III-352　不均質地盤における帯水層パラメータの同定について

京都大学工学部　正員　青木一男　嘉門雅史

1．はじめに ---- 帯水層パラメータの代表的なものとして、透水量係数、貯留係数がある。これらのパラメータの推定手法に関し、近年多くの研究がなされつつあるが、そのほとんどが、透水量係数のみの場合が多く、また、地盤の不均質性をも合理的に考慮した手法は数少ない。そこで、本報告では、同定するパラメータとして、透水量係数および貯留係数を考え、さらに、地盤の不均質性をも同時に推定する手法を示す。

2．パラメータの空間分布の表現法 ---- 対象地盤が均質であれば問題はないが、不均質の場合にはその空間分布を推定する方法が問題となる。有限要素法により不均質地盤を表現する手法として、要素あるいは節点のゾーン分割がよく用いられる。すなわち、各々のゾーン内のパラメータを一定として推定する方法である。これにより透水量係数の地域分布差は多少犠牲になるが、地質学的連続性を考慮すれば透水量係数のゾーン内偏差は小さいと考えられ、観測値の質的・量的な不十分さから生ずる推定値の不安定さの除去のためには有効な方法である。そこで、本報告では、このような透水量係数の空間分布を表現する手法としてゾーン分割法を用い、以下にその手法を示す。まず、M個のゾーンに分割する場合を考える。この時、図1に示すように基準点をM個設定し、各節点と各基準点との距離を比較し、各節点がその距離の近い基準点に属するものと見なすことによりゾーン分割を行う。基準点の位置を種々移動させることにより、ゾーン分割のすべてのパターンが表現できる。

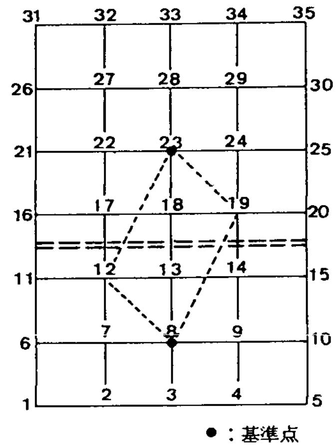

図1　解析モデル

3．同定の解析手法 ---- 同定手法には、直接法と間接法があるが、定式化の容易さなどから間接法が現在主流になっている。本報告でも、間接法による非定常同定問題として、定式化を行う。すなわち、水位に関する観測値とゾーン分割およびパラメータを仮定して得られた解析値との残差二乗和式①を最小にする解を推定する。残差二乗和を最小にする手法として、種々のものが提案されているが、ここでは、Gauss-Newton法である式②を用いる。

$$E=\sum_{ob}(h(\lambda)-h_{ob})^2 \quad \text{式①}$$

$$\lambda^k=\lambda^{k-1}-(J^T J)^{-1} J^T(h^{k-1}-h_{ob}) \quad \text{式②}$$

$$E_1=\sum_{ob}(h(\lambda^k)+J(\lambda^k-\lambda^{k-1})-h_{ob})^2 \quad \text{式③}$$

ここで、E：残差二乗和、λ：パラメータ、h：水位の解析値、h_{ob}：水位の観測値、J：感度行列、E_1：線形近似による残差二乗和である。

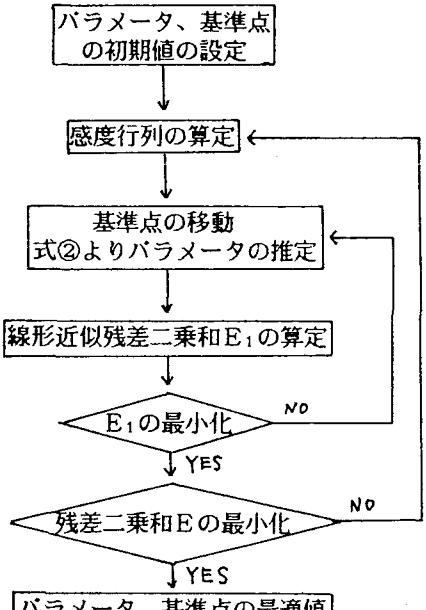

図2　解析手順

さて、解析手順を図2に示す。この解析手法の特徴は、地盤の不均質性とパラメータを同時に推定することができること。解の反復改良過程で、線形近似による残差二乗和式③を第一の判定基準とし、残差二乗和式①を第二の判定基準として用いることにより、計算時間が極力減少させることができること。また、非定常解析において必要となる初期状態として、推定したパラメータに

基づく定常解析解を用いることにより、初期状態の設定法の問題点を解消できる。

4．感度行列 ---- 感度行列とは、ここではパラメータの変動に対する水位の変動の割合を示すもので、残差二乗和最小化問題において、特にに重要である。感度行列の求め方には、影響係数法、感度方程式法、変分法などがあるが、本研究では、精度および計算時間の少なさから変分法を用いた。Caterら[1]によると、透水量係数および貯留係数に対する水位の感度行列は、式④、⑤により求められる。

$$\frac{\partial h}{\partial T}=\iint_{\Omega}\int_0^{t_n}(\nabla p'(x,y,t_n-t)\nabla h(x,y,t))dtdxdy \quad \text{式④}$$

$$\frac{\partial h}{\partial S}=\iint_{\Omega}\int_0^{t_n}(p(x,y,t_n-t)h(x,y,t_n-t))dtdxdy \quad \text{式⑤}$$

ここで、t_n：観測時刻
p ：水位に対する随伴方程式の解
p' ：pの時間微分

さて、透水量係数1m²/hr、貯留係数0.01と仮定した場合の節点18における非定常状態での感度行列を表１に示す。これによると、透水量係数に関しては、観測時刻が経過するほど感度行列が大きくなり同定解析の精度上都合がよい。しかし、貯留係数に関しては、その逆で観測時刻が小さいほど感度行列値が大きくなる。これは、観測時間が大きくなることにより定常状態に近づくからである。このことより、透水量係数および貯留係数を同定する場合には、観測時刻を初期と終期の２カ所以上を選択したほうが良い結果が得られるものと考えられる。

表１　感度行列

観測時刻	$\partial h/\partial T$	$\partial h/\partial S$
10	0.412×10^{1}	0.647×10^{2}
20	0.510×10^{1}	0.319×10^{2}
30	0.545×10^{1}	0.125×10^{2}
40	0.558×10^{1}	0.438×10^{1}
50	0.562×10^{1}	0.144×10^{1}
60	0.563×10^{1}	0.454×10^{0}
70	0.563×10^{1}	0.139×10^{0}
80	0.563×10^{1}	0.418×10^{-1}
90	0.563×10^{1}	0.125×10^{-1}
100	0.563×10^{1}	0.363×10^{-2}

5．同定結果 ---- 解析モデルとして、図１に示すものを用い、解の真値とし以下のようにした。まず、節点8,28を基準点として選び、図のように２つのゾーンに分割した。それぞれの透水量係数を１m²/hr、0.5m²/hrとした。さらに、貯留係数は、領域全体で0.01に設定した。また、観測点は、節点8,18,23の３点を、観測時刻は、30hrs，100hrsの２点を選んだ。揚水井の位置を節点18、揚水量10t/hrとした。このような条件下で同定した結果を表２に示す。これによると、反復回数８でかなりの精度で、不均質性、透水量係数および貯留係数が、同定されたものとみなせる。

表２　同定結果

反復回数	基準点	透水量係数	貯留係数	残差二乗和
初期値	17	0.1	0.1	――
	19	0.1		
1	5	1.2395	0.1265	143.71
	23	0.1773		
2	9	1.8245	0.0546	2.2888
	23	0.2322		
3	4	1.4665	0.0183	0.8293
	11	0.3840		
4	4	0.6106	0.0111	0.3434
	11	0.6429		
5	9	0.8305	0.0103	0.0107
	23	0.5934		
6	8	0.9155	0.0099	0.0659
	23	0.5604		
7	8	0.9980	0.0099	0.23×10^{-5}
	23	0.5001		
8	8	1.0000	0.0100	0.18×10^{-10}
	23	0.5000		
真値	8	1.0	0.01	――
	23	0.5		

6．おわりに ---- 地盤の不均質性を考慮した透水量係数および貯留係数を推定する手法を示し、解析例によりその妥当性を検討した結果、良好な結果が得られた。今後は、この手法により、現位置での適用を進めて行きたい。なお本研究に際し多大な御援助、御指導をいただいた京都大学赤井浩一教授に深く感謝致します。

<参考文献>

1)Carterら:Performance matching with constrains,Soc.Pet.Eng.J.,14(2),187-196,1974