

供用中高速道路トンネルに接続する分合流部切開きの設計施工

鹿島建設株式会社	正会員	○西嶋	徹
鹿島建設株式会社	正会員	山本	佳正
首都高速道路株式会社	正会員	永井	政伸

1. はじめに

平成 27 年 3 月 7 日に開通した首都高速中央環状線（湾岸線～3 号渋谷線）（以下、品川線）は、大橋ジャンクションにおいて品川線本線トンネルと、供用中の中央環状新宿線トンネル部を、地中にて接続する構造となっている。この中央環状新宿線トンネル部は、上下 2 本の双設トンネルであるが、本工事では分合流部を構築するために、このうち約 250m の区間を供用しながら切開いて接続を行った（図-1）。この供用中トンネルの挙動を把握しながら安全性を確保して施工を進めることが、当工事の最も重要な課題であった。また、工事区間は重要幹線の都道環状第 6 号線（山手通り）の直下であることから、環状第 6 号線の通過車両や近隣の住民、近接する鉄道などへの影響を最小限に抑えることも重要であった。工事計画に当たっては、躯体構築工法や仮設の土留め工法の選定など、周辺環境への影響低減を最優先した。

様々な検討の成果から、平成 20 年 8 月～平成 27 年 3 月までの 6 年 7 ヶ月に亘って施工した本工事「中央環状新宿線大橋地区本線接続工事」も、無事完成することができたので、本報告は供用中高速道路トンネルの切開きの完成に至るまでの設計施工実績について報告するものである。

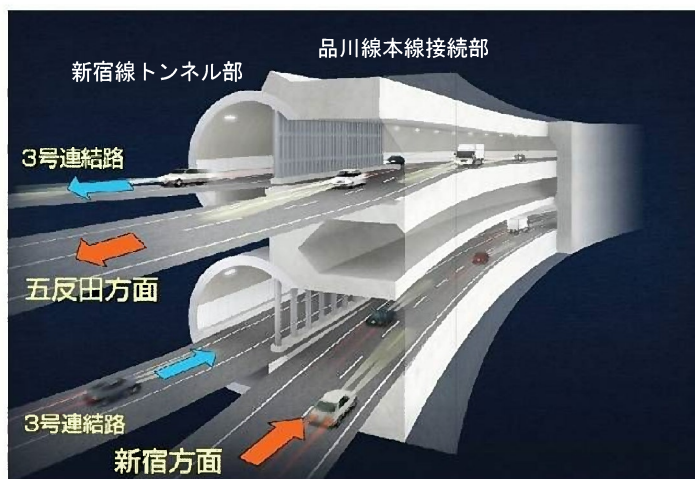


図-1 工事完成パース

2. 工事概要

首都高速中央環状線は、首都圏 3 環状 9 放射道路の最も都心側に位置する環状道路である（図-2）。その内、平成 22 年 3 月に高速 3 号渋谷線の大橋 JCT から高速 4 号新宿線の西新宿 JCT 間の約 4.3km が開通し、高速湾岸線の葛西 JCT から大橋 JCT までを供用していたが、今春、品川線の約 9.4km が開通したことにより、全長約 47km の環状道路が完成した。本工事は、先行して供用していた中央環状新宿線に品川線拡幅躯体を地中で接続する工事であった。開削トンネル工法で、供用中のシールドトンネルの側部 250m 区間を地上から掘削し、本線となる RC 構造の躯体を構築、その後、外径 $\phi 12.65\text{m}$ の鋼製セグメント側面を切開くことにより地中で地下空間を拡幅し、分合流部を構築した。



図-2 首都高速中央環状線位置図

キーワード 切開き, 供用中トンネル, 高速道路, 分合流部, 開削トンネル

連絡先 〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島建設株式会社 土木管理本部 T E L 03-5544-0621

3. 施工概要

(1) 「開削工法と NATM の併用」工法の採用

施工方法の選定については、街路交通・周辺環境、供用中のシールドトンネルの交通に与える影響、周辺地盤変状の抑制、工程遵守について特に着目した結果、開削工法と NATM を併用する工法を採用した（図-3）。地盤条件は、地下水位が概ね TP+16m で Tog 層は層厚 2.6m 程度で透水性が高く湧水量も多いものの、拡幅掘削部は全線にわたり安定した上総層群泥岩（Kc 層）が分布している。当該箇所の Kc 層は自立性が高く、湧水が懸念される介在砂層の分布も少ないことから、Tog 層の確実な止水とともに、NATM の適用が可能であると判断した（図-5）。

施工は、環状 6 号線内回り側（歩道側）に寄せて設置した作業帯から工事範囲全線にわたって細長く開削（幅 5m～8m）し、開削部から供用中トンネルに向かって NATM にて拡幅掘削し、躯体を構築した（図-4、写真-1）。この併用工法は、開削幅を小さくすることで常設作業帯を設置した上でも、山手通りの所定の車線数（内・外回り各 2 車線）・歩車道幅員を確保でき、街路交通への影響を最小限に抑えけるとともに、NATM 掘削幅を小さくすることで周辺地盤の変状を抑制できる。また、NATM に先立ち土留め内掘削を行うため、地盤状況の把握と必要に応じての対策（止水注入等）が可能である。さらに、工事範囲全線において同時着手が可能であり、工程遅延に対する対応が取りやすいことから本工法を採用することとした。施工ステップを次頁に示す（図-6）。

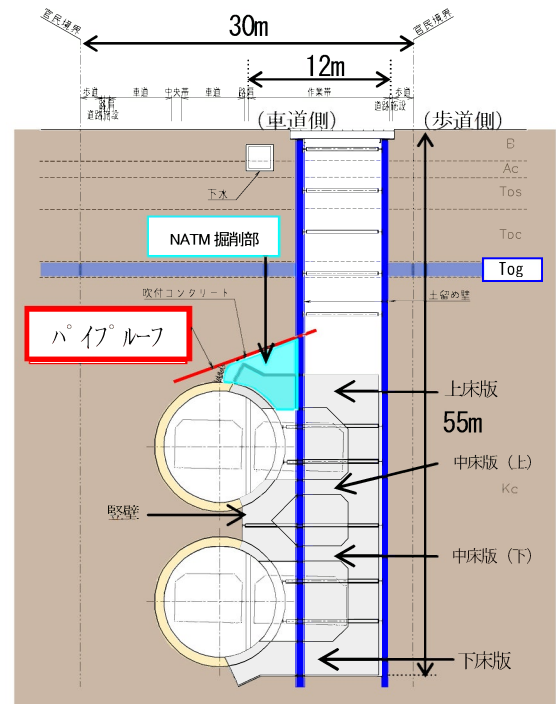


図-3 開削工法と NATM の併用



図-4 工事範囲図



写真-1 地上部施工状況

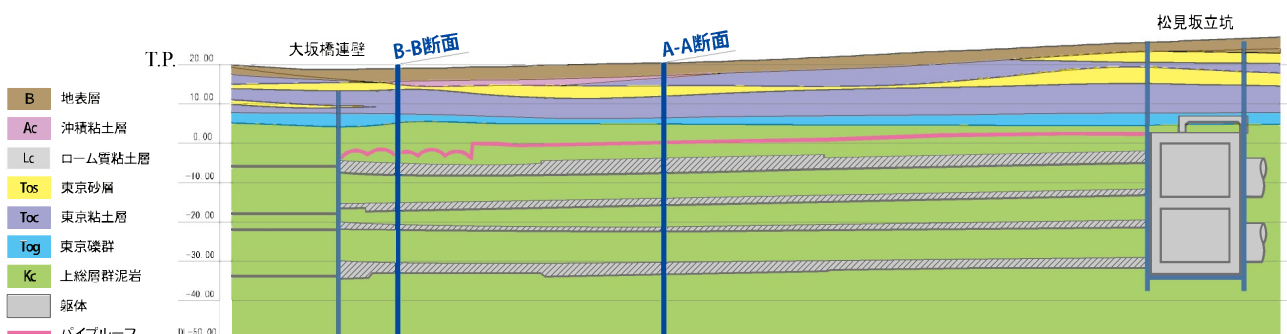


図-5 地質縦断面図

<STEP1>

- ① 土留め施工 (RCD 杭, CSM)
路面覆工の施工
常設作業帯内での掘削

- ② 作業床の構築

- ③ パイプルーフの施工

<STEP2>

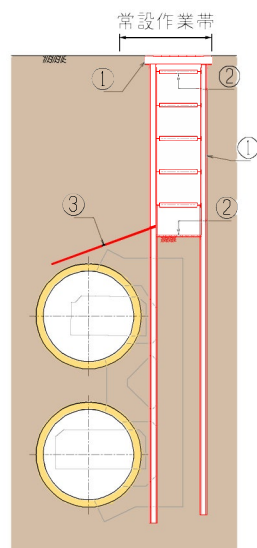
- ④ NATM (拡幅掘削)

- ⑤ トンネル上床版の施工 (逆巻工法)

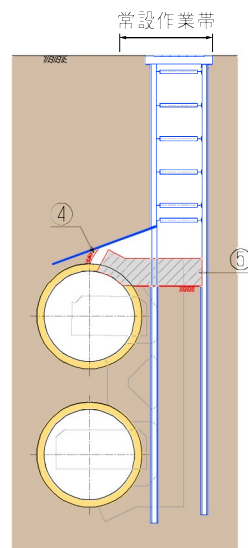
<STEP3>

- ⑥ NATM 部埋め戻し

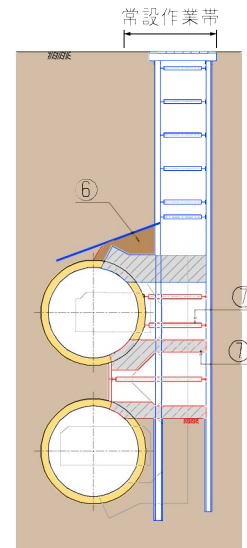
- ⑦ 逆巻掘削・切梁設置・中床版構築



STEP 1



STEP 2



STEP 3

<STEP4>

- ⑧ 連結路間側壁 (堅壁構築)

- ⑨ 床付け・下床版構築

<STEP5>

- ⑩ 歩道側側壁構築・切梁撤去

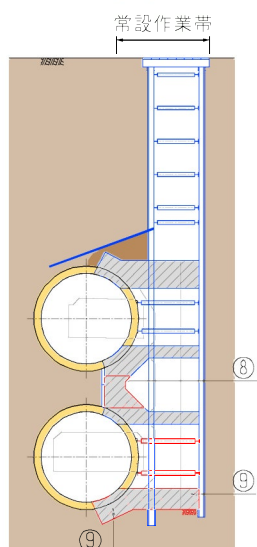
- ⑪ 鋼製セグメント切開き

- ⑫ 切梁撤去・埋め戻し

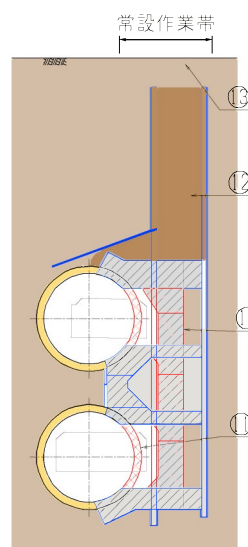
- ⑬ 路面覆工撤去

<STEP6>

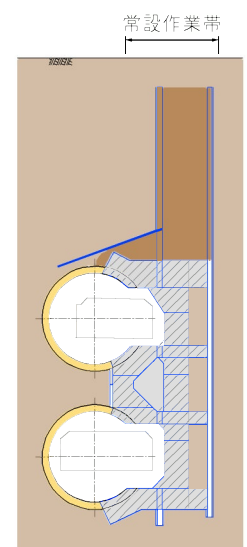
完成



STEP 4



STEP 5



STEP 6

図-6 全体施工ステップ

(2) 土留め工法について

土留め工法として CSM 工法+リバーシ杭 (RCD) 工法を採用した (CSM: Cutter Soil Mixing). この工法では, RCD 杭施工後に RCD 杭間を CSM 工法にてソイルモルタル壁を構築するため, 止水性の確保が期待できた. また, 拡幅掘削を行う車道側については, 土留め壁に必要な芯材と支持杭として必要な芯材を分割して施工できるため, RCD 杭のピッチを飛ばすことが出来るので, NATM 時の掘削施工性が向上する. 両工法とも使用する施工機械がコンパクトであるため, 当工事のような狭隘部での施工に有利であり, 隣接した首都高の大橋連結路建設工事での施工状況も良好であったため, 本工事にて採用することになった. 供用中トンネルへ向けて切広げる側となる車道部, 反対側を歩道部と称し, 土留め構造を図-7 に示す.

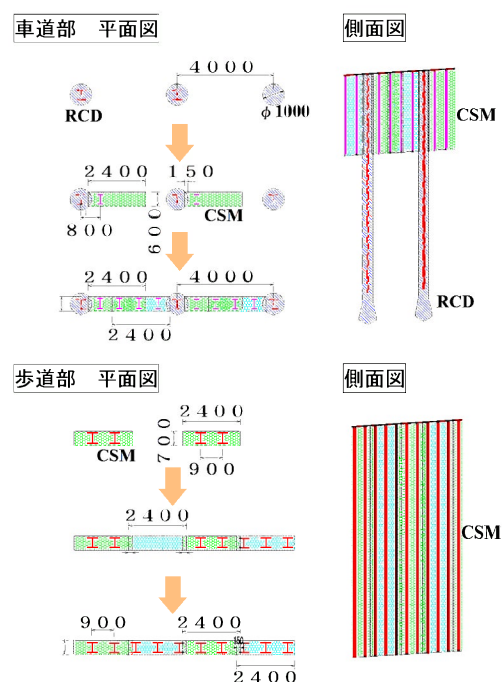


図-7 土留め構造と施工ステップ

(3) 逆巻き工法の採用について

本工事では逆巻き工法を採用し、切梁に加え本設床版により掘削中に露出する供用中トンネルを、より確実に支持させている。また、逆巻きで先行施工した床版と後施工で構築する側壁の上部は、無収縮モルタルで打ち継部を充填する方法が多く採用されているが、本工事では、高流動コンクリート（膨張材入り）による方法を採用することとした（図-8）。一般に、逆巻き工法は、打ち継部の強度及び止水性において、順巻き工法と比較した場合、性能が劣ることが懸念される。そのため、本工事では逆巻き部実物大の止水性試験を実施し、施工性及び品質を確認し施工に反映した。

(4) 床版構築について

拡幅掘削により露出した供用中トンネルの鋼製セグメント外側スキンプレーートを撤去し、既設シールドトンネル施工時にこのセグメント内に設置された鉄筋継ぎ手と、今回施工の床版主筋を接続することで、床版と既設トンネルを一体化させている（図-9）。また、逆巻床版自重（一部埋戻土含む）については、中間杭、土留め芯材にスタッドジベルを打ち、床版と結合することでズレ止めとして支持させた。床版コンクリート打設時の供用中トンネル内への漏えい防止として、セグメント内の内側スキンプレーート溶接部、セグメントリング間へのコーキングを実施した。

(5) 切開き工法について

本線躯体が構築された後に供用中トンネルの切開きを実施した。図-10 に示すように、鋼製セグメントの重量を考慮して切開き箇所を4分割し、側方空間が広い箇所についてはクレーン車、狭い箇所にはホイストクレーンを用いてセグメントを吊下げ、安定を図りながら高所作業車を利用してガス切断を行った。ここで、最初の切開き工実施にあたっては、中間杭の撤去及びセグメントを切開いたことによる解放応力をひずみゲージにより測定し、設計値と比較しながら切開き作業を実施した（写真-2）。

尚、切開き作業時には、工事作業帯から供用路線への火花・煙等の飛散防止策として、工事空間と供用路線の間にプロテクターパネルを設置した（写真-3）。このプロテクターは供用路線側にて、指定曜日のみ夜間車線規制を行い設置した。

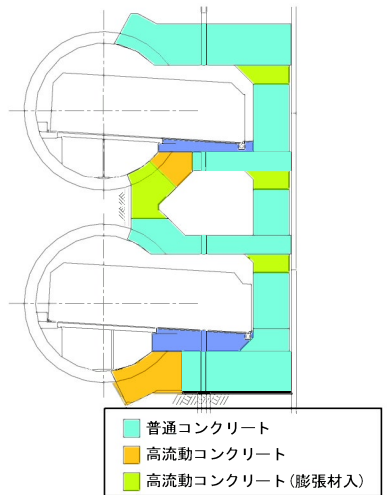


図-8 コンクリート使用部位

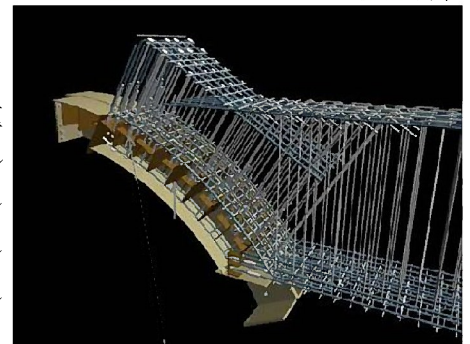


図-9 セグメントと躯体接続

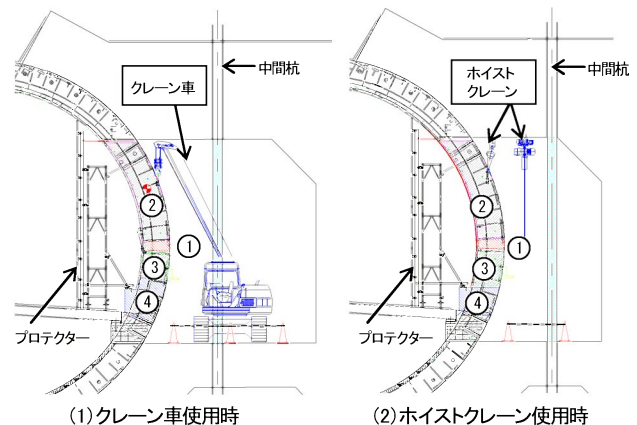


図-10 シールド鋼製セグメント切開き工概要図



写真-2 セグメント撤去状況（工事側）

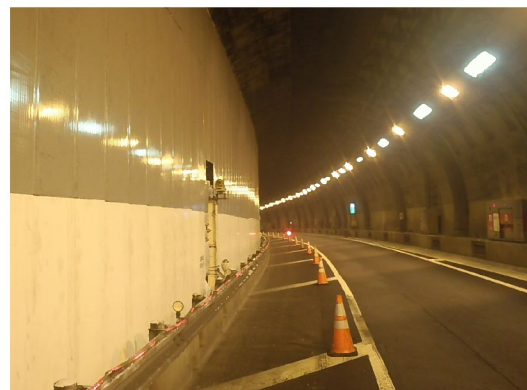
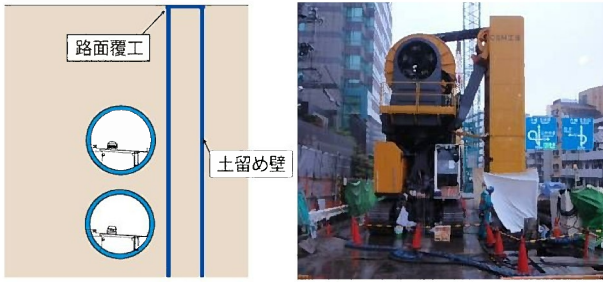


写真-3 プロテクターパネル（供用側）

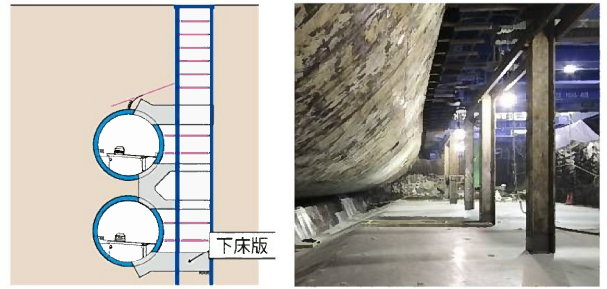
(6) 施工状況

施工状況を以下に示す。

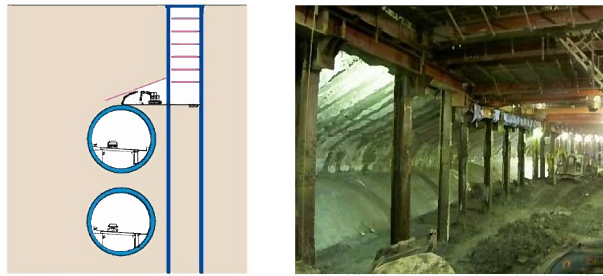
STEP1 土留め工，路面覆工



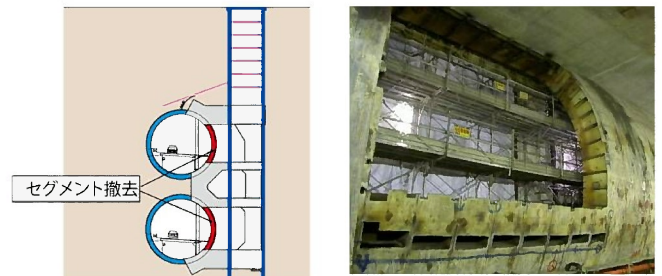
STEP4 掘削工，躯体構築工



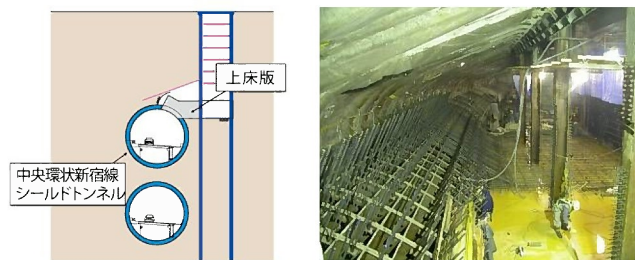
STEP2 拡幅掘削工



STEP5 シールド切開き工，トナリ接続工



STEP3 躯体構築工



STEP6 内装工，埋戻し，地上部復旧



4. 逐次解析による安全性確認と計測管理結果

供用中シールドトンネルの安全性の確認は、工事着手前に各施工段階でのトンネルの挙動と発生応力を確認する目的で2次元逐次解析を実施し、管理値を設定して計測管理した。施工にあたっては、トンネルの挙動を把握するためにトータルステーションで鉛直方向，水平方向の変位を計測し、解析結果から設定した計測管理値と比較し安全性を確認した。計測管理の概要について以下に示す。

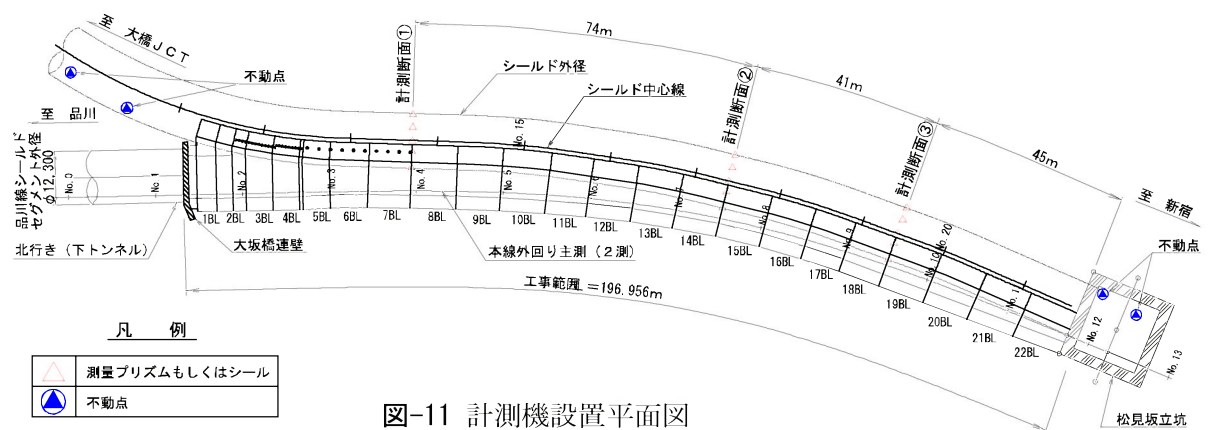


図-11 計測機設置平面図

(1) 供用中トンネルの挙動計測

施工中に供用中トンネルセグメントの挙動を把握するため、セグメントに計測点を設け、各測点の変位量を自動計測した。計測器配置図を図-11, 12 に示す。松見坂立坑内および大橋方に不動点を設け、当該工区に3断面、1断面当り上半部のみ5箇所（上層：a～e、下層：f～j 鋼殻撤去時はe、jを除く各4箇所）、トータルステーションにて、鉛直方向(Z方向)と水平方向(Y方向)を計測した（写真-4・5）。

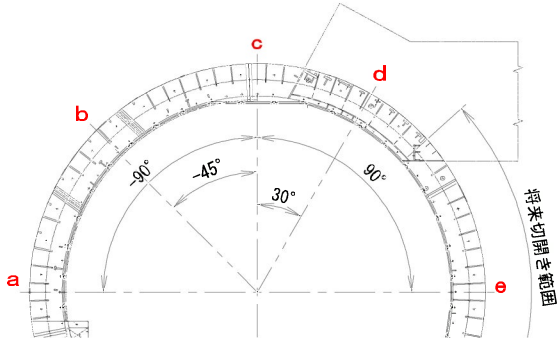


図-12 計測器設置断面図(上層)



写真-4 自動計測器（トータルステーション）



写真-5 計測用プリズム

(2) 解析モデル

施工手順に順じた鋼殻の安全性を確認するための解析は、2次元FEM逐次解析(A B A Q U S)を用い、掘削開始～躯体構築(逆巻き工法)～切開き～埋戻し完了～剛性低下までを19STEPでモデル化し実施した。解析は、工事着手前に実施した解析①に対し、掘削時の鋼殻変位量をフィッティングすべく解析条件を変更し再計算した解析②がある。解析②の側圧は、土留め壁の計測変位から推定した値を用いている。さらに、上層鋼殻と下層鋼殻の各変位量のフィッティング精度が、上層掘削時点と下層掘削時点で推定した各側圧で分けて解析すると精度が向上したことから、上層、下層でそれぞれに解析モデルを分割した。解析モデルを図-13, 14 に示す。また、解析に用いた荷重条件を表-1 に示す。

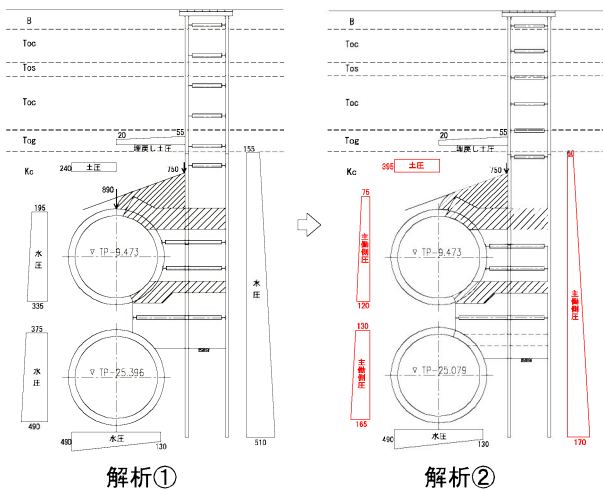


図-13 上層解析モデル図

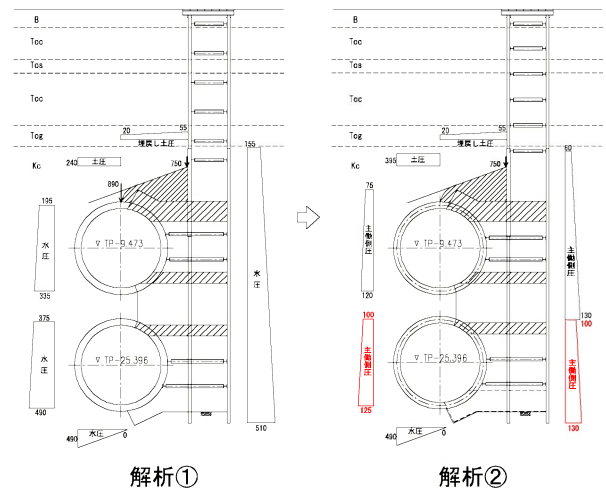


図-14 下層解析モデル図

表-1 荷重条件

	鉛直土圧	側 圧
解析①	パイプルーフ両端に集中荷重で載荷	静止土圧相当を考慮
解析②	土留め杭側は集中、鋼殻側は分布荷重	上層鋼殻 $0.16 \gamma h$ ，下層鋼殻 $0.12 \gamma h$

(3)解析結果と計測値との対比

解析②の結果，鋼殻の応力度は許容値に対して上鋼殻 93%，下鋼殻 88%となり，安全であることが確認できた（表-2，表-3 参照）．したがって，計測管理値は以下のように設定した．

一次管理値：解析結果の最大応力度比となった施工ステップの上半の最大変位

二次管理値：応力度比が 95%となる変位

許 容 値：解析値÷許容応力度比≤50mm

鋼殻切開き後における解析値と計測値を図-15 に示す．解析値と計測値との差異は少なく，鋼殻の変形モードをよく表現しており，切開き施工着手前に，それまでの掘削時の計測結果をフィードバックして設定した解析モデル及び条件は妥当であったと考えられる．

表-2 逐次解析結果（切開き前～剛性低下までの鋼殻の応力度比）

STEP	上層				下層			
	切開き前	切開き後	完成	剛性低下後	切開き前	切開き後	完成	剛性低下後
計測断面①	0.45	0.45	0.65	0.90	0.22	0.23	0.48	0.87
計測断面②	0.45	0.45	0.62	0.82	0.32	0.33	0.57	0.88
計測断面③	0.48	0.48	0.71	0.93	0.35	0.35	0.57	0.81

応力度比＝発生応力度／許容応力度

表-3 逐次解析結果（切開き前～剛性低下までの鋼殻の上半の最大変位）

単位:mm

STEP	上層				下層			
	切開き前	切開き後	完成	剛性低下後	切開き前	切開き後	完成	剛性低下後
計測断面①	20.2	20.2	30.9	39.7	21.0	22.3	22.4	25.6
計測断面②	20.6	20.7	26.0	32.3	22.3	22.7	23.0	25.1
計測断面③	25.7	25.8	32.5	39.7	22.6	23.0	25.2	26.8

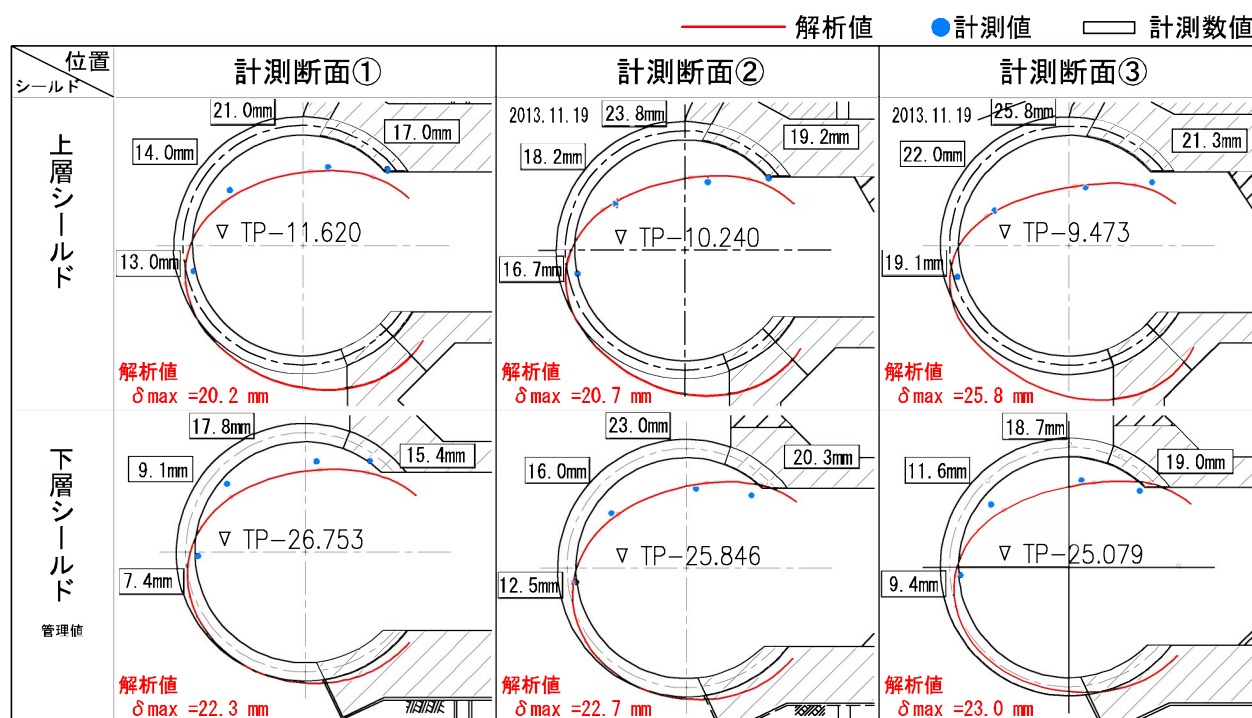


図-15 鋼殻切開き後の解析値と計測値

供用中トンネルの切開き前後の状況を写真-6・7に示す。



写真-6 供用中トンネル切開き「前」

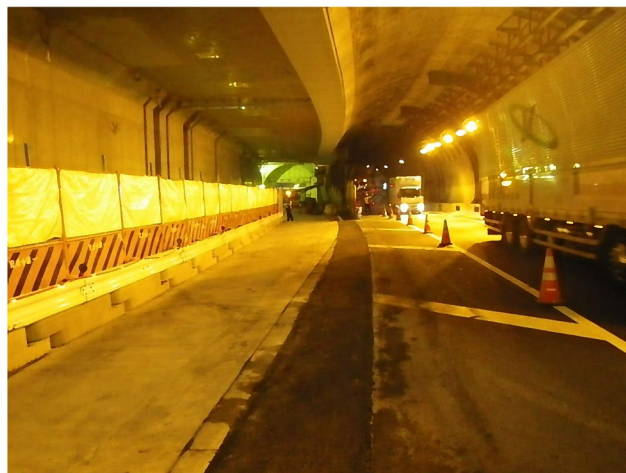


写真-7 供用中トンネル切開き「後」

5. まとめ

本工事は、新宿線拡幅部の躯体構築後にシールドトンネルの鋼製セグメントを250mにわたって切開き、上下2本の品川線トンネルと新宿線トンネルの接続部（分合流部）を構築するという前例のない工事であった。

切開き対象となった新宿線トンネルは供用状態であり、かつ、重要幹線直下での施工であったため、掘削から埋戻しまでの一連の工事進捗に伴う供用中トンネルへの影響を極力低減するとともに、供用中トンネルの挙動を正確に把握し、安全管理を行うことが非常に重要であった。施工にあたっては、綿密な工事の計画と、情報化施工を利用するなどして、安全に工事を完了することができた。

本報告が類似のプロジェクトを進める上で参考になれば幸いである。



写真-8 品川線・新宿線接続部 完成状況



写真-9 地上部完成状況

参考文献

- 1) 下西勝，石黒義晃，渡邊健治，西嶋徹：供用中の道路トンネルへの切開き工法による新線接続工事計画，トンネル工学報告集 20，pp. 273-279，2010.
- 2) 小川寛久，安井雅士，山本佳正：供用中の地下道路トンネルへの切開き工法による新線接続工事の施工状況，地下空間シンポジウム論文 報告集 VOL. 19，pp. 197-200，2014.