

II-94

帯水層パラメーターおよび境界条件の推定に関する一考察

神戸大学 正○川谷 健 大林組 安田敏夫 神戸大学 学 安東伸泰

1. はじめに 有限要素法などによる地下水流の数値シミュレーションは、地下水利用の変化に伴う流況の変化を把握するのに有効である。しかし流れ場のモデル化にあたって、帯水層の構造や諸物性値、さらに境界条件が明確に規定されていなければ、数値シミュレーションの利点と結果を十分に生かすことができない。とくに境界条件は、それが結果に与える影響が大きいのにもかかわらず、適切に設定することの困難な事項である。したがって、測定が比較的容易である水位・水頭の実測値を利用し、また透水係数あるいは透水量係数の現場試験値を参考にして、現地地下水流況の再現性の高いモデルを構築してゆくことが必要である。

本研究では、Carrera らが示した “最尤法による帯水層パラメーターの推定法”¹⁾²⁾³⁾を用いて透水量係数、涵養量および境界流束の推定を行い、上記の推定法の適用性について検討した。

2. 解析モデル 解析モデルとして、図-1に示す1辺6kmの正方形領域を選ぶ。帯水層は透水量係数が一定である9つの部分領域からなるものとし、透水量係数は5～500 m²/dayである。観測井は平均して2 km²に1ヶ所設けられているものとし、18地点に設置する。境界条件は、図-1において、領域の上側および右側の境界が不透水性、左側の境界が流束900 m³/day (150 m³/day・km)、下側境界が水頭一定、である。また、涵養量は、左上半の領域で 0.1×10^{-3} m/day (36.5 mm/yr) 右上半の領域で 0.5×10^{-4} m/day (18.3 mm/yr) とする。要素分割は等辺の長さが1 kmの直角二等辺三角形で行う。総節点数49、総要素数72である。

3. 解析条件と推定結果 水頭と透水量係数の測定値が得られているものとし、測定誤差は平均0、標準偏差 σ の正規分布($N(0, \sigma)$ で表わす)であるものとする。

この推定法では、諸パラメーターの最適推定値は、 $J = J_h + \sum \lambda_i J_i$ を最小にする値として与えられる。ここに、 $J_h = (h^* - h)^T V_h^{-1} (h^* - h)$ 、 $J_i = (P_i^* - P_i)^T V_i^{-1} (P_i^* - P_i)$ であり、 h と h^* は水頭の真値と測定値、 P_i と P_i^* はパラメーター i の真値と測定値、 V_h と V_i はそれぞれ水頭とパラメーターの誤差の共分散行列に関わる対称正値行列である。さらに、 $\lambda_i = \sigma_h^2 / \sigma_i^2$ で、ペナルティ基準の重みと見なされ、 σ_h^2 と σ_i^2 は水頭と i パラメーターの誤差の分散である。

J の最小値は次の4つの条件のいずれかが満たされたときに、得られたものとする。すなわち(1) $\|\nabla J\| \leq 10^{-5}$ 、(2) $(\|\nabla J\|)^k / (\|\nabla J\|)^1 \leq 10^{-7}$ 、(3) $J \leq 10^{-5}$ および、(4) 10回の繰返し計算において $|J^k - J^{k-1}| / J^k \leq 10^{-5}$ 、であり、ここに $\|\nabla J\|$ は J の勾配のノルムであり、 J^k および $(\|\nabla J\|)^k$ は k 回目の繰返し計算における J および勾配のノルムを表わす。

水頭の測定誤差が、 $N(0, \sigma_h = 0.1m)$ であり、透水量係数(T m²/day)の対数値($Y = \log_{10} T$)の測定誤差が、 $N(0, \sigma_Y = 0.1)$ であるときの推定結果を表-1に示す。なお、涵養量と境界流束の推定値の初期値はそれぞれ 2×10^{-4} m/day および100 m³/day・kmである。この表で、“水頭の推定値”は、透水量係数、涵養量および境界流束の推定値を用いて算定される値である。

透水量係数の推定結果は、Case 1 が最良であり、Case 3 がやや劣り、Case 2 が最も劣っている。これは、Case 2 では透水量係数の大きなゾーンでその測定誤差が大きいためと考えられる。涵養量と境界流束の推定結果でも、Case 1 とCase 3 はほぼ同じ精度であるが、Case 2 はかなり劣っている。一方、これらの推定値をモデルに採用して算定する水頭の分布には、それほど著しい精度の違いは認められない。この推定に先立って行った予備的な計算結果によると、透水量係数の測定値がなく、水頭の測定値のみから透水量係数を推定する場合には、推定精度は水頭の測定精度と正の相関を持っている。しかし、この推定例のように水頭と透水量係数の測定値が与えられているとき、後者が推定精度により大きな影響を持つようである。

水頭の測定誤差(単位;m)および透水量係数(単位;m²/day)の対数値の測定誤差が共に、 $N(0,$

0.05), $N(0, 0.1)$, $N(0, 0.3)$ である場合についての推定結果を表-2に示す。測定誤差が大きいほど、透水量係数の推定精度は悪くなるが、それに比べて境界流束と涵養量の推定精度には大きな違いが生じない。ただ、測定誤差が大きくなるほど最適推定値を得るまでの繰返し計算回数は多くなる。前例と同じく、諸パラメーターの推定値を用いて得られる水頭分布には大きな差は認められない。

4. おわりに 地下水解析モデルの構築にあたり、境界条件を適切に設定することは、現地地下水状況を再現するうえで重要である。とくに境界流束あるいはそれに相当する涵養量を設定することが重要である。この観点に立てば、Carrera らの示した帯水層パラメーター推定法はきわめて有効な手法であると考えられる。

参考文献

- 1) Carrera, J., and S.P. Neuman, Estimation of aquifer parameters under transient and steady state condition, 1, Maximum likelihood method incorporating prior information, WRR, 22(2), p.199-210, 1986.
- 2) Carrera, J., and S.P. Neuman, Estimation of aquifer parameters under transient and steady state condition, 2, Uniqueness stability and solution algorithm, WRR 22(2), p.199-210, 1986.
- 3) Carrera, J., and S.P. Neuman, Estimation of aquifer parameters under transient and steady state condition, 3, Application to Synthetic and Field Data, WRR 22(2), p.199-210, 1986.

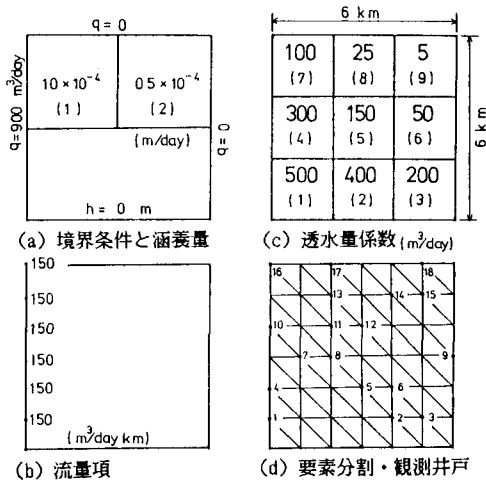


図-1 解析モデル

表-2

		Case 4		Case 1		Case 5	
σ_h		0.05 m		0.1 m		0.3 m	
ゾーン	真値	測定値	推定値	測定値	推定値	測定値	推定値
透水量係数 (m^2/day)							
σ_v		0.05		0.1		0.3	
1	500	450	507	405	513	266	532
2	400	396	409	392	419	376	448
3	200	178	207	159	215	100	257
4	300	307	301	314	302	345	298
5	150	189	161	239	172	603	232
6	50	46	53	42	55	29	66
7	100	104	101	109	103	129	107
8	25	31	25	38	26	90	27
9	5	5	5	6	5	7	6
涵養量 ($\times 10^{-4} m/day$)							
1	1.00		1.02		1.04		1.11
2	0.50		0.51		0.53		0.59
境界流束 ($m^3/day \cdot km$)							
1	150		151		152		154
繰返し回数		100		151		215	

表-1

		Case 1		Case 2		Case 3	
水頭 (m)		真値	測定値	推定値	測定値	推定値	測定値
井戸番号							
1	1.43	1.49	1.41	1.37	1.43	1.52	1.34
2	0.81	0.72	0.81	0.83	0.84	0.69	0.75
3	0.72	0.69	0.72	0.83	0.79	0.50	0.62
4	2.70	2.61	2.66	2.72	2.70	2.42	2.53
5	1.73	1.83	1.74	1.86	1.74	1.72	1.68
6	1.55	1.46	1.56	1.50	1.62	1.56	1.44
7	4.26	4.12	4.22	4.25	4.28	4.13	4.21
8	3.97	4.02	3.90	3.97	3.94	4.02	3.95
9	3.70	3.60	3.61	3.70	3.72	3.58	3.62
10	6.44	6.46	6.42	6.51	6.53	6.47	6.45
11	5.49	5.29	5.40	5.54	5.47	5.43	5.52
12	5.08	4.99	4.92	4.99	4.99	5.10	5.04
13	8.84	8.94	8.78	8.81	8.79	8.95	8.88
14	10.28	10.27	10.24	10.18	10.16	10.30	10.29
15	14.74	14.46	14.65	14.85	14.80	14.87	14.80
16	12.03	11.98	11.97	11.94	11.92	11.99	11.98
17	10.02	9.84	9.98	9.88	9.96	10.01	10.07
18	17.44	17.53	17.38	17.49	17.54	17.45	17.51

		Case 1		Case 2		Case 3	
透水量係数 (m^2/day)		真値	測定値	推定値	測定値	推定値	測定値
ゾーン							
1	500	405	513	397	373	499	567
2	400	392	419	419	353	468	350
3	200	150	215	125	135	227	227
4	300	314	302	246	222	244	298
5	150	239	172	189	135	142	140
6	50	42	55	49	46	40	40
7	100	109	103	52	79	127	104
8	25	38	26	22	22	20	22
9	5	6	5	3	4	4	4
涵養量 ($\times 10^{-4} m/day$)							
1	1.00		1.04		0.79		1.05
2	0.50		0.53		0.43		0.42
境界流束 ($m^3/day \cdot km$)							
1	150		152		114		151
繰返し回数		151		158		142	