土圧式シールドにおける添加材の 注入・拡散状況の予測方法の研究

杉山 博一1・岩井 俊之2・高梨 和光3・安井 克豊4

1正会員	清水建設株式会社	技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)			
E-mail: sugiyama.h@shimz.co.jp					
2正会員	清水建設株式会社	技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17) E-mail: kuwata@shimz.co.jp			
3正会員	清水建設株式会社	土木技術本部(〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1) E-mail: w.takanashi@shimz.co.jp			
4正会員	清水建設株式会社	土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1) E-mail: kyasui@shimz.co.jp			

土圧式シールドのチャンバー内塑性流動性の管理を高度化する目的で、チャンバー内の撹拌や添加材の 拡散状況を予測、評価できる手法を検討した.まず最初に、チャンバー内の撹拌状態が観察できるように 相似則を適用した模型実験を行い、撹拌に伴う圧力変動や添加材の注入・拡散状況を確認した.次に、チ ャンバー内の撹拌状況を予測する手法として粒子法解析の検証を行った.解析では粘性パラメータの設定 方法を検討するため、4種類の粘性モデルで解析し、模型実験の結果と比較して評価した.その結果、従 来の検討で仮定してきたビンガム流体では実験時の圧力変動や添加材の注入状況を再現できなかったが、 低せん断速度領域で高粘性流体として取り扱える粘性モデルを使えば実験結果を再現できることが分かっ た.

Key Words : Earth Pressure Balanced shield, soil mixing, plastic flow, Moving Particle Semi-implicit method, viscosity properties

1. はじめに

土圧式シールドでは、掘削時に地盤条件に合わせて添 加材を適量注入して掘削土を塑性流動化させ、切羽土圧 を適切に制御するとともに、掘削土を円滑に坑内に取り 込むことを基本としている.近年、施工管理の合理化を 目的にチャンバー内掘削土の塑性流動状態を評価して可 視化する技術が開発されてきているが¹⁰、本技術は評価 するまでであり、今後はその評価結果をもとに添加材の 注入管理に反映できるようになることが望ましい.しか し現状では、掘削土の流動状態や添加材の注入・拡散状 況は不明であるため、合理的な注入管理方法を提案する までには至っていない.

筆者らはこれまでに添加材の注入・撹拌状況を実験的, および解析的に評価する方法をそれぞれ検討してきた. 実験的検討では,実験中の撹拌状況を観察できるように シールドチャンバーの模型を作成し,様々な条件で撹拌 実験を行ってきた³.また,将来の様々な案件にも対応 できるように解析手法についても検討してきた^{3,4}. 解 析ツールとしては粒子法(Moving Particle Semi-implicit method,以降MPS解析と略す)に着目し,その基礎的な 検証は行ってきているが,まだ課題も多く残されている. そこで本研究では,添加材の注入・拡散を予測する方 法として前述の模型実験を実施するとともに,MPS解析 の適用方法について検討した.

2. 添加材注入を模擬した模型実験

実際のシールドマシンや掘削土を用いて添加材の拡散 状況を観察することはほぼ不可能である.そこで,チャ ンバー内泥土の撹拌と,添加材の拡散状況を模擬できる ように流体実験の相似則を適用した模型実験を行った. 模型実験では模擬添加材の注入位置等を変えて拡散状況 を観察した.



図-1 1/10 チャンバー模型 (左;全体正面図,右;隔壁部)

(1) 模型実験の相似則

本模型実験では、流体実験の相似則のうち、撹拌槽の レイノルズ数が同等となるように各種パラメータを調整 した. 撹拌槽のレイノルズ数は次の式で示されている⁹.

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\rho}$$
(1)

ここに、 ρ ;流体の密度(kg/m³)、N;回転速度(ps)、D; 直径(m)、 μ ;流体の粘度(Pas)

実機の1/10サイズのチャンバー模型を作り、カッター の回転速度を実機と合致させた実験を行うと想定した上 で、チャンバー内の撹拌・拡散状況が観察できる模擬泥 土を検討した結果、高吸水性ポリマーを水に溶かしたも のが適切であると考えた.

(2) チャンバー模型装置

図-1にチャンバー模型装置の概要を示す.この装置は、 ある案件のシールドマシン・チャンバー部分を1/10に縮 小して再現したものである.実験時のカッターの回転数 は0.5pm,アジテータの回転数は4pmに設定されている. また、隔壁には図示した位置に注入口が4か所と、圧力 計が12個設置されており、撹拌に伴う圧力変動が計測で きる.

(3) 模擬添加材の注入方法

実験では、図-1に示した注入口4か所のいずれか1か所 から模擬添加材を注入した.今回の実験では、模擬添加 材として水性絵具で着色した水を用いた.したがって、 密度や粘性等の物性はほぼ水と同等である.ちなみに注 入口の位置は、カッター外周(半径78cm)、カッター 中間(半径40cm)、隔壁外周(中心から65cm)、隔壁 内周(中心から20cm)の4か所である.カッタースポー クの注入口については、カッタースポーク内(空洞)に 模擬添加材を充填したビニール製バッグを挿入し、遠隔 操作によってポンプを作動させて注入した.流量はいず れも約300cm³/分であり、この流量は実機換算で0.3m³/分

表-1 模擬泥土の基本配合(ILあたり)

配合名	高吸水性 ポリマー (g)	水 (g)
AQ04	4	1,000
AQ06	6	1,000

※ただし、AQ04は単一流体の撹拌実験でのみ使用

表-2 実験ケース

実験	配合名	模擬添加材 の注入位置	カッター 回転方向	アジテータ
#1	A006	カッター外周	左	右
#2	AQ06	カッター中間	左	右
#3 AQ06		隔壁外周	左	右
#4	AQ06	隔壁内周	左	右

※回転方向は切羽側から見た方向(図-1と同じ)



図-2 ボール測定システムの治具

に相当する.

(4) 実験条件

表-1に模擬泥土の基本配合を示す.また,表-2に実験 ケースを示す.なお,AQ04はこれまでに実施した単一 流体の撹拌実験で用いたものであり,本報告に示す模擬 添加材の注入実験では使っていない.

(5) 模擬泥土の粘性測定試験

撹拌実験に先立ち,模擬泥土の粘性を高性能レオメー ター(Anton Par 社製 MCR301)により計測した.この試 験で得られた結果(粘性定数)については,後述する解 析パラメータに反映させる.

測定治具は、一般的には共軸二重円筒型やコーンプレ ート等が用いられることが多いが、模擬泥土(高吸水性 ポリマー)は水を含むとやや粒が大きくなり、それらが



表-3 チャンバー模型による注入実験の結果(カッターはいずれも左回転)

狭隘な測定部に入らなかったために良好な測定結果が得られなかった.そこで今回はボール測定システムを用いた.図-2にボール測定システムの治具を示す.なお,測定方法については4章で述べる.

(5) チャンバー模型への注入実験結果

チャンバー模型へ模擬添加材を注入した結果を時間経 過ごとに**表-3**に示す.

まず,カッター最外周部から注入したケースでは,実 験装置のリング状側壁部と模擬泥土の摩擦抵抗によって 徐々に拡散していることが分かる.一方,中間部から注 入した場合は模擬泥土と前面のアクリルガラスに摩擦抵 抗がないこともありカッターと供回りし,ほとんど拡散 しない結果であった.

一方,隔壁外周から注入したケースはカッターの回転 より若干遅れはあるものの,注入口を半径とする円周上 に拡散していった.また,隔壁内周から注入したケース は,隔壁外周から注入した実験の後に朱色の水を注入し たものであるが,アジテータにより効果的に撹拌・拡散 されていた.

3. 粒子法(MPS解析)によるチャンバー内流動解析

シールドマシンは現場案件ごとにチャンバーの形状が 異なるため,掘削土や添加材の撹拌・拡散状況を案件ご とに実験で検討することは合理的でない.将来的に解析 によって予測できるようになれば,チャンバー内の撹拌 翼や固定翼等の配置計画や,添加材の注入位置,速度を 変えた効果を机上で検討できるようになる.筆者らはこ れまで MPS 解析に着目し,その適用方法について検討 してきた.今回はこれまでの検討で残されていた課題を 含め,添加材の拡散を再現する方法について検討した.

(1) MPS解析の概要

MPS解析には市販ソフトのParticleworksを用いた. 図-3 に坑内側から見た解析用形状モデル(ポリゴン壁)を示 す.ただし、内部が見えるように隔壁部の形状モデルの み消去して示している.

(2) 解析条件

基本的な解析条件として,解析時間等を勘案して粒子 径を2cmとした.その結果,総粒子数は5.5万個前後とな



図-3 解析用形状モデル

表-4	解析の基本条件
<u> </u>	

計算方法	陰解法
陰解法パラメータβ	1.0
陰解法パラメータγ	1.0
形状モデル	ポリゴン壁
粒子サイズr	2 (cm)
粒子数n	約 55,000(個)
密度p	$1000 (\text{kg/m}^3)$
重力加速度 g	9.8 (m/s ²)
初期時間刻み Δt	0.001 (s)

る. 模擬泥土,および添加材を模擬した粒子には,それ ぞれ適宜粘性等パラメータを与えて解析を行った. なお, 粘性パラメータの設定方法については後述する.

4. 解析的評価方法の検討

(1) 模擬泥土の粘性測定試験について

図-4に2章(5)で示した粘性測定試験結果としてせん断 速度とせん断応力の関係を,図-5に図-4の測定点間の傾 きである塑性粘度の関係を示す.なお,図中の線につい てはそれらを近似したものであり,後に詳述する.

前報⁹を含めこれまでの検討では,粘性測定試験においてせん断速度の設定範囲を1~100(1/s)に設定して計測した結果を用いてきた.その際,低せん断速度領域での変動や,AQ06では高せん断速度領域(40~100)を無視してビンガム流体と仮定して粘性定数を設定した.その値を用いて撹拌シミュレーションを行ったところ,AQ04では実験と解析で圧力の変動状況は概ね合致していたが,AQ06では実験結果の半分ほどの振幅しか得られず課題を残していた.そこで本研究では,低せん断速度領域の粘性も評価できるようにせん断速度範囲を0.1



図-4 模擬泥土のせん断速度とせん断応力の関係





~100に広げて再計測した.図-4,5のAQ06はその結果 を示した.図-5からも分かるように、低せん断速度領域 0.1~1(1/s)で高い塑性粘度となる流体であり、これらを 考慮できる粘性モデルで解析する必要があることが分か った.

(2) 解析に用いた粘性モデル

前述の粘性測定試験の結果より,解析の粘性モデルとしては従来の[A]ビンガム流体に加え,[B]パワーローモデルを利用した.

[A]ビンガム流体は、図-4に示したように、せん断速 度とせん断応力の関係で定義するものであり、前述のと おりせん断速度1~40(1/s)の範囲のデータを用いて次式 (2)で直線近似して定義した.

$$\tau = 2.0\dot{\gamma} + 70\tag{2}$$

ここで, τはせん断応力 (Pa), γはせん断速度 (1/s)

一方, [B]パワーローモデルは, 図-5に示したように, せん断速度と塑性粘度の関係で定義したものであり,計 測値を次式(3)で近似して定義したものである.



表-5 粘性モデルの違いによる解析結果の違い

注1) 流速分布とせん断速度分布は坑内側から切羽方向をみた図で,撹拌開始60秒後の結果. 注2) 注入を模擬した解析結果は,正面からみてカッターが左14回転した時点の結果. 注3) 注入粒子の凡例:赤;カッター外周,水;カッター中間,黄緑;カッター中央,黄;隔壁外周,橙;隔壁内周

(3)

 $\eta = 90.19 \dot{\gamma}^{-0.911}$

ここで, ηは塑性粘度 (Pas), γはせん断速度 (1/s)

さらに、 [B]のパワーローモデルで計算される粘性 η か ら計算される動粘性係数($v = \eta/\rho$)に一律の値(0.25, 0.5, 1.0, 10.0)を加算してパラメータスタディ[C]を行った.

(3) 解析結果の検証

表-5に3種類の粘性モデルで計算した結果を示す.なお,[C]は前述のパラメータスタディで動粘性係数に一律1を加算したときの結果を示した.なお,圧力変動,流速分布,せん断速度分布は添加材の注入は模擬していない.また,流速分布とせん断速度分布の絵では,チャンバー奥側の粒子の色も見えるように着色設定で2割ほど透過して表示している.

a) 圧力変動

実験結果(青線)と解析結果(赤線)を比較すると、

[A]は実験値の約半分程度の変動であるのに対し,[B]は [A]とほぼ同等かそれ以下に変動が小さくなってしまった.一方,[C]では流体の粘度を高くする操作を加える ことによって実験結果にほぼ近い変動幅となった.

b) 流速分布

[B]と[C]はカッター外周部の流体がほぼカッター最外 周部の速度0.042(m/s)と近く、中央に近づくにつれて流速 が小さくなっており、実験で目視観察された流動状況に 近い.それに対し、[A]でもその傾向はみられるが、[B] や[C]に比べて平均化された値となっている.

c) せん断速度分布

実験ではせん断速度分布を観察,評価することができ ていないため粘性モデルの評価はできないが,いずれの 粘性モデルで計算してもアジテータや撹拌翼付近以外で はせん断速度が1よりも小さく,そのせん断速度領域で の粘性評価が重要であることが再認識できた.

d) 注入を模擬した解析結果

この図はシールド正面から見たものであり、カッター が左1/4回転した時点の模擬添加材の粒子位置のみを表 示した.1/4回転時の結果を示した理由として、高粘性 流体では膨大な解析時間を要したことと、この時点で解 析結果に差が表れていることが挙げられる.

解析の結果, [A]と[B]ではカッター中心部や中間部から注入した粒子が流れてしまっているのに対し, [C]ではほぼ注入位置の軌跡に沿った位置にいることが分かる. このことからも,合理的な粘性パラメータを設定することによって,実験結果により近い状態を再現できるようになった.

5. まとめと今後の課題

チャンバー内掘削土の撹拌状況や、添加材の注入状況 が解析的に予測検討できるようになることを目的として、 まず相似則を適用した模型実験を行い、実験結果をMPS 解析で再現しながら、粘性モデルとパラメータの設定方 法検討した.

その結果,従来用いてきた粘性モデル(ビンガム流体) では低せん断速度領域で高粘度となる流体の挙動が考慮 されておらず,本問題に適用するのは適切でないと思わ れる.一方,低せん断速度領域での挙動を考慮できる粘 性モデルとしてパワーローモデルを適用して解析を行う とともに、粘度を調整することによって実験結果に近い 再現が可能となった.

実機に適用するまでには、まだ多くの技術的課題を抱 えているが、今後さらに解析方法を検討して、合理的な 撹拌機構や添加材注入方法等の提案につなげていきたい.

謝辞:MPS解析の実施に際してプロメテック・ソフトウ ェア(株)殿に多大な協力を頂いた.ここに記して謝意 を表す.

参考文献

- 例えば、杉山、磯部、塩出、藤井、副島: チャンバ 一内塑性流動性可視化システムの大断面シールド工 事への適用と考察、トンネル工学報告集、第 25 巻、 II-6、2015年11月
- 2) 杉山他:撹拌条件を考慮したチャンバー内塑性流動 性評価方法(その2)実機での評価方法に関する検 討,土木学会第70回年次学術講演会概要集,VI-061, 2015年9月
- 高梨他: チャンバー内攪拌シミュレーションへの MPS 解析の適用性, 土木学会第 70 回年次学術講演会 概要集, VI-062, 2015年9月
- 4) 杉山,岩井,高梨,安井:チャンバー内撹拌シミュ レーションへの MPS 解析の適用性(その2),土木 学会第71回年次学術講演会,III-438,2016年9月
- 5) 化学工学会:化学便覧(改訂六版), p.424, 丸善, 1999年

(2016.8.5受付)

STUDY FOR REPLODUCING METHOD OF ADDITIVE INJECTION AND ITS DIFFUSION IN CUTTING CHAMBER OF THE EPB SHIELD

Hirokazu SUGIYAMA, Toshiyuki IWAI, Wako TAKANASHI and Katsutoyo YASUI

In order to control the condition of excavated soil in cutting chamber of the Earth Pressure Balanced shield, it is important to understand mixing behavior of excavated soil and diffusion of injected additive, and to be able to predict them by numerical analysis. The mixing behavior in cutting chamber was obtained by executing a downscaled model test. The model soil was made by super absorbent polymere, so that the similarity rule could be satisfied. The pressure fluctuation during mixing test was measured by pressure gauges, and the diffusion of injected additive was observed by video recording. The test results were reproduced by the Multi Particle Semi-implicit method. Three types of viscosity models were tried to apply in the analysis. The parameters of each models were determined from mesurment test using a rheometer. As a result, if the viscosity parameters were taken the behavior under low shear velocity into the consideration, mixing behavior could be reproduced better than the former study.