

高速横浜環状北西線シールドトンネル 地中切り開き部の設計施工

盛岡 諒平¹・内海 和仁²・上村 健太³・熊田 政典⁴
京屋 宜正⁵・奥田 豊⁶

¹正会員 首都高速道路(株) 神奈川建設局設計課 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)
E-mail: r.morioka1728@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路(株) 技術部技術推進課 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)
E-mail: k.uchiumi63@shutoko.jp

³首都高速道路(株) 神奈川建設局北西線工事事務所 (〒221-0013 神奈川県横浜市都筑区仲町台5-2-20)
E-mail: k.uemura1663@shutoko.jp

⁴横浜市 道路局 (〒231-0017 神奈川県横浜市中区港町1-1)
E-mail: ma01-kumada@city.yokohama.jp

⁵正会員 大成建設(株) 横浜支店 (〒226-0021 神奈川県横浜市緑区北八朔町218-6)
E-mail: kyouya@ce.taisei.co.jp

⁶正会員 大成建設(株) 横浜支店 (〒226-0021 神奈川県横浜市緑区北八朔町218-6)
E-mail: okdytk00@pub.taisei.co.jp

横浜環状北西線の併設シールドトンネル及びUターン路2ヶ所は横浜市が事業者として整備を進めているが、このうち港北行きシールドトンネル及び港北側のUターン路1ヶ所を首都高が受託し、設計及び施工を進めている。Uターン路工事は、シールド掘進工及び道路床版工の資機材搬出入の動線に支障無く進めるため、一連の施工をトンネル円形断面のうち開口側の半断面で行う必要がある。本工事のクリティカルパスであるUターン路構築工事は、工程短縮や遅延リスク排除が求められており、パイプルーフ工及び内部支保工に関する工程短縮策を検討した。パイプルーフ工については、発進仕口を鋼製セグメントに内包化、内部支保工については支保工配置間隔の工夫により、工期短縮を図った。

Key Words : shield tunnel, connection tunnel, segment, pipe roofing, non-open-cut underground enlargement method

1. はじめに

横浜環状北西線は、東名高速道路横浜青葉ICと第三京浜道路港北IC、高速神奈川7号横浜北線横浜港北JCTを結ぶ延長約7.1kmの路線であり、トンネル構造の約4.1kmのうち約3.9kmの併設シールドトンネル及びUターン路2ヶ所は横浜市の事業として整備を進めている(図-1)。港北行きシールドトンネル及び港北側のUターン路1ヶ所(以降、「Uターン路②」と称す)は首都高が受託し、設計及び施工を進めている。トンネル区間の途中に出入口はなく、シールドトンネルの切り開きを伴う特殊構造はUターン路2ヶ所のみである。

Uターン路の施工はシールド掘進工及び道路床版工の資機材搬出入の動線に支障無く進めるため、トンネル円形断面のうち開口側の半断面で行う必要があり、工程短

縮や遅延リスクの排除が求められる。本稿では、Uターン路②の設計施工と工程短縮策について報告する。



図-1 横浜環状北西線平面図及びUターン路位置図

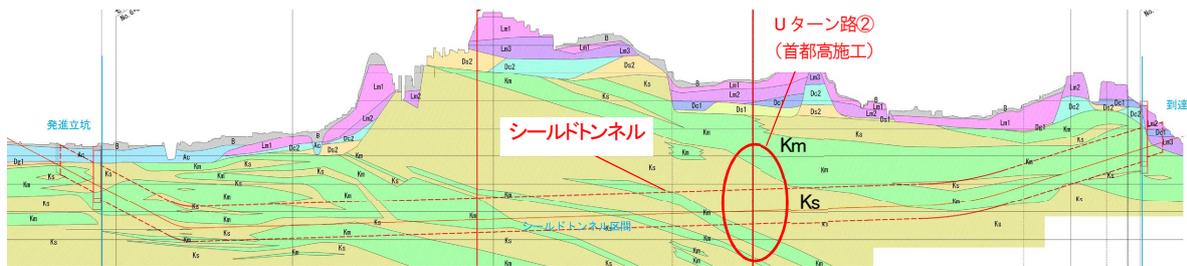


図-2 シールドトンネル縦断と地質縦断図

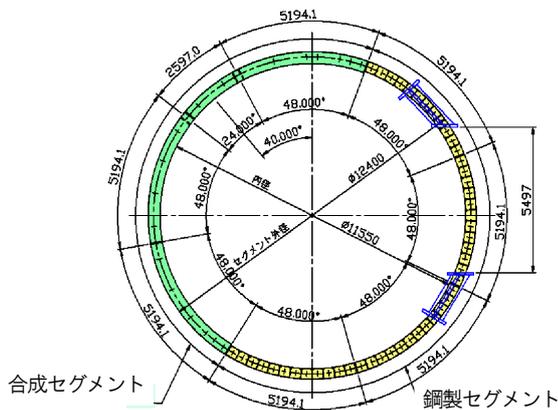


図-3 Uターン路②切り開き部セグメント断面図

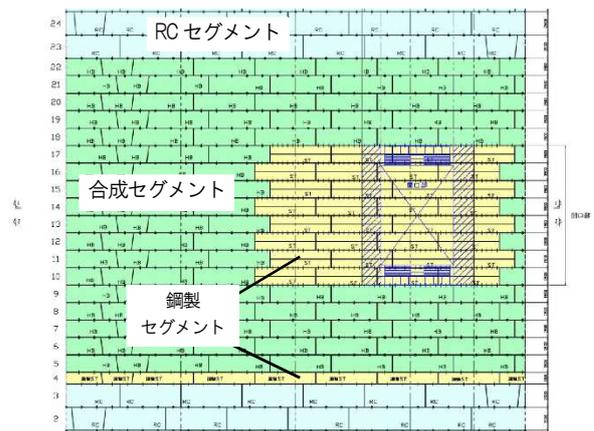


図-4 Uターン路②切り開き部セグメント展開図

2. Uターン路基本構造と非開削切り開き工法概要

(1) 地質概要

図-2にシールドトンネル区間の地質縦断図を示す。シールドトンネル区間全般にわたり、硬質地盤である上総層 (Km, Ks) に位置し、安定的な地盤でのシールド掘進となっている。Uターン路②においては、TP+6.2m以下の砂質土層 (Ks) に位置し、地下水位TP+18.6mであり、切り開き工事における止水が重要となる。

(2) Uターン路の基本構造

シールドトンネルの構造は、外径12.4m、内径11.5mであり、一般部はRCセグメント (セグメント厚：450mm、セグメント幅2m) で構成されている。図-3及び図-4に示すとおり、Uターン路部には局部的に大きな応力が発生しやすいため、合成セグメント (セグメント厚：450mm、セグメント幅1.5m) を配置し、開口部となるリングには部分的に鋼製セグメント (セグメント厚：400mm、セグメント幅1.5m) を配置することで、切り開きが可能な構造とした。また、図-5及び図-6に示すとおり、開口部の補強構造としては、水平に梁補強材 (BH-2000×1000：SM520) を渡し、円周方向には円弧状の柱補強材を設置している。

Uターン路②の構造は、高さ7.7m、幅10.8mで両シールド

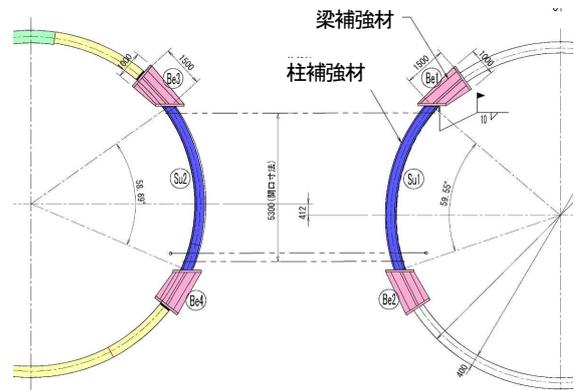


図-5 Uターン路②開口部補強構造 (開口側面図)

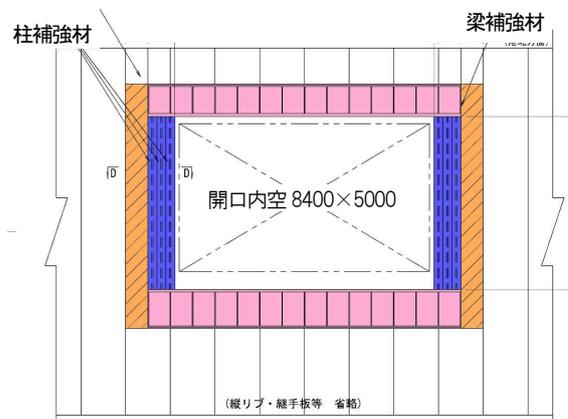


図-6 Uターン路②開口部補強構造 (開口正面図)

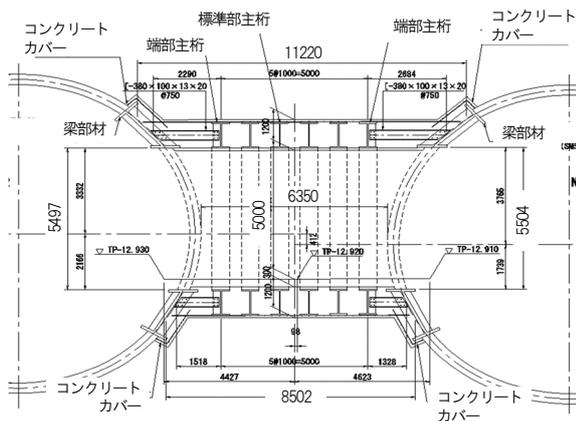


図-7 Uターン路②躯体構造

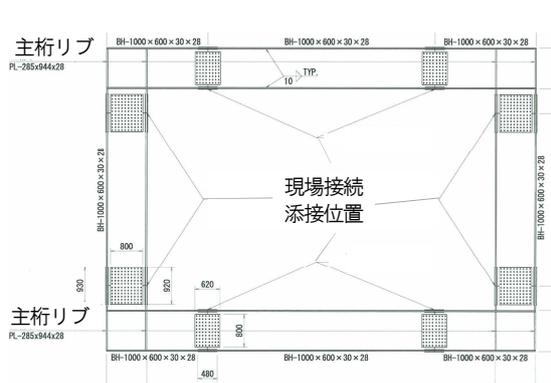


図-8 Uターン路②躯体構造

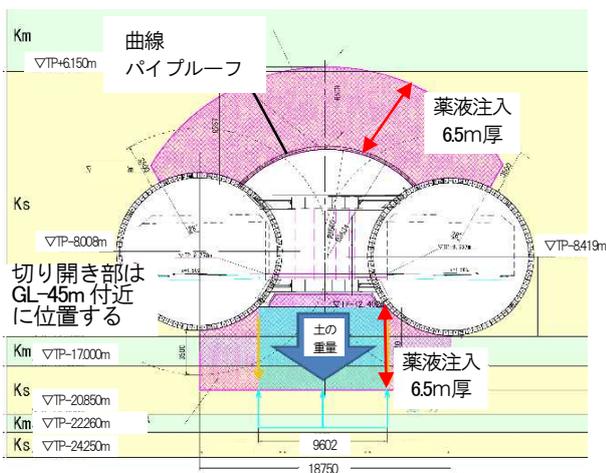


図-9 曲線パイプと薬液注入範囲

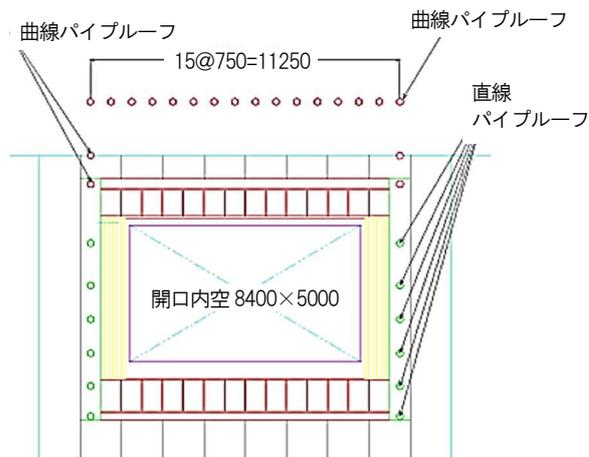


図-10 パイプ配置図 (開口正面)

ド間の距離約10mを結んでおり、図-7及び図-8に示すとおり、鋼製I型断面で構成された口の字型のラーメン構造とし、ゆるみ土圧 (1D, D:トンネル外径12.4m) に対する抵抗部材とした。シールド接合部からは鋼部材で直接主構造に接続し、主構造を鉄筋コンクリートの頂版・側壁・底板で内包する構造とした。

(3) 非開削切り開き工法概要

図-9に地層入りの断面図を示す。Uターン路②構築に際し、トンネル間の上半部の掘削工に対する防護工として曲線パイプ (φ267.4mm) を採用し、止水対策として、地上及び構内からの薬液注入工法を採用した。なお、棲部の土留め工には直線パイプ (φ267.4mm) を採用した。図-10にパイプ配置図を示す。Uターン路施工は、本線シールド掘進工事と同時施工を行うため、切り開き箇所と反対側のトンネル半断面を資機材搬入の動線として確保する必要があり、コンパクトな施工設備で対応可能な小口径パイプ工法とした。止水注入厚は、掘削するトンネル半径分を注入厚さ (6.5m) として止水注入の範囲を設定した。また、薬

液注入範囲の下に位置するKm層が薄く、地質縦断図よりKs層との互層となっているため、追加ボーリングにより層厚を確認した上で、盤ぶくれ照査を行った。その結果、1.4m程度で安全性に問題ないことを確認している。

3. 施工ステップと構造解析

(1) 施工ステップ

図-11にUターン路構築の施工ステップを示す。施工手順は以下の流れとなる。

STEP1: 開口前 (切り開き工事前)

地上及びトンネル内部より止水のための薬液注入を行う。次に、トンネル内部より地山防護のためのパイプを施工した後、内部支保工を構築

STEP2: 施工時 (内部支保工撤去前=Uターン路構築中)

セグメントを撤去し、切り開いた開口よりトンネル間を掘削する。掘削完了後、トンネル開口部の補強鋼材とUターン路本体鋼製枠を設置

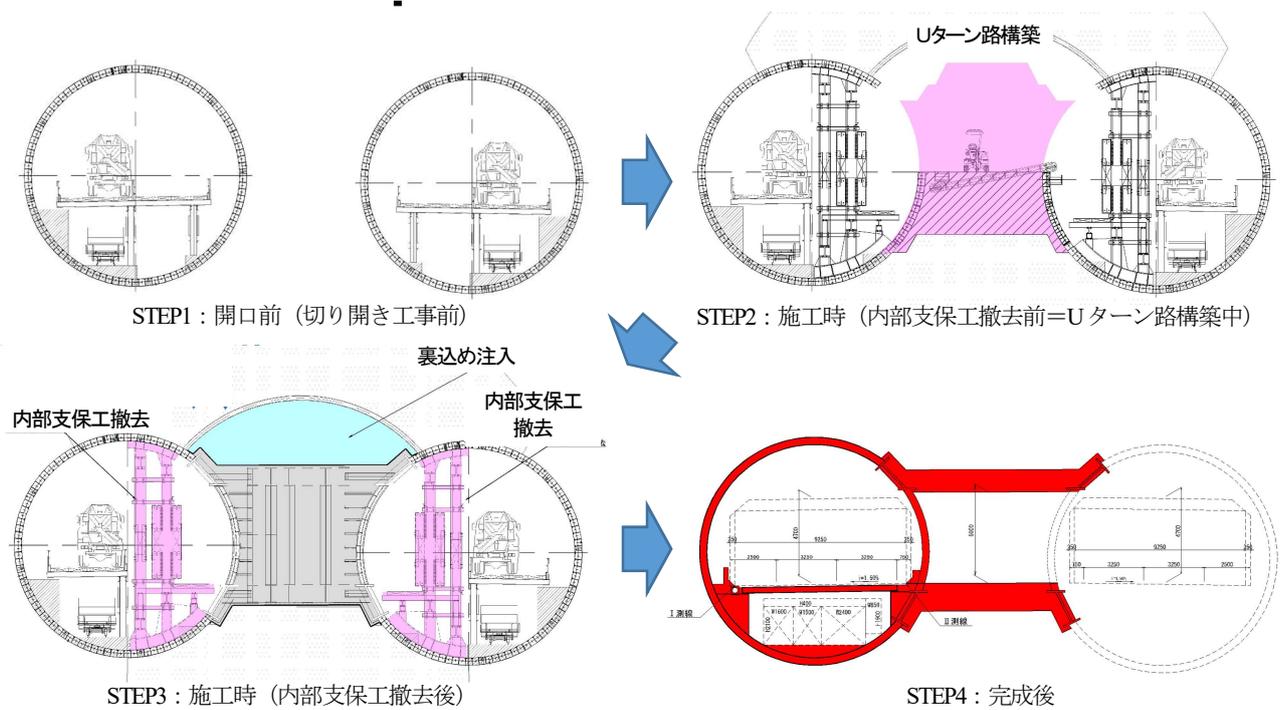


図-11 Uターン路②施工ステップ

ケース	開口前	施工時 (内部支保工撤去前)	完成時・施工時 (内部支保工撤去後)
モデル名	2リングはりばねモデル	剛性一様リング地盤ばねモデル	剛性一様リング地盤ばねモデル
モデル図			

図-12 解析モデル (2リングはりばねモデル, 剛性一様リング地盤ばねモデル)

STEP3 : 施工時 (内部支保工撤去後)

防水工の後、躯体コンクリート打設と裏込め材充填を行い、内部支保工を撤去

STEP4 : 完成後

内部支保工を撤去し、Uターン路の完成

(2) 構造解析概要

それぞれのステップにおいて、荷重を受ける部材が異なるため、各ステップにおける応力状態を把握する構造解析を実施し、Uターン路及び開口付近のセグメントの設計を行った。開口部が外力を受けるときの状況の違いを考慮し、開口部の解析モデルの使い分けも行った。

STEP1 : 開口前 (切り開き工事前) については、通常

のシールドトンネル設計で使用する2リングはりばねモデルを用いた。STEP2 : 施工時 (内部支保工撤去前=Uターン路構築中) やSTEP3 : 施工時 (内部支保工撤去後) , STEP4 : 完成時については、剛性一様リング地盤ばねモデルを用い、それぞれパイプルーフ及び支保工によって支持された状態であることから仮設部材もモデル化し、開口補強で支持された状態を再現するため、開口補強部を支点ばねとした (図-12) 。さらに、STEP4 : 完成時については、開口部セグメントに作用していた荷重を非開口部セグメント (開口部に隣接する合成セグメント) が負担し、応力状態の急変が考えられるため、多リングはりばねモデルにて3次元的な挙動の評価も行った (図-13) 。

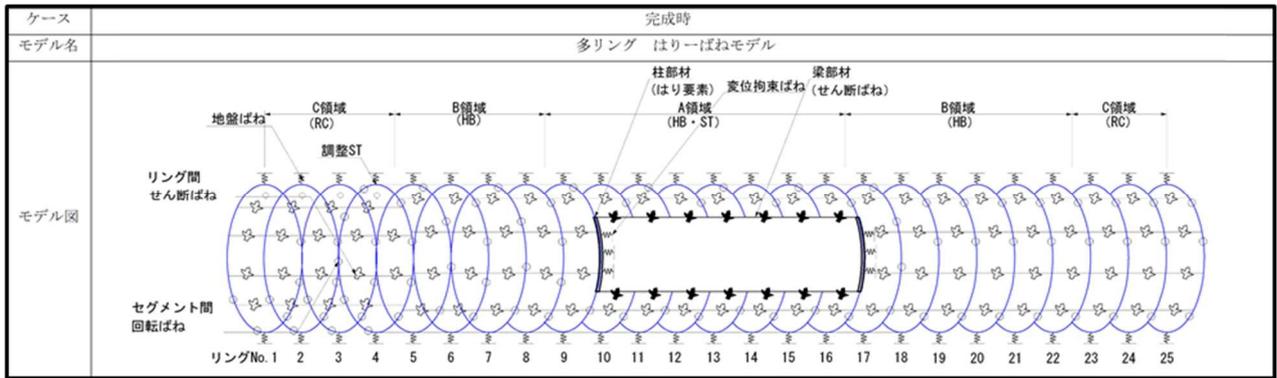


図-13 解析モデル (多リングはりばねモデル)

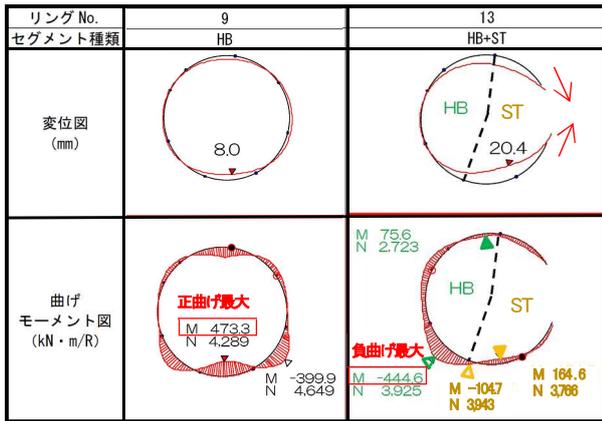


図-14 多リングモデル解析結果

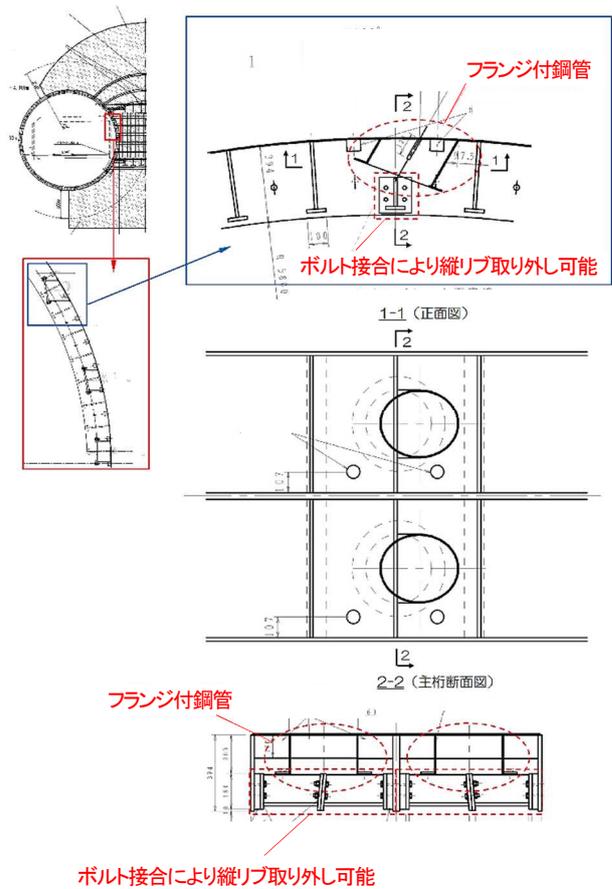


図-15 パイプルーフ仕口詳細図

(3) 多リングモデル解析結果

図-14に多リングモデルの解析結果の代表例を示す。ここでは、開口部に隣接する合成セグメント (No.9リング) と開口部中央の合成セグメント・鋼製セグメント (No.13リング) を代表とした。なお、リングNoは、図-13の多リングモデル中にNo.1～No.25と割り振っている位置を示している。

No.9リングは合成セグメントの正曲げ最大値を示すリングであり、これを基に合成セグメントの諸元を決定している。ただし、変位図や曲げモーメント図のモード自体は、これより若番側の開口から遠ざかるリングと大きくは変わらないことを別途確認しており、近接する開口により影響は受けているものの、応答値が大きく変動したり変形モードが大きく変わるなどの極端な影響はなかった。

一方、No.13リングは開口の影響を受け、変形及び曲げのモードが大きく異なっている。変位図に着目すると、開口位置であるリングの端部が、開口が閉じる方向に変形しており、そのため、リング左下側の負曲げが助長され、負曲げの最大値を示すリングとなった。当該リングは開口補強梁の中央付近であることから、変形量が最も大きい位置だったことによると考えられる。

4 施工法の詳細検討

Uターン路工事は、シールド掘進工及び道路床版工の資機材搬出入の動線に支障無く進めるため、一連の施工をトンネル円形断面のうち開口側の半断面で行う必要がある。また、Uターン路工事は、工程短縮や遅延リスク排除が求められ、解決すべき問題点・着眼点として、パイプルーフ工及び内部支保工に関する工程短縮策の検討を行った。



図-16 トンネル内側より撮影したパイプ仕口部

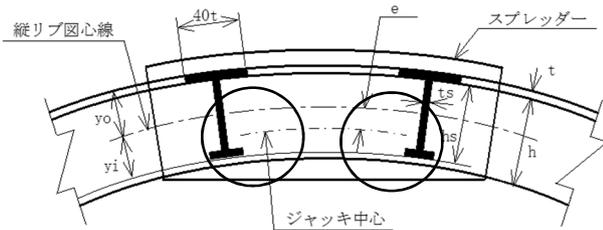


図-17 縦リブ断面図 (曲線パイプルーフ)

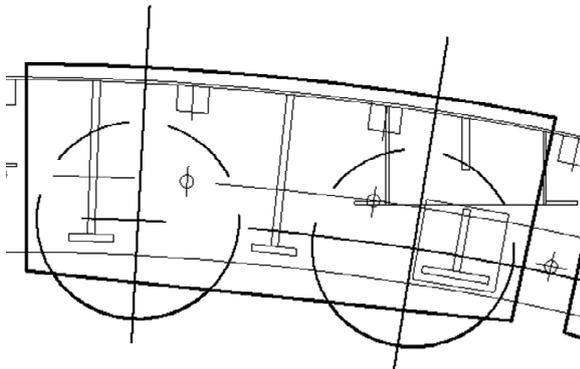


図-18 縦リブ断面図 (直線パイプルーフ)

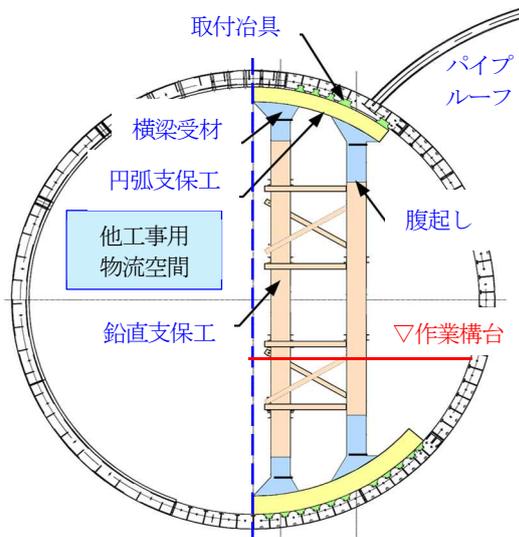


図-19 内部支保工概要

(1) パイプルーフ工

パイプルーフ工の従来工法では、パイプルーフ発進部（鋼製セグメントの縦リブ及びスキンプレート）をガス切断し、スキンプレートに発進仕口を現場溶接する手順をとる。しかし、施工空間の限られた中でスキンプレートの曲面に対し高い精度の溶接を行うことは難しく、仕口の設置には相当の時間を要する。

a) 対策概要

図-15に本工事におけるパイプルーフ仕口の詳細図を示す。パイプルーフ工については、発進仕口を鋼製セグメントに内包化すべく工場製作段階で設置しておくことで、発進仕口の現場溶接に係る工程がクリティカルにならないようにした。仕口の内包化により縦リブ断面が半減するため、シールドトンネル掘進時において残った部分でジャッキ推力に対して座屈しない断面諸元を設計した。また、パイプルーフ施工前の縦リブ撤去時に極力ガス切断を使用しないよう、縦リブの-span中央にテーパ付きの継手板を設置し、ボルト撤去により取り外し可能な縦リブ構造とした。これによりシール材損傷リスクが軽減されるため、出水に伴う工程遅延リスクを抑制することが出来る。

b) 設計概要

図-16に示すように仕口を内包することにより縦リブ断面上半が欠損してしまう。そこで、シールド掘進に伴うジャッキ推力に対して、座屈しないように縦リブの構造設計を行った。

曲線パイプルーフ部の縦リブの応力度照査は、縦リブ2本でスプレッダー1枚の推力を受けもつものとして行った。なお、図-17に示すように、スプレッダー1枚には、ジャッキが2本取り付けられている（直線パイプルーフ部は縦リブ3本；図-18）。ジャッキ中心と推力受け中心との偏心量を考慮し、座屈に対して照査を行った。ジャッキ推力は、スプレッダーで覆われる縦リブ又は継手板およびスキンプレートの一部を含む有効断面で受け持つものとして応力度を計算した。また、ジャッキ推力を適切に伝達するように、シールドジャッキ1本の推力を少なくとも2本以上の縦リブで支持するように縦リブを配置した。この結果、縦リブの座屈等の問題なく、シールドマシンは通過することができた。

(2) 内部支保工

図-19に内部支保工の概要を示す。内部支保工設置について検討前は、以下の手順で行うこととしていた。

1. 上部円弧支保工及び腹起しをチェンブロックで設置
2. パイプルーフ施工用の作業構台を解体しながら下部の円弧支保工及び腹起しをクローラークレーン等で設置

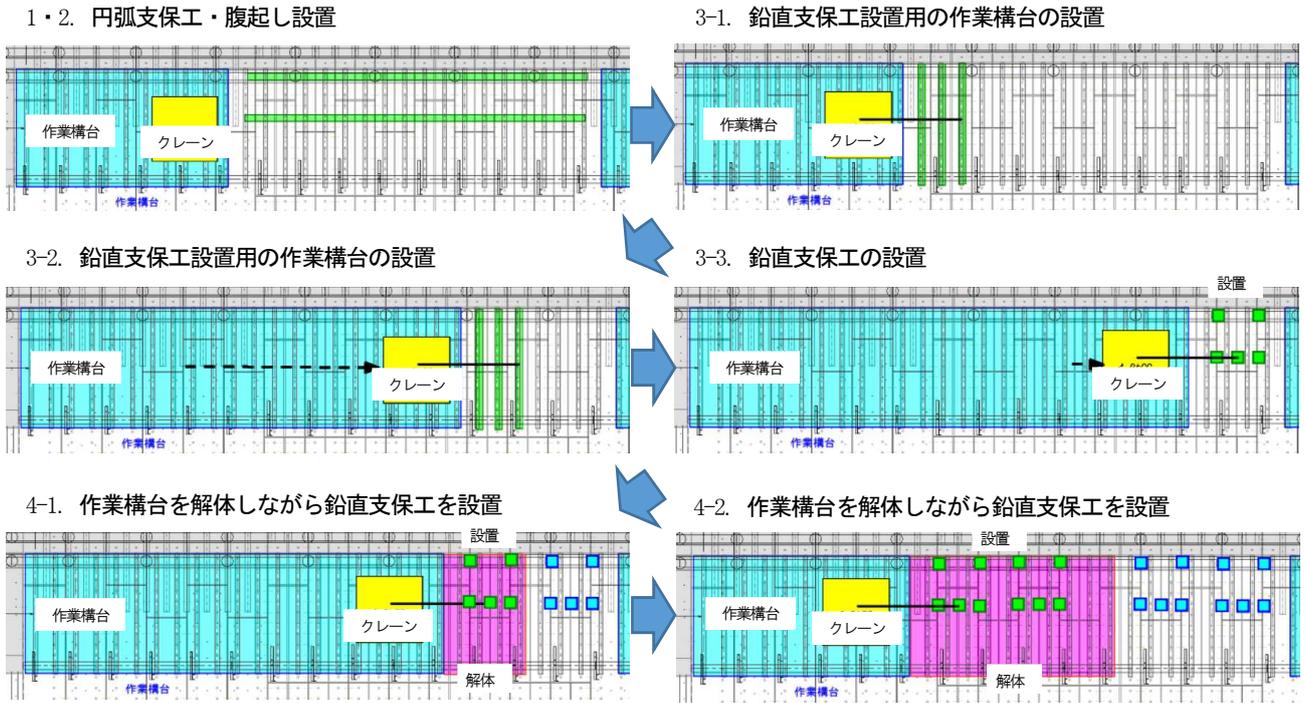


図-20 内部支保工の設置手順（検討前）

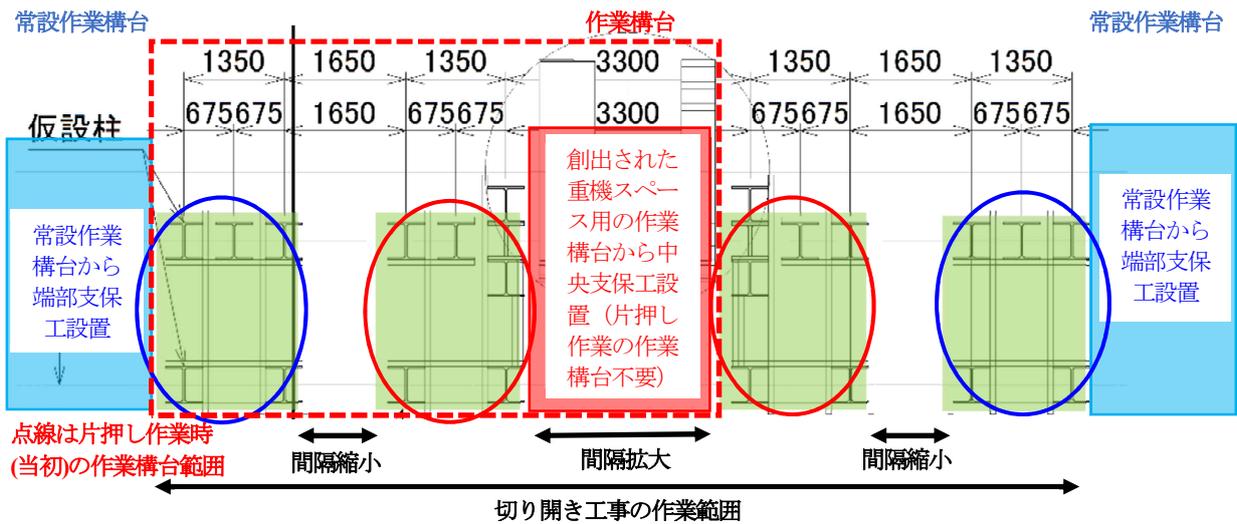


図-21 鉛直支保工（4か所）の平面配置図

3. 鉛直支保工設置用の作業構台を設置
4. 片押しで作業構台を解体しながら鉛直支保工を設置
5. 次工種の切り開き用作業構台の設置

しかしながら、以上の手順（図-20）では、作業構台の組みばらしが発生するため、工程ロスとなる。

a) 対策概要

内部支保工については、図-21に示すとおり、鉛直支保工のトンネル軸方向の配置間隔を一部広げて重機の作業スペースを創出することで、鉛直支保工設置に関する作業構台の組みばらし作業を低減することとした。一部鉛直支保工の間隔が大きくなるため、相対的に横断解析における内部支保工剛性が小さくなる。セグメントと内部支保工が負担する断面力の割合がトンネル縦断方向で

異なるため、縦断方向の解析モデルにより内部支保工配置を考慮した横断解析における単位奥行き辺りの剛性を評価して各部材の設計を行った。

b) 設計概要

内部支保工は、円弧支保工、腹起し、横梁受材及び鉛直支保工に大別される。内部支保工の力の伝達は次の通りと考える。パイプルーフやセグメントが受けた荷重を、まずセグメント側からセグメントの縦リブに固定された取付治具によって内部支保工側（円弧支保工）へと伝達する。取付治具はセグメントに対して法線方向の軸力と、接線方向のせん断力として荷重を円弧支保工へ伝達する。

円弧支保工に伝達された力によって、円弧支保工には軸力と曲げモーメントが生じる。その円弧支保工の支点

となる部材として横梁受材を配置する。支点反力として荷重を受け取った横梁受材から、トンネル軸方向に配置した腹起しに荷重を伝達し、その後、鉛直支保工へと荷重が伝達される。以上のように伝達された荷重に対して、各部材の設計手法および結果を次節に示す。なお、トンネル軸方向の鉛直支保工間隔を考慮して、内部支保工にとって安全側に評価するように断面力を改めて算定する。

c) 設計手法および結果

内部支保工を設計するにあたっては、トンネル横断方向の解析モデルにより、セグメントやパイプルーフで受けた荷重のうち内部支保工へ伝達される断面力の大きさを評価する。その際、内部支保工の剛性によって、セグメントと内部支保工が負担する断面力の割合が異なるため、トンネル縦断方向の解析モデルにより、内部支保工配置を考慮した横断解析における単位奥行き当たりの剛性を評価する。それぞれのモデルを図-22に示す。

縦断方向の鉛直支保工配置は図-21に示すように縦断方向に不均一なため、鉛直支保工配置が密な部分では相対的に剛性が高く、一方で横梁スパン中央部では変形が

最も大きくなるため相対的に横断解析モデルにおける内部支保工剛性が低い。横断解析において、内部支保工剛性が高い場合には内部支保工が負担する断面力が大きく、一方で内部支保工剛性が低い場合には、セグメントが断面力を負担する割合が大きくなるため、表-1に示すようなケースを設定し、内部支保工の仕様を算定した。また、横断解析モデルについて、セグメントと内部支保工との結合条件として、ピン結合および剛結合の両方の解析を実施し、部材にとって厳しい断面力によって照査した。

横断解析と縦断解析のそれぞれの結果が互いの入力条件に関わるため、繰り返し計算を行い計算結果を収束させ、安全側の仕様決定を行った。表-2に各部材仕様を決定するために用いる断面力の算定方法について示す。内部支保工のうち、上部円弧支保工はパイプルーフからの荷重が主であることから、パイプルーフと円弧支保工間隔は同じため、横断解析で算出された断面力を用いた。腹起しおよび鉛直支保工は、鉛直支保工配置を考慮できる縦断解析により算出された断面力より算出した。下部円弧支保工や下部横梁受材は縦断方向の鉛直支保工配置

表-1 解析ケース

解析ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
内部支保工剛性	大 (a部)	小 (b部)	大 (a部)	小 (b部)
結合条件	ピン結合	ピン結合	剛結合	剛結合

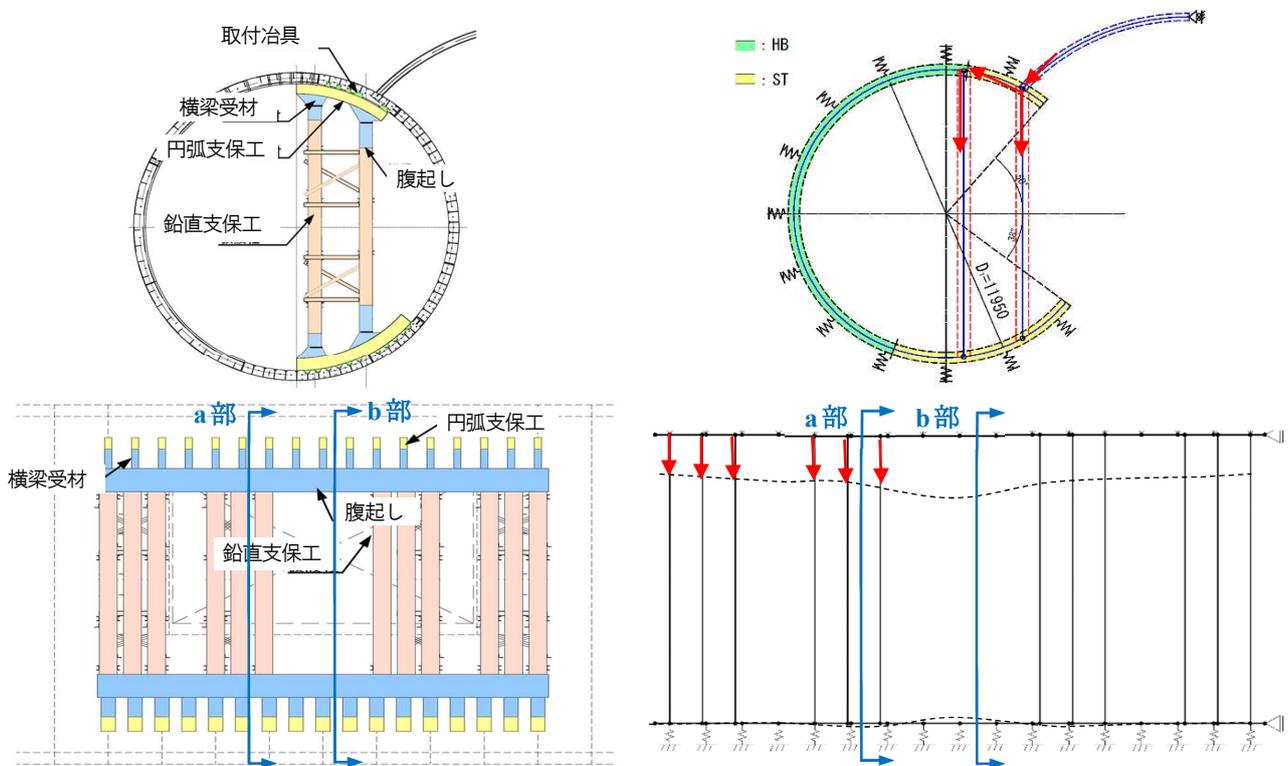


図-22 内部支保工 (左：設計対象部材説明図, 右：解析モデル)

表-2 各部材仕様の決定方法

部材		横断/縦断	使用断面力	補正等
円弧支保工	上部円弧支保工	横断解析	円弧支保工 曲げ・軸力・せん断力	—
	下部円弧支保工	横断解析	円弧支保工 曲げ・軸力・せん断力	縦断解析の下部円弧支保工ばね反力により補正
横梁受材	上部横梁受材	横断解析	柱部材 軸力、曲げ・せん断力	—
	下部横梁受材	縦断解析	下部腹起しばね反力	横断解析の柱部材に発生する 曲げ・せん断力を補正して考慮
腹起し	上部腹起し	縦断解析	腹起し 曲げ・せん断力	—
	下部腹起し	縦断解析	腹起し 曲げ・せん断力	縦断解析モデルでは下部からの荷重の影響が考慮できないため、 上部横梁受材と同仕様とする
鉛直支保工		縦断解析	鉛直支保工軸力	横断解析の柱部材に発生する 曲げ・せん断力を補正して考慮

の影響が考えられるため、縦断解析により算出されたばね反力をもとに検討を行った。

以上の検討より、安全で合理的な鉛直支保工配置を図-21のように決定した。その結果、片押しで作業構台を解体しながら鉛直支保工を配置することなく、両外と中央の作業構台からの鉛直支保工の設置を可能とし、工程短縮を図ることができた。

5 おわりに

本稿ではUターン路の設計手法と施工法についてまとめた。また、施工の詳細について検討し、施工性改善及び工程短縮化を図った。パイプルーフの発進仕口内包化

については、特に品質に問題無くセグメントを製作することができ、すでに現地で組み上がったセグメントの外観からも品質の劣化等の問題は確認されていない。パイプルーフ工、内部支保工ともに2018年夏には施工着手予定である。引続き施工計画を精査し、実施工に臨むこととしたい。また、実施工に際しては工程短縮への寄与について検証することとしたい。

参考文献

- 1) 熊田政典, 森 亮, 内海和仁, 上村健太: 高速横浜環状北西線シールドトンネル工事の設計施工, 地下空間シンポジウム論文・報告集第23巻, pp.77-82, 2018
- 2) 内海和仁, 川瀬洸祐, 熊田政典, 奥田豊: 横浜環状北西線シールドトンネル U ターン路部の設計施工, 土木学会年次学術講演会, 2018

(2018. 8. 10 受付)

DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONNECTION TUNNEL BY NON-OPEN-CUT UNDERGROUND ENLARGEMENT METHOD FOR SHIELD TUNNEL OF YOKOHAMA CIRCULAR ROUTE NORTHWESTERN SECTION

RYOHEI MORIOKA, KAZUHITO UCHIUMI, KENTA UEMURA,
MASANORI KUMADA, NORIMASA KYOUIYA and YUTAKA OKUDA

City of Yokohama is currently working on construction of twin shield tunnels and two connection tunnels of Yokohama Circular Route Northwestern Section as an administrator. Metropolitan Expressway Co., Ltd is taking charge of one of the tunnels and connection tunnel, and is also advancing the final design and construction.

Construction of the connection tunnel needs to be carried out in half of the tunnel section in order not to interrupt the work of shield tunnel and the road deck. Since the progress of connection tunnel, which is a critical path of whole project, is quite important, shortening construction period and excluding delay risk are required. Numbers of measures are being taken such as pipe roofing and internal support to accelerate the progress of this connection tunnel.