

## MPS 法によるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価方法に関する研究

Study on Evaluation Method of Muck Fluidity Inside Cutting Chamber of the  
Earth Pressure Balanced Shield by Moving Particle Semi-implicit Method

安井克豊 Katsutoyo YASUI (清水建設(株)土木技術本部)  
 杉山博一 Hirokazu SUGIYAMA (清水建設(株)技術研究所)  
 竹下祐二 Yuji TAKESHITA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

泥土圧シールド工事に於いて切羽の安定を図るためには、カッターチャンバー内の泥土を塑性流動化させる必要がある。筆者らは、カッターチャンバー内における泥土の攪拌に伴う切羽土圧の変動から塑性流動性を評価・可視化するシステムを開発し、実務への適用性を検討している。本稿では、大口径シールド工事への適用性の向上を目的として、MPS 法による流動解析を実施し、攪拌条件が異なる位置に土圧計が設置された場合においてもチャンバー内泥土の塑性流動性を適切に評価できるシステムを考案したので、その概要と展望について述べる。

キーワード：泥土圧シールド，切羽安定，カッターチャンバー，塑性流動性，切羽土圧，  
MPS 法，粒子法 (IGC : C07, E13, H05)

## 1. はじめに

都市土木工事においてトンネルを構築する際には、工事に伴う周辺環境への影響を低減するために、多くの場合シールド工法が採用されている。このうち、泥土圧シールド工法は、掘削土の処理設備が少なく、発進基地の面積が小さくて済むことから、特に大口径シールドトンネル工事において主流となっている。図-1 に泥土圧シールドの構造例を示す。泥土圧シールド工法は、カッターヘッドの前面で掘削土に添加材を加えて攪拌・混練して泥土化し、それをカッターチャンバー（以下、チャンバーと記す）内に充満させて加圧し、その圧力により切羽を安定させて掘進する。地山を掘削して、その掘削土で切羽の安定を図りながら同時に掘削土砂を排出する必要があるため、掘削土による切羽の安定と掘削土の搬出、この相反する 2 つの作用が同時に行われなければならない。

掘削土を連続的に移動させてスクリーコンベヤから排出するためには、加圧された掘削土が自由に変形・移動できる性質、すなわち塑性流動性を持つことが必要である<sup>1)</sup>。そのために添加材を過剰に加えると、掘削土の流動性が高くなるため、スクリーコンベヤの圧力保持機能が低下し、チャンバー内の圧力を維持できず、切羽の安定性が確保できなくなる。このような理由から、泥土圧シールド工法において、チャンバー内泥土の塑性流動性を管理することは非常に重要である。

従来のチャンバー内泥土の塑性流動性の管理方法は、スクリーコンベヤから排出された泥土を目視や触診といった経験的な判断や、スランプ試験、バーンせん断試験等により定量的に管理する方法をとってきた。しか

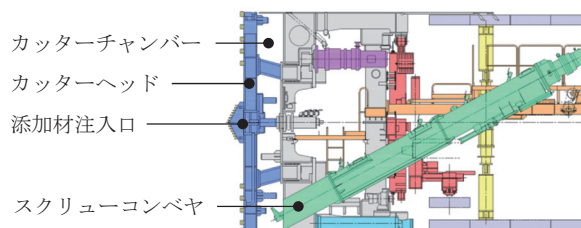


図-1 泥土圧シールドの構造例

し、大口径シールドにおいては、掘削された土がスクリーコンベヤから排出されるまでに時間を要することから、排出された泥土の性状を確認するだけでは、リアルタイムにチャンバー内全体の泥土の性状を確認することが困難であった。近年では、チャンバー内に設置した回転体のトルクを計測する方法<sup>2)</sup>や、ロッドの曲げを計測する方法<sup>3)</sup>、あるいは隔壁部に作用するせん断力からリアルタイムに塑性流動性を評価する方法<sup>4)</sup>が提案されている。これらの方法は、いずれも塑性流動性を評価するために特別な装置を設置する必要があり、その費用が発生することや、特殊な装置のため故障するリスクが高いこと等の問題があった。

筆者らは、シールド隔壁部で計測される土圧データを用いた塑性流動性管理手法を開発し、5つの施工現場に展開してきた。また、チャンバー内の複雑な挙動を再現するための手法として、粒子法の一つである MPS 法による流動解析技術の有用性を実験的に検討してきた。本稿では、MPS 法を用いたチャンバー内泥土攪拌シミュレーションの適用性を示すとともに、MPS 法による事前解析により、攪拌条件が異なる位置に土圧計が設置された場合においても塑性流動性を適切に評価できるシステムを考案したので、その概要と展望について述べる。

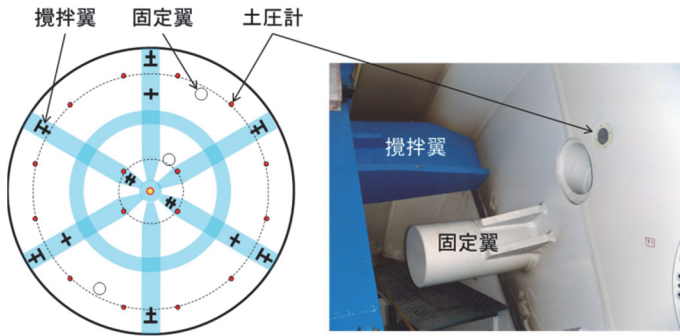


図-2 泥土圧シールドにおける土圧計の設置例

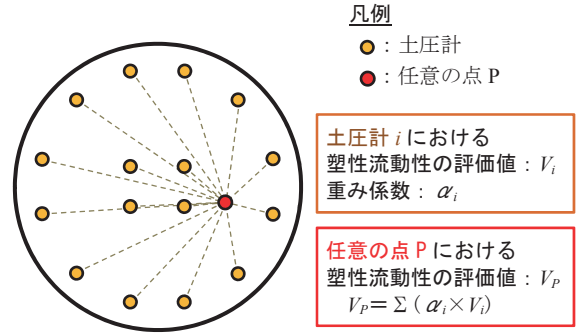


図-5 クリギングによる推定方法の概念図

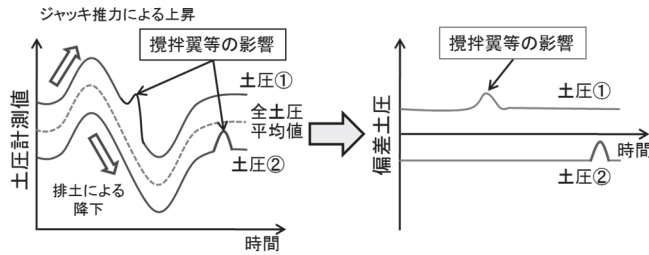


図-3 土圧データと偏差土圧の概念図

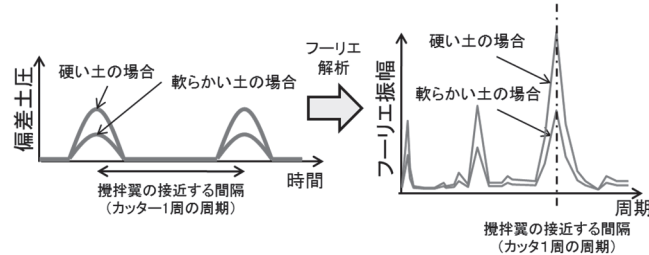


図-4 フーリエ解析の概念図

## 2. 塑性流動性評価方法の概要

### 2.1 塑性流動性評価方法

泥土圧シールド工事では、チャンバー内に土圧計を設置し、切羽土圧を管理している(図-2)。実際の工事の土圧データを分析したところ、カッターヘッドの回転に伴い攪拌翼が土圧計に接近・通過すると、土圧の値が変動することが判明した。また、攪拌翼接近に伴う土圧変動成分を抽出し、その大小に応じた塑性流動性の間接的な評価方法を考案した<sup>5)</sup>。

計測された土圧データには、図-3 に示すように、シールドのジャッキ推力や、スクリーコンベヤからの排土など、チャンバー内全体で起こる圧力変動と攪拌翼が土圧計近傍を通過する際の局所的な圧力変動が含まれていると考えられる。そこで、複数ある土圧計の計測データの平均値を算出し、それぞれの土圧データから差し引くことで、局所的な変動だけを抽出することを試みた。以降、この計算された土圧を平均値からのずれと定義し、偏差土圧と呼ぶ。

偏差土圧の変動の大小を簡易に判定する方法として、ある時間範囲の偏差土圧データを用いて標準偏差を算定した。標準偏差が小さければ変動が小さい、すなわち攪拌翼通過時の泥土の抵抗が小さく軟らかい土である



図-6 塑性流動性可視化システムの画面表示例

と判定し、標準偏差が大きければ変動が大きく、硬い土であると判定できると考えられる<sup>5)</sup>。図-4 に示すように、偏差土圧には、攪拌翼やカッタースポークが接近することによる周期的な変動(波)が含まれていると考えられる。ある時間範囲の偏差土圧データを用いてフーリエ解析を行い、攪拌翼が接近する周期付近の波の振幅(以下、フーリエ振幅と記す)が算定され、その大小により掘削土の塑性流動性を評価できると考えられる。

### 2.2 可視化方法<sup>6)</sup>

チャンバー内全体の泥土の塑性流動性を面的に評価・可視化するために、離散的に得られているデータから領域全体を推定できるクリギングによる補完方法を用いる<sup>7)</sup>。図-5 に示すように、任意の設置点 P に対する各土圧計の重み係数 $\alpha_i$ ( $\sum \alpha_i = 1$ )をクリギングにより求め、各土圧計における塑性流動性の評価値 $V_i$ (標準偏差、フーリエ振幅等)に $\alpha_i$ を乗じ、その総和 $V_P (= \sum (\alpha_i \times V_i))$ を算出する。なお、通常型クリギングを用い、自己相関距離を設定する際には、共分散関数として指数関数モデルを採用している。

図-6 に本システムの画面表示例を示す。土圧値のほか、標準偏差とフーリエ振幅のいずれかを選択して表示できる。描画点は実際のチャンバーの寸法に対し 100 mm 間隔でプロットし、0.5~0.7 秒ごとに更新する。塑性流動性の評価値は、青色(土圧変動が小さく、流動性が大きい)~白色(適切)~赤色(土圧変動が大きく、流動性が小さい)のグラデーション表示により可視化する。

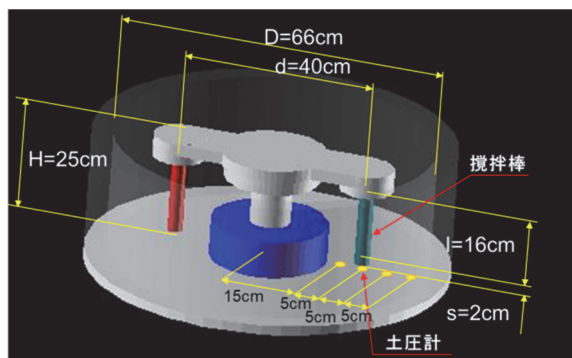


図-7 解析モデル

表-1 解析ケース

CASE	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)	対応する実験ケース
A-s20	500	5	S20
B-c30	1000	10	C30
C-c15	1500	15	C15

### 2.3 課題および解析ニーズ

大口径の泥土圧シールド工事に適用する際、土圧計をチャンバー全体に均等に配置する必要が生じたが、設置位置によって攪拌翼との離隔や通過速度が異なることから、これらを考慮した評価方法が必要となる。そこで、塑性流動状態を変えた土砂試料を用いた室内実験において、攪拌条件を変化させた場合の土圧変動の違いを観察し、攪拌条件を考慮した評価方法を開発した<sup>8),9)</sup>。本評価方法を実機相当のフィールドに適用した場合の妥当性を検証するために、流動解析を実施した。

## 3. MPS 法による泥土の流動解析の適用性の検討

### 3.1 土砂攪拌実験の再現<sup>10)</sup>

泥土圧シールドのチャンバー内泥土の塑性流動性状態の数値解析には、有限体積法 (FVM) や個別要素法 (DEM) が試みられてきた<sup>11)</sup>。このうち DEM は、泥土を土粒子 (要素) の集合体としてモデル化する不連続体の解析手法である。本研究では、粒子法による解析手法に着目した。粒子法は、流体を粒子に分割して解析する手法で、圧縮性流体を扱う SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法および非圧縮性流体を扱う MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法に大別される。本解析では非圧縮性の土砂を扱うことから MPS 法による解析手法 (以下、MPS 解析と記す) を適用した。MPS 解析は、土木工学分野においてもコンクリートの充填性解析に対しての適用が進んでおり<sup>12)</sup>、泥土を流体としてモデル化する MPS 法が適していると考えた。ところが、泥土圧シールドのチャンバー内攪拌解析に適用された事例は見当たらないため、様々な塑性流動状態の泥土を攪拌した実験の再現を MPS 解析により行い、チャンバー内泥土の攪拌シミュレーションへの MPS 解析の適用性を検討した。

表-2 解析条件

計算方法	陰解法
流体モデル	ビンガム流体
構造モデル	ポリゴン壁 (固定, 移動)
粒子サイズ $r$ (cm)	1
粒子数 $n$ (個)	71,894
時間刻み $\Delta t$ (秒)	0.0005
再現時間 $t$ (秒)	60 (一部 30)
重力加速度 $g$ (m/s <sup>2</sup> )	9.8
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,000
降伏値 $\tau$ (Pa)	500~1,500
塑性粘度 $\eta$ (Pa・s)	5~15
降伏点パラメータ $p_\tau$	0.0001
攪拌棒回転速度 (rpm)	4~8

#### (1) 解析モデルと解析条件

MPS 解析には市販のソフトウェア“Particleworks®”<sup>13)</sup>を用いた。図-7 に実験で使用した攪拌装置を再現した解析モデルを示す。土槽の内径は 66cm、高さは 25cm で、土槽中央部には回転体があり、半径 20cm の位置に攪拌棒が設置され、攪拌棒直下とそれを中心に半径方向に 5cm ずつ離して計 4 つの土圧計を設置している。

表-1 に解析ケースと地盤パラメータを表-2 に解析条件を示す。泥土のパラメータは、フレッシュコンクリートの流動特性の評価に用いられるツーポイント試験<sup>14)</sup>により測定し、ビンガム流体としてモデル化して降伏値と塑性粘度を決定した。ビンガム流体には流動時では粘塑性流体、不動時は高粘性流体として扱う bi-viscosity モデルを採用した。土槽と回転アームと攪拌棒はポリゴン壁でモデル化し、回転アームの回転軸に回転速度を設定した。なお、実験では、攪拌棒の離隔や回転速度を数種類変化させて実施しているが、解析では、離隔を 2cm (固定)、回転速度を 4rpm および 8rpm と設定した。

#### (2) 解析結果

図-8 に解析と実験の土圧変動の比較を示す。攪拌棒の回転速度が 8rpm の場合については、ケース C-c15 のみ示しており、ケース A-s20 とケース B-c30 については割愛した。また、攪拌棒の回転速度が 4rpm、土圧計-2 のケースについては、解析結果も実験と同じ 0.1 秒ごとにプロットし、ソフトウェアの制約から 30 秒間で解析を中断した。いずれのケースも土圧変動が概ね一致しており、0.1 秒ごとにプロットすることにより、細かな土圧変動も再現できることが確認できた。図-9 に MPS 解析による圧力分布の解析結果を示す。攪拌棒周辺だけでなく、土槽の底面や側面にも圧力が広がる攪拌時の挙動が確認できた。



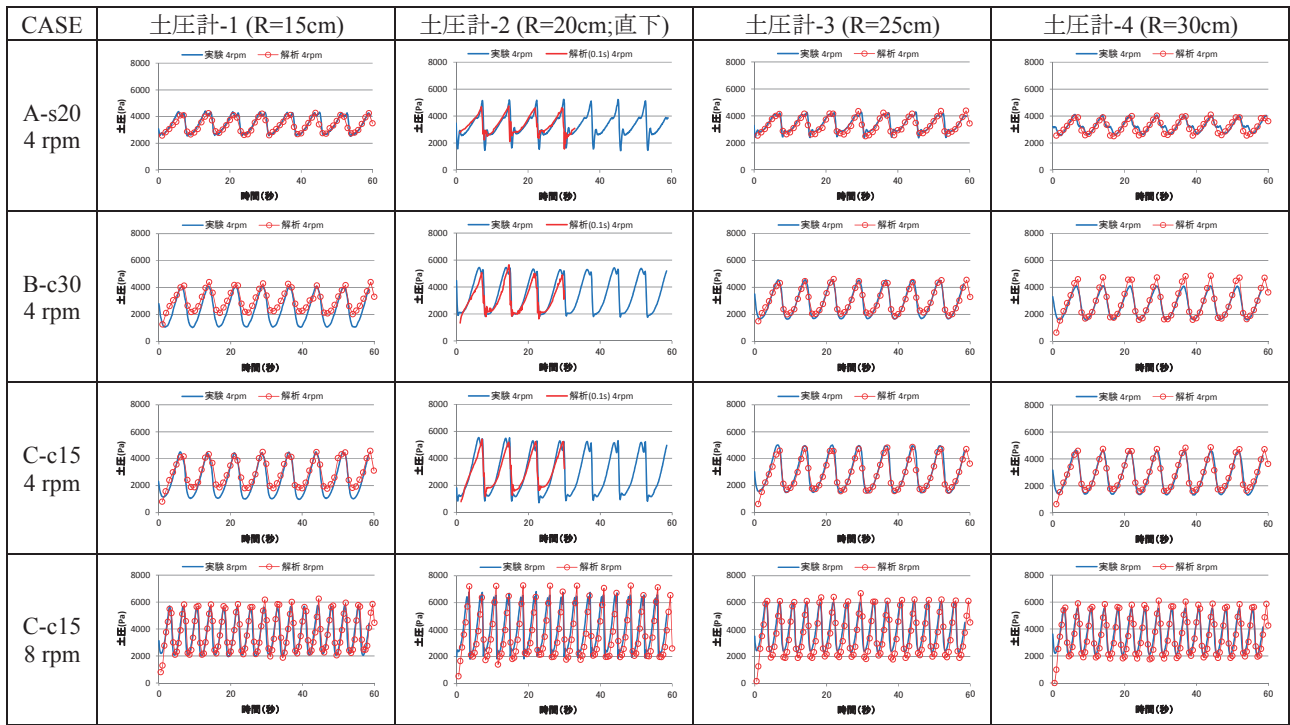


図-8 解析結果と実験結果の比較

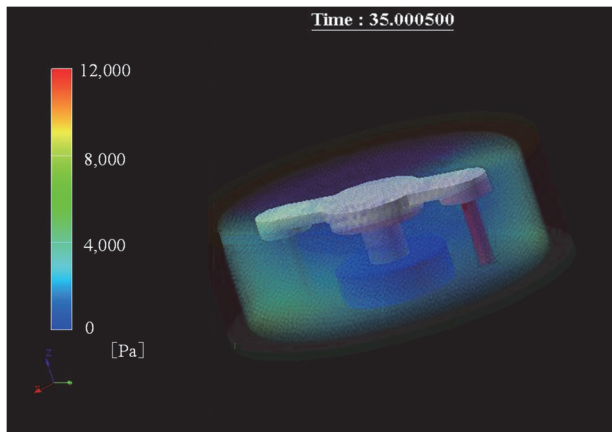


図-9 圧力分布状況（ケース B-c30，4rpm，35 秒後）

以上、実験での攪拌条件と泥土の粘性特性を入力値とした再現解析を実施し、土槽の底面に作用する土圧変動を実験値と比較したところ、ほぼ再現できていることを確認した。また、MPS 解析により圧力分布を三次元的に可視化することで、圧力が攪拌棒周辺だけでなく、土槽の底面や側面にも広がるといった攪拌時の挙動を表現できると考えられる。

### 3.2 チャンバー模型実験の再現<sup>15),16)</sup>

チャンバー内の複雑な攪拌状態を再現した模型実験を実施し、実験で計測された土圧変動と MPS 法による数値解析の結果を比較して、MPS 法のチャンバー内攪拌シミュレーションへの適用性を検討した。

#### (1) 実験の概要

チャンバー模型装置を図-10 に示す。この装置は、実際の工事で使用する泥土圧シールドのチャンバーを約

表-3 レイノルズの相似則に基づく実験条件

	実機	模型
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2000	1000
回転速度 $N$ (rps)	$8.33 \times 10^{-3}$	$8.33 \times 10^{-3}$
直径 $D$ (m)	16	1.6
粘性係数 $\mu$ (Pa・s)	$\mu$	$\mu/200$

表-4 模擬泥土の配合と粘性測定試験結果

CASE	配合		模擬泥土		実機
	SAP (g)	水 (g)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)	
AQ04	4	1000	40	0.587	117
AQ06	6	1000	70	2.133	427

10 分の 1 に縮小して再現したものである。また、レイノルズの相似則を満足させるために表-3 のように各種パラメータを調整した。なお、攪拌槽のレイノルズ数は、次の式で示される<sup>17)</sup>。

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ ：流体の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $N$ ：回転速度 (rps)  
 $D$ ：直径 (m)、 $\mu$ ：流体の粘度 (Pa・s)

模擬泥土には、観察がしやすく、粘性の調整が容易な高吸水性樹脂 (SAP) 水溶液を用いた。表-4 に模擬泥土の配合と粘性測定試験結果を示す。粘性は、高性能レオメーター (Anton Parr 社製 MCR301) により計測した。この試験で得られた粘性定数については、後述する解析

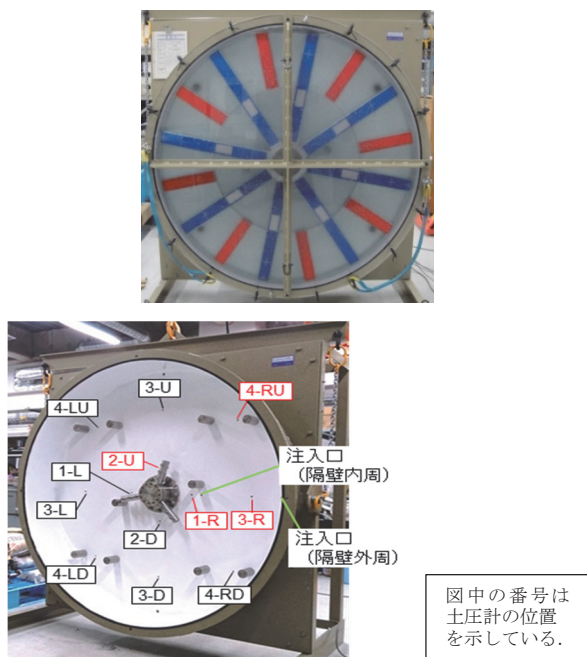


図-10 チャンバー模型

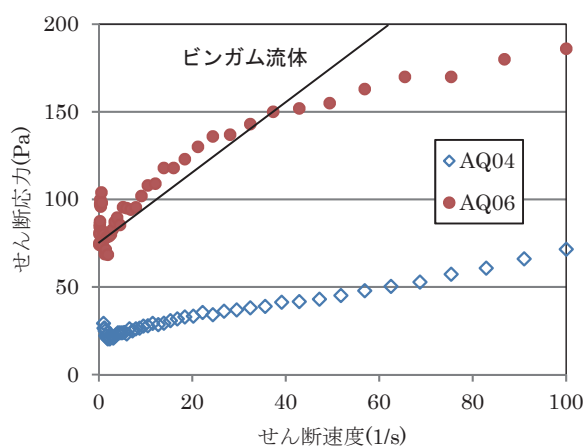


図-12 模擬泥土のせん断速度とせん断応力の関係

パラメータに反映させる。また、カッターは反時計回りに 0.5rpm ( $8.33 \times 10^{-3}$  rps), アジテータは時計回りに 4rpm で回転させた。隔壁に設置した 12 個の圧力計により 0.1 秒間隔で圧力変動を測定した。なお、アジテータは、カッター中心部の流速が小さくなりやすい部分を強制的に攪拌する機能を有している。

## (2) 解析モデルと解析条件

図-11 に解析用形状モデル (ポリゴン壁) を示す。内部が見えるように隔壁部のモデルを消去している。表-5 に解析条件を示す。なお、粒子サイズはチャンバー模型実験と同様に 1cm とした際に解析時間が非常に長くなったため、解析結果に有意な差が見られなかった 2cm に変更した。粘性測定試験においてせん断速度を 1~100 (1/s) の範囲に設定して計測した結果を用いた際には、低せん断速度領域や高せん断領域を無視し、ビンガム流体と仮定して粘性定数を決定した。このような条件で数値解析を実施したところ、ビンガム流体とみなせる

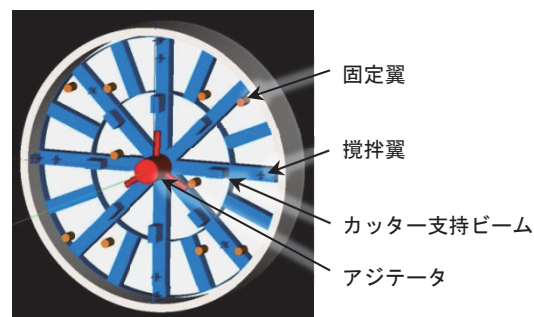


図-11 解析用形状モデル

表-5 解析条件

計算方法	陰解法
陰解法パラメータ $\beta$	1.0
陰解法パラメータ $\gamma$	1.0
構造モデル	ポリゴン壁
粒子サイズ $r$ (cm)	2
粒子数 $n$ (個)	58,483
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
重力加速度 $g$ (m/s <sup>2</sup> )	9.8
時間刻み $\Delta t$ (秒)	0.001

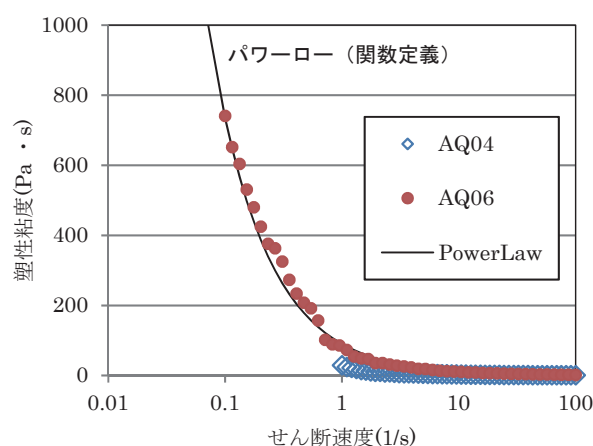


図-13 模擬泥土のせん断速度と塑性粘度の関係

ケース AQ04 では実験と解析で圧力変動は概ね一致していたが、高粘性流体のケース AQ06 では実験結果の半分ほどの圧力変動となり、数値解析の再現性に課題があった<sup>15)</sup>。そこで、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の範囲を 0.1~100 (1/s) として再計測を実施した。図-12, 13 に模擬泥土の粘性試験結果を示す。図-13 より、ケース AQ06 は低せん断速度領域で塑性粘度が大きくなる流体であり、このような特徴を再現できる粘性モデルを採用する必要があると思われる。

以上により、粘性モデルとして従来のビンガム流体に加え、パワーローモデルを採用することにし AQ06 の実験結果を対象として以下の 3 ケースについて検討した。

### a) CASE1 : ビンガム流体

ビンガム流体は図-12 に示すようにせん断速度とせん断応力の関係により、せん断速度 1~40 (1/s) の範囲のデータを用いて、次式に近似して定義した。

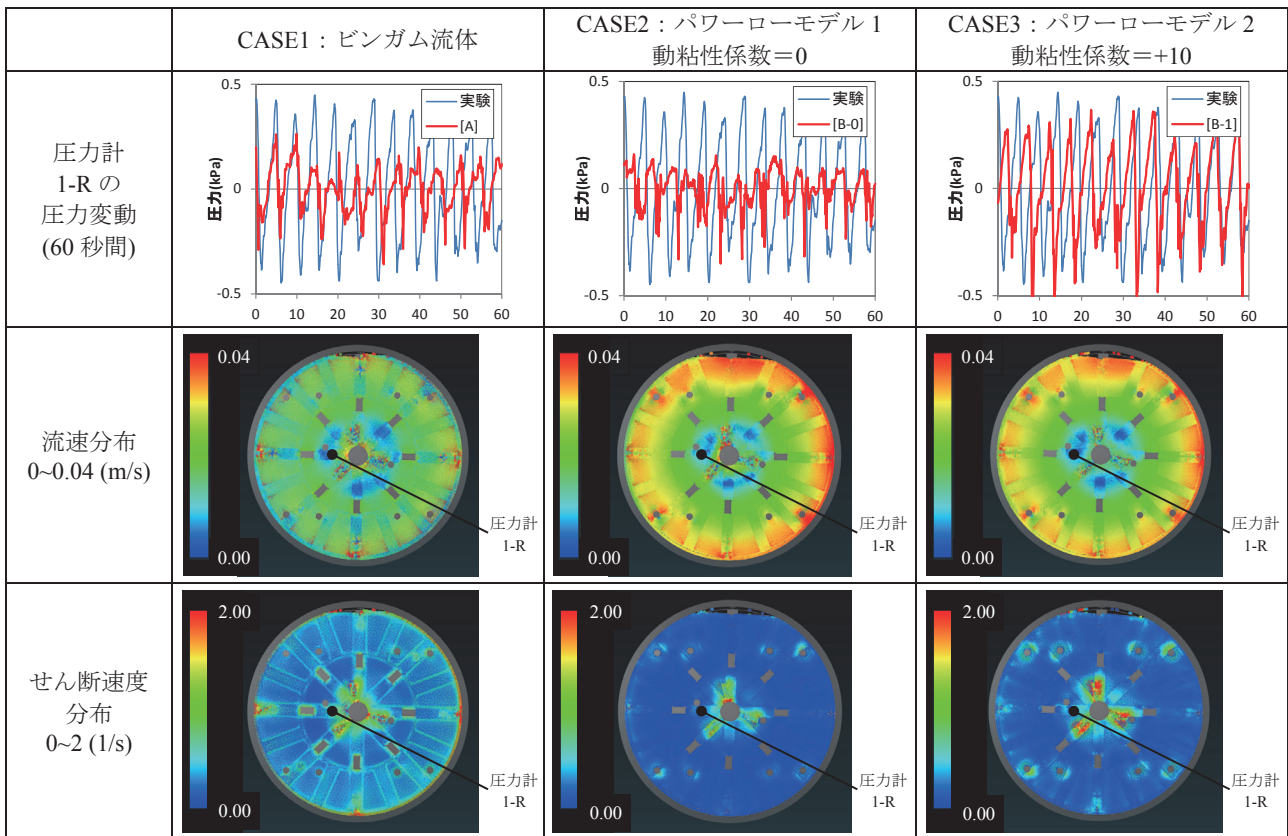


図-14 粘性モデルの違いによる解析結果の比較

$$\tau = 2.0\dot{\gamma} + 70 \quad (2)$$

ここで、 $\tau$ はせん断応力(Pa)、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度(1/s)

#### b) CASE2：パワーローモデル 1

パワーローモデルは図-13に示すように、せん断速度と塑性粘度の関係で定義するものであり、次式で近似して定義した。

$$\eta = 90.19\dot{\gamma}^{-0.911} \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ は塑性粘度(Pa・s)、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度(1/s)

#### c) CASE3：パワーローモデル 2

後述するようにCASE2では圧力変動を再現することができなかった。原因として、粘性測定試験において模擬泥土の粘性定数が適切に評価できていない可能性があった。そこで、ソフトウェアに搭載されている動粘性係数を一律付加する機能を用いて簡易にパラメータスタディを行った。具体的には、動粘性係数( $\nu=\eta/\rho$ )に0.25, 0.5, 1.0, 10.0を付加して試算した。参考までに、模擬泥土の密度 $\rho$ は1000kg/m<sup>3</sup>であるので、式(3)にそれぞれ250, 500, 1000, 10,000(Pa・s)を一律に増加させたことになる。試算の結果、実験結果と最も整合した+10.0のケースを示す。

#### (3)解析結果

図-14にCASE1～3の粘性モデルで計算した結果を示す。なお、流速分布とせん断速度分布の図では、チャンパー奥側の粒子の色も見えるように2割程度透過して

表示している。

泥土の流速分布については、CASE1は全体的に平均化された流速分布になっているのに対し、CASE2,3はカッター外周部の流速がほぼカッター最外周の速度0.042(m/s)に近く、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泥土の流動状況に近い結果となった。模型実験では、せん断速度分布を観察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攪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。したがって、チャンパー内の土砂流動解析では低せん断速度領域での挙動を考慮できるパワーローモデルを適用すべきであると考えられる。なお、CASE3については圧力変動を実験結果と合せることを目的としてパラメータスタディを実施したものであり、粘性測定方法を含めて今後検討していきたいと考えている。

### 4. 大口径泥土圧シールドに対応した塑性流動状態の評価方法

塑性流動性可視化システムを大口径シールド工事に適用する際には、塑性流動性の評価精度を確保するために掘削断面全体にある程度均等に土圧計を配置する必要がある。カッターの回転・攪拌に伴う土圧の変動幅は、

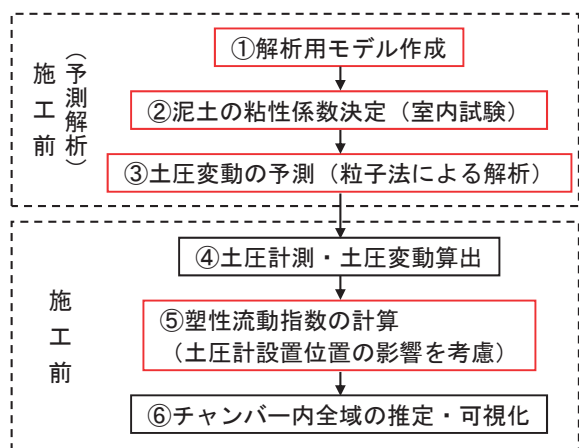


図-15 改良版システムのフロー（赤枠が改良点）

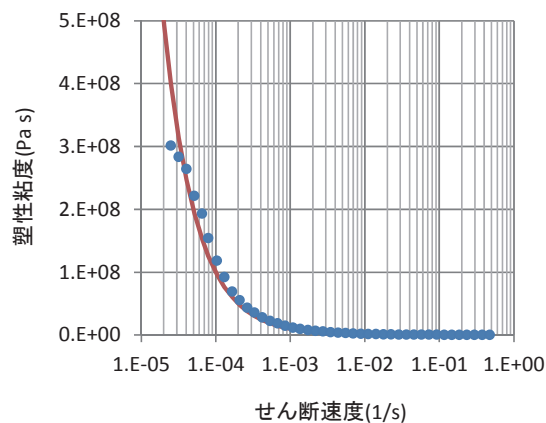


図-16 現場で採取した粘性土を圧密した試料のせん断速度と塑性粘度の関係

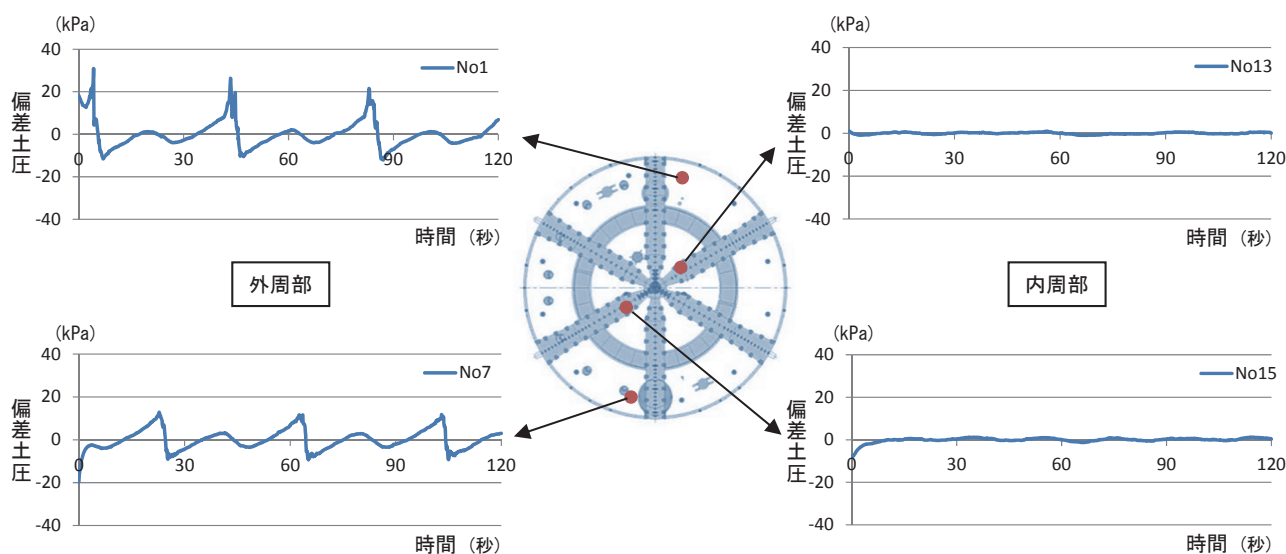


図-17 粒子法による偏差土圧の予測値

同じ塑性流動状態の泥土であっても土圧計の設置条件（攪拌翼との離隔、攪拌翼の通過速度等）によって異なるため、施工前に MPS 解析を実施し、土圧計の設置条件に対応した土圧の変動幅を予測して管理値を設定し、施工中の値と比較する方法を提案する。図-15 に改良した塑性流動性可視化システムのフローを示し、以下に、現在施工中の大口径シールド工事への適用事例を示す。

#### 4.1 事前の予測解析

粘性測定試験を実施し、粘性モデル（パワーローモデル）およびパラメータを設定する。図-16 に適用工事で採取した粘性土を切羽土圧相当（314kPa）で圧密した泥土のせん断速度と塑性粘度の関係を示す。

粒子法による数値解析を実施し、チャンバー内に設置した各土圧計の土圧変動を予測する。図-17 に予測した土圧変動から算出した偏差土圧を示す。チャンバーの外周部と内周部では同じ粘性パラメータでも土圧変動の大きさが異なることが分かる。

現場で採取した掘削対象地盤の試料は、添加材を加え

ていない土砂の性状であり、施工中に想定される最も流動性の低い性状であると考えられる。そのため、この試料の粘性モデルを用いて粒子法による数値解析を実施すれば、各土圧計において想定される最大の土圧変動幅が得られると考えられる。そこで、土圧計ごとに1分間のデータから標準偏差を求め、これを施工管理上の最大土圧変動幅 $\sigma_{i\max}$ と設定する（図-18）。

#### 4.2 施工時の評価方法と検証

従来のシステムと同様に土圧計ごとに直近1分間の標準偏差 $\sigma_i$ を算出し、次式により塑性流動指数を定義することにより、土圧計の設置条件による土圧変動への影響を考慮する。

$$MF_i = \sigma_i / \sigma_{i\max} \quad (4)$$

ここで、 $MF_i$ は塑性流動性指数(%),  $\sigma_i$ は土圧の標準偏差(kPa),  $\sigma_{i\max}$ は最大土圧変動幅(kPa)



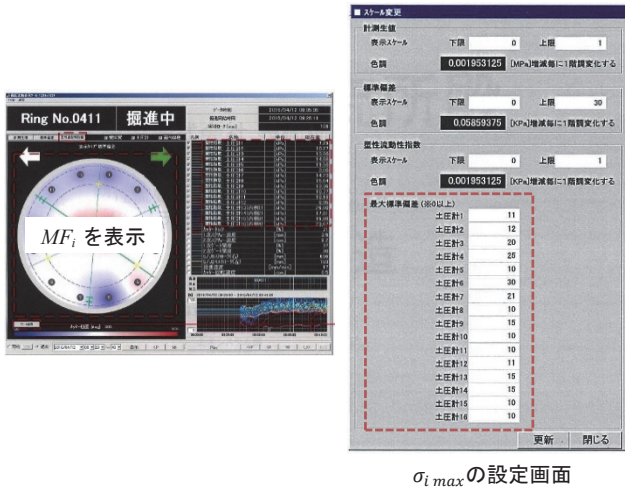


図-18 可視化画面（改良版）

直近 1 分間の塑性流動指数を土圧計ごとに逐次算定しながらチャンバー内全体の塑性流動指数を算出し、図-18 のように泥土の塑性流動性を可視化する（青色；流動性が小さい，白色；適切，赤色；流動性が大きい）。

図-19 に適用現場で既に掘進を完了しているシールド工事の土圧変動データについて，従来版で標準偏差を表示した結果と改良版で塑性流動指数を表示した結果を示す。従来システムでは土圧計の設置条件ごとに異なる土圧変動の考慮や塑性流動性の定量的な評価が困難であったが，粒子法による数値解析と組み合わせることにより，それらの問題が解決できると考えられる。

## 5. まとめ

筆者らが開発したチャンバー内塑性流動性可視化システムを大口径泥土圧シールド工事向けに改良するために，粒子法を利用した合理的な塑性流動性評価方法を検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 泥土圧シールドに設置した土圧計の圧力変動値から算出した標準偏差を用いてチャンバー内泥土の塑性流動性を評価，可視化する方法は，大口径シールド工事においても適用可能である。
- (2) 大口径シールド工事に塑性流動性可視化システムを適用する際には，土圧計を掘削断面全体に均等に配置する必要があるが，従来の塑性流動性の評価方法では，土圧計の設置条件に起因する土圧変動の相違を考慮することが困難であることを指摘した。
- (3) 土圧変動は，土圧計と攪拌翼との離隔等によって異なることを実験的に確認しており，それらを再現できる MPS 法は有用である。実際の泥土を用いた攪拌実験やチャンバーの模型実験によって，泥土や実験用粘性流体を適切にモデル化すれば，MPS 法を用いてチャンバー内泥土の土圧変動を再現できる。
- (4) 実際の大型泥土圧シールド工事で得られた泥土

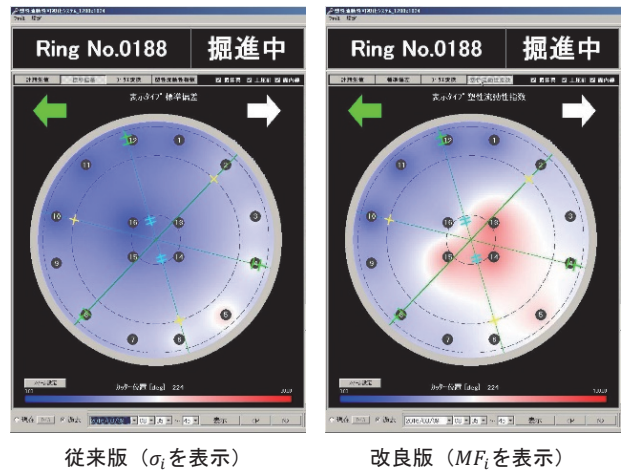


図-19 画面表示例の比較

から粘性パラメータを決定し，MPS 法によって各土圧計の土圧を求めたところ，チャンバー外周部と内周部では土圧変動が異なることを確認した。

- (5) MPS 法による予測解析を実施して得られた最大土圧変動幅とシールド掘進時の土圧変動との比率を塑性流動性指数として定義し，土圧計の設置条件を考慮した泥土の塑性流動性の評価方法を提案した。

今後は，改良された塑性流動性評価システムを実際のシールド工事に適用し，予測解析に用いる泥土の粘性パラメータの設定方法と塑性流動性を評価した結果の妥当性について検証する予定である。

## 謝辞

MPS 解析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。また，システムを改良するにあたり，協立電機株式会社の鍋田氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 小山幸則，加島豊，須賀武，高田正治，木村宏：土圧式シールド工法その理論と応用，p.30，2009。
- 2) 土橋浩，松田満，松原健太，山本彰，近藤由也，日野義嗣，今田徹：泥土圧シールドにおけるチャンバー内の土砂流動管理技術の開発，土木学会論文集 F，Vol.66，No.2，pp.289-300，2010。
- 3) 株式会社フジタ ホームページ「チャンバー内見える化技術」でシールド掘進管理を高度化～曲げセンサーと色相彩度で土砂の流動状態を可視化～：[http://www.fujita.co.jp/information/2016/post\\_347.html](http://www.fujita.co.jp/information/2016/post_347.html)（入手日 2017.6.1）
- 4) 粥川幸司，新原圭祐，名倉浩，越田健：泥土圧シールド実機を用いた掘進実験によるチャンバー内掘削土の塑性流動判定，第 26 回トンネル工学研究発表会，報告 II-3，2016。



- 5) 渡邊洋輔, 杉山博一, 島厚夫, 安井克豊, 小瀧伸也 : チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討 (その 3), 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, VI-146, 2012.
- 6) 杉山博一, 磯部哲, 塩出健二, 藤井暁也, 副島直史 : チャンバー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.
- 7) 村上大輔, 堤盛人 : GIS—理論と応用, Vol.19, No.2, pp.59-69, 2011.
- 8) 中谷篤史, 杉山博一, 原忠, 前田俊宏, 佐々木博昭, 塚田裕史 : 攪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 1) 様々な攪拌条件と土圧変動との関係について, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, VI-060, 2015.
- 9) 杉山博一, 岩井俊之, 原忠, 前田俊宏, 佐々木博昭, 塚田裕史 : 攪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.
- 10) 高梨和光, 小瀧伸也, 杉山博一, 原忠, 前田俊宏, 佐々木博昭, 塚田裕史 : 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.
- 11) たとえば, 佐々木加津也, 清水賀之 : 個別要素法による大断面土圧シールドチャンバー内土砂挙動解析, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, III-B88, 1997.
- 12) たとえば, 浦野真次, 根本浩史, 山田義智, 崎原康平 : 締固めを行うコンクリートの充填性評価への流動解析手法の適用に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.179-190, 2017.
- 13) プロメテック・ソフトウェア株式会社 ホームページ : <http://www.prometech.co.jp/> (入手日 2017.6.1)
- 14) 河井徹, 橋田浩 : 高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.125-130, 1994.
- 15) 杉山博一, 岩井俊之, 高梨和光, 安井克豊 : 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 (その 2), 土木学会第 71 回年次学術講演会, III-438, 2016.
- 16) 杉山博一, 岩井俊之, 高梨和光, 安井克豊 : 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, トンネル工学報告集, 第 26 巻, II-1, 2016.
- 17) 化学工学会 : 化学便覧 (改訂六版), 丸善, p.424, 1999.

(2017 年 6 月 19 日 受付)

