

気泡材を活用した大口径泥土圧シールドの切羽管理

THE CONTROL OF TUNNEL FACE FOR LARGE DIMENSION HIGH DENSITY SLURRY SHIELD USING CHEMICAL FOAM

大野 宏紀* 川枝 眞夫**
Hiroki Ono Masao Kawaeda

Now, in Japan, Earth pressure balanced shield's share in shield method is about 70%. Large dimension earth pressure balanced shield will be more as middle and small dimension as.

Recently, High density slurry shield adopt more in earth pressure balanced shield method.

This report describes how to employ shield machines equipped cutter face and long screwconveyer and additives for the excavation of a large dimension tunnel by chemical form and high density slurry injection shield, sets forth the results of the successfully completed excavation works.

Keywords: High density slurry shield, chemical form and high density slurry, cutter face, long screwconveyer

1. はじめに

現在、我が国のシールド工法の内、約70%が土圧式シールドを採用している。今後、土圧式シールド工法が現在の中小口径から大口径においても適用されるケースは増加するものと考えられる。

この報告は、都営地下鉄12号線、練馬駅～豊島園駅間の玉石混じり砂礫地盤の地層を気泡併用の大断面泥土圧シールド（掘削外径 $\phi 8,660\text{mm}$ ）で施工したものである。

泥土圧シールドの施工上のポイントは、第一にいかに切羽の安定を図るか、第二に地盤沈下をいかに最小限に抑えるかであり、この目的のためには適切な添加材の選択により、掘削土砂を流動化させ、マシンに過大な負荷を与えることなく、掘削管理する必要がある。このことについてのシールドマシン及び添加材の考え方と計画、施工実績について述べるものである。

2. 概要

2・1 工事概要

工法 : 泥土圧シールド工法
シールド外径 : $\phi 8,660\text{mm}$

* 東京都交通局高速電車建設本部練馬建設事務所

** 株式会社熊谷組東京支店練馬地下鉄作業所長

延長 : 617 m
 曲線施工 : R=165 m 2箇所 (全延長の44%)
 土被り : 10.8~14.0 m (1.2~1.6D)

2・2 地質概要

当該地域の地質は図-1に示すとおりで、トンネルの通過する地層は主に、武蔵野礫層、東京礫層で、一部、切羽下端に江戸川層の洪積粘性土が出現する。

武蔵野礫層、東京礫層ともに、粒度構成は礫分は60~70%で、0.075mm以下の細粒分は2~9%と少なく、切羽の自立性が非常に乏しい、シールド施工にとって厳しい土質である。また、東京礫層最下部には200~450mmの大きな礫が点在している。透水係数は 10^{-2} cm/secオーダーと透水性が高く、シールドセンターでの間隙水圧は1kgf/cm²程度である。

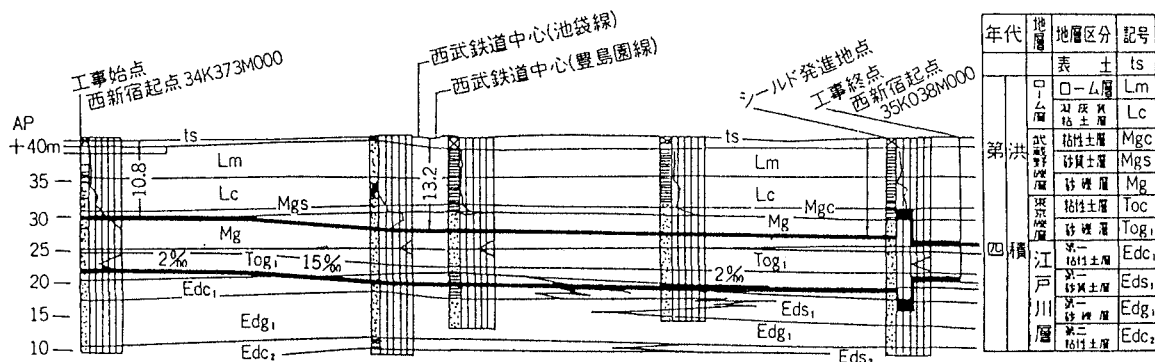


図-1 地質縦断図

3. 計画

3・1 シールドマシン

(a) , カッターヘッド

カッターヘッドの形状は面板型とし、想定最大礫径450mmまではチャンバー内に取り込むこととしてスリット幅を決め、450mmとした。開口率は35%である。

(b) , カッタービット

カッタービットは、外周に8条、内周に2条配置した。チップ材質は通常使用されるE5種でなく、硬度は若干低いが欠けに強いE6相当品にした。磨耗防止、大礫の破碎を目的としたディスクカッターを16個(ゲージカッター6個、インナーカッターを10個)配置した。このほかに先行ビットや各種保護ビットを装備するとともに、ビットの磨耗検知のため、背面保護ビットに油圧式の検知ビットを6個取り付け付けた。

(c) , 排土機構

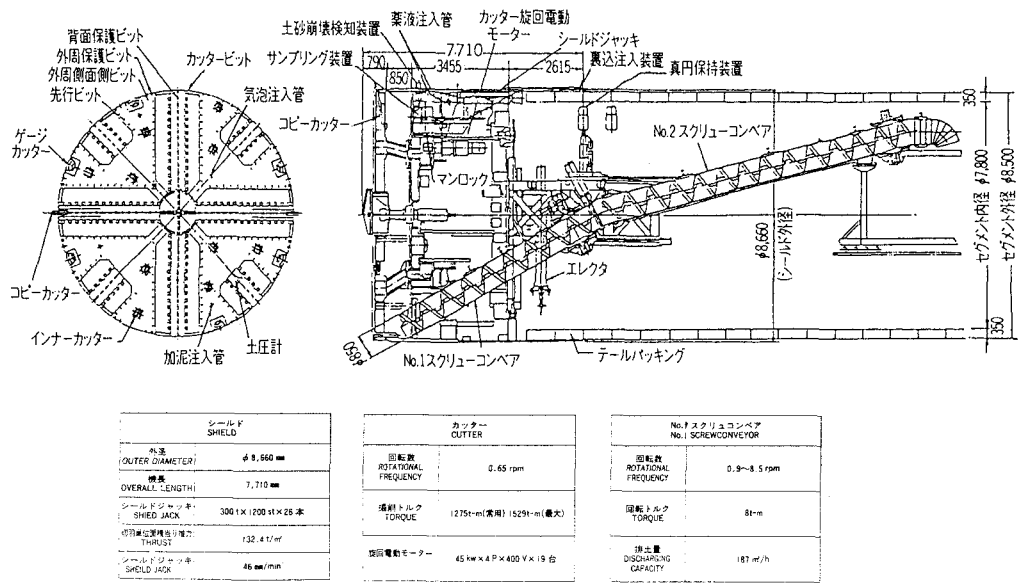
排土機構は、径φ450mmの礫をそのまま取り込み可能なトラフ内径850mmのリボンスクリューコンベヤとして、止水効果を高め噴発防止を図り、切羽の安定保持のため、全長17.5mの2段式に、している。

(c) , 添加材注入孔

大断面泥土圧シールドでの添加材注入孔は切羽への浸透、全断面への均等な注入が十分できる機構であることが非常に重要である。このことを考慮してカッターフェスに3系統5箇所の注入孔を設けた。

(e) , 土圧計

確実な土圧管理を実施するために、土圧計をカッターフェースに2箇所、チャンバー内バルクヘッドに5箇所（内2箇所は交換型）配置した。



図ー2 シールドマシン

3・2 添加材

添加材の性状や注入量の選定は泥土圧シールドの成否に大きな影響を与える重要な要素である。添加材には、粘土、ベントナイトを主体とした加泥材や、特殊起泡材と圧縮空気により作成される気泡などがあり、それぞれ一長一短がある。

加泥材は掘削土に最粒土分を付与することにより、塑性流動性と止水性を向上させるものである。加泥材により本工事を施工する場合には、高濃度、高粘性の加泥材とする必要がある、ただし、高濃度、高粘性にすればするほど切削土との均一練り混ぜが難しく、機械的な負荷が大きくなるとともに、ビットや面板などの磨耗も大きくなると考えられる。また、地下水による加泥材の希釈による効果の低減、切削土と加泥材の分離、被圧水による噴発も想定される。

気泡は、ベアリング効果により流動性を、また内圧をもった気泡が地山の間隙に地下水と置き代わって入り込むことにより止水性を向上させる効果がある。気泡注入の場合には、土砂との攪拌混合に要する負荷が少なくてすむため、加泥材に比べ混練状態が良好で、流動性も向上すると考えられる。しかし本工事のように礫率が70%程度で、しかも大礫を含む地盤では、間隙が大きい気泡が浸透したり、気泡の比重が小さいことからチャンバー内で玉石を安定した状態に保持することができないことがあり、気泡注入だけの施工は難しいと考えられた。

そこで、本工事では加泥材と気泡を併用することで両方の長所をいかし、より確実な切羽の安定を図ることとした。

今までの併用注入の実績は気泡主体注入であって加泥材主体注入は本工事が初めての試みである。計画注入率は、気泡の注入率下限値を掘削土量体積の15%とし、加泥材注入率を掘削土質に合わせ、掘削土量体積の16~25%とした。表ー1に加泥材と気泡（特殊起泡材）の標準配合を、また表ー2に気泡と加泥材の計画注入率を示す。なお、注入系統は、フィッシュテール部と外周部の2系統から加泥材を、面板中間部の1系統から気泡を注入することとした。

加泥材 1 m ³ の標準配合					
配合	N P サンドスラリー (kg)	1.305～1.315	性状	比重	1.42
	ベントナイ (200メッシュ) (kg)	96～114		粘性 (C . P .)	1.000 ～2,200

特殊起泡材 1 m ³ の標準配合 (B タイプ) 6 倍発泡					
配合	特殊起泡材 (OK-1) (L)	10	性状	P H	7.3
	起泡添加材 (OK-2) (kg)	20		粘性 (20 ℃) (CP)	200
	水 (L)	970		比重	1.0

表－1 加泥材および気泡の標準配合

区間	(発進部) ① No. 467 ～ No. 458	② No. 458 ～ No. 450	③ (到達部) No. 450 ～ No. 436
延長 (m)	177	160	280
気泡注入率 : Q _K (%)	15.0	15.0	15.0
加泥材注入率 : Q _D (%)	19.8	16.7	24.9
総注入率 : Q _T (%)	34.8	31.7	39.9

表－2 加泥材と気泡の注入計画

4. 施工実績

4・1 掘進実績 (表－3)

掘進は初期掘進時から順調であり、本掘進時での掘進速度は毎分15mm～20mmで、カッタートルクは700 ～ 800 tfm($\alpha=1.1\sim1.2$)、スクリュートルクも2.7 ～3.3tfm(装備の30～40%)と機械負荷は小さく、管理土圧も主働土圧+水圧ではば安定していた(図－3)。排土状況も良好で、スランプ値 4～8cm, 含水比18～21%で安定しており、添加材と掘削土が十分に攪拌混合され、均一で流動性に富んだ土砂に改良されていた。このように気泡と加泥材の併用注入を実施したことにより、掘進状況は非常に安定し、大断面泥土圧シールドとしては理想的な切羽管理状態が維持できたものと考えられる。日進量も最大で10m/日、直線部での稼働日当たり日進量も7m/ 日と非常に順調であった。

			初期掘進	本掘進区間				
			区間	直線区間 ※	曲線区間 R=165m	直線区間	曲線区間 R=165m	直線区間
			(1～50リング)	(51～162リング)	(163～337リング)	(338～438リング)	(439～608リング)	(609～680リング)
チャンバー内土圧 (kgf/α)	上		1.1	1.0	0.8	0.9	0.7	0.7
	中		1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3
	下		1.8	1.8	1.7	1.7	1.8	1.8
掘進速度 (mm/min)			9	17	18	17	15	15
総推力 (tf)			2,280	2,520	2,480	2,550	3,860	3,090
カッタートルク (tf-m)			640	720	730	790	750	790
No1 スクリュートルク (tf-m)			4.7	3.3	2.9	2.9	2.7	2.8
添加材 (%)	注入率	加泥材	18.0	16.7	16.3	16.8	13.6	12.4
		気泡	15.4	15.8	16.5	15.1	20.6	21.5
		合計	33.4	32.5	32.8	31.9	34.2	33.9
加泥材粘性 (CP)			1,000～2,000	1,500～2,000	1,500～2,000	1,000～2,000	1,500～2,200	2,000～2,200

※70～100リング は除く

表－3 掘進管理データ一覧表

4・2 気泡注入の効果

70～100 リング間で気泡装置の不調により加泥材の単独注入となった。図-5に、加泥材単独区間と加泥材気泡併用区間の掘進状況の比較を示す。

これによると、加泥材の単独注入になるとカッター
トルクが1,000tm、推力が2,900t程度とシールド機に
かかる負荷が増大するとともに、管理土圧もバラツキ
が大きくなり、掘進速度が低下した。また、スクリュ
ーコンベヤーからの排土砂が土塊状となりその表面に
加泥材が浮き上がった状態となった。この原因として
は、加泥材と掘削土砂がチャンパー内で均一に攪拌混
合されておらず、泥土としての十分な流動性を呈して
いなかったことによるものと考えられた。このような
状態でも掘進することはできたものの、非常に不安定
な掘進状況であり、大きなトラブルの発生が懸念され
た。

気泡装置調整後、加泥材を15%気泡を15%それぞれ注入したところ、カッタートルクが、720tm、推力が2,500tまで低下するとともに、チャンパー内土圧や、スクリーコンベヤーからの排土の性状が非常に安定し施工性が向上した。このことから、気泡を注入することにより、そのベアリング効果、間隙水との置換等により掘削土を十分に攪拌混合し流動性のある土砂に改良できたものと考えられる。

4·3 層別沈下測定

シールド掘進による周辺地盤の変動を把握するために、地中に層別沈下計を設置し沈下量の測定を実施した。図-4に沈下量計測結果を示す。横断方向の沈下はシールドから45°の範囲にほぼ左右対象の分布となった。縦断方向の沈下傾向は、切羽が測定地点の手前10m付近に近ずいた時点で沈下が始まり切羽通過時までに全沈下量の34%、テール部通過時に38%、裏込め注入によるテールボイド充填後の後続沈下は28%であった。テール部が約50m離れた7日後にほぼ最終沈下量に達した。地表面最終沈下量は5.6mm、シールド直上沈下量は9.2mmで、シールド外径8.66m、土被りが1.6Dであることを考慮すると、良好な結果であると考えられる。

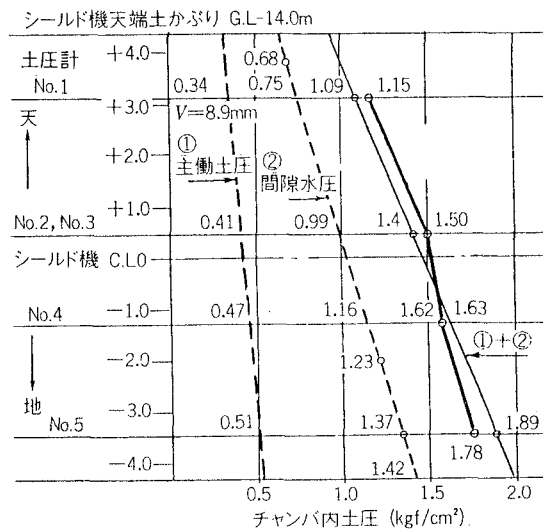
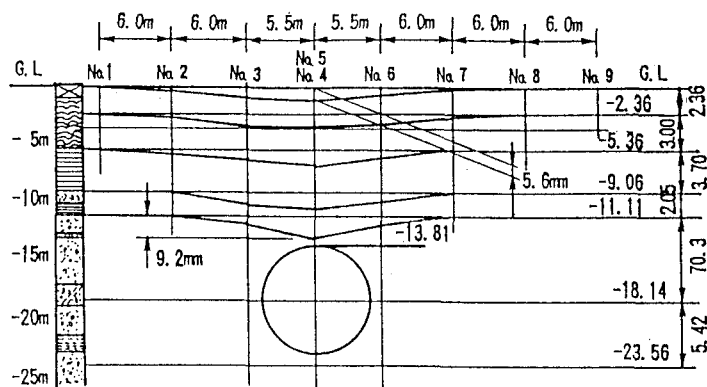


図-3 チャンバー内土圧分布



〔備考〕

下方変位：地下を示す

単位：1目盛り1mm

圖-4 層別沈下測定結果

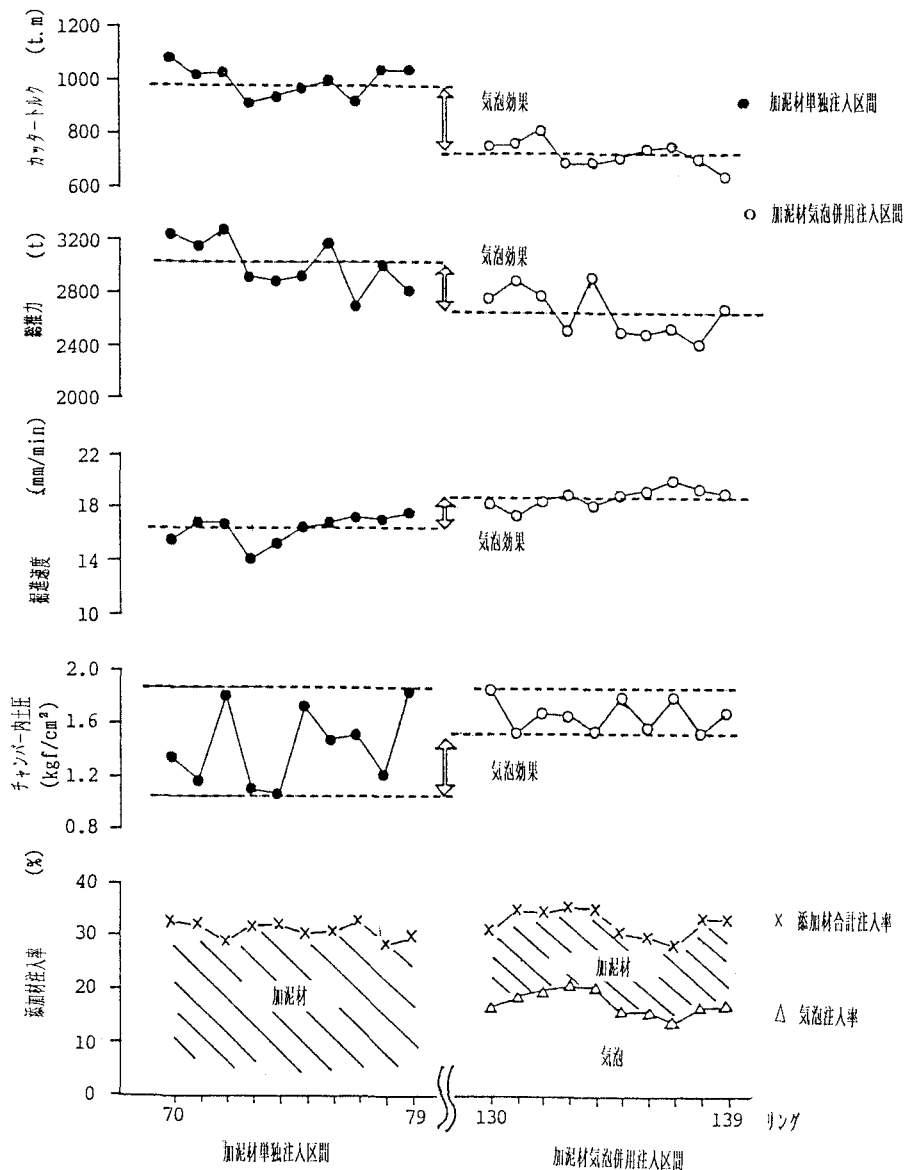


図-5 加泥材区間と加泥材気泡併用区間の掘進状況の比較

5. おわりに

厳しい土質条件下での国内最大径の泥土圧シールドの施工において、加泥材と気泡の併用注入によりそれぞれの添加材の特徴がより一層生かされ、切羽の安定、機械への負荷の低減等に非常に有効に作用し、スムーズな掘進ができた。

泥土圧シールド工事の成否は、掘削土砂を流動性と止水性のある泥土に改良できるかどうかにかかっていると言っても過言ではない。特に大断面になればなるほど均一な攪拌混合が要求される。これらの点からも気泡を併用注入することで有効に作用した。

最後に、本工事の施工にあたり、ご指導、ご協力をいただきました関係各位の皆様に厚くお礼申し上げます。