

大断面泥土圧シールドにおける掘削土のポンプ圧送と改質

The Pump-discharging of Excavated Soil at the Large Diameter EPB Shield

桑原 賢司* 森 一*
 Kenji Kuwabara Hajime Mori
 坪井 広美**
 Hiromi Tsuboi

要 約

「平野川調節池築造工事-4」は、現在最大径の ϕ 11.52m大断面泥土圧シールドにより延長1.7kmのトンネルを施工するものである。そして、大量に発生する掘削土の搬出は、切羽から地上まではポンプ圧送を採用し、場外搬出は普通ダンプトラックで行う計画である。この搬出形態における掘削土には、ポンプ圧送のための液性状態と、普通ダンプトラックでの搬出における塑性状態が要求される。この相反する要求性状に対して、最適かつ効率の良い切羽添加材、土砂改質材の選定と土砂性状の管理が必要となる。さらに、土砂ストック量の制限から連続的に性状を変化させる必要がある。

この様な厳しい課題に対して、シールド発進前に土砂圧送実験および改質実験をとおして最適な切羽添加材および改質材添加量を把握し施工に臨んだ。その結果、大きなトラブルもなく、効率よく排土、改質が可能であった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 土砂圧送および改質実験
- § 4. 施工結果
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

大阪市は、市南東部の浸水被害を軽減するため寝屋川南部地下河川の建設を進めている。本工事は、その一部である「平野川調節池」のⅢ期工事として、延長1.7kmの区間に12万 m^3 の貯留量をもつトンネルを、外径 ϕ 11.52mの泥土圧シールド工法で施工するものである。

大断面泥土圧シールドの多くの技術的課題の一つとして、大量に発生する掘削土の坑内輸送と場外搬出をいかに効率良く行うかという課題がある。原設計では、切羽添加剤として気泡材を使用し、場外搬出は、消泡材を使用することで改質材なしで普通ダンプトラックで搬出するものであった。一方、高水压下での施工や輸送効率から、坑内輸送にポンプ圧送を採用することとなった。そこで大規模な土砂圧送固化工法実験をとおして最適な施工法

を検討することとなった。

本報では、掘削土の坑内輸送と改良搬出について、事前検討と実施工結果について記述する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工事内容を表-1に示す。

2-2 地質概要

地質概要図を図-1に示す。掘削対象土質は、海成粘土層と淡水成砂質土が規則的に互層となる下部洪積層大

表-1 工事概要

工 事 名	平野川調節池築造工事-4
企 業 先	大阪市建設局
工 事 場 所	大阪市阿倍野区桃ヶ池町1~松虫通1
施 工 延 長	1,690m
シールド	泥土圧シールド(中折れ付) 外径 ϕ 11.52m機長9.5m
残 土 搬 出	ポンプ圧送方式
平 面 線 形	R70m \times 1カ所、R500m \times 3カ所
縦 断 勾 配	i=1/1,500
土 質	下部洪積層大阪層部粘性土と砂質土の互層
土 か ぶり	最大36.1m、最小26.7m
セグメント	ゲタパゲメント 外径 ϕ 11.3m・桁高350m・幅600mm RCセグメント 外径 ϕ 11.3m・桁高500m・幅1500mm
裏 込 め 注 入	セグメントからの同時注入方式(可塑性クレイト別)
補 助 工 法	発進防護凍結工法および薬液注入工法

* 関西(支)平野川シールド(出)

** 横浜(支)MM線山下町(出)

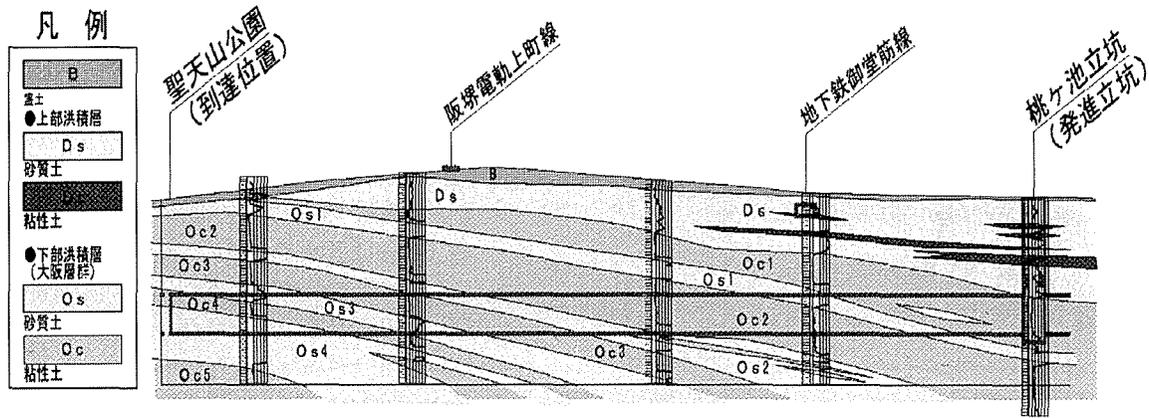


図-1 地質概要図

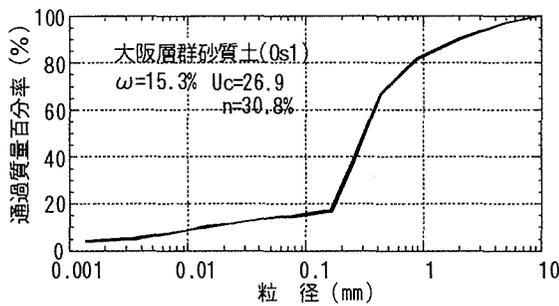


図-2 Os1層粒度分布

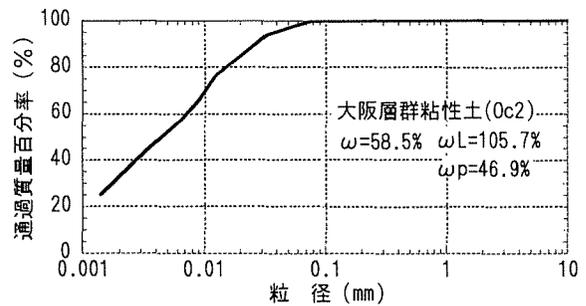


図-3 Oc2層粒度分布

阪層群である。大阪層群は、本工区終点付近を軸とする背斜構造となっているため、掘削断面内に粘性土層(Oc層)と砂質土層(Os層)が繰り返し出現することとなる。掘削対象土層の代表として、Os1、Oc2層の粒度分布を図-2、図-3に示す。

粘性土層は、一軸圧縮強度の平均が $q_u=0.33$ MPa程度と比較的硬質であるが、 $5\mu\text{m}$ 以下の粘土含有率が平均44%と高く、塑性指数も平均 $IP=60$ と高塑性を示すことから、チャンバ内での混練・塑性流動化および各機械や圧送管への付着に留意する必要がある。一方、砂質土は、いずれも $N=50$ 以上と蜜実であるが、細粒度の混入率が10%以下で、均等係数が $U_c=5$ 以下となる流動性、崩壊性の高い砂質土層も存在することから、切羽の安定に留意する必要がある。

§ 3. 土砂圧送および改質実験

3-1 実験目的

シールド発進前に実施した土砂圧送実験および土砂改質実験は、掘削土砂のポンプ圧送と排土後の土砂改質の高効率化を目的に実施した。それぞれの実験目的は次のとおりである。

(1) 土砂圧送実験

- ① 切羽添加材の選定
- ② 実工事での圧送距離を考慮した、切羽添加材の最適添加量の把握
- ③ 圧力損失係数の把握

④ 添加材添加前後での土砂性状の変化

(2) 土砂改質実験

- ① 効果的な改良材の選定
- ② 添加量の把握

3-2 土砂圧送実験

(1) 実験方法

実験装置の模式図を図-4に、本実験と実施工時の条件比較を表-2に示す。

添加材の添加場所は、掘削土砂の塑性流動化や付着防止の目的で添加する切羽(チャンバ)と、ポンプ圧送効率向上の目的で添加する注水リングの2ヶ所とした。切羽での添加は、チャンバ内を想定したピットで添加材と地盤材料を混練することで再現した。

計測項目は圧送管4個所での管内圧力(P1~P4)、流量および密度で、0.5sピッチでデータを収録した。また、圧送後における含水比・スランプ試験を行い土砂性状の変化を捉えた。

(2) 地盤材料

圧送土砂は、当工事で主体となる下部洪積層大阪層群粘性土を対象とし、同じ地盤を掘削した他現場の発生土を使用した。また砂質土は、土砂を主体として、当工区の対象地盤と同様な粒度に調整した。

(3) 切羽添加材の種類

実験に使用した添加材は、粘性土に対して高分子系のA、Bの2種類である。添加材Aはアクリルマイドを主成

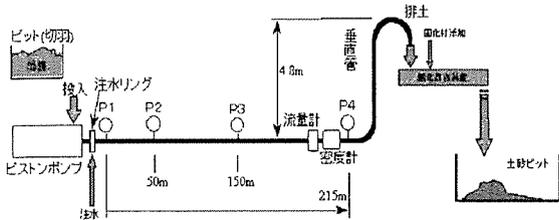


図-4 実験装置の模式図

表-2 実験条件

	実験	実施工
ポンプ最大吐出量 ピストンポンプ	50m ³ /h	340m ³ /h (170×2系統)
圧送管	6 ^B ×1系統	12 ^B ×1系統 (P2以降)
水平圧送距離	約220m	最大500m
注水リング吐出量	15ℓ/min (一定)	0~15ℓ/min (可変)

分とし、粘性土表面に吸着し保護皮膜を形成、掘削土の塑性流動性を向上させるものである。添加材Bは天然物質である海藻から抽出されるアルギン酸を主成分とし、別にカルシウムを添加することで高い凝集力を発揮し、泥水処理等で用いられるものである。どちらの添加材も硬質粘性土の切削状態を考慮し、摩擦・付着低減を主眼としたものである。一方、砂質土に対しては、泥漿材(クレイサンド)を切羽添加材として使用した。

(4) 実験ケース

圧送実験のケースを表-3に示す。粘性土地盤に対しては、その添加量を変化させた。砂質土地盤に対しては、主に圧力損失の把握を目的に1ケースを実施した。

(5) 圧送実験結果

① 粘性土地盤での圧送性

実験結果の代表として切羽で添加剤Aを5%混練したものと添加材Bを10%混練したものについて、水平換算距離と管内圧力の関係を図-5および図-6にそれぞれ示す。これらの図より注水リングからの注水がポンプ元圧(P1)の低減、管内摩擦の低減に対して非常に有効であることが分かった。また、水の注水よりも添加材の注水が、ポンプ元圧(P1)、管内圧とも低く抑えることができた。さらに、添加材Bを切羽で混練したものは、注水リングからの水の添加が最も有効であることが分かった。

図-7にポンプ元圧(P1)と単位長圧力損失の散布図を示す。土砂圧送は、ポンプ元圧が低く、かつ圧力損失も小さいものが好ましい。したがって、圧送性に優位性を認められるNO.6(切羽で添加材A、注水リングで添加材Bの0.5%溶液を注入)、およびNO.7(切羽で添加剤B、注水リングで水を注入)が圧送性に優れていることが分かった。

② 土砂性状の変化

圧送後の土砂改質を考慮すると、できるだけ含水比の

低い状態で排土されるのが好ましい。図-8に圧送前後の含水比の変化を示す。この結果から、切羽で添加材Bを注入したものは、注入に拘わらず圧送前後の含水比の増加は小さい。これは添加材Bの持つ離水作用によるもので、圧送過程で注水された水が圧送土砂に取り込まれることなく、土砂と圧送管壁との間に存在するためである。これは、注水リングから添加する水を着色すること

表-3 実験ケース

実験NO	切羽での添加(混練時添加)		注水リング	地盤材料
	材料名	添加量(Vol%)		
1	添加材A (1/2000)溶液	10%	水	粘性土
2			添加剤B(0.2%)溶液	
3			添加剤B(0.5%)溶液	
4	添加材A (1/2000)溶液	5%	水	
5			添加剤B(0.2%)溶液	
6			添加剤B(0.5%)溶液	
7	添加材B (1/1000)溶液	10%	水	
8			添加剤B(0.2%)溶液	
9			添加剤B(0.5%)溶液	
10	クレイサンド	30%	添加剤B(1.0%)	砂質土

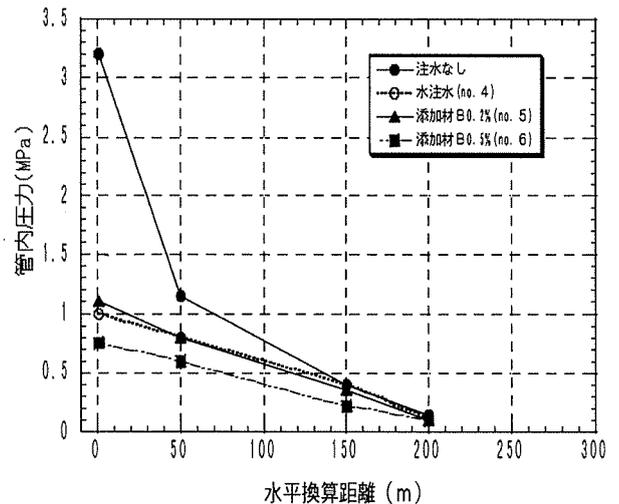


図-5 管内圧力(切羽で添加材A5%混練)

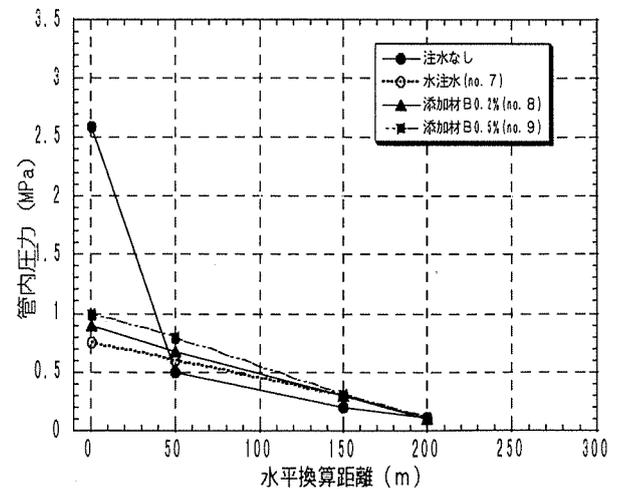


図-6 管内圧力(切羽で添加材B10%混練)

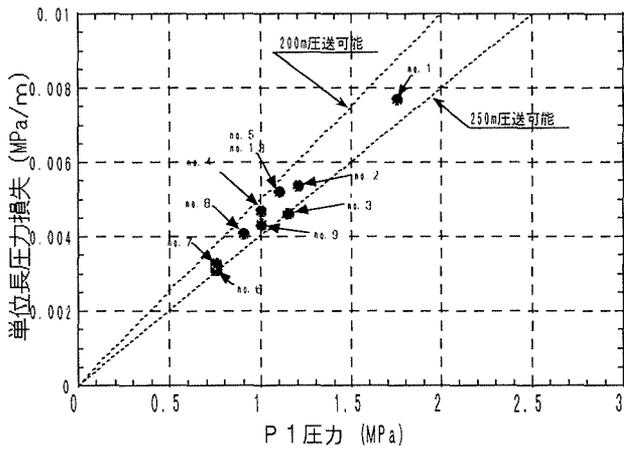


図-7 ポンプ元圧と圧力損失

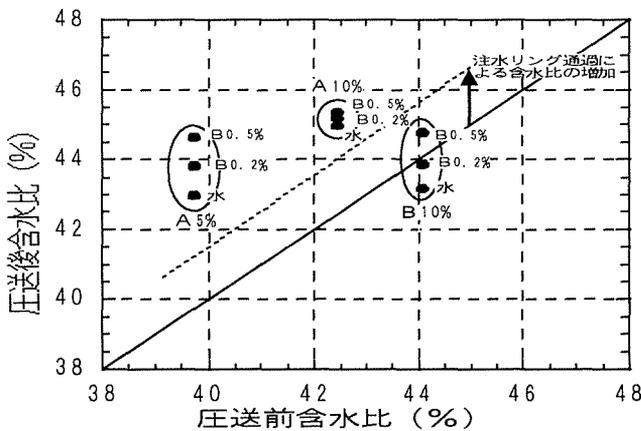


図-8 圧送後の含水比の変化

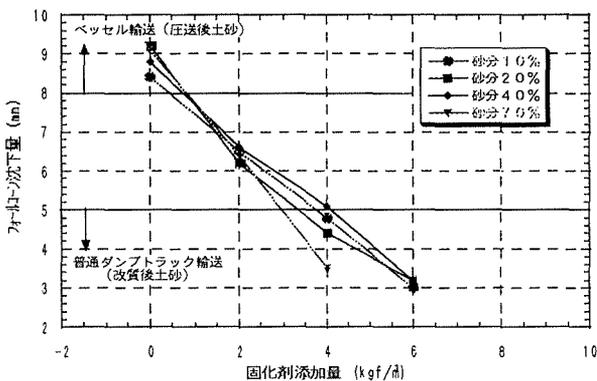


図-9 改質材添加量とフォールコーン沈下量

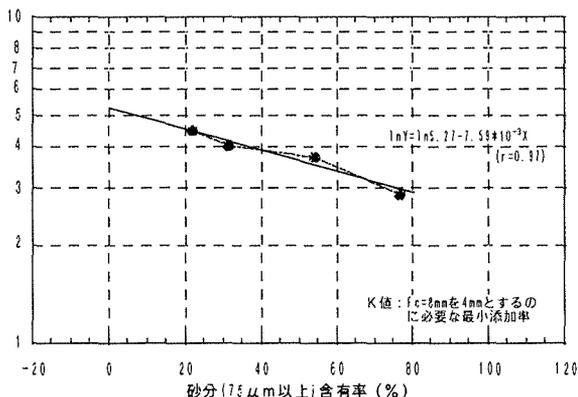


図-10 土砂改質実験結果

を確認した。

すなわち、切羽で添加材Bを添加すれば、注水リングから水を添加することで、最大の圧送性を発揮し、注水した水が圧送土砂内に取込まれないため圧送後の含水比が増大せず、改質効率も向上する。

以上より、NO.7 (切羽で添加剤B, 注水リングで水を注入) が圧送性・土砂性状変化とともに最も優れていることが分かった。

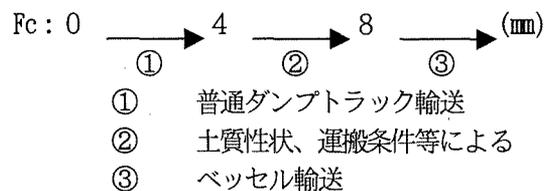
3-3 土砂改質実験

(1) 実験方法と改質材の選定

圧送実験に引き続き、実験装置端部にセットしたスクリーフィーダで圧送土砂と改質材を混練し、土砂ピットにてスランプテスト (JIS A 1101) とフローテスト (JIS R 5201) を実施し、最適な改質材を選定した。改質材に求められる機能として、速効性とpH中性域での改質があり、高分子系の粉体2種類・液体2種類の4種類改質材について実験を実施した結果、最良な値を示した粉体の天然高分子系吸水材を採用した。

(2) 改質材の添加量

本工事での残土処分は、普通ダンプトラックでの指定地処分である。そこで、普通ダンプトラックで運搬可能な改質後の土砂の目標性状を定める必要があり、ベッセル輸送と普通ダンプトラック輸送との境界を以下のように実験的に示した文献1) より目標性状をフォールコーン沈下量 $F_c=4\text{mm}$ と定めた。



また、圧送実験から、圧送後の土砂のフォールコーン沈下量が $F_c=8\text{mm}$ となる結果を得た。また、本工事での掘削土質や場外運搬状況を考慮すると、 $F_c=5\text{mm}$ でも普通ダンプトラックによる運搬が可能であるため、 $F_c=8\text{mm}$ の土砂を $F_c=5\text{mm}$ 以下にするために必要な改質材の添加量を求めた。ここでは、この添加量をK5値とする。改質材添加量とフォールコーン沈下量 (F_c) との関係を図-9に、この図から、 $F_c=8\text{mm}$ を 5mm にするのに必要な最小の改質材の添加率 (K5値) を求めて、砂分含有含有量でプロットしたものを図-10に示す。この図から砂分 ($75\mu\text{m}$ 以上) 含有率 (%) とK値 (kgf/m^3) には強い相関があることが分かった。

§ 4. 施工結果

4-1 ポンプ圧送

(1) ポンプ圧送設備

本工事のポンプ圧送システムは、掘削土を1軸のスクリーコンベアに直結されている左右2機のP1ポンプで2系統に振り分ける。次に後方台車後部のシルトミキサ(解放型)まで圧送し、シルトミキサの2軸オーガによってP2ポンプに送られ、500mピッチに設置された中継ポンプを介して地上の土砂改質装置まで送られる。ポンプ圧送設備概要図・圧送設備の諸元を図-11、表-4に示す。

(2) 圧送性

事前の圧送実験結果より、実施工での切羽添加材として、粘性土地盤に対しては添加材Bを、注水リングでは水を添加した。また砂質土に対しては泥漿材(クレイサンド)を添加した。その結果、良好な圧送性を示したが、P2ポンプ吐出部に圧力計を設置し管内圧力を土質・圧送距離別に測定し、従来より土砂ポンプ圧送検討に使用されているコンクリートのポンプ圧送式(1式)と比較を行った。

$$\Delta P = \frac{2}{r} \times \left\{ K_1 + K_2 \times \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) \times V \right\} \times \alpha \dots (1)$$

ここに、 ΔP :単位長さ当りの管内圧力損失 (MPa/m)

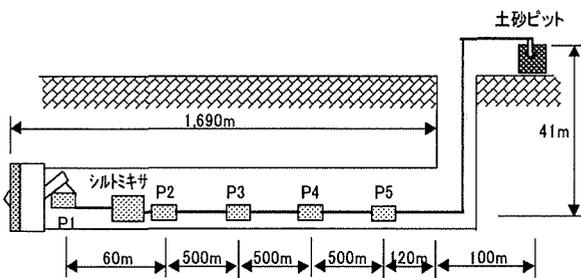


図-11 ポンプ圧送設備図

- r :圧送管半径(m)
- K_1 :粘着係数 $= (3 - 0.1 \times SL) \times 9.8 \times 10^5$ (MPa)
- K_2 :速度係数 $= (4 - 0.1 \times SL) \times 9.8 \times 10^5$ (MPa)
- SL :圧送土のスランプ
- t_1/t_2 :圧送排土流動時間/停止時間(0.3)
- V :管内平均流速 $= Qp / (3600 \times \pi \times r^2)$ (m/s)
- Qp :時間当り排度量(m^3/h)
- α :管軸方向と半径方向の圧力比

表-5に実験および実施工の比較を示す。

実験と同じ土砂性状区間にて実施工結果と比較した結果、砂質土においては、推定値と実測値が一致した。これは、砂質土に泥漿材を添加し不足するバインダー分を補充することによりコンクリート性状に近い状態となるためである。一方粘性土は、推定値が実験値を上回る結果となった。前項で述べたように粘性土の圧力損失は、注水によって左右されるため、注水による摩擦低減効果を加味していないスランプに基づいたコンクリート圧送式(1式)では、実測より大きくなると考える。

以上のことより実測値とコンクリート圧送式(1式)による推定結果は、砂質土に関しては、相似であり土砂圧送においても適用できることが分かった。しかし、デ

表-4 圧送設備の諸元

一次圧送ポンプ (P1)	形式	油圧式ダブルストポンプ
	最大吐出量	180m ³ /h
二次圧送ポンプ (P2,P3,P4,P5)	形式	油圧式ダブルストポンプ
	最大吐出量	170m ³ /h
シルトミキサ	吐出圧	6MPa
	容量	18m ³
圧送管	P1~P2	10 ^B
	P2以降	12 ^B

(1系統当たり)

表-5 実験および実施工の比較

項目	単位	粘性土	砂質土			
		実験no.7 切羽添加材:B10% +注水:水	実験no.10 切羽添加材:泥漿材 30%			
土砂圧送実験	圧送管6B	圧送管半径	r	m	0.0776	0.0776
		圧送土のスランプ	SL	cm	2	9.5
		排土と停止時間の比	T2/T1		0.3	0.3
		時間当排土量	Qp	m ³ /h	20	29.6
		管軸方向と半径方向圧力比	α		1	1
		粘着係数	K1	MPa	0.0003	0.0002
		速度係数	K2	MPa	0.0004	0.0003
		管内平均流速	V	m/sec	0.2937	0.4346
		管内圧力損失	ΔPH	MPa/m	0.0106	0.0095
		実験値			0.0033	0.0096
実施工結果 (圧送管12B)	圧送管12Bでの推定	圧送管半径	r	m	0.1523	0.1523
		時間当排土量	Qp	m ³ /h	62.6	58.5
		管内平均流速	V	m/sec	0.2386	0.2230
		管内圧力損失	ΔPH	MPa/m	0.0051	0.0037
管内圧力損失	ΔPH	MPa/m	0.0046	0.0038		

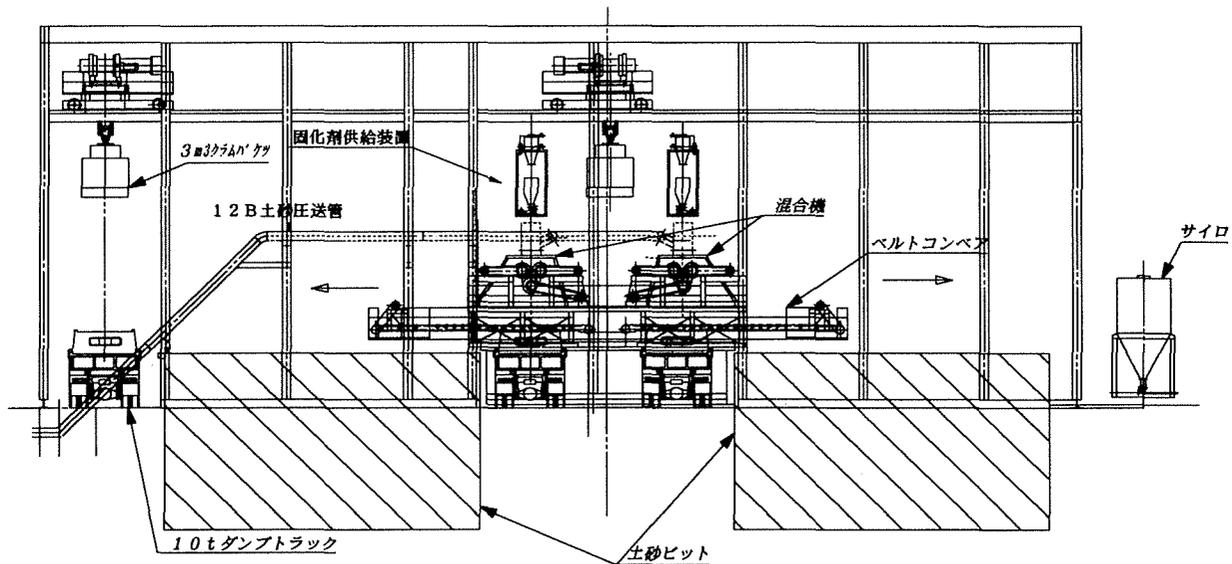


図-13 改良装置図

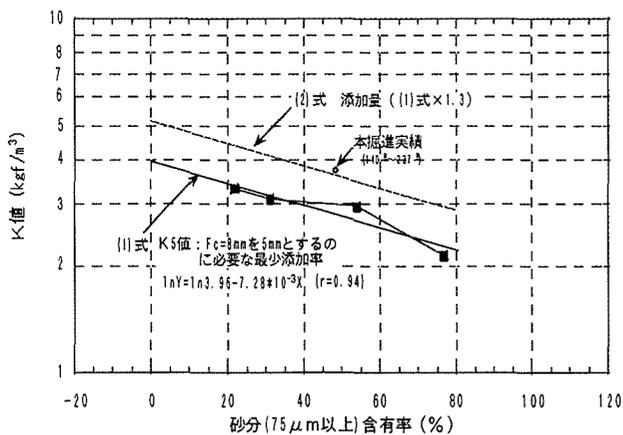


図-12 実施工におけるK5値

ータ不足のため粘性土における管内圧力損失と注水による摩擦低減効果の関係を把握することができず、今後課題を残すこととなった。

4-2 圧送土の改質

実施工において、実験で得た改良材添加量K5値に着目した。その結果、図-12に示した通り、混練方法等の相違から、実験と同様な改良効果を得るためには改良材を30%増加させる必要があることが分かった。

4-3 改質装置

実施工では、圧送管より排出された土砂の上部より改良材をふりかけ、付着防止効果をもつ多軸式混合機の3軸ロータにより混合、スライド式ベルトコンベアにて土砂ピットへ輸送した。固化装置概要図を図-13に示す。この設備を採用することにより、実験段階で課題となっていた土砂の混練・運搬を連続的に行うことができ、1日200台以上におよぶ普通ダンプトラックの残土搬出が可能となった。

§ 5. おわりに

本工事は、今回述べた土砂圧送だけでなく大断面シールド工法における70R急曲線施工・地下鉄御堂筋線の交差施工と厳しい条件下での施工ではあったが、本稿で述べた事前検討および掘進管理システムを代表とする各種のシステムや計測管理の導入により平成9年11月に発進し、平成10年12月に大きなトラブルもなく無事到達することができました。

最後に、これまで多くのご指導、ご支援を頂いた関係各位に対し深く感謝致します。

参考文献

- 1) 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, 1971.
- 2) 寺本 博明, 山口 弘則, 可川 清人, 坪井 広美, 世界最大径の泥土圧シールド, トンネルと地下, Vol.30, 1999.