

砂礫土地盤での大断面泥土圧シールドにおける切羽添加材の計画と施工結果

The Conceptual Planning, and Achieved Results, for Conditioning of Sandy Gravel Layers for Face Stability in Large Diameter EPB Shield

坪井 広美* 田中 隆利*
 Hiromi Tsuboi Takatoshi Tanaka
 村川 徳尚* 野本 雅昭**
 Norihisa Murakawa Masaaki Nomoto

要 約

泥土圧シールドにおいて、切羽安定と掘進進捗を確保するためには、掘削土をチャンバ内で塑性流動化させること、坑内ポンプ圧送における圧送性を確保することが重要となり、掘削した地山の性状を添加材により連続的にコントロールする必要がある。今回の工事は、シールド外径φ9.98mの大断面泥土圧シールドであるとともに、砂礫土が卓越する土質であって、従来に例のない厳しい条件である。そこで、工事計画段階で全断面砂礫層と互層区間を想定した添加材実験を行い、切羽添加材を複合使用する計画で施工に臨んだ。

その結果、シールドチャンバ内が高圧力下であること、混練効果の相違などから、材料の複合使用比率や、添加材注入率を修正する必要がある。さらに、従来ポンプ圧送は不可能であるとされていた全断面砂礫層区間において、掘削土砂のポンプ圧送性を確保するための最適なポンプ圧送補助材を見出すことで、地上までの連続的なポンプ圧送と安定した掘進を実現することができた。

目次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 切羽添加材の検討と計画
- § 4. 施工結果
- § 5. 大断面に起因する新しい課題
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

みなとみらい21線は、横浜市が推進する新都市開発事業（みなとみらい21計画）における円滑な旅客輸送や関内・山下町地区の利便性向上を目的とするものであり、横浜駅からみなとみらい地区を経由して元町に至る営業キロ4.1mの地下鉄である。本工事は、地下鉄複線断面を泥土圧シールド工法で施工するものである。本稿では、掘削土の塑性流動化を実現する切羽添加材の計画と施工結果、および、全断面砂礫層での掘削土のポンプ圧送を可能とするポンプ圧送補助材について報告する。さらに、施工をとおして明らかになった大断面泥土圧シールドに

特有の課題について報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工事内容を表-1に示す。

表-1 工事内容

工事名	MM, 山下町シールドT
発注者	日本鉄道建設公団 東京支社
施工場所	横浜市中区本町～山下町
工期	平成10年3月17日～平成13年2月14日
掘進時期	平成12年3月～平成12年8月
シールド	外径φ9.98m, 機長8.815m (泥土圧式)
施工延長	448m
平面線形	R355m × 1カ所, R1200m × 1カ所
縦断勾配	+2% → -9%
土質	沖積砂礫土と粘性土
土被り	最大16.8m, 最小13.3m
セグメント	RCセグメント 外径φ9.8m, 桁高400mm, 幅1200mm
裏込注入	シールドからの同時注入方式
補助工法	発進防護：CJG, 到達防護：RJP

* 横浜（支）MM線山下町（出）

**技術研究所土木技術研究課

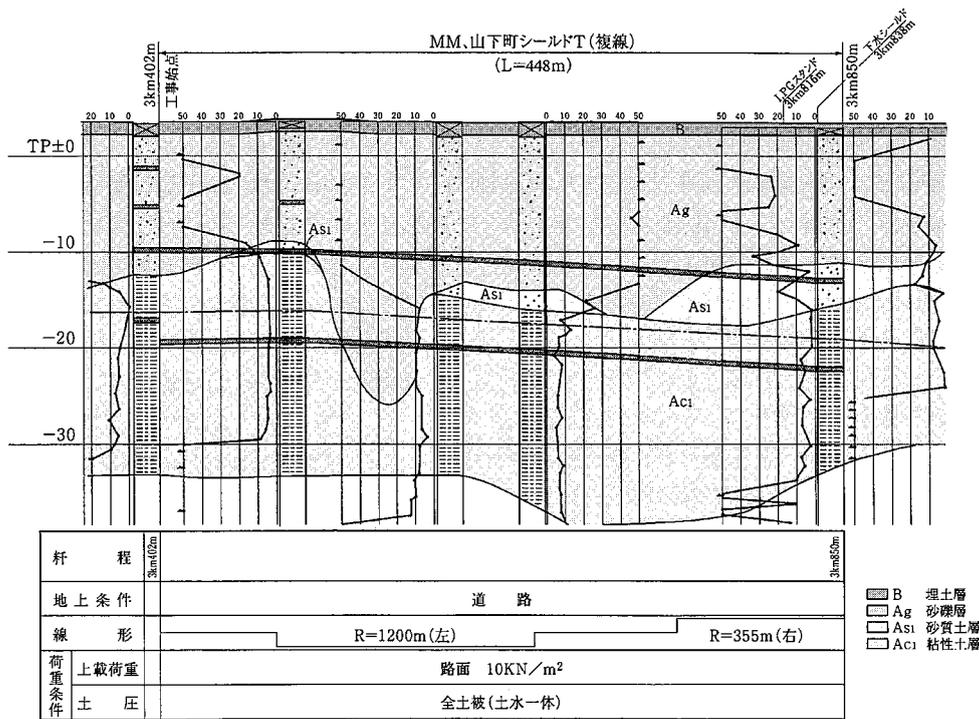


図-1 地質想定縦断図

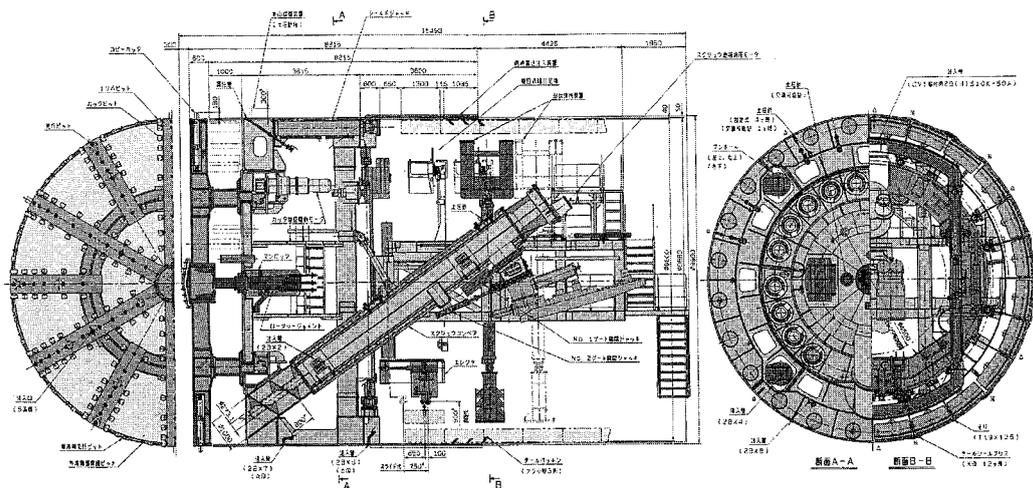


図-2 シールド構造図

2-2 地質概要

地質想定縦断図を図-1に示す。掘削対象土質は、沖積砂礫層 (Ag) と粘性土層 (Ac) の互層であるが、一部区間で、全断面砂礫層、全断面粘性土層が出現する。また、到達付近では、シールド上部に均等係数 $U_c = 10$ 程度の崩壊性の高い細砂層 (As) が出現する。砂礫層は、バインダーとなる粘土・シルト分が4.4%と極めて少なく、10~20mm程度の中礫が卓越する層である。一方、沖積粘性土層は、N値=2~3程度で、含水が多く粘性が強い層である。

2-3 シールド

シールド構造図を図-2に、仕様を表-2にそれぞれ示す。

表-2 シールド仕様

シールド本体	シールド外径	φ9980mm
	シールド機長	8815mm
推進装置	シールドジャッキ	3500kN×1900st×24本
	総推力	84000kN
	単位面積当たり推力	1073kN/m ²
カッター装置	支持方式	中間支持方式
	回転数	0.49rpm
	装備トルク	最大19300kN-m (α=19.4)
	開口率	65%
排土装置	スクリュウコンベア形式	軸付スクリュウφ1000mm
	最大排土量	約240m ³ /h

2-4 覆工構造

本工事で使用するセグメントは、外径φ9800mm、幅1200mm、桁高400mmのRCセグメントであり、二次覆工はなく一次覆工のみで供用するものである。また、継手金物は、高剛性なダクティル製インサートタイプであるが、ボルト挿入側の継手金物がセグメント背面まで貫通している構造であるため、背面防水工に留意した設計となっている。

§ 3. 切羽添加材の検討と計画

3-1 切羽添加材の分類

泥土圧シールド工法における切羽添加材の働きは、掘削地山に微細粒子分を補うことで粒度構成を良好にし、土砂を不透水性と塑性流動性を有する泥土に変換することである。また、掘削土をポンプ圧送する場合は、泥土の分離抵抗性も重要となる。添加材の機能は次のとおりである。

①不透水性

砂・砂礫などは間隙が大きい透水系数が大きく止水性がない。このような土質の場合にはチャンバ内へ切羽添加材を注入し混練することで、砂・砂礫の間隙の自由水を排除し、間隙を埋めることにより透水系数の非常に小さな土砂とする。

②塑性流動性

砂・砂礫などの内部摩擦角の大きい土砂は、流動性が悪い。切羽添加材を注入することにより、粘性を有した微細粒子が砂・砂礫粒子同士の直接接触状態を軽減し、塑性流動性を有する掘削土砂に変換される。

粘性土地盤では、掘削により原地盤に比べ強度が低下し、比較的良好な塑性流動性を示すことが多い。しかし、砂分含有率の高い地盤では、含水比が低いため流動性が悪くなったり、チャンバ内に泥土が付着しやすくなる傾向にある。この場合には、切羽添加材の注入により流動化を促進する必要がある。

③分離抵抗性（土砂圧送性）

掘削土のポンプ圧送の可否は、一般的に粘土シルト分あるいは切羽添加材などの代替成分が30%以上含まれているものとされている。

これらの機能を発揮する添加材の種類は多岐に渡り、図-3に示すとおり分類される。

a) 粘土鉱物系

ベントナイトなどの粘土鉱物が多量に含まれる切羽添加材を注入することにより土砂に内部摩擦角の小さい微細粒子分を補足し、土圧で変形や破壊を誘発させて流動化を図る。

b) 不溶性ポリマー（吸水性樹脂）

自重の数百倍の水分を吸水し止水性を向上させ、土粒子間を目詰めすることによりベアリング効果を高めて流動化を図る。

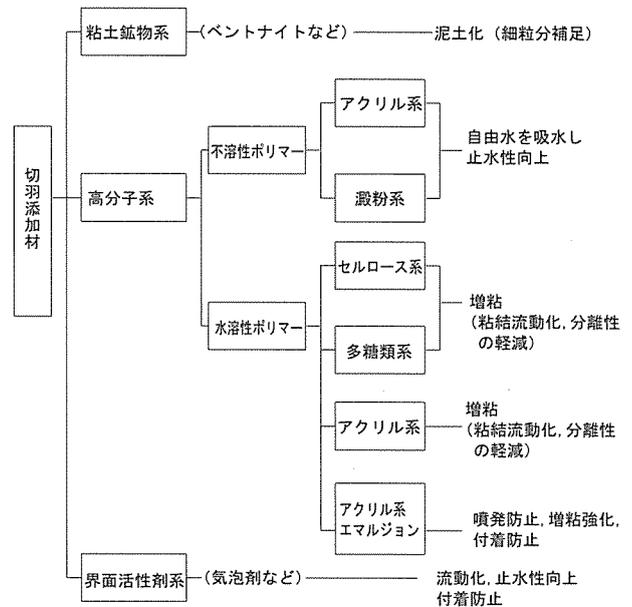


図-3 切羽添加材の分類と使用目的

c) セルロース系，多糖類系

土砂中の自由水を追い出して置換し、増粘性により土粒子間を粘結させて内部摩擦角を低減し流動化を図る。

d) アクリル系

土砂中の自由水を追い出して置換し、増粘性により土粒子間を粘結させて内部摩擦角を低減し流動化を図る。セルロース系と比べ経時変化が少ない。

e) アクリル系エマルジョン

土砂中の水分と土粒子との間にフロックを形成し、粘結させて内部摩擦角を低減し流動化を図る。

f) 界面活性剤系

土砂中の自由水を追い出して置換し、気泡のベアリング効果により流動化を図る。

3-2 施工条件を考慮した要求機能と使用材料の選定

本工事における掘削対象土質は、砂礫（Ag）層が卓越し、全断面砂礫層区間も存在する。この層は前述したとおり、バインダー分が5%以下であることから、この最も厳しい条件を考慮して切羽添加材を選定する必要がある。

切羽添加材の目的は、掘削地山に不足する細粒分を付加することにより粒度組成の改善であるが、今回の10～20mmの中礫が卓越する層では、粘土鉱物により粒度組成を改善することは困難となる。このため、不足する細粒分などの補充を行い粒度を良好にする従来の算定方法（泥土圧シールド工法協会積算資料）にとらわれずに材料を選定する。そこで、高分子系添加材のなかでも、粘性を増すことで内部摩擦角を低減し、流動性の増加を図る水溶性ポリマーを使用した。さらに、チャンバ内だけでなく、ポンプ圧送により地上の土砂ホッパまで添

加効果を持続させるために、経時変化の小さいアクリルエマルジョン系の材料を選定した。

しかし、φ9.98mの掘削断面全てが砂礫層である今回の条件においては、大量の砂礫土を速やかに流動化させるだけの高粘性の添加材をプラントで作液することは困難であり、作液が可能であっても切羽までの圧送は不可能である。そこで、高分子系添加材を使用するが、添加効率のよい材料、添加方法を検討する必要がある。アクリル系高分子ポリマーについては、できるだけ高純度の材料を選定することで、添加効果時間を長くとり、ポンプ圧送時の配管内での土砂の沈降を抑制した。今回は、一般の純度が約30%であるのに対して45%と高純度なアクリル系エマルジョンである「アルカマー120L」を選定した。さらに、このアクリル系エマルジョンにベントナイト泥水をショットさせることで、急激に粘性が上昇する特有の性質に着目し、別系統でこれらの2液を切羽に圧送し、チャンバ内で増粘反応させる方式を採用した。アクリル系エマルジョンには、付着防止の効果があるため、粘性土層に対しても有効であると考えた。選定した切羽添加材は次の2種である。

①粘土鉱物（ベントナイトTB-S）

アメリカワイオミング州に産出する高純度、高品質のNa型ベントナイト。Ca型ベントナイトに比べて高膨潤なNa型の中でも最も優れた性能（高粘性）を持ち、土粒子間の保持力が強く、かつ流動化を図る。

②アクリル系エマルジョン（アルカマー120L）

土砂中の水分と土粒子との間にフロックを形成し、粘結させて内部摩擦角を低減し流動化を図る。

3-3 切羽添加材実験

(1)実験目的と評価指標

選定した複合使用を前提とした2種の材料について、掘削対象地盤に応じた添加比率と注入率を求めることを目的として切羽添加材実験を行った。その評価指標と確認方法を表-3に示す。

表-3 評価指標と確認方法

評価指標	確認方法
流動性	スランプ値
内部摩擦角	混練抵抗性
分離抵抗性	ブリージングの有無
チャンバ内付着性	鉄片への付着度合い

(2)実験ケース

実験ケースを表-4に示す。

想定した地盤は、全断面砂礫層である130リングを含め、代表的な4断面を設定した。そして、切羽添加材は、ベントナイト溶液とアクリル系エマルジョン溶液の添加比率、切羽添加材の試料土に対する注入率を変化させることとした。以下ベントナイト溶液をA液、アクリル系

エマルジョン溶液をB液と呼称する。

表-4 実験ケース

対象掘進リング	切羽断面内地層構成 (%)			切羽添加材実験ケース	
	砂礫層 (Ag)	細砂層 (As1)	粘性土層 (Ac1)	添加比率 A : B	添加率 (%)
130リング (全断面砂礫層)	100.0	—	—	9 : 1	10~30%
				8 : 2	
				7 : 3	
200リング	28.8	23.7	47.5	全断面砂礫層の試験結果より最適添加比率を決定	10~30%
250リング	50.0	—	50.0		
320リング	—	55.1	44.9		

(3)実験方法

実験フローを図-4に示す。

実験に使用する土砂は、原位置試料が入手不可能なため、礫、3号硅砂、粉体粘土（トククレー）を混ぜ合わせるにより、想定される掘削対象地盤と同じ粒度分布の試料土を作成した。また、地山の状態が悪い場合を想定して、試料土は飽和状態とした。図-5に各断面での想定粒径加積曲線と試料土の通過百分率のプロットを示す。

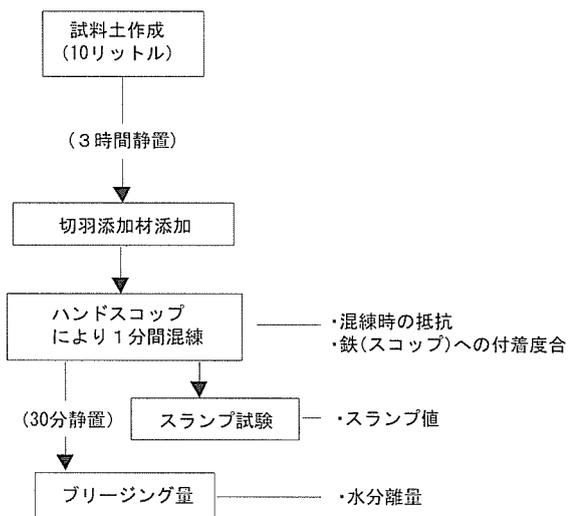


図-4 実験フロー

(4)実験結果

実験結果の一覧を表-5に示す。先に実施した全断面砂礫層である130リングを対象とした実験結果では、①添加比率9：1，注入率30% ②添加比率8：2，注入率25% ③添加比率7：3，注入率30%が選定されたが、アクリル系エマルジョンB液の添加比率の低い③の配合については、添加後2時間放置でブリージングが発生したことから、②、③の配合を選定した。

そして、ブリージング抑制と注入率を抑制する目的で添加比率を7：3に固定し、以後の互層を対象とした実験を行った。そして、それぞれの断面での注入率は、200リングで15%、250リングで15%、320リングで10%が最適である結果を得た。

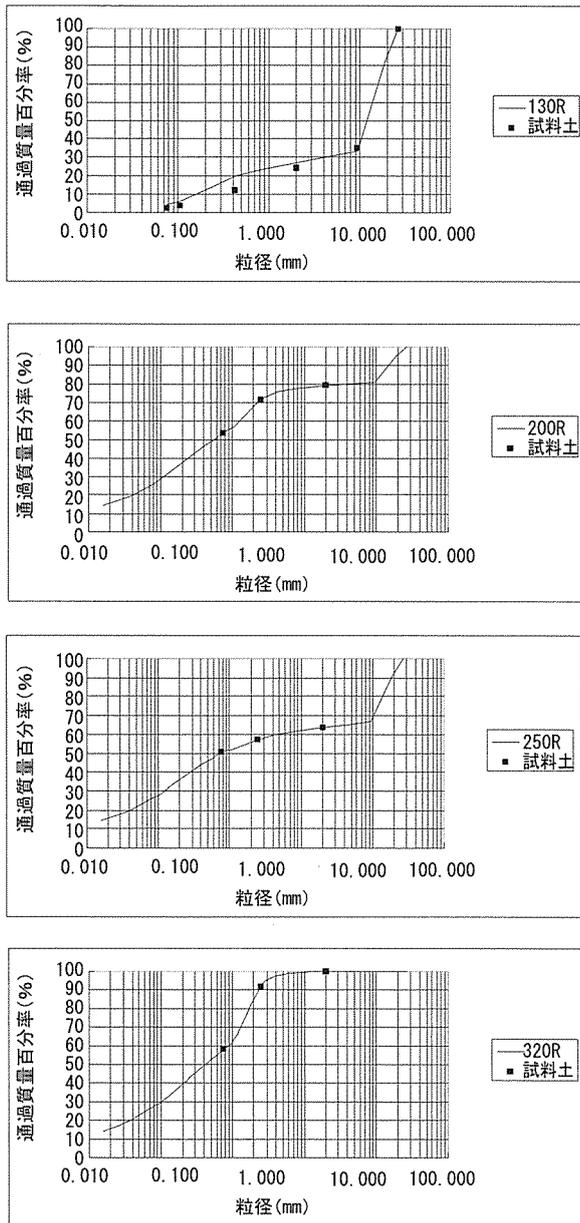


図-5 試料土の粒径加積曲線

§ 4. 施工結果

4-1 切羽添加材計画方針

実験結果を踏まえた実施工に向けての添加方針を表-6に示す。ベントナイト溶液 (A液) とアクリル系エマルジョン (B液) の添加比率を7:3とし、掘削断面内の砂礫層出現比率に応じて注入率を変化させることとした。

表-6 切羽添加材注入方針

掘削断面内の砂礫 (Ag) 層比率	切羽添加材	
	注入率	A:B添加比率
40%以上 (90R~160R)	20%	7:3
20%~40% (160R~300R)	15%	
20%未満 (300R~到達)	10%	

表-5 実験結果

対象掘進リング	添加比率	注入率 (%)	スランプ値 (cm)	かき混ぜ時の抵抗	ブリージング	鉄への付着度	総合評価
130R	—	0	22.8	—	有り	弱	—
	9:1	20	21.0	大	無し	弱	×
		25	24.9	中	無し	弱	△
		30	25.3	小	無し	弱	◎
	8:2	20	20.5	中	無し	弱	△
		25	24.4	小	無し	弱	◎
		30	25.7	中	無し	弱	○
	7:3	20	23.7	小	無し	弱	◎
		25	24.0	中	無し	弱	○
30		26.0	大	無し	弱	△	
200R	0	27.0	小	無し	強	△	
	10	26.0	小	無し	中	○	
	15	22.0	小	無し	弱	◎	
	20	23.5	小	無し	弱	○	
250R	0	24.2	小	無し	強	△	
	10	21.5	小	無し	中	○	
	15	20.0	小	無し	弱	◎	
	20	22.0	小	無し	弱	○	
320R	0	26.5	小	無し	強	△	
	10	21.0	小	無し	弱	◎	
	15	21.5	小	無し	弱	○	
	20	22.5	小	無し	弱	○	

4-2 施工結果

実施工時は、シールド機内の圧送管に取り付けたサンプリングバルブにより掘削土を採取し、目視や手触りの他、スランプ試験を実施することで、塑性流動化を評価し、その都度、注入率、添加比率を調整した¹⁾。90リングから到達 (368リング) までの注入率とB液添加比率の結果を図-6に示す。

(1)注入率と添加比率

注入率、アクリル系エマルジョン (B液) 添加比率ともほぼ計画どおりで推移している。断面内の砂礫層出現率が100%となる140~150リングでは、30%以上の注入率が必要であったものの、アクリル系エマルジョンとベントナイト溶液の併用は有効であった。

アクリル系エマルジョンの添加比率が大きく変動しているが、材料そのものの粘結効果の時間依存性とチャンバ内の混練度が一様でないため、その使用方法 (添加比率、注入位置) に苦慮したためである。さらに、チャンバ内が加圧状態であることから、中心付近やカッタスポーク背面などの混練度の低い部位では、このB液により泥土の脱水が促進され土砂固結が発生した。

(2)ポンプ圧送性

掘削土をポンプ圧送する場合、土砂の分離抵抗性が重要であることから、切羽添加材実験結果よりB液の添加比率を30%として分離抵抗性の向上を図る計画とした。

しかし、本工事の中礫が卓越する砂礫層区間においては、切羽添加材のみでは高压力下の配管内では分離抵抗性が著しく低下し、閉塞によりポンプ圧送は不可能となった。そこで、ゲルストレングスの大きい材料で礫を包み込むことで、分離抵抗性を向上させることを試みた。

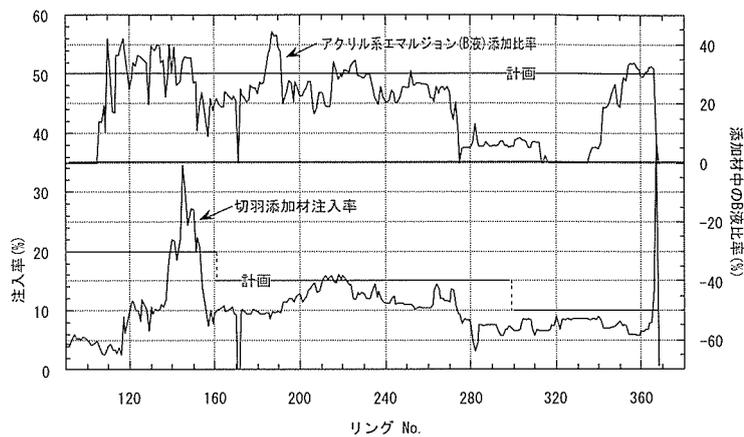


図-6 切羽添加材注入率とB液添加比率の施工結果

ベントナイト溶液（A液）にケイ酸をショットさせたゲル状の中間充填材をP2ポンプ、P3ポンプのホッパに直接注入した結果、分離抵抗性が飛躍的に向上し、閉塞することなくポンプ圧送を可能にすることができた。

§ 5. 大断面に起因する新しい課題

今回の砂礫地盤での大断面泥土圧シールドの施工をとおして、大断面であるために最適化されるべき機械設備が明らかになった。ここでは、掘削土の塑性流動化に関する2項について記述する。

5-1 添加材注入システム

大断面泥土圧シールドにおける切羽安定や掘進進捗の確保は、掘削土の性状をいかにリアルタイムにかつ連続的にコントロールするかにつきる。そのため、チャンバ内における切羽添加材の注入混練は、最も重要であり、掘削対象土質に応じて、添加材の種類、濃度、量および注入位置を逐次変更する必要がある。特に、注入位置は、混練効果や止水性など、添加材の効果発現に最も影響する。

切羽添加材注入位置は、一般的にカッタスポークからの注入となるが、大断面泥土圧シールドの場合は、内周側と外周側では、土の動きや混練度合いが異なり、各々異なった注入量を設定する場合がある。さらに、複数の添加材を併用する場合は、注入位置の組み合わせで、その効果発現が著しく異なる。今回はその都度、配管ジョイントを付け替えることで対応した。しかし、シールド機内には、多数の配管が複雑に存在し、注入孔の変更・選択が速やかにできなかった。また、添加材吐出孔が土砂で閉塞気味となり、所定量を注入できない場合もしばしばあった。今後は、切羽添加材の種類、濃度、量、その注入位置が任意に設定でき、確実に所定量を注入できるシステムを確立する必要がある。

5-2 チャンバ内土砂混練および排土機構

泥土圧シールドにおけるチャンバ内土砂混練装置に

は、カッタヘッド側に取り付ける攪拌棒、バルクヘッド側の固定棒の他、カッタヘッド支持脚などがある。これらは全てカッタ回転に伴い混練するものであるが、大断面であるため、外周側と中心付近でその周速が著しく異なる。その結果、外周側は混練に十分な周速を得ることができるが、中心付近では得ることができず、混練効果は低下する。

また、排土装置であるスクリュウコンベアがチャンバ内最下部であるため、流動性の高い外周部の土砂を排土し易くなり、結果として中心付近の土砂は混練され難く、かつ、排土口へのスムーズな動きを抑制されてしまう。そして今回、一部区間で中心付近の土砂が固結状態となるトラブルが発生した。対策として、排土口であるスクリュウコンベア取付け位置を中心に近づけることがあるが、ベアリング部との干渉があると共に、掘削土質に大きく依存するため判断が難しい。

今後は、チャンバ内土砂の動きをシミュレーション等の手法を用いて解析し、土質に応じた最適な混練装置、カッタ回転速度やスクリュウコンベア取付け位置を検討する必要がある。

§ 6. おわりに

今回の工事は、都市部の重交通下において、砂礫層を大断面泥土圧シールドで掘削する従来に例のない工事であった。そして、実際にφ9.98mのシールド全体が砂礫層に入った区間では、当初の予想を遥かに越える困難な施工であった。しかし、本稿で述べた事前の検討などにより、無事到達することができたとともに、多くのノウハウを得ることができた。今後の同種の工事においては、前述した課題を克服し、さらに高品質な施工を目指す所存である。最後に、今回の施工にあたり御指導頂いた関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 木村光夫他：全断面礫層区間をφ10m大断面泥土圧シールドで突破、トンネルと地下、Vol.32 No.3, 2001.