土木学会第53回年次学術講演会（平成10年10月）

III－A286

亀裂性岩盤における三次元浸透流解析手法に関する研究

岡山大学環境理工学部　正会員　西垣　誠
大阪ガス（株）　正会員○新堂充彦
動力炉・核燃料開発事業団　正会員　竹内竜史

1.はじめに

岩盤の透水性は亀裂の性状に依存した強い異方性と貯留性を有している。従って、岩盤地下水の透水性、貯留性を評価し、挙動を予測するには三次元的な取り扱いが必要である。本研究では亀裂性岩盤を対象としたクロスホール試験、特にシヌソイダル試験の結果から岩盤の三次元の浸透特性の評価を行う際に、時間的な短縮が図ることのできる方法の提案と検証を目的とした。そこで、微分方程式における時間的な離散を除去するためにLaplace Transform Galerkin [1] を用いた三次元浸透流解析手法の開発を行った。これにより、時間領域で複雑な問題を周波数領域での簡単な問題に変換でき、より迅速かつ記憶容量の減少が可能となった。また、この解析コードの有効性を検証するために時間差分法を用いた解析との比較を行い、考察した。

2.ラプラス変換を用いた三次元浸透流解析

時間関数から周波数関数へのラプラス変換は変数 t の全ての正の値に対して定義された関数 $h(t)$ に e^{-pt} をかけ、かつ t に関して零から無限まで積分することで得られる。

ラプラス変換を施した支配方程式を以下に導く。

$$divK\nabla\bar{h} = S_s(p\bar{h} - h(t=0)) = \bar{Q} \tag{1}$$

ここで、p：ラプラスパラメータ、$\bar{h}$：ラプラス変換された水頭、$\bar{Q}$：ラプラス変換された注入流量

また、上式を解くための初期条件、境界条件を以下のように定める。

(1)初期条件

$$h(x_i, 0) = h_0(x_i) \tag{2}$$

(2)境界条件

(a)水頭が既知の境界

$$\bar{h}(x_i, p) = \bar{h}_b(x_i, p) \tag{3}$$

(b)流量が既知の境界

$$(k_{ij}\frac{\partial\bar{h}}{\partial x_j})n_i = -\bar{V}(x_i, p) \tag{4}$$

ここで、n_i：境界面からの垂直ベクトル

もし、境界条件が時間に関して変動するものであれば、重ね合わせの原理を適用することで、複雑な時間変動の入力を行うことができる。

以上の式からラプラス変換した水頭を有限要素法により代数的に求め、解を時間領域にラプラス逆変換することで目的時間の解を得る。時間軸の差分近似を行わないため、演算時間の短縮が期待できる、丸め誤差やその累積が少ない、並列型計算機の利用による高効率な演算が可能、といった利点がある一方、ラプラス逆変換の段階で精度上の問題が生じる。西垣ら [2] は定圧・定流量試験の解析において逆変換を行う際にはQuotient Difference Algorithmが、境界条件が大きく変動するシヌソイダル試験の解析の際には細野の方法 [3] が有効であることを示した。従って、本研究でも数値ラプラス変換の手法としてこれらを用いた。

3.LTG法を用いた三次元浸透流解析手法の検証

LTG法を用いた本解析手法の妥当性を検証するために、図-1に示す簡単なモデルを用い、従来の時間差分

Keywords：シヌソイダル試験、LTG法、Laplace変換、浸透流解析

連絡先：〒700-8530　岡山市津島中2-1-1　Tel：086-251-8167　Fax：086-251-8257

による浸透流解析と比較した。ここで、モデルは等方均質性媒体で、透水係数 ks=1.0×10^{-6}(cm/sec)、比貯留係数 Ss=1.0×10^{-8}(1/cm)とした。初期水位 h_0を20m、境界条件として左側面の水位を15m、右側面の水位を20mに固定した。解析はほぼ定常になるまで行い、経時的な水頭の変化を比較した。解析結果を図-2に示す。両手法の結果は非常によく一致している。また、演算時間はLTG法(Quotient Difference Algorithm)で約13min、従来法で約25minであった。従って、本解析手法には十分な妥当性と有効性を確認できた。なお、用いた計算機は富士通製FMV-5150NA/X(CPU：intel Pentium 150Mhz)である。

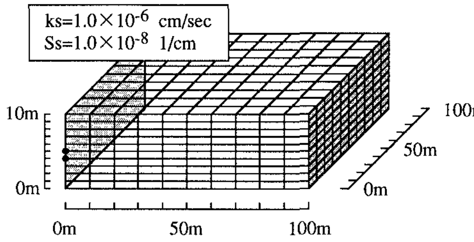

図-1　解析モデル

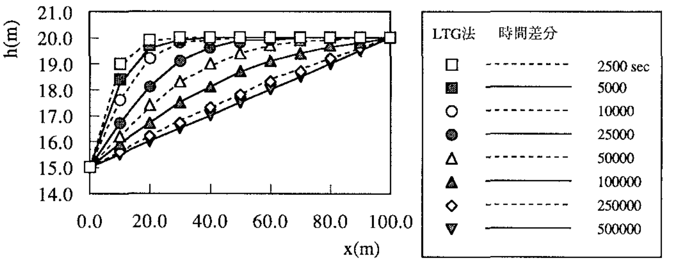

図-2　LTG法と時間差分法の比較

4.シヌソイダル試験での解析の検証

従来の時間差分法の解析では、シヌソイダル試験のように境界条件が経時的に変動する場合、必然的に時間間隔を小さくする必要があり、三次元で解析を行う際に演算時間の増大が懸念される。しかも、厳密な境界条件の導入は不可能であり、時間間隔の取り方で解がばらつき、解析をより困難にしている。LTG法では境界条件を関数化したうえで取り扱うため厳密に導入することができ、時間間隔の取り方を考慮せずに解析が可能である。図-3に一例を示す。解析モデルは図-1のモデルを用い、左側境界の節点において正弦波周期1cycle/6hour、注水圧を基準水頭30mから18m振幅として解析を行った。解析のパターンとそれぞれの演算時間を表-1に示す。両手法の結果は比較的良く一致した。しかし、演算時間は明らかにLTG法が短く、本解析手法の有効性が分かる。LTG法では解析上、境界条件を関数化するため、シヌソイダル試験のように境界条件が変動するような場合には、本解析手法が演算時間だけでなく、解の信頼性、安定性の面でも非常に有効であるといえる。ただし、複雑な解析を行う場合は個人差が生じる可能性が大きくなるので注意が必要である。

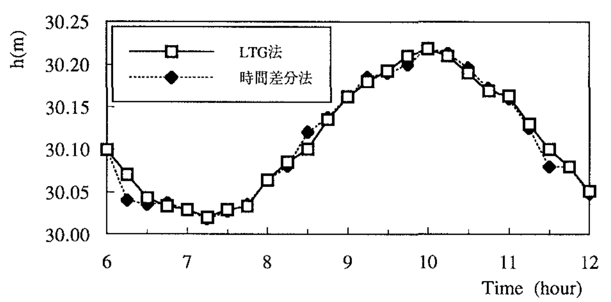

図-3　シヌソイダル試験における解析

表-1　境界条件の扱いと演算時間

	LTG法	時間差分法
シヌソイダル境界条件の導入法(/1cycle)	関数化(ラプラス変換)	120分割
演算時間(sec)	3560	10640

5.おわりに

本研究ではラプラス変換を用いた三次元の解析コードを開発した。これにより時間差分法に対し迅速に解を求めることが可能になった。特に境界条件が変動するような場合には有効であることを確認した。

【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)西垣誠・松尾雄一郎：亀裂性岩盤での水圧トモグラフィーに関する研究，土木学会第52回年次学術研究発表会講演集第3部(B)-A253, pp.506-507, 1997.

3)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.