# 大規模粒子法に基づく数値地盤実験室の開発

大林組 正会員 ○山本 修一 大林組 正会員 樋口 俊一 海洋研究開発機構 正会員 西浦 泰介 海洋研究開発機構 正会員 阪口 秀

### 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・確証に縮 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はな 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.そこで筆者ら 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)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)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<sup>1),2</sup>,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<sup>3)</sup>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層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.本報では、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の 結果を示す.

#### 2. 遠心模型実験のシミュレーション解析

(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 変位載荷土槽の概要を図-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 *Dr=*90%で締固められた乾燥 岐阜珪砂 7 号である.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



図-1 断層変位載荷土槽の概要

中構造物なしのケースで 60mm (実際の 3m 相当),ありのケースで 100mm (実際の 5m 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. 実験では奥行が1mであるが,計算負荷を考慮して,シミュレーションでは0.001m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週間である.

(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200万個であ 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

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,ボックスカルバート 連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組 生産技術本部設計第二部 TEL. 03-5769-1307

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 qmax 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.

(3) 予備的解析の結果 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<sup>3)</sup>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.

## 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,本文で示した三軸圧縮 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.

## 参考文献:

1) M. Furuichi, D. Nishiura, Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions, Computer Physics Communications, Vol. 219, 135-148 (2017)



3) 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)



(a) σ₃=50 kPa (l 軸ひずみ 12% 軸

(b) ஏ₃=100 kPa 軸ひずみ 11% (c) σ₃=200 kPa 軸ひずみ 9.0%

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* ~*q<sub>max</sub>*関係の実験と解析の比較



(b) 地中構造物が有る場合

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

