

大断面・大深度の立坑をニューマチックケーソン工法で2基同時施工

Simultaneously construction of large and deep Pneumaticcaisson

池ノ内 烈*

Tsuyoshi Ikenouchi

宗澤 敦郎*

Atsurou Munezawa

福岡 卓也*

Takuya Fukuoka

中桐 秀雄**

Hideo Nakagiri

小島 一郎*

Ichirou Kojima

要 約

中央新幹線梶ヶ谷非常口及び資材搬入口新設は、リニア中央新幹線のうち神奈川県川崎市宮前区においてシールド発進立坑として梶ヶ谷非常口（以下、非常口）と資材搬入口を2基同時に施工する。特に非常口は、掘削面積が2,000 m²、深度が70 mを超える国内最大級かつ最深級のニューマチックケーソン工法である。沈下掘削中に非常口が反時計周りにローリングする事象が発生したが、対策工を実施したことで、問題なく施工できた。本稿では、その施工実績について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地盤改良工
- § 3. コンクリート工
- § 4. 掘削沈下工
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

中央新幹線は、東海道新幹線が担ってきた日本の大動脈輸送を二重化することを目的とした路線であり、まず品川・名古屋間から建設を進めている。工事中はシールド工事用立坑として、開業後には異常時の避難口となる「非常口」と開業後に線路保守等のために資機材を搬入する「資材搬入口」を新設するものである（写真一1、図一1、2）。



写真一1 非常口（左）と資材搬入口（右）

【工事概要】

工 事 名：中央新幹線梶ヶ谷非常口及び資材搬入口新設
 発 注 者：東海旅客鉄道株式会社 中央新幹線推進本部
 請 負 者：西松・五洋・青木あすなろ特定建設工事共同企業体

工 期：平成29年2月2日～令和3年10月31日

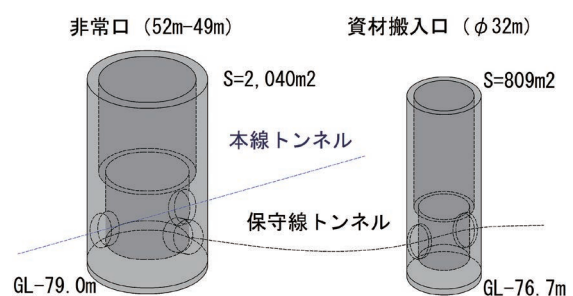
工事内容：ニューマチックケーソン工法 2基

非常口 小判型 52m～49m GL-79.0m

資材搬入口 円形φ32m GL-76.9m



図一1 中央新幹線のルート図（川崎市内）



図二 非常口と資材搬入口

* 関東土木（支）梶ヶ谷（工）

** 土木設計部

§ 2. 軟弱地盤対策

2-1 地盤改良の概要

非常口は、面積が $2,040\text{ m}^2$ 、底盤厚さが 8 m でコンクリートが約 $16,000\text{ m}^3$ と非常に大型であり、初期沈下荷重が約 $410,000\text{ kN}$ と類がないものであった。施工ヤードは盛土（B層）で造成されており、その直下のGL-8 m付近にはN値が4程度の軟弱な粘性土層（Al-c層）が存在する（図-3）。現地盤の場合、初期沈下時の作業室の理論開口率は30%となり、過沈下や急傾斜の発生が懸念された。そこで、開口率を掘削機械が適切に配置され安全に掘削が可能となる55%以上となるよう地盤改良を検討し、碎石を使用した静的締め固め砂杭工法（セープコンポーザ工法）を採用した（写真-2）。

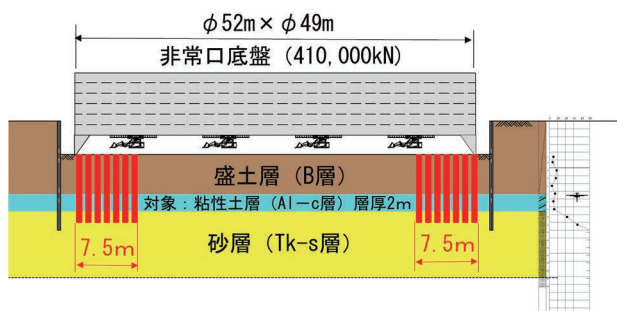


図-3 地盤改良の断面図（非常口）



写真-2 地盤改良の施工状況（非常口）

2-2 地盤改良の評価

地盤改良の検討条件は以下とし、地盤改良後の支持力は複合地盤として評価した。複合地盤の支持力は、現地盤と改良後の地盤の支持力をそれぞれ算出し、改良率で平均化したものとした（表-1）。

- 盛土（B層）： $\phi = 30^\circ$, $C = 0\text{ kN/m}^2$
- 粘性土層（Al-c層）： $\phi = 13^\circ$, $c = 18\text{ kN/m}^2$
- 碎石： $\phi = 35^\circ$, $\gamma = 20\text{ kN/m}^2$
- 改良杭：改良率30%，杭径 $\phi 700\text{ mm}$ ，ピッチ 1.2 m

表-1 地盤改良支持力の評価

土質	沈下荷重 (kN)	沈下抵抗力 (kN)	支持力(kN/m ²)			開口率 (%)	評価
			杭間地盤	改良後地盤	複合地盤		
Al-c	410,395	22,435	195.6	1,126.1	892.8	56.0	OK

2-3 近接構造物への影響抑止

(1) 概要

セープコンポーザ工法は圧縮空気ですり石を締め固めるため地中及び地表が変位する恐れがある。資材搬入口は第二梶ヶ谷架道橋、JR貨物軌道に近接しているため、これらの施設への影響が懸念された（図-4）。

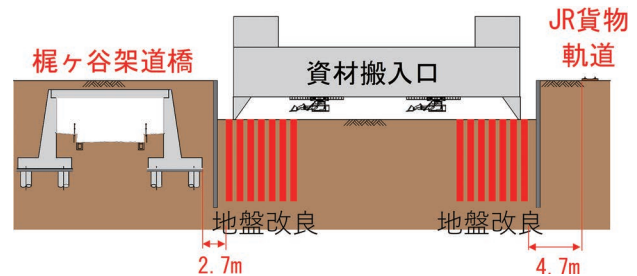


図-4 近接構造物の概要図（資材搬入口）

(2) 近接構造物への影響抑止対策

地盤改良工の周辺構造物への影響抑止対策として、変位緩衝孔を併用することとした。また、施工方向の違いによる影響を確認するため、近接構造物がなく先行して施工している非常口の施工にて地中変位を計測し、資材搬入口施工時の梶ヶ谷架道橋への影響をシュミレーションした（図-5）。その結果、近接構造物から縦方向に遠ざかる方向に施工を実施した（図-6、表-2）。

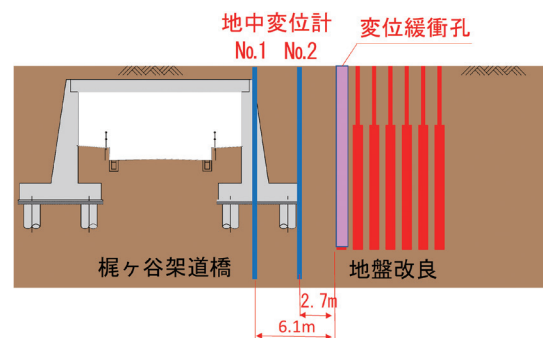


図-5 地盤改良影響検討シュミレーション図

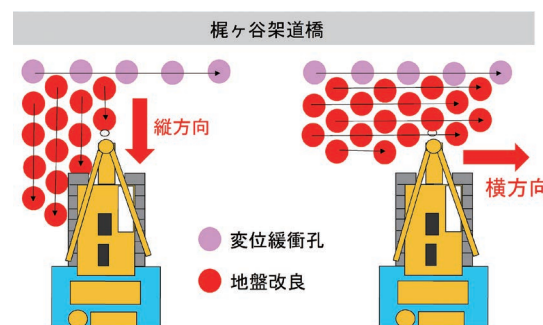


図-6 影響検討シュミレーション図

表-2 地盤改良施工方向の評価

項目	橋台頂部		フーチング中心部		基礎杭天端部	
	変位量(mm)	評価	変位量(mm)	評価	変位量(mm)	評価
許容値	3.4	-	3.3	-	3.4	-
縦方向施工	3.1	OK	-1.5	OK	2.7	OK
横方向施工	3.1	OK	-23.0	NG	18.7	NG

§3. コンクリートの大量打設

3-1 コンクリートの概要

- コンクリート工の特徴は以下である。
- ・主筋、配力筋、補強筋の大多数がD41で150～200mmピッチの過密配筋である（写真－3）。
 - ・非常口は底盤厚8m、下部壁厚7m、上部壁厚5m、資材搬入口は底盤厚5.5m、下部壁厚5m、上部壁厚3mとマスコンクリートである。
 - ・コンクリートの打設量が非常口で最大3,107m³/日、資材搬入口で最大1,721m³/日、工事全体では約100,000m³である。
 - ・中埋めコンクリートは高気圧下（0.68MPa）での打設である。

3-2 コンクリートの配合

過密配筋対策として、高流動コンクリートを使用した。コンクリート標準示方書（以下、示方書）で規定する自己充填性のランクをランク2と設定し、スランプフローの目標値を60cmとした（表－3）。

温度ひび割れ抑止対策としては、低熱ポルトランドセメントの使用と、熱膨張率の小さい石灰石粗骨材を使用した。温度応力解析を実施し、要求性能のひび割れ幅0.2mm以下を超過する部分には補強鉄筋を追加した。

1日に最大3,100m³を打設するために9プラントを選定した。混和剤は各プラントで主成分は同種であるが製造会社が異なる（表－4）。異メーカーの混和剤を混合した場合に所定の性能が得られないことが考えられた。そのため、異メーカーの混和剤で混合した供試体を製作し、圧縮強度試験を実施した。打設時に異なる混和剤のコンクリートが混合されても要求性能を満足することを確認した。



写真－3 底盤、シールド開口、離隔壁の状況（非常口）

表－3 高流動コンクリートの配合

区分	設計基準強度 (N/mm ²)	管理材齢 (日)	呼び強度 (N/mm ²)	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプフロー (cm)	空気量の範囲 (%)
非常口	50	56	50	L	20	60±10	4.5±1.5
資材口	30	28	40				

表－4 各プラントでの混和剤の一覧表

混和剤名	主成分
マスタートグレニウム 6500	ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体
フローリック SF500F	ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体
チューポール HP-70B	ポリカルボン酸系ポリマーと特殊増粘剤

3-3 高流動コンクリートの打継ぎ面処理

(1) 概要

コンクリートの打継ぎ面処理として、樹脂エマルジョン系の打継ぎ面処理剤を使用する計画であったが、高流動コンクリートでの使用実績が少なかった。示方書には「所要の品質を有していることを確認できれば、打継ぎ面の処理を簡略化してもよい」とある。また、高流動コンクリートはブリーディングがほとんど生じないため、打継ぎ面に形成されるレイタンスは通常のコンクリートより少ないとされている。よって、打継ぎ面処理剤の効果を確認するための試験を実施した（表－5）。

表－5 打継ぎ面処理の方法（供試体）

打継ぎ処理方法	供試体の製作方法
無処理	下層を打設、翌日に清掃し上層を打設
通常処理	下層を打設、翌日に目荒らし後に上層を打設
打継ぎ面処理剤 ジョイントテックス（CT-400）	下層を打設してブリーディングが引いた時点でジョイントテックスを散布、翌日に上層を打設
打継ぎ面処理剤 ジョイントエース（JA-40）	下層を打設直後、打設30分後、1時間後、2時間後、3時間後にジョイントエースを散布、翌日に上層を打設

(2) 打継ぎ処理剤の効果確認試験

① 打継ぎ面の曲げ強度

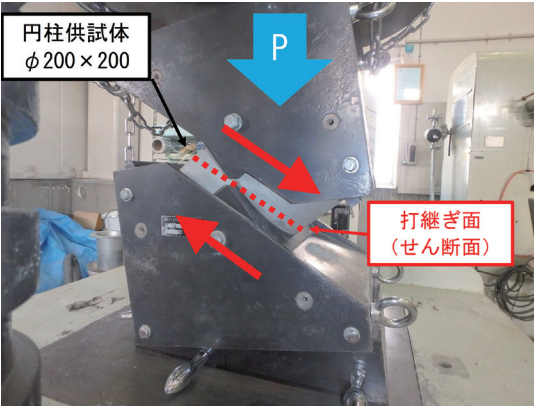
コンクリートの曲げ試験方法（JIS A 1106）で評価した。

② 打継ぎ面のせん断強度

簡易一面せん断試験は、φ200×200mm円柱供試体を製作し、せん断面に働くせん断応力が毎分0.4～0.5N/mm²になるよう加力し、垂直応力とせん断力の関係から純せん断強度として評価した（写真－4）。

③ 打継ぎ面の止水性

透水試験（インプット法）は、供試体の上面から打継ぎ面に向かって水圧1.0MPaで48時間加圧する。水の



写真－4 打継ぎ面のせん断強度試験

浸透深さをJIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」の手法に従って打継ぎ部に対して直交するように割裂し、破断面における水の浸透状況を速やかに撮影する。画像寸法計測ソフトで浸透面積を測定し、拡散係数で評価した（図-7）。

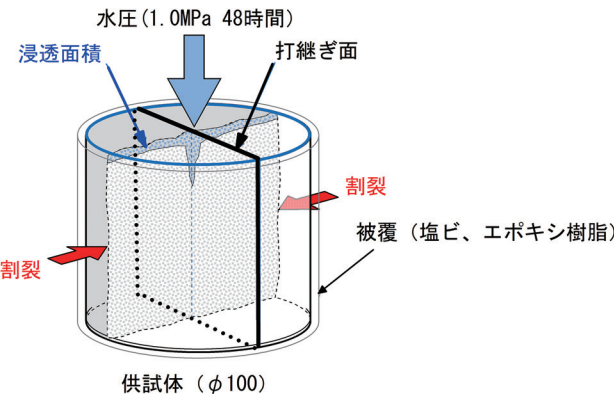


図-7 透水試験の概要図

④ 打継ぎ処理の評価

簡易一面せん断試験は、供試体の打継ぎ面成形時の凹凸の有無で試験結果に大きなバラツキが生じたが、設計上問題ないことを確認し、参考値とした。曲げ試験（表-6）と透水試験（表-7）の結果から、最も有効的であるジョイントエース（JA-40）を打設後3時間以内に散布し打継ぎ面を処理する施工方法とした。

3-4 コンクリート打設

1日に大量のコンクリートを打設する場合は、供給と打設のバランスを第一に綿密な施工計画が必要である。非常口は最大計画量を3,100 m³としてロット割し、10時

表-7 打継ぎ面の透水試験の結果

項目	試験結果	写真	判定
無処理	水の浸透有り		×
通常処理	水の浸透有りとしが混在		△
ジョイントテクス（CT-400）	水の浸透有り		×
ジョイントエース（JA-40）	水の浸透無し		○

間（8：00～19：00）で連続的に打設する計画とした。出荷はミキサ車1台4.25 m³を6分サイクル、300 m³/hとしてプラント数を決定した。コンクリートポンプ車は、1台当り40 m³/hとして、高流動コンクリートの水平流動距離を勘案し台数と配置を決定した（写真-5、表-8）。

3-5 中埋めコンクリート

(1) 配合

掘削沈下完了後に、中埋めコンクリートを作業室内に充填する。高気圧下ではコンクリート中の空気量がボイ

表-6 打継ぎ面の曲げ試験の結果

項 目		曲げ強度（平均） （N/mm ² ）	通常処理との 相対評価
通常処理		1.19	-
無処理		0.52	NG
ジョイントテクス（CT-400）		2.28	OK
ジョイントエース（JA-40）	打設直後	3.07	OK
	打設後30分	2.72	OK
	打設後1時間	2.54	OK
	打設後2時間	3.17	OK
	打設後3時間	3.61	OK
	打設後4時間	1.03	NG



写真-5 コンクリート打設の状況

表-8 コンクリートの打設実績

区分	場所	1ロット（日）当りの 打設量 （m ³ /ロット（日））			1ロット（日）当りの 打設時間 （h/ロット（日））			1時間当りの打設量 （m ³ /h）			コンクリートポンプ車					
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	台数（台）		打設量（m ³ /台・h）			
											最大	最小	最大	最小	平均	
非常口	底 盤	3,107	2,095	2,661	9.7	7.4	9.0	331	246	296	9	8	41.2	27.4	35.7	
	下部側壁	2,868	2,615	2,615	10.5	9.0	9.5	307	224	276	9	8	34.1	26.6	30.9	
	上部側壁	2,930	2,482	2,853	10.9	7.9	9.3	369	259	309	8	8	46.1	32.3	38.6	
資材搬入口	底 盤	1,721	1,002	1,433	10.6	6.9	9.1	163	145	156	5	5	32.6	29.0	31.2	
	下部側壁	1,674	910	1,326	9.8	7.7	8.7	177	119	151	6	4	29.7	24.3	27.2	
	上部側壁	1,593	1,410	1,554	10.9	8.8	9.9	168	145	158	6	5	33.5	24.1	29.8	

ルの法則により減少し、大気圧下に比べボールベアリング効果が下がり、流動性が低下するとされている。そのため、空気量を通常の $4.5 \pm 1.5\%$ から 3.0% 以下に調整した配合とした（表—9）。

表—9 中埋めコンクリートの配合

区分	管理材齢 (日)	呼び強度 (N/mm^2)	セメント の種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (フロー) (cm)	空気量の 範囲 (%)
コンクリート	28	21	N	20	21 ± 1.5	3.0以下
モルタル				-	70 ± 10	

(2) 打設

非常口、資材搬入口とも、作業室内への充填性を確保するため、高さ 2.5 m の内、下部 2.0 m はコンクリート、上部 0.5 m はモルタルを打設する計画とした。資材搬入口は 1 日での打設としたが、非常口は $4,677 \text{ m}^3$ と大量であったため、2 日に分けて打設する計画とした。しかし、非常口で、2 日目のモルタル打設時にコンクリート圧送配管の閉塞が発生した。1 日目のコンクリートが硬化し、狭隘な空間があり、モルタルの流動性では充填できなかったことが原因と考える。一部の未充填箇所へは、水中不分離性特殊増粘剤（TAC200—VT）を添加したセメントミルクを注入した。

§ 4. 大深度沈下掘削

4—1 概要

掘削沈下工の特徴は以下である。

- ・沈設深さが、非常口は GL-79.0 m、資材搬入口は GL-76.88 m と非常に深い。GL-20 m 付近までは有人掘削（写真—6）、それ以降は無人掘削とした。
- ・GL-8 m 付近には N 値が 4 程度の軟弱な粘性土層が、GL-20 m 以深には換算 N 値 200 以上の非常に硬質な固結シルト層（土丹層）が存在する。

4—2 ヘリウム混合ガスと作業時間

大深度での高気圧障害の発生防止対策として、酸素とヘリウムの 2 種を混合した呼吸ガス（ヘリオックス）を



写真—8 マテリアルロックからの排土状況

作業気圧 0.39 MPa から使用した（写真—7, 8）。作業気圧 0.7 MPa、呼吸ガスを酸素 17%、ヘリウム 83%、安全率 1.0 以上、酸素暴露量が 600 UPTD 以下の場合で 70 分の作業が可能であった。しかし、最終予定気圧 0.68 MPa で 60 分を超える作業が 100% 安全ではないとの専門医の判断から、函内設備解体時の標準作業時間 45 分、最大 60 分（減圧時間最大 237 分）とするタイムテーブルで管理した。函内設備解体時の実績としては、作業気圧は非常口で 0.69 MPa、資材搬入口で 0.68 MPa を記録し、工程（ケーソンショベル：非常口 14 台、資材搬入口 6 台）は、非常口は 2 班の 3 交代で 18 日、資材搬入口は 1 班の 3 交代で 14 日であった。



写真—7 ヘリウム混合ガス管制の状況



写真—6 函内の掘削状況



写真—8 ヘリウム混合ガス利用作業の状況

4-3 ローリング現象の発生

(1) 概要

GL-20 m 以深の硬質な固結シルト層の掘削沈下時に、刃先の地盤支持力及び躯体と地山との周面摩擦力の瞬時の低下に起因し、最大 80 cm 程度急激に沈下した。その際に、非常口が沈下 1 m 当り 6.5 mm 反時計方向に回転するローリング現象が発生した。

(2) ローリングの発生原因の推定

同一ヤード内で沈設を行った資材搬入口においてはローリング現象が発生していないことから、原因は地盤状況には起因せず、発生原因を以下と推定した（図-9）。

- ・非常口は、シールド発進のための開口箱抜きが3箇所あり、躯体形状の中心と重心にズレが生じ、一定方向に傾斜することで、沈下時に地山と接触し、一定方向への反力を受ける。
- ・非常口は、3 m の小判形直線部の影響で刃口抵抗が中心に対してアーム長を有することで、地盤反力に偏心が生まれローリング力が発生する。

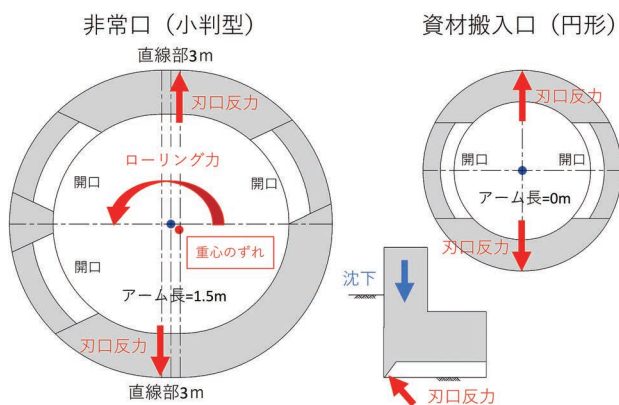


図-9 ローリング発生原因の推定

(3) ローリング対策工（特許出願中）

非常口の直線 3.0 m 部にアンカーとブラケットを、外部には反力受け基礎コンクリートを設置し、それぞれを PC ケーブルで緊張しケーソンに回転力を与えた。PC ケーブルの緊張力は、 $1,000 \text{ kN} \times 6 \text{ 本} = 6,000 \text{ kN}$ とした（写真-9、図-10）。掘削は時計周りの回転力を与えるよう刃口部を堀残し、躯体周面のフリクションカット部には滑剤を注入した。

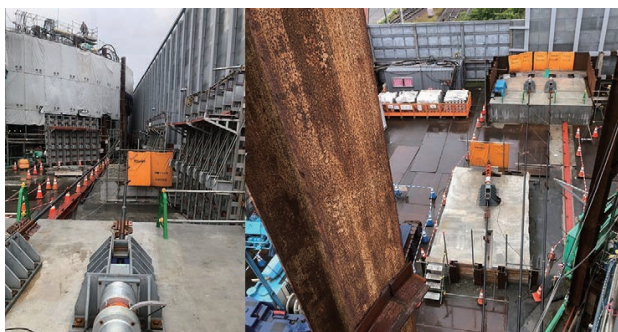


写真-9 PC ケーブル緊張状況

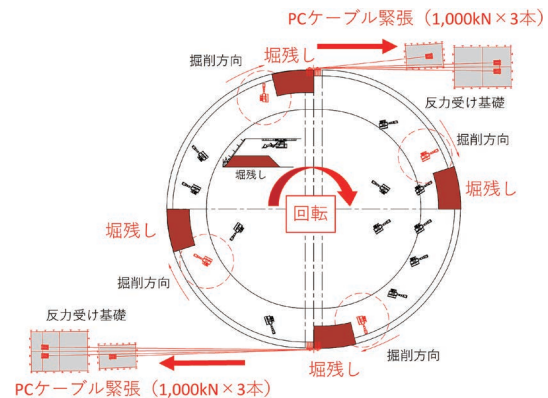


図-10 ローリング対策工の概要

(4) 最終出来形

非常口は、出来形管理基準のシールド開口水平位置の許容値 150 mm 以内に対して、品川方開口約 40 mm、名古屋方開口約 90 mm、保守線方開口約 110 mm となり、許容値（150 mm）を満足して沈設を完了することができた。

§ 5. おわりに

日本でも数例の大深度・大断面ニューマチックケーソン工法の資材搬入口が令和 3 年 2 月 28 日に、非常口が令和 3 年 10 月 31 日に無事竣工を迎えた（写真-10）。本稿が、今後の工事の参考になれば幸いである。

最後に、施工に際してご指導・ご鞭撻を賜った東海旅客鉄道株式会社、立命館大学小山上席研究員、早稲田大学清宮名誉教授、亀田総合病院鈴木医師、そしてその他の工事関係者の各位に対しまして厚く御礼申し上げます。



写真-10 非常口の完成

参考文献

- 1) 高橋和也, 久保宏太, 池ノ内烈, 中桐秀雄: 大深度・大断面の立坑をニューマチックケーソン工法で2基同時施工, 日本トンネル技術協会, トンネルと地下, 2022 年 3 月
- 2) 井上智裕他: 高気圧下環境がコンクリートのスランブに及ぼす影響, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 平成 18 年 9 月.
- 3) コンクリート標準示方書 施工編, 土木学会, 2017 年制定