

P- 8. 砂岩平板モデルを用いた室内エアパルス試験による

境界条件推定法の検討

Examination of Boundary Condition Estimating Method by Laboratory Air Pulse Test using Sandstone Monotonous Model

増本 清 (島根大学大学院総合理工学研究科)

○永井康介 (島根大学大学院総合理工学研究科)

1. はじめに

不均質な地下水物理性分布を考慮した地下水モデルを構築するためには、地下水物理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流圧力データを逆解析することにより地下水物理性分布を推定するハイドロパルストモグラフィーが提案され¹⁾、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が行われている²⁾。しかし、ハイドロパルストモグラフィー手法の妥当性評価に関するこれまでの研究において、地下水物理性値（浸透率等）は逆解析により推定されているが、境界条件については、既知として扱われることが多く、逆解析により推定されている例は少ない。一方、境界の推定に関する例として、Chen and Seinfeld(1975)³⁾では境界の位置の推定を、Jyrkama and Sykes(2006)⁴⁾では涵養量・涵養域の推定が行われている。しかし、これらの研究例では、境界条件と物理性値を同時に推定することや、3種類全ての境界条件を推定するといったことは行われていない。

より信頼性の高い地下水モデルを構築するためには、地下水物理性分布だけでなく境界条件の把握も重要である。そのために、境界条件も逆解析により推定する必要がある。そこで本研究では、多孔質体内の流体流動モデルにおける境界条件を推定するために、境界条件を表すパラメータ (α , β) を導入し、それらを未知パラメータとした逆解析プログラムを開発した。さらに、砂岩平板モデルを用いた室内エアパルス試験により得られた圧力データを用いて、開発した逆解析プログラムの妥当性を検討した。

2. 境界条件の数値逆解析法

2.1 逆解析法の概要

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。

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。

$$J = \sum W (P_{cal} - P_{obs})^2 \quad \dots (1)$$

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

2.2 境界条件パラメータの導入

地下水モデルにおける境界条件は一般に3種類考えられている。境界部において圧力値を指定する第一種境界条件，流量を指定する第二種境界条件，圧力値と流量の線形関係を指定する第三種境界条件である。本研究では，境界条件を表すパラメータ（ α ， β ）を導入し，これら3種類全ての境界条件を表現できる式を用いた。

$$\alpha \frac{\partial \Phi_0}{\partial X} + (1 - \alpha) \Phi_0 = \beta \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial X} = \frac{1}{2} (-\Phi_2 + 4\Phi_1 - 3\Phi_0) \quad \dots (3)$$

ここで， α, β は境界条件パラメータ， Φ_0 はモデル境界部における水理ポテンシャルを表す。(2)式において， $\alpha = 1$ のとき第一種境界条件， $\alpha = 0$ のとき第二種境界条件， $0 < \alpha < 1$ のとき第三種境界条件を表す。本研究では，境界条件パラメータ α, β を未知パラメータとして逆解析を行った。

3. 室内エアパルス試験

3.1 室内エアパルス試験方法

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。室内エアパルス試験は，増本ほか(2005)⁵⁾と同様の試験方法で行った。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秒圧入後240秒停止を2回繰り返す，その後10分停止した計20分計測とし，圧入流量はいずれも約1.5ml/secとした。

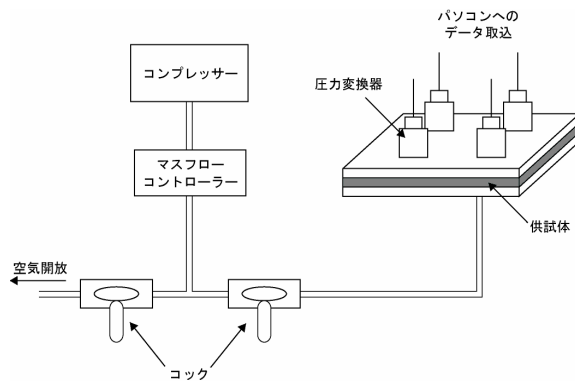


図-1 実験装置全体の概念図

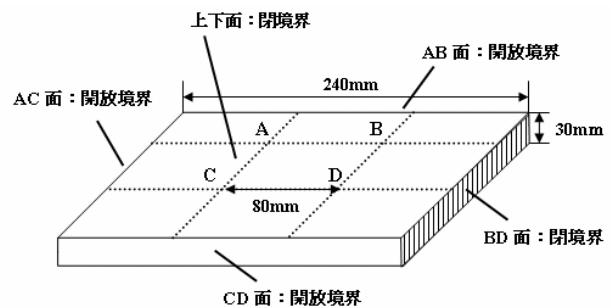


図-2 砂岩平板供試体

3.2 室内エアパルス試験データの逆解析法

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。また，室内実験同様，B, D 点に近い側面を BD 面とする。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，観測孔の間隙率を 10.0 とした。岩石部分の間隙率は 0.2 とした。境界に接する格子ごとに境界条件パラメータ（ α ， β ）を与え，その個数は $17 \times 4 + 18$

×4=136 個である。境界条件パラメータの初期値は、BD 面の α を 0.999d0, β を 0.0d0 とし、その他の面は α を 1.0d-5, β を 101325.0d0 とした。浸透率は全パラメータに 0.5md を与える。未知パラメータの初期推定値、個数を様々に変えた計算を行った。

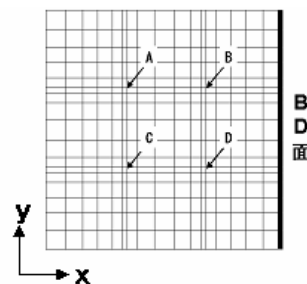


図-3 差分格子分割図

4. 結果と考察

4.1 室内エアパルス試験結果

一例として、A 点発信の室内エアパルス試験結果を図-4 に示す。図より、圧入点 (A 点) からの距離により、B, C, D 点での圧力挙動に明瞭な差が見られる。また、B 点での圧力値が C 点での圧力値に比べあまり減少しておらず、境界の影響が出ていることがわかる。逆解析ではこれらの圧力データに加え、B, C, D 点を発信点とした圧力データも入力データとして使用した。

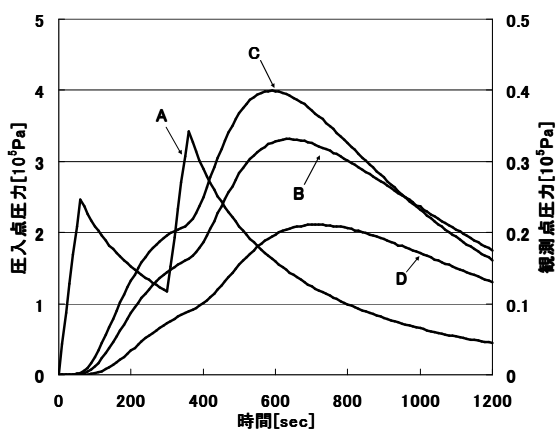


図-4 室内エアパルス試験結果 (A 点圧入)

4.2 室内エアパルス試験データの逆解析結果と考察

一例として、ここでは、浸透率は x 方向と y 方向の 2 個、境界条件パラメータは面毎に α と β 1 個ずつの計 10 個の未知パラメータとして行った逆解析結果を示す。逆解析反復に伴う評価関数値の変化を図-5 に示す。図-5 より、評価関数値が逆解析反復とともに減っていることがわかり、このことから、境界条件パラメータを組み込んだ逆解析が適切に行われていると考えられる。次に、逆解析反復に伴う未知パラメータの変化を図-6, 7, 8 に示す。図-6, 7, 8 より、浸透率はある程度特定の値に収束していることがわかる。一方、境界条件パラメータは、AB 面の β を除き反復 21 回までは修正が行われているもののほとんど変化しないが、それ以後に急激な変化を示している。この原因として、境界条件パラメータの感度が浸透率に比べて低いことが考えられる。こうした問題に対処するために、計測形態や未知パラメータのスケーリングによる調整などの検討をさらに行う必要があるだろう。

5. まとめ

境界条件を推定するための逆解析プログラムを開発し、その妥当性を検討するために、室内エアパルス試験データを用いて数値逆解析を行った結果、逆解析反復に伴い評価関数値が着実に減少するような逆解析計算が行われ、プログラムの妥当性が示された。しかし、十分

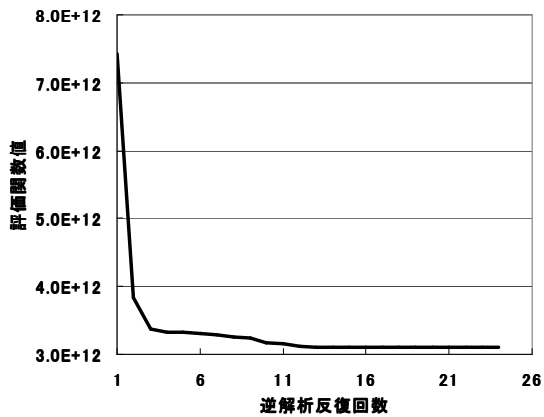


図-5 逆解析反復に伴う評価関数値

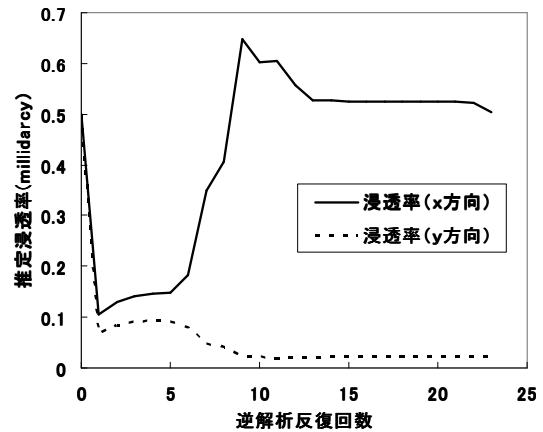


図-6 逆解析反復に伴う浸透率変化

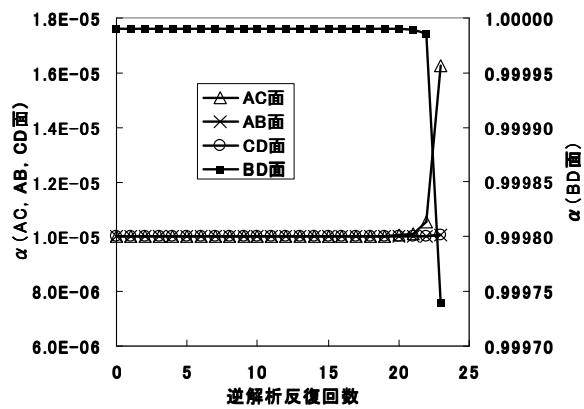


図-7 逆解析反復に伴う α の変化

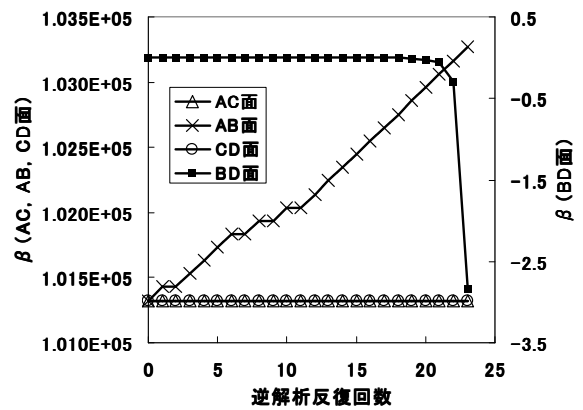


図-8 逆解析反復に伴う β の変化

な精度の解析を行うためには、さらに計測形態および未知パラメータの設定法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) G. Chavent and M. Dupuy: History Matching by Use of Optimal Theory, Soc. Pet. Eng. J, 15(1), pp. 74-86, 1975.
- 5) 増本清, 永井康介: 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, 地盤と建設, Vol. 23, No. 1, pp. 79-84, 2005.