

シールドチャンバ内における掘削土砂流動解析（その1）

—数値シミュレーションによる流動状況の検討—

上野 敏光 山下 幸夫
藤原 紀夫

Analysis of Soil Flow in Shield Chamber (Part 1)

—Study on State of Flow by Numerical Simulations—

Toshimitsu Ueno Yukio Yamashita
Toshio Fujiwara

Abstract

Closed type shield machines are being used of recent in tunneling work in urban areas. However, the states of soil flows in shield chambers are not known very well. It is important to understand how to mix excavated soil and additive materials and how to make them flow in the shield chamber of a closed type machine in order to arrive at the best design of a shield machine with large cross section and deformed cross section. Therefore, the authors simulated numerically the flow states of soil for the agitation problems of two-phase mixture flows.

The authors research in this study the effect of agitation caused by an agitator, the properties of materials, and variations in the flow state.

概要

最近のシールド工事では、切羽の安定性に優れた密閉型シールドが主流として使用されている。今後の大深度化、大断面化、さらには複合断面化に伴ってその需要はますます高まると考えられる。ところが、シールドチャンバ内において掘削土砂と添加材がどのように混合・攪拌されているかについては未だに不明のままであり、シールドマシンの最適設計のためにも流動状況を正確に把握する必要がある。

そこで、土圧式と泥水式および複合断面シールドに対して数値シミュレーションを行い、攪拌翼やアジテータの効果およびそれらを含めた流動状況について検討した。解析の結果、① 攪拌翼の効果、② アジテータ周辺の流動挙動、③ 各シールドタイプの流動状況の特徴などが明らかになった。

1. はじめに

シールド工法は、切羽の安定性に優れた密閉型タイプの開発に伴って、悪条件の地盤に対しても安全に施工を進められるようになった。最近の都市トンネル工事においては、その大部分が密閉型シールドを用いて施工されているのが現状である。今後、シールド工事の大深度化への要望および掘削断面の有効利用を目的とした大断面化・複合断面化に向けて、この型式の需要がますます高まることが予想される。

ところが、現時点では密閉型シールドのチャンバ内における土砂の流動経路や攪拌翼とアジテータで攪拌されたあとの流動状況は解明されていない。今後、シールドマシンの多様化が進めば、最適設計を行うことはさらに重要なこととなる。そのため、アジテータの効果も含めて、これらの流動状況を解明することが急務となる。

そこで、大断面円形シールドと複合断面シールドを対象として数値シミュレーションを行った。ここでは土砂

の流動状況や添加材との混合・攪拌状況および攪拌翼やアジテータの効果について検討した結果について以下に述べる。

2. 移動境界問題とその解析手法

シールド掘進時の土砂の流入・流出を含めたチャンバ内の流動状況を解析するに当たって、流動特性を評価するため土砂を粘性流体として取扱った。従って、一般の流体解析で用いられているナビエ・ストークスの方程式と連続の式を基礎方程式とした有限差分法によって離散化を行った。

ただし、シールドマシンへの土砂の流入が、カッターフェイスの回転を伴ったものであること、およびチャンバ内での土砂の流動状況がアジテータによって攪拌されるために回転を伴った挙動となることから、これらの境界部分ではいわゆる移動境界問題となり一般的な手法では解析が不可能となる。また、アジテータなどは複雑な物体形状をしており、これらもできるかぎり詳細にモデ

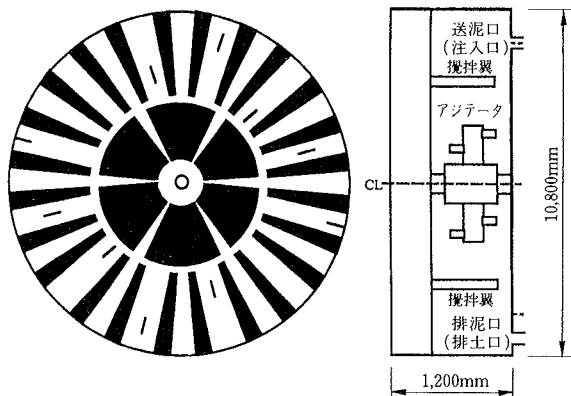


図-1 カッターフェイスおよびチャンパのモデル (大断面)

表-1 物性値 (大断面)

材料	密度(kg/m ³)	粘度(Pa.S)	流体区分
気泡材	200	0.2	Newton流体
泥水	1,100	0.025	Newton流体
地山	1,600	$\mu=3.0$	Bingham流体

※ $\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}$, $\mu = (\tau_y / \dot{\gamma}) + \mu$ ただし $\tau_y = 500\text{Pa}$

表-2 流入場所と流入速度の関係

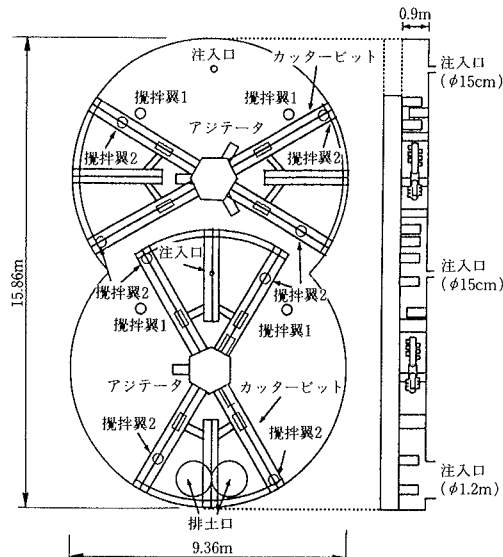
流入場所 (mm)	流入速度 (m/s)	
内側スリット (6箇所)	800~1,800	-2.72×10^{-4}
	1,800~2,400	-3.99×10^{-4}
外側スリット (12箇所)	2,800~3,710	-4.70×10^{-4}
	3,710~4,490	-4.60×10^{-4}
	4,490~5,400	-4.63×10^{-4}
泥水型シールド注入口	1.10	
土圧型シールド注入口	1.50×10^{-1}	

ル化しなければならない。そこで、この二つの問題に対処するため、竹田らが提案した解析手法^{1),2)}を適用した。この方法の第一の特徴は修正反変速度成分 (修正反変速度成分とは、計算空間の ξ, η, ζ が一定の面に垂直な速度成分のことである) を用いたことである。これによって時間精度を2次に保ったままで、従来では不可能であった座標に特異点を持つ場合も一般座標に拡張できるようになる。修正反変速度成分への変換は、次項を基礎方程式の各項に掛ければよい。

$$J(\partial \xi_i / \partial x_i) |\Delta \xi_i|^{-1} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、J: ヤコビアン, ξ : 計算空間座標, x: 物理空間座標

もう一つの特徴は、マルチブロック法への適用を可能にしたことである。ここでマルチブロック法とは、計算領域を幾つかの小ブロックに分け、各ブロックごとに独立してメッシュ分割し、それぞれに対して流れの解析を行う方法である。この手法はBFC (物体適合座標) 系の座標系と組み合わせることにより、複雑な物体形状への対応や格子の分解能を部分的に高めることができ、攪拌槽



攪拌翼1は、固定 (隔壁に取付けられている。) 攪拌翼2は、移動 (カッタービットに取付けられている。)

図-2 カッターフェイスおよびチャンパのモデル (複合断面)

表-3 物性値 (複合断面)

材料	密度(kg/m ³)	降伏値(Pa)	粘度(Pa.S)	流体区分
気泡材	200	10	$\mu=1.5$	Bingham流体
地山	1,600	500	$\mu=3.0$	Bingham流体

※ $\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}$, $\mu = (\tau_y / \dot{\gamma}) + \mu$ ただし τ_y は降伏値

のように複雑な流れ場を有するものも解析できるようになる。従って、シールドマシンのような特殊な攪拌槽と見なせるものについても解析が可能となる。

3. 解析ケースおよび解析条件

3.1 円形大断面シールドの解析

円形大断面シールド (直径 10.8 m) では、攪拌翼やアジテータが土砂の攪拌・混合におよぼす影響および泥水式と土圧式のシールドマシンの土砂の流動経路や流動状況について検討するため、以下に示す3ケースについて解析を行った。

- ① アジテータ付きの土圧式シールド
- ② アジテータの無い土圧式シールド
- ③ アジテータ付きの泥水式シールド

図-1 に円形大断面シールドのカッターフェイスおよびチャンパをモデル化したものを示す。解析条件として、カッターフェイスには反時計まわりに 0.5 r.p.m の速度をあたえ、アジテータにはフェイスと反対方向に 1.5 r.p.m の速度をあたえた。攪拌翼はフェイス部に取付けられている。

土砂と添加材の物性値を表-1 に示す。土砂は粘性流体として扱っている。また、表-2 には流入・流出境界の条件を示した。解析ではチャンパ内が常に掘削土砂と添加材で充填された状態であり、総流入量と流出量はバランスしているものと仮定した。

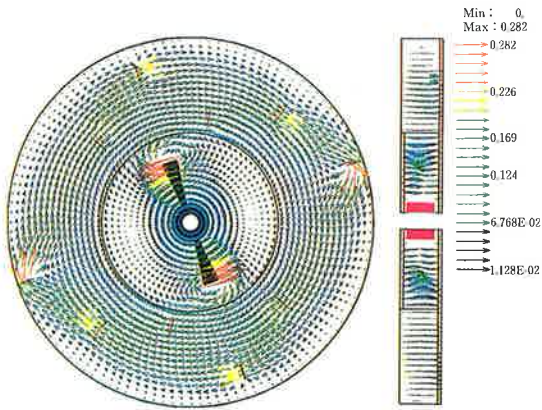


図-3 アジテータの有る土圧式シールドの流速ベクトル分布

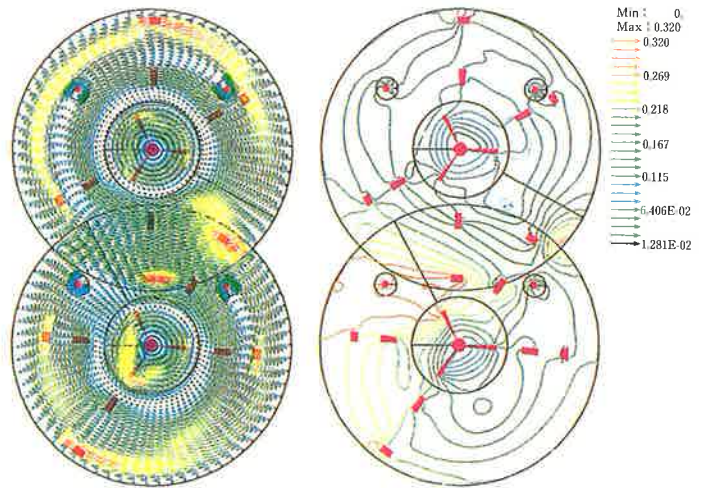


図-4 複合断面シールドの流速ベクトル分布と圧力コンター

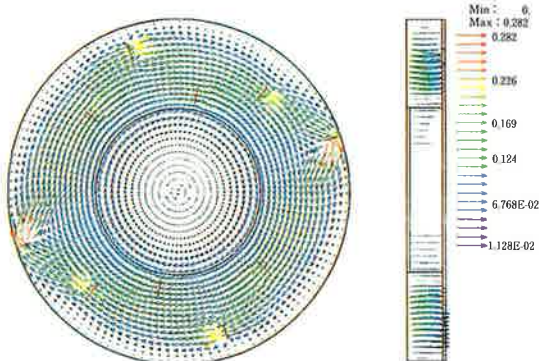


図-5 アジテータのない土圧式シールドの流速ベクトル分布

3.2 複合断面シールドの解析

シールドマシンの断面形状が複合断面の場合のチャンバ内における土砂の流動状況や混合・攪拌状況について検討するため、縦型二連形シールドについて解析を行った。

図-2 に縦型二連形シールドのカッターフェイスおよびチャンバをモデル化したものを示す。それぞれのカッターフェイスには反対方向に 0.7 r.p.m の速度を与え、アジテータには各カッターと反対方向に 1.9 r.p.m の速度を与えた。攪拌翼はカッターに取付けられた移動型のものと同隔壁部に取付けられた固定型のもの 2 種類とした。

土砂と添加材の物性値を表-3 に示す。その他の条件については円形大断面の場合と同様にした。

4. 解析結果および考察

4.1 攪拌翼による混合・攪拌への影響

攪拌翼は解析の全ケースにあるので、それらについて順次検討することとする。土圧式の流速ベクトルを図-3 に示す。図中の赤線が攪拌翼の配置場所である。外壁近くに配置するほど攪拌翼によるかきまぜの効果が大きくなっている。このことは、泥水式についても同様である。複合断面シールドの流速ベクトルを図-4 に示した。

移動型の攪拌翼では、土圧式の場合と同様に外壁近辺で土砂のかきまぜ効果が大きくなっている。一方、固定型の攪拌翼では移動型の攪拌翼とは逆に流速が低減されていることが分かる。固定型の攪拌翼は反対方向への攪拌を促進することで攪拌効率を相対的に上げることを目的にしたものであり、このことを考慮すると、これを取付けることで全体的に攪拌効果は大きくなっていることが理解される。

4.2 アジテータによる混合・攪拌への影響

土圧式の解析結果からアジテータの効果を検討する。図-3 がアジテータが有る場合で、図-5 は無い場合である。アジテータが無い場合の中心付近の流速ベクトルから土砂の流動速度が極めて小さいことが分かる。縦断面の流速ベクトルを比較すると特にこのことがよく現れている。一方、アジテータを付けると羽根の先端あたりを中心に渦が発生しており、この渦がアジテータの回転と共に移動するため、中心付近でも土砂がよく流動すると考えられる。従って、アジテータによる攪拌効果は大きいと言える。

次に、泥水式の場合と比較する。図-6 から分かるように渦の大きさが違っており、粘性が大きいほうがアジテータによる攪拌効果も大きくなっている。また、これらの渦の大きさからアジテータによって攪拌される領域が把握できる。これらの結果より、大断面および異形断面などの場合のアジテータの最適な配置を検討することが可能である。

また、羽根の枚数については、複合断面を 3 枚羽根でモデル化したのが、粘性やアジテータの回転速度の違いが影響しているものの、2 枚羽根では渦がアジテータの回転に伴って移動することによって全体を攪拌するような挙動となっている。これに対して、3 枚羽根では中心部においても旋回流の流向と反対向きにある程度の速度で流動しており、2 枚羽根より攪拌効果ははるかに大きいことが確認できる。

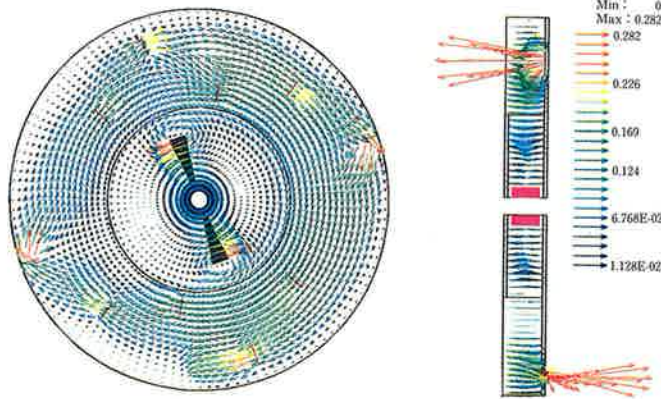


図-6 泥水式シールドの流速ベクトル分布

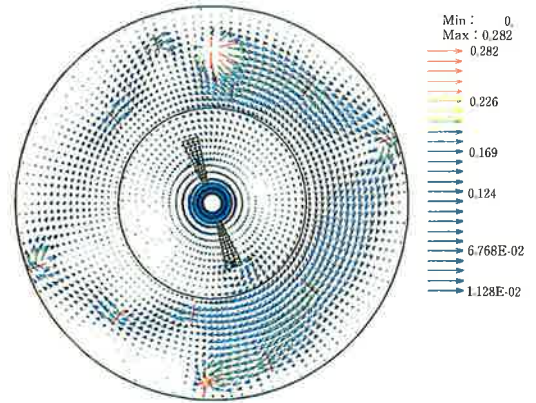


図-7 隔壁近くの流速ベクトル分布 (泥水式)

4.3 断面形状の違いとその流動状況の特徴

図-3, 図-4 から断面形状の違いによる流動状況の特徴を検討する。複合断面では上下断面の接合部で土砂の流動が阻害される可能性があると考えられる。しかし、今回の解析では、土砂が流動されずにその場に留まっているような現象は認められなかった。ただし、圧力コンターでは、土砂が接合部の壁面にぶつかるところで動圧が高くなっており、特に攪拌翼が近くにあるとかなりの高圧になることが予想され、設計において注意を要すると思われる。

4.4 各型式のシールドマシンにおける流動状況の特徴

密閉型のシールドマシンには土圧式と泥水式があり、円形断面に関して流速ベクトルで表示した図-3および図-5～図-7より、それぞれの土砂の流動状況について考察した。チャンバ内流体の粘性の違いによる影響が多少あるが、どちらの形式でもチャンバ外壁周辺では流速が遅くなっている。これは壁面での摩擦抵抗によるものである。また、アジテータの中心軸付近でも、流速が遅くなる現象が認められるが、掘削土砂の粘性によっては、この部分で付着が生じ、デッドスペースを形成するため注意が必要である。

次に全体的な流れについて述べると、土圧式では攪拌翼の配置状況を考慮すると流速ベクトルがほぼ対称になっているが、泥水式では攪拌翼の配置が同じであるにもかかわらず、送泥口を過ぎたあたりから流速が急増し、排泥口を過ぎると一気に流速が減少して、明らかに流速ベクトルが非対称となり流速分布に偏りが生じている。隔壁近くを示した図-7では、この現象はさらに顕著に現れている。この原因は、泥水式シールドがチャンバ内で大量の泥水を循環させ、土圧とのバランスを取りながら掘進および土砂輸送を行う機構となっているため、送泥・排泥口付近での流入・流出の影響がチャンバ内全体の土砂流動へも大きく作用していると考えられる。このことは、チャンバの縦断面の流速ベクトルからも認められる。

5. まとめ

ここでは、シールドマシンのチャンバ内における土砂の混合・攪拌を含めた全体的な流動状況の解明を目的として、数値シミュレーションを試みた。流動特性の評価に重点を置いたため、土砂の物性値などについて今後さらに検討を要するところはあるが、チャンバ内の土砂の流動挙動の全容解明への糸口をつかむことができたと考えている。

今回の解析で得られた結果について要約すると以下のとおりである。

- ① 攪拌翼は、外壁の近くに配置するほどその効果が大きくなる。
- ② アジテータを取付けることによりチャンバ内では、土砂がよく流動するようになる。また、粘性が大きくなるほどアジテータによる流動化の促進効果も大きくなる。
- ③ 泥水式シールドでは、チャンバ内において激しい泥水循環が行われるため、土砂の流動にたいへん大きな影響を及ぼしている。

この解析コードにおいて、付着現象まで追跡することは現段階では不可能であるが、このことも含め残された課題を解決していけば、最終的にはシールドマシンの最適設計にも適用できるのではないかと考えている。また、現在は数値シミュレーションしか行っていないが、これらの解析の整合性を調べるためにも、今後は検証実験も含めてさらに検討を加えていきたいと考えている。

謝 辞

この解析を行うにあたり、(株)リクルート科学システム事業部の植崎邦男氏にご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹田 宏：非圧縮ナビエ・ストークス方程式に対する $O(\Delta t^2)$ 差分スキーム, 第2回 数値流体力学講演論文集, p. 251~254, (1988)
- 2) 竹田 宏, 徐 錦貴：マルチ・ブロック法による非圧縮流れの差分法, 第3回 数値流体力学講演論文集, p. 499~502, (1989)