

# 世界最大の泥土圧シールドの掘進管理について

櫻井裕一<sup>1</sup>・中山正夫<sup>2</sup>・松原健太<sup>2</sup>・河口琢哉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>首都高速道路公団 東京建設局 建設第一部 池袋工事事務所  
(〒171-0021 東京都豊島区西池袋5-13-13 東都自動車ビルディング2階)

<sup>2</sup>正会員(株)大林組 首都高池袋南JV工事事務所(〒171-0021 東京都豊島区西池袋5-22-19)

<sup>3</sup>(株)大林組 首都高池袋南JV工事事務所(〒171-0021 東京都豊島区西池袋5-22-19)

従来、切羽安定保持の信頼性、排土効率の優位性といった点から、大断面シールドトンネルでは泥土圧シールドよりも泥水式シールドが有利とされてきた。本工事では、泥土圧シールドとしては世界最大となるシールド機外径 12.02mの泥土圧シールドが採用され、大断面泥土圧シールドならではの課題を克服すべく、様々な検討・対策を行った。本稿では掘進管理の主となる「掘削土の塑性流動化」、「土圧管理」、「排土量管理」について述べるとともに、チャンパー内土砂の塑性流動状態を確認・評価するために開発・導入した「チャンパー内可視化技術」の概要と実施工への適用結果について報告する。

**キーワード：**大断面泥土圧シールド，掘削土の塑性流動化，土圧管理，排土量管理，チャンパー内可視化技術

## 1. はじめに

首都高速中央環状線（以下中央環状線）は、都心から半径約8kmに位置する総延長約47kmの環状道路である。総延長の6割弱にあたる東側および北側の約26kmは、現在供用中である。残る約20kmのうち、西側部分の中央環状新宿線（以下新宿線）は、現在急ピッチで建設が進められている。また、南側部分の中央環状品川線は、昨年11月に都市計画決定され、事業化に向けた手続きが進められているところである。中央環状線の整備により、都心に集中する「通過交通」が迂回・分散され、バランスのとれた道路ネットワークの利用が可能となり、渋滞が大幅に緩和されるものと考えている。さらに、交通渋滞の緩和により首都機能の維持・増進に資するほか、社会経済効果および環境改善効果も期待されていることから、その早期完成が望まれている。

新宿線は東京都目黒区青葉台四丁目を起点とし、板橋区熊野町を終点とする延長11kmの自動車専用道路であり、その大部分の区間で環状第6号線の拡幅事業と併せて建設が進められている。本路線は、沿道の土地利用状況や良好な都市環境の保全および都市空間を有効活用する観点からトンネル構造で計画され、その約7割の区間にシールド工法を採用している。シールド区間は7区間に分割されており、いずれも11m～13mの大断面のシールド工事である。図-1に首都高速道路ネット



図-1 首都高速道路ネットワーク

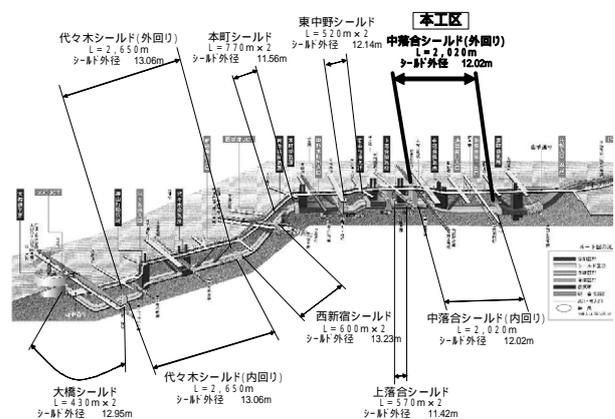


図-2 新宿線の路線概要図

ルド工法を採用している。シールド区間は7区間に分割されており、いずれも11m～13mの大断面のシールド工事である。図-1に首都高速道路ネット

表-1 工事概要

工事名称	SJ51工区～SJ53工区(外回り)トンネル工事		
発注者	首都高速道路公団		
工事内容	シールド機径	12,020mm	
	トンネル延長	2,018.1m	掘削土量 229,766m <sup>3</sup>
	トンネル線形	平面線形：R=500m(左カブ)、R=600m(右カブ) 縦断線形：i=2.587% (下り最急勾配)	
	掘削工法	泥土圧(気泡)シールド工法	
	一次覆工	RCセグメント(ワパセグメント)：833リガ <span style="margin-left: 100px;">ダクバセグメント：240リガ</span> 外径 11,800mm、桁高450mm、幅1,500mm <span style="margin-left: 100px;">外径 11,800mm、桁高400mm、幅1,200mm</span> 鋼殻セグメント：316リガ 外径 11,800mm、桁高400mm、幅1,500mm	
	道路床版	床版設置延長：1636.5m、プレキャストPC床版：1091枚	
	発進到達方法	発進方法：NOMST壁、到達方法：地盤改良工	
	土質	武蔵野礫層(Mg)、東京層(Toc.Tos)、東京礫層(Tog)、江戸川層(Edc.Eds)	
	土被り	7.3～23.4m	

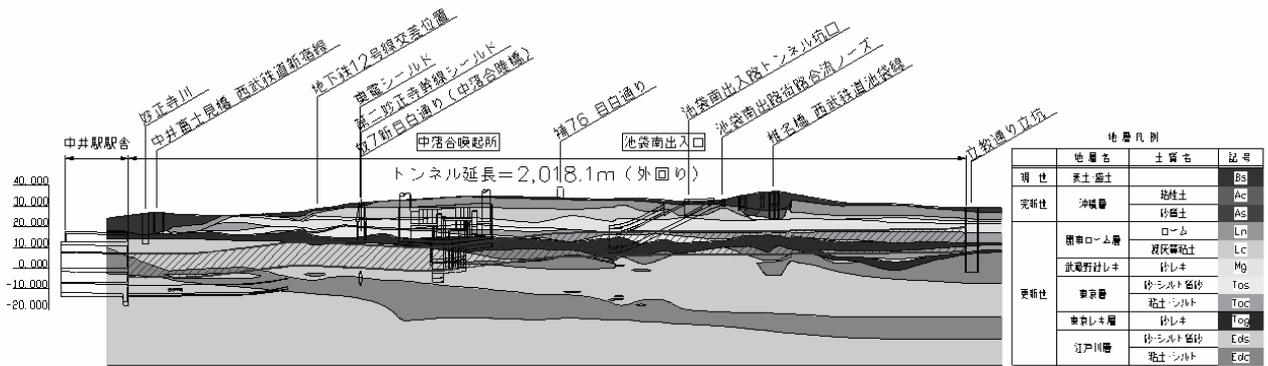


図-3 土質縦断図

トワーク，図-2 に新宿線の路線概要図を示す。

新宿線のうち中落合シールドは、豊島区千早一丁目の立教通り南に位置する立坑を発進して新宿区上落合二丁目の地下鉄大江戸線中井駅舎に到達する施工延長約2,020mの併設トンネルであり、泥圧式シールドとしては世界最大径となる外径12.02mのシールド機により、外回り・内回りをそれぞれ1機のシールド機にて施工するものである。外回りシールドトンネル工事の工事概要を表-1に、土質縦断図を図-3に示す。

この併設される2本のシールドトンネルはまず、先行して外回りを施工し、1～2ヶ月の間隔をあけて内回りを施工する計画である。

新宿線のシールド7区間9工区のうち、7工区に泥水式シールド工法が採用されているが、本工区においては、以下の理由により泥土圧シールド工法を採用した。

本工区については、外回りと内回りを同時に施

工する必要があるが、シールドの発進基地として使用可能な用地面積が小さく、泥水式シールドでは作業基地用地が不足する。

発進部の土被りが9.2m、河川横断部の土かぶり7.3mと小さく、泥水式シールドでは、低土被り部における泥水の漏泥が懸念される。

一般に、10mを超えるような大断面シールドでは、切羽安定保持の信頼性、排土効率の優位性から泥水式シールド工法が採用されることが多かったが、中落合シールド工事では、大断面泥土圧シールドの課題を克服すべく様々な対策を行った。

本稿は、この併設される2本のシールドトンネルのうち、先行して施工する外回りシールドトンネル工事に、「切羽圧の管理」、「排土量の管理」といった大断面泥土圧シールドの掘進管理について述べるとともに、「チャンバー内可視化技術」の概要と実施工への適用結果について報告するものである。

表-2 大断面シールドの課題と対策

課 題		対 策	
切羽の安定	掘削土の塑性流動化	添加材の選定、注入方法	掘削地山を対象にした添加材試験を実施し、気泡を選定 地山に応じて3種類の気泡を用意 ・Aタイプ(粘性土~シルト主体) ・Bタイプ(砂主体) ・ゲル化気泡(砂礫主体) 添加材が均一に地山に注入されるように注入孔を図-4に示す様に配置
		チャンパー内における掘削土砂の攪拌性能の向上	攪拌されにくいマシン内周部に中央アジテーターを配置 固定翼及び攪拌翼を図-4に示す様に配置
		これまでに前例のなかったチャンパー内状態の把握・評価	チャンパー内可視化技術の導入
	土圧管理	チャンパー内の土圧分布の把握	チャンパー内に土圧計を図-4に示す様に効果的に配置
		適切な管理土圧の設定	土圧分布状態を考慮した管理土圧の設定 層別沈下計により管理土圧の妥当性を検証
水圧対策	機内への噴発を防止	1次・2次スクリュウコンベアを設置し土水圧を軽減するための距離を確保し、またプラグゾーンを形成することによって止水性確保 スクリュウコンベア内に複数の土圧計を配置し噴発の兆しを事前に察知	
排 土	土砂搬出の効率化	礫を含む大量の掘削土砂の連続的な搬出方法	下記の理由から連続水平ベルコン(径幅800mm)+垂直ベルコン(径幅1200mm)の採用 ・スリ網車 大量の排土土砂を搬出するため、施工サイクルが確保できない ・ポンプ圧送 礫層を掘削するため閉塞による掘進遅延の低下が懸念、
	排土量管理	連続的且つタイムラグがなく掘削土量を把握	ベルトスケールにより排土重量を計測、レーザースキャナーにより排土体積を計測
		土量測定精度の確保	ミキシングホッパーを設置し掘削土砂をベルコンに定量供給
		土量管理手法の確立	統計処理によって土量を管理 排土された土の比重を計測し土量測定結果の妥当性を確認 土砂ホッパーにロードセルを設置しダンブで搬出する土の重量を計測し、掘削土量をマクロ的に把握

## 2. 大断面泥土圧シールドの掘進管理における課題と対策

大断面泥土圧シールドの掘進管理においては、切羽の安定を図り、効率よく排土し、排土量をどのように管理するかが重要な課題となる。本工事において切羽の安定と排土に関して行った対策を表-2にまとめる。

### (1) 掘削土の塑性流動化

泥土圧シールドにおいて切羽を安定させて掘進を行うためには、チャンパー内の掘削土砂を塑性流動状態に保つことが重要な課題となる。掘削土砂の塑性流動性が損なわれると、チャンパー内土圧バランスの不均衡化やスクリュウコンベアからの土砂の噴発等により、切羽の安定が困難となり、地表面へ大きな影響を及ぼす恐れがある。

#### a) 掘削添加材における対策

泥土圧シールドでは、掘削地山に応じた適切な添加材を選定することが重要である。本工事では図-3に示されるように粘性土から礫層まで様々な地山を掘削するため、それぞれの地山を対象とした添加材の性能確認試験を事前に行った。その結果、広汎な地山に対して適用可能で、地山の変化に迅速な対応が可能な気泡を選定した。気泡に

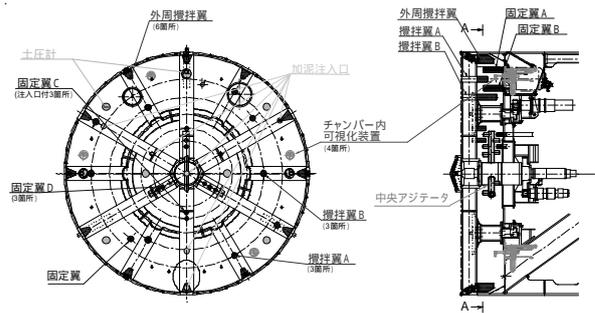


図-4 シールド機概要

は対象地山に応じて、粘性土～砂質地盤にはAタイプ、砂質～砂礫地盤にはAタイプより粘性のあるBタイプの2種類がある。ただし、本工事は大断面であり掘削土層が全断面礫層になる箇所があることから、従来のBタイプで切羽の安定が困難になった場合を想定して、新たにCタイプ(ゲル化気泡)の採用を検討し礫層掘進時に備えることとした。Cタイプ(ゲル化気泡)は、間隙の大きい礫層を対象地山としたもので、高粘性で破泡しにくいゲル状の気泡である。

#### b) シールド機における対策

掘削土を塑性流動化させるためには、添加材と掘削土が混合攪拌されることが重要である。本シールド機では、掘削土砂への均一な添加材の注入を行うため、注入孔をカッタースポークに6箇所、バルクヘッドに5箇所装備した(図-4参照)。添

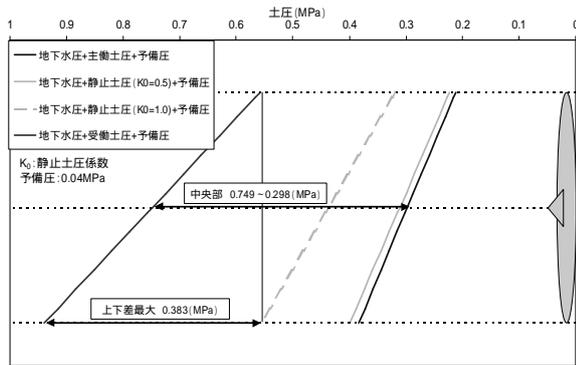


図-5 管理土圧分布

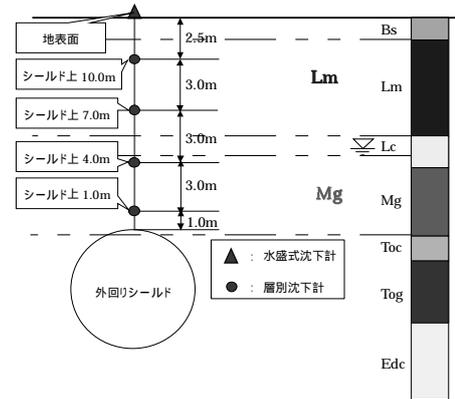


図-6 層別沈下計設置断面図

加材と掘削土砂を攪拌するために、カッタースポーク、アジテータスポークの背面に攪拌翼を、バルクヘッド側に固定翼をそれぞれ配置するとともに掘削土砂が攪拌されにくいと考えられる中央部に、可変式の大型の高速回転アジテータ（羽根径 4,200 mm, 回転トルク: 1,094/1,641 kN-m, 回転数: 2.0/1.33rpm）を装備した（図-4 参照）。

### c) 実施工の状況

現在（平成 17 年 2 月）、シールド機は約 1400m の掘進を完了している。掘進状況としては、噴発もなく掘削土の塑性流動化は適切に図られていると思われる。これまでは A タイプの気泡だけで対応が可能であった。

## (2) 土圧管理

一般に、泥土圧シールドの管理土圧は、シールド中央部に作用する土水圧を対象として、土の弾性領域である主動土圧から受働土圧の範囲で設定される。しかし、大断面シールドになるとチャンパー内の土圧分布はシールド上部と下部で差がおおくなるため、シールド機のどの位置でどのような管理土圧を設定するかが重要な課題であると考えた。

図-5 は、土被り約 15m において受働土圧から主動土圧までの間で 4 種類の管理土圧を設定した時のシールド高さ方向の管理土圧分布を示したものである。管理土圧の選択によってはシールド中央部では 0.451 MPa の差が生じ、シールド上部とシールド下部では最大 0.383 MPa の土圧差が生じることがわかる。上記の事項を考慮し、本シールド機には図-4 に示すようにチャンパー内に土圧計を 9 個設置して土圧分布状況が把握できるようにし、本工事における管理土圧を以下に示す理由から、「静止土圧 ( $K_0=0.5$ ) + 地下水圧 + 予備圧 (0.04 MPa)」に設定した。

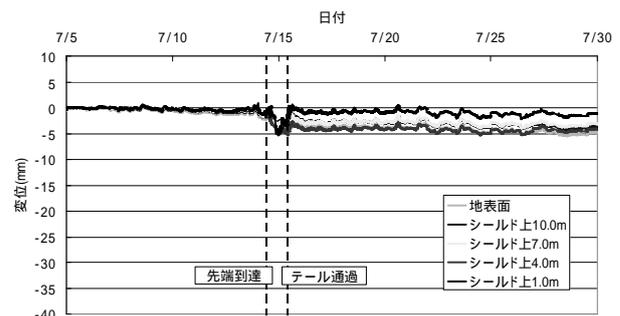


図-7 沈下量結果

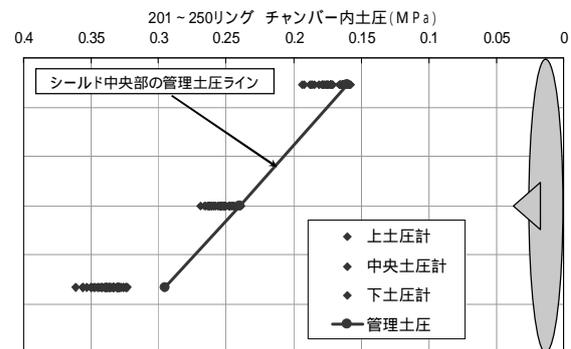


図-8 チャンパー内土圧分布

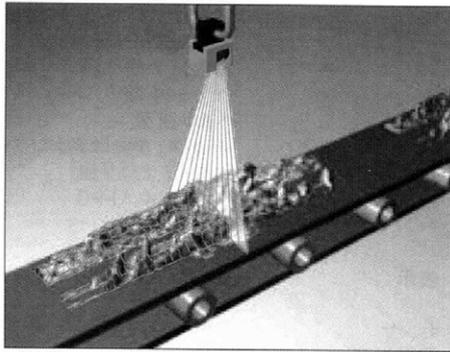
掘削地盤が硬質な土層であるため主動土圧側での管理が可能と考え、主動土圧よりもやや高い静止土圧 ( $K_0=0.5$ ) で管理する。

大断面であることから上下の土圧差が大きくなるため、予備圧は通常より高めめの 0.04 MPa とする。

土圧制御は従来の中口径シールドと同様にシールド中央部に作用する土水圧を対象とするが、大断面であるためシールド上部についても同様に管理土圧を定め、上部と中央部のいずれも管理土圧を下回らないようにする。

上記の管理土圧を設定して、層別沈下計の下を掘進した（図-6 参照）。沈下量の測定結果を図-7 示す。図-8 は層別沈下計近傍を掘進した時のチャ

レーザースキャン（排土量計測）



ベルトスケール（排土重量計測）

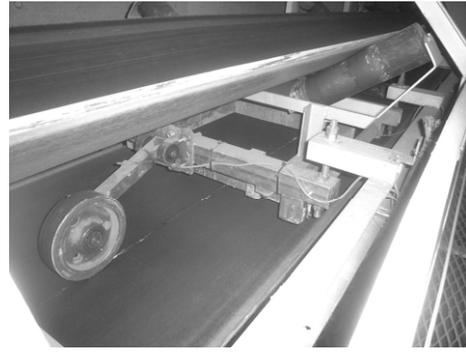


図-9 排土量計測機器

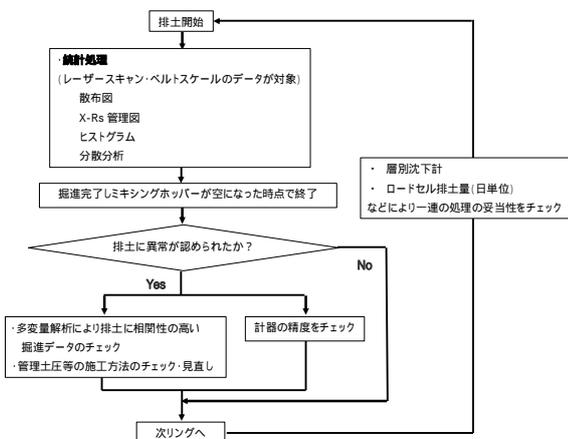


図-10 排土量管理フロー

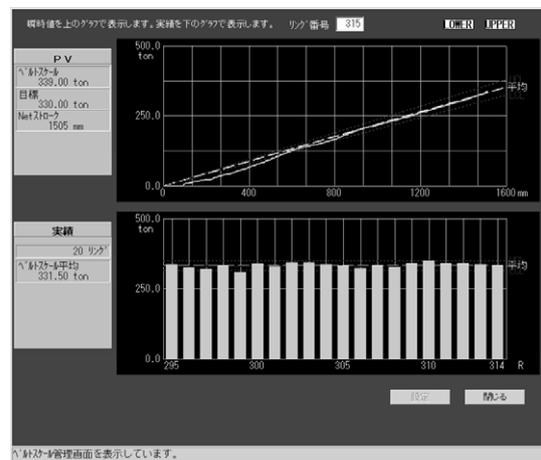


図-11 排土量管理状況

ンバー内の土圧分布状況である。前述した管理土圧を設定して掘進を行った結果、先行隆起・沈下がなく、またシールド通過時の沈下も少なかったため、管理土圧の設定方針は適切であると考えた。現在も同様の管理土圧で掘進を行っている。

なお、テール通過時に最下段の素子が隆起傾向を示しているが、これは裏込め注入による影響と考えられる。

### (3) 排土量管理

シールド掘進においては前述した土圧管理とともに、排土量管理が重要である。

排土量の計測は、延伸ベルトコンベヤの採用により土砂が連続して排出されることから、連続的かつリアルタイムに行う必要がある。ベルトコンベヤを用いた場合の排土量の計測には、重量式、超音波式、レーザー光式といった方法があるが、いずれも精度に課題があったことから土量管理に寄与している例が少ないのが現状である。そのた

め、本工事では以下のような対策を行った。

レーザースキャンとベルトスケールを同一地点に設置し、土砂の体積と重量の両方を計測（図-9参照）。

土砂をベルトコンベヤに定量供給した方が高い計測精度を得られるため、二次スクルーコンベヤと延伸ベルトコンベヤの間にミキシングホッパーを設置。

統計的管理手法により排土量を管理。

排土量管理フローを図-10に示す。

本工事では統計的手法により排土量を図-11に示すようにグラフ化して管理している。管理値としては、過去20リングを対象として警戒限界値を $\pm 2$ （ $\sigma$  = 標準偏差）、管理限界値を $\pm 3$ とした。現在まで安定した計測データが得られ、取り込み過ぎといった排土異常もなく排土管理が行えている。ただし、計測精度を確認・維持するために、キャリブレーションを頻繁に行うなどの対策を行う必要がある。

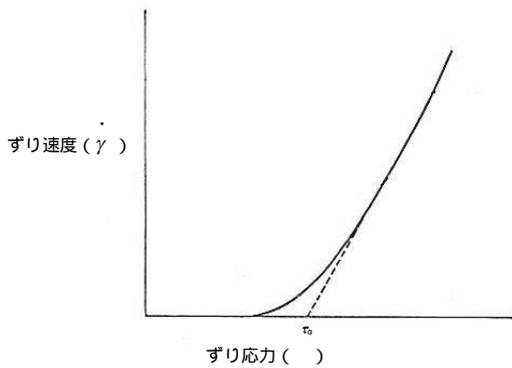


図-12 土砂の塑性流動状態

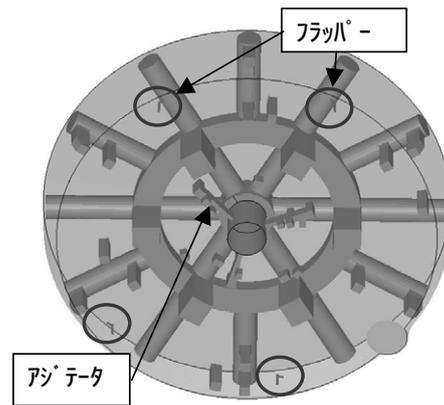


図-13 モデル図



写真-1 計測装置 (フラッパー)

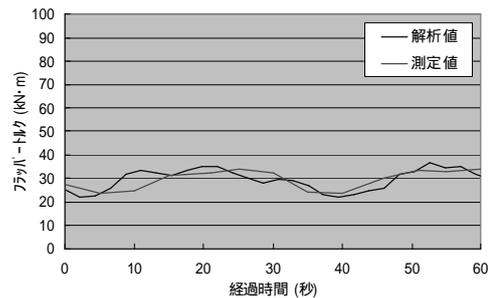


図-14 フラパートルクの比較結果

### 3. チャンバー内可視化技術

#### (1) チャンバー内可視化技術の概要

泥土圧シールドの切羽の安定において必要不可欠である「塑性流動化」とは、図-12 に示すように土砂に生ずる「ずり応力」がある値 ( $\tau_0$ ) を超えると「ずり速度」を発生し流動する状態である。ここに、「ずり応力」とは掘削土に流動(ずりひずみ)を起こさせる単位面積あたりの力で、「ずり速度」とは「ずりひずみ」の単位時間あたりの変化を表すひずみ速度である。

チャンバー内の土砂には、カッターの回転によって「流速」が与えられ、固定翼やアジテータがあることによって「ずり応力」が生じている。チャンバー内の土砂が塑性流動状態にあるならば、「ずり応力」が生じた際、「ずり速度」が発生しているものと考えられる。

今回開発・導入した「チャンバー内可視化技術」は、チャンバー内の土砂の「流速」と「ずり速度」に着目したもので、シールドのチャンバー内をモデル化(図-13 参照)して土砂流動解析を行い、流速とずり速度をシミュレーションして、その結果からチャンバー内の土砂の塑性流動状態を評価するものである。また、シミュレーション精度の

検証を行うために、電動回転式の計測装置「フラッパー」(写真-1 参照)を開発し、バルクヘッド外周部に装備した。このフラッパーは電動モーターで回転し、回転時のトルク変動を計測するものである。フラッパーのトルク変動値とシミュレーションから得られるトルク変動値を比較して、シミュレーション精度を検証する。また、フラッパーのトルク変動値をもとに逆解析を行って、様々な条件下におけるチャンバー内の土砂の状態を評価する。

本技術は、シミュレーション精度を向上させて掘削土砂の塑性流動状態を反映した適切な掘進管理を行うとともに、このシミュレーションを利用して大口径の円形断面だけでなく、小・中口径や、円形断面以外の泥土圧シールドの最適な設計・計画に寄与することを目的としている。

#### (2) 実施工への導入

##### a) シミュレーション精度の検証

実施工への導入にあたって、まず掘進中に計測したフラッパーのトルク変動値と、シミュレーション結果から得られたトルク変動値とを比較してシミュレーション精度の検証を行った。

その結果を図-14 に示す。両者の変動モードと値は概ね一致しており、シミュレーション精度の

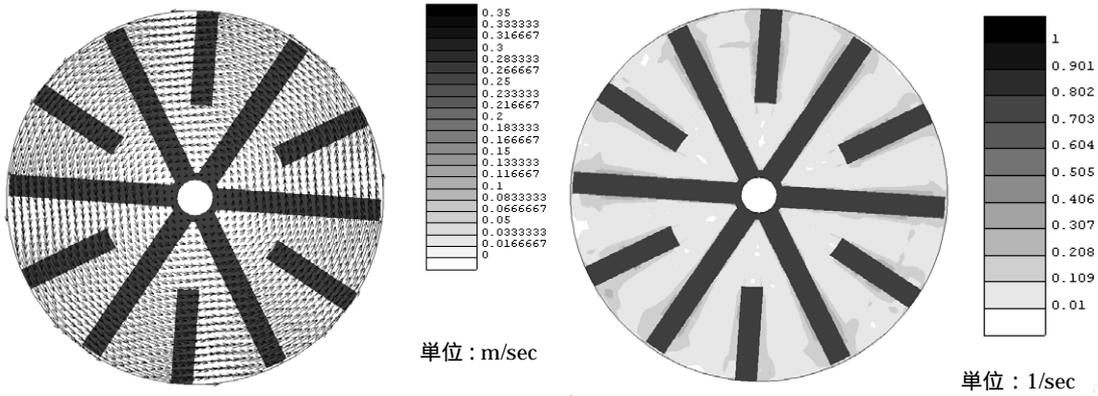


図-15 z=1.7m (カッターフェイス近傍)における流速分布図およびずり速度分布図

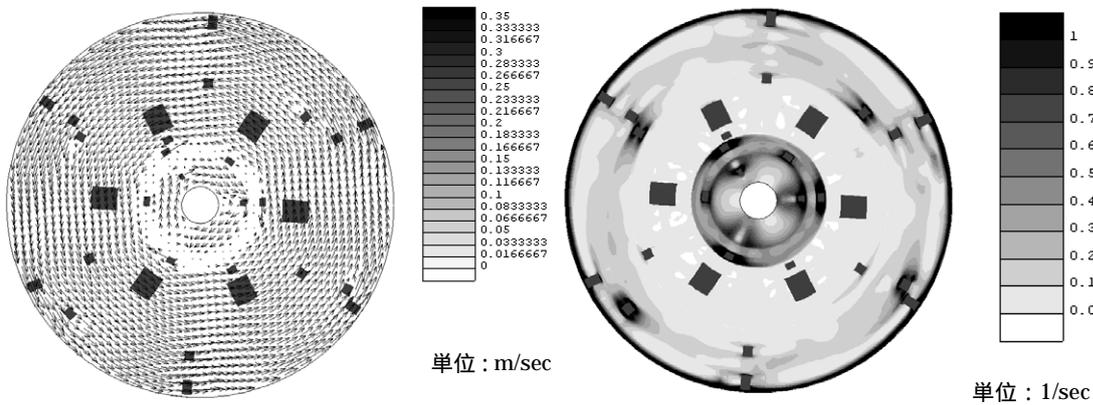


図-16 z=0.9m (チャンバー断面中央)における流速分布図およびずり速度分布図

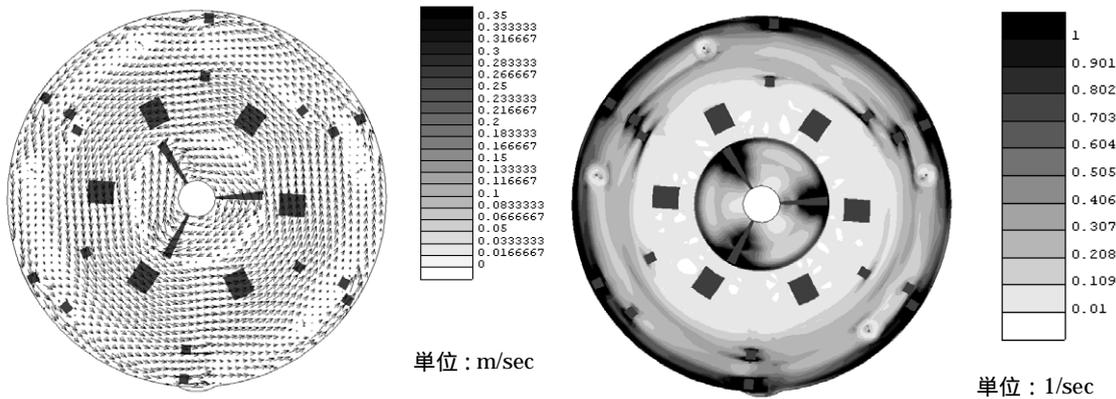


図-17 z=0.45m (バルクヘッド近傍)における流速分布図およびずり速度分布図

妥当性を確認することができた。

b)チャンバー内の可視化

掘進中は、スクリーコンベヤからの土砂の噴発もなく切羽を安定させた状態で掘進を行った。この時、チャンバー内の土砂は掘進状況から推察すると塑性流動化が図られていたと考えられる。掘進時のチャンバー内の状態をシミュレーション

した結果を以下に示す。

図-15～17は、カッターフェイス近傍( $z=1.7\text{m}$ ,  $z$ :バルクヘッドからの距離)、チャンバー中央付近( $z=0.9\text{m}$ )、バルクヘッド近傍( $z=0.45\text{m}$ )の3断面において、流速分布(左図)とずり速度分布(右図)を示したものである。流速はベクトル量であり、矢印の大きさと向きによってどの向き

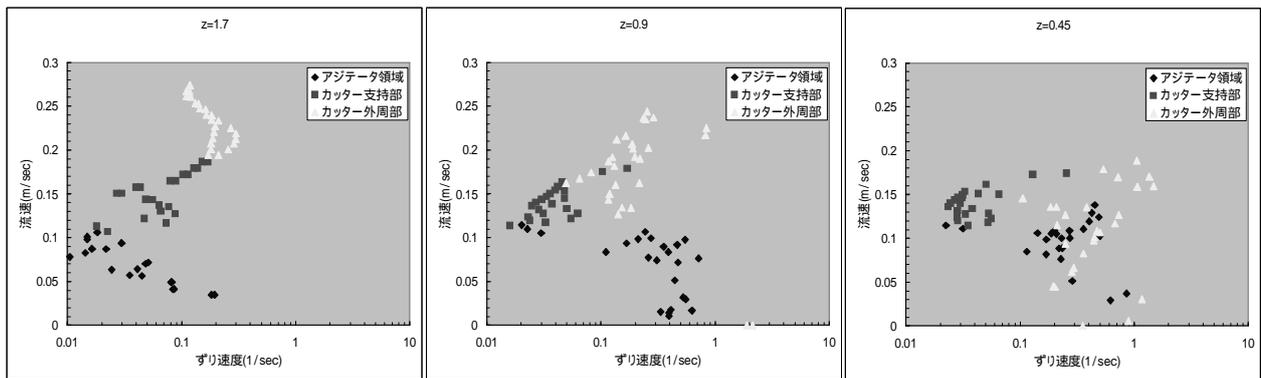


図-18 各断面における流速とずり速度の関係

にどれくらいの流速が発生しているかを示している。一方ずり速度はスカラー量であり、色の濃淡により大きさを表現している。

シミュレーションの結果、横断方向で見ると、流速及びずり速度の分布は一様でなく、外周側、カッター支持部付近、アジテータ周辺で分布の相違がみられている。また、縦断方向で見ると、カッターフェース付近からバルクヘッド付近に近づくに連れて、流速とずり速度の分布が変化している傾向がみられた。

図-18 は、縦軸に流速 (m/sec)、横軸にずり速度 (1/sec) の対数をとって、任意の点における流速とずり速度をプロットしたものである。左図から  $z=1.7\text{m}$ 、 $0.9\text{m}$ 、 $0.45\text{m}$  の断面における分布状況を示している。また、横断方向の領域を、アジテータ領域 ( $0 \sim 1/3R$ 、 $R$ : シールド半径)、カッター支持部 ( $1/3R \sim 2/3R$ )、外周部 ( $2/3R \sim 1R$ ) に大別して、流速とずり速度の関係をプロットしている。

カッターフェース付近 ( $z=1.7\text{m}$ ) からバルクヘッド付近 ( $z=0.45\text{m}$ ) に近づくに連れて、プロットした点がグラフ中央付近に推移していく傾向がみられている。特にアジテータ領域においては、ずり速度の増加傾向が顕著にみられている。

こういった傾向から、チャンバー内においてはバルクヘッドに近づくに連れて、固定翼やアジテータの効果により掘削土砂の塑性流動化がなされ

ていると考えられる。また、実施工においては排土状況が良好で切羽の安定が図れていたことを考慮すると、本解析結果はチャンバー内の土砂が適切に塑性流動化している場合をシミュレーションした一例と位置付けることができると考えられる。

### (3)今後の展望

現在、掘進土質が変化する代表的な断面毎に、シミュレーションを行い、チャンバー内の土砂の状態を評価している。

本工事を通じてシミュレーション精度の向上を図り、掘削土砂の塑性流動状態を反映した適切な掘進管理を行うとともに、シミュレーションを利用して大口径の円形断面だけでなく、小・中口径や、円形断面以外の泥土圧シールドの最適な設計・計画に寄与する技術としての確立を目指す予定である。

## 4. おわりに

本工事では大断面泥土圧シールドの様々な対策を行ったが、平成 17 年 2 月現在まで、シールドは約 1,400m を順調に掘進することができた。今後は、橋脚基礎、既設シールド、鉄道、河川といった近接構造物も多くなるが、これまで培ってきた掘進管理技術を活用し掘進を行っていく所存である。