チャンバー内土砂流動性可視化システム（その１）－土砂粘度特性の確認実験－

㈱大林組　正会員　○菅野　静　正会員　香川　敦
正会員　阿部　靖　正会員　木村志照

１．はじめに

泥土圧シールド工法における切羽安定性向上を目的として，チャンバー内の土砂の状態をリアルタイムに解析・可視化するシステムを開発し，これまで多くのシールド掘削施工に活用してきた．本研究では，チャンバー内の掘削土の粘度特性をより正確に把握することを目的とした土砂の撹拌実験を実施し，解析精度の向上に向け検討を行った．

２．チャンバー内可視化システムの概要と課題

本システムではチャンバー内の流動性土砂を粘性流体とみなし，**図-1** のような土砂の粘性抵抗を計測する装置（フラッパー）と，**図-2** のようにチャンバーやスポークなどを詳細にモデル化した 3 次元流体解析によって，リアルタイムに土砂の粘度およびずり応力（せん断応力）の分布を表し，土砂の状態を評価・把握するものである．システムの概要について次に示す．手順ステップ①として，隔壁に設置したフラッパーを掘進中に回転させ土砂の抵抗（トルク）を計測する．スポークにより土砂が撹拌流動すると，フラッパートルクに変動（トルク振幅）が発生する．このトルク振幅が大きい場合は土砂の粘性が高い状態であり，逆に小さい場合は土砂の粘性が小さい状態であるため，トルク振幅を土砂の性状を表すパラメーターとして用いることが出来る．しかしながら，チャンバー内土砂の粘度特性（ずり速度とずり応力の関係）は未知であることから，ステップ②として，①で計測したトルク振幅実測値に対して流体解析によるトルク振幅解析値が整合するまで，粘度特性をフィッティングさせる繰り返し解析を行う．振幅の実測値と解析値が整合したら解析を終了し，ステップ③として，終了時の解析結果の内，土砂の「流速」，「ずり応力」および「粘度」の分布をチャンバー断面図に示し，土砂の状態を可視化する．本システムでは土砂の粘度特性について，当初**図-3** に示すようなケソンモデルを仮定し解析に使用したが [1]，解析の精度向上のため，正確に土砂の粘度特性を把握することが課題となっていた．そこで，実現場で採取した掘削土を用いた粘度計測試験および気泡や増粘材を混合した土砂の撹拌実験により，土砂の粘度特性を明らかにすることとした．

図-1　フラッパー

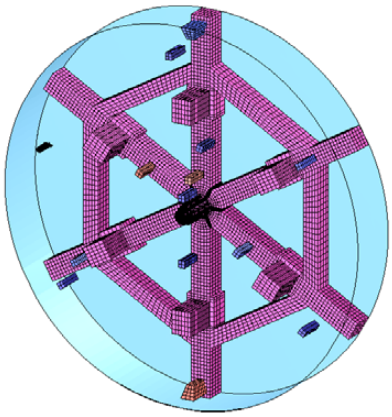

図-2　3 次元流体解析モデル

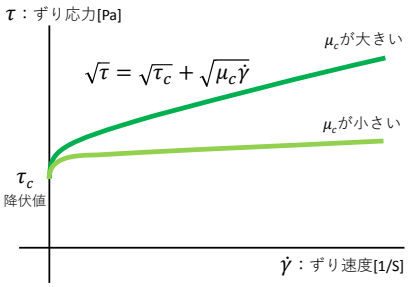

図-3 ケソンモデル

３．現場掘削土（粘性土）の粘度計測結果

2016 年 7 月から掘進を開始した 357 号東京港トンネル（その 2）工事（以下，東京港トンネル）は，シールド外径φ12.2m，延長 1,315m の泥土圧シールドである．掘削する東京湾海底下は 98%がシルト・粘土分（2%砂分）の海成粘土層であった．従来，粘性流体の粘度の計測にはＢ型粘度計が使われるが，土砂の場合，砂が滑ってしまい粘度を計測することが出来ない．しかし，今回のようにほとんどがシルト・粘土分の場合は，加水することによりＢ型粘度計での粘度の計測が可能であった．**図-4** に

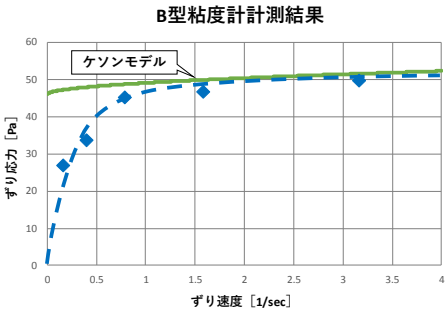

図-4　Ｂ型粘度計による粘性土の粘度特性

キーワード　シールド，泥土圧シールド，チャンバー内土砂性状可視化，土砂の粘度特性
連絡先　〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟　㈱大林組　TEL：03-5769-1318

Ｂ型粘度計による東京港トンネル掘削土の粘度計測結果を示す．チャンバー内で流動化された土砂は，ずり速度がある程度大きくなるとずり応力が一定値に近づくが，ずり速度が小さいときはケソンモデルよりも小さなずり応力となり，擬塑性流体のような粘度特性を有することがわかった．

４．土砂撹拌実験の概要（その 1）

Ｂ型粘度計で得られた粘土の粘度特性（擬塑性流体）を，実シールド機に設置するフラッパーの撹拌によって把握する実験を行った．**図-5** に示すようなφ500mm，深さ 600mm の円柱形容器に実験用土砂を投入後，フラッパーで撹拌し，フラッパーの回転数をパラメーターとしてトルクを計測した．実験用土砂は，珪砂に増粘材 CMC を混合した増粘材混合土を用いた．配合を**表-1** に示す．回転数は 1.0，2.0，5.0，10.0rpm とし，それぞれの回転数で 5 分間撹拌した．

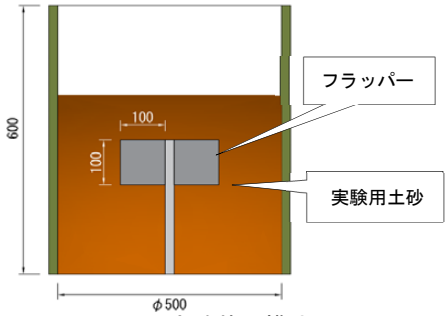

図-5 実験装置模式図

表-1 実験用土砂の配合

	珪砂 (kg)	粘土 (kg)	水 (kg)	CMC2%溶液 (kg)	気泡 (%)
増粘材混合土	125	-	16.5	29	-
気泡土	125	22	26.5	-	5※

※珪砂+粘土+水の体積に対する割合

５．実験結果（その 1）

図-6 に横軸を回転数，縦軸を各回転数のフラッパートルクの平均値としたグラフを示す．**図-6** にはずり応力が小さい初期勾配領域が表れず，擬塑性流体の特性が確認できていない．

６．土砂撹拌実験の概要（その 2）

擬塑性流体の特徴を把握するため実験装置を改造し，小さな回転数で撹拌することを試みた．実験用土砂は，その 1 と同様，珪砂に増粘材 CMC を混合した増粘材混合土に加え，珪砂と粘土に気泡を混合した気泡土の 2 種類を用いた．各配合を**表-1** に示す．回転数は 0.1，0.2，0.3，0.4，0.5rpm とし，それぞれ 4 回転撹拌した．

７．実験結果（その 2）

図-7 に増粘材混合土，**図-8** に気泡土の実験結果を示す．増粘材混合土のグラフには実験（その 1）の結果も併せて示した．増粘材混合土および気泡土とも，初期勾配領域を含む擬塑性流体の粘度特性が現れており，土砂の粘度特性のモデル化には，土質に応じた適切な回転数で撹拌することが必要であることがわかった．

８．考察

この実験から，適切な回転数で撹拌することにより，土砂の粘度特性を把握できることが確認できた．実際のシールド機への適用に際し，この擬塑性流体の粘度特性をべき乗式 $\tau = C\dot{\gamma}^{(1-n)}$（ここに τ：ずり応力，$\dot{\gamma}$：ずり速度)で表し，次のようにシステムを改良した．まず本実験の状態と同様，土砂が静止しているセグメント組立中にフラッパーを適切な回転数で撹拌させ，計測したトルクを用いてべき乗式の n の値を解析する．次に前述したステップ①と同様，掘進中のトルク振幅の実測値と解析値が整合する様にべき乗式の C の値をフィッティング解析し，最終的に土砂の「流速」，「ずり応力」および「粘度」の分布から土砂の状態を可視化する．改良した可視化システムの現場への適用結果については「チャンバー内土砂流動性可視化システム（その 1）―現場適用結果―，土木学会年次学術講演会，2017 年」を参照されたい．

増粘材混合土　実験結果（その1）

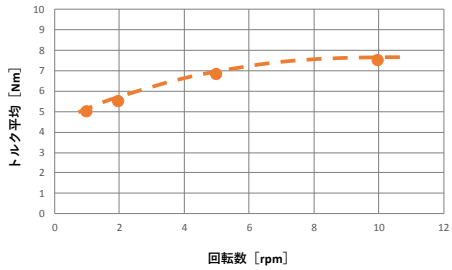

図-6 実験結果（その１）：
増粘材混合土の粘度特性

増粘材混合土　実験結果（その2）

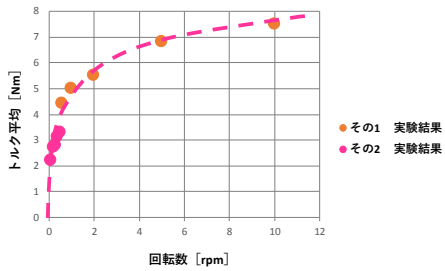

図-7 実験結果（その１・その２）：
増粘材混合土の粘度特性

気泡土　実験結結果（その2）

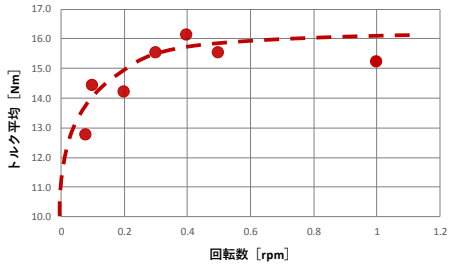

図-8 実験結果（その２）：
増粘材混合土の粘度特性

参考文献　1)土橋　他: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.289-300，2010.6