個別要素法による粒状体解析を用いた 高流動化処理土の流動性評価†

稲積 真哉* 重松 祐司** 中尾 晃揮***

Flowability Evaluation of Higher Fluidization Treated Soils by Granules Analysis with Distinct Element Method

by

Shinya INAZUMI*, Yuji SHIGEMATSU** and Koki NAKAO***

This paper clarifies the flow analysis method of fluidization-treated soils using 3D granules analysis by distinct element method (DEM) and the validity of the method. In recent years, fluidization-treated soils have been widely used as a material for landfilling such as underground space and so on in Japan. However, in the design and construction of fluidization-treated soils, it is based on the existing rule of thumb. In this study, the authors considered the applicability of 3D granules analysis by DEM in the flowability evaluation of fluidization-treated soils. As a result, it was clarified that flowability of fluidization-treated soil can be well reproduced by using 3D granules analysis by DEM. In addition, flowability was compared and evaluated by simulating pumping of two types of fluidization-treated soils using 3D granules analysis by DEM.

Key words:

Fluidization-treated soil, Granules analysis, DEM, Flowability test

1 緒 言

我が国では下水管や地下空間の埋戻し、および構造物の裏込め等において充填材または埋戻し材として流動化処理土が多用される傾向にある (Fig. 1 参照)。流動化処理土とは、粘土やシルトの細粒分を十分に含む泥状土ならびに所定の力学的特性に安定化させるための固化材から構成されることを原則とする湿式土質安定処理土の一つである。本材料は、締固めが不要であり適度な流動性を持たせた泥状の土に固化材を適量混合して固化効果を期待するものである。高含水比の建設発生土や中間処理が施された建設汚泥などを元とする母材と所定の力学諸特性に安定化させるための固化材とから構成されることを原則とする¹⁾。固化材としては、普通ポルトランドセメントやセメント系固化材あるいは石灰系固化材などがあげられる。流動化処理土は主に、土工による締固めが困難な狭い空間などへ流し込み施工で隙間を充填し、固化後に発揮される強度と高い充填性により品質を確保する土工材料である。しかしながら、多用される傾向にある流動化処理土の設計および施工は、現場における既往の経験則に基づいている現状である。そこで、流動化処理土の設計および施工について、理論に基づく知見を基にした流動挙動および充填挙動等を把握することができれば、以下の点で有用であると考えられる。

- (1) 流動化処理土の最適な配合設計を可能にする。
- (2) 現場における圧送距離および充填距離を定量的に把握することができる。
- (3) 圧送機材 (装置) の適切な選択を可能にする。

理論に基づく知見に関して、近年では非連続体を取り扱う方法として個別要素法 (Distinct Element Method; DEM)

が注目されている。DEM ははく離、滑りならびに要素間の接触といった連続体ベースの解析手法では追跡することができない現象を計算することができる数値解析手法の 1 つで、土粒子や粉体の流動・混合挙動をシミュレーション解析することに特化している。これら DEM のメリットに基づき、フレッシュコンクリートを対象として、DEM による粒状体解析を用いた流動性評価が試みられている²⁾。そこで、固化材として主にセメントが用いられる流動化処理土においても同様に流動解析を実施することが可能であると考え、本研究では流動化処理土の設計および施工における理論に基づく知見として DEM によ

Fig. 1 Example of construction of fluidization treated soil.

† 原稿受理 平成31年2月28日 Received Feb. 28, 2019 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 芝浦工業大学 〒135-8548 東京都江東区 Shibaura Institute of Technology, Koto-ku, Tokyo, 135-8548.

** 賛助会員 (株)三和 〒559-0031 大阪市住之江区 Sanwa Co., Ltd., Suminoe-ku, Osaka, 559-0031.

*** 東京大学大学院 〒153-8505 東京都目黒区 The University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505.

る粒状体解析に着目している。具体的には、流動性を高めた 2 種類の流動化処理土の流動性試験（フロー試験）を実施し、各流動化処理土の流動挙動に関する実現象の把握を行う。加えて、2 種類の流動化処理土のフロー試験を DEM による粒状体解析により再現する。これらの実現象および解析の比較を行い、当該手法の妥当性を検討する。加えて、実問題に則した解析として、複雑管路内での流動シミュレーションを実施する。

2 流動化処理土

流動化処理土とは、各種構造物の裏込めや地中構造物の埋戻しの際、適切な締固めが不可能な場合に対して建設発生土を有効利用するために開発された材料である。流動化処理土は締固めが不要であり、適度な流動性を有した泥状の土に固化材を適量に混合して硬化効果を期待することが基本的な概念である。流動化処理土は高い流動性を保有しており、ポンプ圧送等を用いて施工が行われる¹⁾。

流動化処理土は建設発生土や建設汚泥を母材としており、母材の粒径としては 40 mm 程度までは使用可能である¹⁾。細粒分を多く含む母材の場合、水分を含んだ母材に更に所定量の水を混合し製造する。一方、細粒分が不足する場合、母材が所定密度を確保するよう砂質土系の土を加え、更に細粒分を多く含む泥水を混合し製造する。また、粗粒分を多く含む粘性が不足する母材の場合、細粒分を多く含む泥水の混合とともに粘土を混入して粘性を調整し製造する。これら調整を行い、母材には粘土やシルトの細粒分を十分に含ませる必要がある。

流動化処理土に関する既往研究^{3),4)}では、力学特性および流動性に関しての実験的検討が行われている。また、繊維を混入した場合や泥状土の種類を変化させた場合の、力学的特性および流動性も多く検討されている⁴⁾。しかしながら、流動化処理土の流動性に関する解析的な評価・把握は十分に行われていない現状である。

本研究では、後述する高流動化・超高流動化処理土に対して、流動性試験（フロー試験）を実施した上、DEM による粒状体解析を用いた流動解析を実施する。なお、高流動化・超高流動化処理土の主たる相違は、母材の違い、すなわち粒度分布の違いが挙げられる^{5),6)}。

2.1 高流動化処理土

本研究では脱水・分級等の中間処理を行った建設汚泥を母材とし、セメント系固化材を配合したものを高流動化処理土として取り扱っている^{5),6)}。当該高流動化処理土は、最大粒径が 74 μm 以上の細粒分の混入を許した母材（建設汚泥の脱水処理時に発生する脱水液）を利用している。

2.2 超高流動化処理土

本研究で用いた超高流動化処理土は、母材として建設汚泥の脱水処理時に発生する脱水液を用いている^{5),6)}。一般的に建設汚泥は他所の現場のものと一緒に受入収集して一箇所に集積させ、排水処理まで複雑な工程をたどり、細かく分級された上で処理されている。その中、超高流動化処理土の母材として使用可能な工程を検討した結果、

振動ふるい機を通過した粒子径 74 μm 以下の細粒分を含む脱水液を母材として決定している。建設汚泥は土質特性にばらつきがあり、品質の安定性に欠ける¹⁾。そのため、振動ふるい機を通し品質の安定性を向上させた母材を用いている。当該超高流動化処理土は母材品質をより安定化するため、固化材としてセメント系固化材を配合している。当該超高流動化処理土の特徴としては、従来の圧送距離が短い流動化処理土（約 100~300 m）に比べて、低い圧送圧力でも 500 m 以上（好条件下では 700 m 以上）のポンプ圧送が可能である。さらに、当該超高流動化処理土は充填距離に合わせた中間立杭設置箇所の削減、中間立杭による舗装復旧等の付帯工事の削減、一日当たりの充填量が従来工法に比べて 3~4 倍多いこと、およびブリージングが少なく廃棄管充填の目的に適合といった更なる効果も得られる。同時に、大幅な工期の短縮および予算の軽減が可能となる^{5),6)}。

2.3 高流動化・超高流動化処理土の環境安全性

本研究で取り扱う高流動化・超高流動化処理土の環境安全性は、土壌溶出量試験および土壌含有量試験によって土壌汚染対策法基準に基づき判定している。土壌溶出試験では、第一種特定有害物質（四塩化炭素、1,2-ジクロロエタン等）、第二種特定有害物質（カドミウムおよびその化合物、六価クロム化合物等）、第三種特定有害物質（シマジン、チウラム等）を測定する。土壌含有量試験では、第二種特定有害物質を測定する。当該超高流動化処理土に対する各特定有害物質の測定結果において、例えば四塩化炭素では測定値が 0.0002 mg/L 未満であり、土壌汚染対策基準値 0.002 mg/L 以下を満たしている。他のすべての特定有害物質においても土壌汚染対策法の指定基準値を満たしている。すなわち、当該超高流動化処理土は土壌汚染に対する基準を満たしており、環境安全性が確保された材料である。加えて、力学的諸特性に関しても、流動化処理土としての品質を十分に満足した材料である^{5),6)}。

3 流動性試験による流動性評価

3.1 フロー試験による流動挙動の把握

高流動化・超高流動化処理土の流動性を把握するため、エアモルタルおよびエアミルクの試験方法^{1),7)}（JHS A 313-1992、 $\phi 80\text{ mm} \times \text{h} 80\text{ mm}$ のエアシリンダを使用）に準拠し流動性試験（フロー試験）を実施した。試験方法は、縦 80mm $\times$ 直径 80mm の円筒形の筒に材料を入れ、筒を引き上げたときの材料の拡がりを見るものである。数値の見方としては材料の拡がり大きいほど流動性があると判断できるものである。Table 1 は使用した高流動化・超高流動化処理土の配合を示している。

Table 2 は高流動化・超高流動化処理土に関するフロー試験の結果を示している。これより、高流動化処理土に比べ、超高流動化処理土はフロー値が大きく流動性に優れていることが明らかである。

加えて、DEM による粒状体解析に基づくフロー断面における流動挙動とフロー試験結果を比較するため、フロー試験の真上から動画撮影も実施し、経過時間ごとのフロー値を求めた。その測定結果については、Fig. 2 に示す。

3.2 回転粘度計による粘度の測定

本研究において粘度の測定は、回転粘度計を用いて実施した。回転粘度計には取扱いが容易である B 型粘度計 (DV2T) を用い、スピンドルは LV-3 を利用した (Fig. 3 参照)。回転速度はトルクが 10% を超えるよう、2~200 rpm の間で測定を実施している。トルクが 10% を超えるよう設定しているのは、トルクが 10% 未満では測定精度が著しく低下するためである。塑性粘度の測定は 1 つの回転

Table 1 Combinations of each fluidization treated soil.

	High fluidization treated soil	Super high fluidization treated soil
Specific gravity (stock solutions)	1.238	1.123
Cement addition amount (kg/m ³)	150	150
Specific gravity (after mixing)	1.324	1.238
Moisture ratio (%)	46.7	56.8

Table 2 Results of the flow test for each fluidization treated soil.

	High fluidization treated soil	Super high fluidization treated soil
Flow value (mm)	469	613

Fig. 2 Flow behavior of each fluidization treated soil by image analysis.

Fig. 3 Rotational viscometer.

数につき 20 秒の測定を行い、15 秒から 20 秒の測定値の平均値を結果として出力している。

Fig. 4 は、高流動化・超高流動化処理土の粘度測定の結果をそれぞれ示している。測定の際、試料の温度は約 20℃ である。これら粘度の測定結果より、回転速度により粘度が変化していることから、高流動化・超高流動化処理土はいずれも非ニュートン流体であることが確認できる。加えて、Fig. 4 から、回転速度が大きくなるほど粘度が小さくなり、収束は完全に起きていないものの、その傾向を捉えることができる。

3.3 高流動・超高流動化処理土の流動性

埋戻しや空洞充填に用いる流動化処理土の流動性の目安としては、ポンプ圧送性や施工性を考慮してフロー値 140 mm 程度以上とすることが一般的である。また、通常の流動性を有する流動化処理土で埋戻しを行った後に、残された非常に狭小な隙間等を充填して仕上げる際には、フロー値 300 mm 程度以上の流動化処理土をポンプ圧送することで非常に高い充填性が得られるとされている^{5),6)}。本研究において用いた高流動化処理土はフロー値が 469 mm および超高流動化処理土は 613 mm (Table 2 参照) であり、通常の流動化処理土に比べ流動性が向上している。そのため、高流動化・超高流動化処理土においては狭小な空間をも埋めることが可能となり、仕上げのみでなく埋立て材または充填材として用いると、より低い圧送力での高い充填が見込まれる。

高流動化処理土に用いた母材は、粒径が 74 μm を超える細砂の混入を許容している。一方、超高流動化処理土において用いた母材は、最大粒径が 74 μm になるよう篩分けの精度を向上している。すなわち、流動性の違いの要因として、粒度分布が異なることが影響していると考えられる。

フロー値の比較については、Table 2 より超高流動化処理土は、高流動化処理土や通常の流動性を有する流動化処理土に比べ流動性の向上があることが明らかである。流動性が向上する要因としては、粒度分布による影響があることが考えられる。

また、Fig. 4 は高流動化・超高流動化処理土の粘度測定結果を示しており、超高流動化処理土の粘度はいずれ

Fig. 4 The measured results of viscosity for each fluidization treated soils.

の回転速度においても高流動化処理土に比べ小さいことが確認された。したがって、粘度の測定結果からも超高流動化処理土は高流動化処理土に比べて流動しやすいと考えられる。

4. DEM による粒状体解析による流動性評価

4.1 DEM による粒状体解析

DEM とは、Peter A. Cundall によって提案された解析手法で、解析対象を微小な粒子の集まりと考え、粒子個々の運動を解析することで集合体全体の挙動や反力を解析する手法である。DEM は連続体力学に基づく有限要素法や粒子法と異なり、不連続体モデルに基づく解析手法である。計算に用いる要素は変形しない剛体として表現され、有限の大きさを持つ。また、その要素同士が接触した場合に接触力が働き、その力に基づいて各要素の運動を解くことで不連続体の集合体の挙動を表現することができる。Peter A. Cundall が提案した当初は、多角形要素が用いられたが、様々な分野で応用されるうちに、接触アルゴリズムがシンプルであるという理由から球要素がよく使われるようになった。DEM は、解析の対象を自由に運動できる多角形や円形（2 次元）、球（3 次元）の集合体にモデル化し、不連続面で区切られた要素の集合体において個々の要素ごとに独立した 2 階常微分方程式をたて、これを差分近似して時間領域におき Step by Step で前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動や変形を解析しようとするものである^{8),9)}。

Fig. 5 は DEM による粒状体解析で使用される一般的な接触力モデルである。法線方向にばねとダッシュポット、接線方向にはそれらに加えてスライダを考える。ここで、法線方向と接線方向とは、具体的には Fig. 6 のように表現される。すなわち、法線方向とは球要素の中心点を結んだ方向であり、接線方向とはそれに直交する方向である。基本的には、法線方向のモデルは要素間の反発力（斥力）を、接線方向のモデルは要素間の摩擦力を表現するために存在する。ばねは反発力や摩擦力を発揮するために存在し、ダッシュポットはエネルギーを減衰させるための粘性的な挙動を表現する。また、スライダは摩擦則に基づいて摩擦力の大きさをコントロールする役割を担当する。ここで、Fig. 5 では接触していない要素の間にモデルが存在するように見えるが、実際の計算では Fig. 6 のように要素がオーバーラップして（貫入して）初めて接触力が発生する。要素は変形しない剛体と仮定しているため、オーバーラップが生じることはもとの仮定と矛盾することになるが、これを許す接触力モデルを導入している。

Peter A. Cundall および Cundall and Stack によって元は岩盤工学の問題に導入され、その後地盤の問題に適用されるようになってきた。粒子個々を実土砂として模擬できることから、土砂形状を限りなく実際に近い形で表現できるため、現在では液状化や土石流等地盤の挙動解析に用いられることが多く、破壊を伴う地盤の大変形問題に対しての解決策として注目されている一方、流動性を有する材料に適用した事例は数少ない。

Fig. 5 General contact force model used in DEM.

Fig. 6 The normal direction and the tangential direction in DEM.

DEM は、各要素間を Fig. 5 のようにばね状のもので連結するため、要素同士のはく離・接触・滑動といった不連続体の運動の解析が可能であり¹⁰⁾、要素の集合体と考えることで様々な物質、構造体、岩盤ならびにコンクリート等の動的な破壊を含めた固体材料の挙動も解析することができる。

4.2 流動化処理土への適用

本研究では DEM による粒状体解析を流動化処理土に適用するため、フロー試験での流動挙動の再現を実施する。DEM による粒状体解析のパラメータの設定方法については数多くの研究がされており、様々な理論や式が提案されてきたが、未だに明確な設定方法は決められていない。一般的には実試験での集合体の挙動と一致するようなパラメータを変化させ、試行錯誤的に決定されている。本研究では、世の中で行われている DEM 解析を参考に、ばね定数、減衰定数、転がり摩擦および摩擦係数を設定し、DEM による粒状体解析における流動化処理土のモデル化を試みた。

4.2.1 粒子形状および初期条件 本研究では、シンプルなモデル化および計算時間の短縮から粒子群の形状は完全な球形とし、球形要素の径は解析規模との兼ね合いから直接的な土粒子径を設定せず、単位集合体として半径 2.5mm で一様な粒子径を用いている。粒子群の初期配置は空隙率を 26%とし、球体が最密充填となる配置を初期配置とした。なお、シリンダーの引き上げ速度は 50cm/s と仮定した。

4.2.2 ばね定数 線形ばね定数を試算する方法は、伯野⁸⁾によって、多質点-ばね連結系の 1 次元波動伝ば速

度の考察に基づいて、粒状体中の弾性波 P 波、S 波の速度 V_p , V_s を用いることで、式(1)のように提案されている。

$$k_n = 1/4 \pi \rho V_p^2, \quad k_s = 1/4 \pi \rho V_s^2 \quad (1)$$

ここで、 k_n は法線方向のばね定数、 k_s は接線方向のばね定数および ρ は粒状体全体の密度である。ポアソン比を 1/3 相当とすると V_p は V_s の 2 倍程度となるため、 $k_s/k_n = 1/4$ となる。本研究では簡単のため上式の関係を用いた。

なお、岩石のように $V_p = 1,000$ m/s を超えるような材料では k_n を 10^9 N/m 以上の大きな値で設定することになる。しかし、 k_n が大きくなると計算時間刻みを小さくせざるを得ないため、結果的に計算時間を増大させる原因となる。一方、粒状体の変形・破壊挙動、流れ挙動、衝撃力の挙動では、ばね定数が 10^6 N/m 以下では粒子要素の重なりによる圧縮性が顕著になり、粒状体本来の挙動とはかけ離れることが判明している¹¹⁾。また、 k_n が 10^7 N/m 程度以上であれば、計算で得られる特性に大きな差がない結果も得られている。以上から、計算負荷を避けるために、便宜上 10^7 N/m を超えるばね定数を用いれば良いとみなせる。そこで、当該解析では、ばね定数は $k_n = 2 \times 10^8$ (N/m)、 $k_s = 5 \times 10^7$ N/m と各試料とも同じ値に設定した。

4・2・3 減衰定数 フレッシュコンクリートに関する既往研究²⁾により、減衰定数はスランプ試験での試料の変形速度を決定するパラメータであることが判明している。また、減衰定数の影響は、流動の最終状態ではほぼ見られないことから、当該解析では実挙動の変形速度が合うように減衰定数を設定した。

4・2・4 転がり摩擦 当該解析で流動化処理土をモデル化する際に、計算負荷との兼ね合いから解析を円滑に行うため、要素形状は球形を用いた。しかし、円形要素を用いると粒子間衝突が点接触となり、転がり時に発生する抵抗が考慮できないため、粒子の回転が過剰になることを示されている。そして、このような過剰な回転を避けるため、転がり摩擦モデルを導入したところ、粒子の過剰な回転を抑制できることが分かっている^{12)~15)}。そこで当該解析でも、既往研究を参考にし、転がり摩擦を設定した。

4・2・5 摩擦係数 フレッシュコンクリートに対する研究²⁾により、摩擦係数はスランプフローと直線的な関係があることが示されており、流動化処理土においても同様の関係が存在すると考えられる。そこで当該解析では、流動化処理土の粘性を表現できるパラメータであると仮定し、摩擦係数を微調節していき、最終のフロー値が実試験と一致するよう逆解析的に決定した。

4・3 フロー試験の再現

当該解析で設定した各パラメータを Table 3 に示し、得られた各流動化処理土の解析断面の変化を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。そして、解析結果と実際のフロー試験による流動挙動を合わせて示したものを高流動化処理土に関しては Fig. 9 に、超高流動化処理土に関しては Fig. 10 に示す。高流動化・超高流動化処理土において、流動停止後のフロー値は、DEM による粒状体解析による解析結果とフロー試験結果と同一の値であるが、Fig. 9 および Fig. 10

Table 3 The DEM parameters set in this analysis.

	High fluidization treated soil	Super high fluidization treated soil
Density (kg/m ³)	1.324	1.238
Normal stiffness (N/m)	2.0×10^8	2.0×10^8
Shear stiffness (N/m)	5.0×10^7	5.0×10^7
Normal damping	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}
Shear damping	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}
Rolling resistance coefficient	0.1	0.1
Friction coefficient	0.120	0.085

Fig. 7 Visualized results of the granules analysis by DEM for the high fluidization treated soil.

Fig. 8 Visualized results of the granules analysis by DEM for the super high fluidization treated soil.

はともに一見すると解析結果とフロー試験結果は異なる挙動を持つようにみえる。しかしながら、実際の施工等における取り扱いのは主に充填可能距離であり、本研究で得られた流動停止距離は一致しており、このことを考慮すると流動挙動はよく合致していると判断できる。よって、DEMによる粒状体解析は、流動化処理土への適用が可能であるといえる。

4.4 複雑管路内での流動シミュレーション

流動化処理土は流動性を有しているため、狭く複雑な空間を埋め戻すことが可能である。しかし、充填に必要な流動性を有した流動化処理土を使用したとしても、複雑な断面形状の場合、未充填が発生する危険性が高くなる。そのため、未充填等のリスクを未然に防ぐためには、施工性の検討において流動化処理土の流動性に関する施工計画が非常に重要となる。最も確実な施工性の評価方法は、実大規模の施工実験であるが、費用と期間を要するため、実験を行うことは容易でない。そのため、DEMによる粒状体解析を用いた流動解析によって施工性の評価を確立することができれば、ポンプ車の圧送力、流入箇所および流入量等を入力値として多くのパラメータスタディーを行うことができ、事前の施工性予測が可能となる。さらに、設計段階から当該解析を導入して検討することにより、合理的な設計計画が可能となるものと考えられる。

そこで、本研究では複雑管路内での充填挙動における未充填箇所の検討を目的として、DEMによる粒状体解析を用いた流動解析の有効性の検討を行った。前述した結果をもとにすれば、実大規模の管路で充填箇所の流動挙動を解析して、未充填箇所を評価することが可能であると考えられる。本解析では、Fig. 11に示す断面形状およびFig. 12に示す流入箇所を想定した流動解析を実施する。解析条件としては、管路中心部0.5 mの高さから1秒間に0.0014 m³の粒子群を30秒間連続的に生成し、自由落下させ、流動が停止するまで計35秒間の解析を実施した。なお、DEMによる粒状体解析の粒子条件および各パラメータは、フロー試験の再現で得られたものを用いた。その解析結果について、高流動化処理土に関してはFig. 13に、超高流動化処理土に関してはFig. 14に示す。

流動停止後(35.0秒後)の充填性を比較すると、高流動化処理土は管路の端まで充填ができていないのに対し、超高流動化処理土は端まで充填できている。これより、管路の充填性もフロー値と比例して高くなる可能性がある。フロー値により示された高い流動性を持つ超高流動化処理土の管路内の充填性能は、高流動化処理土に比べ高いことが明らかである。以上のように、想定した複雑管路内の充填状況について、本研究における各パラメータに関する仮定および本解析手法により、対象としたケースではシミュレーションできているものと考えられる。ただし、DEMによる粒状体解析におけるモデル化で仮定を含むことから、実試験との比較等、今後検証のための確認が必要であるものの、当該解析が複雑管路内に流動化処理土が隅々まで行き渡り充填可能かどうかの状況を観察す

Fig. 9 Comparison of results of flow test and granules analysis by DEM for the high fluidization treated soil.

Fig. 10 Comparison of results of flow test and granules analysis by DEM for the super high fluidization treated soil.

Fig. 11 Cross-sectional shape inside complex pipeline.

Fig. 12 Inflow point of fluidization treated soil to complex pipeline.

Fig. 13 Simulated flow situation of the high fluidization treated soil in complex pipeline.

Fig. 14 Simulated flow situation of the super high fluidization treated soil in complex pipeline.

るために、有効な手法として構築できる可能性があることを示すことができたと考えられる。

5 結 言

本研究は、高流動化・超高流動化処理土の流動性に関する実験的評価ならびに DEM による粒状体解析に基づく流動化処理土の流動シミュレーションを行った。

本研究で得られた成果および知見は以下に示される。

- (1) 高流動化・超高流動化処理土の流動性は、従来の流動化処理土に比べ、それら名のとおり向上が確認された。最大粒径が異なる母材を用いた流動化処理土の流動性の比較により、母材の粒度分布や含水比が流動性に影響を与えることを示した。
- (2) DEM による粒状体解析においても高流動化・超高流動化処理土の流動性の向上が確認された。また、高流動化・超高流動化処理土に対する DEM による粒状体

解析は実問題と高い精度で合致しており, その妥当性が確認された.

- (3) DEM による粒状体解析におけるパラメータの設定方法について, 摩擦係数は流動化処理土の粘性を表現できるパラメータであり, 実試験と一致するよう逆解析的に決定できる.
- (4) DEM による粒状体解析は, 流動化処理土の管路内での流動挙動や流動停止後の充填状況を観察する手法として有効である. これより, DEM による粒状体解析は, 流動化処理土の施工計画および現場流動性の把握に有効な手法であるといえる.
- (5) 本研究で用いた 2 種の流動化処理土は, 一般の流動化処理土に比べ流動性に優れ, 特に超高流動化処理土は, 管路の充填において, 高い施工性が見込まれる.

課題として, 本研究はパラメータ決定において種々の仮定を含んでいる. 個別要素法の各パラメータの決定根拠や確実性をさらに検討し評価を行う必要がある. 今後は実現象との比較等により, 適用性を把握する必要がある.

参 考 文 献

- 1) Public Works Research Institute, “Technical manual for fluidized soils”, Public Works Research Institute, pp.1-19, (2007).
- 2) K. Nabeta, A. Machida, K. Iwashita, K. and T. Sasaki, “Flow simulation of fresh concrete by distinct element method”, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.16, No.1, pp.479-484, (1994).
- 3) Y. Kohata, “Mechanical property of liquefied stabilized soil and future issues”, Journal of Japan Society of Civil Engineers (F), Vol.62, No.4, pp.618-627, (2006).
- 4) Y. Kohata, K. Ito and Y. Koyama, “Effect of cement content on shear properties of liquid stabilized soil”, Journal of Japan Chapter of International Geosynthetics Society, Issue 26, pp.95-100, (2011).
- 5) S. Inazumi, M. Manabe, Y. Shigematsu and H. Kawamura, “Fundamental characteristics of the fluidization treated soils using the construction sludges with slurry state”, Proceedings of the 11th National Symposium on Ground Improvement, pp.407-410, (2014).
- 6) S. Inazumi, M. Kaneko, Y. Shigematsu and K. Shishido, “Mechanical properties of super fluidized soils using construction sludges with slurry state”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.65, No.7, pp.496-501, (2016).
- 7) Y. Akagi, M. Saitou, A. Okubo and Y. Komuro, “Development of filling method (Super flow method by high fluid filler)”, Special Report of Institute of Technology, Kurimoto Co. Ltd., No.53, pp.18-24, (2005).
- 8) M. Hakuno, “Simulation of destruction -follow the destruction in the extended distinct element method-”, Morikita Publishing Co., Ltd, (1997).
- 9) S. Yamamoto, “Analytical Study on Mechanical Behavior of Granular Materials by Distinct Element Method (Part 2)”, Report of the Engineering Research Laboratory, Obayashi Corporation, No.48, p.50, (2008).
- 10) S. Sawada, B. S. Pradhan and Y. Iwasaki, “Simple shear behavior of granular bodies by DEM”, The 27th Geo engineering research presentation, pp.573-576, (1992).
- 11) H. Nakase, T. Annaka, F. Katahira and T. Kyono, “An application study of the distinct element method to plane strain compression test”, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.454, pp.55-64, (1992).
- 12) Japan Society of Civil Engineers: “workshop text on analytical technique (DEM) on ground”, Japan Society of Civil Engineers, (2010).
- 13) K. Maeda, S. Moriguchi, T. Matsushima and T. Koyama, “Distinct element method for geotechnical engineering”, The Japanese Geotechnical Society, pp.63-68, (2015).
- 14) K. Osada, Y. Shimizu and A. Wakai, “Effects of grain rotational motion and rolling friction on debris flow simulation by the distinct element method”, Proceedings of hydraulic engineering, Issue 49, pp.889-894, (2005).
- 15) Y. Fukumoto, H. Sakaguchi and A. Murakami, “Failure criteria for geomaterials in simple discrete element modeling”, Journal of Japan Society of Civil Engineers (A2), Vol.67, No.1, pp.105-112, (2011).