

## 室内空気圧入試験データによる不均質浸透特性逆解析における境界条件設定の影響

### Influence of Boundary Condition Setting in Heterogeneous Permeability Inversion Using Laboratory Air Injection Test Data

増本 清 Kiyoshi MASUMOTO (島根大学総合理工学部)  
永井康介 Kousuke NAGAI (島根大学院総合理工学研究科)

不均質な地下流動特性の推定に逆解析手法が用いられるが、境界条件設定の適切性に関する検討はあまり行われていない。そこで、本研究では境界条件設定の違いが逆解析結果に及ぼす影響を検討するため、砂岩平板を用いた室内空気圧入試験で得られた圧力データを用いて多様な境界設定に対する逆解析を行い、その結果を比較した。同時に、初期推定値・評価関数形を変更した逆解析も行った。その結果、境界設定の一部のみを変更しても、浸透率分布・圧力値とも良好なマッチング結果が得られた。このことから、逆解析を行う際に一部の境界条件設定が異なっても、その結果は信頼できる可能性があることが示された。

キーワード：不均質，浸透特性，室内実験，空気圧入試験，逆解析，境界条件，(IGC：D-4, G-7)

#### 1. はじめに

不均質な地下水理物性分布を考慮した地下水モデルを構築するためには、地下水理物性分布を把握する必要がある。不均質不飽和条件下の地下水モデルを構築する有効な手法として、複数孔を用いた水理試験により得られた非定常圧力データを逆解析することにより地下水理物性分布を推定するハイドロパルストモグラフィが提案されている<sup>1),2)</sup>。この手法の妥当性を評価するために、数値実験等により様々な検討<sup>3),4),5),6)</sup>が行われている。一方、不均質な地下における流体挙動モデリングにおいて、境界設定を扱ったものとして、境界位置を逆解析により推定する方法とその数値実験<sup>7)</sup>、境界条件を未知量として逆解析する方法<sup>8)</sup>などがあるが、その後、境界の影響を積極的に検討した研究は見られない。そこで本研究は、不均質浸透特性逆解析において境界設定の及ぼす影響を調べた。ここでは、2次元平板モデルを用いた室内空気圧入試験により得られた非定常データを用いて、意図的に室内実験と異なる条件の逆解析を行い、不均質浸透特性逆解析における境界条件設定の違いが逆解析結果に及ぼす影響について検討した。

なお、4観測点内部の不均質性を逆解析によりある程度推定できることは、同様の試験形態に対して、Masumoto et al.<sup>1)</sup>により実証されている。Masumoto et al.<sup>1)</sup>と同様の検証を行うためには、岩石内部の加工を要する。しかし、本研究では境界面を加工した実験を行う必要があったため、内部の不均質性の検証は行わず、ある程度内部が推定できていると仮定して検討を行った。

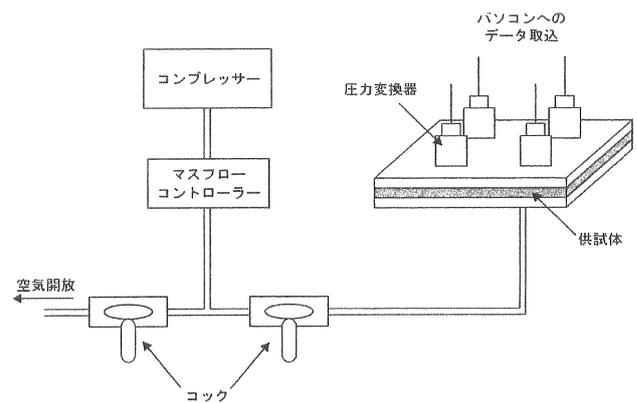


図-1 実験装置全体の概念図

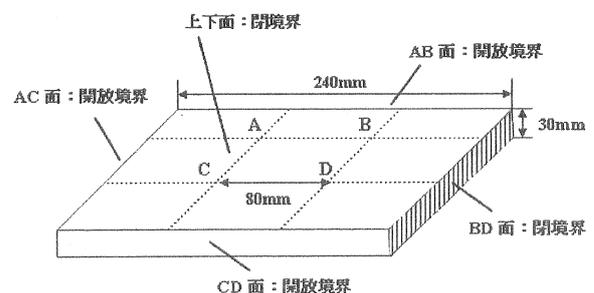


図-2 砂岩平板供試体

#### 2. 室内空気圧入試験

##### 2.1 室内空気圧入試験法

試験装置全体の概念図を図-1に、試験装置本体である砂岩平板供試体を図-2に示す。供試体は比較的均質で非常に細粒な、島根県出雲市河下町産の凝灰質砂岩を

使用した。24cm×24cm×3cmの板状に整形し、4隅から縦・横それぞれ8cmの位置に直径5cmの孔を、4箇所(A, B, C, D)開けた。供試体は十分乾燥させた後、上下面にエポキシ系接着剤を塗ることにより閉境界とした。さらに、上下を供試体と同位置に穴をあけたアクリル板で挟み、固定した。室内試験における境界の影響を見るため、孔B, Dに近い側面(図-2に示すように、これをBD面とする)を、上下面同様、接着剤を塗ることにより閉境界とし、その他の3側面は開放境界とした。上側のアクリル板に圧力変換器を取り付け、下側から空気を圧入し、各孔における圧力値を経時的に計測する。空気圧入は4孔のうち1孔から行い、その他の孔は閉鎖バルブを取り付ける。

空気圧入試験では、コンプレッサーで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、実験装置本体である供試体への圧入を行う。その際、2つのコックを切り替えることにより、空気の圧入・停止を繰り返したパルス状の空気を送り込む。

なお、BD面を閉境界とする前にも試験を行い、計測データへの影響を確認することとした。

## 2.2 計測パターン

計測パターンは、圧力変換器の制約、圧入流量、時間等を総合的に考慮して決定した。計測は、孔AからDまで、それぞれを圧入点として、計4回行った。いずれの実験も、60秒圧入し、240秒停止を2回繰り返した、計20分計測とし、圧入流量はいずれも約1.5ml/secとした。

## 3. 数値解析法と逆解析モデル設定方法

### 3.1 数値解析法

順解析は、有限差分法を用いて解く。逆解析には、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を用いた。また、逆解析の安定性を考慮したスムージングを行っている。

評価関数Jは、圧力残差2乗和に圧力の時間変化率残差2乗和を加えた形を使用した。

$$J = \sum W(p_{cal} - p_{obs})^2 + \lambda \sum W \left( \frac{\Delta p_{cal}}{\Delta t} - \frac{\Delta p_{obs}}{\Delta t} \right)^2 \quad (1)$$

$$\Delta p = p^n - p^{n-1} \quad (2)$$

$W$  : 重み,  $\lambda$  : 変化率項の係数

$p_{cal}$  : 計算圧力値,  $p_{obs}$  : 計測圧力値

$n$  : 時間ステップ番号

逆解析において変化率マッチングを加えない場合、式

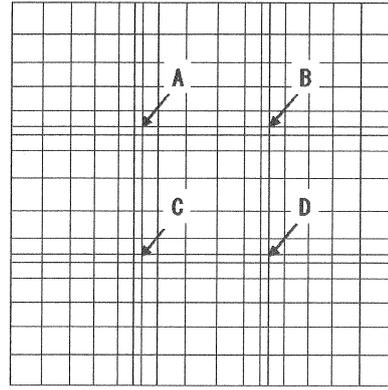


図-3 差分格子分割図

(1)において $\lambda=0.0$ とすることによって、圧力残差2乗和のみの評価関数式となる。変化率マッチングを加える場合は、 $\lambda$ に値を入れることによって変化率項を加えた評価関数式となる。

### 3.2 逆解析モデル設定方法

砂岩平板の差分格子分割図を図-3に示す。差分格子数は $17 \times 17 = 289$ 個とした。開放境界部は一定圧条件とするため、数値解析上ではダミー格子を設け、 $10^8$ と高い間隙率を与える。孔部分の間隙率は、チューブ、ねじ穴等を考慮し、発信孔の間隙率を25.0、観測孔間隙率を10.0とした。岩石部分の間隙率は0.2とした。ダミー格子を除く、 $17 \times 18 + 18 \times 17 = 612$ 個の格子間浸透率を、独立な未知パラメータとして逆解析を行う。しかし、境界条件設定の際に閉境界として逆解析を行う場合、ダミー格子は不要となり、そのため求める未知パラメータの個数も変わる。時間ステップは10秒間隔とし、浸透率の初期推定値として全パラメータに0.5mdを与える。以上を基本の設定条件として逆解析を行う。

本研究では、逆解析における境界条件設定の違いが逆解析結果に及ぼす影響を検討するために、実験条件と必ずしも一致しない境界条件設定を用いて逆解析を行い、それぞれの逆解析浸透率結果・圧力挙動結果を比較検討した。さらに、計算結果の信頼性を検証するために浸透率初期推定値・評価関数形を変更した計算もあわせて行った。

初期推定値に関しては、使用した凝灰質砂岩の浸透率が0.1~1.0md程度であること<sup>5)</sup>を踏まえ、その平均的な値である0.5mdに加えて、その範囲内の比較的離れた値である0.1mdを代表として選び、違いを検討することとした。

逆解析における境界条件設定パターンを表-1に示す。室内実験はBD面を閉境界として行っているため、BD面のみを閉境界とした境界条件設定を通常逆解析とし、一面・二面・三面を変更した逆解析を行う。逆解析を行う際のモデル境界面は、BD面同様に、孔に近い境界面を、それぞれAB面、AC面、CD面とする(図-2参照)。

変化率マッチングを加えた逆解析では、case1-1の設

表-1 境界条件設定パターン

	境界条件設定	初期推定値
case1-1	BD 面のみ閉境界 (実験条件と一致)	0.5md
case1-2	全面開放境界	0.5md
case1-3	AC,CD,BD 面閉境界	0.5md
case1-4	全面閉境界	0.5md
case2-1	BD 面のみ閉境界 (実験条件と一致)	0.1md
case2-2	全面開放境界	0.1md
case2-3	AC,CD,BD 面閉境界	0.1md
case2-4	全面閉境界	0.1md

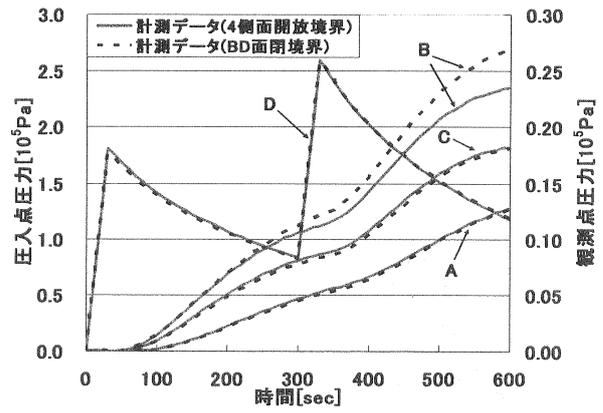
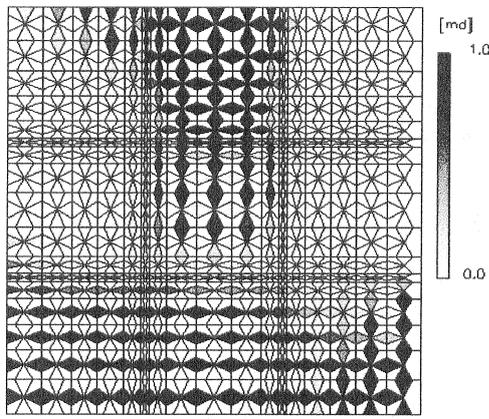
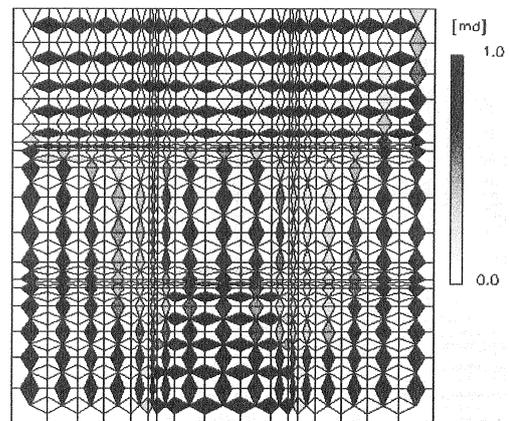


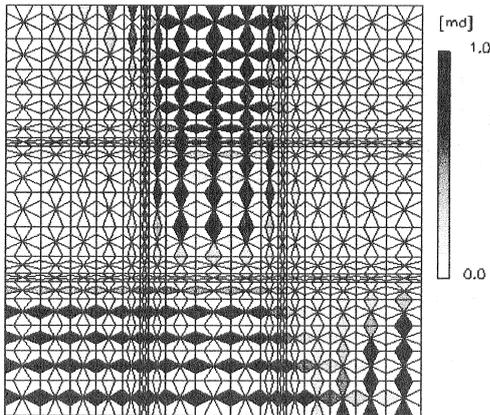
図-4 異なる境界条件による計測圧力値



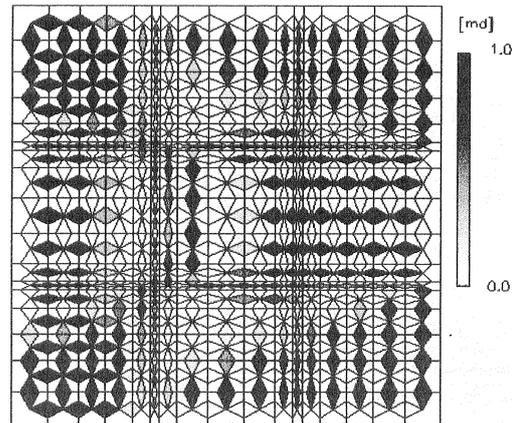
(a) case1-1



(c) case1-3



(b) case1-2



(d) case1-4

図-5 case1 の浸透率の逆解析結果

定条件に対し、式(1)において $\lambda = 1.0 \times 10^{-8}$ とした評価関数式を用いた。

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 異なる境界条件による計測データの比較

計測データの妥当性を検討するために、砂岩平板供試

体の4側面を開放境界にした場合と、BD面のみを閉境界とした室内実験の比較結果を示す。ここでは、一例として、境界の影響が大きく現れたD点圧入の結果を図-4に示す。なお、この例は30秒圧入し、270秒停止を二回繰り返しており、圧入流量は約2.0ml/secの場合である。図より、B点において両者の圧力挙動に明瞭な差が見られ、境界の影響が出ていることがわかる。

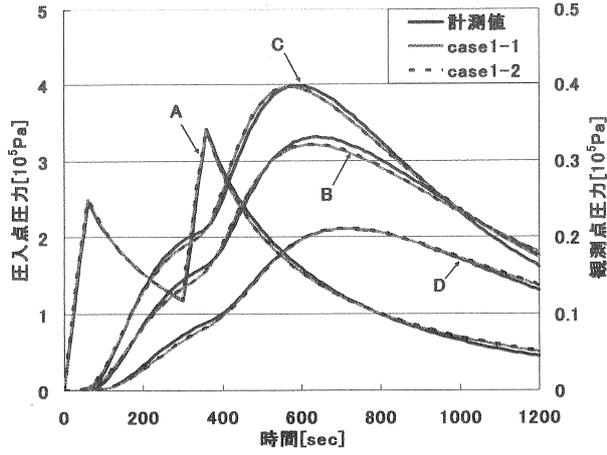


図-6 case1-1, 1-2 の圧力マッチング結果

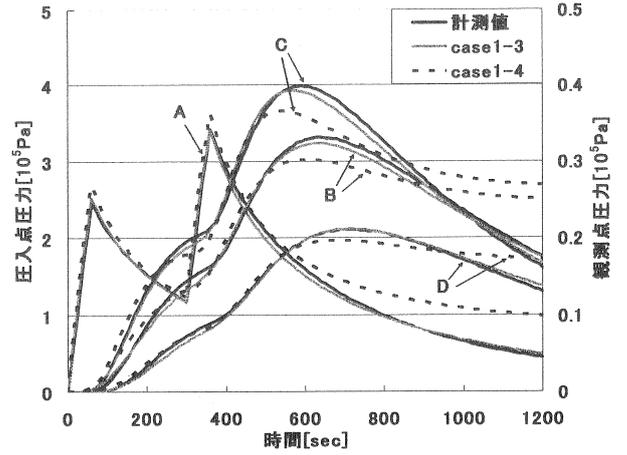
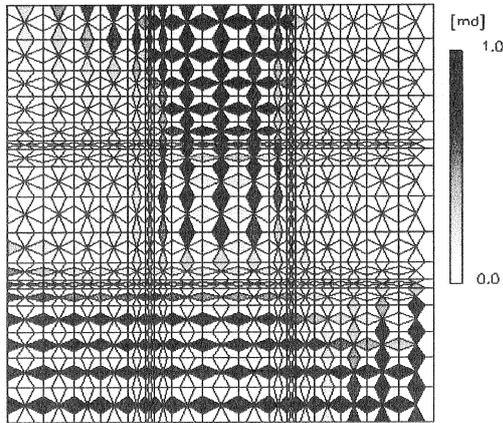
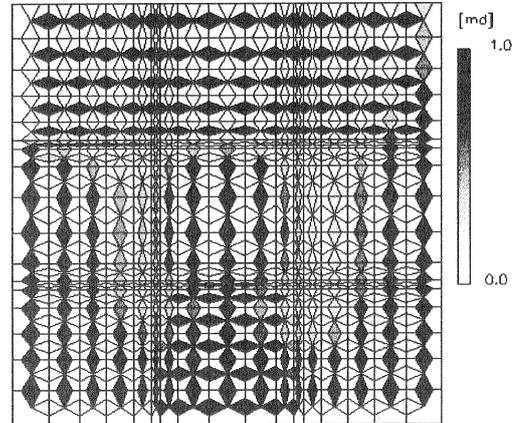


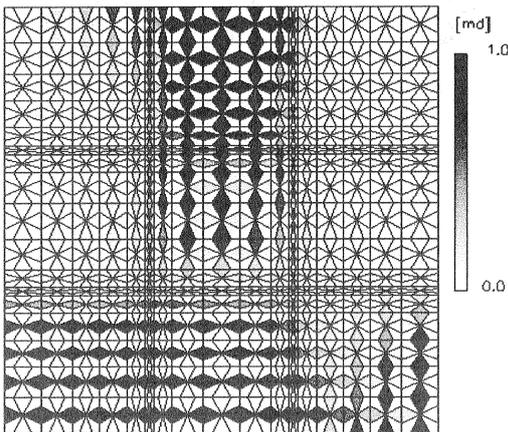
図-7 case1-3, 1-4 の圧力マッチング結果



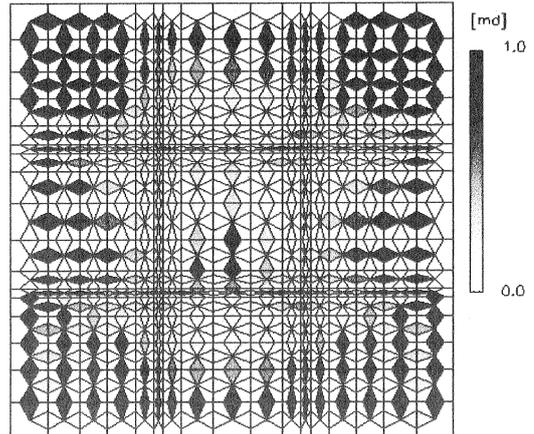
(a) case2-1



(c) case2-3



(b) case2-2



(d) case2-4

図-8 case2 の浸透率の逆解析結果

#### 4.2 多様な境界設定における逆解析結果

case1-1・case1-2 の逆解析浸透率結果を図-5(a)(b)に、それぞれの結果を用いた圧力マッチング結果を、A点発信を例として図-6に示す。両者の結果を比較すると、AB面境界付近やモデル右下部の浸透率分布は多少異なるものの、モデル中心部(A, B, C, Dの4観測点に囲

まれた内部領域)は比較的一致していた。さらに、計算圧力値も計測値と比較的一致していた。同様に、case1-3・case1-4の逆解析浸透率結果を図-5(c)(d)に、それぞれの結果を用いた圧力マッチング結果を図-7に示す。図-5(a)と比較すると、図-5(c)では、モデル中心部のAB, CD面方向(縦方向)の浸透率が高く、AC, BD面方

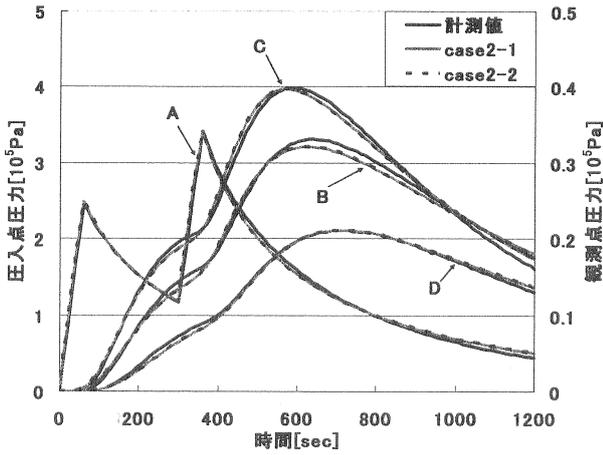


図-9 case2-1, 2-2 の圧力マッチング結果

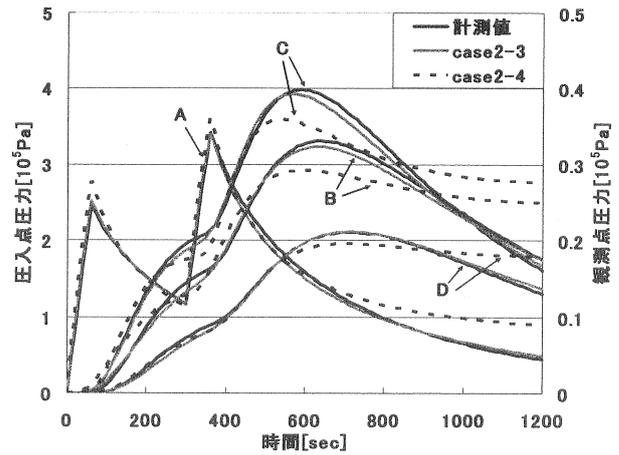
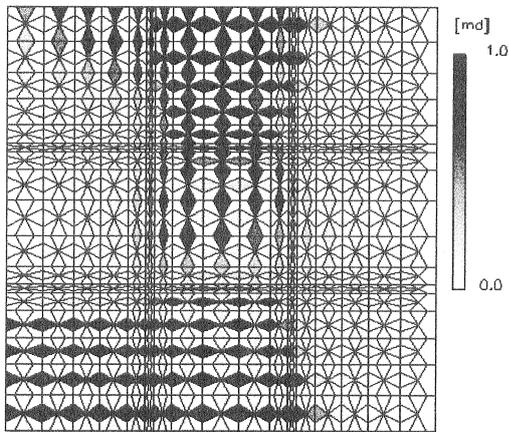
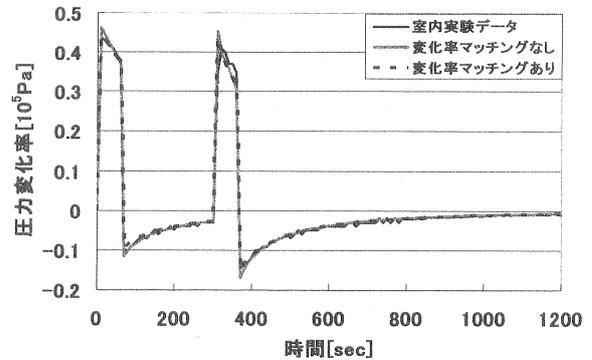


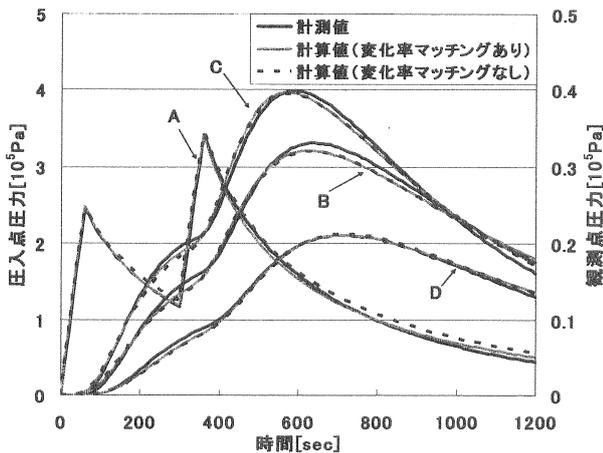
図-10 case2-3, 2-4 の圧力マッチング結果



(a) 変化率マッチングを加えた逆解析結果

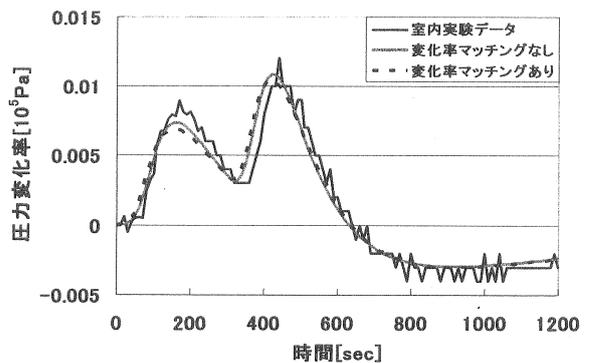


(a) 圧入点圧力変化率 (A点)



(b) 圧力マッチング結果

図-11 変化率マッチングを加えた逆解析



(b) 観測点圧力変化率 (B点)

図-12 変化率マッチング

向(横方向)の浸透率が低いという傾向はあっているが、図-5(b)ほど一致しておらず、また、4 観測点の外側は図-5(a)(b)と大きく異なっている。一方、図-5(d)は4 観測点の内部・外部ともほとんど一致していないことがわかる。圧力値は、case1-3は計測値に比較的一致して

いるものの、case1-4は、明らかに計測値と一致していない。

以上のことから、逆解析を行う際に一部の境界条件設定が異なっても、圧力挙動がよく一致している場合、観測点内部の浸透率分布は信頼性があると考えられる。

### 4.3 初期推定値を変更した逆解析結果

浸透率の初期推定値を0.1mdとし、同様に境界設定を

変更した逆解析を行った。case2-1・case2-2 の逆解析浸透率結果を図-8(a)(b)に、case2-3・case2-4 の結果を図-8(c)(d)に示す。さらに、それぞれの圧力マッチング結果を図-9、図-10に示す。図より、初期推定値を変更しても、浸透率分布・圧力挙動ともに初期推定値を変更する前と同様の結果が得られ、初期推定値の違いによる不安定性は無いことがわかる。

#### 4.4 変化率マッチングを加えた逆解析結果

圧力変化率マッチングを加えた逆解析結果と圧力マッチング結果を図-11(a)(b)に示す。変化率マッチングを加えた場合、モデル右側の境界付近で浸透率分布が大きく異なるが、モデル中心部では、ほぼ同様の分布が得られた。しかし、実験と異なる境界設定で行った逆解析は計算が途中で発散してしまい結果が得られなかった。このことから、変化率マッチングを加えた場合、逆解析において境界条件設定はより重要であると考えられる。逆に、変化率マッチングを利用して境界条件設定の妥当性を判別できる可能性が示唆される。

次に、一例として、圧入点変化率(A点)と観測点変化率(B点)を図-12(a)(b)に示す。図より、圧入点では圧力変化率のマッチングが良好になったが、その他の観測点では良好なマッチング結果が得られなかった。このことから、この場合、圧入点の圧力変化率マッチングは改善されるものの、その他の観測点の圧力変化率マッチングは改善されないということがわかる。これは、重み付けの影響と考えられ、今後さらに検討が必要である。

## 5. 結論

室内空気圧入試験から得られた圧力データを用いて、実験条件とは異なる条件で逆解析を行い、境界条件設定の違いが逆解析結果に及ぼす影響を検討した。その結果、一部の境界条件設定が異なっても、圧力挙動がよく一致している場合は、観測点内部の浸透率分布は信頼性があることが示された。さらに、初期推定値を変更した場合、変更する前と同様の結果が得られ、初期推定値の違いによる逆解析の不安定性はないことが示された。一方、変化率マッチングを加えた場合、実験と異なる境界設定で行った逆解析は計算が途中で発散してしまい、境

界条件設定に対する感度が高くなった。このことから、変化率マッチングを加えた逆解析により境界設定の妥当性を判別できる可能性があることが示唆された。

## 謝辞

島根大学生谷口貴久氏には、室内空気圧入試験においてご協力いただきました。心より感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Masumoto, K., Tosaka, H., Ito, K. and Otsuka, Y.: New Measuring System and High Speed Three Dimensional Inversion Method for Hydropulse Tomography., Proc. International Congress on Rock Mechanics, ISRM, pp. 847-850, 1995.
- 2) 増本清, 登坂博行, 小島圭二: ハイドロパルストモグラフィ—岩盤内の3次元透水性分布を描き出す技術—, 地下水技術, Vol. 37, No. 6, pp. 11-23, 1995.
- 3) 増本清, 登坂博行, 小島圭二: ハイドロパルストモグラフィ—技術による多孔質媒体不均質性の逆同定, 東京大学工学部総合試験所年報, Vol. 55, pp. 193-198, 1996.
- 4) 増本清, 登坂博行: 実スケールモデルによる地下水理逆解析結果の信頼性評価ケーススタディ, 第48回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 331-338, 2003.
- 5) 増本清, 錦織信吾: 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, 地盤と建設, Vol. 21, No. 1, pp. 115-120, 2003.
- 6) 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, 第40巻, 第3号, pp. 273-287, 1998.
- 7) W. H. Chen and J. H. Seinfeld: Estimation of the Location of the Boundary of a Petroleum Reservoir, Soc. Pet. Eng. J, 15(2), pp. 19-38, 1975.
- 8) G. Chavent and M. Dupuy: History Matching by Use of Optimal Theory, Soc. Pet. Eng. J, 15(1), pp. 74-86, 1975.

(2005年7月25日 受付)