

I-18 GISと連結した浸透・物質移行の連成解析システムとその地盤汚染問題への適用

Groundwater Dispersion Model Considering Seepage and its Coupling
with GIS and Application to Pollution Analysis小早川 博亮¹、キン サンダ²、京谷 孝史³、林 良嗣⁴

Hiroaki KOBAYAKAWA, Khin Sanda, Takashi KYOYA, Yoshitsugu HAYASHI

【抄録】

近年問題となっている地盤汚染問題に対し、その状態を精度良く再現・評価できるシステムの開発が望まれている。本研究は、この問題に対し地下水挙動を応力変形・物質移動と連成させた3次元の問題として解くための有限要素解析コードと地理情報システム（GIS）を組み合わせた解析システムを構築を行ったものである。これにより解析用の入力情報に費やす労力が大幅に削減されるとともに、解析結果からの汚染状態の具体的かつ視覚的な把握が可能となった。また、今後、土地利用分布や人口分布などの他のデータとの関連付けを行うことは容易であり、それによってより現実に即した種々の分析が可能となる発展性を秘めている。本論文では、対象とする現象の支配方程式の混合体理論に基づく導出、および有限要素法による離散化を示した後、GISと連結した解析システムに言及し、構築したシステムを名古屋地区の地盤に適用した解析例を示す。

【Abstract】

In recent years, attention is brought to the problem of groundwater and soil pollution. This raised the need for tools and models for estimating and reproducing the progress of pollutants flow into the groundwater and soil. To meet this need, this study proposes a dispersion model which takes the effects of seepage and stress into considerations. A FORTRAN program representing this model is then written and coupled with a Geographical Information System (GIS) for handling data storage, retrieval, and display of analysis results. The developed system is then applied for analyzing groundwater pollution problem in Nagoya city for which a spatial soil database is available.

【キーワード】：地理情報システム、有限要素3次元連成解析、地盤汚染

【Keyword】：Geographical Information System, Finite Element 3-D Coupling Analysis, Groundwater Pollution

1. はじめに

近年問題となっている揮発性有機塩素化合物による汚染問題を含めた地盤汚染問題は、ひとたび生じると半永久的にその影響が残ってしまう性質を有している。従って地盤汚染対策として最も重要となるのは未然防止である。また、顕在化してしまった地盤汚染問題に対してはその早急かつ有効な対策が必要とされる。そのためには、汚染現場の地下の状態や地盤構造の正確

な情報に基づいて、汚染物質の種類や拡散の程度などができる限り正確に把握されることが重要である。

こうした要請に応えるには、地下水の移動と有害物質の移行の連成問題、さらには掘削や盛土などの人為的行為がそれに及ぼす変化を、より現実に即して把握することのできるように応力変形をも連成させた問題を解くための3次元解析コードと、そしてそうした3次元解析を容易に実行せしめ、かつその出力を視覚的

¹ 正会員 (財)電力中央研究所
² 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻
³ 正会員 東北大学工学部土木工学科
⁴ フェロー会員 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻

(〒270-11 我孫子市我孫子1592, Tel 0471-82-1181)
 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)
 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

にわかりやすく提示することのできるプリ・ポストシステムが必要不可欠である。

本研究では、地盤環境の汚染状況を精度よく再現・評価するために、混合体理論に基づいて物質移行と地下水挙動および応力変形を連成させて解く有限要素3次元解析モデルを構築し、これを地形・地盤データといった煩雑な情報を容易に検索することができ、かつ解析結果の視覚的表示が可能な地理情報システム (Geographical Information System: GIS、以下GIS) と組み合わせた解析システムの構築を行ったものである。そして、現在GIS上での地盤情報が利用可能な名古屋地区の地盤を対象に、その地下水流動、およびそれに伴う有害物質の移流・分散挙動の解析を実施した。

このシステムは、将来的には地下水や地盤情報の充実により、浅層地盤から大深度の岩盤への適用や、地表土地利用データ等の組み合わせによる具体的な被害予測など、種々の地盤環境問題へ適用できる可能性を有している。こうした解析システムは、種々の環境対策の支援システムとして今後重要な役割を果たすものとする。

2. 混合体理論に基づく応力・浸透・物質移動場における支配方程式

2.1 質量保存則

(1) 応力変形・浸透連成場の質量保存則

固相 (土粒子) と液相 (地下水) からなる飽和地盤において、汚染物質の固相への吸着および液相への溶出は微量であり、それらによる固相および液相の質量変化は無視できる程小さい。従って、固相および液相の質量保存則は、相間において質量のやりとりがないとした

$$\frac{D_s}{Dt} \int_V (1-n) \rho_s dv = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{D_w}{Dt} \int_V n \rho_w dv = 0 \quad (2.2)$$

と表して差し支えない。

式中、 $\frac{D_s}{Dt}$, $\frac{D_w}{Dt}$ は、固相と液相それぞれの場の物質微分であり、また、積分領域 V は現在時刻 t において地盤が占める体積、 ρ_s および ρ_w は固相および液相の密度、 n は地盤の間隙率である。

これらを局所形で表し、微分演算を施して2式を足し合わせると、飽和地盤全体における応力変形と水の移動を連成させた場の質量保存則を得る。

$$\frac{1-n}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{n}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \frac{1}{\rho_s} \nabla \cdot \{ (1-n) \rho_s \mathbf{v}_s \} + \frac{1}{\rho_w} \nabla \cdot (n \rho_w \mathbf{v}_w) = 0 \quad (2.3)$$

(2) 物質の移流分散に関する質量保存則¹⁴⁾

地盤中の物質の状態を、流水中を移動している状態と土粒子表面に吸着している状態の2つとし、それぞれの濃度を c 、 c' とすると地盤全体で

$$\frac{D}{Dt} \int_V n(c+c') dV = - \int_S n \mathbf{q}_w \cdot \mathbf{n} dS + \int_V W_c dV \quad (2.4)$$

なる保存則が成り立つ。ここで右辺第1項は、単位時間当りに地盤 V の表面 S から出入りする物質の質量であり、 $\mathbf{q}_w$ は単位体積、単位時間当たりの分散による物質移動流束ベクトルを表す。 $\mathbf{n}$ は表面 S の外向き法線ベクトルである。また、右辺第2項は地盤 V 内に吸着とは別に発生・消滅する物質の質量である。ここで、土粒子表面に吸着している物質の質量濃度を q 、土粒子の密度を ρ_s とすれば c' は

$$c' = \frac{1-n}{n} q \rho_s \quad (2.5)$$

であるので、(2.4) 式を局所形で表し、(2.5) を使って書き改めると次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t} n \left(c + \frac{1-n}{n} q \rho_s \right) + \nabla \cdot (n \mathbf{v}_w c) = - \nabla \cdot (n \mathbf{q}_w) + W_c \quad (2.6)$$

ただし、固相粒子表面に吸着している物質は流速 $\mathbf{v}_w$ で運ばれることはないので次式とした。

$$\nabla \cdot (n \mathbf{v}_w c') \equiv 0 \quad (2.7)$$

2.2 運動量保存則

飽和地盤における各相の運動量保存則は

$$\frac{D_s}{Dt} \int_V \rho_s \mathbf{v}_s dV_s = \int_S \mathbf{T}_s dS_s + \int_V \rho_s \mathbf{g} dV_s + \int_V \zeta_{sw} dV \quad (2.8)$$

$$\frac{D_w}{Dt} \int_{V_w} \rho_w \mathbf{v}_w dV_w = \int_{S_w} \mathbf{T}_w dS_w + \int_{V_w} \rho_w \mathbf{g} dV_w + \int_{V_w} \zeta_{ws} dV \quad (2.9)$$

となる。ここで $\mathbf{T}_s$ 、 $\mathbf{T}_w$ はそれぞれ固相、液相の表面力、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトル、 ζ_{sw} 、 ζ_{ws} はそれぞれ液相から固相、固相から液相への内部作用力を表し、 $\zeta_{sw} = -\zeta_{ws}$ である。

この両式にそれぞれ質量保存則 (2.1)、(2.2) 式を代入して局所形で表し、加え合わせると飽和地盤全体の運動量保存則が得られる。

$$(1-n)\rho_s \frac{D_s \mathbf{v}_s}{Dt} + n\rho_w \frac{D_w \mathbf{v}_w}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} \quad (2.10)$$

ここに、

$$\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_w \quad (2.11)$$

で、 ρ は混合体の平均密度である。

2.3 構成則

(1) 固相の応力-ひずみ関係式

地盤骨格を等方弾性体と仮定し、以下のように応力-ひずみ関係式を導入する。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon}' \quad \boldsymbol{\varepsilon}' = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p - \boldsymbol{\varepsilon}_0$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \boldsymbol{\varepsilon}_p = -\frac{p}{3K_s} \mathbf{I} \quad (2.12)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は地盤の弾性定数テンソルを表す。 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は全ひずみテンソルで、 $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ は間隙水圧の変化による固相粒子の圧縮ひずみ、 $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ は温度変化・化学変化等によって固相粒子に発生するひずみであり、 $\boldsymbol{\varepsilon}'$ は水がない状態で有効応力が作用したときに地盤骨格に生ずるひずみを表している。また、 $\mathbf{u}$ は地盤において観測される変位場、 K_s は固相粒子の体積弾性係数、 $\mathbf{I}$ は 2 階の単位テンソルを表している。なお、本研究では $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ は考慮しない。

(2) 浸透場に関するDarcy則

浸透場に関する構成則には、相対平均流速に対して以下のDarcy則を用いる。

$$\mathbf{v} = n(\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s) = -\frac{\mathbf{k}}{\rho_w g} \nabla h, \quad h = p + \rho_w g z \quad (2.13)$$

ここに、 $\mathbf{k}$ は透水テンソル、 h は水頭ポテンシャル、 $\mathbf{g}$ は重力加速度 (鉛直下向き)、 z は基準面からの高さを表す。

(3) 物質の移動 (分散) に関するFick則

分散による物質の移動はFick則に従うとする。すなわち、

$$\mathbf{q} = n\mathbf{q}^* = -\mathbf{D}^* \nabla c \quad (2.14)$$

ここで、 $\mathbf{q}$ は単位面積単位時間当たりに分散によって運ばれる物質の流束ベクトル、 $\mathbf{D}^*$ は分散係数テンソルを表す。

また、固相 (土粒子) への吸着・脱着による物質の移動については、次式で示される吸着等温式によって表されたとする^{1b)}。

$$q = K_d c \quad (2.15)$$

ここに、 q は土粒子表面に吸着している物質の質量濃度、 K_d は分配係数である。

2.4 支配方程式の導出

(1) 浸透式の導出²⁾

飽和地盤全体の質量保存則に対して、次のような仮定を行う。

・各相の密度 (ρ_s, ρ_w) の位置の違いによる変化は緩やかで、それぞれ固相の真の応力 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 、間隙水圧 p によって変化する。

・固相の体積ひずみ変化率は全体積ひずみ変化率に等しい。

以上をふまえ (2.3) 式にDarcy則 (2.13) 式、応力-ひずみ関係式 (2.12) を代入すると、浸透場の支配方程式

$$\left\{ \text{tr} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} - \frac{1}{3K_s} \text{tr} \left(\mathbf{E} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} \right) \right\} - \nabla \cdot \left\{ \frac{\mathbf{k}}{\rho_w g} (\nabla h) \right\} + \left\{ \frac{1-n}{3K_s} + \frac{1}{K_w} - \frac{1}{(3K_s)^2} \text{tr}(\mathbf{E}\mathbf{I}) \right\} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

が得られる。ただし、 $\rho_w g z$ の時間微分の項は十分に小さいとして無視している。

(2) つり合い式の導出²⁾

飽和地盤全体の運動量保存則に対して各相の加速度は無視し得るほど小さいとし、全応力 $\boldsymbol{\sigma}$ を有効応力 $\boldsymbol{\sigma}'$

と間隙水圧 p に分け、有効応力に応力-ひずみ関係式 (2.12) を適用すると次式を得る。

$$\nabla \cdot (\mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon}) + \nabla \cdot \left(\mathbf{E} \frac{p}{3K_s} \mathbf{I} \right) - \nabla p + \mathbf{b} = 0 \tag{2.17}$$

(3) 物質移流分散式の導出

飽和地盤中の物質移動において、固相土粒子への吸・脱着以外の作用での液相中の物質の発生・消滅は無いものとする。また、地盤の間隙率 n はほぼ一様であり、場所的変化の項は無視できる程小さいとする。

質量保存の式 (2.6) に、物質移動に関する構成則 (2.14) 式、吸着等温式 (2.15) 式を代入し、平均流速に対して近似的にDarcy則 (2.13) 式を用いると、

$$\left\{ n + (1-n)K_d\rho_s \right\} \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{k}{\rho_w g} (\nabla h) \cdot (\nabla c) - \nabla \cdot \{ \mathbf{D}(\nabla c) \} = 0 \tag{2.18}$$

のように書き換えられる。式中、第2項は移流項、第3項は分散項である。

2.5 有限要素離散化

浸透式 (2.16)、つりあい式 (2.17)、移流分散式 (2.18) を弱形式化し、図1に示すような20節点3次元立方体有限要素を考え、その形状関数³⁾を用いて離散近似し、さらに行列の形で表示すると (2.19) になる。

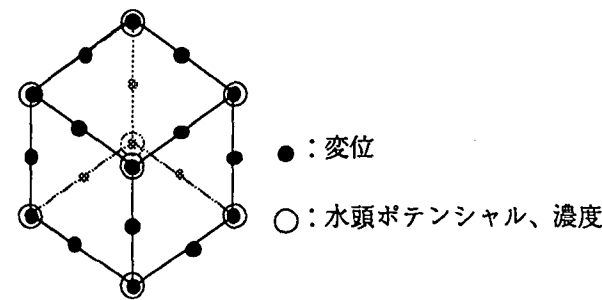


図1 要素節点配置図

$$\begin{bmatrix} C_{HH} & C_{HU} & 0 \\ C_{UH} & C_{UU} & 0 \\ 0 & 0 & C_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{H} \\ \dot{U} \\ \dot{C} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{HH} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H \\ U \\ C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ F \\ S \end{Bmatrix} \tag{2.19}$$

ここで、(2.19) 式の行列中の部分行列は次のようになる。

$$\begin{aligned} C_{HH} &= \int_V \mathbf{M}^T \left\{ -\frac{1-n}{3K_s} - \frac{1}{K_w} + \frac{1}{(3K_s)^2} \mathbf{L}^T \mathbf{E} \mathbf{L} \right\} \mathbf{M} dV, \\ C_{HU} &= \int_V \left(\frac{1}{3K_s} \mathbf{M} \mathbf{L}^T \mathbf{E} \mathbf{B} - \mathbf{M}^T \mathbf{L}^T \mathbf{B} \right) dV, \\ K_{HH} &= - \int_V \mathbf{A}^T \frac{k}{\rho_w g} \mathbf{A} dV, \quad Q = \int_{S_s} \mathbf{M}^T \hat{q}_H dS, \\ C_{UH} &= \int_V \left(\frac{1}{3K_s} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{L} \mathbf{M} - \mathbf{B}^T \mathbf{L} \mathbf{M} \right) dV, \\ C_{UU} &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV, \quad F = \int_{S_s} \mathbf{N}^T \hat{t} dS, \\ C_{CC} &= \int_V \mathbf{M}^T \{ n + (1-n)K_d\rho_s \} \mathbf{M} dV, \\ K_{CC} &= \int_V \mathbf{A}^T \frac{k}{\rho_w g} \mathbf{A} \mathbf{H} \mathbf{M} dV + \int_V \mathbf{A}^T \mathbf{D} \mathbf{A} dV \\ &\quad + \int_{S_m} \gamma \mathbf{M}^T \mathbf{M} dS, \quad S = - \int_{S_s} \mathbf{M}^T \hat{q}_c dS + \int_{S_m} \gamma \mathbf{M}^T \bar{c} dS \end{aligned} \tag{2.20}$$

ただし、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{C}$ はそれぞれ水頭ポテンシャル h 、変位 u 、濃度 c の節点での値を並べたベクトル、 $\mathbf{M}$ は8節点についての1次のアイソパラメトリック要素の形状関数、 $\mathbf{N}$ は20節点についての2次のアイソパラメトリック要素の形状関数、 $\mathbf{A}$ は形状関数マトリクス $\mathbf{M}$ に勾配作用素 ∇ を作用させたもの、 $\mathbf{L}$ は単位ベクトルである。

ここで、浸透場、応力場および物質移動場間の連成の様子を示すと図2のようになる。 $\mathbf{K}_{CC}$ の第1項に水頭ポテンシャル $\mathbf{H}$ が含まれているため、濃度 $\mathbf{C}$ は $\mathbf{K}_{CC}$ を通じて $\mathbf{H}$ の変化による影響を受ける。

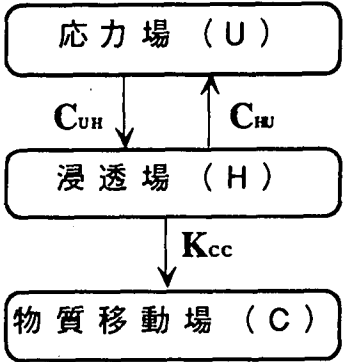


図2 提案モデルの連成関係

(2.19) 式を θ 法によって次のように差分化し、時間積分を実行することになる。

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} C_{HH} + t_{\theta} K_{HH} & C_{HU} & 0 \\ C_{UH} & C_{UU} & 0 \\ 0 & 0 & C_{CC} + t_{\theta} K_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H^{(n)} \\ U^{(n)} \\ C^{(n)} \end{Bmatrix} \\
 &= \begin{Bmatrix} t_{1-\theta} Q^{(n-1)} + t_{\theta} Q^{(n)} \\ t_{1-\theta} \dot{F}^{(n-1)} + t_{\theta} \dot{F}^{(n)} \\ t_{1-\theta} S^{(n-1)} + t_{\theta} S^{(n)} \end{Bmatrix} \quad (2.21) \\
 &+ \begin{bmatrix} C_{HH} + t_{1-\theta} K_{HH} & C_{HU} & 0 \\ 0 & C_{UU} & 0 \\ 0 & 0 & C_{CC} - t_{1-\theta} K_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H^{(n-1)} \\ U^{(n-1)} \\ C^{(n-1)} \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

ただし、

$$t_{\theta} = \Delta t \theta, \quad t_{1-\theta} = \Delta t (1 - \theta) \quad (2.22)$$

で、 Δt は時間増分である。

3. GISと連結した応力変形・浸透・物質移動の連成解析システム

3.1 地理情報システム⁴⁾

地理情報システム (GIS) とは、地図・統計あるいは調査上の大量の情報をデータベース内に一元的に管理し、図形処理・画像処理といった機能を通じて、これらの情報の検索・分析・表示等の作業を効率的に行うことを目的とした計算機システムである。このGISの最大の特徴は地図上の図形間の空間的な関係を定義づけられることにある。

本研究において、GISを利用することによる利点は以下のようである。

(1) 解析対象のモデル作成の労力削減

ボーリング位置図からは、そこでかつてボーリング調査がおこなわれ、地盤に関するデータが存在するという情報しか得られない。その地盤の土質分類や地下水位などを知るためには、位置図以外にボーリングデータを調べる必要がある。そしてそのデータを調べて入力するのは煩雑な作業で、多大な労力と時間を費やさなければならない。しかし、GISでは地理情報 (ボーリングの位置) と空間情報 (土質分類、地下水位) を一元的に管理し、容易にそれらの情報を検索、表示することが可能である。つまり、一度ボーリングデータをデータベースとして構築してしまえば、解析の入力に

関する作業に費やしてきた労力を省くことが可能であり、時間は驚くほど短縮される。

(2) 結果の迅速な可視化処理

その表示能力により直観的・経時的に結果を把握することが可能となり、可視化された結果を基とした検討作業を容易ならしめる。

(3) システムの将来発展性

上にあげた利点は、従来、時間や費用の制限からほとんど不可能であったところの、異なる条件に対する多くのケーススタディを可能ならしめることを意味する。すなわち、汚染防止などの環境対策において、いくつもの代替案の比較検討を容易ならしめ、意志決定者に対し十分な情報を提供する支援システムとなりうることを意味する。また、GISの中のデータベースの拡充、および目的別の解析・分析サブコードとの連結を通して、システムはいくらでも拡充が可能で、そうした拡充を通して現実の要請に応え得る強力なシステムになる可能性を秘めている。例えば、将来的に社会的な環境評価基準が明らかにされれば、その基準と解析結果を結びつけてGISで分析を行い、それに応じた対策を考えることも可能となる。

本研究では以上のような利点を持ったGIS (ARC/INFO) を利用する。図3に本システムを運用する際の代表的な出力画面として、ボーリング位置図と名古屋市の市区境界図、道路図を表示させたものを示す。

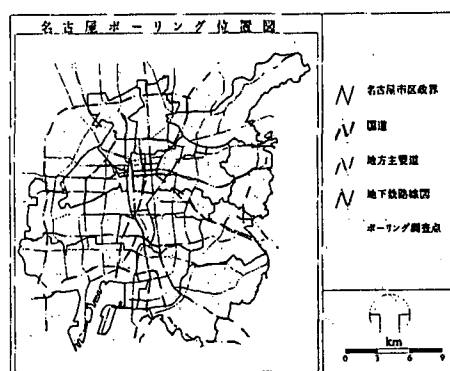


図3 代表的出力例 (名古屋ボーリング位置図)

これらを重ね合わせて表示させることにより、対象とする領域のボーリングでデータ分布状況をより直観的に把握できる。

3.2 名古屋地盤図⁵⁾

地盤情報は「最新名古屋地盤図」・資料編データベースを利用した。これは、土質工学会（現地盤工学会）中部支部名古屋地盤データバンク研究委員会が監修し、名古屋地盤図出版会が研究を目的とするものに対してのみ配布しているデータであり、名古屋市並びにその周辺部のボーリング調査によって得られた各種土質データの有効利用を図ったものである。その構成は、

- ・ボーリング柱状図集（約4200本、標準貫入試験N値付き）とその位置索引図
- ・名古屋市域の各位置の土質試料約7000個に対して行われた土質試験結果一覧表
- ・約1100箇所のボーリング孔内水平載荷試験結果一覧表
- ・現場透水試験一覧表

などである。また、全市域について名古屋地盤の地質学的構成を三次元的に示すための地質断面図についても、東西2.3Km間隔、南北1.9Km間隔の合計20のものが記録されている。この名古屋地盤図によって、名古屋市全域のおおよその土質分布や力学的性質、物理的性質を把握することが可能である。

本研究ではこれらの膨大な情報を、地理情報としてボーリング位置図、その図と関係づけた空間情報として土質分類や地下水位などをGIS内のデータベースとして構築したものを利用している。

3.3 本解析システムの構成と解析の手順

本解析システムは、応力変形・浸透・物質移動の連成解析コードとGISの2つを主な構成要素とした解析システムである。図4にこの解析システムのプロットを示す。

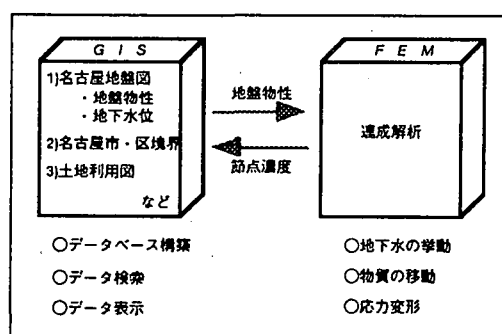


図4 システムの概念図

この2つを連結することの利点は、GISの多彩な検索・

表示能力を利用することにある。図に示すように、GISにはボーリングの位置や市区境界、土地利用等の地理情報と地盤物性や地下水位等の属性が結びつけられて管理されており、それらの情報を有機的に関連づけながら検索する事は容易である。したがって、そこから連成解析に必要な地盤物性、地下水位などの情報をボーリングデータから引き出して、簡単に連成解析コードの解析用入力データが作成できる。こうして作成したデータと、解析コード側で準備されている有限要素自動分割サブコードによるメッシュデータを用いることで、任意の領域の連成解析が可能となる。

一方、解析の結果は数字の羅列でしかないためそれらを可視化することが必要となるが、それは再びGISを利用することで容易に解決される。また、解析の結果をGISの入力情報とすれば、他の情報（例えば土地利用状況等）と重ね合わせて可視化することも可能である。解析結果は単にそれ自体を可視化するだけでなく、その地域の社会的な状況（人口分布や土地利用状況等）と併せて評価されることで解析の結果を様々な予測・検討に有効利用することができるようになる。

次に本解析システムによる解析の手順を示す。

- 手順1) GIS (ARC/INFO) を起動し、名古屋市街地図、ボーリング位置図を重ね合わせて表示し、その画面上で対象領域の設定を行う。その結果、領域内のボーリングデータを元に地盤物性の情報がデータファイルとして出力される。
- 手順2) 対象領域に対して要素数と要素サイズを入力すると、有限要素自動分割サブコードにより要素分割が行われて座標データ、節点連結データがデータファイルに出力される。
- 手順3) 1)で得られた地盤物性の情報が解析コード入力データに変換されてファイルに出力される。
- 手順4) 連成解析コードを実行する。
- 手順5) 4)の結果をGISに受け渡して出力する。

以上の手順をフローとして表したのが図5である。

図中のデータのうち、3)の物性データについては、まずGISにデータベース化された名古屋地盤図から必要なデータを検索して、ASCIIデータとしてファイルに書き出す。それらのデータのうち、データそのものが存在しないものについては主に土質分類からデータの推定を行って入力物性値とするようにしている。また、

4)の解析実行に際しての境界条件については、解析する対象領域がおかれた条件を境界条件として与えている。

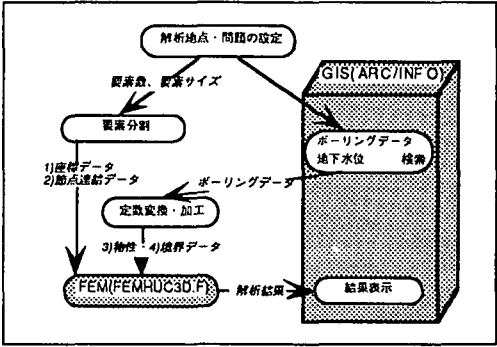


図5 システムのフロー

4. 解析例

名古屋地盤図により得られたある地点の砂と粘土の地盤を対象に、解析を実施した。計算条件を表1に、表2にその地盤物性を、図6に有限要素分割図と境界条件を示す。

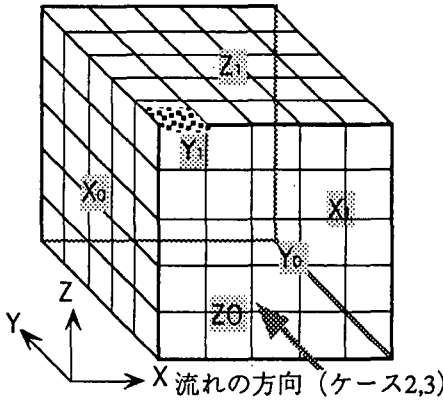
解析には時間ステップ幅を0.5日とし、中央差分法 ($\theta=0.5$) を用いた。解析によって得られた濃度分布図をケース1の1日後と5日後は図7(a)、(b)に、ケース2の1日後と5日後は図8(a)、(b)に、ケース3の1日後と5日後は図9(a)、(b)にそれぞれ示す。

表1 計算条件

ケース番号	条件
ケース1	砂層・移流無
ケース2	砂層・移流有
ケース3	粘土層・移流有

表2 地盤物性表

地盤物性	単位	砂層	粘土層
密度	(t/m^3)	1.80	1.65
体積弾性係数	(tf/m^2)	1.0E+30	1.0E+30
分散係数	(m^2/day)	0.367E-02	0.195E-02
変形係数	(tf/m^2)	1.329E+04	0.896E+03
透水係数	(m/day)	73.4	0.389
分配係数	(m^3/t)	0.338E-01	0.338E-01
ポアソン比		0.3	0.45
間隙率		0.483	0.51



- ・応力変形に関する境界条件
X0,X1,Y0,Y1,Z0：軸方向変位固定
- ・浸透に関する境界条件
Z0：不透水
Y0：h=0(m) (ケース1) ,0.5E-03(m) (ケース2,3)
Y1：h=0(m)
- ・物質の移流分散に関する境界条件
[Shaded Box]：c=0.25E-03 (tf/m³)
X0,X1,Y0,Y1,Z0,Z1：物質流出なし

図6 要素分割図と境界条件

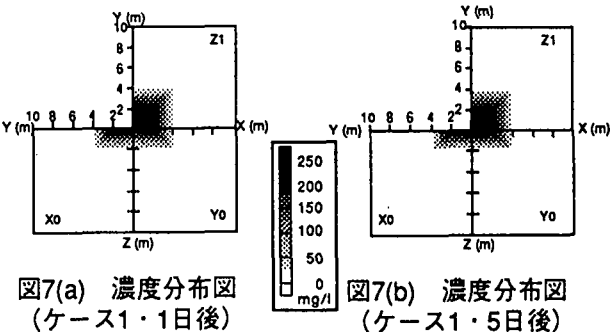


図7(a) 濃度分布図 (ケース1・1日後) 図7(b) 濃度分布図 (ケース1・5日後)

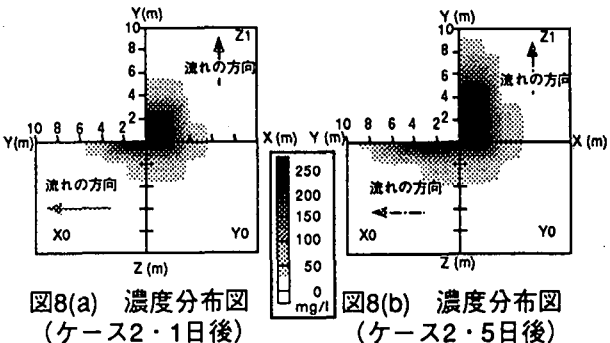


図8(a) 濃度分布図 (ケース2・1日後) 図8(b) 濃度分布図 (ケース2・5日後)

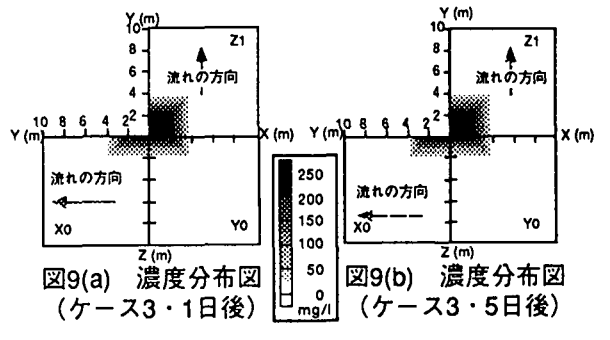


図9(a) 濃度分布図 (ケース3・1日後) 図9(b) 濃度分布図 (ケース3・5日後)

地下水流の影響： 図7(a)と図8(a)を比較すると地下水流のある場合の方が有害物質の広がりが圧倒的に速い。この傾向は5日後の図7(b)と図8(b)ではさらに顕著となって表れる。これは有害物質の輸送においては地下水流の影響が非常に大きいことを意味する。実際の地盤では多くの場合に地下水流があり、それはこの解析のような状態を表している。

地盤の透水性の影響： 図8(a)、(b)に示す砂層の場合には、日に日に汚染物質が広がっている。これに対し図9(a)、(b)に示す粘土層の場合には地下水流があるにも関わらず、有害物質は全く移流・分散していない。これは砂層の方が透水係数のオーダーで2桁違う事が如実に現れた結果である。

また、本解析では平面的に物質の移動を把握するだけでなく、その鉛直方向への移動の様子も同時に確認できることが示されている。

5. おわりに

以下に本研究で得られた成果を述べる。

(1) GISと連結した応力変形・浸透・物質移動の連成解析システムの構築

GISと連結した応力変形・浸透・物質移動の3次元連成解析システムを構築し、その有用性を確認した。

(2) 地盤汚染問題への適用

構築した解析システムを名古屋市に適用した。計算の結果を比較、考察することにより有害物質の広がりには、地盤の透水性と地下水流の影響が大きい事が確認された。

今後の課題として以下のことが挙げられる。

(1) GISの有効な活用

本研究では、最終的に解析結果をGISにフィードバックし表示させるのみに止まった。しかし、本来のGISの能力は結果を表示するだけでなく、その土地の属性との関連を分析することによって生かされ、さらに効率的な地盤汚染対策ができるものと考えられる。例えば解析結果による濃度分布図と土地利用図の重ね合わせである(図10 地盤汚染曝露図)。こうすることにより、汚染がどの程度広がるかだけでなく、それが人間にどの程度影響を与えるか、つまり汚染の曝露状況を評価することが可能となる。

(2) 応力変形の影響の評価

物質移動を浸透・応力変形と連成して解くための解析コードを作成したが、応力変形を考慮した解析は行っていない。地盤中にゴミなどを埋設し、その上に盛土を施す場合など、今後生じるであろう廃棄物処理に関連した問題への適用可能性を是非検討したい。この方面の基礎データの集積が待ち望まれる。

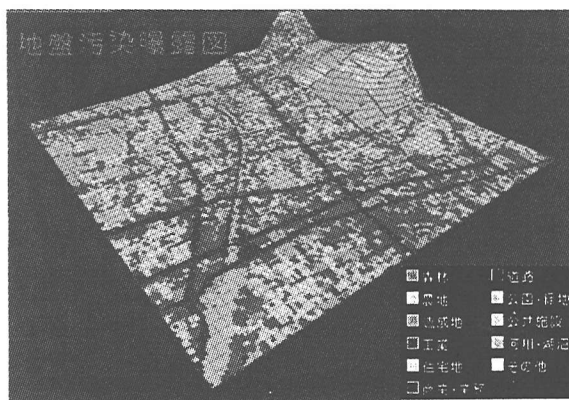


図10 地盤汚染曝露図

参考文献

- 1) 合田 健: 水質環境科学, 丸善, a) pp.400-402, b) pp.398-399, 1985
- 2) 京谷孝史, 市川康明, 川本眺万: "不連続性岩盤に対する応力・浸透場連成解析", 第1回計算力学シンポジウム, 1987
- 3) NOBORU KIKUCHI: Finite element methods in mechanics, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, pp.281-285
- 4) マップインテグレーション研究会: 都市と地図情報システム, 講談社サイエンティフィク, 1992
- 5) 土質工学会中部支部: 最新名古屋地盤図, 名古屋地盤図出版会, 1988
- 6) Khin Sanda, Omar Osman, Takashi Kyoya, and Yoshitsugu Hayashi: Integrated System for Ground Water Pollution Analysis, 環境システム研究, vol.23, pp.180-190, 1995,
- 7) 市川康明, 京谷孝史, 高田渉太郎: 混合体理論による地盤内の熱・水・応力連成挙動に関する基礎的研究, 第27回土質工学研究発表会, pp.1189-1190, 1992