

粒子法に基づく数値地盤実験室 (数値地盤構造模型実験システム) の開発

課題責任者

山本 修一 株式会社大林組 生産技術本部

著者

山本 修一^{*1}, 永井 秀樹^{*1}, 佐藤 伸^{*1}, 樋口 俊一^{*2}, 佐々木 智大^{*2},
杉江 茂彦^{*2}, 中道 洋平^{*2}, 西浦 泰介^{*3}, 古市 幹人^{*3}

*1 株式会社大林組 生産技術本部, *2 株式会社大林組 技術研究所, *3 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野

近年、より高い性能 (例えば高耐震) や複合化が要求されるようになってきた社会インフラ (土木建築構造物) の開発、設計、性能評価や、今後ますます必要性の高まる既設インフラの機能維持・向上の検討においては、技術情報調査や数値解析 (FEM 解析) に加えて、模型実験などによる確認等がなされるのが現状である。特に、地下構造物や構造物基礎などの地盤を含む系が対象の場合には、実際の土圧を再現するため実大規模の実験に代えて遠心模型実験が行われるが、多数ケースの実験を行うことが多く、遠心模型実験であっても多大な時間、労力、費用がこれに投じられているのが現状である。一方、コンピュータの発達により粒子法による地盤解析では模型実験での土粒子数 (数億～数十億粒子) を扱えるレベルになってきた。そこで、本課題においては、土粒子 1 つ 1 つをモデル化する粒子法 (DEM) を用いることによって、土の室内要素試験や地盤・構造物系の遠心模型実験を数値解析によりほぼ完全に再現できる、いわば「数値地盤実験室 (数値地盤構造模型実験システム)」の開発を試みた。

キーワード：個別要素法, 遠心模型実験, 三軸圧縮試験, 断層変位

1. はじめに

土木構造物の開発プロセスにおいては、最適な構造の研究やその挙動の確認、評価モデルの検証・確認に縮小規模の模型実験が行われることが多い。特に、地盤を含む系が対象の場合には、実際の土圧を再現するために遠心模型実験を行うのが一般的である。しかし、模型実験には多大な時間と労力、費用がかかるだけでなく、そのために十分なケースの実験を実施できず最良の成果を生み出せていない可能性もある。そこで我々は、社会インフラ開発プロセスの飛躍的な効率化を実現するために、遠心模型実験を補完する粒子法ベースの数値地盤実験システムの開発を進めている。このシステムでは、土粒子 1 つ 1 つを個別要素法 (DEM) [1] でモデル化することで粒子構造と巨視的な密度が実際の土と一致する (従って強度・変形特性も一致する) 数値地盤モデルの構築を目指している。また、間隙流体に対しては SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [2] を適用し DEM とのハイブリッド法により飽和・不飽和地盤にも対応する数値地盤実験システムを目指している。現在、ハードとソフトの発達により 100 億粒子規模の DEM 解析が可能であり [3-6]、通常の遠心模型地盤程度の土粒子数であれば上記概念の数値地盤モデルの構築が可能となってきている。

本研究では、砂地盤で埋め戻された断層直上のボックスカルバートが逆断層変位を受ける場を模擬した既往の遠心模型実験 [7] に対し、開発した数値地盤実験システムを用いてシミュレーション解析を実施し、断層変位に

ともなうボックスカルバートに作用する土圧や地盤表面形状の変化について実験との比較検証を行い、本数値地盤実験システムの有用性を検証する。そこで本課題では、数値モデル地盤のキャリブレーションを目的に行った遠心模型砂地盤に対する三軸圧縮試験のシミュレーション解析と遠心模型実験の予備的シミュレーション解析を行った。

2. 遠心模型実験のシミュレーション解析

2.1 実験概要と数値地盤モデル

遠心模型実験における断層変位载荷土槽の概要を図 1 に示す。実験は 1/50 の縮尺模型とし、50g 場で上盤側 (図 1 の右側) の床版を水平面から 30° で準静的にせりあげ、模型地盤に逆断層変位を作用させるものである。地盤材料は相対密度 $D_r=90\%$ で締固められた乾燥岐阜珪砂 7 号である。

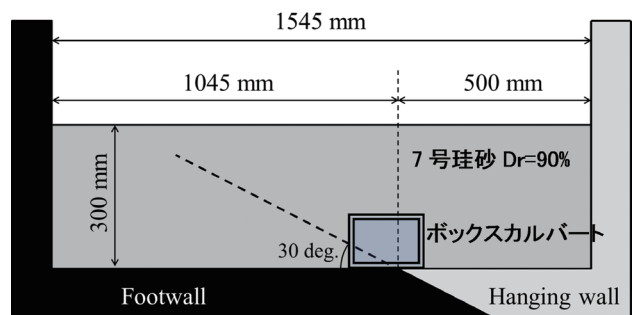


図 1 断層変位载荷土槽の概要

る。地中構造物の模型寸法は長さ 160 mm、高さ 120 mm、壁厚 20 mm のボックスカルバート構造物で、床版に接するように地盤中に設置されている。断層変位は地中構造物なしのケースで 60 mm (実際の 3 m 相当)、ありのケースで 100 mm (実際の 5 m 相当) を与えた。

数値地盤実験システムにおけるモデル地盤は、岐阜珪砂 7 号と同等の粒度分布を有する DEM 粒子を用いた。実験では奥行きが 1 m であるが、計算負荷を考慮して、シミュレーションでは 0.001 m とし、側壁の摩擦の影響を軽減するために側壁の摩擦係数は 0 に設定した。本計算条件下において用いられる DEM 粒子数は約 2 億個であり、地球シミュレータの 512 ノードを用いた場合の計算に要する時間は約 1 週間であった。

2.2 三軸圧縮試験シミュレーション

数値モデル地盤の強度・変形特性のキャリブレーションを目的に、岐阜珪砂 7 号の三軸圧縮試験のシミュレーション解析を行った。粒子を密充填して供試体を作成し、実験と同様の 50 kPa、100 kPa、200 kPa の拘束圧条件 (側圧一定) で三軸圧縮試験シミュレーションを行った。なお、計算負荷を考慮して、供試体サイズは実際の 1/4 の高さ 25 mm、直径 12.5 mm とした。DEM 粒子数は約 2 百万個である。DEM 粒子の摩擦係数と転がり摩擦係数を適切に設定することで、模型砂地盤と同等のせん断強度を有する砂地盤モデルを作成した。

三軸圧縮試験のシミュレーションにより得られた降伏後の所定の軸ひずみにおける供試体の様子を図 2 に示す。粒子の色は粒子の回転速度を表しており、白から黒になるほど回転速度が速いことを示している。せん断帯内では粒子の回転速度が増加するのが確認できる。また、拘束圧が高いほどせん断帯が 1 つに集約される傾向が見られる。図 3 は、主応力差ピーク時の主応力差 q_{max} と平均主応力 p との関係を実験と解析で比較したものであるが、両者はよく一致し (内部摩擦角はともに 38°)、遠心模型地盤と同じせん断強度を有する数値地盤モデルを構築できていることが確認できた。なお、解析では粒子間摩擦係数 0.5、転がり摩擦係数 0.01 とした。

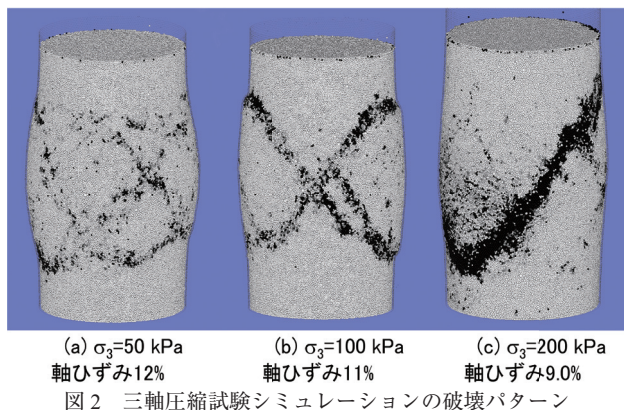


図 2 三軸圧縮試験シミュレーションの破壊パターン

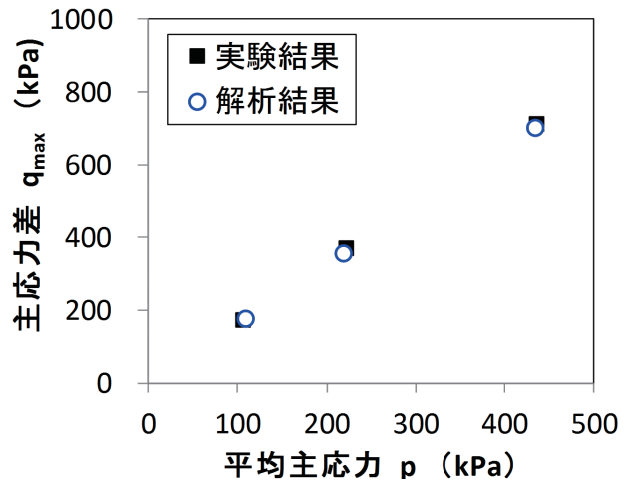


図 3 三軸圧縮試験におけるピーク時の $p \sim q_{max}$ 関係の実験と解析の比較

2.3 遠心模型実験シミュレーション

上記の三軸圧縮試験シミュレーションによるモデル地盤のキャリブレーションに先立って行った (キャリブレーションされていないモデル地盤で行った) 予備的な遠心模型実験シミュレーションによって得られた地盤の様子を図 4 に示す。ボックスカルバートが有る場合はボックスカルバートが無い場合と比べて、地盤表層に現れる断層位置が下盤側に移動していること、また、ボックスカルバートは反時計回りに若干ではあるが回転していることが確認できるが、これらは実験 [7] と同様の結果である。図 5 は所定の逆断層変位を与えた後の地表面の変状を実験結果と比較したものである (実寸法で示している)。ボックスカルバートの有無による地表面変状の相違を数値モデルはよく再現していることがわかる。

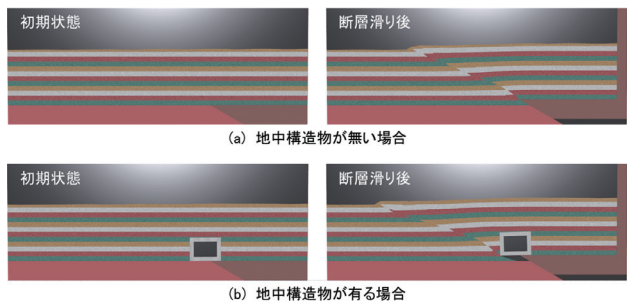


図 4 断層変位に伴う地盤およびボックスカルバートの挙動

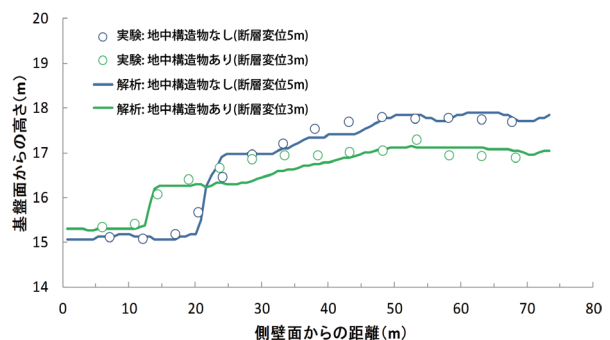


図 5 断層変位後の地表面形状

3. おわりに

開発した大規模粒子法に基づく数値地盤実験システムを用い、土粒子1粒1粒をモデル化して三軸圧縮試験および遠心模型実験のシミュレーション解析を行い、実験との比較に基づいて数値地盤実験システムの有用性を検証した。今後、本課題で行った三軸圧縮試験シミュレーションに基づくキャリブレーション済の数値地盤モデルを用いて遠心模型実験の再現解析を行い、地盤の変形やボックスカルバートへ作用する土圧等に関してより定量的な検証を行う。さらに、地下水を含む多様な実験系に対する検証も行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省ポスト「京」重点課題3「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（課題番号：jh170051-NAH）の支援による。

文献

- [1] P.A. Cundall and O.D.L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *Geotechnique*, vol.29, no.1, pp.47-65, March 1979.
- [2] J.J. Monaghan, “An introduction to SPH,” *Computer Physics Communications*, vol.48, no.1, pp.89-96, January 1988.
- [3] M. Furuichi and D. Nishiura, “Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions,” *Computer Physics Communications*, vol.219, pp.135-148, October 2017.
- [4] D. Nishiura and H. Sakaguchi, “Parallel-vector algorithms for particle simulations on shared-memory multiprocessors,” *Journal of Computational Physics*, vol.230, no.5, pp.1923-1938, March 2011.
- [5] D. Nishiura, M. Furuichi, and H. Sakaguchi, “Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing,” *Computer Physics Communications*, vol.194, pp.18-32, September 2015.
- [6] M. Furuichi, D. Nishiura, M. Asai, and T. Hori, “The first real-scale DEM simulation of a sand-box experiment using 2.4 billion particles,” *Proc. SC17 The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Technical Poster, no.P21, pp.1-2, Denver, USA, Nov. 2017.
- [7] 樋口, 加藤, 佐藤, 伊藤, 佐藤, 逆断層変位を受ける箱型地中構造物に作用する土圧特性に関する研究、土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, I_19-I_31 (2017).

Development of a Virtual Geotechnical Laboratory Using Particle Simulation Method

Project Representative

Shuichi Yamamoto Civil Engineering Technology Division, Obayashi Corporation

Authors

Shuichi Yamamoto^{*1}, Hideki Nagai^{*1}, Shin Sato^{*1}, Shunichi Higuchi^{*2}, Tomohiro Sasaki^{*2}, Shigehiko Sugie^{*2}, Yohei Nakamichi^{*2}, Daisuke Nishiura^{*3} and Mikito Furuichi^{*3}

*1 Civil Engineering Technology Division, Obayashi Corporation, *2 Technical Research Institute, Obayashi Corporation,

*3 Development of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The recent years have seen an increased demand for higher functionality (e.g., earthquake resistance) and more complexity in the development, design, and functional evaluation of the social infrastructure (civil engineering and architectural structures). Simultaneously, a growing need has also occurred for studies on maintenance and improvement of the functions of the existing infrastructure. For such investigations, in addition to technical information surveys and numerical analyses (finite element method analysis), model-based experiments are used for confirmation and other purposes. For models, it is necessary to reproduce actual Earth pressures, especially for systems that include ground soil elements, including underground structures and structure foundations, etc. In lieu of the large-scale actual tests, centrifuge model tests are performed. However, such tests must be performed for multiple cases, requiring extensive amounts of time, labor, and expenses. Meanwhile, with the development in computing technology, model tests using particle approaches have become possible, enabling soil analysis at the level of soil particles (from several hundred million to several billion particles). Using this discrete element method, where individual particles are modeled, we aim to develop a numerical ground test system that enables a nearly complete reproduction of laboratory soil element tests, and numerical analyses of ground and structure systems using centrifuge model tests.

Keywords: Discrete element method, Centrifuge model test, Triaxial compression test, Fault displacement

1. Introduction

In the development process for civil engineering structures, reduced-scale model testing is frequently performed in optimal-structure studies and behavior confirmation, and for evaluation-model validation and confirmation. In particular, when the study target is a system that includes ground soil, centrifuge model tests are commonly performed to reproduce actual Earth pressures. However, because model tests require extensive amounts of time, labor, and expenses, the cases tested may be insufficient, thereby resulting in suboptimal results. Thus, to realize breakthroughs in the efficiency of the social infrastructure developmental processes, we developed a numerical ground test (virtual laboratory) system based on particle approaches that can complement the centrifuge model testing. The aim of our virtual laboratory system is to construct, via modeling individual soil particles with the discrete element method (DEM) [1], a numerical ground model such that the particle structure and macroscopic density match those of the actual soil (thereby matching soil strength and deformation characteristics, as well). Using a hybrid method with the DEM and applying the smoothed particle hydrodynamics (SPH) [2] for pore fluids, we aim to realize a numerical ground test system

for both saturated and unsaturated soils. With the development in computer hardware and software, it is currently possible to perform DEM analysis on a scale of 10 billion particles [3-6]; further, with soil particle numbers equivalent to the ordinary centrifuge model soils, the configuration of a numerical ground model fulfilling the above-described concepts has become possible.

In this study, we verified the usefulness of our numerical ground test system. This was performed through simulation analysis, using our developed numerical ground test system, in an existing centrifuge model experiment [7], with the simulation of a box culvert buried in sand soil directly above a backfilled fault at a site that is undergoing a reverse fault displacement. A comparison was made between the simulation, and the experiment results for the Earth pressure exerting on the box culvert in tandem with fault displacement, in addition to changes in the ground surface shape. Further, a preliminary simulation analysis of the centrifuge model test was also performed, and simulation analysis of a triaxial compression test of the centrifuge model sand soil was performed to calibrate the numerical model soil.

2. Simulation of geotechnical centrifuge model test

2.1 Experimental overview and numerical ground model

Figure 1 shows an overview of the fault-displacement-load soil tank used in the centrifuge experiment. The experiment consisted of a 1/50 scale model, with a hanging wall slab (at the right side of the figure) at the 50-g site, quasi-statically elevated from the horizontal plane at 30°, to create a reverse fault displacement within the model soil. The soil material was the dry Gifu No. 7 silica sand, compacted to a relative density $Dr=90\%$. The underground structure was a box culvert of length 160 mm, height 120 mm, and wall thickness 20 mm, set within the soil to be in contact with the slab. A fault displacement of 60 mm (actual 3-m equivalence) was performed without the underground structure, and of 100 mm (actual 5-m equivalence) with the structure.

The model soil in the numerical ground test system consisted of DEM particles having particle distribution equivalent to that of the Gifu No. 7 silica sand. While the depth was 1 m in the test, considering the computational load, it was set to 0.001 m in the simulation. To reduce the effects of side wall friction, the side wall coefficient of friction was set to "0." Approximately 200 million DEM particles were used under the stated computational conditions. When the Earth simulator of 512 nodes was used, the time required for computation was approximately 1 week.

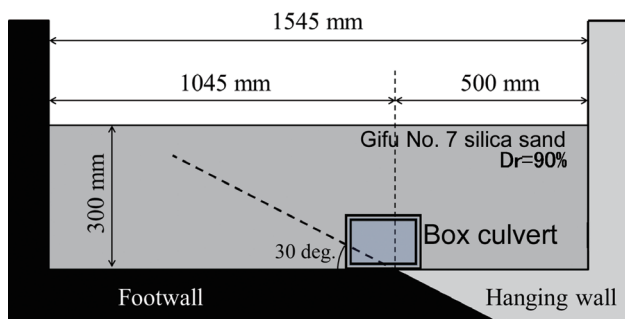


Fig. 1 Schematic diagram of soil tank used in centrifuge test.

2.2 Triaxial compression simulation

To calibrate the strength and deformation characteristics of the numerical model ground, a simulation analysis was performed on the triaxial compression test of the Gifu No. 7 silica sand. A test specimen of closely packed particles was created, and a triaxial compression test simulation was performed under confining pressure conditions (lateral pressure constant) equivalent to those of the experiment: 50 kPa, 100 kPa, and 200 kPa. Considering the computational load, the specimen was at 1/4 the actual size, with a height of 25 mm, and a diameter of 12.5 mm. The number of DEM particles was approximately 200,000. With the proper settings of the coefficient of friction and the coefficient of rolling friction of the DEM particles, a sand soil model was created having a shear strength equivalent to that of the model sand soil.

Figure 2 shows the appearance of the specimens at predetermined coaxial strains after the yields were obtained from the triaxial compression test simulation. The particle colors show the rotational speed of the particles, with the greater shift from white to black indicating faster rotation speeds. We confirm that the particle rotation speeds increased within the shear zones. Further, we also observed that with a higher confining pressure, the concentration into a single shear zone occurred. Figure 3 shows the relationships between deviatoric stress and average principal stress at deviatoric stress peaks, for both the experiment and simulation. They match closely (both have internal frictional angles of 38°), confirming that the numerical ground model was successfully created, having the same shear strength as the centrifuge model ground. It is noteworthy that for the simulation analysis, the interparticle friction coefficient was set at 0.5, with the rolling friction coefficient of 0.01.

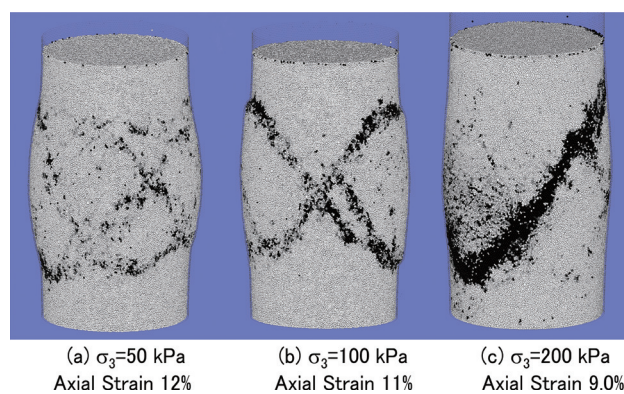


Fig. 2 Fracture pattern of test pieces in triaxial compression simulation

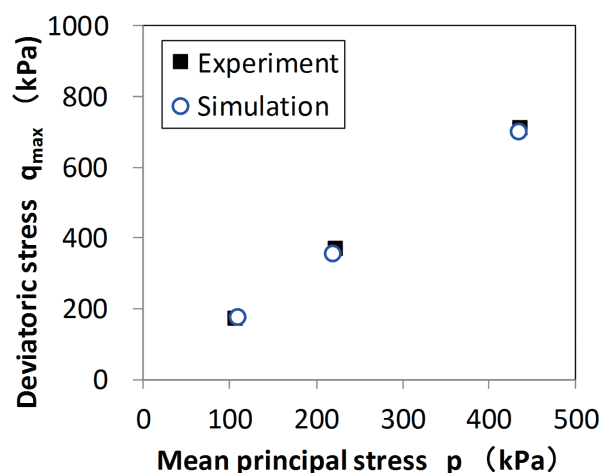


Fig. 3 Relationship between average principal stress and deviatoric stress at the yield point in the triaxial compression test.

2.3 Centrifuge model simulation

Figure 4 shows the appearance of the ground as obtained via the preliminary centrifugal model test simulation. This was performed using the uncalibrated model ground, as it was performed before the model ground calibration using the above-described triaxial compression simulation. Compared with the case with no box culvert, when the box culvert was included,

the fault site as it appears on the ground surface moved toward the footwall side. A slight rotation of the box culvert in the counterclockwise direction can also be confirmed. These results are the same as the experimental results of [7]. Figure 5 compares the simulation and experimental results for the shape profile of the ground surface after the predetermined reverse fault displacements (shown are actual dimensions). Differences in the ground surface changes due to the presence or absence of the box culvert are well reproduced by the numerical model.

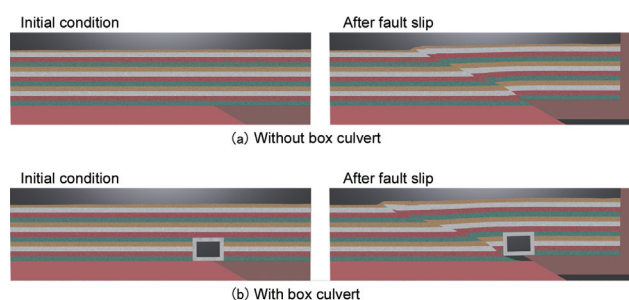


Fig. 4 Ground and box culvert motion with fault displacement obtained by DEM simulation.

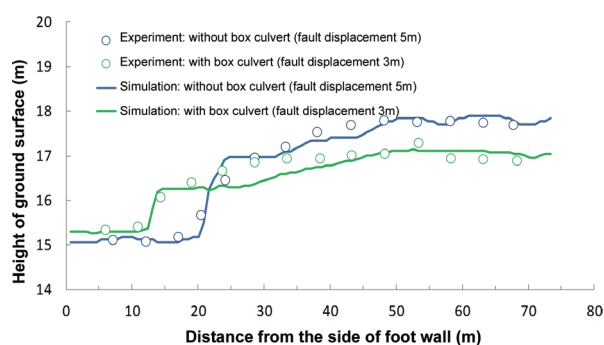


Fig. 5 Shape profile of ground surface after fault slip.

3. Conclusion

Using our developed numerical ground test system based on a large-scale particle approach, ground particles were modeled particle by particle, and a simulation analysis was performed for the triaxial compression test and centrifuge model test (experiments). Based on the comparisons between the simulation and experimental results, we verified the usefulness of our numerical ground test system. In future studies, we plan to use the numerical ground model that is calibrated based on the triaxial compression test simulation of the present study to perform a replication analysis of the centrifuge model test, for a more quantitative validation concerning ground deformation, Earth pressure exerting on the box culvert, etc. We also intend to perform further verifications using a variety of test systems that include groundwater.

Acknowledgement

This work was supported by MEXT as “Priority Issue 3 on post-K computer” (Development of integrated simulation systems for hazards and disasters induced by earthquakes and tsunamis) and "Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures" in Japan (Project ID: jh170051-NAH).

References

- [1] P.A. Cundall and O.D.L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *Geotechnique*, vol.29, no.1, pp.47-65, March 1979.
- [2] J.J. Monaghan, “An introduction to SPH,” *Computer Physics Communications*, vol.48, no.1, pp.89-96, January 1988.
- [3] M. Furuichi and D. Nishiura, “Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions,” *Computer Physics Communications*, vol.219, pp.135-148, October 2017.
- [4] D. Nishiura and H. Sakaguchi, “Parallel-vector algorithms for particle simulations on shared-memory multiprocessors,” *Journal of Computational Physics*, vol.230, no.5, pp.1923-1938, March 2011.
- [5] D. Nishiura, M. Furuichi, and H. Sakaguchi, “Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing,” *Computer Physics Communications*, vol.194, pp.18-32, September 2015.
- [6] M. Furuichi, D. Nishiura, M. Asai, and T. Hori, “The first real-scale DEM simulation of a sand-box experiment using 2.4 billion particles,” *Proc. SC17 The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Technical Poster, no.P21, pp.1-2, Denver, USA, Nov. 2017.
- [7] S. Higuchi, I. Kato, S. Sato, G. Itoh, and Y. Sato, “Experimental and numerical study on the characteristics of earth pressure acting on the box-shape underground structure subjected the strike slip fault displacement,” *Journal of Japan Society of Civil Engineering Ser.A1* vol.73, no.4, pp.I_19-I_31, September 2017.