

微視構造を考慮した土の物質移行拡散解析

仲 沢 武 志

概 要

本文では、汚染の拡散状況や地下水の汲み上げによる浄化において、その効果を検討するために用いられる予測解析について考察する。地盤中の物質拡散挙動の予測には物質移行拡散解析が行なわれることになるが、この時移流項での流速には実流速が用いられている。通常の地下水浸透流解析では Darcy 流速が計算されるが、実流速は、この Darcy 流速を間隙率で除することで求められている。しかしながら、この方法で求められる実流速は、その実績から有効な場合もあるが、適用性に関しては必ずしも十分に把握されているものではないように思われる。そこで、本文では、地盤の内部構造を考慮した形で提案された透水モデルで実流速を求め、物質の拡散挙動への影響を考慮できる計算手法を若干の例題とともに示す。

Dispersion Analysis for Soils with Microstructure

Abstract

In this study we consider the calculation model of contaminant dispersion in soil and in ground water. In the prediction of contaminant behavior in soil and in ground water, we usually perform transportation and/or dispersion analysis. In that calculation, the concept of “real velocity” is used. The “real velocity” is obtained by dividing the Darcy velocity by the void ratio. However, this calculation does not include any consideration of ground properties such as microstructure and/or anisotropy.

In this study we discuss a calculation of dispersion by using a “real velocity” model with microstructure

キーワード： 微視構造, 透水, 移行拡散,
予測解析, 有限要素法

§1. はじめに

環境問題に社会的な関心が寄せられる中、地盤や地下水の汚染もその範疇で注目されている問題点となっている。地盤や地下水の汚染を浄化するには、汚染の現状を把握し、透水性のような地盤特性を考慮して対策工法が選定される。汚染の現状は、ボーリングからのサンプリング試料での物質の含有量や地下水中の濃度調査によって推測される。また、稼動中工場等ではその原位置浄化に地下水の汲み上げが採用されることがあるが、その効果の事前把握が必要と考えられる。このような場合、地盤の透水性や拡散物質の性質を考慮して行う予測解析が重要な役割を果たすこととなる。

地盤中に拡がる物質の挙動は、物質移行拡散方程式で解析されるが、その際、移流項には実流速が用いられている。この実流速はいわゆる Darcy 流速を間隙率で除して求められている。実流速は、地盤が標準砂のように比較的均一であって等方的な場合には有効なものであると考えられるが、実際の地盤は一般的にそれほど単純ではないように思われる。

そこで、物質の拡散挙動を予測する解析においては、実流速に関する検討が必要であると考えられるが、必ずしも十分な考察がなされているものではないのが現状であるものと思われる。

一方、材料のマクロな力学挙動をそれが構成する微視構造を考慮することで評価する手法が微視力学(マイクロメカニクス)として発展している¹⁾。この手法を用いて透水性を微視的に考慮したモデルが文献 2)において報告されている。

本文では、このモデルを用いて一般的な考え方で導入される実流速が物質の拡散挙動に与える影響を数値解析的に検討する。

§2. 微視構造を考慮した透水モデル

文献 2)での微視構造を考慮した透水モデルは、Eshelbyの等価介在物法と森・田中の平均化手法を組み合わせることで、次式のように得られている²⁾。

$$\langle k \rangle = [k_M + f k_M (S - I) P (k_M - k_I)] [I + f S P (k_M - k_I)]^{-1} \quad (1)$$

ここに、 $P = \{k_M - (k_M - k_I)S\}^{-1}$

$\langle k \rangle$: 領域の平均透水係数

k_M : 母材の透水係数, k_I : 介在物の透水係数

f : 介在物の体積比率, S : Eshelby テンソル

式(1)は、領域全体の透水係数に対する微視構造の影響を把握し易くするために次式のように書き換えることもできる。

$$\langle k \rangle = k_M + \frac{f(k_I - k_M)k_M}{(k_I - k_M)(1 - f)S + k_M} \quad (2)$$

ここで、領域内の平均流速を次式で定義する。

$$\langle v \rangle = f \langle v^{(I)} \rangle + (1 - f) \langle v^{(M)} \rangle \quad (3)$$

ここに、 $\langle v \rangle$: 領域平均の流速, $\langle v^{(M)} \rangle$: 母材の流速, $\langle v^{(I)} \rangle$: 介在物の流速である。

この定式化から母材の実流速は次式で得られる。

$$\langle v^{(M)} \rangle = [I + f(S - I)\{k_M - (k_M - k_I)S\}^{-1}(k_M - k_I)]^{-1} \langle v \rangle \quad (4)$$

微視構造の流速への影響が明確となるように透水係数と同様に式(4)を書き直すと次式が得られる。

$$\langle v^{(M)} \rangle = \langle v \rangle - \frac{f(S - I) \frac{k_M - k_I}{k_M - (k_M - k_I)S}}{I + f(S - I) \frac{k_M - k_I}{k_M - (k_M - k_I)S}} \langle v \rangle \quad (5)$$

式(5)と式(3)より、介在物領域での流速は次式のように得られる。

$$\langle v^{(I)} \rangle = \langle v \rangle + \frac{(1 - f)(S - I) \frac{k_M - k_I}{k_M - (k_M - k_I)S}}{I + f(S - I) \frac{k_M - k_I}{k_M - (k_M - k_I)S}} \langle v \rangle \quad (6)$$

なお、介在物の透水係数が $k_I \rightarrow 0$ の時、式(5)は従来の実流速に一致し、式(6)はゼロとなる。このことより、本定式化は従来 of 計算手法を包含した1つの拡張となっている。

§3. 支配方程式

3.1 浸透流に関する計算手順

3.1.1 浸透流に関する支配方程式

浸透流に関する支配方程式は、従来から得られているもの³⁾をそのまま使うことができる。ただし、流速や透水係数は領域内でマクロに平均化されたものとなることに注意する。なお、本章ではテンソル表記に添え字付き表示を用いる。

浸透流に関する場の方程式は次式に示す Richards による連続の式である。

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f \langle v_i \rangle) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \langle \theta \rangle) \quad (7)$$

ここに、 ρ_f : 間隙流体の密度, $\langle \theta \rangle$: 領域平均の体積含水率を表わす。さらに、体積含水率は次式で定義されている。

$$\theta = n S_r \quad (8)$$

ここに、 n : 間隙率, S_r : 飽和度 ($0 < S_r \leq 1$) である。領域内の平均的な体積含水率については、式(5)を次式のように扱えるものここでは考える。

$$\langle \theta \rangle = \langle n \rangle \langle S_r \rangle \quad (9)$$

また、領域内の平均流速は式(1)の平均透水係数と領域内の平均的なヘッド $\langle h \rangle$ ならびに Darcy 則から次式で与えられる。

$$\frac{\partial \langle v_i \rangle}{\partial x_i} = - \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_j} \quad (10)$$

これらより、式(7)は次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_j}) &= \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \langle n \rangle \langle S_r \rangle) \\ &= (\langle n \rangle \langle S_r \rangle \frac{\partial \rho_f}{\partial \langle \phi \rangle} + \rho_f \langle S_r \rangle \frac{\partial \langle n \rangle}{\partial \langle \phi \rangle} + \rho_f \langle n \rangle \frac{\partial \langle S_r \rangle}{\partial \langle \phi \rangle}) \frac{\partial \langle \phi \rangle}{\partial t} \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 $\langle \phi \rangle$ は領域平均の圧力水頭である。

式(11)が本文におけるマクロな浸透挙動に対する支配方程式となる。

浸透挙動において間隙の変化がなく、間隙流体の密度が無視できるとしたときには、式(8)は次式のように簡単化される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\langle k_{ij} \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_j}) = c(\phi) \frac{\partial \langle \phi \rangle}{\partial t} \quad (12)$$

$$\text{ここに、} \quad c(\phi) \equiv \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial \langle \phi \rangle} \quad (13)$$

$c(\phi)$ は比水分容量と呼ばれていて、圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化の割合を表わす。

3.1.2 浸透流に関する初期・境界条件

式(11)あるいは式(12)を解くには初期条件や境界条件が必要である。これらを以下に列挙する。

(1) 初期条件

$$\langle h(x_i, 0) \rangle = \langle \hat{h}_0(x_i) \rangle \quad (14)$$

(2) 境界条件

① 全ヘッドが既知の場合

$$\langle h(x_i, t) \rangle = \langle \hat{h}(x_i, t) \rangle \quad (15)$$

② 流量が既知の場合

$$(k_{ij} \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_i}) n_i = - \langle Q(x_i, t) \rangle \quad (16)$$

以上のように、本文の定式化における初期値や境界値はマクロに平均化された量に対して設定されるものとする。

また、本定式化において、§2で現れる体積比率 f は介在物の混入率であり、間隙率 $\langle n \rangle$ は領域内に占める間隙の比率である。標準砂のような土質を考え、 $k_l \rightarrow 0$ とした場合、両者はほとんど一致した概念となるが、本文の定式化においては異なる状態を表現している。すなわち、一般には $(1-f)$ と $\langle n \rangle$ は異なる概念となることに注意する。

3.2 物質移行拡散に関する計算手順

3.2.1 母材における物質移行拡散挙動

式(11)あるいは式(12)を支配方程式として初期値・境界値問題を解き、平均ヘッドを求めた上で平均流速を算出する。さらに、得られた平均流速を、式(5)に代入することで母材の流速を求め、次式の物質移行拡散方程式に代

入することで、地盤を拡散する物質の挙動を解析することが可能となる。

$$\frac{\partial C^{(M)}}{\partial t} + \langle v_i^{(M)} \rangle \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_j}) \quad (17)$$

ここに、 $C^{(M)}$: 母材での拡散物質の濃度、 $D_{ij}^{(M)}$: 母材における物質の分散係数を表わす。

3.2.2 介在物における物質移行拡散挙動

介在物領域での平均的な物質の拡散挙動も式(6)を用いることで介在物における流速 $\langle v_i^{(I)} \rangle$ を計算し、式(17)の $\langle v_i^{(M)} \rangle$ の代わりに $\langle v_i^{(I)} \rangle$ を次式のように用いれば把握することができる。

$$\frac{\partial C^{(I)}}{\partial t} + \langle v_i^{(I)} \rangle \frac{\partial C^{(I)}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij}^{(I)} \frac{\partial C^{(I)}}{\partial x_j}) \quad (18)$$

ここに、 $C^{(I)}$: 介在物領域での拡散物質の濃度、 $D_{ij}^{(I)}$: 介在物領域における物質の分散係数を表わす。

3.2.3 2相間での濃度勾配

母材や介在物での拡散物質の挙動は式(17)と式(18)を解くことで基本的に得ることができる。しかしながら、母材と介在物領域とで流速が異なることから、拡散挙動においてはこれら2相の間で濃度勾配が生じるものと考えられる。そこで、ここでは二重間隙モデル⁵⁾⁶⁾の概念を用いてこの濃度勾配の影響を解析手順に組み込むこととする。これには、濃度勾配によって移動する拡散物質の量を Γ として、母材と介在物領域での物質の収支を考慮すればよい。このようにして式(17)および式(18)を書き換えると次式となる。

$$\frac{\partial C^{(M)}}{\partial t} + \langle v_i^{(M)} \rangle \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_j}) - \Gamma \quad (19)$$

$$\frac{\partial C^{(I)}}{\partial t} + \langle v_i^{(I)} \rangle \frac{\partial C^{(I)}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij}^{(I)} \frac{\partial C^{(I)}}{\partial x_j}) + \Gamma \quad (20)$$

式(19)ならびに式(20)が本文での物質移行拡散挙動における支配方程式となる。なお、本文では濃度勾配による物質の移動収支量が、濃度勾配に単純に比例するものと考え、 Γ として次式を用いることとする。

$$\Gamma = \kappa (C^{(M)} - C^{(I)}) \quad (21)$$

ここに、 κ は比例定数を表わす。

3.2.4 物質移行拡散に関する初期・境界条件

初期条件や境界条件を本文では次式のようにマクロな平均量で設定できるものとする。

(1) 初期条件

$$C(x_i, 0) = \hat{C}_0(x_i) \quad (22)$$

(2) 境界条件

① 濃度が既知の場合

$$C(x_i, t) = \hat{C}(x_i, t) \quad (23)$$

②濃度フラックスが既知の場合

$$(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j})n_i = -q(x_i, t) \quad (24)$$

§4. 有限要素法による離散化

§3での支配方程式を任意の初期値・境界値で計算するために数値解析手段を用いる。本文においては有限要素法を用いるものとする。以下に、その基礎となる重み付き残差法とともに有限要素法による離散化を記す。

4.1 浸透流解析における離散化

§3で示したように、ここでの浸透流解析における支配方程式は式(11)である。しかしながら、以降の記述においては簡単のため、上述の条件の下で式(12)を用いる。なお、物質移行拡散とともに浸透流を考えている場合、間隙流体の密度変化を無視することは、拡散物質の重さを無視するという近似に相当する。

さて、式(12)に重み付き残差法⁴⁾を適用すると次式となる。

$$\int_V W^m \frac{\partial}{\partial x_i} \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_j} dV - \int_V W^m c(\phi) \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial t} dV = 0 \quad (25)$$

ここに、 W^m は重み関数である。式(25)を弱形式⁴⁾で表わすと次式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial W^m}{\partial x_i} \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_j} dV + \int_V W^m c(\phi) \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial t} dV \\ = \int_S W^m \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_j} n_i dS \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、形状関数 N^n を導入して、ヘッドを次式のように展開する。

$$\langle h(x_i, t) \rangle = N^n(x_i) \langle \hat{h}^n(t) \rangle \quad (27)$$

式(27)を式(26)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_V \left\{ \frac{\partial W^m}{\partial x_i} \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial t} (W^m c(\phi) N^n) \right\} dV \langle \hat{h}^n \rangle \\ = \int_S W^m \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_j} n_i dS \langle \hat{h}^n \rangle \end{aligned} \quad (28)$$

さらに、時間に関する微分項に後退差分を適用することとすれば、式(28)は次式のようにある。

$$\begin{aligned} \int_V \left\{ \frac{\partial W^m}{\partial x_i} \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_j} + \frac{1}{\Delta t} (W^m c(\phi) N^n) \right\} dV \langle \hat{h}^n_{(t)} \rangle \\ = \int_S W^m \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_j} n_i dS \langle \hat{h}^n_{(t)} \rangle + \int_V \frac{1}{\Delta t} (W^m c(\phi) N^n) dV \langle \hat{h}^n_{(t-\Delta t)} \rangle \end{aligned} \quad (29)$$

式(29)が浸透流解析における離散化された支配方程式となる。

式(29)を用いて解析領域内の平均的なヘッドを設定されたメッシュ上の各節点で計算する。その求められたヘッドから、各要素あるいは積分点の流速を次式から計算する。

$$\langle v_i \rangle = - \langle k_{ij} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_j} \langle \hat{h}^n \rangle \quad (30)$$

この平均流速を式(5)に代入することで、母材の流速を計算することができる。この段階で求められた母材の流速を式(18)の左辺第 2 項の $\langle v_i^{(M)} \rangle$ に用いて物質の移行拡散を実施する。介在物については、式(30)での流速を式(6)に代入することで流速を求めた上で、式(19)の $\langle v_i^{(I)} \rangle$ に用いればよい。

4.2 物質移行拡散解析における離散化

母材に対する物質の移行拡散方程式は式(19)である。浸透流の場合と同様な手順で、この式に重み付き残差法を適用すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_V W^m \frac{\partial C^{(M)}}{\partial t} dV + \int_V W^m \langle v_i^{(M)} \rangle \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_i} dV = \\ = \int_V W^m \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_j}) dV - \int_V W^m \Gamma dV \end{aligned} \quad (31)$$

浸透流解析と同様に、式(31)の右辺を弱形式で表わすと次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \int_V W^m \frac{\partial C^{(M)}}{\partial t} dV + \int_V W^m \langle v_i^{(M)} \rangle \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_i} dV + \int_V \frac{\partial W^m}{\partial x_i} (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_j}) dV \\ - \int_V W^m \Gamma dV = \int_S W^m (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial C^{(M)}}{\partial x_j}) n_i dS \end{aligned} \quad (32)$$

さらに、浸透流解析と同様に、形状関数 N^n を導入して濃度 C を次式のように展開する。

$$C^{(M)}(x_i, t) = N^n(x_i) \hat{C}^{(M)n}(t) \quad (33)$$

$$C^{(I)}(x_i, t) = N^n(x_i) \hat{C}^{(I)n}(t) \quad (34)$$

式(33)および式(34)を式(21)とともに式(32)へ代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_V \left[W^m \frac{\partial N^n}{\partial t} + W^m \langle v_i^{(M)} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_i} + \frac{\partial W^m}{\partial x_i} (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) + W^m \kappa N^n \right] dV \hat{C}^{(M)n} \\ - \int_V W^m \kappa N^n dV \hat{C}^{(I)n} = \int_S W^m (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) n_i dS \hat{C}^{(M)n} \end{aligned} \quad (35)$$

移流項を持つ方程式の解析においては、風上法や Euler 法等種々の精度向上手段が提案されている。これについては別途考慮するものとし、ここでは簡単に後退差分を用いる。この前提においては、式(35)は次式となる。

$$\int_V \left[\frac{1}{\Delta t} W^m N^n + W^m \langle v_i^{(M)} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_i} + \frac{\partial W^m}{\partial x_i} (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) + W^m \kappa N^n \right] dV \hat{C}_i^n$$

$$-\int_V W^m \kappa N^n dV \hat{C}_t^{(I)n} = \left[\int_S W^m (D_{ij}^{(M)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) n_i dS \right] \hat{C}_t^{(M)n} + \left[\int_V \left\{ \frac{1}{\Delta t} W^m N^n \right\} dV \right] \hat{C}_{t-\Delta t}^{(M)n} \quad (36)$$

式(36)がここで用いる離散化された物質の移行拡散に対する支配方程式である。

介在物領域における拡散現象も同様な手順で次式のように導かれる離散化された支配方程式を解くこととなる。

$$\left[\int_V \left\{ \frac{1}{\Delta t} W^m N^n + W^m \langle v_i^{(I)} \rangle \frac{\partial N^n}{\partial x_i} + \frac{\partial W^m}{\partial x_i} (D_{ij}^{(I)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) + W^m \kappa N^n \right\} dV \right] \hat{C}_t^{(I)n} - \left[\int_V W^m \kappa N^n dV \right] \hat{C}_t^{(M)n} = \left[\int_S W^m (D_{ij}^{(I)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) n_i dS \right] \hat{C}_t^{(I)n} + \left[\int_V \left\{ \frac{1}{\Delta t} W^m N^n \right\} dV \right] \hat{C}_{t-\Delta t}^{(I)n} \quad (37)$$

以上の手続きで母材ならびに介在物領域での拡散物質の挙動を把握することができる。

§5. 適用例

前節までに記述した計算手段の適用性を示すためにここで例題を示す。解析例を有限要素メッシュや境界条件とともに図1に示す。なお、簡単のため、ここでの解析は2次元問題とし、浸透流について定常状態を考える。

この例題においては、マクロな透水係数は式(1)または式(2)より $1.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と計算され、領域全体のマクロな Darcy 流速は $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ と求められる。

一方、母材での流速はこの値と式(5)より、 $1.25 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ となる。また、介在物領域では式(6)と平均流速から $2.48 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ と求められる。

なお、この例題は2次元問題として扱うものとし、介在物は紙面直角方向に無限の長さを持った円筒であるものとする。この時、Eshelby テンソル S_{ij} は次式を用いることとなる。

$$S_{11} = \frac{a_2}{a_1 + a_2} \quad S_{22} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \quad S_{33} = 0 \quad (38)$$

ただし、ここでは $a_1 = a_2$ とする。

次に、上で求めた母材の流速ならびに介在物領域での流速と、式(36)や式(37)から各相の物質移行拡散挙動を求めることになる。この時分散係数である $D_{ij}^{(M)}$ や $D_{ij}^{(I)}$ が必要となる。本文では、これらに次式を用いる⁷⁾。

$$D_{ij}^{(M)} = a_T^{(M)} |V^{(M)}| \delta_{ij} + (a_L^{(M)} - a_T^{(M)}) \frac{V_i^{(M)} V_j^{(M)}}{|V^{(M)}|} \quad (39)$$

$$D_{ij}^{(I)} = a_T^{(I)} |V^{(I)}| \delta_{ij} + (a_L^{(I)} - a_T^{(I)}) \frac{V_i^{(I)} V_j^{(I)}}{|V^{(I)}|} \quad (40)$$

ここに、 $a_L^{(M)}$ 、 $a_L^{(I)}$: 母材、介在物各々での縦分散長、 $a_T^{(M)}$ 、 $a_T^{(I)}$: 母材、介在物各々での横分散長、 $|\cdot|$ はノルムを表わす。

本解析例では文献8)を参考に縦分散長 a_L を母材と介在物の両相で 1m とし、横分散長を縦分散長の1割として

物質の拡散挙動を計算した。その結果が図2である。なお、本文では式(21)における比例定数 κ をゼロと仮定した計算例を示す。また、図3に図1中の点 A における濃度の時間変化を示す。図3より母材(間隙)の拡散速度が介在物の拡散速度より早いことが自明的に確認できる。しかしながら、従来の実流速の概念では介在物での拡散状況を予測できないのに対して本文での解析モデルでは母材

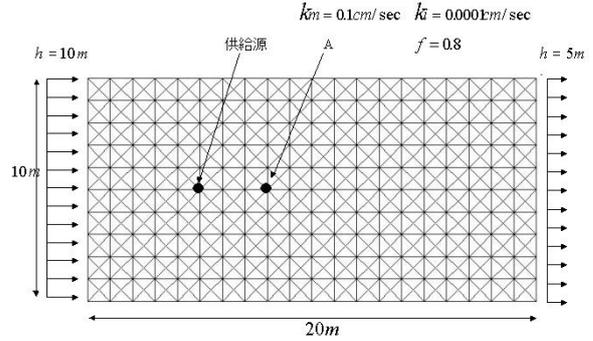


図1 解析対象

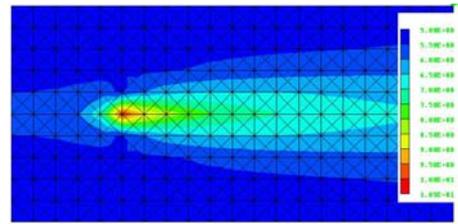


図2(a) 計算結果(母材)

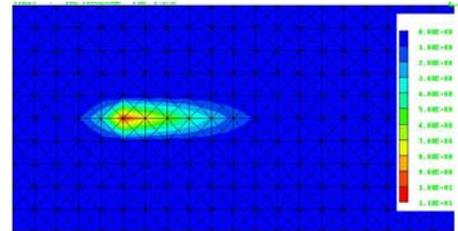


図2(b) 計算結果(介在物)

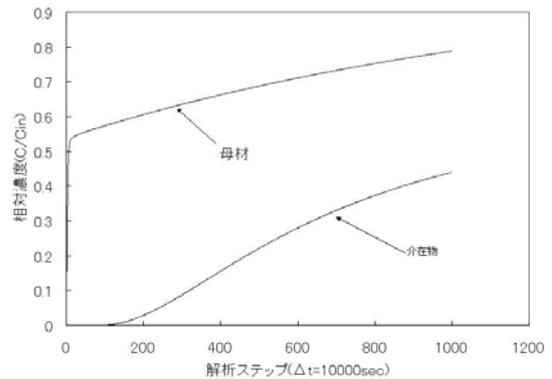


図3 濃度の時間変化(A点)

だけでなく、ここで示したように介在物での拡散状況も把握できているところに1つの特徴をもつ。なお、介在物での透水性をゼロとして扱おうと、式(5)や式(6)および式(39)と式(40)から、ここでの解析モデルは従来からの計算手法に帰着される。介在物での挙動を考慮するための1つの拡張手段として位置付けることができる。

§6. あとがき

ここでは微視構造を考慮した透水モデルによって実流速を計算し、拡散挙動に対する影響を考慮できる計算手法について記した。

実際、稼働中の工場においては、原位置での地下水の汲み上げによる浄化手法がまず考えられるが、その効果や残存濃度の予測等、ここで示したモデルの適用性は多いものと考えている。また、拡散状況の予測において比例定数 κ を適切に判断すれば物質の吸着特性も考慮できるモデルに拡張することもできると思われるが、これらの点についてさらに検討を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) Mura, T.: Micromechanics of Defects in Solids 2nd ed., Martinus Nijhoff Publ, 1987
- 2) 仲沢武志: 土の不均一性を考慮した透水モデル, フジタ技術研究報告, 第 41 号, 2005
- 3) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和—不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第 264 号, 1977
- 4) O.C. ツィエンキウィッツ, K. モーガン著, 伊理正夫, 伊理由美訳: 有限要素と近似, 啓学出版
- 5) 大西, 小林, 塩田: 二重間隙モデルを用いた地盤挙動に関する考察, 土木学会論文集, 第 394 号/III-9, 1988
- 6) 仲沢武志: 異方性を考慮した二重間隙モデルによる物質移行拡散解析, 第 56 回土木学会年次講演会概要集 第 III 部門
- 7) Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications, INC, New York, 1972
- 8) W. キンツェルバッハ著, 上田年比古監訳: パソコンによる地下水解析, 森北出版



ひとこと

微視構造を考慮した透水モデルを用いた上で物質の拡散状況を予測する計算方法について考えたわけであるが、今度さらにこの研究を深めたいと考えている次第です。

仲沢 武志