに求めることにより算出する．

$$PCI90 = \sum_{n=1}^{Nt}\left(P_n^6 - P_n^{95}\right)^2 \tag{2}$$

n:時間ステップ番号, Nt:総時間ステップ数,
$P^6{}_n$:n番目の時間ステップの圧力予測値のうち，大きいほうから6番目の圧力予測計算値,
$P^{95}{}_n$:n番目の時間ステップの圧力予測値のうち，大きいほうから95番目の圧力予測計算値

ここでは，実データを扱うため，真の浸透特性は不明であるためKCI90の検証はできない．一方，逆解析で得られたモデル（浸透特性）による予測計算結果と，同じ供試体を用いた長時間観測結果とを比較することにより，PCI90の検証は可能である．長時間計測で得られた圧力値と予測計算結果（全ての重み=1）の差の2乗和を真の予測誤差P_errorとする．これとPCI90を比較することにより，ブートストラップ法による信頼性評価手法の妥当性を検討する．

$$P_error = \sum_{n=1}^{Nt}\left(P_est_n - P_true_n\right)^2 \tag{3}$$

P_est_n:n番目の時間ステップの，通常逆解析による推定浸透率分布を使用して予測した圧力予測計算値,
P_true_n:n番目の時間ステップの真の観測圧力値

本研究では，短時間計測による2種類（5分：obs1および20分：obs2）の計測データを用いて，計3ケースの逆解析モデルを検討する．各逆解析モデルを用いて，長時間（60分）の予測計算を行う．予測計算と同条件の室内実験(obs3)を行い，予測との適合性を検証する．

以下の節で，室内試験法と解析モデルの設定の詳細を示す．

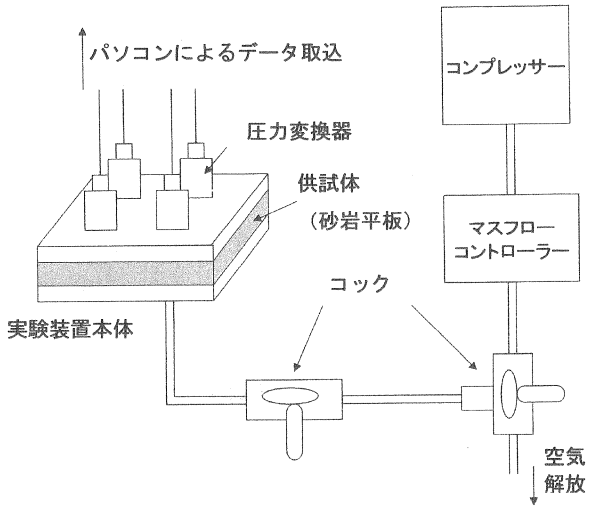


図-2 試験装置全体の概念図

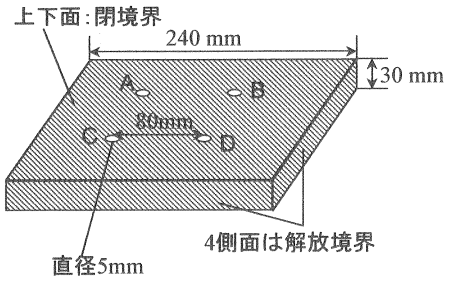


図-3 砂岩平板供試体

2.2 室内エアパルス試験と計測パターン

2.2.1 室内エアパルス試験法

試験装置全体の概念図を図-2に，砂岩平板からなる供試体を図-3に示す．供試体は，島根県産の河下砂岩（比較的均質で非常に細粒な凝灰質砂岩）を使用した．24cm×24cm×3cmの板状に整形し，直径0.5cmの孔を，4隅から縦・横それぞれ8cmの所に4箇所(A,B,C,D)に開けた．供試体は乾燥後に上下面を密閉して閉境界とした上で，上下をそれぞれ4箇所のネジ穴を持つアクリル板で挟み固定する．供試体側面の4辺は開放状態とする．4箇所の孔はオーリングで空気漏れを防ぐ構造となっている．上側のアクリル板には圧力変換器を取り付ける．下側のアクリル板は，1孔を空気圧入のための孔（ここでは発信孔と呼ぶ）としてチューブを接続し，他の3孔は閉塞バルブで閉境界条件とする．

エアパルス試験は，コンプレッサーで約5000hPaに圧縮した空気をマスフローコントローラーで一定流量に制御し，試験装置本体の発信孔に圧入して行う．その際，圧入と密閉をコックにより切り替えることによりパルス状の流量で空気を送り込む．発信孔および他の観測孔における圧力応答を上部に取り付けた圧力変換器により経時的に計測する．

試験手順を**図-4** に示す．圧力計測開始と同時に空気の圧入を開始し，一定時間圧入後，コックを切り替えて密閉する．パルス状圧入を繰り返す場合は，一定の密閉時間後に再度コックで切り替えて，同様の操作を行う．

2.2.2 計測パターン

計測パターンは**表-1** に示すように短期計測（obs1）・中期計測（obs2）・長期計測（obs3）の圧力データを取得する．短期計測（obs1）および中期計測（obs2）の試験は逆解析に使用するため，A，B，C，Dを発信孔とした計４回のエアパルス試験を行った．一方，長期計測（obs3）は圧力予測（順解析）に使用するため，A点を発信孔とする１回の試験のみを行った．

表-1 室内エアパルス試験の計測パターン

名前	計測時間	ﾊﾟﾙｽ回数	圧入流量	ﾊﾟﾙｽ１回の圧入停止時間
obs1	5 分	1 回	3.5cm³/s	30 秒圧入，570 秒停止
obs2	20 分	1 回	1.8cm³/s	60 秒圧入，1140 秒停止
obs3	60 分	3 回	1.0cm³/s	120 秒圧入，480 秒停止

2.3 数値解析法とモデル設定

2.3.1 数値逆解析法

解析は，Masumoto and Valle[2] と同様の方法を適用する．順解析は多孔質体内の圧縮性流体挙動を有限差分法で解く．逆解析は，準ニュートン法を基礎として，高速勾配計算法により順解析計算の繰り返し回数を最小限に抑えた方法である．また，逆解析の安定性を確保するために未知パラメータが空間的に滑らかに変化することを仮定したスムージングを行う（詳細は文献[1)2)3)7)]参照）．

2.3.2 逆解析モデル設定

砂岩平板の差分格子分割を**図-5** に示す．差分格子数を17×17=289 個に設定した．４辺の境界条件を一定圧条件とするため数値解析上はダミー格子を設け 10^8 と高い間隙率を与える．岩石部分の間隙率は 0.2 とした（発信孔と観測孔はのぞく）．ダミー格子を除く格子間浸透率は17×18＋18×17=612 個となり，これらを独立な未知パラメータとして逆解析を行う．時間ステップは各ケースとも５秒間隔とした．逆解析の初期推定値として浸透率は 0.1md を全パラメータに与える．統一した比較を行うために，逆解析における準ニュートン法の反復回数を 100 回で打ち切ることとした．

以上の条件は共通の設定条件として固定する．ただし，本試験装置の構造上，発信孔および観測孔を含む差分格子における間隙率の設定はチューブやネジ穴の容積を考慮して設定する必要がある．今回は，２つの間隙パターンとして，

ﾊﾟﾀｰﾝ１：発信孔も観測孔も間隙率=25 とする．

ﾊﾟﾀｰﾝ２：発信孔間隙率=25，他３観測孔間隙率=10．

の２通りについて逆解析を実施することとした．

このような設定を行ったのは，実際の容積計測からはパターン２が近い値を示すが，流体の出入りの無い観測孔における間隙率の影響は小さいので，パターン１も逆解析モデルとして使用できると考えたためである．パターン１の場合は，パターン２のように４点の発信ごとに間隙率の値を変化させる必要がないため，計算上容易なモデルとなるという点で，精度に問題がなければ好ましいといえる．表-2 に示すように，短期計測（obs1）に対してはパターン１およびパターン２，中期計測（obs2）に対してはパターン２のみを用いて逆解析を行った．

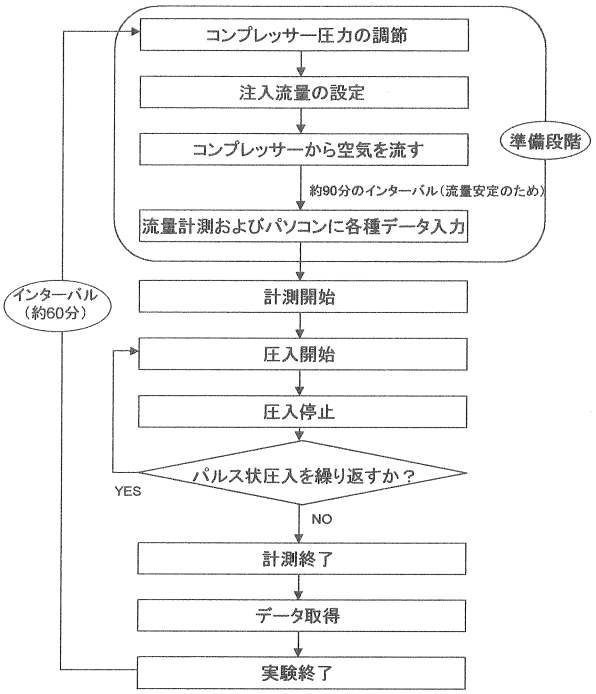


図-4 室内エアパルス試験の流れ図

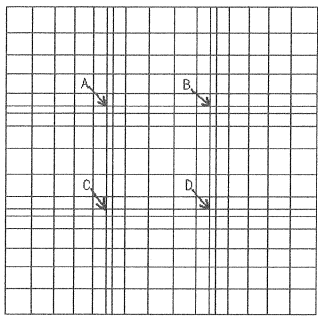


図-5 差分格子分割図

表-2 逆解析モデルのパターン

case 名	観測圧力データ	間隙率設定パターン
case1	obs1	パターン１
case2	obs1	パターン２
case3	obs2	パターン２

予測モデルは，推定された格子間浸透率分布にもとづいて，**表-1** における長時間計測（obs3）の３サイクルパルス状の流量パターンとし，順解析計算を行って予測計算値を得る．**表-2** の各 case の予測計算結果と obs3 の観測圧力値を比較する．

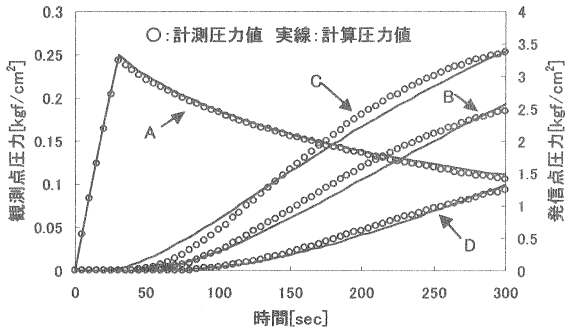


図-6 case1 の圧力マッチング結果(発信孔 A の場合)

3. 結果と考察

3.1 室内試験および逆解析の結果

case1 の観測圧力値と逆解析による計算圧力値の内，発信孔 A の場合を例として図-6 に示す．図より，B, C, D の観測点圧力の立ち上がり部分の適合性が良くないものの，各観測点の圧力応答の違いが良く再現されていることがわかる．このときの逆解析による浸透率分布推定結果と，浸透率分布の 90%信頼区間幅 KCI90 をそれぞれ図-7(a)，(b)に示す．最大の KCI90 値は 19.45 となった．

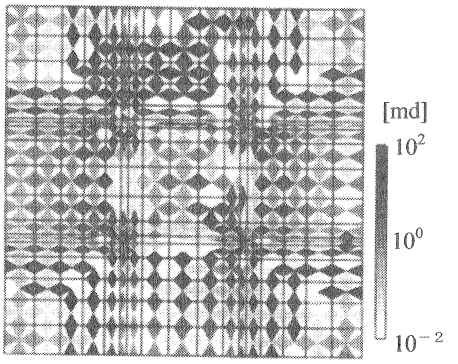
同様に，case2 の圧力マッチング結果を図-8 に示す．図-6 と比較すると，case2 の方が，観測圧力値と計算圧力値の差が小さく，観測圧力の立ち上がり部分の適合性も改善されている．また，case2 の逆解析による浸透率分布推定結果と，浸透率分布の 90%信頼区間幅を図-9 に示す．最大の 90%信頼区間幅は 1.73 となり，case1 に比べて小さくなっている．これらの結果は，発信孔と観測孔の間隙率を変えたパターン 2 の方がより適切なモデルであることを示している．

同様に case3 の圧力マッチングを図-10 に示す．発信孔の圧力値が若干誤差が見られるものの，観測圧力値と計算圧力値が良く適合していることがわかる．このときの浸透率分布推定結果と，浸透率分布の 90%信頼区間幅を図-11 に示す．最大の 90%信頼区間幅は 0.54 と，3case の中では最小の値となり，計測データが多い分だけ推定結果のバラツキが小さくなったと考えられる．

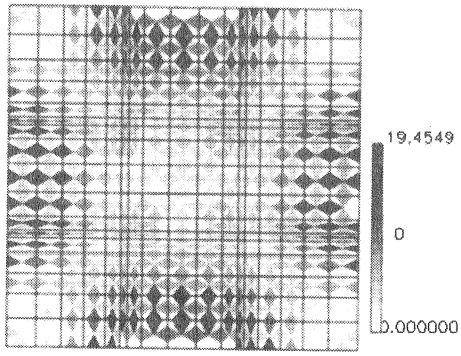
3.2 予測の結果と信頼性評価

case 1, 2, 3 の長時間圧力予測を行った結果の内，例として発信孔 A と観測孔 B の結果を図-12, 図-13, 図-14 に示す．これらの図から case1, case2, case3 の順で，圧力値の 90%信頼区間幅が狭まっていることがわかる．case1 は圧力予測が計測結果と適合性しておらず，信頼区間幅も非常に大きいことがわかる．case2 は 90%信頼区間が狭まるが観測圧力値が 90%信頼区間幅からはずれている．case3 になると，90%信頼区間幅が図から判別できないほど狭まり，case2 同様観測値がずれているが，他の 2case よりは予測計算値と近い値を示していることがわかる．

これら 3 case の各観測点における PCI90 と P_error の相関図を図-15 に示す．この図からも case3 が最も予測



(a) 浸透率逆解析結果



(b) 逆解析結果の 90%信頼区間幅 (KCI90)

図-7 case1 の浸透率逆解析結果とその信頼性

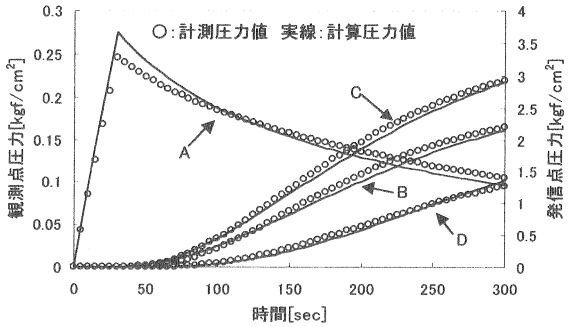


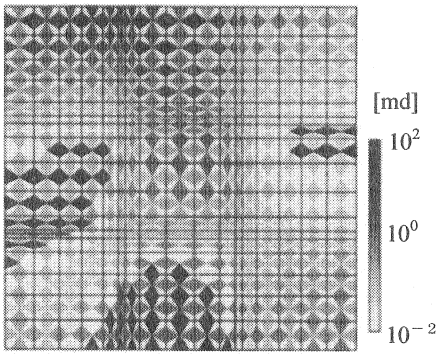
図-8 case2 の圧力マッチング結果(発信孔 A の場合)

精度が高いことがわかる．両対数グラフではあるが，相関係数は r=0.997 と比較的高い値となった．このことから，計測圧力値は圧力の 90%信頼区間幅の中に収まらないものの，試験形態と逆解析モデルの違いを相対的に評価する上でブートストラップ法が適用できる可能性があることが示唆される．

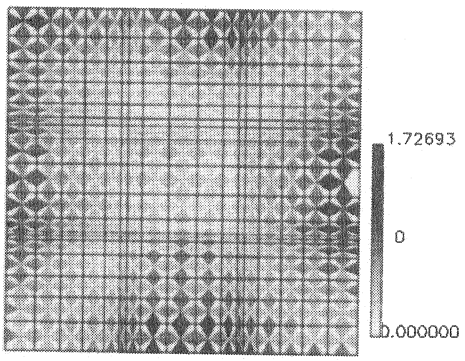
計測圧力値が圧力の 90%信頼区間幅の中に収まらなかった理由としては，浸透率分布以外のパラメータ（間隙率や観測点の境界条件）を既知として扱っていることなどが考えられ，今後の検討が必要である．

4. 結論

砂岩平板を用いた室内エアパルス試験から得られた圧力データを使用して，ブートストラップ法による逆解析

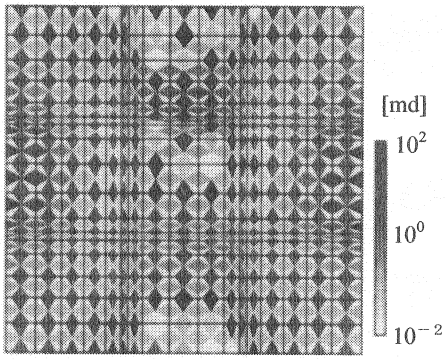


(a) 浸透率逆解析結果

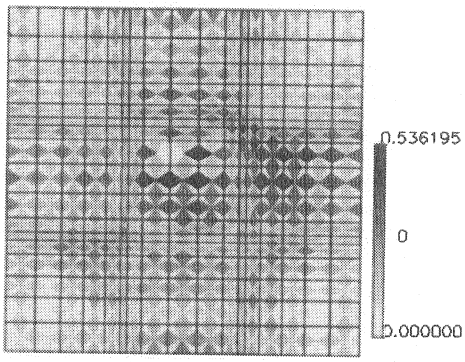


(b) 逆解析結果の 90%信頼区間幅 (KCI90)

図-9 case2 の浸透率逆解析結果とその信頼性



(a) 浸透率逆解析結果



(b) 逆解析結果の 90%信頼区間幅 (KCI90)

図-11 case3 の浸透率逆解析結果とその信頼性

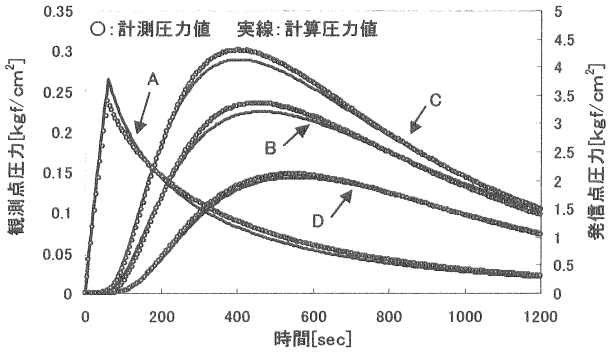
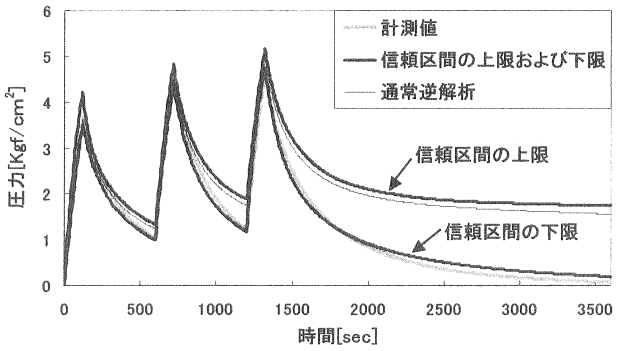
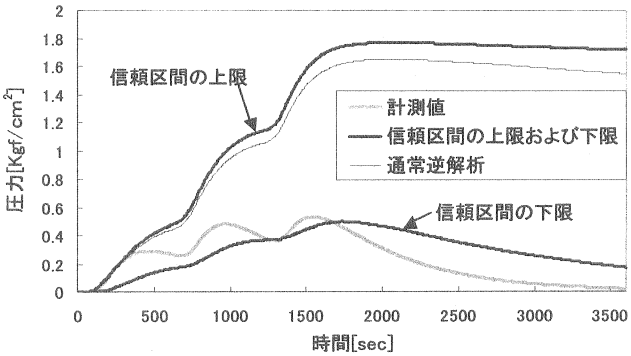


図-10 case3 の圧力マッチング結果(発信孔 A の場合)



(a) 発信孔 A の圧力値



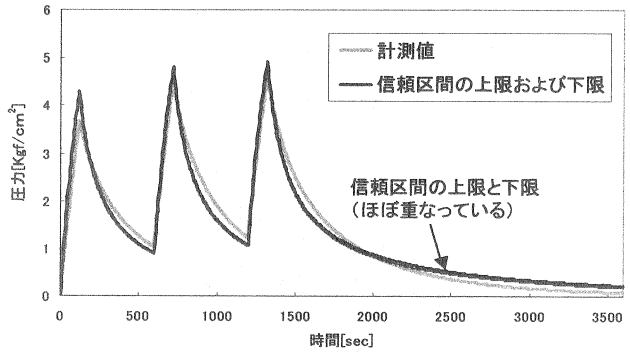
(b) 観測孔 B の圧力値

図-12 case1 の長期圧力予測とその信頼区間
(発信孔 A の場合)

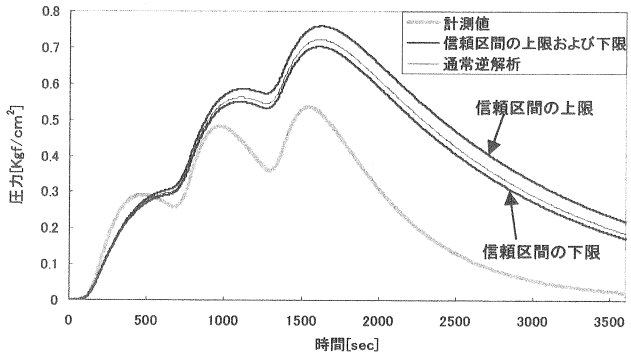
結果および予測計算結果の信頼性評価法に関する検討を行った．その結果，計算圧力値の 90%信頼区間幅の中に計測圧力値は収まらないものの，ブートストラップ法による予測の信頼性指標 PCI90 と，実際の予測誤差の間に相関性があることが示された．このことから，浸透特性逆解析問題において，ブートストラップ法は計測形態や逆解析モデルを相対的に評価する上で有効なツールとなる可能性が示された．

謝辞

解析コードの一部に，登坂博行博士(東京大学工学研究科)作成のソルバーを使用しました．記して謝意を表します．

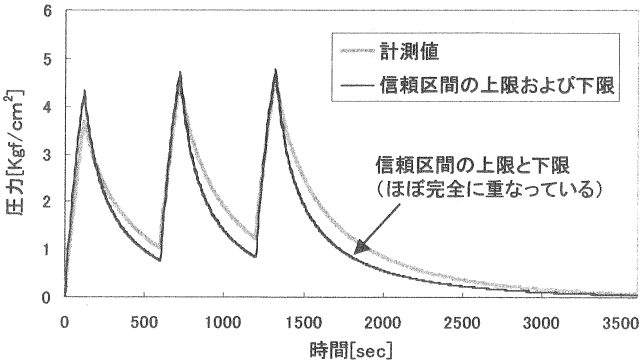


(a) 発信孔 A の圧力値

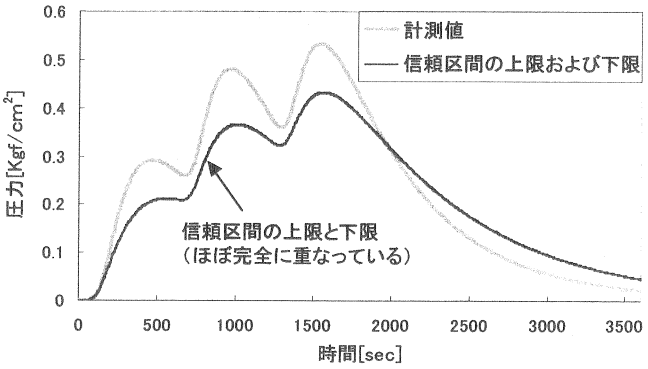


(b) 観測孔 B の圧力値

図-13 case2 の長期圧力予測とその信頼区間
(発信孔 A の場合)



(a) 発信孔 A の圧力値



(b) 観測孔 B の圧力値

図-14 case3 の長期圧力予測とその信頼区間
(発信孔 A の場合)

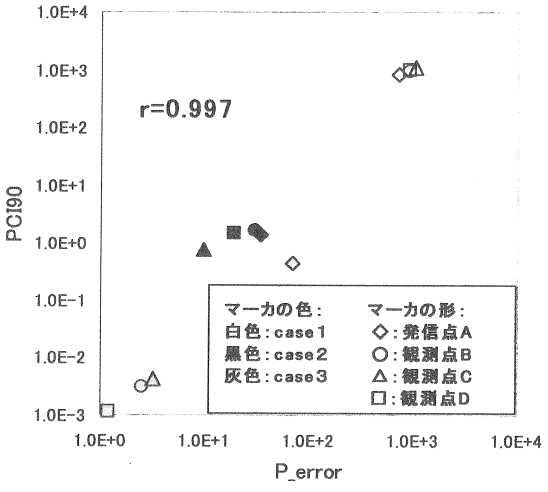


図-15 PCI90 と真の予測誤差との相関

参考文献

1) Tosaka,H., Masumoto,K. and Kojima,K. : Hydropulse Tomography for Identifying 3-D Permeability distribution. Proc. Int. High Level Radioactive Waste Management Conf., Las Vegas,Nevada,U.S.,pp.955-959, 1993.

2) Masumoto,K. and Valle,M. : Confidence intervals of hydraulic properties estimated by highly efficient numerical inversion with pressure change rate matching, Proceedings of the International Symposium 2000 on Groundwater,IAHR in Omiya, pp.375-380, 2000.

3) Masumoto,K.: Prediction error of groundwater behavior by inverse modeling with bootstrap re-sampling method, Proc. of Int. Symposium on Groundwater Problems related to Geo-Environment, IS-Okayama, pp.579-584, 2003.

4) 登坂博行，小島圭二，増本清，穂刈利之：ガスパルステストを用いた地層水理特性評価手法の基礎的研究，日本応用地質学会平成元年度研究発表会講演論文集，pp.41-44, 1989.

5) Illman, W. A. and Neuman, S. P. : Type-curve interpretation of a cross-hole pneumatic injection test in unsaturated fractured tuff, WRR, 37, pp.583-603, 2001.

6) Efron.B. : Bootstrap methods: another look at the jackknife, Ann. Statist, 7, pp.1-26, 1979.

7) 増本清，登坂博行，小島圭二：多点非定常圧力とその時間変化率の同時自動マッチングによる岩盤水理特性逆解析 － 3 次元基本アルゴリズムの開発，日本地下水学会誌，Vol.40, No.3, pp.273-287, 1998.