

機関番号：14301
研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2008～2010
課題番号：20560460
研究課題名 (和文) 化学反応を考慮した多相流シミュレータの開発とエアスパーキングへの適用
研究課題名 (英文) Development of multi-phase simulator on subsurface in considering chemical reaction and its application for air sparging
研究代表者
岸田 潔 (KISHIDA KIYOSHI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20243066

研究成果の概要 (和文)：本研究は、汚染物質の移流、CO₂ 地下貯留、エアスパーキング等、地下での多相流挙動をシミュレーションするためのモデルの構築を行った。提案するモデルは、気相・液相の動的挙動を表現することができる。また、液相は二つのコンポーネント、気相を接する動かない液相と移動する液相、に分割して考える。これにより、地下水での物質の移行をシミュレーションすることが可能となった。また、温度による相変化を組み入れ、地下水中の溶存酸素析出過程を再現した。

研究成果の概要 (英文)：This research presents a mechanical model for simulation of mass removal during multi-phase flow on subsurface, such as pollution advection, CO₂ geo-sequestration and air sparging. Proposed model includes hydrodynamics of air and water phase; calculated air volume content is divided into a number of air channels surrounded by the water phase, which is divided into two compartments. First compartment is immobile and it is in contact with air phase, while the second compartment is mobile. This "mobile-immobile" formulation is a common approach for description of solute transport by groundwater. Moreover, the two-phase (water and air) numerical model which considers the thermal and the dissolved oxygen process are developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：多相流, シミュレータ, 浸透流, 化学反応, 地下水, エアスパーキング, 土壌汚染

1. 研究開始当初の背景

地盤内の流体挙動の解明は、地盤工学上非常に重要な課題である。地盤内の流体は、水と空気である。一般に地下水位以下の地盤では、間隙空気存在をあまり考える必要はないが、豪雨時の地盤災害を引き起こす範囲は、

地下水位より上の不飽和領域であることが多い。この問題を解明するには、流体と気体の多相流の挙動を把握することが重要である。また、地盤浄化手法の一つであるエアスパーキングや CO₂ の地下貯留固定技術では、地下水位以下に気体を注入することになり、

多相流の挙動把握が必要である。さらに、エアスパージングでは、注入した気体が揮発性有機化合物を取り除くことが想定されており、CO₂ 地下貯留では、温度や圧力によっては、超臨界状態になることが想定されている。これらの場合、多相流の挙動を把握するには、化学反応プロセスを無視することは出来ない。そこで本申請では、化学反応プロセスを考慮できる地下の多相流（液体と気体）シミュレータの開発とその適応性の検討を行うことを目的とする。

2. 研究の目的

エアスパージングは、揮発性有機化合物で汚染された地盤の下に空気を注入し、浮力により上昇した空気が汚染地帯を通過し、それを回収することで地盤の浄化をする手法であり、極めて簡便で実用的である。しかしながら、地盤の異方性や不均質性、地下水の挙動等の影響で、空気がどのような挙動をするのかを推定することが困難で、技術的課題である。地盤が浄化させるメカニズムとしては、図-1 に示すように 1) 空気のプリュームに汚染物質が溶け込み運び出される、2) 溶存酸素が増加し微生物分解を促進する、の2点が考えられている。

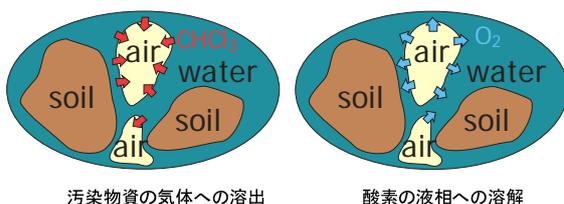


図-1 エアスパージングによる汚染物質除去のメカニズム

本研究で開発を行うシミュレータは、以下の機能を含むものである。

- 1) 気相の動的流動挙動のシミュレートが可能とする。
- 2) 化学反応プロセスの考慮
- 3) 温度および溶存酸素

さらに、温度や圧力に地盤内の構造の変化、特に、岩盤内の亀裂の変化について、温度-化学連成を考慮した検討を行う。

3. 研究の方法

1) 気相の動的挙動の検討

本申請で検討する中心的な課題のひとつである気相の動的挙動について検討を行う。Ji, et al. (1993)の室内実験やBrooks, et al. (1999)の研究により、一般に飽和地盤内の気体の流動パターンは、1-2 mmの粒径サイズを境に、それ以下であればチャネリングフロー、それ以上であれば気泡が律動的な流れになると言われている。これに対して、多くの研究者がエアスパージングのシミュレーシ

ョンに取り組んでいる (Lundegard and Andersen, 1996; McCray and Falta, 1997; van Dijke et al., 1995) が、チャンネルフローの表現が出来るにのみにとどまっている。ここでは、気泡が律動的な流れ（動的流動）を表現できる多相流シミュレータの開発を目指す。

2) 化学反応モデルの検討

固相→液相、液相→気相それぞれの相間の移行モデルの確認と問題点の抽出を行い、化学反応プロセスを表現可能なモデルの構築をおこなう。過去に行われた室内実験と比較検討することで、構築されたモデルの妥当性の検証を行う。

3) 気体溶解プロセスの考慮

温度変化に伴う気泡の出現や溶存酸素量の変化などを考慮可能なモジュールの構築を行う。

4) 圧力融解に伴う岩盤不連続面の力学特性・透水特性の評価

圧力や温度条件により、岩盤内の不連続面がどのように変化するかを実験的に検証を行う。実際には、圧力・温度条件を設定し、単一不連続面に対する透水試験を行い、透水性の変化から亀裂の構造の変化を推定する。それに対して、化学-温度連成モデルの構築を行い、モデルを用いた解析と実験結果の比較を行い、モデルの妥当性の検証を行う。

また、岩盤不連続面のせん断試験を行い、あるせん断状態でさまざま期間応力を保持し、再せん断後の挙動の検証を行う。これにより、ヒーリング現象の有無の確認を行う。

4. 研究成果

① 気相の動的挙動の検討

本申請で開発したシミュレータにより、Ji, et al. (1993)の室内実験のシミュレーションを行った。図-2 にシミュレーション結果を示す。水中の気泡の律動的な挙動を表現することが可能となった。

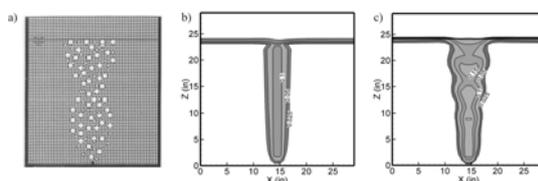


図-2 観測された気泡の流動と解析による気泡の流動比較 (a) は Ji, et al. (1993)の室内実験, b)は加速度項を無視した結果, c)は古スペックでの計算結果)

② 化学反応モデルの検討

固相→液相、液相→気相それぞれの相間の移行モデルをシミュレータに組み込む際に、

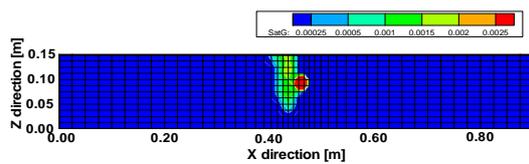
動かない液相 (immobile water phase) を導入した。これにより、各相関の物質の移行のモデル化を行った。

シミュレータの検証には、Reddy and Tekola (2004) の模型実験を対象とした。結果として、模型地盤内の物質濃度の経時変化を解析により表現することが可能となった。また、解析により得られた濃度変化は、実験結果と整合するものであった。

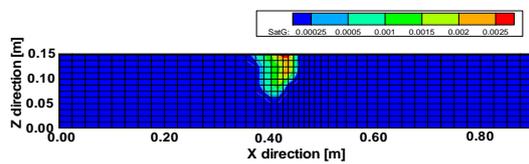
③ 気体溶解プロセスの考慮

①で開発したシミュレータに、温度変化に伴う気泡の出現や溶存酸素量の変化などを考慮可能なモジュールを組み込むことを行った。

小高・浅岡(1994)は、矢板を含む模型地盤を用いて、温度の変化を与えることで焼いた周辺に気泡が発生し、不飽和状態となり、やがて崩壊が生じることを実験的に示している。この実験に対して、シミュレーションを行った。図-3に示すように時間の変化とともに矢板周辺に不飽和領域が発生することが再現できた。



(a) 90 min.



(b) 180 min

図-3 解析による不飽和領域の経時変化

④ 圧力融解に伴う岩盤不連続面の力学特性・透水特性の評価

一定の圧力で拘束行くと、岩盤不連続面の透水性が変化することを実験で評価した。さらに、温度を作用させることでその変化は大きくなり、不可逆的な変化となる。

化学-温度連成モデルにより評価を行った。岩石の主要成分である鉱物 Si に関する評価は、概ね妥当であった。他の鉱物に関しては、量的なものが微小であり、必ずしも十分モデルで再現できたとは言いがたい。

一定圧力状態で保持し再せん断することで、岩盤不連続面のヒーリング現象を計測した。ヒーリング現象は、不連続面の水分の有無により影響を受けること、保持時間の増加に伴い再せん断後のせん断応力が増加すること、その増加はある保持時間までは、対数

線形の関係であるが、それを超えると急増すること、等の知見を得た。

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 8 件)

- ① Kishida, K., Jacimovic, N., Hosoda, T., Nakashima, S., Kodaka, T., Yasuhara, H.: Estimation of ground stability in considering groundwater and air bubbles using multiphase simulator, *ARMS 08-250, Proceedings of 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium*, 査読有, 2008.
- ② 安原英明, 木下尚樹, Dae Sung Lee, 中島伸一郎, 岸田 潔: 力学-化学連成概念モデルによる花崗岩不連続面の透水・物質輸送経時解析, *土木学会論文集 C*, Vol.65, No.1, pp. 41 - 52, 査読有, 2009.
- ③ Yasuhara, H., Kinoshita, N., Nakashima, S. and Kishida, K.: Evolution of Fracture Permeability in Granite and Its Evaluation via Coupled Chemo-Mechano Conceptual Model, *ARMS 09-013*, 査読有, 2009.
- ④ Kawaguchi, Y., Nakashima, S., Kishida, K., Yasuhara, H., Yano, T. and Hosoda, T.: Evolution of Shear Strength and Permeability during Shear-holding in a Simulated Rock Fracture under Moderate Stress and Room Temperature Condition, *ARMS 09-150*, 査読有, 2009.
- ⑤ Kishida, K., Mgaya, P., Ogura, K. and Hosoda, T.: Flow on a single rock fracture in the shear process and the validity of the cubic law examined through experimental results and numerical simulations, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.4, pp. 597 - 610, 査読有, 2009.
- ⑥ 中島伸一郎, 川口雄大, 岸田 潔, 安原英明, 矢野隆夫, 細田 尚: 負荷状態保持による岩石き裂のせん断強度および透水性の変化, *材料*, Vol. 59, No. 3, pp. 211-218, 査読有, Mar. 2010.
- ⑦ Kishida, K., Kawaguchi, Y., Nakashima, S. and Yasuhara, H.: Experimental study on shear strength recovery of single rock fracture through slide-hold-slide direct shear test and its modeling, *ARMA 10-365*, 査読有, 2010.
- ⑧ Yasuhara, H., Kinoshita, N.,

Nakashima, S. and Kishida, K.: Stirred-flow-through experiments of Granite under temperature and pH conditions controlled, *ARMA 10-156*, 査読有, 2010.

[学会発表] (計9件)

- ① Yasuhara, H. Evolution of Permeability in Siliceous Rocks by Dissolution and Precipitation under Hydrothermal Conditions, Thermo-Hydromechanical and Chemical Coupling in Geomaterials and Applications, 3rd International Symposium GeoProc' 2008, 2008.9.26, Lille, France.
- ② Kishida, K. Numerical simulation for the generation of air bubble and the progressive failure around the sheet pile, EIT-JSCE Joint International Symposium on Monitoring & Modelling in Geo-Engineering, 2008.9.12, Bangkok, Thailand.
- ③ Kishida, K., Estimation of mechanical behavior during shear-holding process in single rock fracture under moderate stress, EIT-JSCE Joint International Symposium 2009, Geotechnical Infrastructure Asset Management, 2009.9.7, Bangkok, Thailand.
- ④ 安原英明, 熱・水・応力・化学連成現象を考慮した岩盤不連続面の透水・物質輸送解析, 日本鉱物科学会年会講演要旨集, 2010-04-07, 2009.9.8, 札幌市.
- ⑤ Kishida, K., Estimation on shear strength and permeability during shear holding in single rock fracture, The 22nd KKCNN Symposium on Civil Engineering, 2009.10.31, Chang Mai, Thailand.
- ⑥ Yasuhara, H., Predicting temporal change of fracture permeability in granite via chemical-mechanical coupling model, The 22nd KKCNN Symposium on Civil Engineering, 2009.10.31, Chang Mai, Thailand.
- ⑦ Yasuhara, H., Stress- and Chemistry-Mediated Changes in the Hydraulic Property of Rock Fractures in Granite under Pressure- and Temperature-Prescribed Conditions, The 2009 Fall Meeting, H21C-0845, AGU, 2009.12.15, San Francisco, USA.
- ⑧ Kiyoshi, K., Evaluation of the hydraulic behavior of a single fracture using LCL and Reynolds number under the available cubic law

conditions, The 2009 Fall Meeting, H21C-0849, AGU, 2009.12.15, San Francisco, USA.

- ⑨ Hasegawa, D. Evaluation of fracture permeability in granite influenced by stress and temperature, The twenty-third KKCNN Symposium on civil engineering, 2010.11.14, Taipei, Taiwan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸田 潔 (KISHIDA KIYOSHI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20243066

(2) 研究分担者

細田 尚 (HOSODA TAKASHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10165558
中島伸一郎 (NAKASHIMA SHINICHIRO)
山口大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 70346089
安原英明 (YASUHARA HIDEAKI)
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 70432797
音田慎一郎 (ONDA SHINICHIRO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50402970
川端淳一 (KAWABATA JYUNICHI)
鹿島建設(株)・技術研究所・上席研究員
研究者番号: 80443711