

25. 大断面泥土圧シールドにおける 大型土砂圧送ポンプ採用実績の報告

佐藤工業㈱：*花田 行和、小林 拓、
軽込 茂

1. はじめに

最近、10mクラスの大断面土圧式シールド工法が採用される例が増えてきている。土圧式シールド工法では掘削土量と排出土量をバランスさせることにより、掘削土砂をカッターチャンパー内、およびスクリーコンベア内に滞留させ、切羽地山の土圧・水圧に対抗させて、切羽の安定を確保している。掘進時の切羽安定管理は、土圧計測と排土量計測により行われ、排土量をリアルタイムかつ高精度に計測する土圧制御が最も重要な事項となっている。

従来、土圧式シールドではスクリーコンベアが切羽安定制御の中心的機構と考えられてきたが、シルト層ではロータリーポンプで制御し、スクリーコンベアは付随的な制御手段との報告¹⁾がなされており、その制御は、1台のポンプを技術者の経験に基づく判断で行っていた。

しかしながら、10mクラスの大断面では、時間当たりの排土量が多く、従来使用されている圧送ポンプでは容量不足となり、複数台で行う切羽安定制御は非常に難しくなる。

本稿は、10mクラスの大断面土圧式シールド工法において、切羽安定制御を行う1台のポンプと台車後方から坑外まで搬出する二次圧送を1台で行う、最もシンプルな1系統により全坑長を圧送するシステムについて報告する。

2. 工事概要

「11号線本所工区土木工事」は、営団地下鉄半蔵門線（渋谷～水天宮前）をさらに北東部に延伸するもので、押上停車場から錦糸町停車場までの907mを外径9,600mmの複線泥土圧シールドで掘削する工事である。

工事区域は交通量の多い都道に位置し、周囲にはビルや商店等が密集した商業地域である。また、シールドトンネルが通過する地盤は、N値0～5の軟弱な沖積粘性土層である。

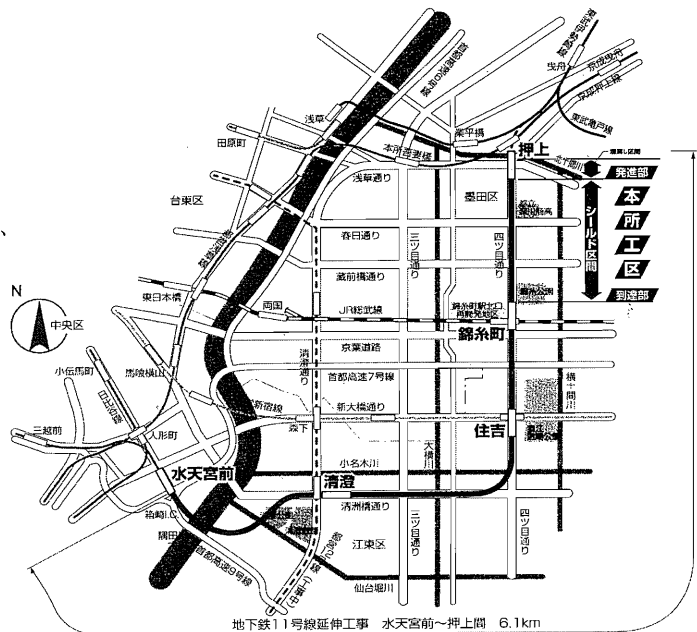


図-1 工事概要図

3. 地質特性

シールドが通過する位置は、下部有楽町層粘性土のほぼ中央にあたり、貝殻を含み、粒土特性はシルト粘土分が85～90%を占めている。また、シールド断面および上部のN値は0であり、モンケン自沈量は50～70cmを示すなど、きわめて軟弱な地盤で、自然含水比が液性限界を超えている箇所も多くみられる。

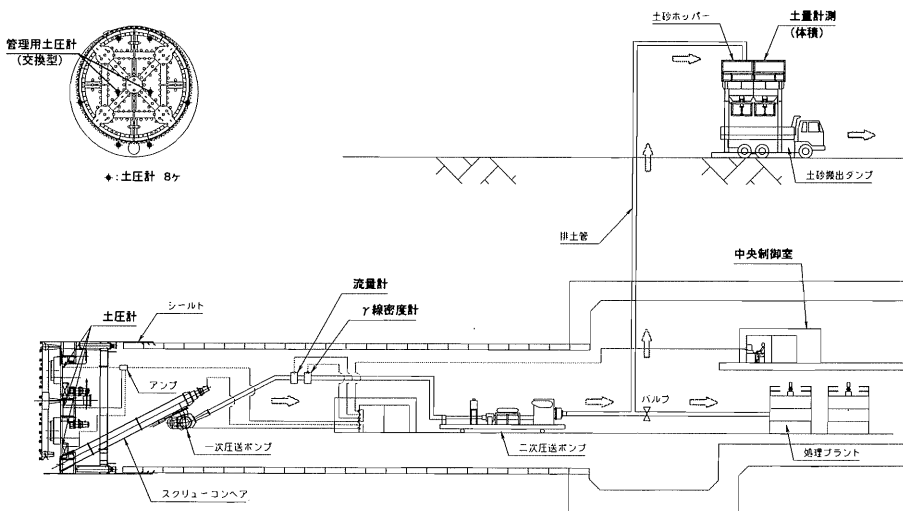
4. 土砂圧送システムの検討

4.1 土砂圧送方式の検討

泥土圧シールド工法における切羽の安定は、塑性流動化した掘削土砂をカッターチャンパー内に充満させ、切羽の土水圧とバランスさせることによって得られる。この土砂は、切羽の安定を保持しながら、スクリーコンベアーを通してシールド外に搬出される。当工区においては、土砂の搬出方法が切羽土圧を保持する最も重要な要素と考え、バルコン方式や鋼車方式に比べ、より精度の高い排土管理ができる方法として、ポンプ圧送方式を採用した。

ポンプ方式を構成する一次圧送ポンプは、切羽安定管理ができ、リアルタイムで高精度の計測が行え、圧送量に変動の無いスムーズで脈動の少ないことが要求される。また、シルト層や滞水砂層においては、切羽安定制御の中心的機構と位置づけている。そのため、当工区では、常に安定した制御ができるロータリーポンプを選定した。

また、台車後方から坑外まで搬出する二次圧送ポンプには、排土作業効率の高さ、に対して多くの実績のあるピストン式の土砂圧送ポンプを採用した。



図一2 土砂圧送システム概要図

4. 2 圧送系統の検討

10mクラスの大断面掘削においては、時間当たりの排土量が多いため、従来使用されている圧送ポンプ1台では容量的に能力不足である。過去の事例としてφ11.52mのシールドでは、一次圧送ポンプ、二次圧送ポンプ共に2系統とすることによって排土量の容量を確保している。しかし、当工区のように綿密な土量管理が要求される超軟弱地盤では、左右それぞれの排土効率の不均衡は、より複雑な制御システムが必要となる。また、従来のポンプでは圧送能力に問題があり、シールドの延長に応じて中継ポンプを追加する必要がある。ポンプ台数が増加することは、メンテナンス等の頻度が格段に増えるため、その管理に多大の労力が費やされる。さらに、坑内の安全性についても、機械類の増加に伴う作業通路の確保等に問題が生じてくる。

そのため、当工区においては、掘進管理の確実性、機械メンテナンスの容易性、さらには坑内の作業環境を考慮した安全面から、最もシンプルなシステムとして、1系統・1台のポンプによって全坑長を圧送する方式を選定した。

以下に、系統別の圧送フローを示す。

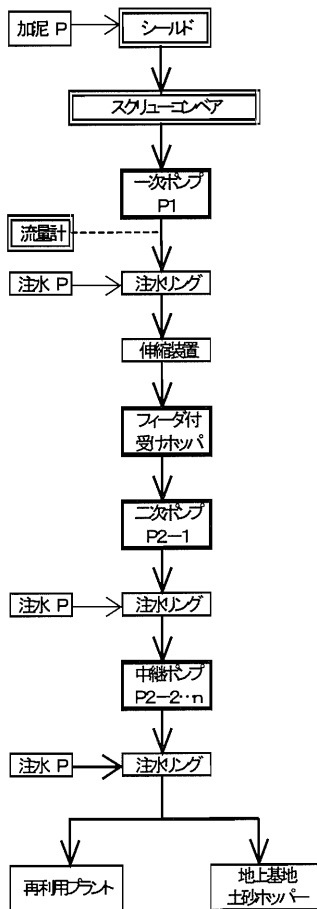


図-3 1系統図

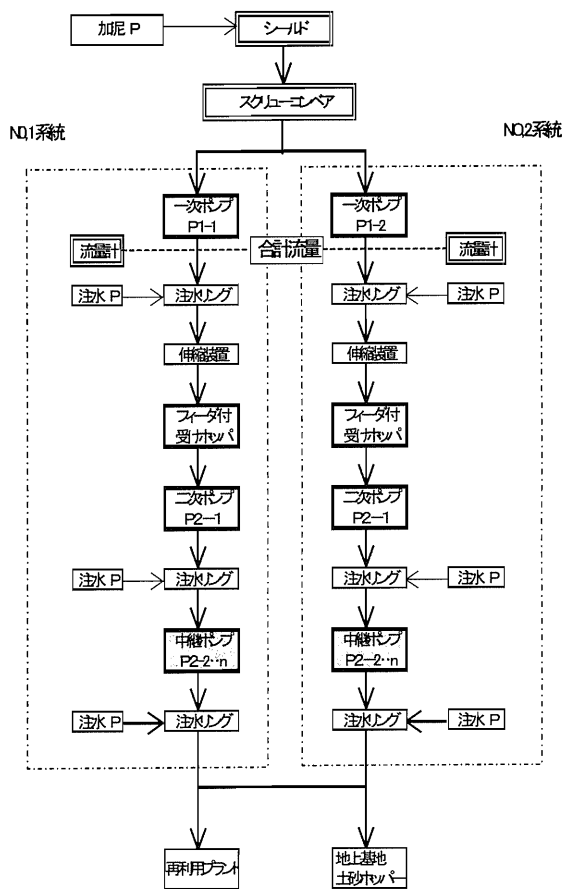


図-4 2系統図

4. 3 ポンプの必要容量

ポンプの必要能力を選定するための基本条件を表一1に示す。表中の注水量は、泥土圧シールド工法協会の表より算出したもので、対象土質の含水比と液性限界を考慮して設定したものである。

表一1 基本条件

項目	設定値
シールド径	φ9.6m
断面積	72.4m ²
土量換算係数	1.05
注水量	50L/m ³

表一2 ポンプ必要容量 (m³/hr)

項目	設定値		
	1系統	2系統	
		50:50	35:65
平均掘進速度			
25mm/min	120	60	78
30mm/min	143	72	93

表一2には、圧送ポンプに必要な圧送能力を系統別に分け、掘進速度に応じて設定した値を示す。2系統の欄に示す比率は、左右に設置したポンプの圧送効率が均衡した場合（50:50）と不均衡な場合（35:65）を示す。

4. 4 ポンプの種類と選定機種

【一次圧送ポンプ】

2系統方式において、掘進速度を30mm/minに設定すると、従来使われているピストンポンプでは、理論吐出量が75～100m³/hr程度の機種が2台必要となる。また、ロータリーポンプを使用する場合は、市場にある機種の中で、最も大きな吐出能力90m³/hr（公称70m³/hr）が2台必要となる。したがって、本工区の厳しい施工条件を満足するためには、脈動が少なく、正確な土量管理を行うことができる、1系統・1台のロータリーポンプが最も適した機種となる。

そこで、今回、新たに従来機種の2倍以上の吐出能力をもつポンプを製作し、本システムに適用した。これは、従来型をスケールアップしたもので、構造および機能は実績に基づいたものである。

表一3 一次圧送ポンプの仕様

名称	機種	電気容量	最大吐出量	最大吐出圧	重量
ロータリーポンプ	従来型	55kw	90m ³ /h	0.68MPa	3,100kg
	新型機種	95kw	152m ³ /h	0.64MPa	6,700kg

【二次圧送ポンプ】

二次圧送ポンプの吐出圧力は、配管径12Bを使用し、坑外までの圧送距離と地上に設置した土砂ホッパーまでの揚程から算出すると、5.2MPaが必要とされる。

表一4に、二次圧送ポンプの機種別能力比較表を示す。

二次圧送ポンプに従来の機種を使用した場合、吐出量からみると、1台で必要数量を満足するものが無いため、2系統方式が条件となる。

また、吐出圧力からみても全坑長を圧送するのに必要な吐出圧力（5.2MPa）を超えるポンプがないため、1台で全坑長を圧送することは困難である。これを補充するには、坑内に中継ポンプが必要となり、全体で4台のポンプを設置することになる。

一方、1系統の場合は、従来型の大容量ポンプを大幅に改造（吐出量135m³/h）することで

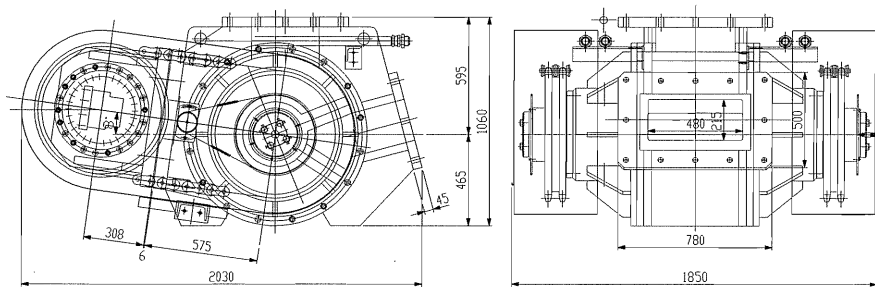
吐出量は確保できるが、この場合の吐出圧力は2.9MPaであるため、必要な吐出圧力を満足することができない。したがって、従来型のポンプを改造しても、中継用のポンプとして、さらに同クラスの機種が必要となる。また、ポンプ効率を考慮すると、さらに15m³程度の土砂をストックする受けホッパーを設置しなければならない。

表一4 二次圧送ポンプの種類

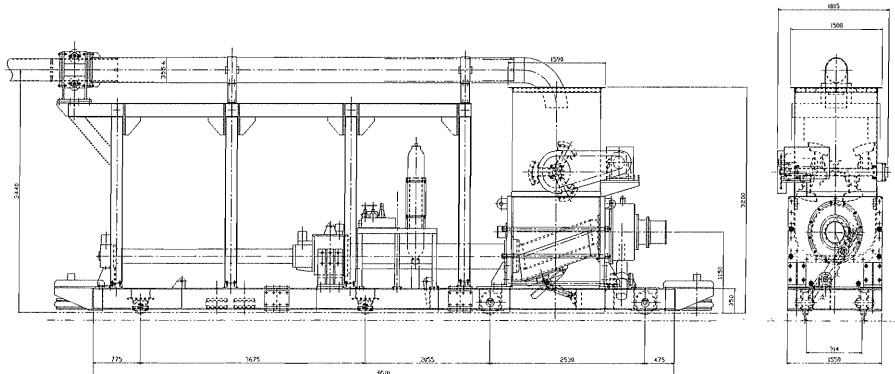
システム	機種	台数	電気容量 (kw)	理論最大吐出量運転		理論最大吐出圧運転	
				吐出量 (m ³ /h)	吐出圧力 (Mpa)	吐出量 (m ³ /h)	吐出圧力 (Mpa)
2系統	ピストンポンプ (従来型)	4	110	100	2.9	75	4.0
1系統	ピストンポンプ (改造型)	2	160	135	2.9	70	5.7
	ピストンポンプ (浚渫用大型)	1	405	207	4.9	125	6.8

4. 5 ポンプの仕様と構造

下記に、当工区で採用した一次圧送ポンプおよび二次圧送ポンプを示す。



図一5 一次圧送ポンプ構造図



図一6 二次圧送ポンプ構造図

5. 施工結果

5. 1 ロータリーポンプによる掘進管理

土圧式シールドでは、土圧管理と土量管理が重要となるが、特に、発進直後の土砂取り込み過多による地盤の陥没が心配される。本工事では、掘削土量を正確に管理するため、二周波流量計と γ 線密度計を用いた連続計測を行った。さらに、初期掘進区間においてはホッパーの内容容量を実測し、流量計の精度を検証した結果、理論排土量に対する流量計の比率は、平均99%と高い精度が確認された。

(報告では5%以内の誤差が実証されている。2))

この様にロータリーポンプを主制御として正確な土量管理を行うこととともに、スクリーコンベアとロータリーポンプの同期制御を行い、微妙に変化する切羽土圧の管理を行った。

5. 2 圧送ポンプの吐出量・吐出圧

本掘進における掘進速度は、初期掘進時での沈下計測結果を基に20~25mm/minの範囲に制限した。そのため、圧送ポンプの実排土量は、加泥量および注水量を加算すると120~130m³/hであった。この値から、今回採用した大型圧送ポンプの吐出量(最大吐出量207m³/h)には十分余裕があったと思われる。

図一7に、掘進距離とピストン前面押し圧力との関係を示す。実績からみても、計画時に設定したポンプの吐出圧力5.2MPaは、ほぼ妥当な値であったと思われる。

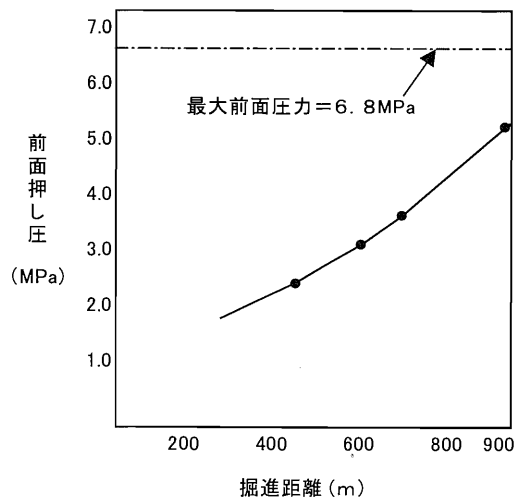
6. おわりに

本報告は、大断面泥土圧シールドの土砂搬送において、1系統・1台の土砂圧送システムが、掘進管理の確実性、機械管理の容易性、および坑内の安全性の面で有効であることを実施工にて確認したものである。システムに使用したポンプは、一次圧送に大型のロータリーポンプ、二次圧送に大容量のピストンポンプであり、その圧送能力には十分な結果を得た。今回対象となった土質は、軟弱な粘土・シルトであったが、他の土質にも対応できるシステムとして適応範囲の拡大を図っていきたい。

参考文献 1) 土木学会第48回年次学術講演会、土圧式シールドにおける切羽安定制御データの重回帰分析、佐藤工業(株)森本藤雄、志村和伸、金山吉。2) 土木学会第47回年次学術講演会、土圧式シールド工法における掘削排土量管理システムの開発、佐藤工業(株)桐谷祥治、志村和伸、直井保。

表一5 掘進距離と前面押し圧

掘進距離 (m)	主ポンプ圧 (MPa)	前面押し圧 (MPa)
450	8.0~9.0	2.46
600	11.0~12.0	3.28
700	13.0~14.0	3.83



図一7 掘進距離と前面押し圧の関係