不完全貫入井戸を用いた揚水試験の解析手法

岡山大学工学部　河野伊一郎
岡山大学工学部　西垣　誠
岡山大学工学部 ○ 竹下　祐二
鹿島建設（株）　福住　幸雄

1．はじめに

従来より、揚水試験結果の解析手法として、Theis・野満の方法、およびJacobの方法がよく用いられる。しかし、これらの方法は帯水層や試験条件に対して種々の仮定条件の基に導かれたものであり、境界条件の複雑な地盤においては帯水層定数の決定が困難な場合がある。　本文では、従来、解析が困難であるとされていた複雑な試験条件下においても帯水層定数の決定を可能とする新しい揚水試験結果の解析手法として、有限要素法による浸透解析手法を用いた逆解析手法を提案し、被圧帯水層地盤において不完全貫入井戸を用いた揚水試験に対してその適用性を検討した。なお、逆解析手法としては間接法を採用し、非線型最小二乗法を用いた。

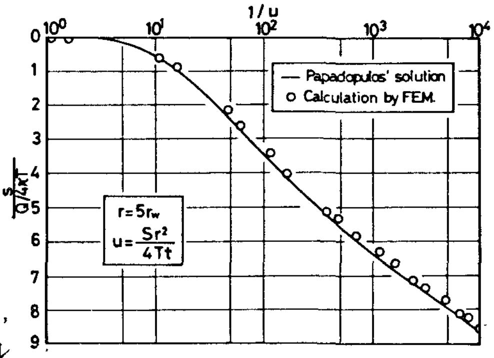
2．逆解析手法による揚水試験結果の解析法

2．1　非線型最小二乗法の解法 [1]

非線型最小二乗法の解法として修正Marquardt法を用いた。この方法は、Gauss-Newton法と最急降下法との中間に位置するものであり、式（１）に示される。

$$[A^T \cdot A + \lambda \cdot I] \cdot \Delta a = A^T (y - Y) \qquad (1)$$

ここに、
$A[n \times m] : \partial Y_i / \partial \alpha_j \quad (i = 1 \sim n,\ j = 1 \sim m)$,
$y[n]$：観測値　，$Y[n]$：計算値　，$\Delta a[m]$：修正ベクトル
$\alpha[m]$：未知パラメータ，$I[m \times m]$：単位行列，λ：０以上の数



図－１　Papadopulosの理論解との比較

式（１）を用いて、残差平方和を最小にする $\{\Sigma (y - Y)^2 \to \min\}$ 同定過程では、非線型性の影響が大きい場合にはλを大きくし、解に近づくにつれてλを小さくする。 収束の判定は、残差平方和の減少量とΔaのいずれかが許容誤差内に達した時とした。

2．2　浸透解析手法

被圧帯水層地盤における揚水試験の有限要素法による浸透解析では、式（２）に示す二次元軸対称浸透流の基礎方程式を用いた。また、揚水井の井戸径を考慮し、井戸水位の計算には式（３）を用いた。[2]

$$k_r \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} k_r \frac{\partial h}{\partial r} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2)$$

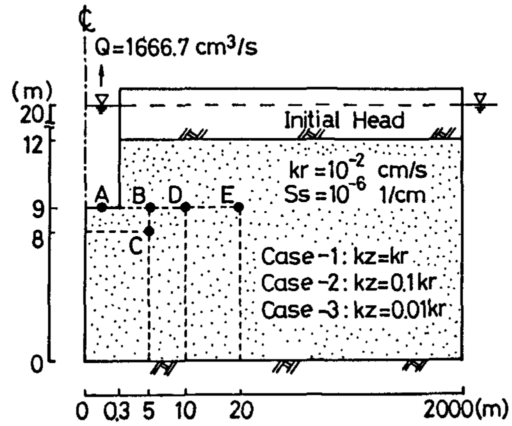
$$h^{I+1}(t+\Delta t) = \alpha h^{I}(t+\Delta t) + (1-\alpha)\left\{h(t) + \Delta t \frac{Q_{out}^{I}(t+\Delta t) - Q_p}{\pi r_w^2}\right\} \qquad (3)$$

ここに、k_r，k_z：水平方向、鉛直方向の透水係数，S_s：比貯留係数
Q_{out}：井戸への浸出量，Q_p：揚水量，I：繰り返し計算step，α：＝0.8，r_w：井戸半径

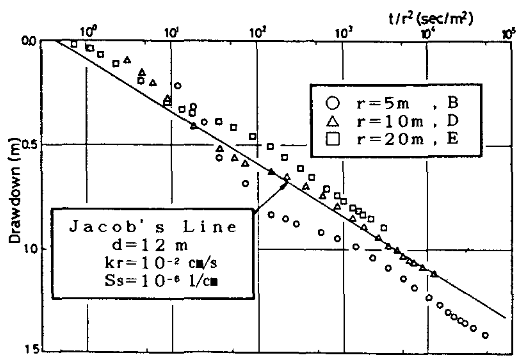
これらの解析手法の妥当性を検討するために、井戸径を考慮した完全貫入井によるPapadopulosの理論式との比較を行った。その結果、図－1に示すように良好な一致が得られている。

3．不完全貫入井戸を用いた揚水試験の解析

図－2に示すように、異方性の強さの異なる3Caseの異方性被圧帯水層において井戸半径 30cm、貫入長 300cmの不完全貫入井戸を用いる揚水試験を考える。このような条件下で実施された揚水試験の理論解は、現時点では報告されていない。そこで、Case-2 の地盤条件について前述の浸透解析法によるシミュレーションにて揚水試験データを作成し、その結果を Jacob法にて整理してみると、図－3を得る。各観測井における観測値は、揚水井の井戸径および不完全貫入の影響を受け、一本の直線上に集まらず、直線の引き方でｋｒ，Ｓｓの値が大きく異なり、またｋzの値も決定できない。このように複雑な試験条件下において、本解析手法によりｋｒ，ｋz，およびＳsの3つのパラメータを同時に推定することを試みる。パラメータの初期推定値は3Caseともｋｒ，Ｓsを真値の$\frac{1}{10}$とし、ｋzの値はｋｒの初期値の$\frac{1}{10}$とした。水位観測データは、図－2に示す揚水井(A点)とB, C点の計3点における値を採用した。同定結果を表1に、繰り返し回数と残差平方和の関係を図－4に示す。各Caseとも4～5回の繰り返し回数でほぼ真値に近い値が得られており、その時、残差平方和も最小となっている。



図－2　不完全貫入井戸を用いた揚水試験

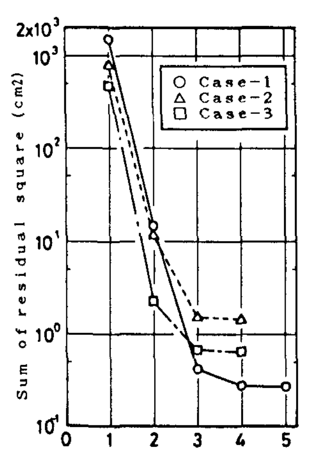


図－3　Ｊａｃｏｂ法による解析（Case－２）

表－1　同　定　結　果

Case	計算回数	S (cm2)	kr 同定値 (cm/s)	誤差 (%)	kz 同定値 (cm/s)	誤差 (%)	Ss 同定値 (1/cm)	誤差 (%)
1	5	0.275	9.362×10^{-3}	6.4	9.362×10^{-3}	6.4	9.042×10^{-7}	9.6
2	4	1.489	9.151×10^{-3}	8.5	9.268×10^{-4}	7.3	8.744×10^{-7}	12.6
3	4	0.661	9.011×10^{-3}	9.9	9.111×10^{-5}	8.9	8.701×10^{-7}	13.0

S：残差平方和



図－4　繰り返し回数と残差平方和の関係

4．おわりに

本解析手法によれば、従来の解析手法が適用困難な場合でも、試験条件に対応した地盤モデルが作成できれば帯水層定数の決定が可能となる。今後は、さらに複雑な地盤条件や不圧帯水層地盤についての検討を行う必要がある。

《参考文献》

1）中川　徹・小柳義夫(1982)：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，PP.95-110.
2）西垣　誠・高坂信章(1984)：井戸半径を考慮した揚水試験における水位低下特性とその解析方法，「土質工学会論文報告集」，Vol.24, No.4, pp.194-204.