

4. 断層を含む地下水モデルでの数値逆解析における

高透水帯の信頼性評価

Reliability evaluation of high permeability zones
in the inverse analysis of groundwater flow including faults

○井川博優・増本清（島根大学大学院）

1. はじめに

地下水位の変動や地層処分の安全性の評価を行う上で、地下水流動の予測が必要とされている。この予測には数値シミュレーションが効果的である。これには現地調査で得られた水理物性値などの観測情報を反映させて作成した数値モデルを用いるが、その情報量には限界があり誤差も含まれていることがある。この問題を解決するのに逆解析手法が効果的と考えられる。逆解析とは、観測された圧力値から水理物性値などを推定する手法であり、逆解析を行うことで観測情報に則した水理物性値を推定することが可能である。

ここで、逆解析には一意解が求まらないという問題がよくあるが、これはノルム最小法を用いることで解決できることが示されている（末光ほか（2014））。ノルム最小法とは、未知パラメータに制約を与えて自由度を制限する方法の1つである。具体的には未知パラメータ空間内で、基準点からの距離（ノルム）が最小となるような解を選ぶ方法である。この時、基準点とされる値が地質構造ごとに与えられている。例えば、断層構造と断層でない地盤をそれぞれ設定・固定し、それぞれに基準点を設けるといことになる。末光ほか（2014）では断層が鉛直方向に固定されている数値モデル（以後、鉛直断層モデルと呼ぶ）を用いて解析を行い、先験調査で確認されなかった高透水帯の存在を示唆する結果を得ている。だがこの時、基準点を与える前に鉛直方向に固定した断層の位置が誤っている場合、モデル誤差が生じてしまう可能性がある。

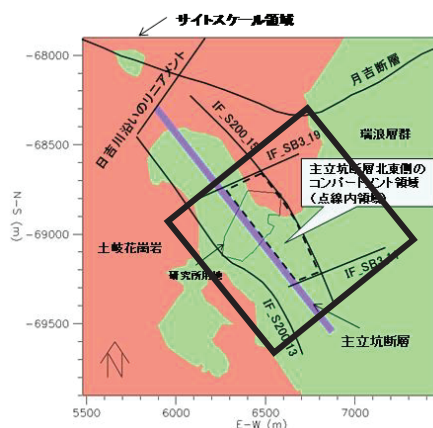


図1. モデル対象領域水平断面投影図
（末光ほか（2014）より加筆修正）

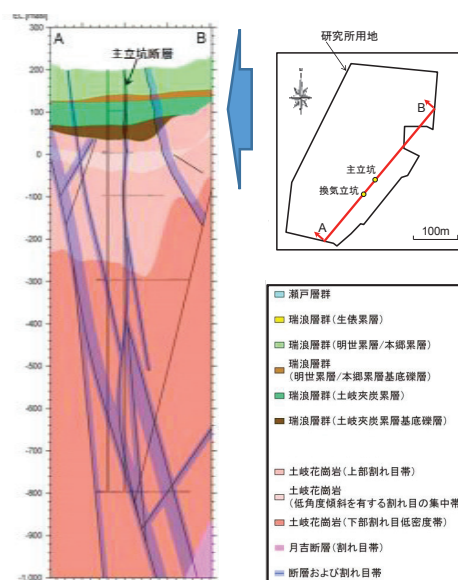


図2. モデル対象領域鉛直断面投影図
（末光ほか（2014）より加筆修正）

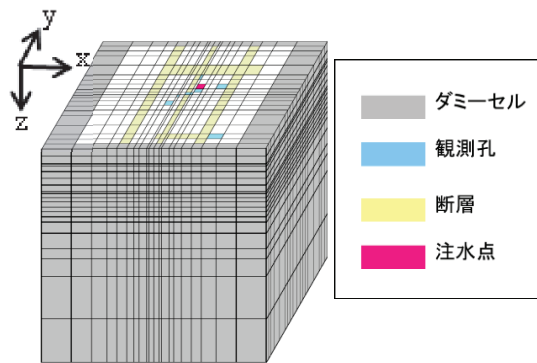


図 3. 数値モデル略図
(末光ほか (2014) より加筆修正)

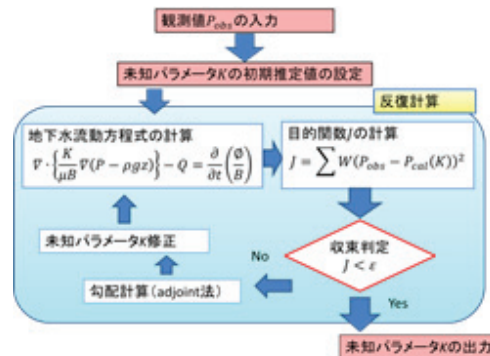


図 4. 逆解析フローチャート
(末光ほか (2014) より加筆修正)

そこで本研究では、鉛直断層モデル内の断層を、先験調査である程度想定されている位置や向きに修正して、解析結果に含まれている高透水帯が鉛直断層モデルを用いた解析の推定結果からどう変わるかを調べる。これにより、逆解析における断層の位置と向きの設定の重要性について検討した。

2. 研究手法

2-1 数値モデル

今回用いた数値モデルは、末光ほか (2014) のモデルをベースとしている。モデル対象領域は岐阜県瑞浪市内の一角 (図 1 枠内) で、領域内にいくつか断層が確認されている。また、領域内の地質は大きく瑞浪層群と土岐花崗岩とに分けられ、断層の形状も先験調査によってある程度想定されている (図 2)。

そして、対象領域の投影図から作成した数値モデルが図 3 になる。対象領域は $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ で、 $20 \times 20 \times 20$ のセルに分割される。今回はセル間での浸透率を未知パラメータとして扱うため、未知パラメータの総数は 19836 個になる。初期浸透率は 10^2 [md]、間隙率は 10^{-1} となり、注水点は 1 か所、観測点は 32 点となっている。尚、図 3 であらわされている注水点および観測孔は水平断面に投影したものとなっており、今回は揚水で試験は 1 回である。また、今回断層の設定を変更する上でモデル中央の主立坑断層より左側 y 軸方向の断層を断層 A、右側 y 軸方向の断層を断層 B とする。

2-2 逆解析の概要

基本的な逆解析手法とは、順解析で得られた計算値と観測値を一致させるように未知パラメータを調整する方法のことである。順解析は、先験調査で得られている浸透率や間隙率といったパラメータを入力データとして地下水流動方程式 (1 式) を解くことである。

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{K}{\mu B} \nabla (P - \rho g z) \right\} - Q = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) \quad (1)$$

K : 浸透率 (m^2) , μ : 粘性 ($\text{Pa} \cdot \text{sec}$) , B : 容積係数 , P : 圧力値 (Pa) ,
 ρ : 流体密度 (kg/m^3) , g : 重力加速度 (m/sec^2) , z : 鉛直深度 (m) ,

Q : 単位体積当たりの流量 (sec^{-1}) , ϕ : 間隙率, t : 時間 (sec)

本研究における逆解析は、(1)式より求められた圧力値と観測圧力値の重み付き残差二乗和からなる目的関数値(2)式を最小化するような未知パラメータを求めることである。

$$J = \sum W(P_{obs} - P_{cal}(K))^2 + F_n(K) \quad (2)$$

J : 目的関数値, P_{obs} : 観測圧力値, P_{cal} : 計算圧力値, W : 重み, K : 未知パラメータ, F_n : ノルム最小法のペナルティ項

そして図4のフローに従って、この目的関数値が十分に小さくなるまで繰り返し計算を行い、最終的な推定値を出力としている。

本逆解析プログラムのより詳しい仕組みおよびプログラムへのノルム最小法の導入については増本ほか(1998)、増本(2004)、末光ほか(2014)などを参照されたい。

2-3 断層の設定の変更方法

本研究では、既存の鉛直断層モデルに対して、断層の位置と向きの変更を行った。その具体的な方法として、各断層面を断層面上の1点の座標と、断層面の法線ベクトルを与えることによって設定するようにした。これにより、各断層面について位置と向きをそれぞれ設定することが可能となった。

先験調査から想定される断層の形状に合わせて設定を変更するにあたって、比較元となる鉛直断層モデルの断層の内、まず想定断層とのずれが最も大きいと考えられる断層1枚についてのみ設定の変更を行った。その後、もう1枚別の断層も設定変更を行った。なお、鉛直断層モデルでこれらの断層面を表1のように設定し以降ケース1として、この設定から法線ベクトルのy,z成分をそれぞれ変更し、解析を実施した。

表1. 各断層の初期設定

		x	y	z
断層A	左側境界面上の一点の座標	320	0	0
	右側境界面上の一点の座標	395	0	0
	法線ベクトルの成分	500	0	0
断層B	左側境界面上の一点の座標	650	0	0
	右側境界面上の一点の座標	740	0	0
	法線ベクトルの成分	780	0	0

表2. 断層Aのみ設定変更した場合の解析ケース設定

解析ケース	断層情報(法線ベクトル)		
ケース1	500.0d0	0.0d0	0.0d0
ケース2	500.0d0	-30.0d0	0.0d0
ケース3	500.0d0	0.0d0	-30.0d0
ケース4	500.0d0	-30.0d0	-30.0d0

表3. 断層Aのみ設定変更した場合の逆解析結果

解析ケース	反復回数	順解析回数	目的関数微分値	目的関数値(初期)	目的関数値(最終)	圧力残差2乗和	ノルム最小項
ケース1	1368	1527	1.51E-05	12269499.49	8.478	2.584	5.894
ケース2	543	604	4.67E-06	12270619.57	8.778	3.467	5.311
ケース3	750	991	4.23E-06	11757415.19	8.474	3.320	5.154
ケース4	671	763	7.46E-06	11758713.96	7.358	2.312	5.046

3. 解析結果

3-1 断層Aのみ設定変更した場合の高透水帯の評価

まず断層Aのみ向きを変更した場合(ケース2, 3, 4)の設定をケース1と合わせて表2に示す。解析結果を表3に、推定結果の断面図を図5, 図6に示す。

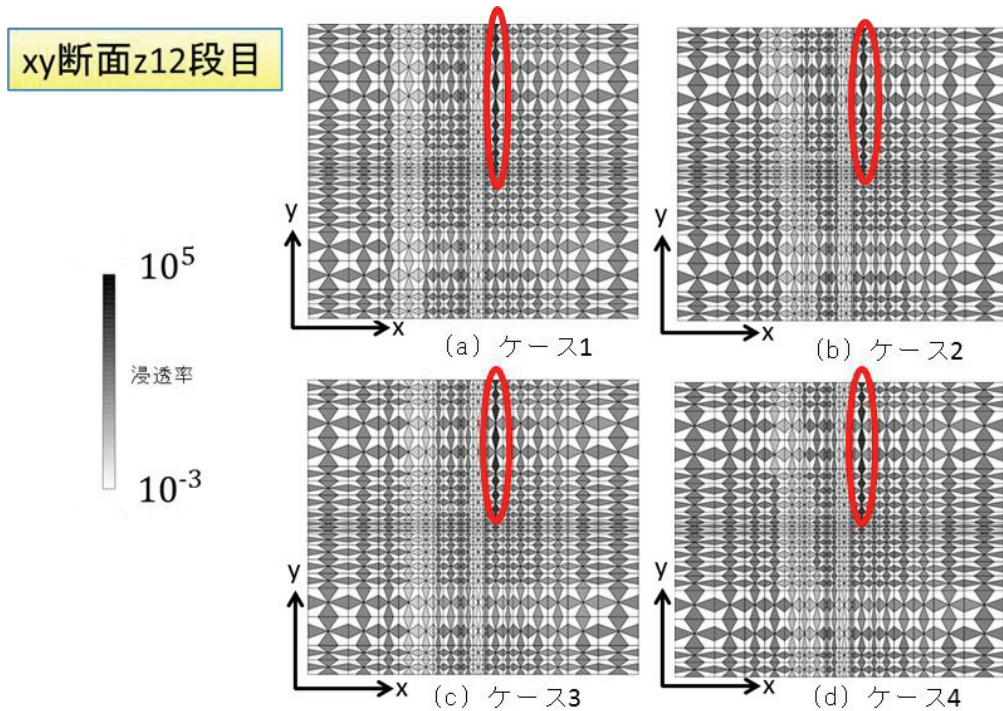


図 5. 断層 A のみ設定変更した場合の逆解析結果 (z12 段目)

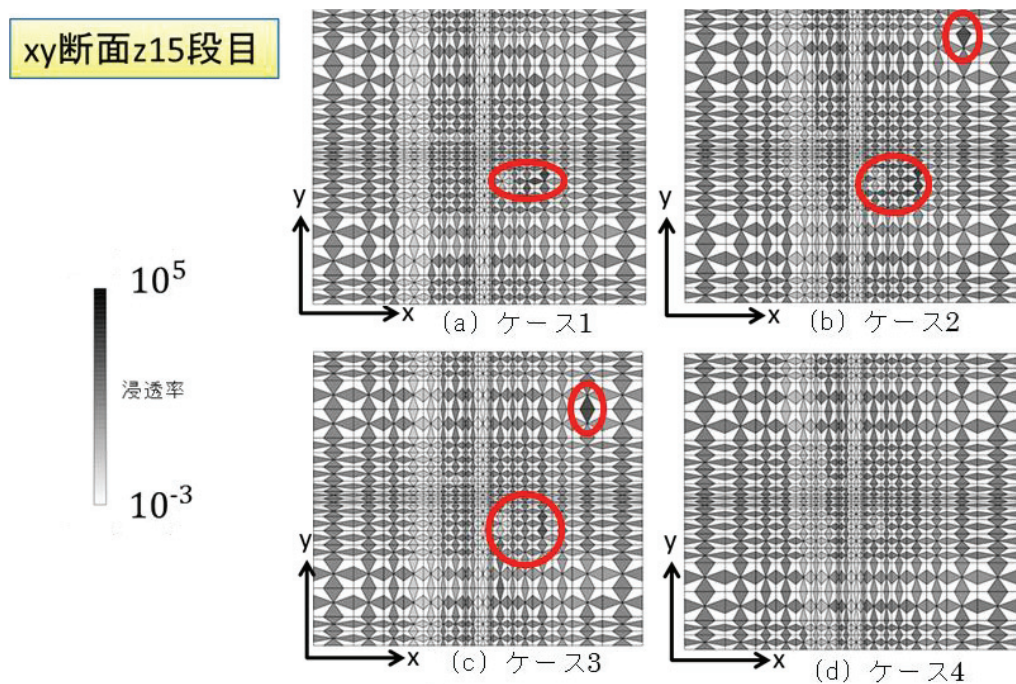


図 6. 断層 A のみ設定変更した場合の逆解析結果 (z15 段目)

まず図 5 では、いずれの解析でも丸枠で示すように高透水帯はほとんど変化しなかったため、相対的にこの構造が存在する可能性が示唆された。また表 3 より、目的関数値等に大きな差異は見られず、いずれも同等の収束が得られたといえる。

次に図 6 では、(d)のケース 10 で高透水帯が消滅した。よって鉛直断層モデルで確認されていたこの高透水帯はモデル誤差であった可能性が示唆された。

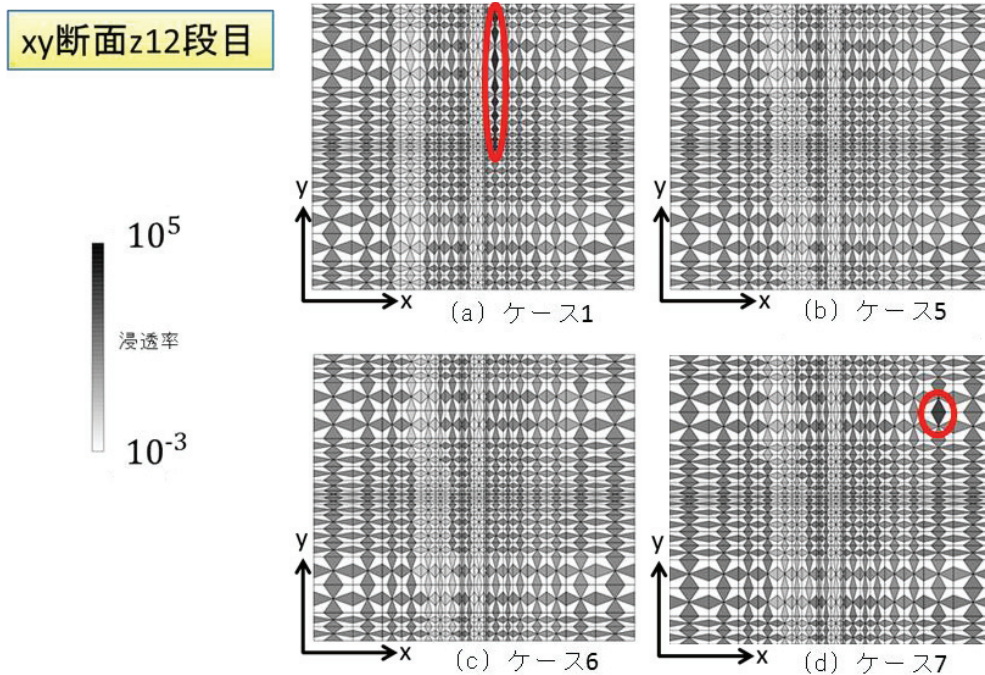


図 7. 断層 A, B ともに設定変更した場合の逆解析結果 (z12 段目)

3-2 断層 A, B ともに設定変更した場合の高透水帯の評価

次に断層 B の向きも断層 A と共に変更した場合 (ケース 5, 6, 7) の設定をケース 1 と合わせて表 4 に示す. 解析結果を表 5 に, 推定結果の断面図を図 7 に示す.

表 5 を見ると, 解析結果の目的関数値等は表 3 の解析結果と大きくは変わらず, いずれも同等の収束が得られたといえる. しかし図 7 をみると, 断層 A についてのみ変更したケースではまったく変化しなかった構造が, 一部のケースを除いてほとんどが消滅した. このことより, この構造は断層 B に関するモデル誤差であった可能性が示唆された.

表 4. 断層 A, B ともに設定変更した場合の解析ケース設定

解析ケース	断層	断層情報 (法線ベクトル)
ケース1	A	(500.0 0.0 0.0)
	B	(780.0 0.0 0.0)
ケース5	A	(500.0 -30.0 -35.0)
	B	(780.0 30.0 30.0)
ケース6	A	(500.0 -30.0 -30.0)
	B	(780.0 25.0 30.0)
ケース7	A	(500.0 -30.0 -35.0)
	B	(780.0 30.0 25.0)

表 5. 断層 A, B ともに設定変更した解析結果

解析ケース	反復回数	順解析回数	目的関数 微分値	目的関数値 (初期)	目的関数値 (最終)	圧力残差2乗和	ノルム最小項
ケース1	1368	1527	1.51E-05	12269499.49	8.478	3.557	5.408
ケース5	1124	1275	4.90E-06	14034421.95	7.585	2.663	4.923
ケース6	1078	1268	1.12E-05	13858182.10	8.040	2.758	5.282
ケース7	1056	1156	5.37E-06	14034303.86	7.983	3.107	4.876

次に、解析ケース 2 からケース 7 までの各解析の推定結果における、高透水帯の変化についてまとめたものを規模の大きい順に上から並べたものを表 6 に示す。表 6 より、規模の小さい高透水帯は規模の大きい高透水帯に比べて、相対的に消滅する傾向にあることが分かった。一方で、規模の大きい高透水帯でも 3 番目や 4 番目の高透水帯のように消滅するケースが存在した。結果的には全体の約半数の高透水帯がいずれかのケースで消滅しており、これらの高透水帯はいずれも断層に関係したモデル誤差であった可能性が示唆された。

表 6. 各解析推定結果における高透水帯の変化

鉛直断層モデルを用いた解析で確認されている高透水帯	規模	解析ケース						
		2	3	4	5	6	7	
セル間方向および確認された断面								
x方向 y13列目 (下側)	1	○	○	○	□	□	□	
y方向 z16段目	2	○	○	○	○	○	○	
x方向 y13列目 (上側)	3	△	□	☆	△	○	△	
y方向 z12段目	4	□	□	□	☆	○	☆	
z方向 y14列目	5	□	○	○	△	□	△	
z方向 y4列目	6	○	☆	○	□	△	□	
z方向 y13列目	7	○	○	□	○	○	○	
z方向 y12列目	8	○	○	☆	○	○	○	
y方向 z15段目	9	○	○	○	□	□	□	
z方向 y8列目	10	☆	☆	☆	☆	☆	☆	
z方向 y9列目	11	□	□	×	☆	☆	☆	

- ：同じ段で形状が変化
- △：隣接する面で構造が確認
- ：ほとんど変化なし
- ☆：消滅した
- ×：断層と重なった
- ※規模は数字が小さいほど大きい

4. 結論

本研究において地下水流動逆解析を行う際、断層の位置と向きを設定を変更しより正確に数値モデルに反映させることで、鉛直断層モデルでの解析結果で確認されていた高透水帯の約半数の構造が消滅することを確認した。これにより、これらの構造はモデル誤差である可能性が相対的に示唆された。特に、1枚の断層の設定変更のみではほとんど変化しなかった構造が、別の断層をさらに設定変更することで消滅したことも確認した。

以上のことより、地下水流動逆解析を行う際断層の位置と向きを設定を考慮することが、重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 増本清(2004)：地下水理逆解析における計算機記憶容量節約アルゴリズム，応用力学論文集，Vol.7，pp.191－199.
- 2) 末光明信，増本清，尾上博則，竹内竜史(2014)：浸透流逆解析における適切化手法の検討，地下水学会，2014 春季講演会予稿，pp.34－39.