

CFD-DEMを用いたサクシオン基礎周辺地盤の浸透流解析技術

CFD-DEMは、数値流体解析（CFD:Computational Fluid Dynamics）と粉粒体の解析手法である離散要素法（DEM:Discrete Element Method）を統合した数値シミュレーション手法である。本稿で紹介する技術は、CFD-DEMの高計算負荷という欠点を低減し、大規模解析を実施可能にする解析モデルである。本技術を構築するため、着床式洋上設備の基礎形式の一種であるサクシオンパケット基礎の施工を対象とした解析および実験を実施し、同基礎施工時の地盤内浸透流による地盤性状の変化を表現した。

キーワード

CFD-DEM, 浸透流解析, 着床式洋上風力基礎, サクシオンパケット基礎



■ CFD-DEM多層粒子モデル

(1) CFD-DEMの課題

近年、DEMは粉粒体の離散的な挙動を表現する有力な解析手法として注目を集めている。一方で、DEMでは各粒子の接触および運動を逐次計算するため、粒子数の増加に伴い、計算負荷が急激に増加する。実務においては、計算負荷の低減を目的として、実際の粒子よりも遥かに大きな球形の解析粒子を使用することが一般的であり、図1に示すように、複数の粒子から構成される粒子群を一つの大きな粒子として模擬する形が採られる。しかし、実粒子と解析粒子に差があるほど、実粒子の挙動を正確に表現することは困難になる。特に、CFD-DEMで扱うような混相現象においては、粉粒体の力学特性と水理特性を同時に表現することが困難になる。以下に具体例を示す。

土質工学において、地盤の力学特性を示す指標として相対密度がしばしば用いられる。相対密度は、土の締め具合を示す相対値であり、100%の場合はその土が取りうる最大充填密度、0%の場合は最小充填密度を意味する。一方で、土の水理特性を示す指標である間隙率は、土に占める間隙の割合を示す絶対値であり、土の粒子形状や粒径分布によって取りうる値の範囲が異なる。例として、図2に各地盤材料と球の取りうる間隙率の例を示す。CFD-DEMでは、上記2種の指標を適切に表現する必要があるが、粒径分布や粒子形状が異なる解析粒子を用いると、指標間の関係が変化してしまう。2指標を同時に表現するには、全く同じ粒径分布や粒子形状である必要がある。

このような背景を踏まえ、実務規模に耐えうる解析を実施するには、単純化された大きな解析粒子を用いた場合でも、実粒子群の力学特性および水理特性を同時に表現する必要がある。そこで、次項に示す多層粒子モデルを構築した¹⁾。

(2) CFD-DEM多層粒子モデル

多層粒子モデルは、一つの粒子に、径方向に変化する3層の物性値を与えるモデルである（図3参照）。外側2層の物性値はDEMの計算に用い、粒子の接触状況に応じて挙動を変化させる。例えば、接触が弱い時には緩い粉粒体群としての物性値（半径 r_1 ）、接触が強い時には密な粉粒体群としての物性値（半径 r_2 ）を用いて粒子挙動を計算する。最内層の物性値（半径 r_3 ）は、CFDとの連成時において、間隙率の算出に用いられる。

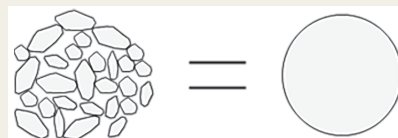


図1 実粒子(左)とDEM解析粒子(右)¹⁾

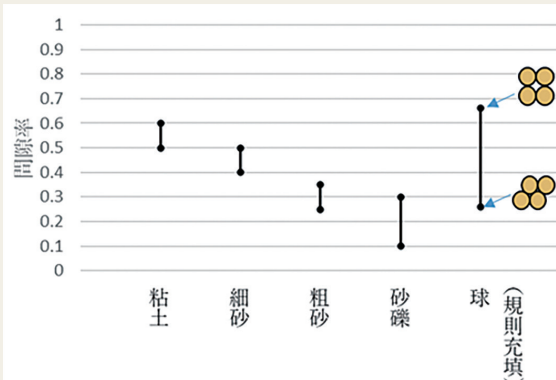


図2 各地盤材料と球形粒子の取りうる間隙率例

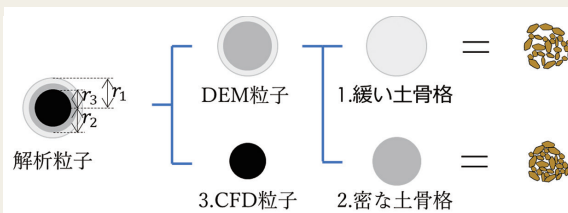


図3 多層球モデルの概念¹⁾

具体的には、空隙を含まない粉粒体層と等価な体積の球形粒子の半径を用いて間隙率を算定する。

これにより、一様な物性値を有する粒子を用いた場合や粒径分布を持たせた場合と比べ、一種類の解析粒子を用いた場合であっても、より広範囲の充填状態を柔軟に表現することができる。つまり、解析粒子数の増加を抑えつつ実粒子群の力学特性および水理特性を同時に表現することができる。

■ サクシヨンバケット基礎への適用 および遠心場貫入実験

本解析モデルを、サクシヨンバケット周辺地盤の浸透流解析へ適用した。サクシヨンバケットは、低コストで施工可能な着床式洋上設備の基礎構造物として今後の展開が期待されている。同基礎は、バケット内の強制排水によって発生するバケット内外の圧力差を利用して貫入する（図4）。そのため、貫入と同時に地盤内に発生する浸透流により周辺地盤の性状が変化する（浸透破壊）懸念がある。地盤性状の変化は基礎耐力の低下を引き起こす可能性があり、設計段階でその発生有無および耐力への影響を十分に検討する必要がある。しかし、浸透破壊は地盤の離散的な挙動に起因するものであり、従来の有限要素法などの連続体モデルではその正確な表現が難しい。また、土粒子とサクシヨンバケットは規模が乖離しており、DEMにおいても大きな解析粒子を用いざるを得ない。そこで、本モデルを用いて施工過程における地盤性状の変化を表現することを試みた。

図5は解析結果の一例である。バケット中心断面における圧力コンターと粒子の様子を表している。バケット内の圧力低下により、バケット近傍粒子が移動し、バケット内部が盛上がる様子が表現できている。本解析は、多層粒子モデルを用いて、一種類の比較的粗い粒子（バケット径の1/7.5倍）のみにより地盤を表現した。他の類似の解析の多くは、粒径分布を考慮し、かつ平均粒径が本解析の約半分以下である。本モデルにて地盤の力学特性を維持したまま水理特性を実地盤に近づけることで、比較的大きな粒子を用いた場合で

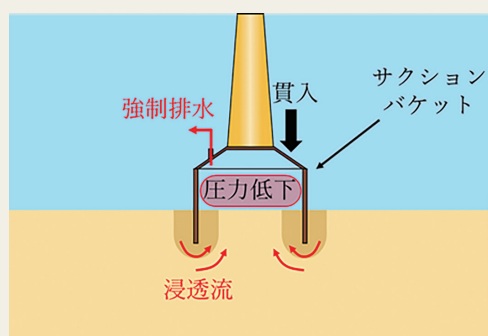


図4 サクシヨンバケット基礎の貫入イメージ

も、実際に近実際に近い挙動を表現できたと考えられる。

なお、本解析の実施にあたり、モデル検証のために、京都大学防災研究所の遠心力载荷装置を用いた遠心場実験（図6）を併せて実施した。遠心場実験は、縮尺模型において実地盤と相似した土圧分布を得るため、模型鉛直方向に遠心加速度を与える実験である。本実験では、Φ75mmの模型を用いて、重力の50倍の遠心加速度を与えることで、直径50倍のΦ3.75mのサクシヨンバケットの貫入を模擬した。現在、実験の再現により解析モデルの精度検証を行い、設計適用を目指している。

■ おわりに

本稿では、CFD-DEM多層粒子モデルを紹介した。本モデルは、大きな解析粒子を用いた場合においても、粉粒体の力学特性と水理特性を同時に表現するものであり、CFD-DEMの高計算負荷という欠点を低減し、大規模解析を可能にする。今後、本モデルの精度向上を図り、実際の設計に適用していく。また、本解析モデルを応用し、灰や触媒の表現など、他製品への展開を目指す。

参考文献

- 1) 小野泰明, 上田恭平, 渦岡良介: CFD-DEM多層球モデルを用いた浸透流解析, 土木学会論文集特集号(応用力学) Vol.81, No.15.

【問い合わせ先】

カナデビア株式会社 開発本部 技術研究所
基盤技術研究センター 流体グループ
Tel: 06-6551-9692
E-mail: ono_ya@kanadevia.com

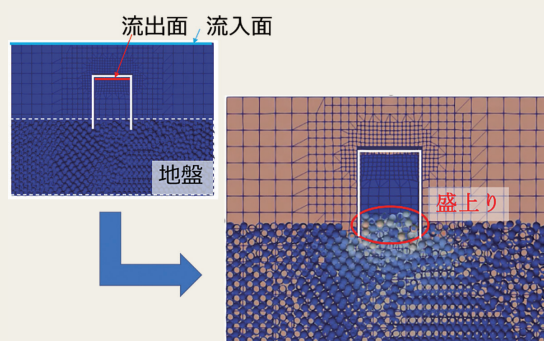


図5 浸透破壊によるバケット内地盤の再現

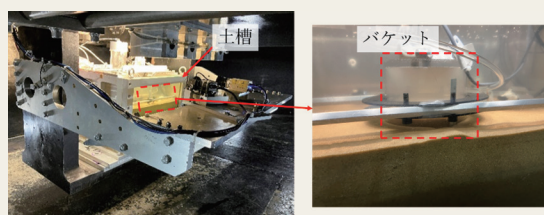


図6 遠心場実験の様子