III－A253

# 亀裂性岩盤での水圧トモグラフィーに関する研究

岡山大学環境理工学部　正会員　西垣　誠
岡山県庁　正会員　○松尾　雄一郎

## 1. はじめに

現在、岩盤の浸透特性を把握するための方法は多数提案されているが、それらのうち3本以上のボーリング孔間で透水試験を行うクロスホール試験の結果を用い、医学方面で人体内の詳細な構造を知る技術として進歩したトモグラフィー法で浸透特性を把握する方法がある。しかし、この理論により把握を行う場合、従来の時間差分法では多大な時間を要することが懸念された。そこで、Laplace 変換を適用した(LTG 法: Laplace Transform Galerkin Method)[1] 浸透解析プログラムコードの開発を行った。

## 2. Laplace 変換による基礎方程式

Laplace 変換は時間関数から周波数関数への変換において、変数$t$の全ての正の値に対して定義される。

$$\bar{h}(p) = \int_0^\infty h(t)e^{-pt}dt \tag{1}$$

式(1)を浸透の基礎方程式に代入すると、以下の方程式が導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{ij}\frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j}\right) = S_s(p\bar{h} - h(t=0)) - \bar{Q} \tag{2}$$

ここで、$p$ :Laplace 変換パラメータ、$\bar{h}$ :Laplace 変換された水頭値、$\bar{Q}$ :Laplace 変換された注入流量

また、境界条件は

水頭が既知の境界 ：$\bar{h}(x_i, p)$ (3)

流量が既知の境界 ：$\left(k_{ij}\frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j}\right)n_i = -\bar{V}(x_i, p)$ (4)

ここで、$n_i$ :境界面からの垂直ベクトルである。

## 3. 数値 Laplace 逆変換

Laplace 変換でのメリットは大きいが、Laplace 逆変換に Laplace 変換の逆の機能を持たせるため、Laplace 逆変換の段階で困難が発生する。Laplace 逆変換式を以下に示す。

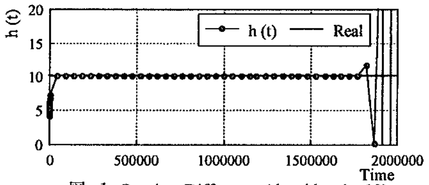
$$h(t) = \frac{1}{2\pi i}\int_{r-i\infty}^{r+i\infty}\bar{h}(p)e^{pt}dp \tag{5}$$

ここで、$h(t)$ :領域内の水頭、$\bar{h}(p)$ :Laplace 変換された水頭、$p$:Laplace 変換パラメータ

数値 Laplace 逆変換法は多数提案されているが、本研究では Crump 改良法および細野の方法を用いた。

## 4. 数値 Laplace 逆変換の検証

クロスホール試験で行われる際に、実際の岩盤中での圧力水頭の挙動を考慮した関数による数値Laplace逆変換を行った。まず、Crump 改良法である Quotient Difference Algorithm での$y=10$、$y=\log t$および$y=\sin\omega t$における逆変換結果を図-1～図-3に示す。図-1、2のパラメータは$\alpha=0.0$、$T=10^6$、$E'=10^{-6}$、$N=7$とした。これらよりクロスホール試験の種類中、定圧・定流量試験の解析を行う場合は、求めたい水頭の試験開始後からの時間が $2.0\times10^{-2}T$ ～$1.7T$の範囲中に収まっている必要があることがわかる。解析を行う際にその区間に収まっていない水頭挙動を得ようとすると、演算時間の増大が懸念される。



図－1 Quotient Difference Algorithm (y=10)

表-1 演算時間の違い(Time=$10^5$まで 0.1 刻み)

| Method | Quotient Difference | Fosono |
|---|---|---|
| Time(sec) | 42 | 126 |

*keyword*: 水圧トモグラフィー法、クロスホール試験、LTG 法、 Laplace 変換、 Laplace 逆変換

連絡先 ： 〒700 岡山市津島中 2-1-1・Tel :086-251-8167・Fax :086-253-2993

また、図-3 に$y = \sin 0.1t$における数値逆変換を示す。これはパラメータを$\alpha = 0.0$、$T = 10^6$、$E' = 10^{-6}$、$N = 7$としているが、適当な逆変換が行われていない。打ち切り級数$N$の値を上昇するとよい解が得られるが、Quotient Difference Algorithm ではパラメータの与え方が非常に困難であり、Sinusoidal 試験による解析を行うには適当とはいえない。

次に、図-4 に細野の方法[2]による$y = \sin \omega t$で$\omega$の値を変えた数値逆変換の結果を示す。パラメータは$\sigma_0 = 5.0$、$k = 10$、$\mu = 5$とした。これからわかるように、$\omega$の値が変化するとそれに応じて逆変換での時間による精度が変化することに注意を要する。また、比較的演算時間を要することが難点である。しかし、従来の時間差分法と比較しても、この方法を用いた浸透解析は時間の短縮を計れるものであり、有効である。

表-1 にそれぞれの方法で要した演算時間の一例を示す。なお演算に用いた計算機は、富士通製パーソナルコンピュータ、FMV-5150NA/X(CPU :Intel 製 Pentium 150Mhz)である。

## 5. LTG 法による岩盤の浸透特性評価の検討

Laplace Transform Galerkin 法の解の妥当性を検討するために、従来の時間差分法による浸透解析プログラムとの比較計算を行った。ここでは、モデルを簡単にするために等方均質性媒体で、透水係数 $ks = 1.0 \times 10^{-5}$(cm/sec)、比貯留係数 $Ss = 1.0 \times 10^{-6}$(1/cm)とした。解析において実際の試験を考慮するため、試験開始からの解析を行う時間を 1 ヶ月までとし、時間差分法は定圧・定流量試験の解析では初期時間刻みを 100(sec)、時間刻みの最大値を 1(day)、時間増分の倍率を 1.2 倍、Sinusoidal 試験の解析では精度を保つため、時間刻みの最大値を 1.2(hour)とした。また、LTG 法では Crump 法は$\alpha = 0.0$、$T_{max} = 170$、$E' = 10^{-6}$、$N = 7$、細野法は、$\sigma_0 = 5.0$、$k = 10$、$\mu = 5$とした。解析に用いた要素は 517、節点は 460 で、境界条件は上部・下部が不透水層、注水井と観測井の中心から左右 1000m を定水位境界、初期条件は 30m 水頭の被圧帯水層とした。定圧試験は水頭を 50m 一定、定流量試験は注水量を 1.0ℓ/hour、Sinusoidal 試験は正弦波周期 1cycle/3day、注水圧を水頭 40m からの 10m 振幅として解析を行った。定圧解析結果を図-5、定流量解析結果を図-6 に、Sinusoidal 試験結果を図-7 に示す。また表-2 に解析演算時間を示す。

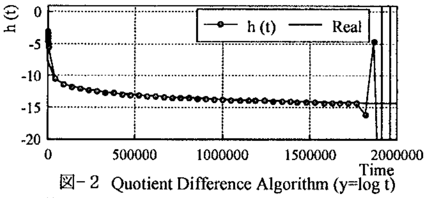


図-2 Quotient Difference Algorithm (y=log t)

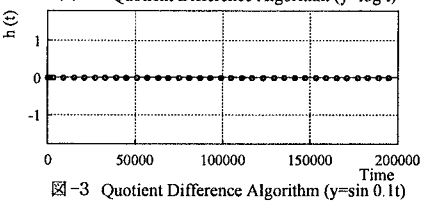


図-3 Quotient Difference Algorithm (y=sin 0.1t)

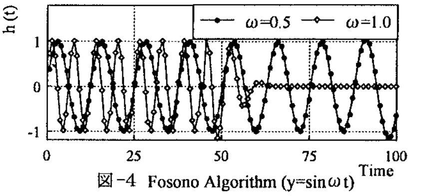


図-4 Fosono Algorithm (y=sinωt)

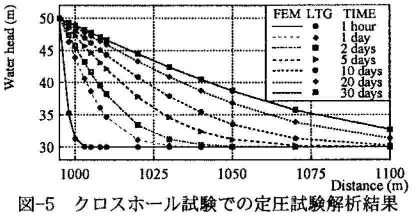


図-5 クロスホール試験での定圧試験解析結果

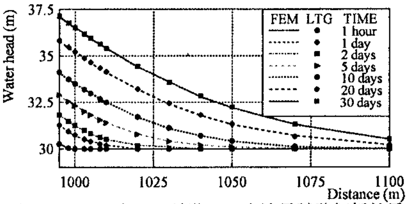


図-6 クロスホール試験での定流量試験解析結果

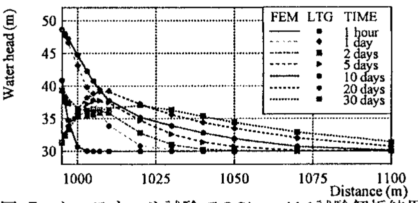


図-7 クロスホール試験でのSinusoidal試験解析結果

表-2 LTG 法による浸透流解析演算時間

| | 定圧 | 定流量 | Sinusoidal |
|---|---|---|---|
| 時間差分法 | 20 (sec) | 20(sec) | 88(sec) |
| LTG 法 | 11(sec) | 11(sec) | 60(sec) |

## 6.おわりに

Laplace 変換を用いた浸透解析法が、比較的迅速に岩盤の浸透特性の把握に有効であることが確認できた。岩盤の浸透特性を把握するため、逆解析のプログラムコードの開発が今後の課題である。

【参考文献】

1) E.A.Sudicky : The Laplace Transform Galerkin Technique. A Time-Continuous Finite Element Theory and Application to Mass Transport in Groundwater, Water Resources Research,Vol.25,No.8,pp.1833-1846,1989.

2) 細野敏夫：数値ラプラス変換,電気学会論文誌,第 99 巻,第 10 号,pp.494-500, 1979.