

シャフトとシールドトンネルとの接続工事 における設計・施工について

山王博之¹・高橋正登²・兼丸隆裕¹・松橋宏³・山内貴宏⁴・深山大介⁵

¹正会員 大林・竹中土木・西武SJ12換気所特定建設工事共同企業体（〒150-0046 東京都渋谷区松濤2-7-12）

²大林・竹中土木・西武SJ12換気所特定建設工事共同企業体（〒150-0046 東京都渋谷区松濤2-7-12）

³首都高速道路(株) 東京建設局 新宿工事グループ（〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-15-3）

⁴正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 新宿工事グループ（〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-15-3）

⁵正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 品川線工事グループ（〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-6-2）

近年、コスト削減、周辺環境への悪影響の低減を目的に長距離シールド工法の開発が著しい。それに伴い、シールドトンネルとの接続を大深度で造る工事も増えている。本換気所工事においても道路トンネル（シールド工法）と換気ダクト他を接続するための工事を大深度で非開削工法を用いて行った。本稿では、そのシャフトとシールドトンネル接続部の工法選定の経緯および設計・施工内容を報告する。

キーワード：薬液注入、高流動膨張コンクリート、PBLジベル、逆巻き施工、連続コアポーリング、ワイヤーソー

1. はじめに

首都高速中央環状新宿線（以下、新宿線）は、東京都目黒区青葉台から板橋区熊野町に至る延長約11kmの自動車専用道路であり、首都高速3号渋谷線、4号新宿線、5号池袋線と連絡するとともに、6ヶ所の出入口、9ヶ所の換気所を有する（図-1）。本路線のうち10kmは、幅員40mに拡幅される都道環状6号線（山手通り）の地下にトンネル構造で計画され、その約7割の区間にシールド工法が採用されている。

神山町換気所は、換気所の下方に縦併設の道路シールドトンネルが構築され、道路トンネルに必要な

避難通路、パイプスペース、エアダクトはトンネルの側部に構築した南北2箇所のシャフトを介して換気所と接続される構造である。接続箇所は北側シャフト9箇所、南側シャフト6箇所の計15箇所となっている（図-2～図-5）。

本工事は、新宿線のうち、既に地下に構築が完了している神山町換気所とシールドトンネルを接続するものであり、本稿では、この大深度でのシールド接続部の工法選定の経緯、設計および施工結果について報告する。



図-1 新宿線路線概要図

2. 工事概要

工事名称：SJ12工区 換気所（その2）工事 { 換気所本体工事はSJ12工区換気所工事 }

発注者：首都高速道路株式会社

施工場所：渋谷区松濤 2 丁目・神山町・富ヶ谷 2 丁目

工期：平成17年1月29日～平成19年8月26日

接続部主要工事数量：掘削工 2,038m³，土留壁撤去工 306m³，フォアパイル工 124 本，

土留め支保工 125ton，モルタル吹付工 825m²，コンクリート工 1,298m³，セグメント撤去工 37ton

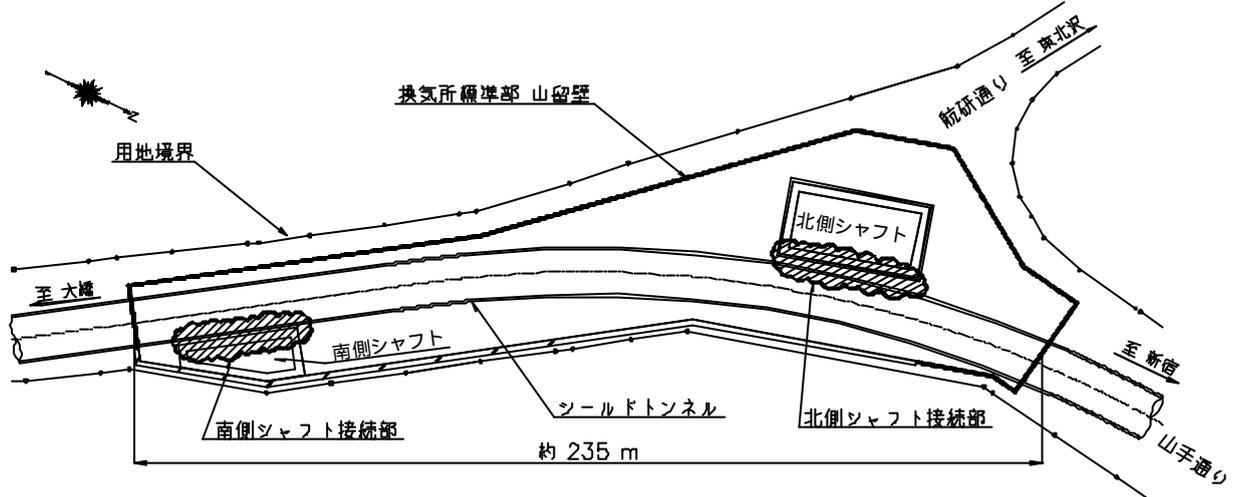


図-2 全体平面図

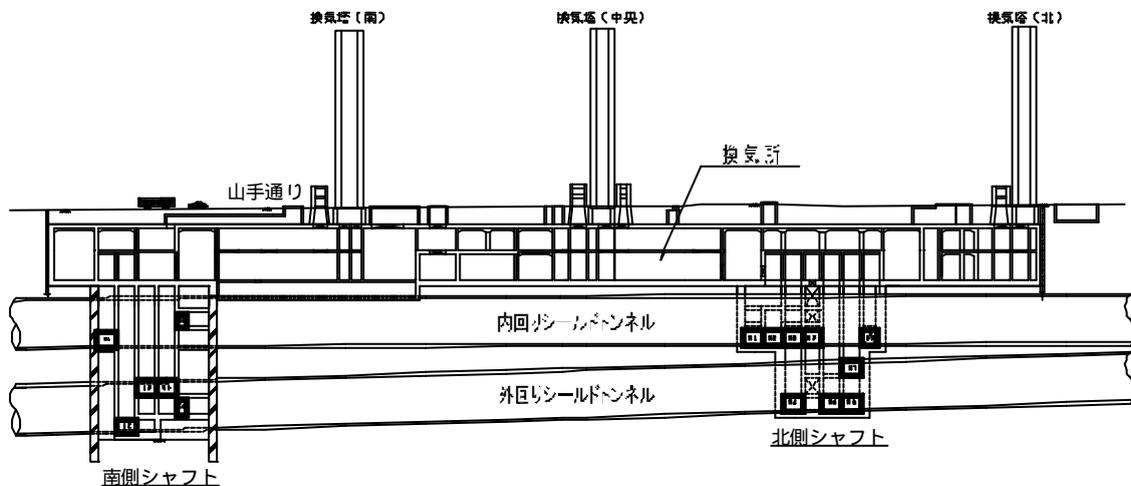


図-3 縦断面図

表-1 接続用途・形状一覧表

	南側シャフト			北側シャフト		
	用途	形状	接続位置	用途	形状	接続位置
内回りシールド	排気ダクト	φ4000×H2800	下付(B5F)	送気ダクト	φ3634×H3000	下付(B5F)
	避難通路・管路	φ1500×H2800	横付(B4F)	管路×2	φ4000×H3000	下付(B5F)
				排気ダクト	φ4000×H3000	下付(B5F)
				送気ダクト	φ3000×H3000	下付(B5F)
外回りシールド	送気ダクト	φ4000×H2800	下付(B8F)	管路	φ4000×H3000	下付(B8F)
	排気ダクト×2	φ4000×H2800	上付(B6F)	送気ダクト	φ4000×H3000	下付(B8F)
	避難通路・管路	φ1500×H2800	横付(B7F)	排気ダクト	φ4000×H3000	上付(B6F)
				排気ダクト	φ4000×H3000	下付(B8F)

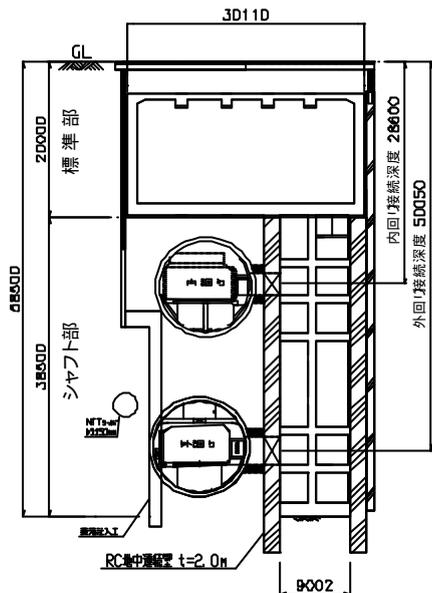


図-4 南側シャフト部断面図

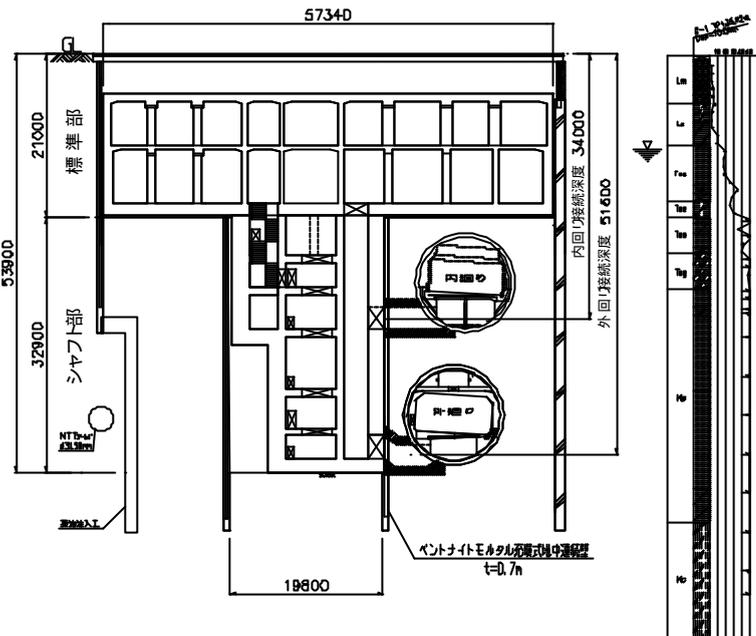


図-5 北側シャフト部断面図

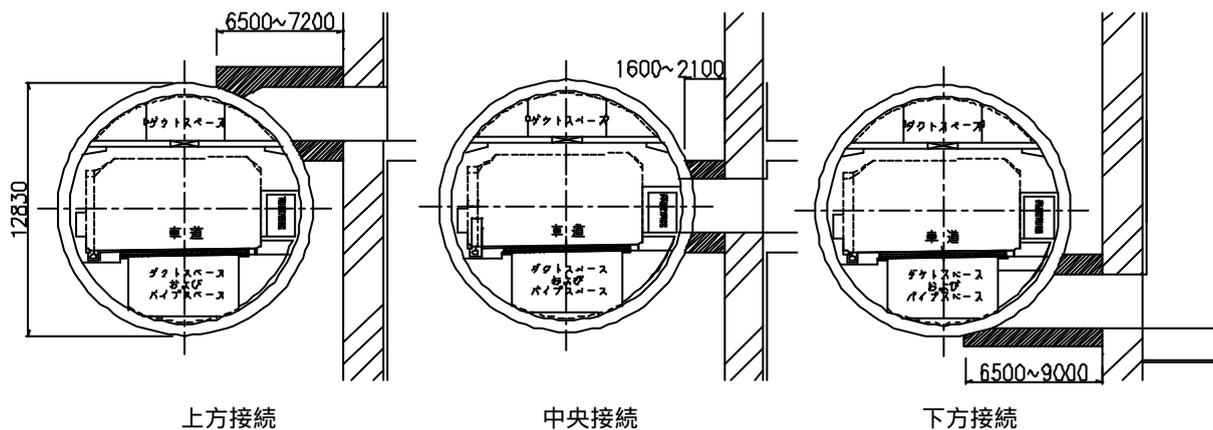


図-6 シールド接続部断面図

3. シールド接続部の計画概要

(1) 接続位置および用途

トンネル内換気計画、換気所内の設備レイアウトより接続位置、接続箇所数が決定している。避難通路は、道路階に接続されるため中央接続、換気ダクトおよび管路はシールドトンネルのダクトスペースである上方または下方接続となっている（図-6）。

接続部の深度は、シールド縦断線形によって決定されるが、内回りシールド接続部がGL - 28.6 ~ - 34.0m、外回りシールド接続部がGL - 41.6 ~ - 55.3mとなっている。

なお、接続部は以下の工夫等により、開口数を少なくして、工費・工期の縮減を図っている。

- 1) 配線ラックのレイアウトを再検討することにより施設管理通路と管路の兼用
- 2) 避難通路の上方空間を管路配置スペースと兼用

(2) 接続部形状寸法

接続部の形状寸法は用途によって異なるが、換気ダクトは必要換気容量および通過風速により決定され、標準内空寸法はB=4.0m、H=2.8~3.0mとなっている。

避難通路は幅1.5m×高さ2.8m（通路2.1m+管路0.7m）となっており、内回りおよび外回りシールドに1箇所ずつ設置される。

接続用途および接続形状一覧表を表-1に示す。

4. シールド接続部の設計概要

(1)設計条件

a)土質条件

接続箇所の土層は南北シャフト共に上総層群の砂質土層 (Ks: 換算 N 値 100) が主体となっている。ただし, Ks 層の間に上総層群の泥岩層 (Kc) を介在しており, 接続箇所の上部に東京礫層 (Tog) が現れる。

b)地下水条件

掘削対象土層である東京礫層 (Tog), 上総層 (Ks) は被圧された帯水層であり, 概ね TP+20.0m 付近の平衡水位を保持している。よって, 接続工事位置での被圧水頭は $hw=10.7m \sim 42.8m$ となり, $Pw=0.1 \sim 0.4MPa$ の高水圧条件下での施工となる。

c)施工条件

接続施工時は, シールド掘進・床版架設工事の中のため, また, 材料を投入できる発進立坑から遠い (2km) ことから, 接続工事は全てトンネル内からではなく, 換気所側からの施工とした。

(2)仮設構造物

接続掘削は, 大深度かつ高被圧水下的での施工のため, 掘削時の止水および地山の緩み抑止が重要と考えられた。

a)掘削方法の選定

接続部の掘削方法として「支保工を組立ながら掘削を行なう山岳形式掘削」と「メッセル, スチールセグメント等で地山を保持しながら掘削を行なう機械式掘削」が考えられた。

当該工事の場合は, 下記理由により「山岳形式掘削」を選定した。

- ・既に構築が完了しているシャフト側の開口よりも大きい断面で掘削する必要がある。
- ・シールドトンネルとの離隔が掘削高さにより異なるため, 機械式では地山を保持できない箇所がある。

b)掘削・躯体構築順序

掘削時の緩み土圧は, 掘削断面が小さい程小さくなるため分割掘削とした。また, 掘削完了後, 早期に地山の安定を図るとともに, シールドトンネルの変位を抑止する目的で上床版を逆巻き施工とした。掘削・躯体構築順序: 上半中央掘削 上半側部掘削 上床版逆巻き施工 下半掘削 下床版・側壁構築 (図-14)

接続箇所が2連, 4連のカルバートとなっている箇所については, 連続した箇所を同時に掘削せず, 1接続部の躯体構築が完了した後 隣接した箇所の掘削・躯体構築を行なうこととした。

c)補助工法の選定

・止水および地盤強化

止水および地盤強化のための補助工法として「凍結工法」, 「地盤改良工法 (ジェットグラウト工法, 薬液注入工法)」, 「地下水位低下工法」が考えられた。

これらを比較検討した結果 (表-2), 止水・地盤強化のための補助工法として薬液注入工法を採用した。

なお, 薬液注入の施工は, 施工条件, 工期短縮を考慮して2段階に分けて行なうこととした。

STEP- 事前注入: シャフト掘削前に換気所床付面からダブルパッカ工法により鉛直施工を行なう。

STEP- 補足注入: 接続掘削前に, シールド周囲, シャフト山留背面の緩み域に補足注入としてステップダウン方式の二重管複相注入を行なう。

薬液注入範囲は, 土被り荷重, 側圧 (土水圧), 揚圧力に対してせん断抵抗で耐えうる必要な厚さを算出した。また, 最小改良厚は遮水性を考慮して $t=2.0m$ とした。

・肌落ち防止

薬液注入の問題点として, 注入の不均一により部分的な崩壊 (肌落ち) の危険性が考えられたため,

表-2 補助工法比較選定表

工法名	当工事への適用性	判定
凍結工法	シールド掘進中のためトンネル内での施工が不可能である。シールド通過後の施工となり, 工期が長くなる。	×
薬液注入工法	シールド通過前に事前注入を行えるため工期が短くなる。最も安価である。	○
ジェットグラウト工法	換算 N 値 100 の硬質地盤のため所定の寸法の改良体が造成困難である。	×
地下水位低下工法	スーパーウエルポイント工法等の採用により, あり程度水位低下は可能だが, 汲み上げた水の処理費が高くなる。別途地盤強化が必要である。シールド通過後の施工となり, 工期が長くなる。	

掘削時の補助工法としてフォアパイル工法（先受け工法）を採用した。

フォアパイル工法には鋼管タイプと鋼棒タイプがあるが、当工事の場合は下記仕様とした。

- 掘削範囲の中央部天端（シャフト内の既設構造物に支障しない範囲）：鋼管タイプ（114.3mm@0.32～0.45m）

- 鋼管タイプが施工できない掘削範囲の側部天端（切広げ部）：鋼棒タイプ（自穿孔型ロックボルト 32mm@0.33m）

設計荷重は、鋼製山留支保工(H-200@1.0m)架設までの期間が短いため、緩み土圧×0.5とした。

(3) 本体構造物

a) セグメントの設計

接続部のセグメントは、スキンプレート・縦リブを切断するため、現場での切断が比較的容易なスチールセグメントを採用した。

セグメントの設計は、剛性一様全周ばねモデル（接続部躯体は平面ひずみモデル）とした。

主桁仕様：t=57～96mm(SM570 使用)，主桁間隔1.05～1.2m（2主桁）とした。

接続部は避難通路部を除いて、スキンプレートと縦リブを撤去し、主桁と継手板は残置することにより、構造の安定とコスト縮減を図っている。

残置された継手板は、ダクト内の風の抵抗になるため、角度を10°傾けることにより有効断面積を大きくとれるように工夫した（図-7）。

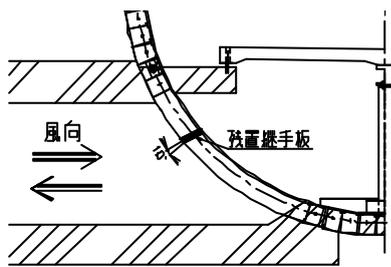


図-7 継手板角度変更図

b) 接続部躯体の設計

接続部躯体の構造は、狭隘箇所での施工となるため、人力作業が可能であるRC構造とした。

接続部躯体に作用する荷重は、土被り荷重、揚圧力、土水圧以外にセグメントとの接合部の反力を考慮した。なお、接合部の反力を算出するために逐次解析（STEP-0シールド通過，STEP-2接続部掘削，STEP-3躯体構築）を行なっている。

表-3に本体構造検討ケースを示す。

表-3 本体構造検討ケース

検討ケース		モデル
横断方向	標準部	ボックスカルバート
	閉合接合部	同上（反力考慮）
	非閉合接合部	U型断面（反力考慮）
縦断方向	閉合接合部	片持ち梁（反力考慮）
	非閉合接合部	別途 応力伝達部材設計
	施工時上床版	ピン・固定梁

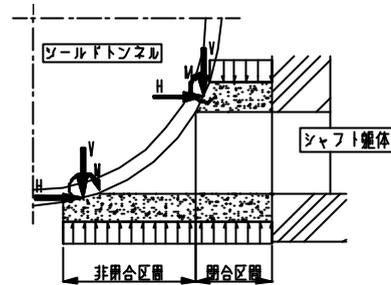


図-8 接続部設計断面（縦断図）

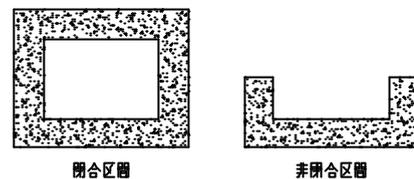


図-9 接続部設計断面（横断図）

c) 接続部応力伝達方法

セグメントとの接合面は、接続部躯体をシールド軸方向に梁構造とし、梁に応力を伝達させる構造とした。応力伝達部材は、施工性に配慮して、せん断に対しては、PBLジベル（孔あき鋼板ジベル：SM490 使用）を主桁外面に溶接し、曲げに対しては、主桁側面に溶接した鋼板を介して鉄筋スタッドを設置した（図-8～図-11）。

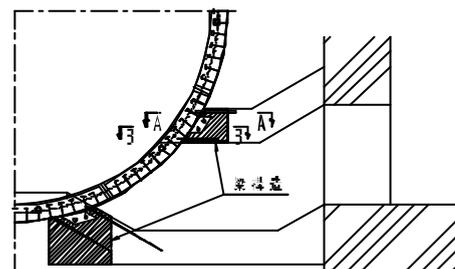
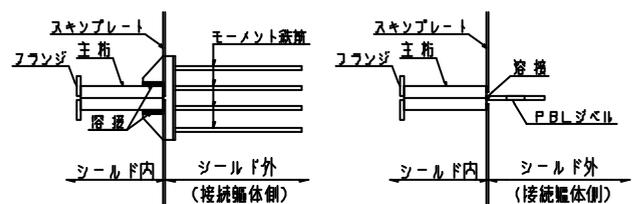


図-10 接続プレート取付け位置図



曲げモーメント鉄筋 (A-A)

PBLジベル (B-B)

図-11 接続プレート詳細図

5. シールド接続部の施工概要

(1) 施工ステップ

換気所掘削から接続部施工までの全体施工順序図を図-13に、接続部の詳細施工順序図を図-14に示す。

(2) 薬液注入工（補足注入）

事前注入完了後に換気シャフトの掘削工事およびシールドトンネルの掘進を行っているため、土留め壁変形に伴う土留め背面およびシールドテールボイド周辺に新たに空隙が生じている可能性があった。そこで、湧水確認試験を行うことで補足注入範囲の見直しを行った（写真-1）。

湧水量試験結果より、補足注入範囲の空隙が大きいことが予想されたため、空隙への先行注入として懸濁型セメント系材料にて一次注入を行い、浸透系の溶液型無機系材料にて二次注入を行った。一次注入および二次注入の仕様を表-4に示す。

表-4 補足薬液注入仕様

	一次注入	二次注入
注入工法	低圧浸透注入工法	低圧浸透注入工法
注入方式	1ショット	1.5ショット
吐出量	18 ㍓/min	8~12 ㍓/min
ゲルタイム	1分程度	10分程度
注入材料	急結セメントライト	緩結製シリカゾル
注入管理	流量圧力管理測定装置（印字式）	



写真-1 湧水量確認試験状況

注入管理については、定量管理では遮水性能の低下が考えられたため、注入圧の上限値をスキンプレーターの耐力から決まる値（ $P = 1.0\text{MPa}$ ）とする圧力管理を行なった。

注入後の確認孔からの目標湧水量は $Q = 1 \text{ ㍓/min}$ に設定し、その値以下になるまで注入を行った。

なお、テールボイド部の削孔はセグメントを傷つ

けないようにメタルクラウンビットではなくフィッシュテールビットを使用し、セグメントとの離隔を確認した。

(3) 山留壁撤去工

南北シャフトの内、南側シャフトの山留壁は本体利用RC連壁 ($t=2.0\text{m}$) となっており、事前のコア採取により圧縮強度 $f=70 \sim 90\text{N/mm}^2$ （設計基準強度 $f_{ck}=35\text{N/mm}^2$ ）が確認された。また、連壁の鉛直継手が剛結継手のため鉄筋以外に仕切り鉄板、補強プレートが埋込まれていた（鋼材比1~2%）。

山留壁のこわしは、当初全て人力はつりであったが、工程の遅延と工事の安全衛生面での危険を回避するために連続コアボーリング+ワイヤーソー工法を採用した。

分割形状は、路下揚重機的能力より $W = 2.0\text{t}$ で決定し、掘削の進捗に合わせて切断とコンクリート塊引出しを行なった（図-12, 写真-2）。

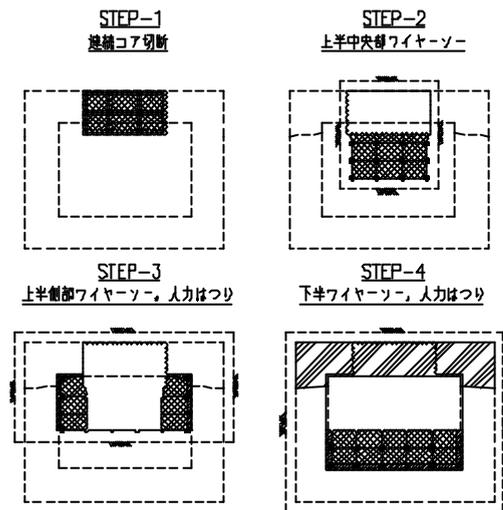


図-12 RC地中連続壁撤去ステップ図



写真-2 RC地中連続壁撤去状況

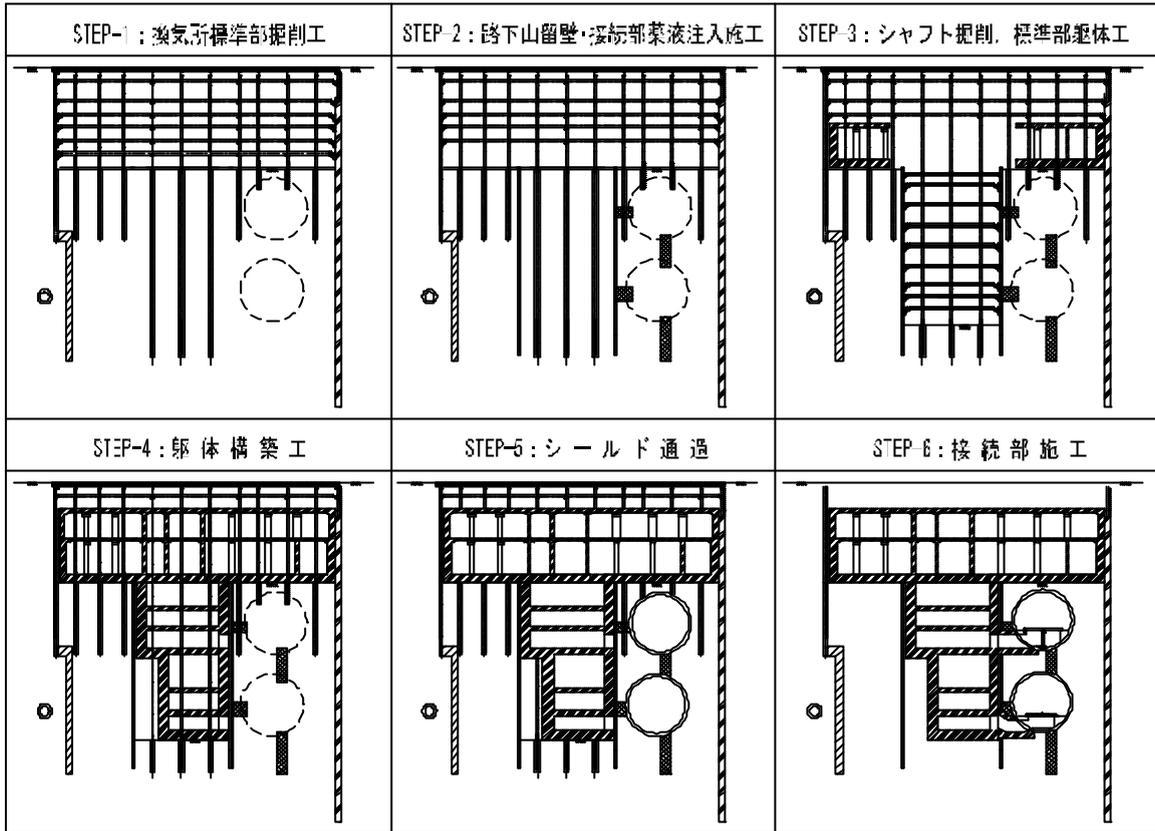


図-13 換気所標準部およびシャフト部 全体施工順序図（北側シャフト）

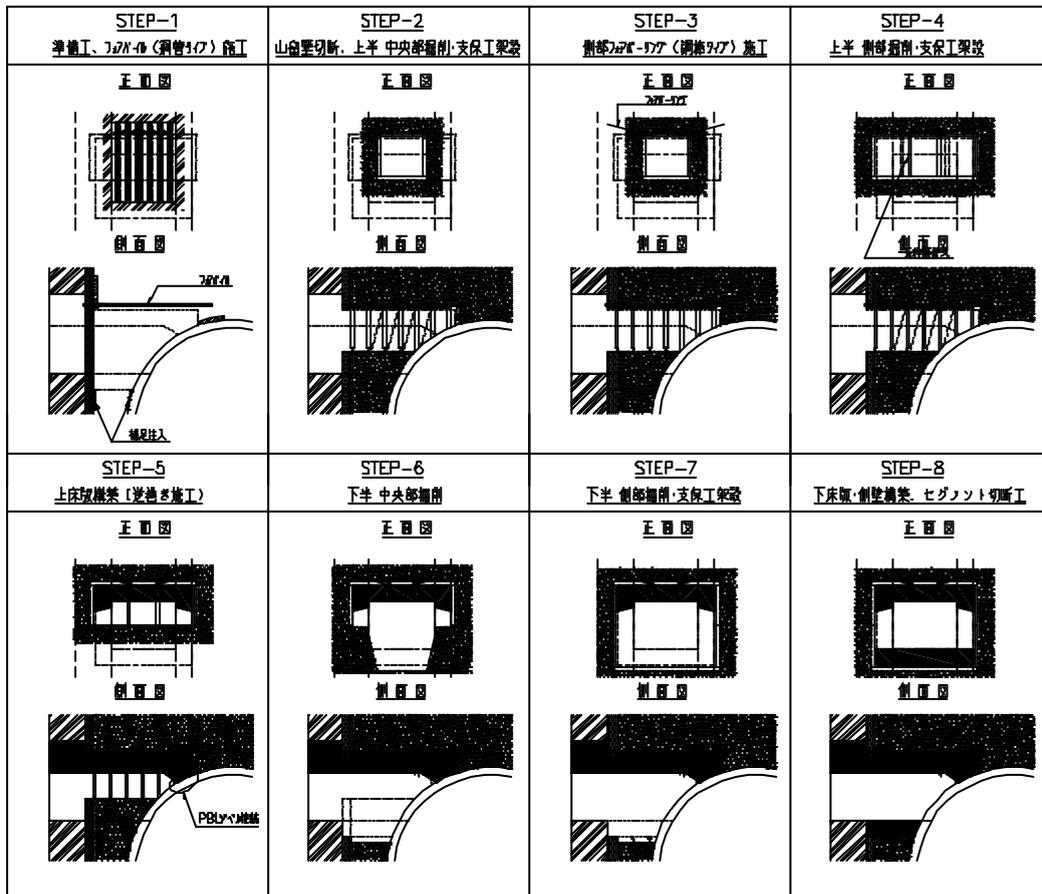


図-14 接続部 施工順序図（北側シャフト 上方接続部）

(4)コンクリート打設工

逆巻き施工の上床版と側壁上部は、バイブレータによる締固めが不可能かつ空隙を残さないために、自己充填性がよく、ノンブリーディングで沈下抑制が可能な高流動膨張コンクリートを使用した。高流動膨張コンクリートの品質基準を表-5に示す。

表-5 高流動膨張コンクリートの品質基準

項目	規格値
設計基準強度	30 N/mm ²
U形間隙通過性試験(障害 R2)	300mm 以上
スランプフロー	67.5±5.0cm
500mm フロー到達時間	3~15 秒
空気量	4.5±1.5%
塩化物イオン量	0.3kg/m ³ 以下
ブリーディング率	0 %
膨張率	1.25±0.75%

打設方法は、上床版内に 100mmのコンクリート圧送用鋼管(2本)を埋め込み、高流動膨張コンクリートを流し込んだ。上床版上面にエアードマリーができないよう、10mmのエアースタック用ホース2本を配置した。

(5)PBLジベル、曲げモーメント鉄筋プレート設置工

接続部躯体とセグメント主桁は、PBLジベル・モーメント鉄筋を介して接合した。曲げモーメント鉄筋プレートは、スキンプレートを貫通するため、溶接前に一度スキンプレートを切断し、溶接後に閉塞した(写真-3,写真-4)。



写真-3 曲げモーメント鉄筋プレート取付け状況



写真-4 接続プレート取付け完了状況

6. おわりに

シャフトとシールドトンネル接続工事は、平成17年12月に補足注入を開始し、平成18年11月までの約11ヶ月で全15箇所コンクリート打設を完了した。

接続箇所数の見直しから始まり、設計・施工計画段階において問題点の抽出・対策の検討を十分に行なったことにより、予定の工期内で安全に工事が進捗した。

今回の接続工事では、大深度(高被圧水下)での施工のため、出水を如何に止めるかが施工面での最大のポイントであったが、掘削中の接続一箇所あたりの最大湧水量は Q_{max} 10~15ℓ/minであり、補助工法の目的は達せられたと判断している。

設計面では、シールドトンネルの外側からの作業で接続躯体とセグメントを接合するために、PBLジベル・曲げモーメント鉄筋プレートを溶接する方法を採用したが、特に問題なく施工が完了した。

今後の課題として、気付いた点を下記に列挙する。

- 1)補足注入の設計値の設定方法
- 2)湧水箇所(注入不連続部)の特定方法
- 3)曲げモーメント鉄筋プレートの取付け方法(取付け位置)の改善
- 4)セグメント切断箇所からの漏水対策の確立

今回の工事のような大深度での非開削接続工事は、都市部での地下利用においてますます増えてくるものと予想される。本報告が今後の同様な工事に対して参考になれば幸いである。