

CS-17 多層地盤内熱伝導解析におけるゾーン分割位置の推定

○ 三井造船（株） 正会員 佐野 泰彦
中央大学 正会員 川原 睦人

1. 序論

近年、パラメーター同定のための様々な手法が開発され、地下水浸透流解析の分野ではかなりの研究成果を挙げているようである。また、地盤内熱伝導問題にもパラメーター同定が適用され^[1]、地盤内温度制御システム開発^[2]のための重要なプロセスとなっている。地盤内熱伝導現象解析において、ある観測値を得て、それにあわせる再現計算をする時には、温度に関する各種パラメーター（定圧比熱、熱伝導率など）を同定しなければならない。更に、解析対象とする地盤が多層構造となっている場合には、解析領域を実地盤にあわせて、物性値の変化する層と層の境目をゾーン分割位置として、各ゾーンに対してパラメーターを決定しなければならない。しかし、現在までのパラメーター同定の問題点として、ゾーン分割位置が正しく設定できていないことが挙げられる。特に、地盤内の解析のように土層の構造が複雑であったり、わかっていない場合、かなり曖昧な決め方をしているようである。地下水浸透流問題では、帯水層が複雑な多層構造となっている問題を解くに際して、ゾーン分割位置の決定が、同定精度、順解析計算精度に大きく影響する。本研究では、温度解析に有限要素法を適用し、状態量観測をもとに、ゾーン分割位置を非線形最小2乗法による最小化法を用い推定する。ゾーン分割位置を表すパラメーターを同定する逆解析問題に帰着するわけである。観測値には、地盤内温度データとして、千葉県農業試験場の制御実験用圃場の地下に温度センサーを埋設して、温度を計測したものを利用した。

2. 基礎方程式

基礎方程式として以下に示す二次元非定常熱伝導方程式を用いる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial T}{\partial y} \right) = Q \quad (1)$$

ここで、 T 、 ρ 、 C_p 、 β 、 Q は、それぞれ温度、密度、比熱、熱伝導率、内部発熱量を表す。地盤内の温度分

布は、この方程式で表せるものとする。土中の水移動等の効果は、無視している。

3. ゾーン分割位置推定手法

ここで、ゾーン分割位置を推定する計算方法について説明する。まず、簡単のため、図-1の様なモデルを用いることとする。図に示す解析領域は、Zone 1とZone 2の2領域から構成されている。2領域を隔てるゾーン分割位置は、わかっていないものとする。そこで、移動節点 P_1 、 P_2 、 P_3 を設け、この3節点の水平方向移動により、真の分割位置が何処にあるかを探索する。ここでは、移動節点は、水平方向のみの移動だが、2次元方向への拡張は、容易である。

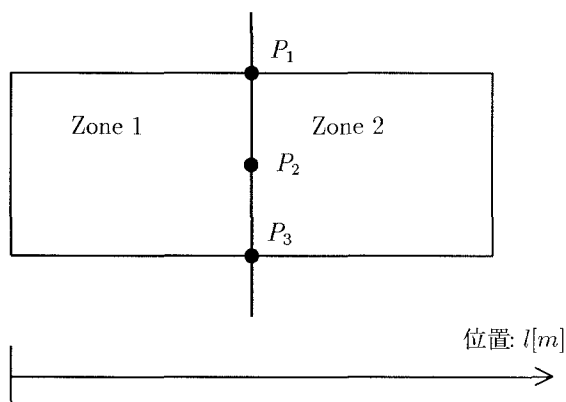


図-1：ゾーン分割位置推定の概念図

評価関数を以下のように定義する。

$$J(l) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\{T(t)\} - \{T^*(t)\})^T (\{T(t)\} - \{T^*(t)\}) dt \quad (2)$$

$\{T(t)\}$ 、 $\{T^*(t)\}$ は、それぞれ温度計算値と観測値を表す。 t_0 、 t_f は、計算開始時刻、計算終了時刻である。この評価関数が最小になるような、ゾーン分割の最適位置を推定する。最小化手法として、共役勾配法を用いた。

4. 数値計算例

図-2に千葉県農業試験場の制御実験圃場地盤の断面図を示す。この試験場で地温制御システムの開発に関する様々な実験が行われている。各観測点において30分おきに温度が計測され、パイプは、地温制御用に埋設されている。図のとおり地盤構成は、3種類の砂層から成りそれぞれ違った熱伝導率をもっていると思われる。2層目（粗砂層）と3層目（玉砂利層）を隔てる境界位置が、不明瞭であると思われるため、正確なゾーン分割位置を推定してみた。図-3に示す有限要素メッシュを使って温度解析を行う。A-B、B-C、C-D境界は断熱とし、A-D境界では温度を強制境界条件として与えた。今回 ρC_p を 2.0×10^6 [$Kg/K \cdot ms^2$]一定とする。まず、図-3に示されたメッシュパターンを用いて各層の熱伝導率を同定しておく。次に、移動節点 P_1 、 P_2 、 P_3 を移動節点として定め、同定された熱伝導率を用いて、ゾーン分割位置の推定計算を行う。観測値として、1993年10月1日から10月4日に得られたもの（データ1）と1993年12月8日から12月11日に得られたもの（データ2）を用いた。それぞれ、図-4・a、bに示す。数値計算結果を図-5・a（データ1）、図-5・b（データ2）に示す。両結果とも、安定した計算が行われ、移動節点が収束している様子がわかる。図-6・a（データ1）、図-6・b（データ2）に推定されたメッシュパターンを示す。結果として、2つのデータを使って同じような分割位置の形状が得られたことになる。

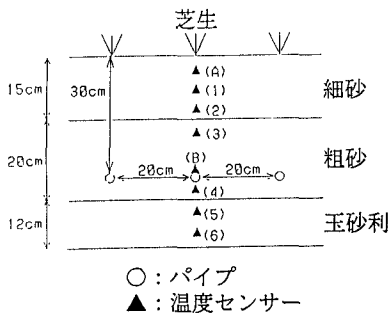


図-2：制御実験圃場
地盤の断面図

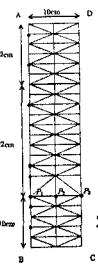


図-3：有限
要素分割図

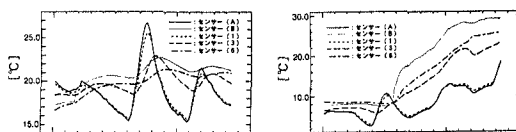


図-4・a：データ1 図-4・b：データ2

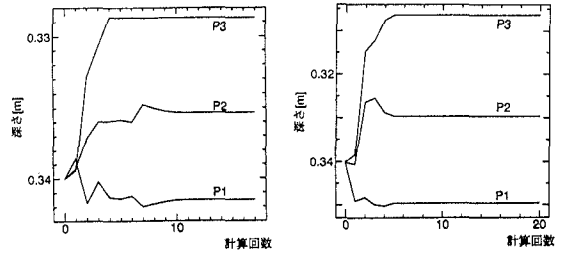


図-5・a：データ1

図-5・b：データ2

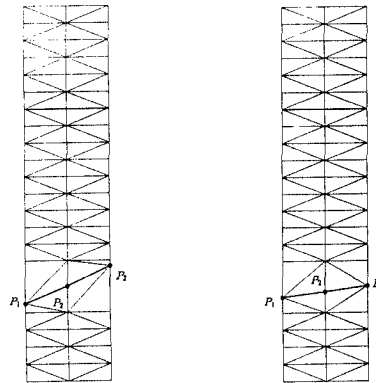


図-6・a：データ1

図-6・b：データ2

5. 結論

ゾーン分割位置の推定手法を提唱し、数値解析例により、その有効性が示された。地盤内熱伝導解析の計算精度の向上につながるものと思われる。千葉県農業試験場の2層目と3層目を分割する位置を数値的に推定したが、2ケースの計算で安定した収束解が得られ、ほぼ同じような境界の形状が推定され、信頼性の高い結果を得た。この手法が、多層地盤内の地下水浸透流問題に適用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 佐野泰彦、安重晃、川原睦人：“現地観測データを用いた地盤内熱伝導係数の同定”，第49回土木学会年次学術講演会講演概要集（共通セッション），pp.144-145
- [2] 鈴木誠一、安重晃、川原睦人：“地中温度の最適制御に関する実験と数値解析の比較検討”，第49回土木学会年次学術講演会講演概要集（共通セッション），pp.142-143