

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289150

研究課題名(和文) 高圧下における地盤材料の圧縮、せん断と固化のマイクロメカニクス

研究課題名(英文) Micromechanics of compression, shear and solidification of geo-materials under high pressure

研究代表者

松島 亘志 (MATSUSHIMA, Takashi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：60251625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,500,000 円

研究成果の概要(和文)：高圧下の粒状体の複雑な巨視的物性(圧縮・せん断・固化特性)を、粒子スケールの力学(粒子破碎による粒度や粒子形状の変化、それに伴う粒子骨格構造変化、細粒分粒子の付着力による固着力など)から導く理論を構築するため、単粒子破碎試験、1次元圧縮試験、回転せん断試験、高速衝突実験、砂層の爆発衝撃実験などを行い、圧力や粒度分布の変化を計測した。その結果をもとに、間隙充填メカニズムに基づいた圧縮構成モデルを構築し、実験と比較して良好な一致を得た。得られた成果は、地震断層面の力学・透水特性評価、衝撃荷重を受ける地盤の力学特性評価、固体惑星表層土の物性評価と惑星探査技術への還元などに役立つものである。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the complex bulk behavior of crushable granular materials from micromechanism, we performed (1) single grain crushing test, (2) One dimensional compression test, (3) Rotary shear test, (4) projectile impact test and (5) sand layer explosion test. Based on those experimental results, we constructed a compression constitutive model that can describe the evolution of grain size distribution in terms of applied stress in a quantitative manner. The obtained results will contribute to the evaluation of mechanics of earthquake faults and permeability through them, prediction of dynamic response of geomaterials subjected to impact load, estimation of physical and mechanical properties of planetary surface soil, and so on.

研究分野：粒状体力学

キーワード：粒子破碎 高速衝突 高速せん断 フラクタル粒度分布 断層面の力学 惑星地盤工学

1. 研究開始当初の背景

地盤材料は微視的に見れば粒状体(固体粒子の集合体)であり、外力によって状態が複雑に変化する。特に高圧下では粒子の骨格構造のみならず、粒度や粒子形状などの粒子物性も変化する。更に、粒子破碎等によって生じた数ミクロン以下の粒子が圧縮を受けると、ファンデルワールス力に起因する粒子間付着力が増大し、材料の固化が起こる。

このような現象は、地盤の締固め、杭の先端支持力、標準貫入試験でのサンプラー先端部の動的貫入抵抗、列車通過時の枕木直下のバラスト破碎、落石や土石流の衝突挙動、地盤のエイジング効果、地震断層面での滑り抵抗など、地盤工学における様々な場面でみられるが、多くは現象論的な取り扱いにとどまり、統一的、理論的な体系化はなされていない。また、高圧材料科学や地球惑星科学の分野でも高圧下の粒状材料の力学挙動の解明は重要な先端研究課題である。一方、粉体工学の分野では、所要の粒子物性を得るための粉碎プロセス、逆に微小粒子の集合体を圧縮して造粒するプロセスなど、粒状体の基本プロセスに組み込まれているが、多くはやはり現象論的な取り扱いにとどまっている。

上述の様々な分野で扱う問題は、それぞれ対象の境界条件や載荷速度が異なっており、それぞれの問題に対する現象論的な取り組みはなされているが、全体を俯瞰して、幅広い条件での振る舞いを統一的に記述するような体系化の試みはこれまで全くなされていない。しかしながら、粒状体のマイクロメカニックス的な見地からは、多くの事象に共通の、比較的単純な力学的枠組みを構築することが可能であるはずである。本研究担当者は、そのような立場から分野の枠を超えて議論し、体系化への努力を始めている。その結果、粒度や粒子形状進化の法則性や、統一的な構成モデル(応力とひずみの関係)の可能性など、重要ないくつかの知見を得てきている。これらを更に発展させるため、本研究では、単粒子破碎試験、高圧一次元圧縮試験、高圧せん断試験、衝突載荷試験、爆発載荷試験といった広範な実験を、共通の粒状材料を用いて系統的に実施し、得られた結果を粒子スケールの数値解析と比較することで、高圧下の粒状体の振る舞いについての普遍的・統一的な枠組みを構築することを目的としている。

2. 研究の目的

高圧下の粒状体の複雑な巨視的物性(圧縮・せん断・固化特性)を、粒子スケールの力学(粒子破碎による粒度や粒子形状の変化、それに伴う粒子骨格構造変化、細粒分粒子の付着力による固着力など)から導く理論を構築する。地盤工学、衝撃工学、地球科学、材料科学、粉体物理学の研究者が協力し、粒状体の高圧載荷実験を系統的に実施し、マクロな力学応答と粒子物性変化

情報を取得する。更に、粒子スケールの数値シミュレーションと比較することにより、幅広い条件下で成立する統一的なマイクロメカニックス構成モデルの枠組みを構築する。得られる成果は、地震断層面の力学・透水特性評価、衝撃荷重を受ける地盤の力学特性評価、固体惑星表層土の物性評価と惑星探査技術への還元、未固結土砂と堆積岩の間の循環プロセスの理解などに役立つ。

3. 研究の方法

山砂で角張った粒子形状を有する岐阜珪砂、および川砂で丸っこい粒子形状をもつ鹿島珪砂を共通試料として、単粒子破碎実験、一次元圧縮試験、低速-高速(1nm/s ~ 1m/s)の高圧せん断試験、衝突載荷実験、爆発載荷実験を実施し、様々な境界条件および載荷速度での巨視的物性(圧縮、せん断、固化特性)および粒子物性(粒度と粒子形状の進化と堆積構造)を取得する。これらを粒子破碎・固着モデルを組み込んだ個別要素法(DEM)解析と比較するなどして、実験の定量評価が可能な数値モデルを構築する。更に、粒子物性変化とマクロな応力-ひずみ関係を結びつけるマイクロメカニックス構成モデルを導き、それを用いた連続体解析と実験を比較することにより、モデルの妥当性を検証する。

4. 研究成果

それぞれの研究項目について、以下のような成果が得られた。

(1) 単粒子破碎試験

本研究の共通試料である岐阜珪砂および鹿島珪砂の単粒子破碎実験を行い、粒子破碎強度の分布を求めた。その結果、それぞれの砂について、ワイブル係数=2のWeibull分布に近似できることを確認した。この結果は、その他の様々な実験の基礎情報となる。

(2) 砂の高圧1次元圧縮試験

それぞれの共通試料について、初期間隙比および最大載荷荷重を変化させて実験を行い、載荷に伴う体積変化および粒子破碎による粒度分布変化を計測した。その結果、間隙比-載荷圧力曲線(log e-log p curve)で得られる降伏応力(粒子破碎が発生する限界応力)は、単粒子破碎応力の1/3~1/4倍程度であること、破碎と共にフラクタル次元-2.5程度の粒度分布に漸近することを見いだした。このフラクタル次元は、Apollonian sphere packingのそれとほぼ同一であり、粒子破碎が間隙充填メカニズムに支配されていることが示唆された。

(3) 砂の高圧せん断試験

共通試料の高圧せん断試験を異なる実験条件(垂直応力、すべり速度、すべり量)下で行い、せん断抵抗の変化とバルク圧縮量、粒度分布の変化を調べた。特に試験体サイズをおよび拘束圧を変化させた結果、0.5(MPa)程度の低拘束圧下でも、せん断と共に破碎が進行し、最終的には5.0(MPa)程度の高拘束圧と同

様の圧縮量となることがわかった。また、最終的な粒度分布は1次元圧縮試験の粒度分布と同一であった。

(4) 粒子破碎理論モデルの構築

上述の実験結果より、圧縮およびせん断を受ける砂の破碎モデルを構築した。モデルを実験と比較したところ、良好な一致を確認した。

(5) 砂層への飛翔体高速衝突試験

共通試料での飛翔体貫入挙動および、試料の粒度分布変化を計測し、Drucker-Prager モデルなどの一般的な構成モデルを用いた粒子法による数値解析との比較を行った。

(6) 砂層の爆発衝撃実験

薬量 8g および 18g の C-4 爆薬を用いて、土槽内で爆発実験を行った。実験では、爆薬から 10cm ~ 15 cm における土圧を計測するとともに、爆発による粒度分布の変化を調べた。実験の結果、土圧は最大で 25MPa に達すること、また、粒径 0.85mm 以下に区分される粒子の割合が 0.4% 増大することがわかった。

(7) 高速衝突時の破碎性粒状体構成モデルにおける弾性モデルの検討

高速衝突時の破碎性粒状体を有限要素法や粒子法などで解析する際に必要となる弾性モデルの検討を行った。これと(4)の塑性破碎モデルを組み合わせることで、(5)や(6)の実験結果を数値計算によって再現することが可能となる。

本プロジェクトは今年度で終了するが、得られた結果を基に、より一般的な条件下で適用可能な構成モデルの構築を目指す。

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 15 件)(全て査読あり)

(1) Matsushima, T., Blumenfeld, R. (2017). Fundamental structural characteristics of planar granular assemblies: Self-organization and scaling away friction and initial state. *Physical Review E*, 95(3), 032905.

(2) Matsushima, T., Sato, K. (2017). Constitutive modeling of granular geo-materials under high-speed impact, *Proc. IWBDG - 11th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials*, in press.

(3) Katagiri, J., Matsushima, T., & Yamada, Y. (2014). Variations in shear behavior among specimens with different packing patterns. *Granular Matter*, 16(6), 891-901.

(4) Katagiri, J., Matsushima, T., Yamada, Y., Tsuchiyama, A., Nakano, T., Uesugi, K., Ohtake, M., Saiki, K., Investigation of 3D grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling, *Journal of Aerospace Engineering, ASCE.*, 28(4), 04014092, DOI:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000421, 2014.

(5) 片桐淳, 松島亘志, 竿本英貴, 豊田衛, 山

田恭央, SPring-8 の X 線マイクロ CT を用いた 3 次元土粒子形状の定量的評価, *土木学会論文集 C(地圏工学)*, 70(2), 265-274, 2014.

(6) Matsushima, T., Ishikawa, T., Particle Grading Effect on Mechanical Properties of Lunar Soil Simulant FJS-1, *Proc. Earth and Space* 2014, ASCE, 60-68, doi: 10.1061/9780784479179.008, 2014.

(7) Suzuki, A., Matsushima, T., Meso-scale structural characteristics of clay deposit studied by 2D Discrete Element Method, *Proc. IS-Cambridge, Geomechanics from Micro to Macro*, Soga et al. Eds, Taylor & Francis, ISBN 978-1-138-02707-7, 33-40, 2014.

(8) Matsushima, T., Yamashita, K., Yamada, Y., Plastic Compression of Sands due to Grain Crushing under High Pressure, *COMPSAFE: Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems*, 668-670, 2014.

(9) Kono, A., Ito, N., Matsushima, T., Abrasion Law of Irregularly-shaped Ballast Grains in a Rotating Drum, *COMPSAFE: Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems*, 671-673, 2014.

(10) Keiko Watanabe, Syungo Fukuma, Tadashi Yoshisaka and Hidetoshi Kobayashi: Penetration Velocity Measurement in Sands Using Magnet-Coil Gages, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 566 (2014), pp.371-376.

(11) Valdez, R.D., II, R. M. Lauer, M. J. Ikari, H. Kitajima, and D. M. Saffer (2015), Data report: permeability and consolidation behavior of sediments from the northern Japan Trench subduction zone, IODP Site C0019. In Chester, F.M., Mori, J., Eguchi, N., Toczko, S., and the Expedition 343/343T Scientists, *Proc. IODP, 343/343T: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.)*. doi:10.2204/iodp.proc.343343T.201.2015.

(12) Ma, S., T. Shimamoto, L. Yao, T. Togo, and H. Kitajima (2014), A rotary-shear low to high-velocity friction apparatus in Beijing to study rock friction at plate to seismic slip rates, *Earthquake Science*, 27(5), 469-497, doi:10.1007/s11589-0140097-5.

(13) Coble, C. B., M. E. French, F. M. Chester, J. S. Chester, and H. Kitajima (2014), In situ frictional properties of San Andreas Fault gouge at SAFOD, *Geophysical Journal International*, 199, 956-967, doi:10.1093/gji/ggu306.

(14) Kitajima, H., and D. M. Saffer (2014), Consolidation state of incoming sediments to the Nankai Trough subduction zone: Implications for sediment deformation and properties, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 2821-2839, doi:10.1002/2014GC005360.

(15) 吉岡秀佳, 秋葉文雄, 金子雅紀, 北島弘子, 東陽介, 橋本善孝, Exp. 311 乗船者一同

(2014), Exp. 311 : ガスハイドレート成因解明に向けて-大陸縁辺域のGH掘削の成果- 月刊地球号外, 64, 88-95.

〔学会発表〕(計 15 件)(全て査読なし)

(1) 石橋壮太, 松島亘志, 土粒子の表面凹凸と形成環境の関連性の把握, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会, 日本科学未来館(東京), 2016.

(2) 佐藤完, 松島亘志, 北島弘子, 高橋美紀, 回転せん断試験による地盤材料の摩耗・破砕特性評価, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会, 日本科学未来館(東京), 2016.

(3) 当流谷啓一, 松島亘志, LROC 画像を用いた月面クレーター形状パラメーターの検討, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会, 日本科学未来館(東京), 2016.

(4) 伊藤伸晃, 松島亘志, 河野昭子, 長期間の粒子摩耗現象解明のための回転ドラム実験と DEM 解析, 第 50 回地盤工学研究発表会(CD-ROM), 北海道大学(北海道) 2015.

(5) 松島亘志, 渡辺圭子, 高速圧縮破砕を受ける砂層に対するユゴニオ状態方程式の土質力学的解釈, 土木学会応用力学講演会(招待講演), 琉球大学(沖縄), 2014.

(6) 松島亘志, 地盤工学における粒子法の活用事例, 弥生研究会「粒子法研究会」(招待講演), 鹿島建設本館(東京), 2014.

(7) 渡辺圭子, 砂中貫入速度および姿勢計測を精緻化するための基礎研究, H26 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム(招待講演), ISAS(東京), 2015.

(8) 渡辺圭子, 分野横断を見据えた衝撃問題への取り組み, 日本材料学会 H26 年度衝撃部門委員会部門賞奨励賞受賞講演(招待講演), 日本材料学会(京都), 2015.

(9) Sato, K., Seta, M., Kitajima, H., Takahashi, M., Matsushima, T., Evolution of grain size distribution during high-pressure compression and shear, 28th KKHTCNN symposium on Civil Engineering, Taiwan, 2015.

(10) Takashi Matsushima, High pressure impact on geomaterials: grain crushing and structural evolution, IWACOM-III(招待講演), Tokyo, 2015.

(11) Takashi Matsushima, Grain crushing and structural evolution of geomaterials under high pressure, Avalanches, plasticity, and nonlinear response in non-equilibrium solids, YITP, Kyoto University, Kyoto, 2016.

(12) Takashi Matsushima, Why was Armstrong's footprint so clear?, Advancing Experimental Geomechanics (Invited lecture), Sydney, Australia, 2016.

(13) Takashi Matsushima, Planetary geomechanics, ALERT geomaterials workshop (special lecture), Aussois, France, 2016.

(14) Takashi Matsushima, Micromechanics of Lunar Soil, IMS-Chubu 2016 "New concepts and new developments in soil mechanics and

geotechnical engineering", Nagoya University, Nagoya, 2016.

(15) Takashi Matsushima, Micromechanical aspects of natural formation process of geological grains, MTiG4 "Modern Trends in Geomechanics (Invited lecture), Assisi, Italy, 2016.

〔その他〕

ホームページ:

http://granular.kz.tsukuba.ac.jp/h26_kibanb/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松島 亘志(MATSUSHIMA, Takashi) 筑波大学, システム情報系, 教授, 研究者番号: 60251625

(2) 研究分担者

別府 万寿博(BEPPU, Masushiro) 防衛大学校, 建設環境工学科, 教授, 研究者番号: 90532797

渡辺圭子(WATANABE, Keiko) 立命館大学, 理工学部, 教授, 研究者番号: 80423599

北島弘子(KITAJIMA, Hiroko) 産業技術総合研究所, 活断層・火山研究部門, 研究員, 研究者番号: 6063579

波多野恭弘(HATANO, Takahiro) 東京大学, 地震研究所, 准教授, 研究者番号: 20360414