

H&V シールドを用いたスパイラル掘進の施工報告

清水建設(株) 正会員 太田 博啓
田中 大輔
○成田 彩華

1. はじめに

本工事は、東京都品川区立会川周辺の浸水被害軽減、および勝島運河の水質改善のため、勝島運河に流入する立会川の直下に、内径 5 m の下水道管渠を 2 本同時に築造するものである。

狭隘な河川幅かつ地下構造物により、平面・縦断においてトンネル線形が制約されるため、H&V シールドによるスパイラル掘進が採用された(表 1, 図 1)。H&V シールド工法によるスパイラル掘進の実績は実証実験の 1 例のみであり、さらに本工事で採用した、一方のトンネルの中心を軸としてスパイラルする施工は前例がなく、本工事が世界初となる(図 3)。本稿では、スパイラル区間における施工結果について報告する。

2. スパイラル区間の概要

図 2 にスパイラル区間の平面図および縦断図を示す。発進位置の立会川河口においては、勝島運河護岸杭および下流側の既設管渠により、高さ方向の制約を受けるた

表 1 工事概要

工事件名	立会川幹線雨水放流管その 2 工事
工 法	H&Vシールド工法(泥水式)
仕上内径	5,000 mm(2連)
掘削外径	5,850 mm×11,790 mm
施工延長	右機(上機): 778.20 m 左機(下機): 774.85 m
土かぶり	11.5~23.7 m
土 質	礫質土, 細砂, シルト質砂, シルト

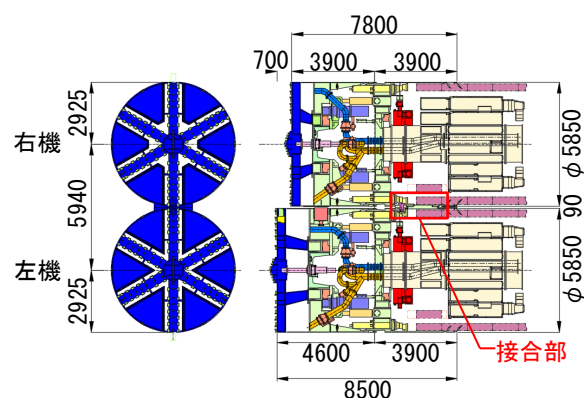


図 1 H&V シールド機

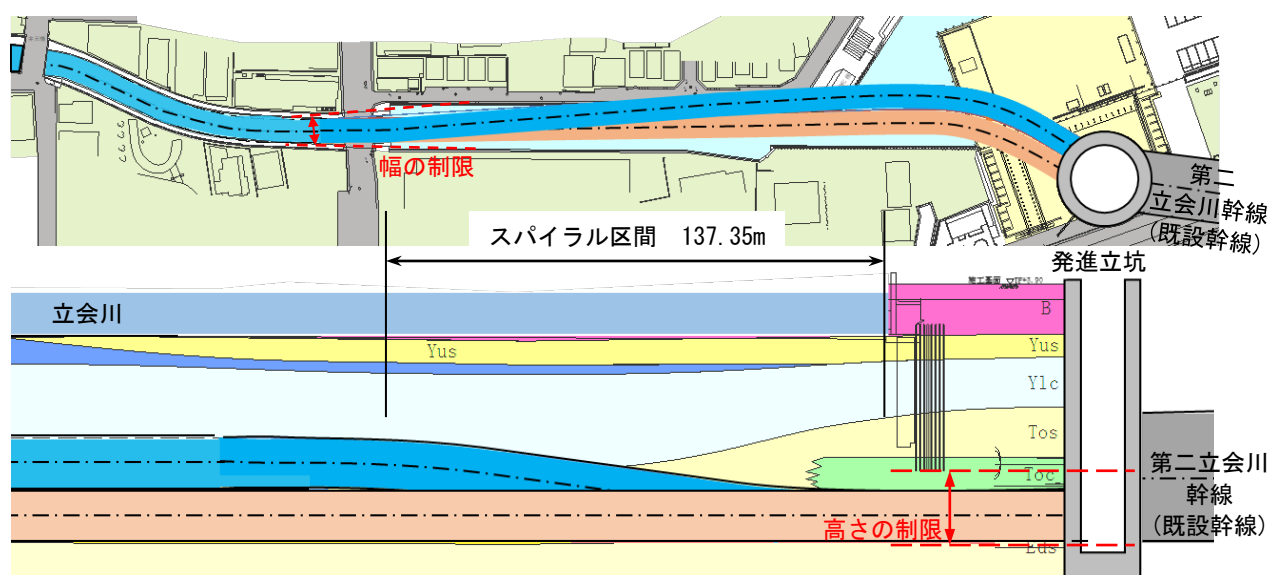


図 2 トンネル平面図・縦断図

キーワード シールドトンネル, H&V シールド工法, スパイラル掘進, 計測管理

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設(株)土木技術本部シールド統括部 TEL03-3561-3892

め横2連の状態が発進する。その後、上流に向かって河川の占有幅が狭くなり、幅方向の制約を受けるため、縦2連の状態となるよう、スパイラル線形が計画されている。本工事のスパイラル掘進区間は、横2連の状態から左機のトンネル中心を軸として、約 137m の区間でシールド機全体を 90° （掘進 1m あたり 0.656° ）スパイラルさせる。この区間のトンネル線形は、左トンネルが直線、右トンネルは平面が $\cos$ 曲線、縦断が $\sin$ 曲線の 3 次元複合曲線である。

スパイラル後は、縦2連の状態で河川下を掘進し、到達する。

3. スパイラルの原理

スパイラル掘進の基本原理を図 4 に示す。後胴を剛結の接合とし、前胴の中折れ操作による地盤のソリ効果によって、シールド機全体をローリングさせるものである。

従来の H&V 工法においては、左右のマシン接合部を剛結合としているが、本工事のスパイラル線形を前胴の中折れのみで掘進する場合、上部に 300mm 以上の大きな余掘りが必要となり、周辺地盤への影響が懸念された。また、接合部が剛結の場合、スパイラル中は後胴の方位とセグメントの方位が一致しないため、上下のテールクリアランスが小さくなり、セグメントの競りが発生する可能性が考えられた（図 5-a）。

そこで、本工事では、接合部にピン接合を採用した。これによって、マシン方位とセグメントの方位を一致させることが可能であり、上部の余掘り量の大幅低減、テールクリアランスを確保することができる。また、前胴と後胴の方位が一致することで、マシン全長でソリ効果を受けることができ、剛結の場合に比較して、小さな地盤反力で大きなスパイラル効果を得ることができる（図 5-b）。

接合部の構造を図 6 に示す。2 連のシールド機は、後胴部において、左右機を繋ぐ連通ピン、および左機が凸型、右機が凹型形状の揺動ピンにて接合され、揺動が可能な機構になっている。

揺動ピンに設けた切欠きに、固定コマを設置することで、揺動角を固定することが可能である。

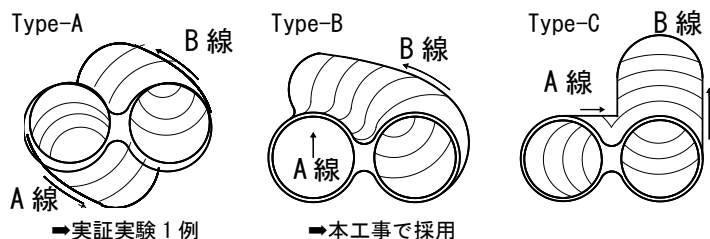


図 3 スパイラル掘進のタイプ

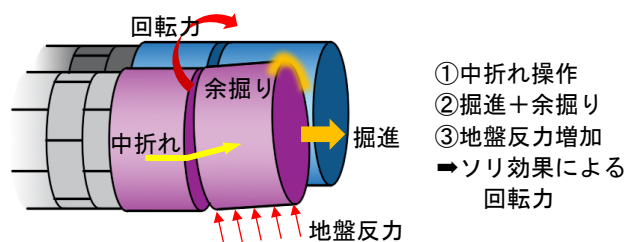
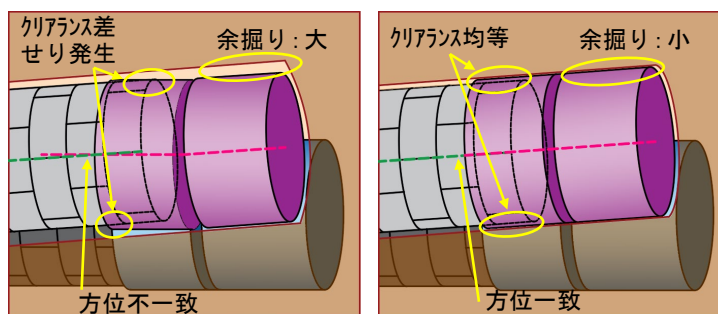


図 4 スパイラル掘進の原理



a) 接合部剛結合の場合 b) 接合部ピン結合の場合

図 5 接合部形式の違いによる差

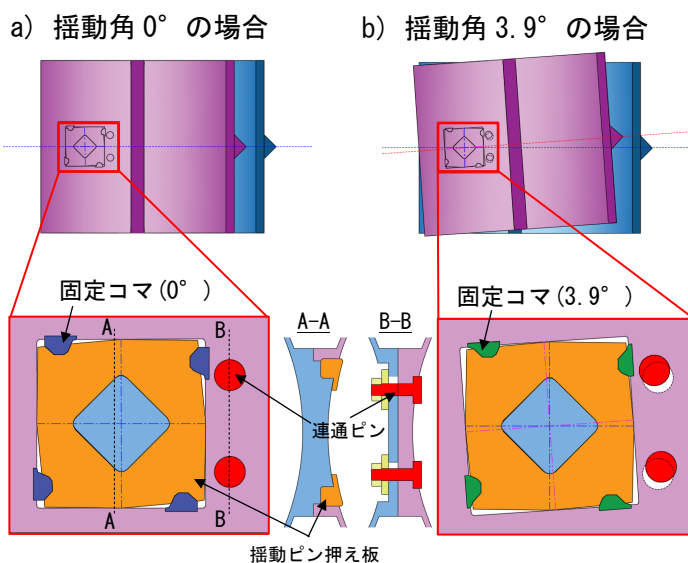


図 6 接合部の構造

4. スパイラル区間の掘進管理

スパイラル掘進において線形を維持するためには、一定のローリング量を維持した状態で掘進を行わなければならない。

経験のないスパイラル掘進に対して、H&V シールドシミュレータによる事前解析を実施し、マシン操作計画の初期値とした。

掘進中には常時、位置や姿勢、揺動角（右機後胴と左機後胴の角度差）、接合部の挙動（次頁参照）などを確認し（図7）、マシン操作による方向制御を行った。

図8にスパイラル掘進区間の施工データを示す。72Ringより右機の中折れを上向きに操作し、揺動角を生じさせることで、マシン全体がローリングし始めることがわかる。

スパイラルに必要な揺動角となった後、一定のローリング量を維持するため、ジャッキ選択や推力、余掘り量、中折れ角度、カッター回転方向の操作を行った。これにより、計画したスパイラル線形での掘進を行った。

区間終点では、再び中折れ角度を大きくし、揺動角を減少させた。揺動角が0度になった時点で揺動ピンに固定コマを設置し、縦2連の状態（ローリング角度90°）でローリングを停止させた。

スパイラルの進行に伴って、右機（上機）の切羽土水圧が減少していることがわかる。これは、スパイラルによって、横2連から縦2連の状態になることで、右機の土被りが小さくなり、土水圧が減少するためである。

左右機のジャッキ総推力を比較すると、170Ring以降においては左機（下機）の推力が、右機より大きいことがわかる。これは、スパイラル掘進中にマシン方位が下がることを避けるため、下勝ちの操作を行っているためである。またスパイラル起点の掘削地盤は砂礫層であるが、縦2連になるに連れて上機の掘削地盤は粘土層に変化していくため、土質の違いによる影響も考えられる。

5. 接合部の計測管理

本工事では2連のシールド機を繋ぐ接合部にピン接合を採用したことにより、図9に示すよ

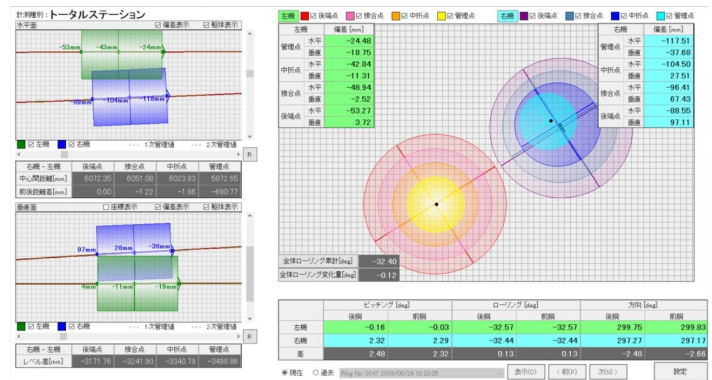


図7 計測表示（線形偏差および姿勢変化量）

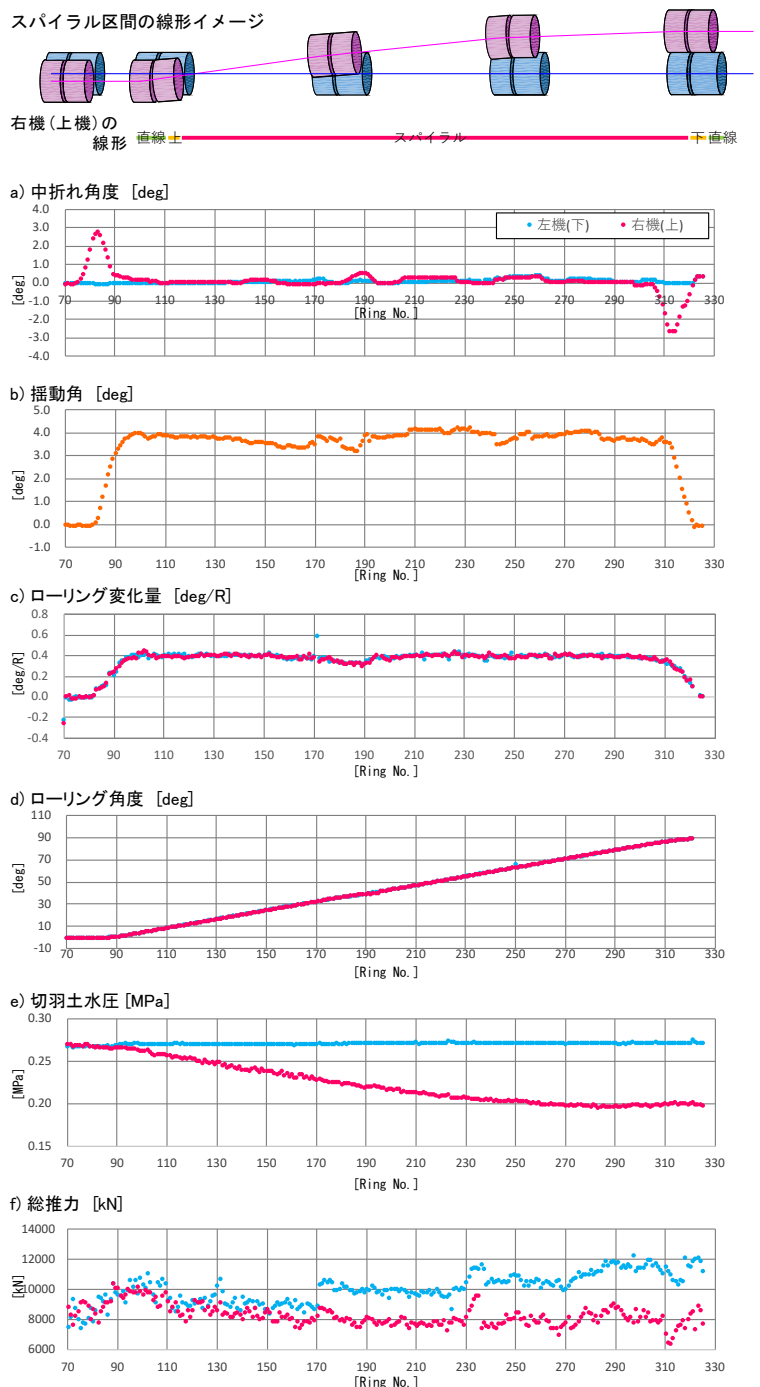


図8 スパイラル区間の施工データ

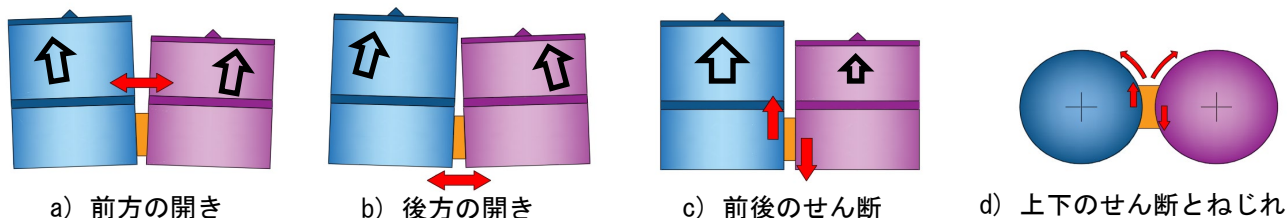


図9 接合部の損傷パターン

うな左右機の挙動差に起因する接合部の損傷が懸念された。そこで、接合部に各種計測器を設置し、事前解析により各種管理値を決定した上で、施工時の挙動を計測した。

図10に、接合部の計測位置を示す。計測項目は、左右機を繋ぐボルトの軸力、揺動ピンの軸方向・周方向の隙間などである。これら进行操作室にて常時監視を行うことで、リアルタイムに接合部の挙動を把握することが可能であり、挙動に合わせたマシン操作を行うことで、接合部の損傷を防いだ。

操作の1つに、モーメント受けジャッキの使用がある。このジャッキは、前胴部の左右機間に設置されたジャッキであり、平面曲線部において、曲線外側のマシンが受ける地盤反力を曲線内側のマシンに伝達する機能を持つ。また、左右機の前胴が閉じる傾向がある場合には、モーメント受けジャッキを使用して、左右機間の距離を維持することができる。

図11に、接合部の計測結果を示す。a)は揺動ピン前後の隙間を示している。前後の隙間の差は、左右機の前胴が閉じる傾向がある場合には、モーメント受けジャッキを使用して、左右機間の距離を維持することができる。

b)は接合部周囲における左右機の隙間を示している。175R以降、接合部前方の隙間量が増加する傾向がみられることから、マシン前胴が離れ、前開き傾向にあることがわかる。この開きを抑制するため、中折れの使用や余掘り量の調整、図12のように内向きに推力モーメントが生じるようにジャッキパターンを変更するなどの操作を行った。一方、マシン前胴が閉じ、後開き傾向がみられた場合には、モーメント受けジャッキを使用するなどの対策を行った。

6. スパイラル掘進に対するマシン設備の対策

スパイラル掘進への対応として、シールドマシンには以下のような機能を備えている。

①作業デッキ水平保持機構 (図13)

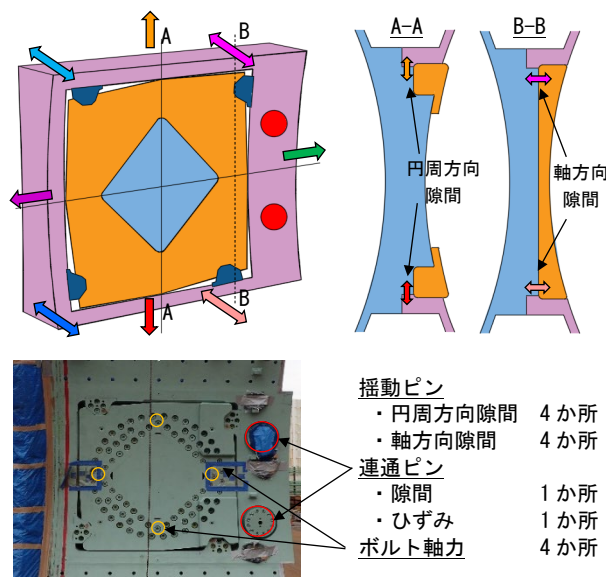


図10 接合部の計測項目

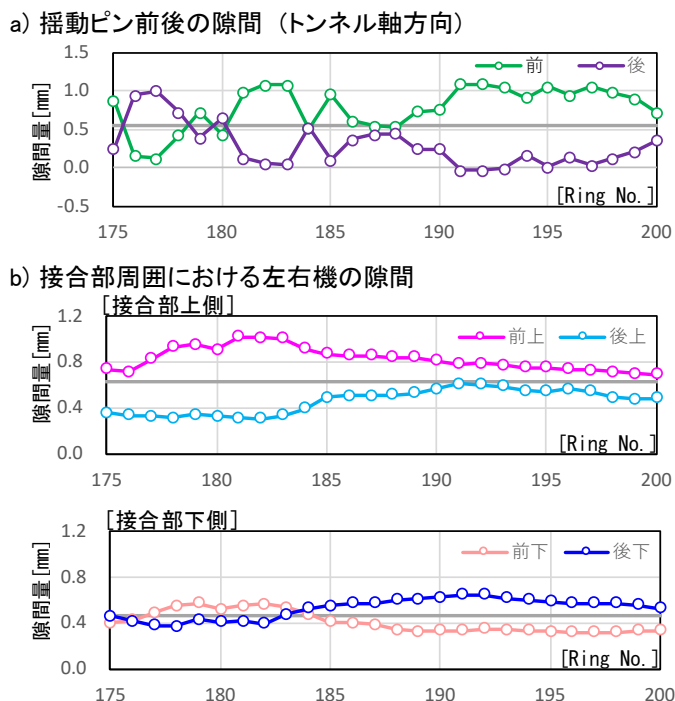


図11 接合部の計測データ

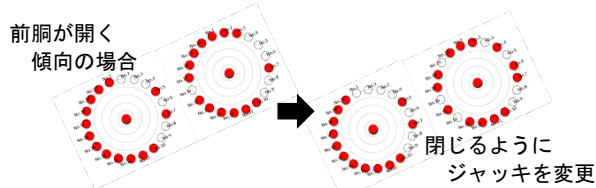


図12 ジャッキ操作の例

作業デッキの固定部を2重の円筒構造とし、ベアリングで回転できる構造とした。これによりスパイラル掘進の回転角度に合わせ、作業デッキを水平に保持することが可能である。

②切替用送排泥管 (図 14)

送排泥管の上下位置を確保するため、複数の送排泥管を設置し、スパイラル回転角度に合わせて切り替える。

③エレクター旋回範囲の拡張 (図 15)

エレクター旋回範囲の初期設定は横2連の状態です。左右210度であるが、縦2連の状態時には右旋回でトンネル天端にセグメントを搬送できなくなる。縦2連状態での施工性を向上するため、右旋回の範囲を300度に拡張した。

7. 出来形について

図 16 にスパイラル区間の出来形を示す。管理値は他の施工区間と同様の値であり、鉛直偏差の許容値は±50mmである。

前述のように、掘進中には必要な揺動角を維持するため、常時、位置や姿勢、リングごとの変化量、接合部の挙動を確認し、マシン操作による方向制御を行ったことで、水平・鉛直偏差ともに許容値内に抑え、スパイラル区間の施工を完了した。

8. まとめ

本工事では、H&V シールド工法において一方のトンネル中心を軸としてスパイラルする世界初の施工を実施した。左右機の接合部をピン構造とし、揺動角の制御等マシンの姿勢制御に重点を置いて線形管理を実施した。マシンの位置や姿勢、接合部の挙動を常時把握し、リアルタイムでマシン操作を行うことにより、線形管理値以内でスパイラル掘進を完了した。

9. 参考文献

- 菅野 美喜雄, 田中 翔真, 安井 克豊ら: 狭隘な河川下におけるH&V シールドによるスパイラル掘進の計画, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017.
- 田中秀明, 久原高志, 尾崎仁ら: H&V シールド工法実証実験工事, トンネル工学研究発表会論文・報告集, vol.1, pp. 249-254, 1991.
- Akatwijika Ronald, Huyunh Ngoc Thi, 杉本光隆ら: H&V シールドのシミュレータの開発, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.

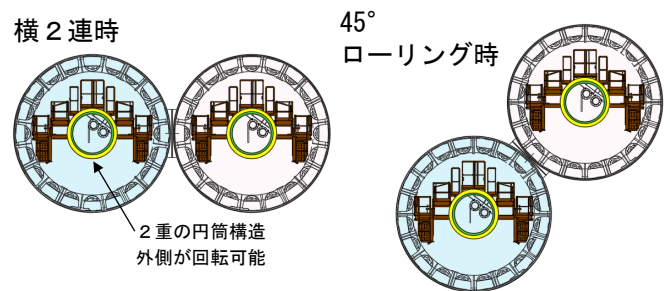


図 13 作業デッキ水平保持機構

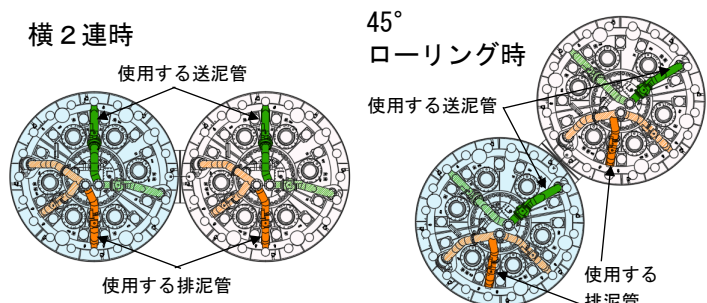


図 14 切替用送排泥管

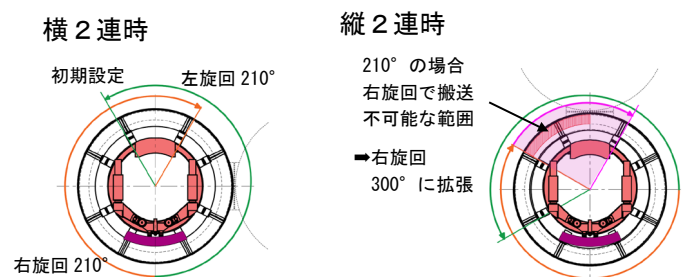


図 15 エレクター旋回範囲の拡張

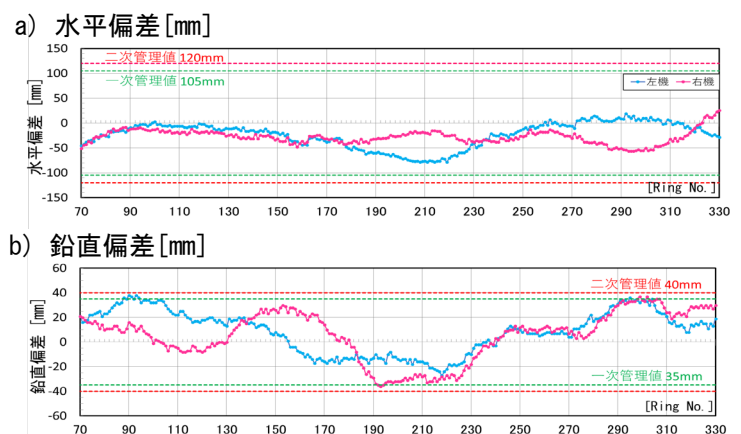


図 16 トンネルの出来形(水平・鉛直偏差)

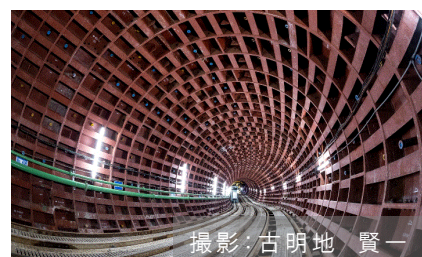


図 17 右機スパイラル区間の坑内