

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成21年度～平成23年度

課題番号：21360222

研究課題名（和文） 多種多様な高精度数値解析手法による落石・土砂崩壊現象予測の適用と限界

研究課題名（英文） Applicability limit of high accuracy simulation for rock-fall and debris-flow using several numerical methods.

研究代表者

沢田 和秀（SAWADA KAZUHIDE）

岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授

研究者番号：30273121

研究成果の概要（和文）：地盤工学の分野で使用されている大変形を対象とした数値解析手法（DEM, CFD, MPS, SPH）について、その適用できる問題と、適用限界について整理した。まず、地盤の変形レベルや変形形態に対して、各手法の適用範囲を明らかにした。次に、落石や土砂崩壊現象を中心として、具体的に地盤工学で取り扱う問題を挙げ、各手法がどのような問題に対して適しているかを明示した。また、各手法を様々な工学的問題に適用した事例を整理し、その中で工学的に利用する際の留意点についてまとめた。

研究成果の概要（英文）： Applicable problems and applicable scopes of numerical methods (DEM, CFD, MPS and SPH) that are used in the field of geo-mechanics are summarized. First, allocable scopes of numerical methods are figured out based on deformation levels and types. Then, suitable numerical methods for each geotechnical problems, mainly focused on rockfalls and soil failures, were figured out. In addition, the numerical methods were applied to some engineering problems and important points were summarized from the point of view of engineering utilization.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤・大変形解析・SPH法・MPS法・個別要素法

1. 研究開始当初の背景

毎年のように繰り返される斜面災害による被害を軽減するために、1)斜面災害から逃げる（ソフト対策）、2)斜面災害を抑止する（ハード対策）を有効に組み合わせて使用しなければならない。そのためには、急傾斜地崩壊、土石流、落石などを精度よく予測する技術が重要となる。地盤の変形や破壊現象は、精緻な構成モデルを組み込んだ有限要素法（FEM）によって多くの問題が解けるように

なってきた。しかし、土砂崩壊、土石流、落石などの大変形問題は、FEMで取り扱うことが難しい。この問題を解決するために、地盤の変形を初期状態から大変形や大移動を伴う現象まで追跡できる手法を開発するために、さまざまな試みが行われてきた。粒子法、個別要素法、CFD解析などは、地盤の大変形問題を取り扱うことができる有力な手法とされている。ただし、これらの手法は、学術レベルにおいてはその有効性が確認されて

いるものの、工学的な利用に関しては、実用化に至っているとは言いがたい。これは、解析パラメータの決定方法や感度、適用限界といった実務レベルで重要な情報の整備が不十分であることが主な原因である。そのため、各手法に関する実用化に向けた課題の整理と適用範囲の明示が必要である。

2. 研究の目的

本申請研究は、多種多様な高精度解析手法を開発・高度化してきた研究者が、落石・土砂崩壊現象崩壊現象などの地盤工学における具体的な問題を対象として、解析手法の適用範囲と限界を明らかにするとともに、提案解析手法を広く工学分野において活用するための情報を蓄積することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、①個別要素法 (DEM)、②粒子法 (MPS・SPH)、③数値流体解析 (CFD) を対象とする。これらの手法は、現段階で、落石・土砂崩壊現象崩壊現象に対して有効と考えられるものである。研究代表者および各研究分担者は、落石、降雨による斜面崩壊、土砂流動に関する模型実験を実施し、解析手法の高精度な検証材料を準備する。その上で各模型実験および実現象 (過去の被災事例) などの再現解析を実施し、各種法の精度や適用限界、および工学的利用に際する留意点などを整理する。

4. 研究成果

手法の分類

まず初めに、本研究課題で対象とする解析手法について、変形のレベルや形態を軸として、適用範囲を検討した。図1が検討した結果を図にしたものであり、研究代表者および各研究分担者がこれまでに各手法を使用してきた経験を踏まえて作成している。また、地盤工学の分野で既に広く利用されている有限要素法 (FEM) の位置づけも合わせて図中に示している。

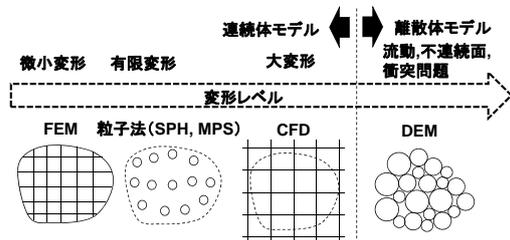


図1 変形レベルによる手法の分類

次に、落石や土砂崩壊現象を中心として、具体的に地盤工学で取り扱う問題を挙げて、各手法がどのような問題に対して適しているのかを整理した。図2は、この検討結果を図で表現したものである。既往の研究の各種

法の適用事例などを考慮して図を作成している。当初は、落石・土砂崩壊現象に限定する予定であったが、2011年の東北地方太平洋沖地震の被害で顕著であった津波と地盤の相互作用や液状化についても項目を追加した。図2は、地盤工学の問題を完全に網羅したものではないが、本研究課題で対象とした解析手法の工学的適用に関して、1つの判断基準になると考えられる。



図2 現象別の手法の分類

以下では、本申請課題で実施した模型実験とその再現解析、および実事例の再現解析について示し、各解析事例から得られた工学的利用に関する留意点をまとめる。

CFDによる雪崩模型実験と再現解析

CFD解析については、土砂流動に関する検証は既に研究成果を報告しているため、ここでは新たな斜面災害として雪崩を対象に模型実験と再現解析を実施した。図3と図4には、模型実験で使用した模型斜面の概略図と写真を示している。模型斜面の上部から雪を疏下させ、流動速度、到達距離、障害物に衝突した際の衝撃力などを計測した。雪崩に関しては、底面摩擦の効果を適切に表現することが重要であると考え、既存の解析プログラムに底面摩擦を調整可能とする改良を加えた。図5は、CFD解析による再現解析の結果の1部を示したものである。この検証の結果、解析結果に底面摩擦とメッシュサイズの影響が大きいことが確認され、各要因が結果に与える影響度について言及している。この情報は、CFD解析を土砂流動や雪崩の予測に適用する際に、有益な情報となると考えられる。

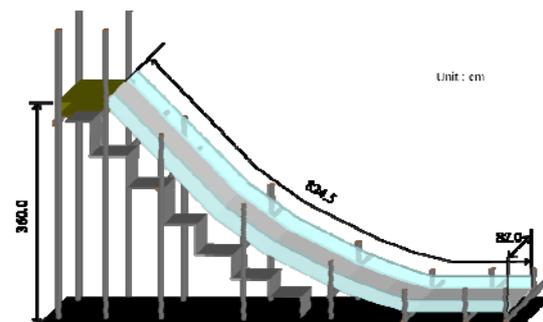


図3 模型斜面の概略図



図4 模型斜面の写真

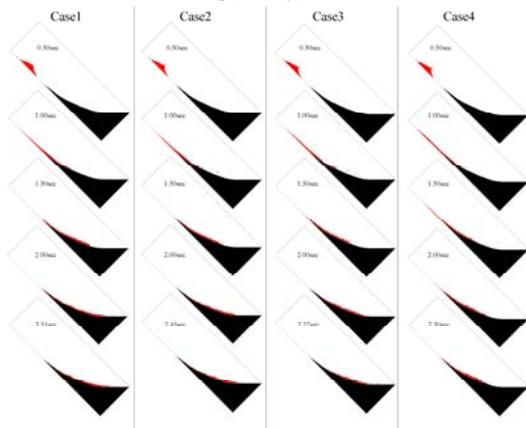


図5 雪崩模型実験の再現解析の例

CFDによる実際の雪崩の再現解析

先述の CFD 解析を実際の雪崩の再現解析に適用した。解析対象は、山古志トンネル（新潟県山古志村）上部で発生した雪崩である。この現場では、観測用のカメラが設置されており、雪崩の発生から流動停止までの一連の挙動が記録されていた。図7は解析結果を示しており、この結果は実際の雪崩の流下経路および流速をよく再現していることを確認している。他の雪崩事例についても再現解析を行っており、その結果を踏まえて、パラメータの範囲などについても言及した。

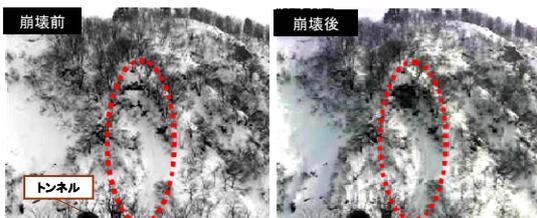


図6 山古志トンネル上部の雪崩の様子

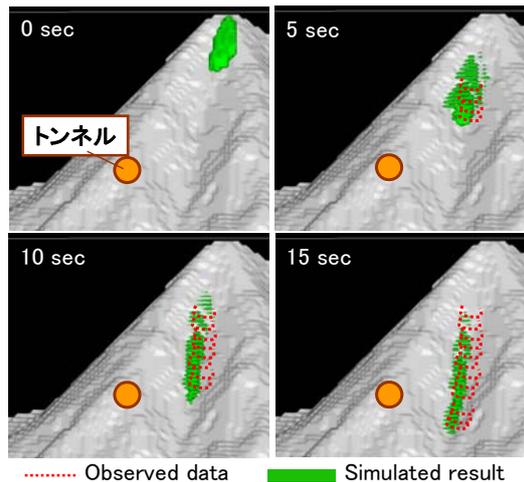


図7 実際の雪崩の再現解析結果

DEMとCFDによる乾燥砂流動実験の再現

過去の研究で実施されている乾燥砂を用いた流動実験を、DEMとCFD解析の2種類の手法で再現した。どちらの手法も、解析パラメータや解析条件を変化させて、パラメータの感度などを確認している。図8は乾燥砂の流動実験の概略図とその結果（流動中の砂の層厚分布）を示したものである。また、図9と図10は、それぞれDEMとCFDの解析結果の1例を示したものである。これらの結果を総合的に判断した結果、どちらの手法も現象を再現できることが確認された。ただし、DEMに関しては特に非球形粒子を用いることが重要であることが明らかとなった。これはDEMを実務レベルで土砂流動問題などに適用する上で極めて重要なことである。また、CFD解析については、流体解析でよく用いられる Non-Slip 境界条件（滑りなし境界条件）では現象をうまく再現できず、流動中の粒子回転に起因する底面摩擦の低減を考慮したパラメータ決定が重要であることが確認された。

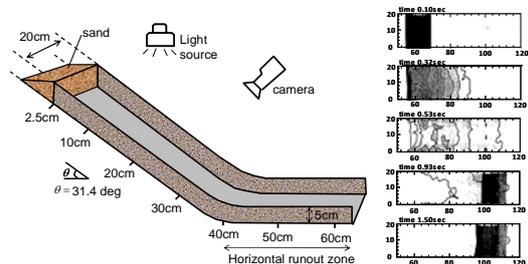


図8 乾燥砂の流動実験 (Denlinger et al. (2001))

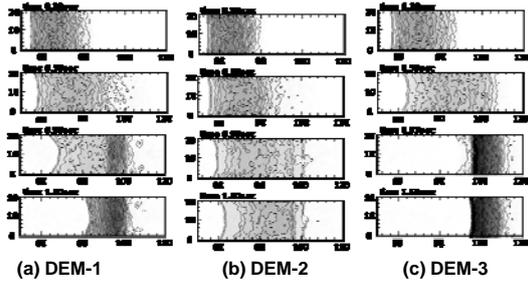


図9 DEMによる再現結果の例

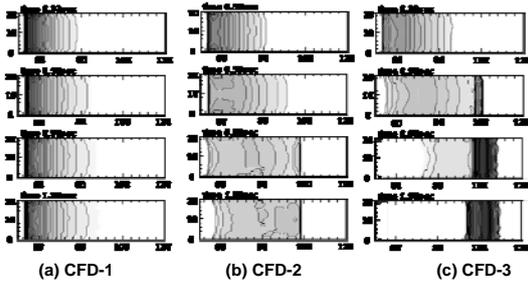


図10 CFD解析による再現結果の例

SPH法による斜面安定解析

SPH法を用いて、単純な条件で斜面安定解析を実施し、従来の設計で用いられる極限平衡理論に基づいた円弧滑り計算との比較を行った。図11は本解析で想定した4種類の解析モデルを示している。

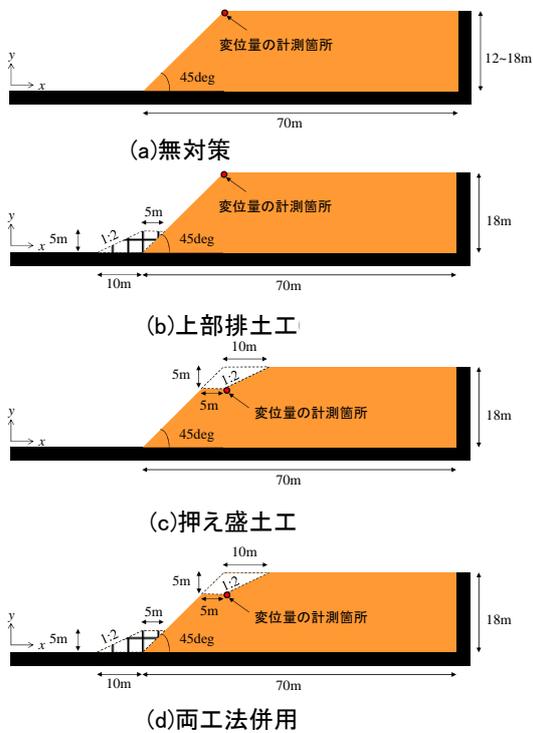


図11 想定した4種類の解析モデル

図12はSPH法による解析結果であり、各ケースについて円弧滑り計算により求めた安全率の値も図中に示している。これらの結果より、SPH法による解析結果は、従来の極限平衡理論に基づいた手法による安全率の傾向をよく表現できており、さらに変形量や変形モードについても言及できる可能性が確認された。

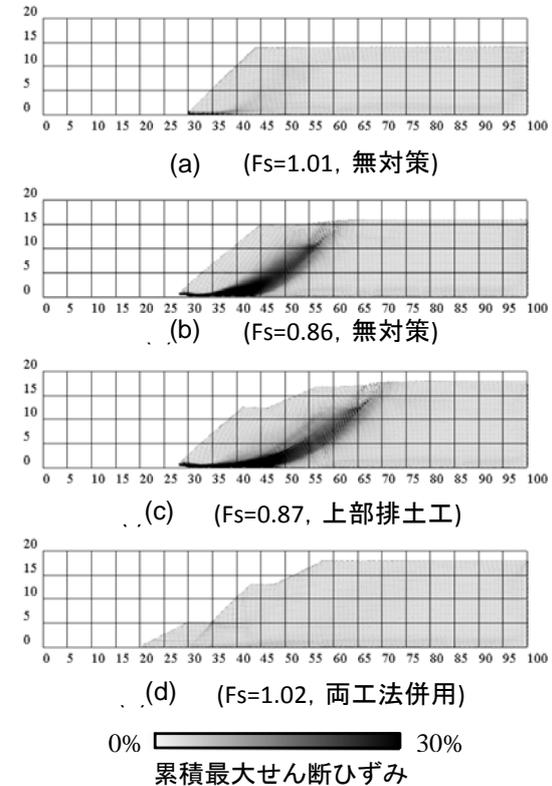


図12 SPH法による解析結果

DEMによる落石模型実験と再現解析

DEMによる落石シミュレーションに関する検証材料として、図13に示す模型斜面と模擬落石(木製)を用いて模型実験を行い、模擬落石の到達距離を計測した。DEMによる解析では、図14に示すような表面精度の異なる模擬落石のモデルを作成し、それぞれについて解析を実施することにより、表面精度が解析結果に与える影響を調べた。また、現象が強い非線形問題であることを考慮して、実験と解析ともに、複数回の繰り返し、到達距離の分布図を作成し、分布の比較を行うことで解析と実験結果を比較した。

図15は、各解析モデルによる結果を実験結果と比較したものである。表面精度が向上するにつれて、解析結果と実験結果の間に良い一致が見られる。また、表面精度が解析に与える影響を定量化した。この成果は、球形要素を用いたDEM解析を落石などの工学的な問題に適用する際の重要な情報であると考えられる。

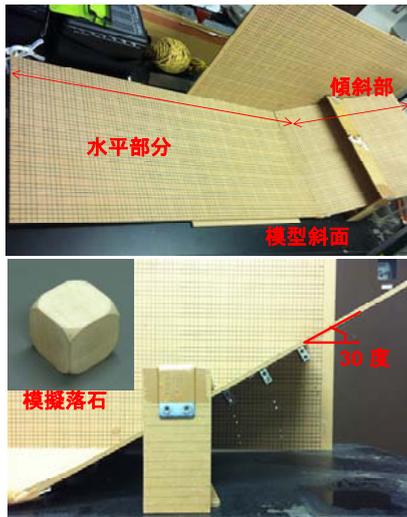


図 1.3 模型斜面と模擬落石

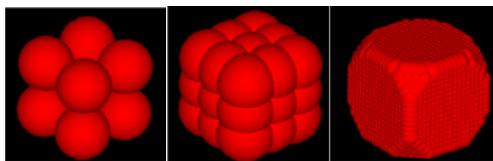


図 1.4 DEM 解析で用いた模擬落石モデル

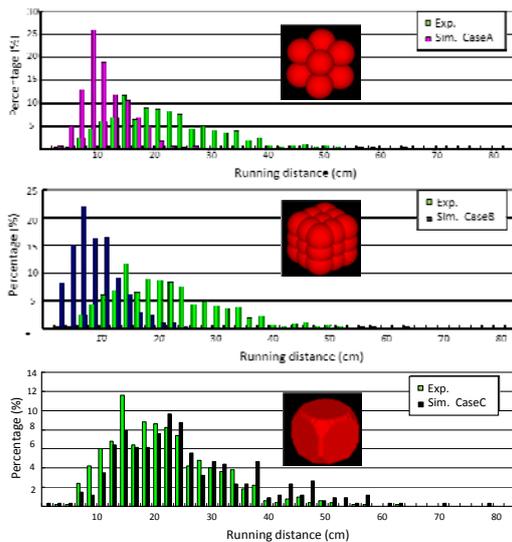


図 1.5 DEM 解析と模型実験の結果の比較

DEM による斜面崩壊解析の基礎的検討

DEM を土砂流動問題や斜面崩壊問題に適用する際には、粒子球形の影響を明らかにしておくことが重要である。そのため、球形粒子で構成される粒状体と、球形粒子を連結された非球形粒子で構成される粒状体の崩壊挙動について検討した。図 1.5 は解析結果の一部を示したものである。粒子形状は崩壊挙動に大きく影響する要因であり、DEM を土砂流動問題や斜面崩壊問題などの工学的問題に適用する場合には、できるだけ現実に即

した形で粒子形状の効果を導入することが重要であることが確認された。

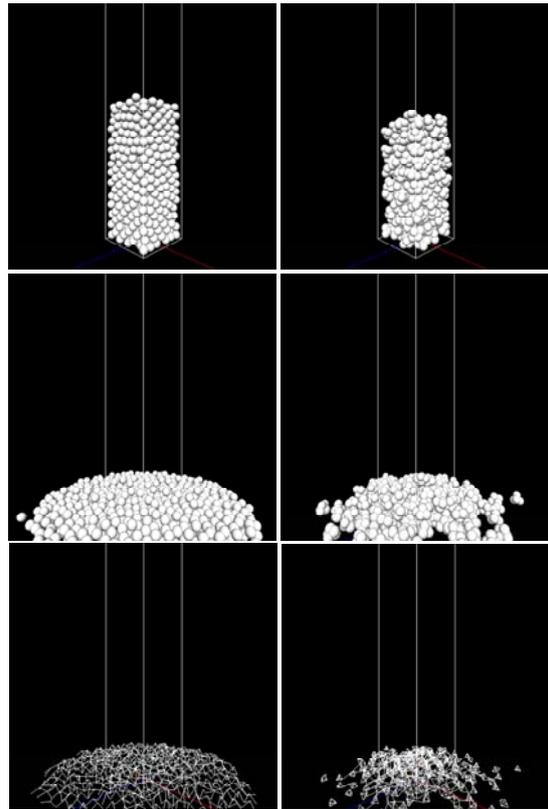


図 1.5 球形粒子と非球形粒子の崩壊挙動

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 17 件)

- ① 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 澤田豊, 角田紘子, 鶴ヶ崎和博, 遠心模型実験および SPH 法による津波が作用する海岸構造物の被害予測技術開発, 地盤工学会誌, 査読有, 60 巻, 2012, 12-14.
- ② 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子, 捨石マウンド-海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化, 土木学会論文集 B2, 査読有, 67 巻, 2012, 551-555.
- ③ 前田健一, 館井恵, 福岡雅俊, 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, 査読有, 64 巻, 2011, 3-14.
- ④ 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子, 津波力を受ける捨石マウンド-海底地盤の透水現象に着目した海岸構造物の安定性, 土木学会論文集 A2, 査読有, 67 巻, 2011, 133-144.
- ⑤ 前田健一, 羽柴寛文, 刈田圭一, 牛渡裕二, 川瀬良司, 二次元個別要素法を用いた落石による水平堆積層の衝撃力伝達

- 挙動, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, 14 巻, 2011, 355-364.
- ⑥ K. Oda, S. Moriguchi, I. Kamiishi, A. Yashima, K. Sawada and A. Sato, Simulation of snow avalanche model test using computational fluid dynamics, Annals of Glaciology, 査読有, Vol.52, 2011, 57-64.
- ⑦ Moriguchi, S., Borja, R. I., Yashima, A., Sawada, K. and Oda, K., Discrete and continuum modeling of sand flow experiment, Proceedings of international symposium on Geomechanics and Geotechnics, 査読有, 2010, 531-536.
- ⑧ Nonoyama, H., Moriguchi, S., Sawada, K. and Yashima, A., Applications for geotechnical problems using SPH method, Proceedings of the 9th Japan/Korea Joint Seminar on Geotechnical Engineering, 査読有, 2010, 127-134.
- ⑨ Maeda, K. and Sakai, H., Seepage failure and erosion of ground with air bubble dynamics, ASCE, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics, 査読有, 2010, 261-266.
- ⑩ 前田健一、松島亘志、森口周二、総説：数値解析技術 -粒状体-, 査読有, 58 巻, 2011, 68-70.
- ⑪ Fuse, T. and Kobayashi, Y., Solid-Fluid Interaction Analysis with Compulsory Displacement by Smoothed Particle Hydrodynamics-, Proceedings of the Twelfth International Summer Symposium, 査読有, 2010, 127-134.
- ⑫ 山口智世、前田健一、松本崇、Erdin Ibrahim, ファイバーによる粒状体の補強効果に関する二次元 DEM 解析, 土木学会応用力学論文集, 査読有, 12 巻, 2009, 497-506.
- [学会発表] (計 36 件)
- ① 前田健一, 塑性応力波の伝播速度からみた石礫流れ挙動, 平成 23 年度砂防学会研究発表会, 2011 年
- ② 前田健一, 細粒分の流出に伴う粒状体の粒子骨格構造変化とマクロ変形のモデリング, 第 55 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2011 年
- ③ 森口周二, Level III Reliability Based Design employing Numerical Analysis -Application of RBD to DEM -, 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, 2011.
- ④ 森口周二, 個別要素法により挙動を考慮した落石対策に関する信頼性設計に向けた提案, 第 23 回中部地盤工学シンポジウム, 2011 年
- ⑤ Moriguchi, S., Aoki, T. and Yashima, A. CFD-DEM coupled numerical simulation

for geomaterial, 9th world congress on computational mechanics and 4th Asian pacific congress on computational mechanics, 2010.

- ⑥ Kenichi Maeda, Critical State-based Geo-Micromechanics on Granular Flow, Powder&Grains 2009, 2009.
- ⑦ 坂井宏隆, 前田健一, 今瀬達也, 砂質地盤の進行性破壊現象における SPH 法の適用と検証, 第 58 回理論応用力学講演会 (NCTAM2009), 2009.
- ⑧ 小林義和, 粒子法に基づく地盤の変形解析に関する基礎的検討, 平成 21 年度地盤工学研究発表会, 2009
- ⑨ 森口周二, Ronaldo I. Borja, 八嶋厚, 沢田和秀, 小田憲一, 底面摩擦を考慮した乾燥砂の流動解析, 第 22 回計算力学講演会, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沢田 和英 (SAWADA KAZUhide)
岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授
研究者番号：30273121

(2) 研究分担者

前田 健一 (MAEDA KENICHI)
名古屋工業大学・都市社会工学科・教授
研究者番号：50271648
小林 義和 (KOBAYASHI YOSHIKAZU)
日本大学・理工学部・講師
研究者番号：20339253
森口 周二 (MORIGUCHI SYUJI)
岐阜大学・社会基盤工学科・助教
研究者番号：20447527

(3) 連携研究者

青木 尊之 (AOKI TAKAYUKI)
東京工業大学・学術国際情報センター・教授
研究者番号：00184036