

シールドトンネル工事における大深度立坑での土砂圧送施工事例 Case study adopting soil pumping system at a deep shaft in TBM project

高永 光太郎* 三ツ井 敦史**
Kotaro Takanaga Atsushi Mitsui
上田 幸生***
Yukio Ueda

要 約

ケーブルトンネル東西線第3工区におけるシールドトンネル工事（掘削外形 6,910 mm）において、ズリ処理時間の短縮を目的として一部の区間に、当初計画していたズリトロ揚重方式に替えて、深度 60 m の大深度立坑に土砂圧送排土方式を採用した。

本論文は、この大深度立坑に採用した土砂圧送排土方式に関して、対象土質の特長などを含めた施工結果、技術的内容について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 施工上の課題
- § 4. 土砂圧送設備計画
- § 5. 土砂圧送施工結果
- § 6. まとめ

§ 2. 工事概要

(1) 工事概要および施工位置

工 事 名：ケーブルトンネル 東西線 第3工区
発 注 者：シンガポールパワーアセット
工事場所：シンガポール（図－1、2 参照）
工 期：2012 年 10 月 8 日～2017 年 4 月 2 日

§ 1. はじめに

シンガポールのケーブルトンネル工事はシンガポールパワーアセットが発注者となり、次世代の電力需要に備え整備される超高压送電線用トンネル建設工事である。総延長 35 km におよぶトンネルは東西線（EW1～EW3 工区）と南北線（NS1～NS3 工区）の 6 工区に分割発注された。ケーブルトンネルは地下幹線道路や地下鉄、下水道幹線を避け 30～60 m の深度に建設される。このうち本施工区間である EW3 工区では、延長約 5.5 km のトンネルを 2 台のシールドマシンにて施工を行った。

このシールドトンネル工事において当初は各立坑からのズリトロ揚重方式で計画していたが、最後のトンネル部（TBM1-2）の発進立坑（深度 60 m）においてズリ処理時間の短縮を目的とし土砂圧送排土方式を採用した。



図－1 施工位置図

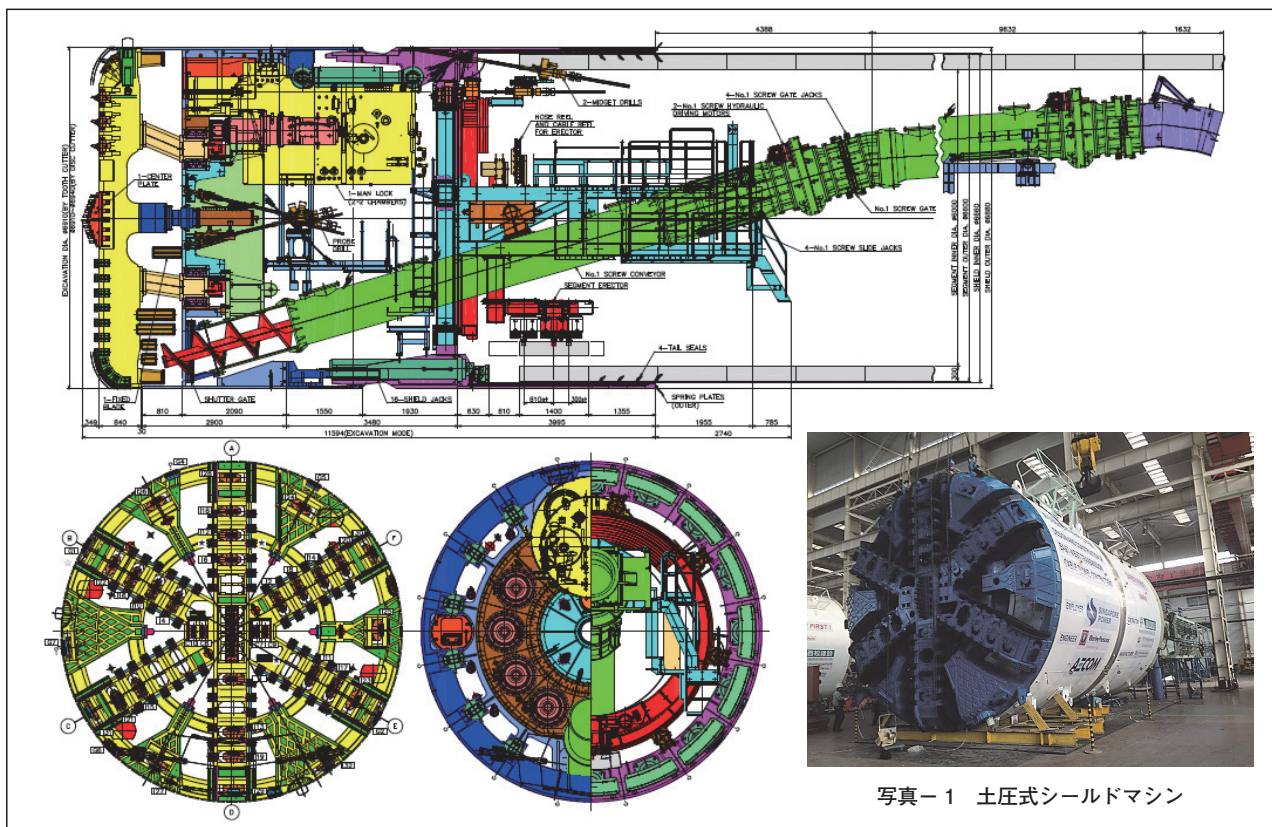


図－2 EW3 施工位置図

* シンガポール営業所ケーブルトンネル(出)(現:九州(支)福岡住吉シールド(出))

** シンガポール営業所ケーブルトンネル(出)

*** 国際事業本部技術部土木設計課



図－３ シールドマシン構造図

(2) 工事内容

表－１に工事内容を示す。

表－１ 工事内容

トンネル	TBM1-1約 1.0km, TBM2-1 約 1.9km, TBM2 約 2.6km、合計 5.5km
立坑	パヤレバ立坑深度 27m, エアポート立坑 深度 40m, カラン立坑深度 60m
トンネル内装設備	ケーブルブラケット, ランウェイビーム, PC トラフ, (トンネル全線)
本設 M&E 設備	照明設備, 消火設備, 通信設備, 接地 アース等

表－２ シールドマシン諸元

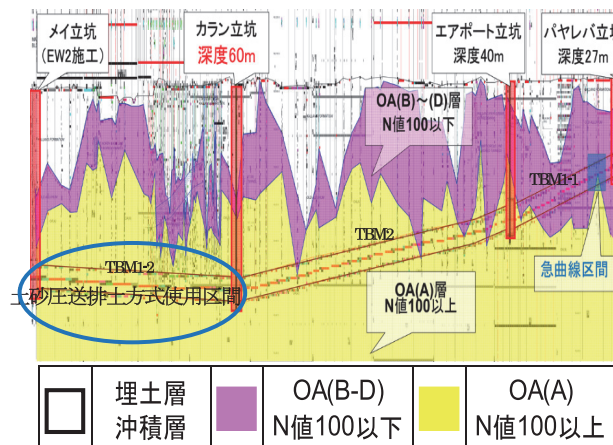
掘削外形	φ6,910mm (コピーカッター200mm)
マシン外形	φ6,880mm (中折れ左右最大 5.5 度)
機体長	11.594m
総推進力	48,000kN (3,000kN×16 本)
カッタートルク	2,560～6,730kN-m
セグメント (仕上り内径 6,000mm)	RCセグメント L=1.4m, 1.0m, W=300mm 複合セグメント L=1.0m, W=295mm
その他設備	・同時注入装置 (4 系統) ・気泡、高分子、ベントナイト注入設備 ・圧気設備 (カッタービット交換用) ・スクリーコンベア 2 基連結 (切羽圧 6bar 対応のため)

(3) シールドマシン概要

表－２にシールドマシン諸元を示す。図－３にシールドマシン構造図、写真－１に土圧式シールドマシンの外観写真を示す。

(4) 地質概要

本施工区間は Old Alluvium 層 (以下 OA 層) と呼ばれる固結砂質土で N 値によって A から D に分類されている。当現場の掘削対象土質は N 値 100 以上の OA (A) 層であった (図－４ 参照)。OA 層の一般的な特長として、N 値が高く自然含水比が 20～30% 程度、均等係数が 10 以上、細粒分含有率が 20% 以上であり硬質で粒度分布が良く、自立性の高い地山である。



図－４ 地質縦断面図

表－３ 各トンネルに門型クレーン各１台を使用した時の切羽サイクルタイム

昼勤	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	計(分)
朝礼														12
坑内移動														26
掘進														188
ズリ函入れ替え														260
セグメント組立て														234
		①	②				③	④				⑤		計 720
夜勤	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	計(分)
朝礼														11
坑内移動														26
掘進														205
ズリ函入れ替え														196
セグメント組立て														282
				⑥	⑦		⑧				⑨			計 720

表－４ ズリ函揚重作業時間

		計画	実績平均	
玉掛け		0:00:15	0:00:32	
立坑下回転		0:00:00	0:00:55	
巻上		0:01:40	0:01:53	
ズリ缶転倒	走行	0:00:55	0:01:39	0:01:34
	横行	0:00:29		
	Muck Out	0:00:15		
立坑上	横行	0:00:29	0:01:24	0:01:23
	走行	0:00:55		
巻下		0:00:50	0:01:43	
回転、台車積載		0:00:00	0:00:51	
玉掛け外し		0:00:00	0:00:16	
ロス(ロコ移動)		0:00:30	0:01:07	
合計		0:06:18	0:10:16	
合計(4函)		0:25:12	0:41:02	

また、石英の含有率が高く、カッタービットやスクリーコンベアに想定以上の磨耗が見られた。

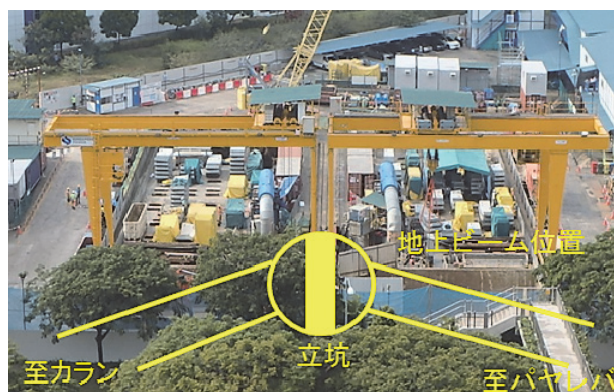
§ 3. 施工上の課題

３－１ エアポート立坑のトンネル施工実績

先に掘進を開始したエアポート立坑ではTBM1-1（至パヤレバ立坑）とTBM2（至カラン立坑）を同時に掘進した（図－２参照）。地上に設置した２台の門型クレーンを各々のトンネルに１台ずつ使用し、ズリ函揚重による土砂搬出を行った。この時、両トンネルのズリ函揚重作業が互いに干渉することと、計画以上にズリ函揚重作業に時間を要し、切羽での掘削作業１日全１,４４０分の作業時間のうち約４５０分（約３０％）のズリ函の入替えを行っている時間が発生した。

表－３に各トンネル作業に門型クレーン各を使用した時の切羽サイクルタイム、表－４に立坑のズリ函揚重作業に要する時間を示す。

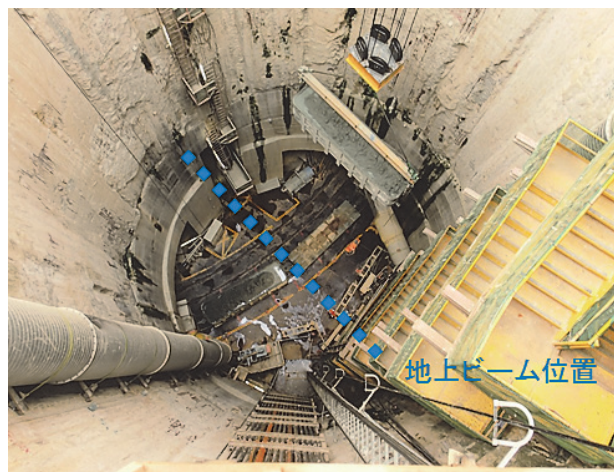
切羽でのズリ函入替えに時間を要した主な原因は以下の理由であった。立坑で門型クレーンを２台使用していた。立坑上の中央に設置していた門型クレーンの走行ビームが立坑下の軌条設備の方向と平面交差しているため、ズリ函揚重作業時に立坑下でズリ函を回転させ安定させる必要があった（写真－２、３、４）。計測の結果、



写真－２ エアポート立坑全景



写真－３ 立坑下ズリ函回転状況



写真－４ ズリ函揚重状況

ズリ函１函当たり計画より約４分程度の時間が掛かっていた。また、各々のトンネルの門型クレーンの揚重作業が互いに干渉して作業効率が落ちていた。

前述の理由により２台のシールドマシンを同時に施工すると各々のトンネル切羽で１日約４５０分のズリ函待ちが発生し、計画進捗１１．２リング／日に対し、最大９リング／日の進捗しか得られなかった。２台のシールドマシン共に進捗が遅れるため、掘削距離が短く、クリティカルパスであるTBM1-1を優先して作業を行った。

表-5 門型クレーン2台をTBM1台に使用した際の切羽サイクルタイム

昼勤	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	計(分)
朝礼	■													12
坑内移動	■	■										■		23
掘進		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		243
ズリ図入れ替え	■	■		■	■		■	■		■		■		131
セグメント組立て			■	■	■	■	■		■		■	■		253
			①		②		③		④		⑤	⑥		計 662
夜勤	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	計(分)
朝礼														20
坑内移動	■	■												24
掘進		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	244
ズリ図入れ替え		■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	143
セグメント組立て		■	■				■	■	■		■			289
		⑦	⑧	⑨		⑩		⑪		⑫	⑬			計 720

表一 6 揚重設備比較表

検討項目	クレーン2台 使用	垂直ベルコン	土砂圧送ポンプ
用地	×	×	○
費用	◎	△	○
メンテナンス性	◎	△	○
評価	×	×	○

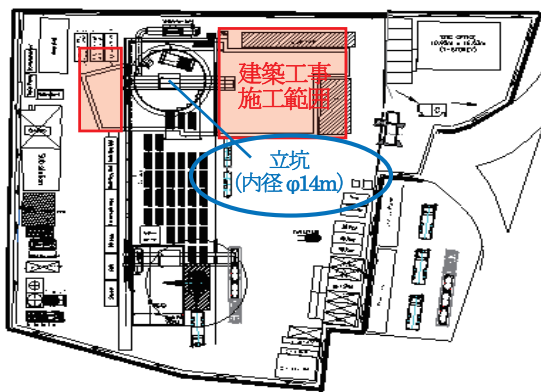


図-5 カラン立坑平面図

TBM1-1の掘進完了後、門型クレーン2台をTBM2の施工に使用した際のトンネルサイクルタイムを表-5に示す。ズリ函入換え時間は1日約270分に改善され最大13リング/日の進捗を確保することができた。

3-2 カラン立坑での課題と改善策

カラン立坑のズリ函揚重作業も門型クレーン 1 台で計画していたため同様の問題が発生し TBM の進捗が遅れることが懸念された。

エアポート立坑での実績を踏まえ事前検討を行った結果、さらに深いカラン立坑では計画 11.2 リング / 日に対して、最大 7 リング / 日の進捗しか得られないと推測された。計画の 11.2 リング / 日を達成するためにはズリ函の入換え時間を 300 分以下とする必要があった。よってズリ函揚重作業時間短縮のため、深度 60 m 立坑のズリ揚重設として下記設備の検討を行った（表－6 参照）。

表-7 土砂圧送設備規格表

土砂圧送ポンプ仕様	
型式	MSP1414
最大吐出圧	5.9MPa
最大輸送量	140m³/h
シルトミキサー仕様	
型式	MSM-07T
最大輸送量	120m³/h
ホッパー容量	7.0m³

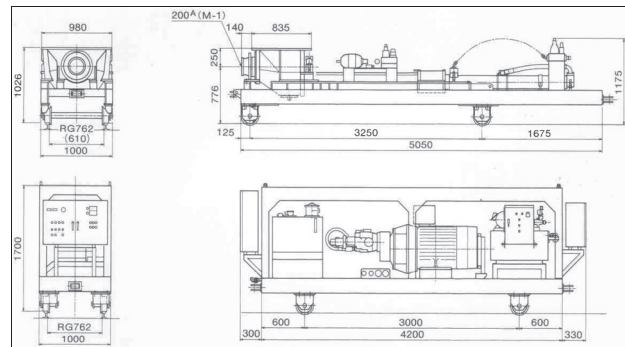


図-6 土砂圧送ポンプ構造図

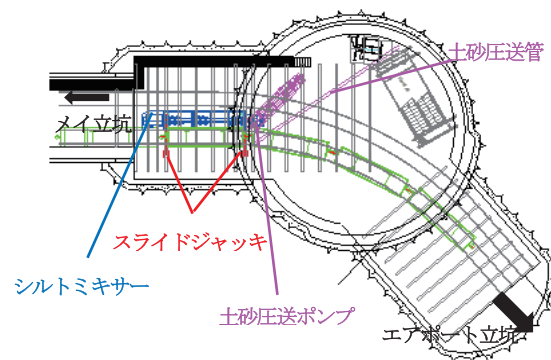


図-7 土砂圧送設備配置平面図

カラシ立坑では建築工事に着手しており、クレーンを2台使用することは不可能であった(図-5参照)。また、用地に制約があるため設備が大きくなる垂直ベルコンの設置は難しかった。このため、立坑下から地上までは土砂圧送ポンプによる排出方式を採用することとした。

§ 4. 土砂圧送設備計画

(1) 土砂圧送設備詳細

土砂圧送設備の規格を表-7に、構造図を図-6に示す。土砂圧送ポンプは、最大圧送能力 $140 \text{ m}^3/\text{時間}$ 、最大圧送圧は 30 MPa のポンプを使用した。

また、土砂圧送設備配置図を図-7、8に示す。土砂圧送設備は、拡幅トンネル（横坑トンネル）内にシルトミキサー、立坑作業床下に圧送ポンプを配置した（写真

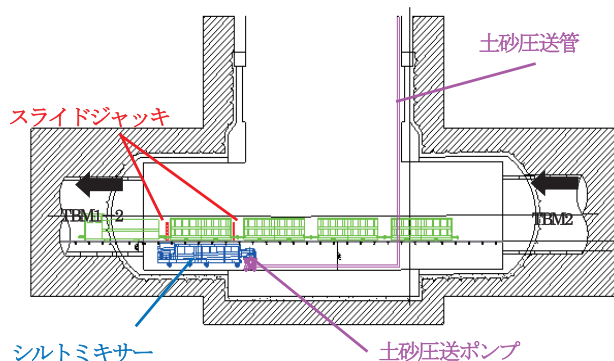


図-8 土砂圧送設備配置図

— 5, 6 参照)。

ズリ函は揚重式ズリ函を加工し、スライド式底開きズリ函を製作した（写真-7 参照）。軌条設備は等3線、後方台車後ろに移動式Yポイントを使用し、坑口から約100 mの位置にNポイントを使用した（写真-8 参照）。ロコは、ズリ函4台を2編成、セグメント台車1編成、材料台車1編成を使用した。

(2) 加泥材使用計画

土砂圧送ポンプを使用したTBM1-2区間の土質データによると、発進側1,600 m区間は砂礫約80%、シルト・粘性土分は約20%であり、到達側300 m区間は砂礫約30%、シルト・粘性土分は約70%であった。そのため、発進側1,600 mは圧送圧の低減と材料分離抑制を目的とし高分子を、到達300 mはTBMチャンバー内での閉塞防止を目的とし分散剤と浸透剤を使用することとした。また、掘削土の塑性流動化とカッタービットの磨耗低減を目的とし使用していた気泡剤も併用することとした。

§ 5. 土砂圧送施工結果

土砂圧送開始後のズリ処理時間を計測すると、ズリ函4函を圧送中に門型クレーン作業時間に大きな余裕があったため、ズリ函3函を圧送処理、ズリ函1函を門型クレーンで処理することとし、更なるズリ処理時間の短縮を図った。

図-9にズリ搬出をエアポート立坑で門型クレーンを1台使用したときの実績、カラン立坑で門型クレーン1台のみを使用した場合の予測、カラン立坑で門型クレーンと土砂圧送ポンプを併用した時の実績のズリ処理時間比較を示す。門型クレーンと土砂圧送ポンプを併用した場合、カラン立坑で門型クレーン1台を使用した場合の予測時間より、ズリ函1函当たり約5分30秒、ロコ1編成当たり（ズリ函4函）約21分短縮することができた。

また、門型クレーンと土砂圧送ポンプを併用した時の切羽サイクルタイムを表-8に示す。ズリ函の待ち時間は1日約267分（139分+128分）となり最大12リング/日を達成した。



写真-5 圧送ポンプ、シルトミキサー設置状況



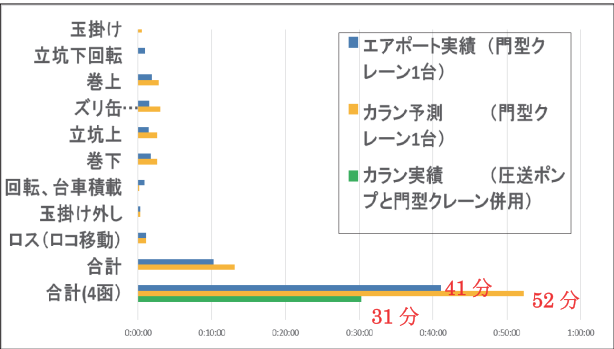
写真-6 拡幅トンネル部土砂圧送設備設置後



写真-7 スライド式底開きズリ函



写真-8 軌条設備とYポイント



図－9　ズリ処理時間比較

表－8　門型クレーンと土砂圧送ポンプ併用時の切羽サイクルタイム

昼動	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	計(分)
朝礼														15
坑内移動														24
掘進														259
ズリ入れ替え														139
セグメント組立て														283
		①		②		③		④		⑤		⑥		計 720
夜動	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	計(分)
朝礼														11
坑内移動														21
掘進														303
ズリ入れ替え														128
セグメント組立て														257
		⑦		⑧		⑨		⑩		⑪		⑫		計 720

表－9　進捗比較表

ケース	場所	掘進No	暦日(日)	進捗(リング数)	掘進停止日(日)	稼働日(日)	進捗/稼働日(リング数/日)	進捗/暦日(リング数/日)	最大日進(m)	最大月進(m)	工事費比率
TBM2台本掘進 門型クレーン2台使用時	エアポート立坑	TBM 1-1	123	636	15	108	5.9	5.2	12.6	192.2	1.09
		TBM2	123	458	42	82	5.6	3.7	12.6	208.6	
TBM1台本掘進 門型クレーン2台使用時		TBM2	225	1,400	54	171	8.2	6.2	18.2	304.6	1.00
TBM1台本掘進 門型クレーン1台と圧送ポンプ使用時	カラン立坑	TBM 1-2	226	1,257	72	155	8.1	5.6	16.8	336.0	1.05

発進側 1,600 m 区間は高分子を添加して掘進する計画であったが、水と気泡を添加することで土砂圧送可能な状態になったため、高分子の使用は中止した。到達側 300 m 区間は面盤へのズリの付着が発生したため予め用意していた分散剤と浸透剤を添加して掘削し、土砂圧送ポンプも問題なく機能した。それぞれの切羽状況を写真－9、写真－10に示す。

また、稼働日当りの進捗表を表－9に示す。門型クレーン2台を使用した場合と土砂圧送ポンプと門型クレーン1台を併用した場合の実績はほぼ同等の進捗を確保することができた。

§ 6. まとめ

カラン立坑は、60 m に及ぶ大深度立坑であることに加え、地上では建築工事と平行作業となる制約があり工程の遅れが懸念されたが、土砂圧送排土方式の使用で所定の進捗を確保することができた。

門型クレーン2台使用した場合と比較し工事単価は若干上がるが、地上に用地使用の制約がある場合には大深度立坑での土砂圧送排土方式は有効的な手段であると考え、また、土砂圧送ポンプの使用により門型クレーンでの揚重作業が大幅に減少するため、安全面においても非常に有効である。



写真－9　切羽状況　坑口～480 m 付近



写真－10　切羽状況　坑口～1,600 m 付近

謝辞. 土砂圧送排土方式の計画、使用後の改善に助言を頂きました当社シールド委員会及び関係者各位様に感謝の意を申し上げます。