

# 土圧式シールドにおけるポリマス工法の開発（その2）

—— 現場適用によるポンプ圧送性能の実証 ——

高野 金 幸      山 下 幸 夫

## Development of POLYMAS Method on Earth Pressure Balance Shield (Part 2)

—— Actual Proof Pumping Transportation Efficiency by Application on Work Site ——

Kaneyuki Takano      Yukio Yamashita

### Abstract

The POLYMAS (POLYMer Added Shield) is an excavation method using a new polymer for the earth pressure balance shield. This method has been developed to transport shield excavated soils by pumping system. Polymer mixed excavated soils flow very plastically, enabling smooth excavation and pumping of soils.

The present paper described results of experiments aimed at estimating the quality of the new polymer and the ability to excavate soils. These experiments indicated the applicability on the work site of pumping soils using the POLYMAS method.

This paper describes results of that confirmed pumping transportation efficiency by application on the work site.

### 概 要

ポリマス工法は、土圧式シールドにおいて、砂礫地盤のポンプ圧送を行うことを主な目的として開発したものである。添加材料として新たに開発した高分子系材料を切羽に注入し、掘削土を塑性流動性に優れた状態に改善することで、スムーズな掘進を行うと同時に、掘削土のポンプ圧送が可能となる。

これまでは、上記のポリマス工法用添加材料の性能を評価・確認すること、および土砂と混合したときの性状やポンプ圧送性能などを把握する目的で行った実験結果より、ポリマス工法は材料の安定性や輸送性能ならびに混合土の流動性改善やポンプ圧送性能などに優れていることを示した<sup>1),2)</sup>。

本報では、実際の工事に対してポリマス工法の適用を検討し、本工法を採用したことで全線のポンプ圧送が可能となった結果について述べる。

## 1. はじめに

近年、坑内の作業性および安全性確保や長距離掘進化への対応などから、土圧式シールドにおける掘削土を、従来のずり鋼車に代えてポンプ圧送することの要請が高まっている。また、メタンガスのような可燃性ガスが発生する地盤においては、安全対策の面からもポンプ圧送が有利となる。

従来のポンプ圧送では、添加材料としてたとえばベントナイトなどの鉱物系材料を使用して掘削土を流動化させ、土砂圧送する方法が採用されている。ただしこの方法は、掘削土の粒径や粒度分布によっては土粒子を支えきれず流動性が低下して圧送距離が制限される問題があった。特に掘削対象地盤が砂礫地盤の場合、ポンプ圧送を行うことは困難であった。また気泡シールド工法も、気泡特有の弾性収縮性があることからポンプ圧送に

は不向きであった。

ポリマス工法は、新たに開発した高分子系添加材料によって、砂礫を主体とした掘削土であっても土粒子を強力に支えることで塑性流動性に優れた混合土に改良でき、スムーズな掘進が行えると同時に、掘削土のポンプ圧送が可能となるものである。種々の実験の結果、1台のポンプで1,000mの長距離ポンプ圧送が可能となることを確認した<sup>2)</sup>。

ここでは上記ポリマス工法の性能を踏まえ、四日市市内のシールド工事に適用し、全線(707.5m)にわたって掘削土をポンプ圧送した結果について述べ、本工法の有効性を示す。

## 2. 適用現場の概要

適用現場のシールド工事は、四日市工業地帯へ工業用

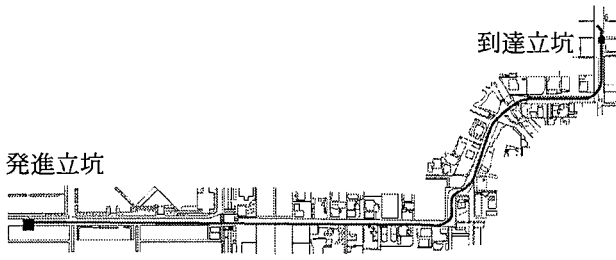


Fig. 1 適用現場シールド工事路線  
An Outline of the Shield Driving Route

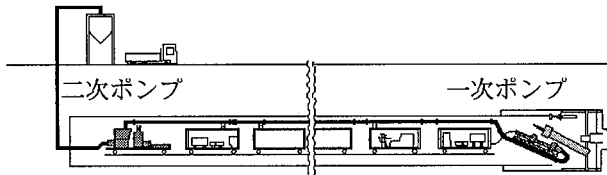


Fig. 2 一般的なポンプ圧送方式  
A Manner of Ordinary Pumping Transportations inside a Tunnel

Table 1 圧送ポンプ仕様例  
Examples of Specifications of Pumps

形式	MSP350	MSP500	MSP750	MSP400	MSP550	MSP800
用途	切羽用（一次ポンプ）			中継用（二次ポンプ以降）		
構造	マシン直結型			レール走行型		
理論吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	41	63	93	47	65	93
理論吐出圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	42	44	31	82	63	63
(MPa)	4.1	4.3	3.0	8.0	6.2	6.2

水を供給するための導水路を建設するものである。Fig. 1に路線概要図を示す。当該工事の概要は以下のとおりである。

- シールド外径：2,580mm      路線延長：707.5m
- 土被り：4.3～10.4m      土質：砂質土
- 曲線：15R～300R, 7箇所      勾配：3.0%

また当該工事の特徴として、以下の点が挙げられる。

- 1) シールド径が比較的小口径である
- 2) 路線の途中で急曲線がある
- 3) 掘進する地盤中にメタンガスを含有する

これより当現場では坑内作業の安全性の確保を第一に図る目的から、特にシールド掘削土をポンプ圧送することが強く求められた。そこで、後述するようにポリマス工法を適用することで全線のポンプ圧送を行うことにしたものである。

### 3. 現場適用への検討

#### 3.1 土圧式シールドにおけるポンプ圧送方式

Fig. 2に土圧式シールドにおけるポンプ圧送方式の概要を示す。一般的なポンプ圧送を採用した掘削土搬出方式は、スクリーコンベヤに直接取り付けられた一次ポンプで掘削土を後方台車の最後尾まで圧送し、そこで能力の

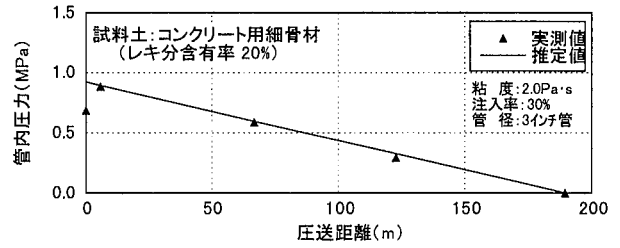


Fig. 3 圧送時圧力損失の一例  
An Example of Measurements on Pressure Loss

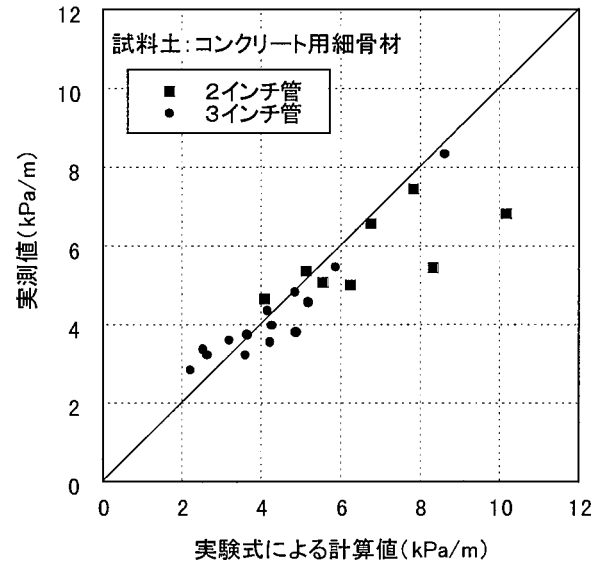


Fig. 4 単位長さ当たり管内圧力損失  
Pressure Losses at Unit Length  
When Transport Polymer Mixing Soils

大きな二次ポンプに積み替えて地上まで再圧送するものである。二次ポンプの能力不足等で掘削土を地上まで送れない場合には、必要に応じて中継ポンプを増設する。

Table 1に圧送ポンプの仕様の一例を示す。一次ポンプは、初期掘進における地上ホッパーまでと、本掘進における二次ポンプまでの土砂圧送を行うものである。圧送距離は60～120m程度であり、それに見合った吐出圧力を有している。

二次ポンプは、トンネル全長にわたって本格的に土砂圧送を行うものである。ただし、Table 1に示すような圧送ポンプを設置したとしても、従来の添加材料を用いる方法では1台のポンプでせいぜい300～700m程度の距離しか圧送できないのが現状である。

#### 3.2 適用現場におけるポンプ圧送の検討

ポリマス工法の現場適用に先立ち、開発した高分子系添加材料を土砂と混合したときのポンプ圧送性能を把握・確認するため、技研内でポンプ圧送実験を行った。実験は、2インチ管と3インチ管を約200m配管し、砂礫地盤を想定したコンクリート用細骨材を用いて行った。実験の結果、混合土の流動性が著しく改善され、順調にポンプ圧送することができた。Fig. 3に圧送時の管内圧力損失の一例を示す。Fig. 4は、圧送条件を変化させた場合

の配管単位長さ当たりの管内圧力損失の実測値を、コンクリート分野で実績のあるポンプ圧送実験式<sup>3)</sup>を用いた計算値と対比して示したものである。これより、掘削土のポンプ圧送による圧力損失は、コンクリートのポンプ圧送実験式とよく一致することがわかった。以下にポンプ圧送実験式を示す。

$$\Delta P = (2/r) \cdot \{K1 + K2(1 + t2/t1) \cdot V\} \cdot \alpha$$

ここに、 $\Delta P$  : 単位長さ当たりの管内圧力損失 (kgf/cm<sup>2</sup>/m → 100kPa/m),

$r$  : 管半径 (m),  $K1$ : 粘着係数 (kgf/cm<sup>2</sup>),

$K2$  : 速度係数 (kgf/cm<sup>2</sup>/m/s),

$t2/t1$ : 管内流動停止時間/流動時間,

$V$  : 平均流速 (m/s),  $\alpha$  : 圧力比

したがって、上式を用いて当該現場の圧送状況を想定し、ポリマス工法の適用を検討した。当初計画の段階では適用現場の対象地盤が砂質地盤であることから、全線を通してのポンプ圧送は困難であると判断されていた。そのため、初期掘進中は地上ホッパーまでのポンプ圧送を行うものの、本掘進では電源が集中する後方台車区間のみでポンプ圧送を行い、後方台車の最後尾でずり鋼車に積み替えて坑口まで搬出する計画であった。

ポリマス工法を適用する場合であっても、本掘進において全線をポンプ圧送する場合は、一般的なポンプ圧送方式で示した通り、通常は二次ポンプを使用する。ただし、ポリマス工法用添加材料による強力な流動性改善効果を背景に、二次ポンプを省略して一次ポンプのみで全線をポンプ圧送する検討を行った。Table 2に検討結果を示す。これより、Table 3に示す当該現場で使用した一次ポンプの圧送能力で充分、全路線のポンプ圧送を行うことが可能であることがわかった。当該現場にとってはシールド径が小さいことから、二次ポンプの設置場所の確保が困難な状況でもあり、一次ポンプのみで全線のポンプ圧送が行えるポリマス工法が採用されることとなった。

### 3.3 地盤改良材の影響

当該現場では途中の急曲線部において薬液注入による地盤改良を行った。地盤改良剤の影響で混合土の流動性が低下するとポンプ圧送に支障を来す恐れがあったため、地盤改良剤の影響を把握する目的で実験を行った。Table 4に現場で使用した薬液の配合を示す。実験は地盤改良剤を模擬土砂に添加したあと、ポリマス工法用添加材料を注入して、時間経過とともにその土砂の流動性と分離状態（遊離水）を測定した。

Table 5に地盤改良剤の影響結果を示す。これより、地盤改良土と添加材料との混合土は6日間にわたり地盤改良剤の影響を受けることなく、地盤改良剤を添加しなかった混合土よりも若干良好な流動性を維持することが判明した。これは薬液中の珪酸ソーダによりpHが上昇し細菌の発生が抑制されたことによって材料の劣化が押さえられたためと考えられる。よってポリマス工法は今回現場が用いた水ガラス系の地盤改良剤の影響を受けないため、現場適用への支障とはならないことが分かった。

Table 2 ポンプ圧送時圧力損失の検討  
An Examination of a Pressure Loss at Work Site

項目	記号・単位	計算式	計算結果
シールド外径	D (m)		2.58
セグメント長	l (m)		1.00
掘進速度	s (mm/min)		50
掘進時間	t (min)	l/(s/1000)	20
添加材注入率	λ (%)		30
圧送土量	Q (m <sup>3</sup> /sec)	{(π/4) · D <sup>2</sup> · l · (1+λ/100)} / (60t)	0.00566
スランプ値	SL (cm)	注入率より決定	23.0
粘着係数	K1 (kgf/cm <sup>2</sup> )	(3.00-0.10SL) × 10 <sup>-3</sup>	0.0007
速度係数	K2 (kgf/cm <sup>2</sup> /m/sec)	(4.00-0.10SL) × 10 <sup>-3</sup>	0.0017
流動停止/流動	t2/t1		0.3
圧力比	α		1.0
管径	d (inch)		6 8
管半径	r (m)		0.0762 0.1016
管断面積	A (m <sup>2</sup> )	π · r <sup>2</sup>	0.0182 0.0324
管内平均流速	V (m/sec)	Q/A	0.3105 0.1746
単位長さ当たり管内圧力損失	ΔP (kgf/cm <sup>2</sup> /m)	(2/r) {K1+K2(1+t2/t1)V} α	0.0364 0.0214
圧送距離	L (m)		270.5 629.5
管内圧力損失	P (kgf/cm <sup>2</sup> )	ΔP · L	9.8 13.5
圧力損失合計	ΣP (kgf/cm <sup>2</sup> )		23.3
	ΣP (MPa)	0.0980665 ΣP	2.28

Table 3 一次圧送ポンプ仕様  
Specifications of P-1 Pump

形式	MSP704型	
用途	切羽用	
コンクリートシリンダー径	φ180mm	
ストローク量 (2シリンダー)	35.6 l	
油圧シリンダー径/ピストンロッド径	φ80/40mm	
吐出圧力: 油圧	1:6.7	
最大油圧	250 kgf/cm <sup>2</sup>	
理論吐出圧力	37 kgf/cm <sup>2</sup>	
実効吐出圧力 (理論吐出圧力 × 0.7)	25.9 kgf/cm <sup>2</sup>	
電動機容量	30 kW	
最大吐出量	36 m <sup>3</sup> /Hr	
オイルタンク容量	200 l	
重量	ポンプユニット	約1,400 kg
	パワーユニット	約1,000 kg

Table 4 地盤改良剤配合例  
Combination Table of Soil Improvements

CASE	中結配合 ゲルタイム 3分 20℃	A液: 珪酸ソーダ 3号...100l 水...100l 計 200l	B液: サンコーボール SW-2...20kg 水 193.2l 計 200l
CASE-2			
CASE-3	瞬結配合 ゲルタイム 6秒 20℃	A液: 珪酸ソーダ 3号...100l 水...100l 計 200l	B液: サンコーボール OSB...12kg OSB 助剤...4kg 水 198.2l 計 200l

Table 5 地盤改良剤の影響  
Results of Estimation Test for Improvement Soils

ケース	CASE-1	CASE-2	CASE-3		
地盤改良剤	配合	なし	中結		
	液添加法	なし	混合後、砂と攪拌約2分		
硬化	添加率 (%)	0	20%		
	条件	—	1日 × 20℃		
S O P	外観・状態	—	全体的に硬く固まっている		
	分離状態	—	若干水が分離 ほぼ硬化している		
測定	添加割合	40%	40%		
	添加方法	攪拌約3分	攪拌約3分		
測定	スランプ	10分後 24.0 × 24.0cm	19.5 × 19.0cm	26.0 × 26.0cm	
	フロー	2日後 23.5 × 22.5cm	19.0 × 19.0cm	25.5 × 25.5cm	
		6日後 26.5 × 26.5cm	22.0 × 21.5cm	26.5 × 26.5cm	
	外観および状態	10分後	砂全体が均一で分離もなく良好	砂全体が均一で分離もなく良好	砂全体が均一で分離もなく良好
		2日後	遊離水なし 砂の分離なし 流動性良好	遊離水なし 砂の分離なし 流動性良好	遊離水なし 下部がわずかに固い 流動性良好
		6日後	遊離水: 約4% 砂の分離有り 流動性やや不良	遊離水: 約5% 砂の分離なし 流動性良好	遊離水: 約5% 下部がわずかに固い 流動性良好

#### 4. 適用結果と考察

当初計画のとおり初期掘進の段階はポンプ圧送を適用し、順調な圧送を行った。引続き本掘進でも検討結果を踏まえ、一次ポンプのみで圧送を行った。最終的に全線707.5m、水平距離換算で約900mにわたって、順調にシールド掘削土をポンプ圧送することができた。

Fig. 5に現場でポンプ圧送した掘削土の粒径分布を示す。現場の土質は検討段階では砂質土という前提であったが、実際はFig. 5のように広い範囲の土質が分布していた。ポリマス工法が目標としている砂礫を主体とした掘削土のポンプ圧送ができたことは、所内実験の結果を基にした検討が妥当であったことを裏付けるものである。また、砂質系の掘削土ではあるが粘土・シルト分を50%程度含む土砂も圧送できたことは、ポリマス工法の適用範囲を広げる意味で重要である。

Fig. 6に計測した圧力損失データを示す。ここでも、圧力損失の実測値を前述のコンクリートのポンプ圧送実験式と対比して示している。これらの結果より、ほぼ当初想定したとおりの圧力損失となり、コンクリート分野で用いられているポンプ圧送実験式が、土砂圧送の場合にも適用できることが確認できた。

また、一般的なポンプ圧送方式が能力の大きな二次ポンプでトンネル全線の圧送を行う（圧送実績：約300～700m）のに対し、能力の小さい一次ポンプのみで全路線をポンプ圧送できたことは、ポリマス工法の有効性を示すものである。

#### 5. むすび

実際のシールド工事においてポリマス工法を適用した結果、当該工事では一次ポンプのみで全路線の圧送を行うことができた。また当該工事における掘削地盤の粒度は広範囲に分布していたが、いずれの場合もポンプ圧送が可能であった。その中には従来の技術ではポンプ圧送が困難であった砂礫を主体とした地盤も存在し、ポリマス工法の有効性を確認した。

また掘削土のポンプ圧送性能を把握するために必要な管内圧力損失の推定は、コンクリートのポンプ圧送で実績のあるスランプ値に基づく実験式が適合することが確認できた。地盤改良剤の影響も少なく、安全に掘削土をポンプ圧送することができる。

シールド工事の将来を展望したとき、今後の長距離掘進および急速施工技術の実用化と相まって、ポンプ圧送の必要性がますます高まり、ポリマス工法に代表されるポンプ圧送技術が必要不可欠になるものと考えられる。それらの要請に応えるよう、これからもより信頼性の高い技術とするため細かな問題点を解決していくこととしたい。

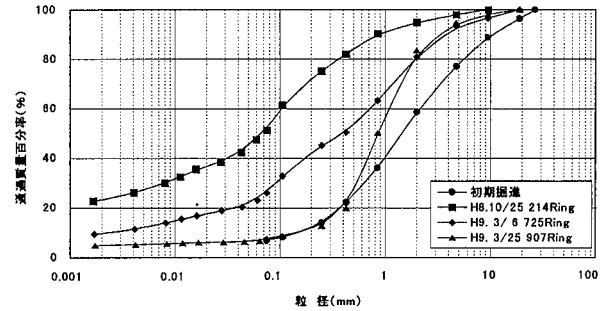


Fig. 5 粒度分布  
Grain Size Distributions of Typical Soil Samples

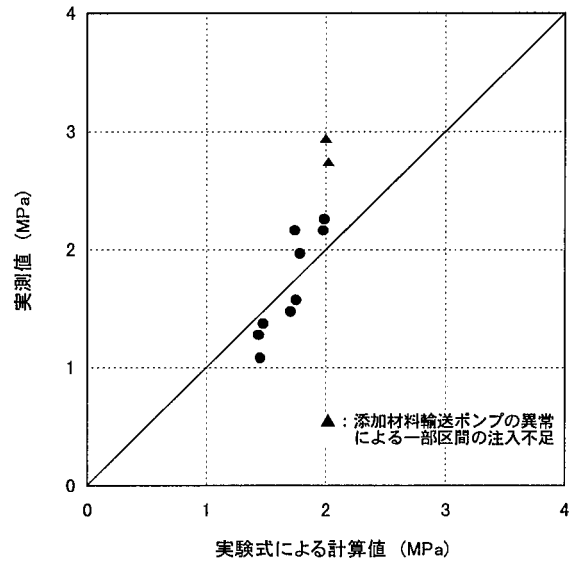


Fig. 6 配管全長における圧力損失  
Results of Measurement on  
Total Pressure Losses at Work Site

#### 謝辞

本研究開発は、ダイセル化学工業（株）との共同研究として実施したものである。佐藤宏一氏、堀河武氏、沖野文吉氏をはじめとして多くの方々のご協力をいただいた。ここに記して、深甚なる謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 山下幸夫, 高野金幸: シールド掘削土のポンプ圧送技術に関する研究, 第32回地盤工学会発表講演集, p. 2, 091~2, 092, (1997. 7)
- 2) 山下幸夫, 高野金幸: 土圧式シールドにおけるポリマス工法の開発—添加材料の性状と掘削土砂の流動性・圧送性等の検証—, 大林組技術研究所報, No. 55, p. 51~54, (1997. 7)
- 3) 森永 繁: コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究, コンクリートジャーナル, Vol. 9, No. 7, (1971. 6)