シールド掘削機チャンバ内の土砂挙動解析

Analysis of Soil Behavior in Earth Pressure Balanced Shield

究*1 次*2 川 有 佐 竹 宏 技術本 部 神戶造船所 小 林 史 生*3

土圧式シールド掘削機の設計や開発には、シールド掘削機チャンバ内の土砂挙動を把握することが重要である。本研究では、 岩や土砂などの不連続物の動的大変形の数値解析が可能な個別要素法を適用し、チャンバ内の土砂挙動や作用力の評価を試みた. その結果,個別要素法適用の妥当性を把握するとともに,シールド口径,排土口位置や撹拌棒などが土砂の撹拌挙動に与える影 響を評価した。

For the design and development of earth pressure balanced shield machines, it is very important to estimate the behavior of soil in the chamber. In this paper, we have tried to apply DEM (Distinct Element Method) which is able to analyse the dynamic and macroscopic behavior of non-continuous matter, to this problem. As a result, we have comfirmed the suitability of DEM and estimated the effects of the shield size, the soil discharge conditions, mixing bars, etc.

1.まえがき

近年、大断面トンネルの増加に伴い、シールド掘削機の大口径 化が推進されている。このような大口径化の対象となるシールド 掘削機は、掘削トルク等の問題により、泥水式シールド掘削機が 主流となってきた、しかしながら、切羽の安定性の面などでメリ ットのある土圧式シールド掘削機についても、大口径化が促進さ れつつある.

このような土圧式シールド掘削機を新規に設計、開発するため には、カッタチャンバ内の土砂の撹拌状況や土圧の適切な評価が 必要である。しかしながら,有限要素法解析等従来の連続体近似 法では土砂等の非連続物質の大変形現象については解析不可能で ある.また近年,流体方程式を用いた数値解析法の適用が検討さ れつつあるが(1)、土砂同士の衝突等が支配的な現象においてはモ デル化が困難である、このため、経験則と実験的な検討を主体と した設計,開発がなされているのが現状である.

これに対し、岩や土砂など非連続的な物質の挙動の解析的なシ ミュレートの手法として、1971年に米ミネソタ大のDr. Cundall により個別要素法(DEM: Distinct Element Method) なる解析 法が提案された(2). 個別要素法は、対象物を多数の個別の要素に 分割し、個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の接触時に作 用、反作用の法則に従う力の伝達が生じるとし、各要素の動力学 的挙動を数値解析する手法である.

本研究では、土圧式シールド掘削機内の土砂の動的大変形挙動 や土圧等を把握できる解析技術を開発することを目標として、現 時点で最も強力なツールになる可能性が高い個別要素法について, その適用性を検討した.

2. 個別要素法の概要

個別要素法に関する原理やアルゴリズムの詳細については、過 去に多くの研究報告がなされているので(2)~(5), ここでは割愛す る. ただ, 個別要素法は, Dr. Cundall により開発されて以来, Dr. Cundall 自身を含む多くの研究者により改造や修正がなされ てきているため、本研究で使用した個別要素法の基本アルゴリズ ムと特徴についてのみ簡単に記す.





今回用いた個別要素法は、オリジナルな Dr. Cundall の手法に 準ずるものであり、その基本アルゴリズムは以下のとおりである。

- ●要素それ自体は剛体粒子である.
- ●要素同士の接触時は、図1に示すように、接触部の見掛けの弾 性ばねと粘性ダッシュポットによって力が伝達される.
- ●各要素は並進(x)及び回転(θ)に関して,以下に示す運動 方程式に従い個別に運動する.

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + kx = 0 \tag{1}$$
$$I\ddot{\theta} + \eta r^2 \dot{\theta} + kr^2 \theta = 0 \tag{2}$$

ただし,

m:要素質量

- r:要素半径
- k: ばね定数
- ŋ:粘性定数

●上記運動方程式及び接触時の力の伝達を微少時間ごとに逐次解 析する.数値解析フローは、図2に示すとおりである.

以上のように、 個別要素法は各要素が個別に運動方程式に従う ため、破壊や分離を伴う非連続体の動的大変形挙動の解析が可能 である.



Behavior of soils in shield chamber

3.解析

3.1 解析モデル

本研究ではチャンバ中心断面を二次的にモデル化した。用いた 解析モデルを図3に解析結果とあわせて示す。モデル条件を表1 に示す。

モデル及び解析条件は以下のとおりである.

- ●実機イメージの再現であり、 φ6.6 m 級の実機土圧式シールド 掘削機をベースに、構造や寸法を設定した.
- ●ただし、各種の影響や効果を検討するため、構造や配置あるいは排土速度などを変化させた。
- ●今回の解析では同一面内の撹拌状況を評価することを主眼とし、 三次元的な土砂の出入りは、排出のみとする。

3.2 要素配列と定数

本研究では、地盤を模擬する個別要素として、表2に示す要素 配列及び解析定数を用いた.これらの設定値については、過去の 研究事例を参考に^{(2)~(5)}、基礎検討を実施して選定した.

3.3 解析手順

本研究では,チャンバ内土砂の撹拌状況を把握するため,以下 の手順でモデルを作成した.

- (1) 要素ランダム発生により、約1.5D (D:シールド径)の地盤を作成。
- (2) 自重解析により安定状態とした後、チャンバ内部のみ切取る.
- (3) 中間ビームや撹拌棒,中心軸を設置するとともに,該当領域の要素を除去.

続いて, 撹拌挙動解析を以下のとおり実施した.

- (4) チャンバを固定とし、中間ビーム、撹拌棒を回転させる.
- (5) 排土する場合には, 排土する領域の要素を設定時間ごとに除去する.
- (6) 時間ステップごとの変形や抵抗力を出力する.

表2 要素寸法と物性値

Element size and property				
	項	目		值,内容
要	素	配	列	ランダム
粒	径		(m)	0.2~0.4
要	素		数	200~1 000
密	度	(kg	/m³)	2.0×10 ³
要素ヤング率 (Pa)				7.5×10 ⁷
ボ	アソ	ン	比	0.3
粘	性	(F	°a∙s)	約1.0×10 ⁵
粘着	「力」		(Pa)	0.0
内部	摩擦角		(°)	30.0

4. 解析結果と考察

4.1 基本解析

まずチャンバ内の撹拌状況を個別要素法によりシミュレート可 能であるか検討するため、直径13.2mの大口径モデルを用いて 基本解析を実施した.

解析結果のうち、変形挙動の経時変化を図3に示す。また、中間ビーム及び撹拌棒に作用する抵抗力を図4に示す。これらの結果から以下のことが分かる。

- (1) 中間ビームや撹拌棒の前方の土砂は、押しのけ、かき上げられ、後方の土砂はすきまに落込むような挙動をし、全体として 撹拌される。
- (2)壁面周辺の土砂は、撹拌棒に削り取られるように撹拌される が、自重によるせん断抵抗が大きくなるかき上げ開始近傍では、 壁面に付着した状態になる。
- (3)シールド外周部に対し、中間ビーム内側の土砂の挙動が小さく、土砂量が減少してくると、かき上げられた土砂が、中間ビーム間を落下していく状況が把握できる。

(4) 中間ビームや撹拌棒の抵抗荷重は、下部からかき上げに移行



- 図4 撹拌抵抗力 チャンバ内撹拌時の中間ビーム及び撹拌棒に作用する回 転方向抵抗力の経時変化の解析結果。 Resistant force of beams
- する辺りで大きくなるが、下部やビーム間等のすきま部で圧密 が生じた場合、局所的に大きな荷重が生じる. 以上の解析結果から、以下のことが評価、考察できる.
- (1) チャンバ内の撹拌状況は、従来から実験などで確認されてい る比較的乾燥した土砂の撹拌状況と一致し、妥当な現象を示し ている.
- (2)中間ビームや撹拌棒に作用する自重土圧や抵抗力の増減する 傾向は、定性的に妥当である。
- (3) すなわち、個別要素法によりチャンバ内の土砂挙動の推定が可能であるとともに、今回採用した物性値やモデル化手法が、 妥当かつ現実的な値であると言える。

ただし、以下の点について、留意しておく必要がある.

- (1) 粘性の高い土砂の壁面付着等については,要素間粘着力の入力も必要である。
- (2) 今回の計算に用いた物性値や要素粒径は、計算時間の短縮を 考慮して決定し、マクロな傾向の評価には十分であった.しか し、抵抗力の定量的評価をするためには、実際に即したモデル 化が必要である.

4.2 具体的問題への展開

以上のように、個別要素法によってシールド掘削機チャンバ内 の土砂挙動推定が可能であることを確認した.ここでは、この解 析コード及びモデル化手法を用いて、具体的なチャンバ内の構造 や施工条件がチャンバ内土砂挙動に与える影響について検討した. 検討した項目は、以下のとおりである.

(1) 口径の影響(口径 6.6, 13.2 m)

- (2) 撹拌棒の効果
- (3) 排土口の位置(下部,中間ビーム内)
- (4) 排土速度の影響
- 以上の解析の結果,明らかになったことは以下のとおりである.
- (1) 口径の影響
 - 口径が異なる場合の中間ビームにかかる抵抗力の違いを図5 に示す.解析結果から以下のことが言える.
 - (a) 口径が2倍になると、土砂の自重によりせん断抵抗が増加



図5 中間ビーム抵抗力(口径の影響) 大口径(φ13.2 m)と中口径(φ 6.6 m)の場合の中間ビームに作用する回転抵抗力の解析結果. Resistant force of beams in case of 13.2 m and 6.6 m in shield diameter



下部及び中間ビーム内側に配置された場合の土砂の変形挙動の解析結果.

Soil behavior in different case of discharge hole

するので、2倍以上の大きな荷重絶対値が生じ、壁面付着力 も大きくなる.

- (b) このため、マクロな挙動は同様であるが、中間ビーム内や 壁面周辺などに挙動の変化が生じる。粘性の大きな地盤では、 その差はより大きくなるものと推定され、口径が土砂の挙動 に影響することが分かる。
- (2) 撹拌棒の効果

撹拌棒がある場合とない場合のモデルについて解析を実施し, 以下のことが明らかとなった.

- (a) 図は省略したが, 撹拌棒がない場合, かき上げ部チャンバ 壁面の土砂は側壁に固まり自重で落下するなど, 前項に記し た撹拌棒のある場合と比べ, 挙動が大きく異なる.
- (b) すなわち、チャンバ内土砂の撹拌において、撹拌棒の影響 は非常に大きく、土砂を効果的に撹拌する構造を設計するた めには、これら撹拌棒の最適配置条件を詰めていく必要のあ ることが分かる。
- (3) 排土口の位置

排土口をシールドチャンバの下部に設けた場合と中間ビーム 内に設けた場合の解析を実施した。図6には、各条件での土砂 の挙動を示す。これらの結果から以下のことが明らかとなった。 (a) 排土口の位置が下部にある場合、中間ビーム内に多少のよ どみ点が生じ、中間ビーム内側に排土口を設けると、チャン

三菱重工技報 Vol. 32 No. 4 (1995-7)



図7 変形挙動軌跡と抵抗力(施工条件の影響) 回転速度と排土速度の組合せが異なる場合の土砂の変形挙動の軌跡と中間ビーム抵抗力の経時変化の解析結果.

Soil behavior and resistant force of beam in different case of executive condition

バ下部に大きな土砂だまりが生じている.

- (b) これらの土砂だまりやよどみ点は、中間ビームや撹拌棒が 通過する際の大きな抵抗力となる、土砂の粘性などによって、 装置全体のトルクなどに大きな影響を与える可能性があり、 今後詳細に検討が必要である。
- (4) 排土速度の影響

回転速度及び排土速度などの施工条件が土砂挙動に与える影響について検討した。変形挙動軌跡及び中間ビーム作用力を 図7に示す.これらの結果から以下のことが言える。

- (a) カッタ回転数に対して排土量が大きいと, 撹拌棒の到達ま でにチャンバ内の持上げ部周辺に土砂だまりが生じる.
- (b) 排土量に対し掘削(撹拌)速度が大きくなると、同心円状の軌跡を描き十分な撹拌が可能で、土砂の抵抗力も低減する. ただし、中間ビーム内部土砂が自転した状態となり排土が悪くなる.
- (c) このように,施工管理が装置負荷に関係することが分かる. 装置の構造の設計に当たっては,施工条件をも考慮した最適 化を図っていくことが重要である.

5.まとめ

本研究では、従来解析的な評価が困難であったシールド掘削機 チャンバ内の土砂挙動を解析的に評価する技術として、個別要素 法の適用を試みた.このため、実際のシールド機を模擬した二次 元モデルを作成し、各種の影響因子をパラメータに、解析的な検 討を実施した.その結果以下のことが明らかになった.

- (1) 個別要素法でシールドチャンバ内の土砂挙動をビジュアルに 評価可能であること及び結果の妥当性を確認した.
- (2)具体的な問題への展開を実施し、口径、撹拌棒や排土口の位置などが土砂挙動に与える影響を評価するとともに、実機の設計上で重要なアイテムであることを把握した。
- (3) 個別要素法が、実機を設計、開発していく上での事前検討ツ ールとして適用できることが明らかとなった.

今後、今回の事例解析でケーススタディを実施した影響因子の 詳細な分析を引続き実施していくとともに、切羽からの土砂要素 の追加やカッタヘッドとの摩擦抵抗の評価など、より詳細で具体 的な構造や条件についても検討を行うことにより、実際のシール ド機の設計や開発の支援ツールとして適用していく予定である.

参考文献

- (1) 上野敏光ほか、土圧式シールドのチャンバ内における撹拌効
 果の数値解析、建設の機械化(1994-5) p.33~37
- (2) Cundall P.A., A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rocksystem, Proc. Symp. ISRM, Nancy, France, 2, (1971) p.129~136
- (3) 木山英郎ほか,岩質粒状体の重力流動に関する研究,鳥取大 学工学部土質・基礎工学報告 No.1 (1985-5)
- (4) 目黒公郎、コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用、
 コンクリート工学 Vol.31 No.5 (1993-5) p.5~17
- (5) 中瀬仁ほか、平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用、
 土木学会論文集 No.454/III-20 (1992-9) p.55~61

三菱重工技報 Vol. 32 No. 4 (1995-7)