

(Ⅱ-74) 地質統計手法による甲府盆地の準三次元地下水解析に関する不圧・被圧水頭の推定

山梨大学大学院 学生員 張 祥偉
山梨大学工学部 正会員 竹内邦良
山梨大学工学部 正会員 石平 博
山梨大学工学部 正会員 徐 宗学

1. はじめに

準三次元モデルによる広域地下水流動解析を行うためには、初期地下水頭の空間分布を適切に与える必要がある。しかしながら、一般に、不圧・被圧水頭の実測値は、ごくわずかな点でしか行われていない。このため、従来、不圧・被圧水頭の観測値から universal Kriging(UK)により全領域における水頭空間分布の推定が行われてきた。しかしながら、この手法は、計算行列の次元が高いため、計算が複雑になる難点がある。また、被圧水頭の観測情報が、不圧水位の実測情報より少ない場合、被圧水頭の推定精度向上のため、不圧水位を補助的な情報として利用することができれば有用である。

本研究では、甲府盆地における準三次元地下水解析を対象として、計算行列次元の低い residual ordinary kriging(ROK)及び不圧・被圧水頭の相互相関を補助的に最大限活用できる universal cokriging(UCK)などの地質統計手法を用いて、限られた点での不圧・被圧水頭観測データから、不圧・被圧水頭の空間分布を推定する。また推定した不圧・被圧水頭を用いて、対象領域における不圧・被圧地下水の流れ方向についても検討する。

2. 研究領域

研究領域は、図1で示す不圧・被圧帯水層を持つ甲府盆地の一部分で、面積は約457km²である。主として、砂礫が堆積して形成された平野で、浅層の厚さは約15-40m、難透水層の厚さは約0-30m、深層の厚さは約10-60mで分布している。

対象領域において、土壌、岩石タイプが比較的一様とみなせる区域を一つのブロックとし、全領域をA1、A2、A3のような三つのブロックに分割した。また全領域を、図1のような414個三角形要素、479個節点に分けた。なお各要素の面積は1.13×0.93km²の矩形面積の1/2である。

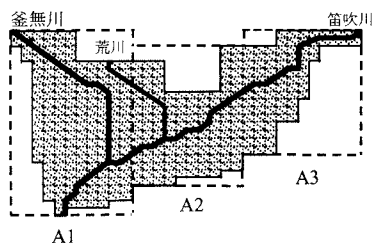


図1 対象領域と要素分割

3. 不圧水位の推定

1) 使用データ 昭和60年2月の56地点における月平均不圧水位をパラメータの同定サンプル、他の10地点における月平均不圧水位を検証対象とした。

2) 推定方法 不圧水位の実測情報に基づき、多項式トレンドからの剰余が正規分布であることを示し、OK法を用いて、剰余の空間分布を推定した。さらに任意の非観測地点の不圧水位は、トレンドと推定した剰余の和とした。この方法をROKと呼ぶこととする。

3) 推定結果 56地点における昭和60年2月の月平均不圧地下水位を用いて、式(1)、(2)のような一次、二次トレンドからの剰余を計算した。

$$a. \quad m(x) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (1)$$

$$b. \quad m(x) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (2)$$

さらに、 χ^2 検定に基づいて、剰余の正規性をテストした。その結果を表1に示す。

表1より、三つのブロックにおいて、式(2)からの剰余分布は、正規分布であることが確認されたことから、この式を対象領域のトレンド式として採用した。同定した式(2)の各係数を表2に示す。

続いて、同定した式(2)により、OK法を用いて、全領域の不圧地下水位を推定した。その結果を図3に示す。また検証対象とする10地点における推定水位の平方根二乗誤差(RMSE)を求めたところ0.89mとなった。

表1 多項式トレンドからの剰余の正規性テストの結果

トレンド方 程式	ブロック	Chi-square test		
		χ^2	$\chi^2_{0.05}$	H ₀
(1)	A1	7.331	7.81	棄却されない
	A2	4.429	7.81	棄却されない
	A3	11.889	7.81	棄却される
(2)	A1	3.812	7.81	棄却されない
	A2	0.895	7.81	棄却されない
	A3	1.261	7.81	棄却されない

ここで、 χ^2 : χ^2 検定の統計量、 $\chi^2_{0.05}$: 有意水準 $\alpha = 0.05$ の場合、正規分布である仮説H₀を棄却しない統計量の最低限。

表2 同定した式(2)の各係数

ブロック	式(2)各係数					
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
A1	236.28	0.0137	-0.0009	1.4E-07	-1.7E-06	2.67E-07
A2	258.07	-0.0076	0.0077	-1.1E-06	6.85E-07	4.39E-07
A3	390.40	0.0108	-0.0508	4.07E-07	-1.8E-07	1.63E-06

キーワード: 準三次元地下水シミュレーション、地質統計手法、不圧・被圧地下水頭。

連絡先: 〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11

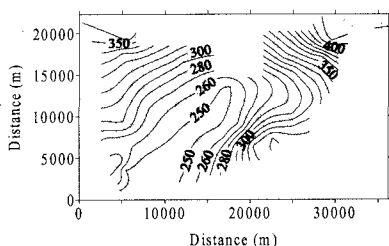


図3 推定した甲府盆地の不圧地下水位の等高線

この結果より、不圧地下水位の空間分布は比較よい精度で再現できていると言える。

4. 被圧水頭の推定

1) 使用データ 昭和60年2月の37地点における月平均被圧水頭をパラメータの同定サンプル、他の9地点における月平均被圧水頭を検証対象とした。

2) 推定方法 実測情報の不足から被圧水頭の推定精度の低下を緩和するために、不圧・被圧水頭相互相関を最大限活用できるUCKを採用する。即ち任意の非観測地点の被圧水頭 $\hat{H}_1$ を、次のような被圧・不圧水頭サンプル値 H_1 、 H_2 の線形結合の形で表わす。

$$\hat{H}_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i H_{1i} + \sum_{j=1}^{n_2} \omega_j H_{2j} \quad (3)$$

そして、バリオグラム (γ) を用いて次の2つの条件を満たす係数 λ_i 、 ω_j を求める。

(1) 推定値 $\hat{H}_1$ が不偏推定値である。即ち

$$E\left[\sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i H_{1i} + \sum_{j=1}^{n_2} \omega_j H_{2j} - H_2(\mathbf{x})\right] = 0 \quad (4)$$

(2) 推定分散が最小である。即ち

$$\sigma_E^2 = \text{Var}[\hat{H}_1(\mathbf{x}) - H_1(\mathbf{x})] \rightarrow \text{最小} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } \sigma_E^2 = & -\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{p=1}^{n_1} \lambda_i \lambda_p \gamma_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_p) - \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_j \omega_j \gamma_{12}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \\ & - \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{n_2} \omega_j \omega_l \gamma_{21}(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_l) - \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{q=1}^{n_2} \omega_j \omega_q \gamma_2(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_q) \\ & + 2 \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i \gamma_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + 2 \sum_{j=1}^{n_2} \omega_j \gamma_2(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} E[(H_1(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - H_1(\mathbf{x}))^2] \quad (7)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} E[(H_2(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - H_2(\mathbf{x}))^2] \quad (8)$$

$$\gamma_{21} = \frac{1}{2} E[(H_2(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - H_2(\mathbf{x}))(H_1(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - H_1(\mathbf{x}))^2] \quad (9)$$

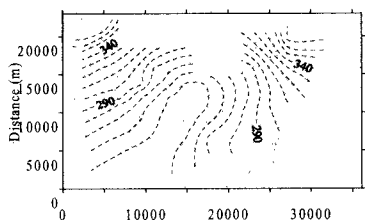


図4 推定した甲府盆地の被圧地下水頭の等高線

3) 推定結果 37地点における昭和60年2月の月平均水頭を用いて、被圧水頭を推定した。その結果を図4に示す。また検証対象とする9地点の推定被圧水頭の

RMSEは0.85mとなった。さらにUK法を用いて、同検証地点の推定を行った結果のRMSEは2.14mとなった。UCK法の精度が高いことが明らかとなった。

5. 対象領域における地下水の流れ方向

推定した不圧・被圧水頭とともに、対象領域における地下水の水平と縦断面の流れ方向図を作成した(図5、図6)。図5を見ると、対象領域において、不圧・被圧地下水は左、右両辺の高いところから、盆地中心へ流れていることが分かる。また、図6より、浅川、金川水系区域に、不圧水位は被圧水頭より高いので、地下水は、不圧帯水層から被圧帯水層に流れている。逆に、盆地中央部で、被圧地下水は不圧帯水層に流れていると言える。

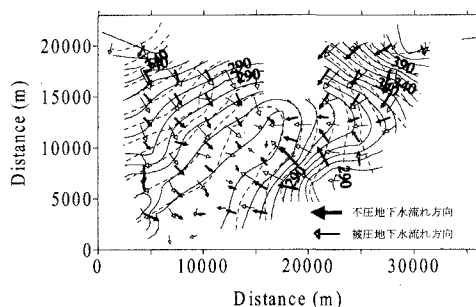


図5 甲府盆地における水平方向の地下水の流れ

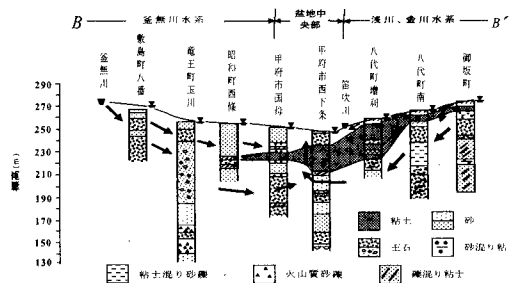


図6 甲府盆地における縦断面の地下水の流れ

6. 結論

本研究では、広域準三次元地下水解析に関する不圧・被圧地下水頭の初期値を推定するROK法及びUCK法を提案した。ROK法は、UK法より概念が分かりやすく、計算次元が低い。この方法を用いて、不圧地下水位空間分布を推定した結果比較よい精度で再現できることが示された。また被圧実測値が不足の場合、不圧水位の実測値を補助的に最大限活用するUCK法は、実測情報の不足から推定精度の低下を抑え、UKより精度が高いことが明らかとなった。

参考文献

- Ma, Tain-Shing, M. Sophocleous, and Yu, Yun-Sheng: Geostatistical applications in groundwater modeling in South-Central Kansas, J. hydrau. Eng., Vol.4, No.1, 57-64, 1999.
- 浜口俊雄、不良な計測情報下でのCokrigingによる地下水位分布の最適推定と相互相関的補間効果、水工論文集、第45巻、343-348、2001年2月。