

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06210

研究課題名(和文)地盤材料の出砂現象予測シミュレータの開発

研究課題名(英文)Development of numerical model to predict sand production

研究代表者

木元 小百合 (Kimoto, Sayuri)

京都大学・経営管理大学院・准教授

研究者番号：70362457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず浸透流による砂地盤の内部浸食や資源開発時の出砂のメカニズムおよび空洞化に至るまでの地盤の挙動を解明することを目的として模型実験を行い、出砂に関する構成モデルである発生条件式と出砂速度式を提案した。

次に、分解時の土骨格挙動の構成式、出砂限界式、出砂速度式を取り入れた出砂現象予測シミュレータを開発した。またハイドレート分解挙動と出砂現象を連成させた解析手法を提案した。開発した解析手法を、地盤の空洞化の進展やそれに伴う不安定化の問題に適用し細粒分の出砂に伴う地盤内部の空洞化や、それによる変形挙動を再現した。さらに、メタンハイドレート生産状況を模擬したシミュレーションを行った。

研究成果の概要(英文)：Model tests for internal erosion of geomaterial have been conducted to clarify the mechanism of the occurrence of internal erosion and the progressive failure. A constitutive model for the internal erosion, that is, the erosion criteria and the erosion rate were proposed based on the tests.

Then, the numerical method was proposed to predict the internal erosion process, in which the constitutive model of erosion was introduced. The dissociation and erosion coupled method was proposed. The erosion process and the gas hydrated production process were reproduced using the proposed numerical method.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤 内部浸食 出砂 数値解析 ハイドレート

1. 研究開始当初の背景

出砂現象とは、地盤内部あるいは表面の土粒子が浸透流によって浮遊・移動する現象であり、地盤工学では、河川堤防や護岸構造物周辺のパイピングや吸出しによる浸透破壊現象として取り扱われてきた。一方、資源工学の分野では、石油や天然ガス等の資源開発時に化石燃料の回収と同時に、岩盤層が乱されて生じた砂粒子が回収される現象を出砂と呼んでいる。特に、近年日本近海で開発が進められているメタンハイドレート開発では、未固結地盤を対象とするため、出砂問題の解決は避けられない課題である。

河川堤防や護岸構造物周辺の浸透破壊現象は、地盤工学では浸透力による地盤の不安定化や侵食現象として捉えられている。この現象は、浸透力による有効応力の減少とせん断力（掃流力）の作用による局所破壊現象であるが、そのメカニズムは複雑で未だ解明されていない。特に細粒分を含む地盤内部で生じる内部侵食については、一旦地盤内で浮遊した土粒子が再堆積し間隙を閉塞することが問題となる場合があるが、そのような土粒子の浮遊と再堆積を予測できる解析手法は未だ提案されていない。

2. 研究の目的

本研究は、以上のような浸透流による砂地盤の流出現象や資源開発時のサンドプロダクションと呼ばれる出砂現象のメカニズムを解明し、現象を予測するための数値解析手法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず出砂現象のメカニズムを明らかにするため、模型実験により発生条件を明らかにする。内部侵食の発生メカニズムや、そこから空洞化に至るまでの地盤の挙動を解明することを目的として、水位条件の違いが内部侵食や空洞化に及ぼす影響に着目した模型実験を行い、内部侵食の挙動について検討した。また出砂に関する構成モデルである発生条件式と出砂速度式を提案した。

次に、定式化した分解時の土骨格挙動の構成式、出砂限界式、出砂速度式を取り入れた出砂現象予測シミュレータを開発した。侵食され浮遊した土粒子は液相とともに運動すると仮定し、土砂輸送問題として取り扱うことができる。多相連成解析手法に侵食に伴う土粒子の移動を取り入れた。

さらに、ハイドレート分解挙動と出砂現象を連成させた解析手法を提案した。開発した解析手法を、地盤の空洞化の進展やそれに伴う不安定化の問題に適用した。細粒分の出砂に伴う地盤内部の空洞化や、それによる変形挙動を再現した。さらに、メタンハイドレート生産状況を模擬したシミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 内部浸食に関する模型実験

地盤の内部侵食現象について、内部侵食の発生メカニズムや、そこから空洞化に至るまでの地盤の挙動を解明することを目的として、特に地下水位条件の違いが内部侵食や空洞化に及ぼす影響に着目した模型実験を行い、内部侵食の挙動について検討した。

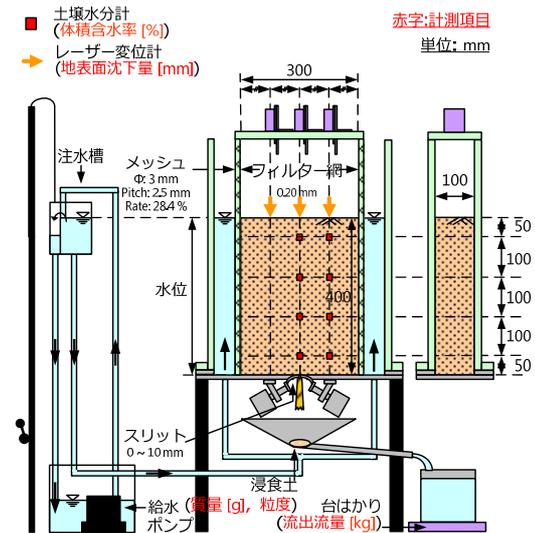


図1 実験装置の概略

表1 実験条件

Case	水位 [mm]	初期開口幅 [mm]	D_c (%)	二次条件
1	$H/2$	D_{max}	90	-
2	$3H/4$	D_{max}	90	-
3	H	D_{max}	90	-
4	$3H/4$	D_{max}	90	開口後、水位上昇
5	H	$D_{max}/2$	90	24 時間後 D_{max} に開口

図1に実験装置と計測項目の概略を示す。上下方向に可動式の注水槽とアクリル製水槽（幅300mm×奥行き100mm×高さ600mm）の両側面にある水槽を直結しており、側面からの浸透により地下水の上昇を模擬する。また、土槽底板に下水管損傷部のクラックを模擬した平面スリットを設けており、その開口幅をダイヤルで調整(0~10mm)することができる。

試料はサフュージョン（細粒分移動）を伴う内部侵食挙動に着目するために、細粒分含有率が比較的高く粒度の良い淀川砂（細粒分含有率23%、均等係数143）を用いた。本試料は堤防改修に用いられている砂質土の9.5mmふるい通過試料である。含水比5%に調整した試料を、締固め度90%となるように、湿潤突固め法により1層あたり仕上げり厚25mmとなるように突き固め、16層で高さ400mmとなるように模型地盤を作製した。

実験ケースを表1に示す。開口幅は最大粒

径 (9.5 mm) と同じ幅に設定し、水位を 3 通りに変えた Case-1 ~ Case-3, スリットを開口後に水位を上昇させた Case-4, スリットを段階的に開口させた Case-5 を実施した。実験の手順は次のようである。注水槽から土槽両側面にある水槽に各ケースで定めた水位で一定となるように水を供給する、スリットを所定の開口幅まで開く、開口部から流出した浸食土を 1h ~ 2h おきに採取する、開口後 48 時間が経過するまで静置する (Case-4 のみの順)。

まず、内部浸食挙動として、全ケースで粒径の比較的小さい土粒子のみが浸食土としてスリット部より継続して流出 (細粒分流出段階) し、しばらく経った後に粒径の比較的大きい土粒子を含む浸食土がスリットより流出する挙動を繰返す現象が観測された。図 2 に実験ケースを代表して Case-1 の細粒分流出段階および骨格浸食段階における粒径加積曲線を初期の粒径加積曲線とあわせて示す。細粒分流出段階では高い細粒分含有率を示しており、長期に渡って細粒分流出が続くことによって、大きなゆるみ・空洞化に発展する可能性が示唆される。

図 3 に Case-1 ~ Case-3 の累積浸食土量の経時変化を示す。Case-1, Case-2 では、48 時間で空洞に至らなかったのに対し、水位を地表面まで上昇させた Case-3 では、6 時間後に空洞に至った。Case-1, Case-2 では、水の流出とそれに伴うサフュージョンによって細粒分流出が徐々に進展したのに対し、Case-3 では、骨格をなす土粒子そのものが浸透力によって流出したと考えられる。

図 4 に Case-2 および Case-4 の累積浸食土量の経時変化を示す。両ケースの水位上昇後の水位は同じであるにもかかわらず、Case-4 においてのみ、スリットからの浸食土の流出に伴う空洞化が見られた。これは、流路の違いによる影響が大きいと考えられる。つまり、スリット開口後に水位上昇させた Case-4 では、水が土槽底板を優先的に流れることによりスリット周辺地盤の透水係数が局所的な増加しスリットからの水の流出量が増加することによるサフュージョンが進展し、土槽底板周辺の地盤強度が局所的に低下することに起因していると考えられる。

図 5 に Case-3 および Case-5 の累積浸食土量の経時変化を示す。スリットを D_{max} まで開口してから空洞化に至るまでの経過時間は、Case-3 が 5.5 時間後、Case-5 が 27.5 時間後であり、Case-3 の方が早期に空洞に至った。

下水管の損傷部とその周辺地盤および地下水の上昇を模擬した実験装置を用いて室内模型実験を実施した。その結果、長期にわたって細粒分流出が続くことによって、大きなゆるみ・空洞化に発展する可能性や、豪雨などによって急激に地下水位が上昇する場合に、短期間で空洞に至る可能性された。

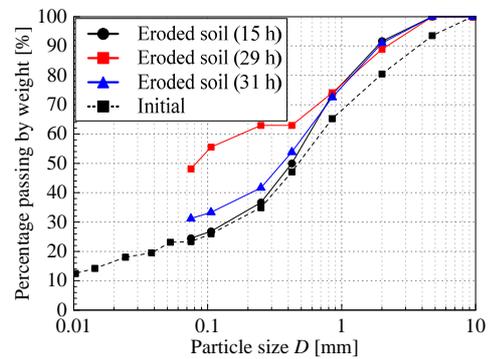


図 2 Case-1 の浸食土の粒径加積曲線

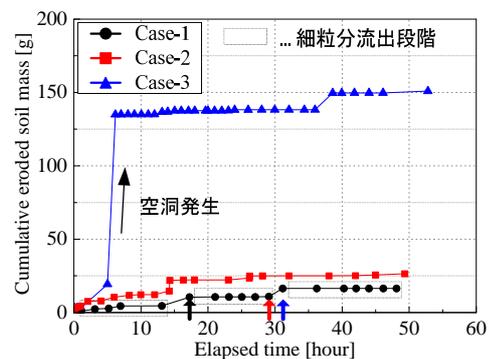


図 3 累積浸食土量

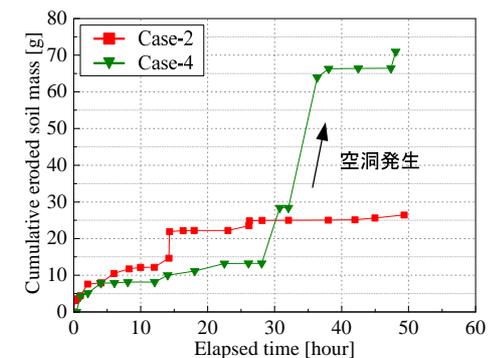


図 4 累積浸食土量 (Case-2, Case-4)

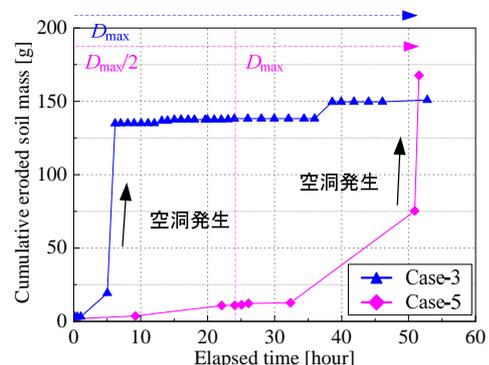


図 5 累積浸食土量 (Case-3, Case-5)

(2) ハイドレート産出時の内部浸食解析

海底地盤中のハイドレート産出時に生じる地盤の内部浸食を再現するため、多相混合体理論に基づく内部浸食モデルをハイドレート含有地盤に応用した。図1に本モデルにおけるハイドレート含有地盤の相構成を示す。ハイドレート含有地盤が土粒子、ハイドレート、水、メタンガスから構成されるとする。このうち土骨格を構成する土粒子と間隙水の流れによって流動化した土粒子を流動化土粒子として区別し、5相の仮想連続体の重ね合わせとして表現する。内部浸食は土粒子相(S)から流動化土粒子相(FS)への質量変換と流動化土粒子相の移流によって表現される。S相とFS相はある代表粒径を有する複数のグループに質量を分割し、S相からFS相への質量変換速度およびFS相の移流は、必要であれば粒径依存性を考慮し粒径ごとに与える。粒径依存性を考慮しなければ単一のS相、FS相となる。

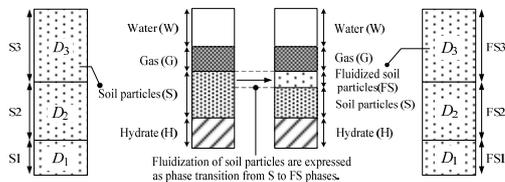


図6 ハイドレート含有地盤の相構成

各相に対して質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則が与えられ、それらから導かれる方程式も含めてS相の質量保存則、H相の質量保存則、水の連続式、ガスの連続式、FS相の移流方程式、混合体の運動方程式、混合体のエネルギー保存則を用いる。

S相からFS相への質量変換速度は内部浸食条件式(1)が満たされたとき、式(2)で与える。

$$R = \tilde{\mathbf{p}}^{W(SH)} \cdot \mathbf{n}_{flow} = \frac{n^W \rho^W g}{k^W} \|\mathbf{w}^W\| \geq R_{cr} \quad (1)$$

$$\dot{M}^S(D_i) = -\alpha_{cr} \left(\frac{R}{R_{cr}} \right) M^S(D_i) e^{-\beta_{cr} \left(1 - \frac{M^S(D_i)}{M_0^S(D_i)} \right)} \quad (2)$$

ここに、 $\tilde{\mathbf{p}}^{W(SH)}$ は間隙水と土骨格の相互作用力、 \mathbf{n}_{flow} は間隙水の流速方向の単位ベクトル、 k^W は透水係数、 g は重力加速度、 R_{cr} は限界駆動力である。 R はマクロに見た間隙水から土骨格に作用する力の大きさであり、その大きさが限界値 R_{cr} を超えると内部浸食が発生する。 D_i は第 i グループの粒径、 α_{cr} 、 β_{cr} は材料パラメータ、 $M^S(D_i)$ は第 i グループの土粒子質量 $\dot{M}^S(D_i)$ は第 i グループの土粒子の浸食速度である。

図7に計算条件を示す。重力方向に垂直な断面を想定して平面ひずみ条件でモデル化している。モデル左下で圧力を下げハイド

レートが分解し、同時に水・ガスの流れが発生する。

図8にハイドレート残存度の時刻歴、体積ひずみの時刻歴、骨格応力径路を示す。比較のため内部浸食を考慮しないケースも合わせて示している。内部浸食が生じる場合、ハイドレートの分解と地盤の圧縮が内部浸食の無いケースに比較して早く進行していることが分かる。これは、本モデルでは内部浸食により間隙が増大し、透水係数が増加することを仮定しているためである。骨格応力径路にも差が見られる。図9には異なる粒径0.01 mm, 0.10 mm, 1.00 mmの粒径グループに対するFS相の体積含有率分布を示している。限界駆動力の粒径依存性に起因して分布間に差が見られる。このように、粒径に応じて別々に移流を考慮することが可能である。

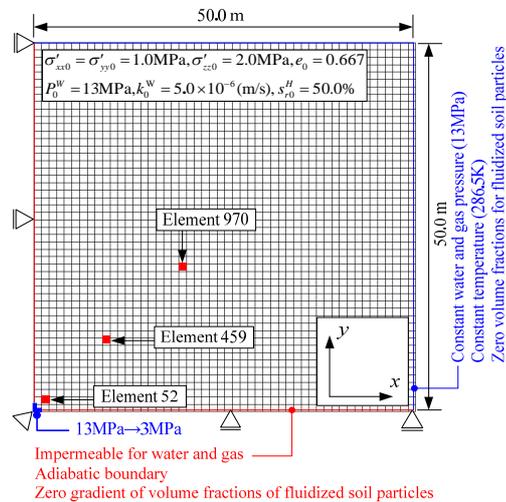
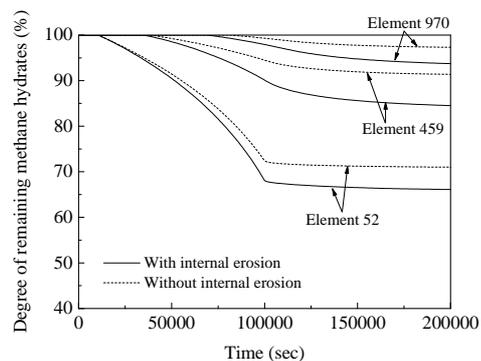
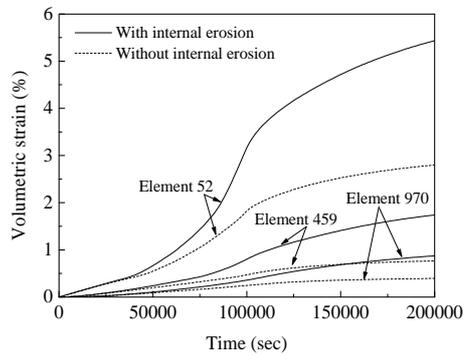


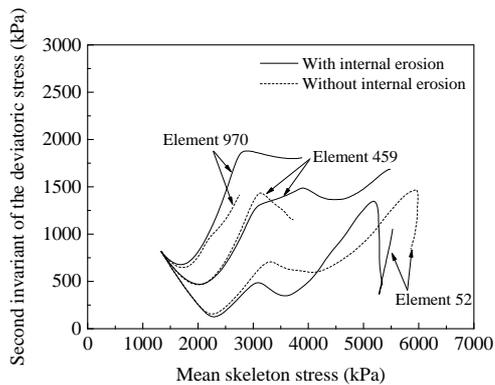
図7 解析メッシュと境界条件



(a)ハイドレート残存度の時刻歴

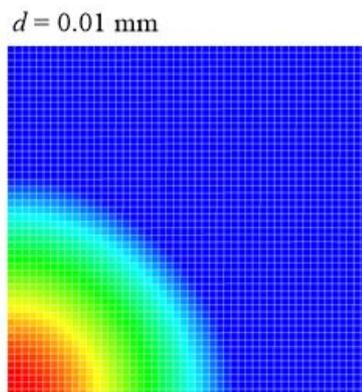


(b) 体積ひずみの時刻歴

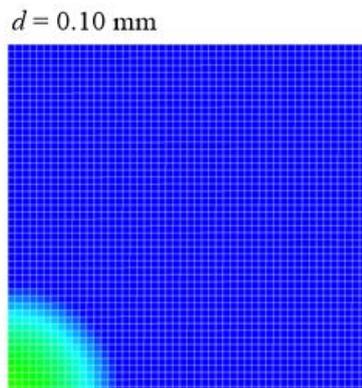


(c) 骨格応力径路

図 8 内部浸食有無の比較

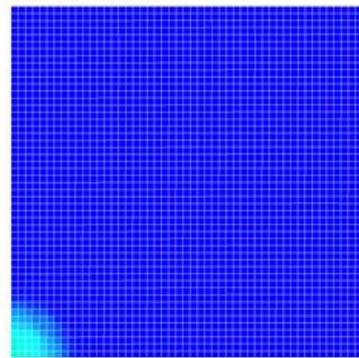


(a) 粒径 0.01 mm



(b) 粒径 0.10 mm

$d = 1.00 \text{ mm}$



(c) 粒径 1.00 mm

図 9 各粒径グループに対する FS 相の体積含有率分布

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)

赤木 俊文, 青田 周平, 木元 小百合, 岡 二三生, 多相連成解析手法に基づく地盤の内部浸食の数値解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 72, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 19), I_75-I_86, 2016. https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_75

〔学会発表〕(計 9 件)

Kimoto, S., Akaki, T., Loret, B., Oka, F., A numerical model of internal erosion for multiphase geomaterials, bifurcation and degradation of geomaterials with engineering applications, Proc. of the 11th Int. Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials, Dedicated to Hans Muhlbach, Limassol, Cyprus, 21-25 May 2017, Springer Series in Geomechanics and Geoenvironment, pp.125-131, 2017.

赤木 俊文, 木元 小百合, 化学-熱-力学連成動的解析手法を用いたガス生産過程におけるメタンハイドレート含有地盤の地震時挙動の検討, 計算工学講演会論文集, Vol. 21, 2016年5月, Paper No. C-2-2, 2016.

赤木 俊文, 青田 周平, 木元 小百合, 岡 二三生, 多相連成解析手法に基づく地盤の内部浸食の数値計算, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016年5月21-22日, 札幌, pp.61-62, 2016.

富田 和秀, 赤木 俊文, 木元小百合, 多相連成有限要素法による地盤の内部侵食の数値解析, 第 50 回地盤工学研究発表会,

2015年9月1-3日, 北海道.

木元 小百合, Benjamin Loret, 岡 二三生, 赤木 俊文, 地盤の内部浸食の発展則-浸食条件と質量変化量-, 日本材料学会第 65 期学術講演会, 2016年5月27-29日, 富山.

赤木 俊文, 青田 周平, 木元 小百合, Benjamin Loret, 岡 二三生, 多相連枝解析手法による地盤の内部浸食のモデル化とその適用性の検討, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016年9月13-16日, 岡山.

赤木 俊文, 木元 小百合, 多相混合体理論によるハイドレート産出時における内部浸食のモデル化に関する研究, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017年7月12-14日, 名古屋.

宇都宮 悠, 木元 小百合, 赤木 俊文, 地下水位上昇時の下水管損傷部周辺地盤の内部浸食に関する模型試験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017年9月11-13日, 福岡.

木元 小百合, 宇都宮 悠, 木戸 隆之祐, 赤木 俊文, 地下水位と細粒分流出に着目した下水管損傷部周辺地盤の内部浸食に関する模型実験, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018年7月, 高松.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木元 小百合 (KIMOTO, Sayuri)
京都大学・経営管理大学院・准教授
研究者番号: 70362457

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし