

長距離大断面泥土圧式シールドトンネル における技術的課題とその対応について

近藤 竜平¹・湯田坂 幸彦²・米沢 実³・梶川 初太郎⁴

¹正会員 首都高速道路(株) 東京建設局品川線工事事務所 (〒141-0032東京都品川区大崎5-4-3)
E-mail: r.kondo156@shutoko.jp

² 首都高速道路(株) 東京建設局品川線工事事務所 (〒141-0032東京都品川区大崎5-4-3)
E-mail: y.yudasaka1414@shutoko.jp

³正会員 鹿島・熊谷・五洋中央環状品川線シールドトンネル(北行) 工事特定建設工事共同企業体
(〒140-0003東京都品川区八潮1-3) E-mail: yonezawm@kajima.com

⁴ 鹿島・熊谷・五洋中央環状品川線シールドトンネル(北行) 工事特定建設工事共同企業体
(〒140-0003東京都品川区八潮1-3) E-mail: kajikawa@kajima.com

本工事は、延長約8kmの長距離大断面トンネルを1台のシールドマシン(外径Φ12.55m)によって構築するものである。シールド通過土層はほぼ全線にわたり、非常に硬質な粘性土層主体であることから、その確実な掘削断面の確保とチャンパー内の塑性流動性の確保、また、多数の重要構造物と交差することから、他インフラ及び路面・近接構造物への影響を及ぼさない掘進管理が必要となる。また、長距離・高速掘進に対応した各設備の耐久性、能力の確保と、適切な維持管理が必要となる。

Key Words : mega long distance tunnel, EPBM method, tunneling nearby adjacent structures

1. 工事概要

現在、首都圏で進められている高速道路ネットワークは、図-1に示すように9つの放射道路と3つの環状道路で構成される。3環状道路の最も内側に計画されている首都高速中央環状線は、都心から約8kmに位置する総延長約47kmの自動車専用道路であり、中央環状線の東側・北側区間は約26kmで、主に高架構造で建設され、2002年度までに順次開通している。

西側区間の首都高5号池袋線から湾岸線までは、ほぼ全線がトンネル構造となっている。5号池袋線～4号新宿線間(6.7km)は2007年12月に、4号新宿線～3号渋谷線間(4.3km)は2010年3月にそれぞれ開通し、現在、3号渋谷線から湾岸線までの区間(9.4km)の中央環状品川線(以下、品川線)を建設中であり、品川線の開通により中央環状線が完成することとなる。

品川線は起点の品川区八潮3丁目で湾岸線から分岐したのち、目黒川および都道環状第6号線(山手通り)の地下を通過し、目黒区青葉台4丁目で供用中の3号渋谷線と中央環状新宿線(山手トンネル)に接続する路線である。

本シールド工事は、図-3に示すように品川区八潮に位置する大井北発進立坑から目黒区青葉台に位置する大坂

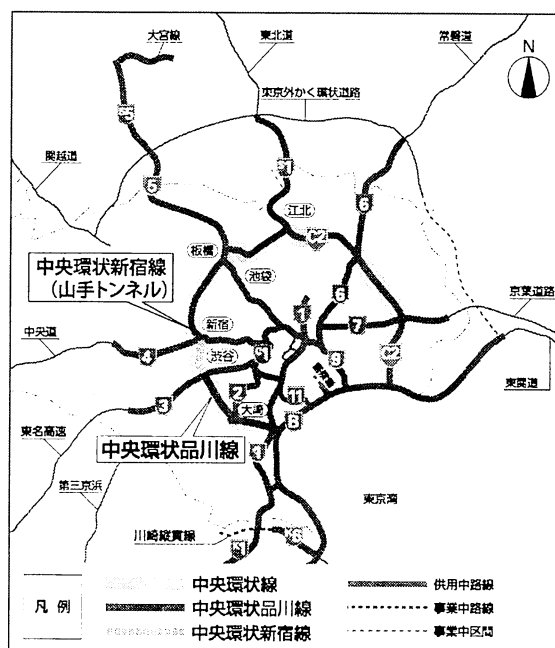


図-1 首都圏高速道路ネットワーク図

橋連壁までを泥土圧式シールドでトンネルを構築するものである。シールドは大井北立坑を発進し、京浜運河を横断、目黒川下を北上し、大崎駅付近からは山手通り下を国道246号線大橋付近まで掘進する。周辺地域の開発

表-1 工事概要

工事名		中央環状品川線 シールドトンネル(北行)工事	
工事場所		東京都品川区八潮一丁目～ 目黒区青葉台四丁目	
施工者		鹿島・熊谷・五洋中央環状品川線 シールドトンネル(北行)工事 特定建設工事共同企業体	
シールド延長		8,030m	
シールドマシン	外径	φ 12.55m	
	工法	泥土圧式シールド工法(気泡シールド)	
セグメント外径		φ 12.30m	
RCセグメント	幅/桁高	1,200mm,1,500mm,2,000mm/400mm	
	種類	耐火機能一体型RCセグメント (ワンタッチ締結式継手)	
床版	構造	鋼コンクリート合成構造	
	長さ/厚さ	8,350mm / 320mm	
	施工方法	シールド掘進と内部構築の同時施工	

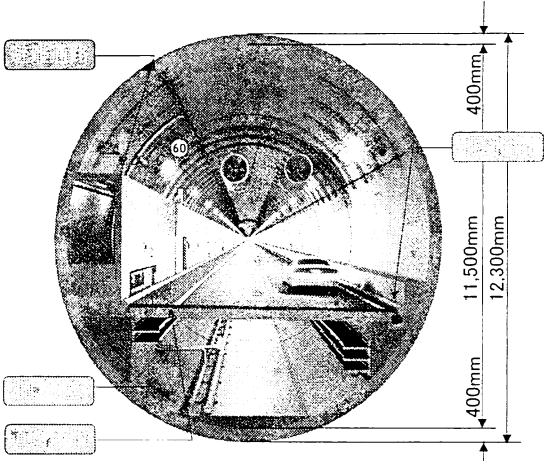


図-2 トンネル概要図

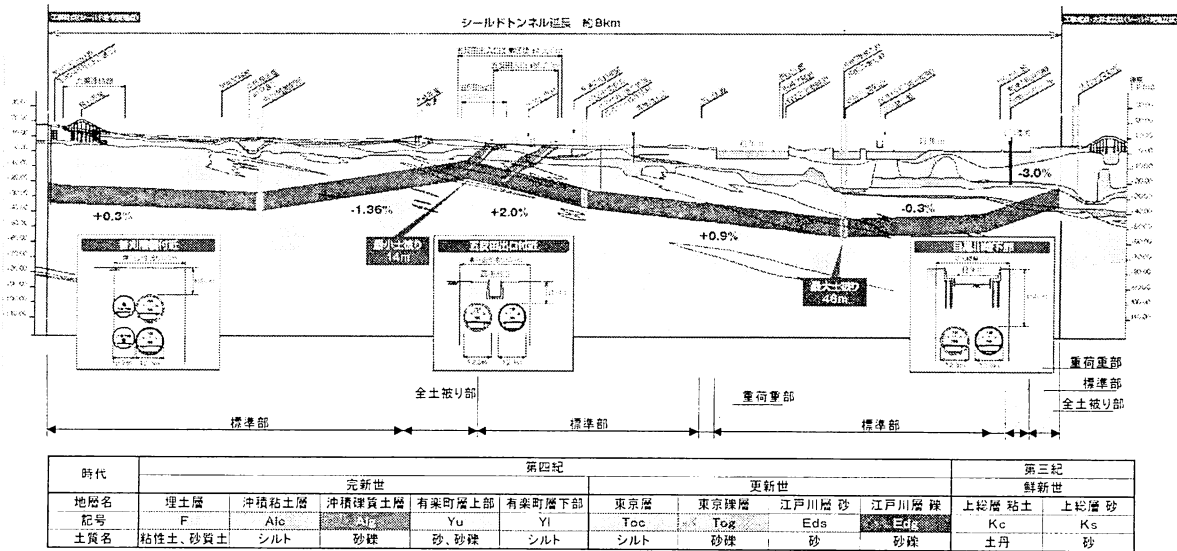


図-3 トンネル地質縦断面図

状況から中間立坑を設けずに約8.0kmの長距離掘進を行う計画であり、大井行きシールド（東京都施工）が離隔3mの位置に併設して施工される。また、到達近傍の菅刈陸橋以降は、上下併設となり、大橋連結路切開区間ではランプシールドを含め4本のシールドが近接することになる。

シールドトンネルの土被りは、南品川換気所付近で最大約46m、五反田出入口付近で最小約14mである。また、トンネルの最小曲線半径は大橋ジャンクション付近のR235mであり、約8kmの長距離掘進区間に国道1号線や東急池上線等、多くの交差物件が存在している。

発進部のシールド通過土層は互層となっており、上部に東京礫層（Tog）、中部、下部に江戸川層砂（Eds）及び江戸川層礫（Edg）が存在する。発進部付近は、シルト層を挟んで、上部20%が東京礫層（Tog）、下部60%程度が江戸川層砂（Eds）となっている。発進時の線形は下り勾配3.0%となっており、上部の東京礫層（Tog）は、掘進距離100m付近で通過断面から姿を消し、下部から

江戸川層礫（Edg）が出現する。この礫層（Edg）は層厚が1～2m程度と薄く、直ぐに下部から上総層粘土（Kc）が姿を現し、掘進距離が370mを超えると、通過断面のほぼ全てが上総層粘土（Kc）となる。以降、到達地点まで上総層粘土（Kc）が主体となるが、所々に介在砂層（上総層砂（Ks））が出現する。

2. シールド掘進に関する課題

本工事のシールド掘進に関する重要課題は以下のとおりである。

- ① 硬質な粘性土層掘進時のチャンバー内の塑性流動性の確保と閉塞の防止。
- ② 適切な掘進管理による周辺構造物（近接構造物）への影響の低減。
- ③ 長距離・高速掘進を可能とするため、シールドマシン等の各設備の耐久性向上と、各設備の能力の確保

と適切な維持管理。

重要課題に対する留意点を以下に述べる。

(1) 土質

発進部の60%を占める土層である江戸川層砂（Eds）は砂分を90%含み、均等係数もUc=3.22と小さく含水比は23%である。また掘削断面の上部の東京礫層（Tog）は、60～70%が礫成分、シルト・粘土分は数%となっており、バインダー分が少なく、N値=50の比較的硬質な地盤である。

掘進延長L=370mから、主体となる上総層粘土（Kc）は硬質な泥岩層であり、含水比は30%前後となっている。介在砂層（上総層砂（Ks））は、過去の工事資料によると透水係数は平均 $6.14 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 、最大値が $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ となっている。また地下水位も東京礫層（Tog）とほぼ同等となっていることから、両層の水位は連動していることが考えられる。

(2) 重要構造物

発進時に東海道新幹線の回送線が影響範囲になることをはじめとして、交差物件は鉄道14本、共同溝、道路陸橋等の構造物を入れると27箇所となる。以下に重要構造物の一覧を示す。全体的には安定したKc層であることから、補助工法を施したところはなく、適正な土圧管理、余掘り管理、裏込め注入管理等にて、慎重な施工を期す方針とした。表-2に重要構造物一覧を示す。

(3) 長距離掘進

約8.0kmの長距離掘進となることから、シールドマシンを始め、各設備の耐久性の確保及び月進400m以上の高速掘進に対応できる設備計画とした。シールドマシンには、発進時の仮壁撤去及びL=370mまでの砂礫層とその後の硬質な粘土層の両方に対応するビットが求められる。また、メインベアリングや土砂シールに加えてテールシールやスクリーコンベヤーの耐久性も求められる。

(4) 高速掘進

高速掘進への対応としては、掘進速度、セグメント組立速度の向上に加え、セグメント搬送設備、土砂搬送設備等の能力の確保と安定した稼働率を確保するためのメンテナンス計画が重要となる。

3. シールド掘進課題への対応技術

前述の重要課題に対する当工事での取り組みについて以下に述べる。

表-2 重要構造物一覧

対象施設	最小離隔	
	平面	縦断
JR東海	東海道新幹線(近接部)	13.9
	東海道新幹線(交差部)	26.0
JR東日本	東海道線・京浜東北線	25.4
	横須賀線・山手線	22.7
	山手線	37.1
東急電鉄	池上線	33.3
	目黒線	1.9
	東横線	35.1
	田園都市線	29.4
東京メトロ	日比谷線	35.1
京急電鉄	京浜急行線	3.8
東京モノレール	東京モノレール	9.8
東京臨海高速鉄道	りんかい線	5.8
東京都交通局	浅草線	18.0
東京都建設局	目黒川護岸	38.5
河川部	目黒川護岸	30.6
国土交通省 関東地方整備局	国道357号線バイパス	22.2
	国道15号線	23.4
	国道1号線	30.2
	国道246号線	38.7
東京都 第二建設事務所	大崎陸橋	22.8
	大島陸橋	12.6
	中目黒立体	28.5
	菅刈陸橋	29.5
東京都港湾局	京浜運河護岸	6.8
港湾経営部、 港湾整備部	天王洲運河護岸	24.8
	天王洲南運河護岸	14.5

(1) 土圧管理値の設定とチャンバー内塑性流動性の確保

a) 土圧管理値の設定

掘進管理に用いる土圧としては、静止土圧・主働土圧・予備圧が挙げられ、それぞれ表-3に示す特徴を持つ。

当工事で用いる管理土圧は、以下の範囲で設定する。

最小値 主働土圧+間隙水圧+予備圧 (20KN/m2)

最大値 静止土圧+間隙水圧+予備圧 (20KN/m2)

$$\text{最小値} \leq \text{管理土圧} \leq \text{最大値}$$

- 主働土圧係数：ランキン・レザール式を用いる
- 静止土圧係数：「トンネル標準施工方書[シールド工法編]・同解説」表2.2を用いる。

大断面・大深度シールドである本工事において、安定した高速施工と出来形品質を確保するためには、セグメントやマシンに必要以上の過大な負荷をかけないことや、周辺環境に対するシールド掘削の影響を最小限に抑制することが重要である。切羽圧力管理値の設定に対する留意点は以下の通りである。

- ① 切羽圧力は必要以上に高く設定しない。
- ② 地表面や近接構造物への影響が懸念される施工条件の場合、切羽面の掘削解放による影響を最小とする切羽圧を設定する。

上述の事項を念頭に置いた上で、施工条件を考慮した区間ごとの切羽圧力の設定を表-4に示す。

表-3 土圧の種類

土圧の種類	土圧の定義	特 徴
静止土圧	土中の自然状態における土圧で、掘削により開放される圧力	切羽面の変形が最も少ない管理値であるがチャンパー内土砂の圧密を発生させる恐れがある。
主働土圧	切羽が崩壊する直前の圧力	管理値の最小値であり、切羽土圧がこの値を下回ると切羽を緩める可能性がある。

表-4 切羽土圧管理一覧

区分概要	切羽圧力の設定思想【管理位置】
	下限圧力の設定思想【管理位置】
軟弱な有実可層粘性土 (Y1層)直下のTog層, Eds層, Edg層	「基本設定値」【切羽上端】 =「静止土圧」+「間隙水圧」+「予備圧(20kPa)」
	「下限設定値」【切羽上端】 =「主働土圧」+「間隙水圧」+「予備圧(20kPa)」
全断面が上総層群泥岩 (土丹)	「基本設定値」【トンネル中心】 =「定常状態の切羽圧」+「予備圧(20kPa)」
	「下限設定値」【トンネル中心】 =「100kPa」(ただしトンネル上端で主働以上)
上総層群泥岩(土丹)と板 状砂層が出現し、東京砂 層(Tog)からの地下水 が流入される区間	「基本設定値」【トンネル中心】 =「定常状態の切羽圧」+「予備圧(20kPa)」
	「下限設定値」【トンネル中心】 =「間隙水圧」+「予備圧(20kPa)」

b) 塑性流動性の確保

泥土圧シールド工法では、掘削土砂が不透水性と塑性流動性を持つ泥土状態にあることが原則である。過去の事例から、上総層群泥岩層は含水比も低く粘着性が高いため、チャンバー内の土砂の付着が起りやすく、土圧計周りに土砂が付着すると土圧計表示が誤値となり適正な土圧管理ができなくなることが知られている。

また土砂の付着が大きくなるとアーチング現象などにより、カッタートルクの異常上昇や排土不能による掘進停止等のケースも報告されている。そのため適切な添加材を選定し、掘削土が適切な状態を保つように管理することが重要となる。

塑性流動化の適正化管理は以下の方法により行う。

塑性流動性確保のため添加材として、気泡材を使用する。また、スクリーコンベヤーに注入する止水材として高分子凝集剤を使用する。そのため、スクリーコンベヤーに添加剤注入口を設置した。(図-4)

チャンバー内の塑性流動性を確保するためにスポークに撹拌抵抗測定システムを設置し、これにより、チャンバー内の塑性流動状況を把握する。(写真-1)

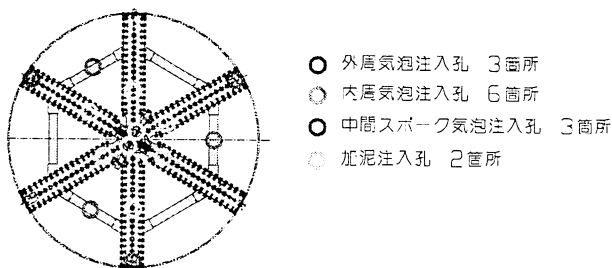


図-4 気泡注入位置図

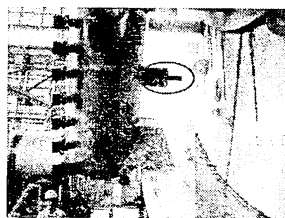


写真-1 撹拌抵抗測定器
カッタートルク、チャンバー内土圧、スクリーコン

ベヤートルク等のデータから、塑性流動状態、固着状態を把握し、添加材の配合及び注入率の適切な管理を行う。

(2) 重要構造物

多数の重要構造物交差物件があるが、全体的には安定した上総層粘土(Kc)層内であることから、補助工法は施工していない。重要構造物への影響を最小限に抑えるために、適正な土圧管理、排土量管理、余掘り管理、裏込め注入管理等が重要となる。前述の切羽土圧の設定において、重要構造物影響区間は、土質の急変に備えて介在砂層が存在する区間とした管理値の設定を行った。

また、排土量の管理は切羽後続台車上のNo.1ベルコンにベルトスケールとレーザーによる容積計測の2種類の装置を設置することで、排土量の変化をリアルタイムに把握できるようにした。

一方、裏込め注入はセグメントからの即時注入方式とした。注入箇所は1リング当たり2か所とし、テールボイド量は余掘り量を含めて自動計算し、適切な注入率(下限値:100%)を確保できるようにした。

(3) 長距離掘進

a) カッタービット

センターカッター部も含めた先行ビットの全数を交換回数に制限のないリレービットとし、万が一の異常磨耗や損傷に対するリスクを回避した。また、先行ビットの全軌跡配置により、交換できないティースビットの磨耗リスクを大幅に低減した。(図-5)

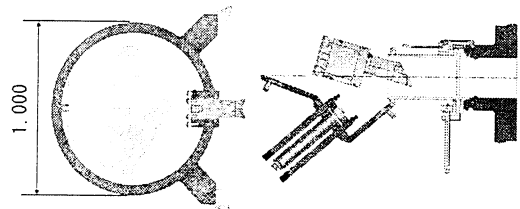


図-5 リレービット概要図

リレービットの特徴を生かして、発進部のNOMST壁および砂れき層ではNOMST用先行ビットで掘進し、砂れき層を通過した初期掘進終了後に、土丹層掘進用のビットに交換して掘進することとした。

b) スクリーコンベヤー

長距離掘進時に摩耗・損傷が懸念される部位として、スクリーコンベヤーが挙げられる。耐摩耗対策として、先端部のオーガー及びケーシング内側には耐摩耗鋼板を貼り付け、それ以外はオーガー部にハードフェーシングを施した。スクリーコンベヤーは、カッタービットのように各土層別に摩耗係数データが蓄積されておらず、寿命を予測することが困難であったため、スクリーコン

ベヤー先端部にゲートを設置しゲートを閉めて、スクリーコンベヤーを後方に引き抜ける構造とし、切羽の安定を保持したまま、安全にスクリー先端部のケーシング及びオーガーの補修・交換が行なえる設備とし、スクリーコンベヤーの磨耗・損傷によるリスクの低減を図った。

(4) 高速掘進

a) 坑内搬送設備

シールド掘進に並行して内部構築工を行い道路床版を構築することとした。そのため、シールド坑内の物流を上下に分離し、上半部は汎用車両による生コンクリートの運搬、床版構築以降に使用する資材の運搬と連続ベルコンによる土砂運搬、下半部はタイヤ式搬送台車によるセグメントおよび鉄筋、床版パネル等の運搬とした。

上下に分離した坑内搬送に対応するために、立坑部に55t 資材リフトを設置した。下半部には専用の台車にてセグメントを4ピース一度に搬入し、床版パネル等も同じ台車で搬入できる設備とした。一方、15t 車までの車両をそのまま積載することも可能であり、上半部には地上から直接坑内に車両を搬入できるようにした。これにより、効率よくトンネルの上半部、下半部それぞれに資材の搬出入が行える設備とした。（図-6）

セグメント搬送設備は、最大日進量 30m/日、土砂搬出設備は最大掘進速度 40mm/分に対応できる設備計画とした。セグメント搬送能力確保のため、1 リング分を一括で高速運搬できるタイヤ式搬送台車を開発し適用した。坑内への枕木設置を省略するため、搬送台車をタイヤ式にし、センター部のみに軌条を敷設するセンターレール方式を採用した（写真-2）。

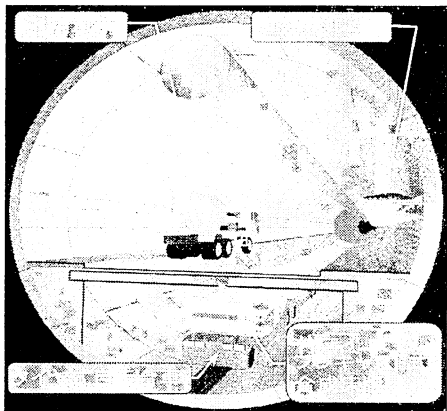


図-6 坑内搬送設備概要

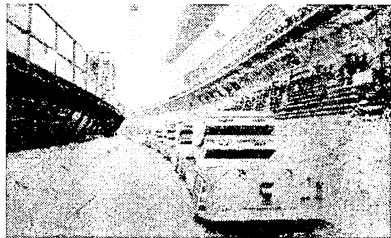


写真-2 タイヤ式搬送台車

b) 同時掘進システム

本工事では、サイクルタイムの短縮を図るために同時掘進システムを採用した。K セグメントの軸挿入代を利用して、掘進後半から 5 ピース程度を掘進と同時に組立てることを目標とした。掘進速度をあまり高く設定することなく、掘進・組立サイクルタイムの短縮が可能であり、大断面シールドの高速施工に最適なシステムである。

本システムは、各シールドジャッキの圧力を個別に制御することでセグメント組立時の各ジャッキの圧力バランスを最適に保ち、姿勢制御、セグメント組立時施工時荷重の影響を及ぼすことなく、掘進と同時にセグメント組立を行うものである。

また、通常掘進時においても各ジャッキの圧力コントロールにより姿勢制御を行なうシステムとし、曲線区間においても全ジャッキ押しによる掘進を行い、施工時荷重によるセグメント損傷防止を図った。

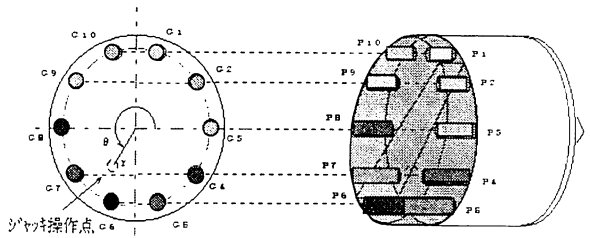


図-7 圧力制御概念図

4. シールド掘進課題への対応結果

(1) 土圧管理値の設定とチャンバー内塑性流動性の確保

前述の管理値に基づき掘進を行ったが、事前の土質調査から、全断面が上総層群泥岩層と予想されていた区間にも多くの介在砂層が存在し、それぞれが高い地下水压を有していた。そのため、高い切羽土圧を保持したまま掘進せざるを得ない状態となり、チャンバー内の塑性流動性の確保とスクリーコンベヤーからの噴発防止という相反する課題を克服しながら掘進することとなった。

各土質における代表的な土圧管理値の実績を表-5 に示す。

表-5 土圧管理実績

区分概要	切羽土圧実績
軟弱な有楽町層粘性土 (Y1層) 直下の Tog 層, Eds 層, Edg 層	{主動土圧}+「間隙水压」+「予備圧 (20kPa)」
全断面が上総層群泥岩 (土丹)	「間隙水压」+「予備圧 (20kPa)」
上総層群泥岩 (土丹) と被圧砂層が出現し、東京磯層 (Tog) からの地下水供給が懸念される区間	{定常状態の切羽圧}+「予備圧 (20kPa)」

「定常状態の切羽圧」とは、
当日 (当方) の掘進開始直前における切羽圧力 (定常状態での短期平衡圧)

また、チャンバー内の塑性流動化の確保については、チャンバー内攪拌抵抗測定システムやカッタートルク、推力に留意しながら、気泡材の注入量を管理した結果、非常に良好な結果が得られた。

チャンバー内攪拌測定システム管理画面を以下に示す。攪拌抵抗値をカッターの回転とリンクさせてレーダーチャートで表示するシステムとした。掘削土砂の流動性が均一であるかを視覚的に判断することができ、チャンバー内の抵抗値のバラツキを早期に把握し、気泡材注入量の管理に反映させた結果、上総層粘土 (Kc) 層においても、高い掘進速度を維持したまま、カッタートルク、推力を管理値以内に収めることが出来た。(図-8)

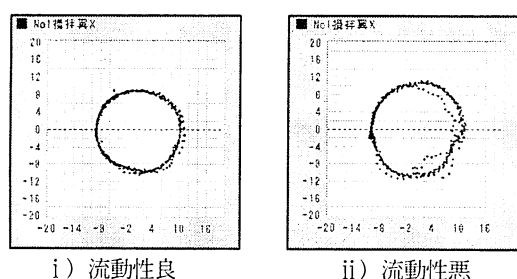


図-8 チャンバー内塑性流動監視システム画面

一方、被圧された介在砂層の掘進については、高分子系凝集材をスクリュウコンベヤーより注入し、スクリュウコンベヤー内に脱水された土砂でプラグ止水ゾーンを形成することにより、噴発を防止しながら掘削を行った。その結果、非常に良好な噴発防止効果が得られ、安定した掘進を行うことが可能であった。

噴発防止対策を行いながら掘進した区間は、当初安定した上総層群泥岩層であると予測した区間のうちおよそ22%であった。

(2) 重要構造物

前述のように数多くの重要構造物と交差するが、切羽土圧の管理は、介在砂層の存在を前提とした下限値設定とした他、適切な排土量管理、余掘り管理、裏込注入管理等を実施することにより、全ての構造物において計測許容値未満で無事シールドを通過させることができた。

排土量管理は、ベルトスケールを主体に行った。ベルトスケール値からの掘削土量の換算には地山の比重を正確に把握する必要があるが、それ以外の誤差をほとんど生じないため、近傍の掘削リングとの比較においては、掘削土量の過不足を正確に把握することが可能であった。

一方、レーザーによる容積計測では、土丹塊の存在や介在砂層による泥濘化等の影響による誤差が大きく、排土量管理に使用することは困難であった。

余掘り量は、事前の線形シュミレーション値により設定したが、重要構造物影響範囲では最低限の余掘り量で

の掘進を行い、裏込注入は、硬質な粘性土層であっても100~110%を目標として行った。

(3) 長距離掘進

a) カッタービット

本工事では、センターカッター部分に2回トラブルが発生し、長期掘進停止を余儀なくされた。

1回目は発進時のNOMST掘進時であり、センターカッター部のビット折損により、センターカッター部が大きく損傷することとなった。損傷したセンターカッター部を交換し、再発進したが、約3,200m掘進した時点で再びセンターカッターのトラブルが発生した。センターカッター部のビットが母材溶接部から脱落したものであり、凍結工法による大規模な地盤改良を行い、再びセンターカッター部の交換作業を行った。センターカッター部近傍のスプーク上の先行ビットには全く異常が発生しておらず、センターカッター部に限定された特異な現象であった。これらによる掘進停止期間は11ヶ月に及んだ。

先行ビットは、リレービット構造であることから、任意の時期にビットの点検が可能であった。点検の結果、スプーク上の先行ビットは、チップには異常が見られなかったが、中間スプーク付近のビットは、母材部分の摩耗が進んでいるものが見られた。

b) スクリューコンベヤー

スクリュウコンベヤーは、適切なトルク管理を徹底した結果、定期的な摩耗計測によるハードフェイシングの追加・補修を行ったのみで、問題なく掘進することが可能であった。

(4) 高速掘進

同時掘進システムのサイクルタイム短縮効果を図-9に示す。同時掘進によって、2.0m幅のRCセグメントにおいては、1リングの掘進・組立時間を100分から78分に短縮できている。(図-9)

当初は、同時掘進システムは直線区間(RCセグメント幅:2.0m区間)にのみ適用する予定であったが、短縮効果が大きいことと直線区間での適用結果が良好であったことから、曲線区間への適用システムを新たに追加開発し、すべての施工線形に対して同時掘進が可能なシステムとして確立した。

本システムを適用した最少曲線はR=235m(RCセグメント幅:1.2m区間)である。適正な中折れ角と余掘り量を確保した状態であれば、ジャッキ圧力差をほとんど発生させずに曲線掘進を行うことが可能であり、本システムを問題なく適用できた。

その結果、掘進進捗は全体を通して稼働日平均日進量は16.6m、月進換算(25日)は414mを達成した。

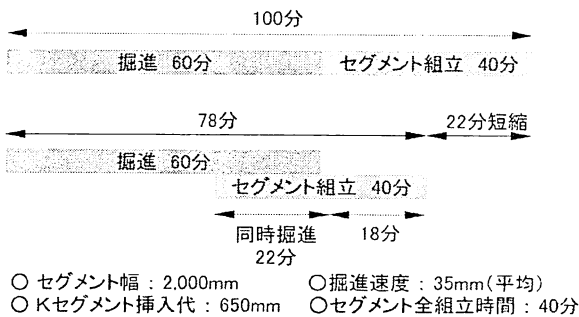


図-9 同時掘進サイクルタイム

これは、鋼殻等の特殊部を含む結果であり、RC 区間が連続した区間では、2011 年 12 月に掘進距離 7,000m 地点で月進 708m を達成した。

5. シールド掘進課題への考察と今後の課題

(1) 土圧管理値の設定

本工事では上総層群泥岩層での土圧管理値として最低 100Kpa まで下げることが計画していた。これは、チャンバー内を土砂で充填せず、いわゆる透かし掘りを行う、TBM のような発想である。しかしながら、実際は被圧された介在砂層が予想以上に多く存在しており、このような掘削方法を行うことは不可能であった。また、到達近傍では安定した上総層粘性土（Kc）層が出現することは大橋 JCT 工事の立坑掘削時に確認していたが、東京都シールドが 3m の離隔で直上に位置していたことから、上層シールドへの影響低減を優先させ、介在砂層が存在する区間として切羽土圧管理値の設定を行った。

今後の、大深度・長距離シールドの施工を考慮するとシールドマシンへの負荷軽減、セグメント施工時荷重の軽減等に有効であると思われるが、突然土質が急変するリスクは常に考慮しておく必要があり、前方の介在砂層の探知方法の確立等が求められる。

(2) チャンバー内塑性流動性の確保

表-6に代表的な地山条件と加泥条件、その時の所要カッタートルクに対する発生カッタートルクの割合を示す。発生カッタートルクは所要トルクのほぼ70%以内に収めることができた。

表-6 代表的な地山条件と加泥条件、カッタートルク発生割合

地山条件	リングNo	加泥条件			所要カッター に対する 発生割合
		気泡		加水	
		発泡倍率	注入率	加水率	
全断面 Kc	3802～3811	13.1倍	71.4%	5.7%	72%
25% Ks	3520～3529	11.7倍	30.4%	2.1%	63%
50%以上 Ks	3170～3179	16.8倍	23.4%	1.9%	52%

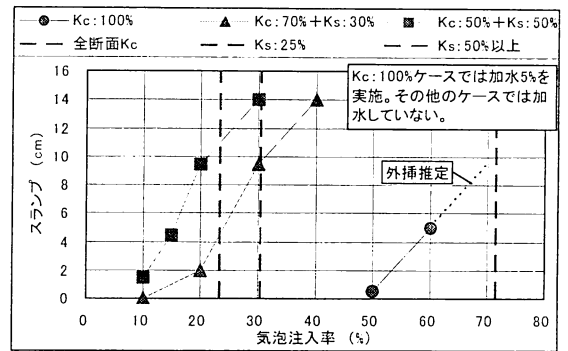


図-10 気泡注入率とスランプの関係

表-7 構造物変位量

	FEM解析値	実沈下量
JR東海 新幹線	-0.9mm	-0.51 mm
JR東海道線・京浜東北線	-0.7mm	-1.59 mm
JR山手線・横須賀線	-1.3mm	-1.24 mm
京浜急行	-1.1mm	-1.49 mm
八潮共同溝	-1.6mm	-1.30 mm
都営浅草線	-3mm	-1.60 mm

図-10にシールド掘進前に実施した加泥材の配合試験結果を示す。図中には実施工での気泡注入率を破線で示している。実施工と配合試験では若干ではあるが加水の有無、Kc層とKs層の割合の違いがあるが、実施工での気泡注入率に対するスランプは10cm程度と推定される。

泥土圧シールドにおいて、塑性流動化された泥土のスランプ値としては概ね15cm程度以内が適切と考えられている¹⁾。スランプ10cm程度というのは概ねこれに合致しており、加泥材としての気泡の効果が十分に発揮され、その結果、カッタートルクも安定的に低く抑えられたと考える。

(3) 重要構造物

前述した施工管理の徹底により、各構造物の変位量は計測管理値以内であったが、一部事前のFEM解析値を超える沈下量も発生した。これは、解析時の土質条件を上総層粘土（Kc）としていたものに対し、実際は介在砂層が存在したことによる影響等が考えられる。表-7に各解析値と変位量に実測値の対比を示す。

(4) 長距離掘進

a) カッタービット

現在シールドマシンは、解体作業を行っておらず残地された状態であり、カッタービット、スポーク等の摩耗状況等が確認できていない。シールドマシンは2012年中には解体する予定であり、改めて状況等についてまとめたいと考えている。掘進途中でスポーク上の先行ビットの点検を行った際に、当初想定していなかった母材部分の摩耗が進行しているものが確認された。通常ビットの摩耗は摺動距離が長い外周側が大きいですが、母材の摩耗は中間スポーク付近の摩耗量が大きいという結果が得られ

た。これに対し、ビットチップ部分の摩耗は外周側が大きく想定通りの結果であった。

中間スポーク部分のビット母材の摩耗量が大きい理由としては、カッター前面の切削土砂がチャンバー内に取り込まれる際の、土砂の流れ方やカッター前面の圧力差等が関係していると推測される。チャンバー内の土砂流動モデルを作成し、解析で再現できないか試みたが、状況を再現できるような結果は得られなかった。今後、解体後にスポーク部材等の摩耗状況も踏まえ、再度、解析したいと考えている。

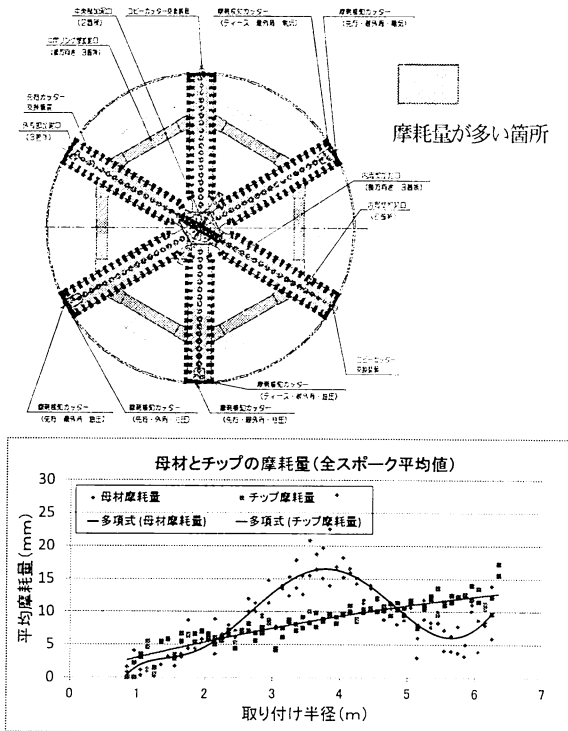


図-11 カッタービット摩耗量

b) スクリューコンベヤー

スクリューコンベヤーもまだ解体していないため、先端部の状況を確認するには至っていない。解体時にオーガーやケーシングの摩耗量を調査することで貴重なデータが得られると期待している。

(5) 高速掘進

本工事における最大月進量は月進708mであると言える。また、日進量は38m/日を記録している。本工事では土砂運搬はすべて10tダンプにて行った。土砂発生量は4,500m³/日であり、ダンプは搬出入は延べ700台/日を常に行う必要があった。ダンプ運行は昼夜で行ったが、1方あたりダンプ所要台数は100台を超え、これだけのダンプを常に確保することは非常に困難を極めた。また、他の資材としてセグメントの搬入用トレーラーが50～55台/日、裏注材や気泡材その他のローリー関係等で30～40台/日の車両の搬出入が必要であった。

また、発進基地が狭小であり、十分な土砂ピットやセグメントヤードが確保できなかったため、設備トラブル等による一時的な掘進停止に対応することが、非常に困難であった。今後、都市部で大断面シールドにおける高速施工においては、これらの物流を確保できる環境を整えることが課題の一つであるとする。

6. おわりに

本工事は、かつてない大断面の長距離シールドトンネルであり、途中2度にわたる長期掘進停止を余儀なくされたが、関係各位の多大なるご支援のもと2012年3月に無事到達することができた。改めて、ご支援いただいた方々に感謝するとともに、本内容が今後のシールド工事の参考になれば幸いである。本稿執筆現在、本線シールドトンネルは到達し、開通に向けてトンネル内装工や五反田出入口工事を含めて鋭意施工中である。

参考文献

1) 足立紀尚監修、小山幸則ほか：泥土圧シールド工法 その理論と応用、鹿島出版会、2009。

(2012.9.3 受付)

Technical Study and Measures of Mega Long distance EPD Tunnel

Ryuhei KONDO, Yukihiko YUDASAKA,
Minoru YONEZAWA and Hatsutaro KAJIKAWA

The expressway tunnel, 8 km long, 12,55 meter excavation diameter is bored by a single Earth Pressure Balance type Tunnel Boring machine (hereafter EPBM). Since the ground to be mined is composed of very stiff mudstone, the excavated area and the plasticity of excavated soil in the EPBM chamber need to be strictly controlled. It is also important to manage daily EPBM excavation operation to avoid impacts to the ground surface since many live important infrastructures exist along the tunnel alignment. The appropriate capacity, durability, and easy-maintenance for the EPBM, conveyers and other tunneling equipments are strongly required to accomplish 8 km long rapid tunnel excavation.