

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14028

研究課題名(和文)土-水-(L・D)NAPL-空気四～五相混合体理論が拓く新しい地盤環境解析学

研究課題名(英文)Pioneering a new environmental geotechnics through soil-water-(L,D)NAPL-air four to five multiphase theory

研究代表者

菊本 統 (Kikumoto, Mamoru)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：90508342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：水や空気とは独立して存在する難水溶性流体による土壌汚染は、現地調査と数値計算を組み合わせた現況確認が効果的である。しかし、原位置浄化では間隙圧変化に伴う地盤変形が懸念される。また、埋立汚染地盤では液状化による汚染流体が移動の恐れがある。これに対して多相浸透と変形の連成解析が望まれるが、土-水-NAPL-空気4相の変形・浸透連成問題の解析例はない。本研究はこれにはじめて挑戦した。まず、質量保存を厳密に維持した新たな空間離散化に基づいて水-NAPL-空気3相の浸透解析を提案し、計算の収束速度と安定性の著しい改善を示した。次に土-水-NAPL-空気4相の変形・浸透連成問題の有限要素法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Soil contamination caused by NAPL, that flows independently from water and air, should be effectively checked by combining field survey and numerical simulation. However, in situ remediation, ground deformation accompanying the change in pore pressure is concerned. In landfilled polluted grounds, contaminated fluids may transport due to liquefaction. Though coupled analysis of multiphase seepage and deformation will be necessary for such issues, deformation-seepage coupled problems of soil-water-NAPL-air 4 phases has not yet solved. Thus, this research the first challenge for such issues. First, we propose a seepage analysis of water-NAPL-air three phases based on a new spatial discretization maintaining mass conservation strictly, and showed a remarkable improvement in convergence speed and stability of calculation. Next, the finite element method for deformation-seepage coupled problem of soil-water-NAPL-air 4 phases was proposed.

研究分野：地盤工学

 キーワード：非水溶性液体 土壌汚染 多相浸透解析 土-水-NAPL-空気4相連成解析 有限要素法 修正Picard法
 質量保存則 浸透変形連成解析

1. 研究開始当初の背景

水や空気とは独立して存在する難水溶性流体による土壌汚染は、現地調査と数値計算を組み合わせた現況確認が効果的である。しかし、原位置浄化では間隙圧変化に伴う地盤変形、埋立汚染地盤では液状化時に汚染流体の移動が懸念される。これに対して多相浸透と変形の連成解析が望まれるが、土-水-NAPL-空気 4 相の変形・浸透連成問題の解析例はなかった。

2. 研究の目的

土の変形と水、NAPL (非水溶性液体)、空気の浸透を連成した土-水-NAPL-空気 4 相の変形・浸透連成解析技術の開発に世界ではじめて挑戦する。質量保存を厳密に維持した新たな空間離散化に基づいて水-NAPL-空気 3 相の浸透解析手法の開発を試みる。解析技術の開発にあたっては、計算の収束速度と安定性の確保に留意する。続いて、土-水-NAPL-空気 4 相の変形・浸透連成解析技術の開発に挑む。

3. 研究の方法

水、NAPL、空気三相それぞれの質量保存則に研究代表者が開発した水-NAPL-空気三相系の圧力飽和度モデルと Mualem の飽和度-透過係数モデルおよび三相流体それぞれに対して仮定した Darcy 則を代入して支配方程式を導出した後、各式の弱形式を Galerkin 法により空間離散化、後退差分法により時間離散化に基づいて水-NAPL-空気 3 相浸透の有限要素法を開発した。解析手法の妥当性はマスマタランスの確認と既往実験との比較により検証した。ここで空間離散化の方法と収束計算法について複数の手法を比較検証し、計算の収束速度と安定性を両立した手法に改良を行った。次に、つり合い式と土骨格の構成則を支配方程式として追加し、土-水-NAPL-空気 4 相の変形・浸透連成問題の有限要素法を開発した。

4. 研究成果

4-1 水-NAPL-空気三相系解析技術の開発

a) 水-NAPL-空気 3 相浸透現象の有限要素解析

3 相系浸透流解析は支配方程式の形式、空間離散化手法、非線形方程式の解法を適切に選択して解くことが重要である。実現象を表現できる代表者らの 3 相特性曲線モデルを用い、適切な解析手法を選定した。

b) 支配方程式

α 相 ($\alpha = w, n, a$) の Darcy 則と質量保存則は、

$$\mathbf{v}_\alpha = -\frac{k_{r\alpha}K_{sat}}{\mu_\alpha} \nabla(h_\alpha + \rho_\alpha z) = -K_\alpha \nabla U_\alpha \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_\alpha + \theta_\alpha \kappa_\alpha \dot{h}_\alpha + \nabla \cdot \mathbf{v}_\alpha = 0 \quad (2)$$

\mathbf{v} は流速ベクトル、 k_r は比透水係数、 K_{sat} は飽和透

水係数、 μ_r は比粘性係数 ($\mu_{rw} = 1$)、 ψ は圧力水頭、 z は位置水頭、 θ は体積含水率、 κ は圧縮率 [1/L] であり、 $K_\alpha(S_w, S_t) = k_{r\alpha}(S_w, S_t)K_{sat}/\mu_{r\alpha}$ 、 $U_\alpha = h_\alpha + \rho_\alpha z$ とした。代表者の圧力-飽和度モデルでは式(3)、(4)のように水相と液体相の比水分容量に 3 相の相互作用が考慮されている。

$$\dot{\theta}_w(h_w, h_n, h_a) = \sum_\beta C_\beta^w \dot{h}_\beta \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_t(h_w, h_n, h_a) = \sum_\beta C_\beta^t \dot{h}_\beta \quad (4)$$

c) 弱形式と時間離散化

式(2)に試行関数 $\tilde{h}_w, \tilde{h}_n, \tilde{h}_a$ を乗じて弱形式を導出し、後退差分により時間間隔 $\Delta t = t - t^n$ で時間離散化した。

$$M_\alpha = \int_V \tilde{h}_\alpha \Delta \theta_\alpha dV + \int_V \tilde{h}_\alpha \theta_\alpha \kappa_\alpha \Delta h_\alpha dV - \Delta t \int_V \nabla \tilde{h}_\alpha \cdot \mathbf{v}_\alpha dV + \Delta t \int_S \tilde{h}_\alpha q_\alpha dS = 0 \quad (5)$$

$\Delta \theta = \theta - \theta^n$ 、 $\Delta h = h - h^n$ である。変数の上付き n は時間ステップを表し、 $n+1$ ステップ目の表記は省略した。また、

$$q_\alpha = \mathbf{v}_\alpha \cdot \mathbf{n} \quad (\alpha = w, n, a) \quad (6)$$

で、 q は境界における流量、 \mathbf{n} は単位法線ベクトルである。

d) 陰解法

Picard 法と Newton-Raphson 法、修正 Picard 法を比較した。初期値 x_0 、 $f(x_0)$ から $f(x) = a$ なる x_{exact} を求めることを考えると、NR 法は現在の地点における接線 $f'(x_m)$ を求め、漸化式 $x_{m+1} = (a - x_m)/f'(x_m)$ を $|x_{m+1} - x_m| < \varepsilon$ (ε は収束判定誤差) となるまで繰り返した。

Picard 法は $F(x) = f(x) - a$ と式変形し、 $g(x) = x - F(x)$ が $g(x) = x$ を満たす x を求めた。初期値 $(x_0, g(x_0))$ から漸化式 $|x_{i+1} - x_i| < \varepsilon$ まで繰り返し計算を行った。圧力型支配方程式の Picard 法は体積含水率の増分を比水分容量と圧力増分から線形近似しているのに対し、混合型支配方程式の修正 Picard 法と NR 法は体積含水率の増分を直接求める。修正 Picard 法と NR 法の違いは右辺の比透過係数の増分項のみであり、NR 法は 2 次収束となる。

Picard 法

時間離散化した混合型支配方程式を圧力支配型方程式に書き換えて式(7)を得る。

$$M_\alpha = \sum_\beta \int_V \tilde{h}_\alpha C_\beta^\alpha \Delta h_\beta dV + \int_V \tilde{h}_\alpha \theta_\alpha \kappa_\alpha \Delta h_\alpha dV - \Delta t \int_V \nabla \tilde{h}_\alpha \cdot \mathbf{v}_\alpha dV + \Delta t \int_S \tilde{h}_\alpha q_\alpha dS = 0 \quad (7)$$

式(7)に Picard の逐次近似法を適用して式(8)を得る。

$$\begin{aligned} & \sum_\beta \int_V \tilde{h}_\alpha C_\beta^\alpha \delta h_\beta dV + \int_V \nabla \tilde{h}_\alpha \cdot K_\alpha \nabla \delta h_\alpha dV \\ & + \int_V \tilde{h}_\alpha \theta_\alpha \kappa_\alpha \delta h_\alpha dV \\ & = -\sum_\beta \int_V \tilde{h}_\alpha C_\beta^\alpha \Delta h_\beta dV - \Delta t \int_V \nabla \tilde{h}_\alpha \cdot \mathbf{v}_\alpha dV \\ & - \int_V \tilde{h}_\alpha \theta_\alpha \kappa_\alpha \Delta h_\alpha dV + \Delta t \int_S \tilde{h}_\alpha q_\alpha dS \end{aligned} \quad (8)$$

m は繰り返し計算ステップで $\delta h = h^{m+1} - h^m$ である。また、 m ステップ目の添字は省略する。

表1 水, 油, 土の物性値

Symbol	Value	Parameter
σ_{aw} [10^{-3} N/m]	72.75	Water air interfacial tension
σ_{nw} [10^{-3} N/m]	41.00	NAPL water interfacial tension
σ_{an} [10^{-3} N/m]	26.40	Air NAPL interfacial tension
ρ_w [g/cm^3]	1.0	Water density
ρ_h [g/cm^3]	0.8	NAPL density
ϕ	0.4	Porosity
K_{sat} [m/sec]	1.0E-5	Saturated hydraulic conductivity
μ_{tn}	1.49	Relative viscosity of NAPL

修正 Picard 法

混合型支配方程式の体積含水率 θ^{m+1} を圧力水頭 h で1次まで Taylor 展開し, Picard 法を適用する.

$$\theta_\alpha^{m+1} = \theta_\alpha^m + \sum_\beta C_\beta^{\alpha,m} (h_\beta^{m+1} - h_\beta^m) \quad (9)$$

未知数が圧力水頭のみになる.

Newton-Raphson 法

支配方程式を線形化して次式を得る.

$$\delta M_\alpha = \int_V \tilde{h}_\alpha \delta \theta_\alpha dV + \int_V \tilde{h}_\alpha \delta \theta_\alpha \kappa_\alpha \Delta h_\alpha dV + \int_V \tilde{h}_\alpha \theta_\alpha \kappa_\alpha \delta h_\alpha dV - \Delta t \int_V \nabla \tilde{h}_\alpha \cdot \delta \mathbf{v}_\alpha dV \quad (10)$$

ここで,

$$\delta \theta_\alpha = \sum_\beta C_\beta^{\alpha} \delta h_\beta, \quad \delta \mathbf{v}_\alpha = -\delta K_\alpha \nabla u_\alpha - K_\alpha \nabla \delta h_\alpha \quad (11)$$

$$\delta K_\alpha = \sum_\beta \frac{\partial K_\alpha}{\partial h_\beta} \delta h_\beta$$

である. 両式を NR 法の漸化式 $M_\alpha^m + \delta M_\alpha = 0$ に代入する.

e) 三種類の空間離散化

空間離散化手法により, 計算の安定性や収束速度は異なる. また, 支配方程式は圧力型, 混合型の違いがマスバランスに影響し, Picard 法より修正 Picard 法はマスバランスが厳密に満たされる. NR 法も修正 Picard 法と同様の混合型支配方程式を用いるため, Picard 法よりマスバランスは保たれる.

要素内の圧力水頭 h は節点値 h_i から形状関数 N で近似する. 形状関数の空間勾配を B とし, 圧力水頭の空間勾配 ∇h も同様に近似する.

$$h \approx \hat{h} = \sum N_i h_i, \quad \nabla h_i \approx \nabla \hat{h}_i = \sum B_{ij} h_j \quad (12)$$

Gauss Base Approximation (GBA)

要素内の θ , K , C , $\partial K/\partial h$ を \hat{h} から非線形関数で計算する.

$$\theta = \theta(\hat{h}), \quad K = K(\hat{h}), \quad C = C(\hat{h}), \quad \frac{\partial K}{\partial h} = K'(\hat{h}) \quad (13)$$

要素内分布の非線形性が強いとガウス積分は真値と異なる場合があり, 質量保存が保たれにくい.

Traditional Approximation (TA)

要素の θ , K , C , $\partial K/\partial h$ を形状関数 N で内挿する.

$$\theta = \sum N_i \theta_i, \quad K = \sum N_i K_i, \quad C \approx \sum N_i C_i, \quad \frac{\partial K}{\partial h} \approx \sum N_i \frac{\partial K_i}{\partial h_i} \quad (14)$$

表2 3相特性曲線パラメータ

Symbol	Value	Parameter
S_{max}	1.0	Maximum saturation
S_{min}	0.0	Minimum saturation
β_{nw}	1.77	Scaling parameter for water-NAPL system
β_{an}	2.76	Scaling parameter for NAPL-air system
α [1/m]	3.14	Scaling parameter
n	5.0	Shape parameter of curve
m	0.8	Shape parameter of curve
a	-1.96	Bezier curve parameter

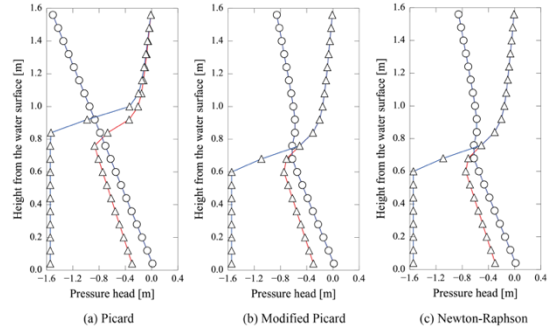


図1 初期 NAPL 圧依存性の検証結果

修正 Picard 法と NR 法は要素内で体積含水率と比透水係数を n 次関数で内挿するにも関わらず, p, C, K を別々の形状関数で近似するため, 体積含水率と比透水係数の増分は $2n$ 次分布となり整合性がなく, 次式が厳密には成立しない.

$$\hat{\theta} = \hat{C} \hat{h}, \quad \hat{K} = \frac{\partial \hat{K}}{\partial h} \hat{h} \quad (15)$$

Nontraditional Approximation (NTA)

修正 Picard 法と NR 法における体積含水率の増分や比透水係数の増分を節点の値から同一の形状関数で近似する.

$$\theta \approx \sum N_i \theta_i, \quad K \approx \sum N_i K_i, \quad \hat{\theta} \approx \sum N_i C_i \hat{h}_i, \quad \hat{K} \approx \sum N_i \frac{\partial K_i}{\partial h_i} \hat{h}_i \quad (16)$$

要素内の任意点で体積含水率と比透水係数の増分が

$$\hat{\theta} = \hat{C} \hat{h}, \quad \hat{K} = \frac{\partial \hat{K}}{\partial h_i} \hat{h} \quad (17)$$

と n 次分布になり整合性が保たれる.

$$\hat{\theta} = \hat{C} \hat{h}, \quad \hat{K} = \frac{\partial \hat{K}}{\partial h} \hat{h} \quad (18)$$

節点で上式が満たされれば, 任意点でも成立する.

f) 解析結果

陰解法3種と近似手法3種の組み合わせを, 1次元カラム試験(高さ1.6m, 幅1m)で検証した. 水と NAPL は非圧縮, 空気圧は常に大気圧とする. 計算には表1, 2のパラメータを用いた. マスバランスは次式により求める.

$$MB(t) = \frac{\sum_{i=0}^{n+1} \{(\theta_w^i - \theta_w^0) + (\theta_h^i - \theta_h^0)\}}{\sum_{i=0}^{n+1} (\Delta Q_w + \Delta Q_h)} \quad (19)$$

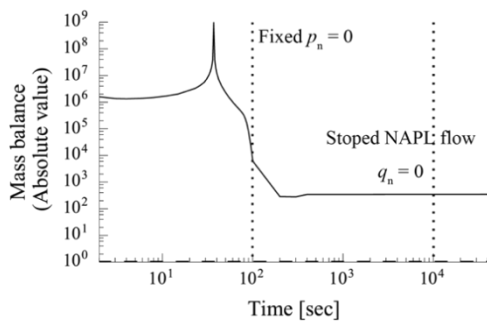


図2 マスバランスの一例（修正 Picard 法，GBA）

解析領域外からの流入量に対して，解析領域内の液体の変化量が等しければ1となる．なお，全ケースで時間項の行列に lumping を施した．

Picard 法の初期圧力依存

代表者のモデルでは NAPL 圧を水圧以下に設定することで NAPL が存在しない状態を再現できる．しかし，圧力型支配方程式を Picard 法で解く方法では解析結果の初期圧力依存性が指摘されている．ここでは代表者の圧力-飽和度モデルで初期圧力依存性を検証した．なお，混合型支配方程式の修正 Picard 法と NR 法についても検討した．

結果を図 1 に示す．Picard 法では初期 NAPL 圧の設定 NAPL 圧に差が生じており，初期の NAPL 圧に解析結果が依存する．これは Picard 法では飽和度の増分を比水分容量 C で線形近似しているため，マスバランスが満たされないためである．一方，修正 Picard 法と NR 法では NAPL 圧が水圧を超える箇所でも，2つの初期条件の NAPL 圧が一致しており，初期の NAPL 圧に解析結果が影響を受けない．よって代表者のモデルを使用した解析でも，修正 Picard 法や NR 法が合理的である．

修正 Picard 法と NR 法の比較

修正 Picard 法と NR 法を比較する．初期 NAPL 圧は恣意的に設定して構わないが，ここでは静油圧とした．解析条件は Picard 法の初期 NAPL 圧依存性を検証した解析とほぼ同じである．解析は 1 ステージ目（100 step, $\Delta t = 1.0\text{sec}$ ）はカラム上面の NAPL 圧を大気圧まで上げ，2 ステージ目（100 step, $\Delta t = 100.0\text{sec}$ ）でカラム上面の NAPL 圧を大気圧で固定しカラム内に NAPL を注入し続け，3 ステージ目（300 step, $\Delta t = 100.0\text{sec}$ ）は上面からの NAPL の注入を止めて時間経過させ，カラム底面方向に NAPL を浸透させる．なお，3 ステージを通してカラム底面の水圧は静水圧，収束判定は 10^{-10} ，最大繰り返し計算回数は 500 回とした．

修正 Picard 法，NR 法ともに，GBA では図 2 のように収束性が低く，マスバランスが保たれない．GBA は変形解析によく用いられる近似手法であるが，非線形性が非常に強い浸透解析には向かない．

次に TA, NTA でのマスバランス（図 3）は，NAPL

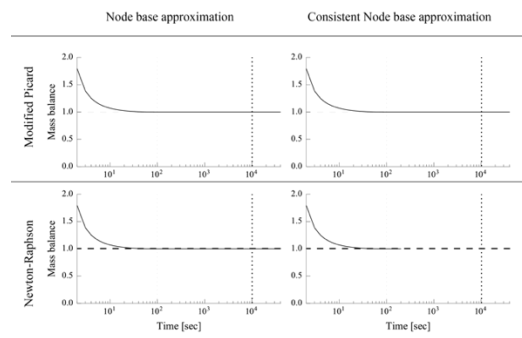


図3 TA, NTA でのマスバランス

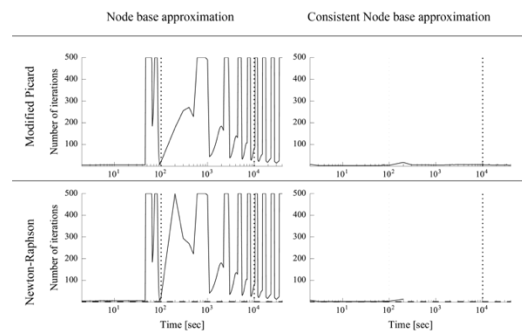


図4 TA, NTA の繰り返し計算回数

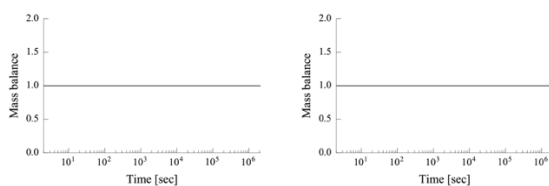


図5 浄化過程における修正 Picard 法（左）と NR 法（右）のマスバランス

流入量と領域内の飽和度変化の値が小さい初期は 1.8 程度の大きさであるが，その後は近似手法に依らずほぼ 1.0 と良好に保たれた．しかし，繰り返し計算回数（図 4）は NTA では少ない回数で収束するのにに対し，TA では多くのステップで収束しきらず計算を打ち切っている．また，NR 法で NTA を用いた解析では，少ない計算回数で収束し，マスバランスも保たれていたものの途中で計算が破綻した．

続いて，NTA を用いて，初期から NAPL が存在する浄化過程を修正 Picard 法と NR 法で解いた．初期状態からカラム底面の NAPL 圧を大気圧に低下させ，NAPL を吸引した．浄化過程では NR 法の計算は最後まで破綻することなく進行した．浄化過程でも修正 Picard 法，NR 法はともにマスバランスの維持に優れる（図 5）．収束計算回数の推移を見ると NR 法は修正 Picard 法に比べ少ない計算回数で収束しており（図 6），1 ステップ毎の収束速度（図 7）も一次収束の修正 Picard 法に対して NR 法は二次収束である．

g) 水 NAPL 空気 3 相浸透解析技術のまとめ

修正 Picard 法と NTA の組み合わせがマスバランス，安定性，収束速度の 3 つの観点から最も優れた

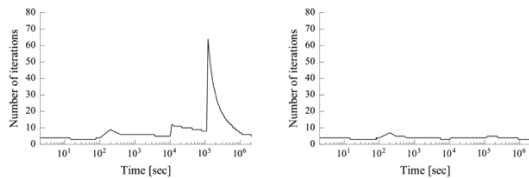


図6 浄化過程における修正 Picard 法 (左) と NR 法 (右) の収束計算回数

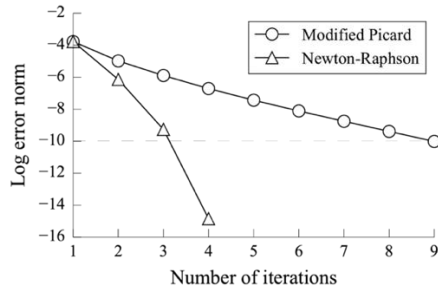


図7 修正 Picard 法と Newton-Raphson 法の収束速度の比較 (360 ステップ目, 197 時間 15 分経過)

手法といえる。圧力型支配方程式では体積含水率増分を線形近似するためマスバランスが保たれにくい。また初期サクシヨンの依存性が見られるため、NAPL が存在しない範囲における初期 NAPL 圧の設定が難しい。よって混合型支配方程式の修正 Picard 法もしくは NR 法を採用すべきである。

近似手法では収束速度に優れる NTA が最も優れた手法である。変形解析に用いられる GBA は非線形性に弱いため、他 2 つの近似手法と比較し 1 ステップにおける誤差の蓄積が著しくマスバランスを維持しにくい。TA ではマスバランスは維持されるものの、仮定している要素内の体積含水率分布と体積含水率増分分布形状の次数が異なるため収束計算に時間を要する。場合によっては収束判定誤差まで収束しない。NTA は混合型支配方程式において要素内の体積含水率分布と体積含水率増分分布形状の次数に整合性を持たせることにより、修正 Picard 法、NR 法共に非常に早く収束する。

近似手法に NTA を採用した時、修正 Picard 法の方が NR 法よりも計算が安定している。NAPL が存在しない領域、つまり Mualem の式から得られる NAPL の比透過係数が 0 となる領域に NAPL 汚染が拡大していく解析では NR 法は不安定な挙動を示す。これは NR 法で定式化した際に現れる比透過係数の増分項が 0 となり計算が不安定になるためである。一方で浄化過程のように NAPL の透過係数が 0 でない領域の解析では NR 法は 2 次収束を示し、修正 Picard 法の収束速度を上回る。修正 Picard 法では汚染、浄化過程共に安定して 1 次収束を得られる。

4-2 土-水-NAPL-空気四相系解析技術の開発

a) Terzaghi の圧密理論との比較

土骨格を線形弾性体として水と NAPL で飽和し

表3 土骨格のパラメータ

Symbol	Value	Parameter
E [kPa]	980.0	Young modulus
ν	0.33	Poisson ratio
n0	0.4	Initial porosity

表4 流体の浸透に関するパラメータ

Symbol	Value	Parameter
σ_{aw} [10^{-3} N/m]	72.75	Waterair interfacial tension
σ_{nw} [10^{-3} N/m]	41.00	NAPLwater interfacial tension
σ_{an} [10^{-3} N/m]	26.40	AirNAPL interfacial tension
ρ_w [g/cm^3]	1.0	Water density
ρ_n [g/cm^3]	0.8	NAPL density
K_{sat}	$1.0 \cdot 10^{-10}$	Hydraulic conductivity
μ_r^n	1.49	NAPL relative viscosity
S_{max}	1.0	Maximum saturation
S_{min}	0.0	Minimum saturation
α	0.01	Constant in SWCC
n	2.0	Constant in SWCC
m	0.5	Constant in SWCC
a	0.0196	Bezier curve parameter

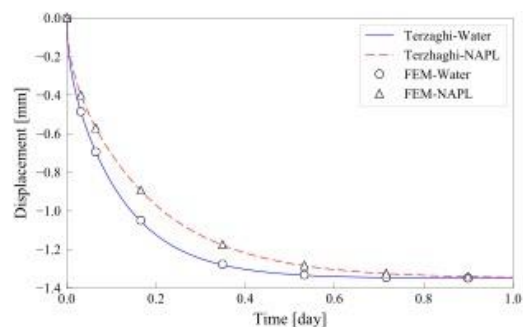


図8 Terzaghi の圧密理論と有限要素解析の比較

た地盤の一次元圧密特性を有限要素法により解く。解析には変位 8 節点-圧力 4 節点の連成要素を使用する。解析には表 3, 4 のパラメータを用いた。

供試体が水もしくは NAPL の単相の場合、Terzaghi の圧密理論と有限要素法による解は一致した (図 8)。なお、NAPL 飽和供試体は比粘性に応じて圧密は遅い。次に、同じ条件で、初期 NAPL 飽和度を 25, 50, 75% とした時の水-NAPL 多相流体の圧密を解く。多相下の圧密では Terzaghi の理論を

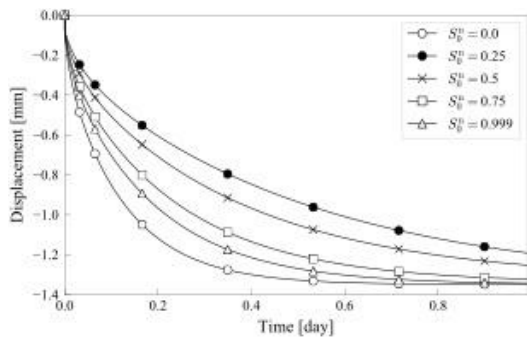


図9 NAPL 飽和度を変化させた時の圧密曲線

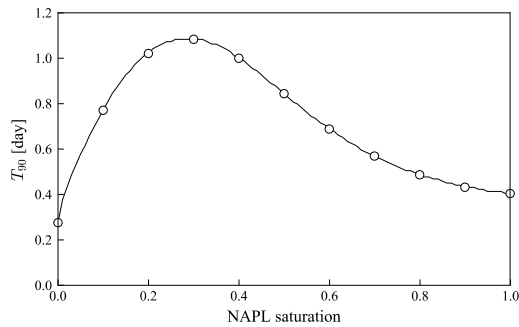


図10 初期 NAPL 飽和度と 90%圧密時間の関係

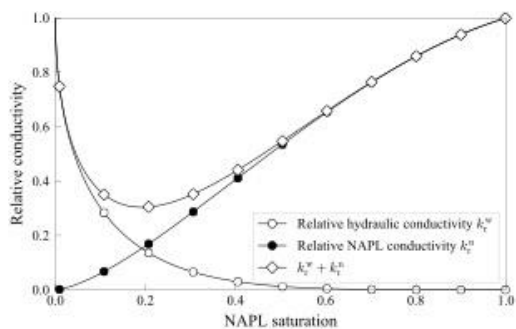


図11 飽和度と比透過係数の関係

適用することができないため数値解析が必要である。多相流状態の圧密曲線を図9に示す。興味深いことに、最も圧密が遅いのは初期 NAPL 飽和度が25%のケースである。90%圧密時間を比較した図10でも初期 NAPL 飽和度が30%付近で最も圧密が遅くなることを確認できる。図11では NAPL 飽和度が20%の付近で水と NAPL の比透過係数の合計値が最も小さな値を示している。よって圧密速度が最も遅くなるのは比粘性が大きい NAPL で満たされている時ではなく、水と NAPL の比透過係数が最も小さくなる割合の NAPL 飽和度の時である。

b) 土-水-NAPL-空気4相浸透解析技術のまとめ

土-水-NAPL-空気4相の変形・浸透連成解析手法を開発した。線形弾性地盤の1次元圧密シミュレーションを行うことで多相流状態の地盤変形特性を明らかにした。水-NAPL の多相流状態の圧密曲線は、水と NAPL 単相流の圧密曲線の間には分布するのではなく、多相流状態の供試体の方が比粘性の大きい NAPL のみで満たされた供試体よりも圧

密速度が遅くなる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① Kikumoto, M. and Nakamura, K.: Simulation of seepage flow of non-aqueous phase liquid in vadose zone, Environmental Geotechnics, vol. 4, no. 3, pp. 171-183, 2017. (査読あり)

[学会発表] (計 1件)

- ① Nakamura, K. and Kikumoto, M.: Simulation of water-NAPL-air three-phase flow in porous media based on a generalized characteristic curve model, Proc. of the 19th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea, Oct. 2017.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称: 不飽和土壌中の非水溶性液体の挙動解析方法

発明者: 菊本統, 中村圭太, 木谷憶人

権利者: 横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特開 2015-225494

出願年月日: 2015年12月

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ:

<http://www.cvg.ynu.ac.jp/G3/MamoruKikumoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊本 統 (KIKUMOTO, Mamoru)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション

研究院・准教授

研究者番号: 90508342

(2) 研究分担者

棚橋 秀行 (TANAHASHI, Hideyuki)

大同大学・工学部・教授

研究者番号: 00283234