

## 個別要素法を用いた土砂流動解析

泥土圧シールド工法では、チャンバ内で掘削土砂を作泥土材と混練し、適切な性状の泥土に変換する。この作業は、シールド掘進機前面に掛かる土圧を維持して慎重に行う必要があり、工事の安全性および効率に大きく影響する。そのため、チャンバ内の高拘束圧下における土砂挙動を把握することは重要である。本技術は、粉粒体解析手法である個別要素法により、チャンバ内土砂挙動を解析するものである。これにより、従来の経験則に基づく検討に加え、解析による混練性能の検証が可能となった。

### キーワード

シールド掘進機, 個別要素法, 土砂, 粉粒体



### はじめに

泥土圧シールド工法では、カッタにより掘削された土砂をチャンバ内で作泥土材と練り混ぜることで、任意の性状の泥土へ変換する。適切に作泥土材を混練することで、多種多様な地層に対して広く適用できる工法である。

掘進中は、地表面への影響を抑えるために、シールド掘進機前面に掛かる土圧を維持する必要があり、慎重に運転される。工事の安全性および効率に大きく影響するため、効率的な混練が求められる。しかし、土砂が高拘束圧下で強力に混練される過酷な環境であることから、センサなどでの実測は非常に困難で、チャンバ内の土砂挙動はまだ十分に解明されていない。

近年、カッタが矩形断面などの特殊断面機や直径15m超の大口徑機といった、過去に例の少ないシールド掘進機の需要が増えており、これまで以上に土砂挙動の解明が求められている。ここでは、上記課題を解決すべく開発した土砂挙動解析技術を紹介する。

### 個別要素法による土砂挙動解析

チャンバ内の土砂挙動の評価には、粉粒体解析手法の一つである個別要素法を用いた。個別要素法では、固体球粒子すべてに対してニュートンの第2法則に基づく運動方程式を解くことで、独立した粒子挙動の追跡を行う。本解析では、球粒子の接触はバネとダッシュポッドとスライダーからなるフォークトモデルにより力が伝達されるものとした。また、回転抵抗モデルを用いることで球粒子の回転を抑制し、いびつな形状の砂粒子の回転挙動を模擬した。なお、解析にはオープンソースソフトであるLIGGGHTS<sup>®</sup> version3.8を用いた。

図1は拘束圧下での土砂攪拌解析の妥当性を検証するために実施した模型実験装置の概形である。底面に円柱状の固定翼を設けた円筒容器と、固定翼と同形状の攪拌翼を設けた加圧蓋を用いた。容器内に土砂を充填し、電動シリンダーにより加圧蓋を充填土砂に押し付けて拘束圧を発生させ、その状態で円筒容器をターンテー

ブルにより回転させることで攪拌を行い、チャンバ内における土砂の攪拌を模擬した。土砂は、豊浦珪砂を白と黒に色付けした2種を用い、容器充填時に水平方向に交互4層に並べることで、実験後の層の乱れや褶曲の様子から、土砂の攪拌状態を目視確認できるようにした。

初期砂分布、実験結果、および再現解析結果を図2に示す。土砂の乱れ、褶曲具合は実験と解析で非常に良く一致した。どちらも、青点線で囲まれた攪拌翼通過部分近傍でのみ、白と黒の土砂粒子が入り乱れており、また、その内周部と外周部では、初期分布を概ね保ったまま少量回転した。拘束圧下では、粒子間の空隙が小さく、摩擦や噛み合いが強く働く。これにより、土砂粒子の移動範囲が限られ、せん断抵抗が増加するため、せ

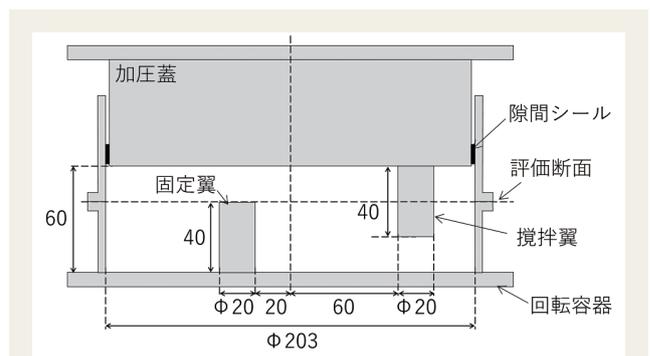
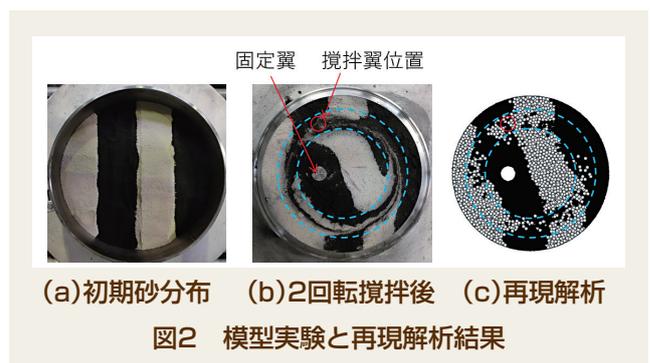


図1 検証実験容器概形 (単位は[mm])



(a)初期砂分布 (b)2回転攪拌後 (c)再現解析

図2 模型実験と再現解析結果

せん断応力が最も強く働く箇所（回転半径の大きな攪拌翼近傍）でのみ攪拌されたものと考えられる。

このように、本手法を用いれば、流体（連続体）解析では考慮が難しい粒子層のせん断など、土砂の非連続物質としての挙動を表現できる。加えて、個別要素法では流体解析のようなボリウムメッシュを作成する必要が無いことから、カッタの回転が複雑な特殊断面シールドへの適用が容易というメリットがある。

## ■ チャンバ内構造検討への適用

### 1. 解析条件

図3の2つのチャンバ構造を持つシールド掘進機（直径3.28m）を対象に解析を実施し、チャンバ構造の差異による混練性能の変化を確認した。チャンバ構造は、どちらも中間支持方式（カッタを回転中心と円周部との中間付近で支持する方式）でカッタを支持し、一方は通常複数配置される攪拌翼および固定翼が無い構造（Case1）、もう一方は固定翼を1本のみ配置した構造（Case2）とした。土砂粒子は、実機と同様、カッタ前面からチャンバ内に取り込まれ、スクリュにより後方に排出されるものとした。また、カッタとスクリュの回転数は、それぞれ1 [rpm]、32 [rpm] と設定した。

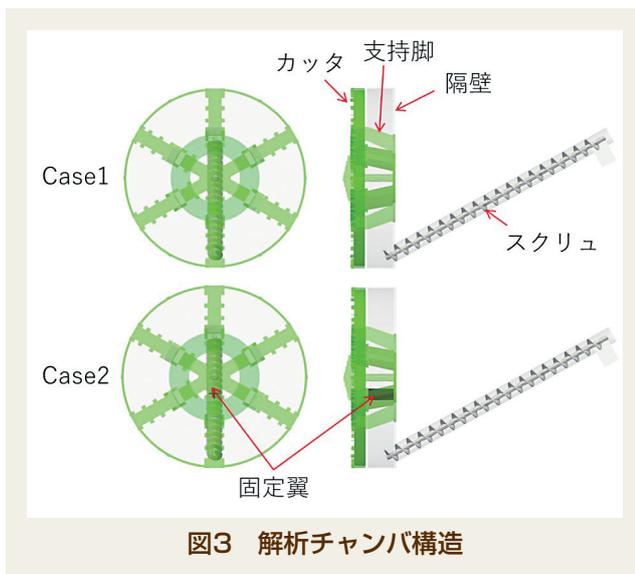


図3 解析チャンバ構造

### 2. 解析結果

図4は、各条件のカッタ近傍と中間、隔壁近傍の3断面における粒子の総回転量を可視化したものである。総回転量とは、解析時間内における粒子の回転数であり、せん断力の作用により回転が発生することから、粒子が攪拌された量に相当する。攪拌性能が高い、つまり混練性能の良いチャンバ構造では、土砂粒子の回転運動も活発であると言える。

Case1では、カッタや支持脚との接触部で粒子回転量が多い傾向があり、隔壁断面に近づくほどカッタの影響が小さくなり、粒子回転量が少なくなった。カッタ近傍断面では、周速度の違いにより外周部ほど粒子回転量が多かった。また、全断面共通して支持脚間で粒子回

転量が最も少ない結果となった。これは、周速度の比較的小さい内周部であることに加え、カッタや支持脚などの回転部が土砂を囲む構造であることと半径方向の流動がないことから、共回りが発生したためである。支持脚内周部に固定翼のあるCase2では、その近傍での共回りが低減されてCase1と比較して粒子回転量が多くなった。

以上のことから、中間支持方式における固定翼には、共回り防止と混練性能向上の効果があることがわかる。また、中間支持方式の特徴として、内周部で土砂が付着しやすいことが経験的に知られているが、本解析ではそれが可視化された形となった。より混練性能を向上するためには、隔壁近傍および内周部での攪拌性を高めるとともに、半径方向の土砂の移動を促す構造が必要となる。

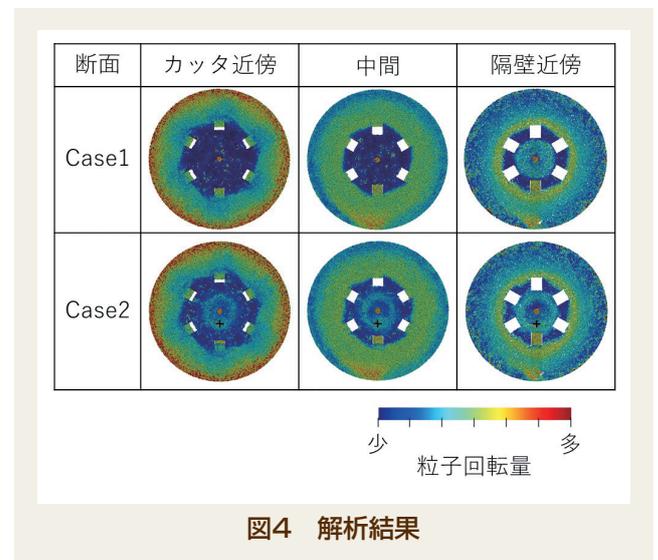


図4 解析結果

## ■ おわりに

個別要素法を用いた土砂解析技術によりシールド掘進機チャンバ内における土砂挙動の評価手法を構築した。チャンバ内の構造による混練性能については、これまで経験則に基づいて検討されていたが、本技術により解析的な構造検討が可能となった。本技術は、今後需要が見込まれる大口径機や特殊断面機の混練性能検討や、設計高度化に活用していく予定である。

### SDGsに貢献する技術

シールド掘進機が作る地下空間は、快適な暮らしを支える社会インフラであり、近年増加傾向にある内水氾濫への対策などにも利用される。土砂挙動の解明によって、より安全かつ効率的な地下空間形成に貢献する。

#### 【問い合わせ先】

日立造船株式会社 開発本部  
技術研究所 基盤技術研究センター  
小野泰明  
Tel : 06-6551-6128  
E-mail : ono\_ya@hitachizosen.co.jp