

# 地下道路分合流部のシールド切拡げ施工 — 開削方式と非開削方式の例 —

名倉 浩\*・宮脇卓哉\*・三木章生\*\*

首都高速道路中央環状新宿線はシールド工法を主体としており、出入口および連結路など分合流部を築造するため、併設した大断面シールドの切拡げ工事を行なっている。ここでは、2例を取り上げ、その設計、施工法の概要ならびにVE提案などについて報告する。一つは、首都高速4号線南連結路および南出入口のダブルデッキ構造の分合流部であり、延長約190mにわたりシールド直上に設けた土留め壁を利用し、上部から開削方式により切拡げる工事である。もう一つは、首都高速4号線北連結路の分合流部で、大型交差点下に位置することから、延長約100mにわたり上部にパイプルーフを設け、非開削方式により切拡げを行なう工事である。

キーワード：シールド工法，分合流部，切拡げ，開削，非開削，パイプルーフ

## 1. はじめに

現在、首都高速道路株式会社によって中央環状新宿線（以下、新宿線）、同・品川線、川崎縦貫線、横浜環状北線といった都市部地下への高速道路の建設が行なわれている。このうち新宿線は、東京都目黒区青葉台と板橋区熊野町を結ぶ延長11kmの道路であり、高速3号渋谷線、4号新宿線、5号池袋線と接続し、6ヶ所の出入口を有する（図-1参照）。また、工事に伴う周辺環境、路上交通への影響を低減するため、φ11～13mの大断面シールド工法が約7割の区間で採用され、それに伴い新たな試みを取り入れられている。

シールドトンネル区間には、避難出口・ポンプ室・ダクトおよび分合流部等の道路トンネルとして機能上必要な構造がある。これら地中構造物を築造するために、セグメント（以下、鋼殻と称す）を部分的に撤去し、地中にシールドトンネルより大きな空間を設ける切拡げ施工が必要となる。とくに出入口等の分合流部を築造す

るため、5ヶ所で切拡げ施工が行なわれ、その総延長は1.3kmに及ぶ。このような併設シールドの切拡げ施工は、地下鉄駅の建設等に用いられてきたが、新宿線のように大規模、複雑な構造、かつ、延長の長い切開き工事は過去に前例がないものである。この区間の施工方法は、トンネル側部および上部に位置する分合流部の躯体

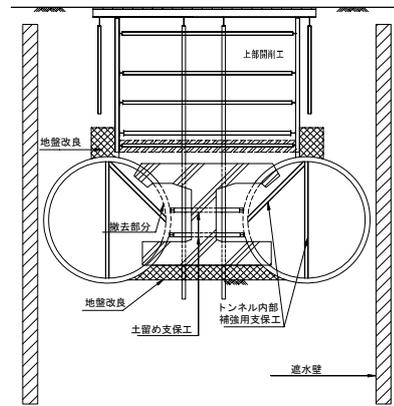


図-2 切拡げ施工概要（開削・1本柱構造）<sup>5)</sup>

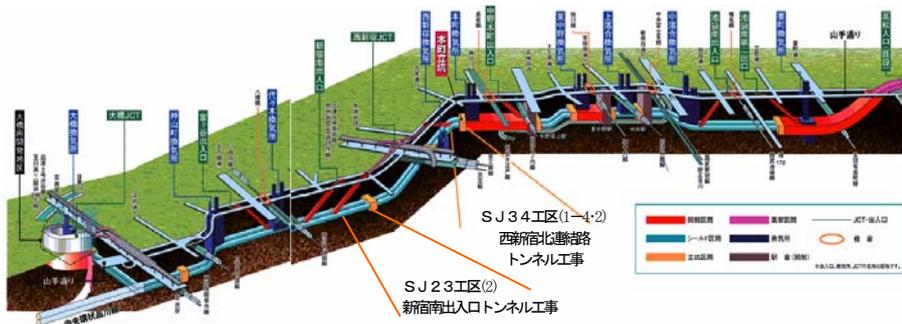


図-1 新宿線・路線図<sup>5)</sup>

\* 技術第一部 \*\* 関東土木支店



表-1 道路シールドトンネル切抜き施工の課題と対応策<sup>5)</sup>

課 題	対 応 策
<b>(1) 構造面での課題</b>	
①鋼殻に対し大きな剛性を有する一本柱構造は片持ち梁構造に近く、頂・底版と中柱の接合部に大きな曲げモーメントが作用すると同時に、地震等アンバランスな荷重に対し不安定な構造となる。	躯体構造として、中間杭・支保工が輻輳する路下での作業となるため、SRC構造等も検討したが高強度コンクリート、多段配筋によるRC構造を採用。地震時についても応答震度法等で検討し、せん断補強等に対応可能と判断。
②施工に伴い荷重系と構造モデルが変化する切抜き施工により、大きな残留応力が鋼殻等に生じる。	鋼殻、躯体、支保工等を対象に2次元フレームによる逐次解析を行ない、施工に伴う構造系、荷重系の変化を考慮して鋼殻・躯体設計を実施。ソリッド要素による躯体のモデル化と、周方向地盤バネ効果の評価により、発生断内力を合理的に算出。一方、1本柱区間では完成後の躯体剛性低下による鋼殻への負担増加を考慮 <sup>2)</sup> 。
③躯体と鋼殻の接合部は鋼構造部材とRC構造部材との異種間接合となり、一体化して断内力の伝達機能を有していなければならない。	主として鋼殻の縦リブを主桁近傍にだけ残してシェアコネクタとして利用（不足時はスタッドジベル併用）し、軸力、曲げモーメント等断内力を確実に伝達できる接合構造を採用 <sup>3),4)</sup> 。
④鋼殻とRC構造の異種間接合として適切な設計手法がなく、解析・試験により構造を確定しなければならない。	各種合成構造に関する指針等をベースに設計・解析を行ない、数々の実験で性能が確認され、設計に反映。また、鋼殻による押抜きせん断、支圧、割裂等端部への集中荷重については補強鉄筋で対応する案を採用 <sup>3),4)</sup> 。
<b>(2) 施工面での課題</b>	
①上部土留め構造において、根入れがない。根入れ部による地盤の受働抵抗に代わる土留めの安定性の確保と、掘削に伴う盤ブクレ・ボイリング等に対する掘削底盤の安定性の確保が必要となる。	設計には根入れがなくとも構造計算が可能な土留め弾塑性解析を採用。土留め下半部の掘削時には、受働抵抗を先行地中梁で確保し、先行地中梁も掘削してしまう最終掘削時には設置済みの土留め支保工と土留め壁剛性で安定性確保と変位抑制を行い、早期に土留め下端部に受働抵抗に代わる切梁支保工を設置する方法を採用。掘削底盤の安定性については、遮水壁を本線シールドトンネル外側に設け、その内側の地下水位を制御する方法を採用 <sup>1)</sup> 。
②土留め端部先端と鋼殻との隙間からの出水が懸念される。	先端部外側に地盤改良を採用し、鋼殻との隙間については、鋼材（二次土留め）と土留め壁と鋼殻の変形に追従できる特殊充填式パッカーで止水する案を採用。
③掘削に伴い、左右および上下の荷重バランスが大きく崩れることにより、鋼殻に大きな断内力が発生する。また各施工ステップで荷重・構造系が変化し、ステップごとの構造的安定性の確保が重要。	構造系および荷重系の変化を表現するため、施工ステップを考慮した鋼殻の2次元逐次解析を行ない、設計に反映。必要に応じて鋼殻の剛性や耐力のアップ、トンネル内・トンネル間支保工設置や、地盤改良・地下水位の制御等補助工法で対応。施工時には計測で安全性を確認し実施 <sup>6)</sup> 。
④掘削によりトンネル上部およびトンネル間地盤がなくなるため、土荷重、受働抵抗や周面せん断抵抗の喪失によりトンネルの回転・浮上り等が発生しやすくなり、トンネル全体の安定性確保が必要。	上記と同様、鋼殻の逐次解析の中でモデル化（荷重・弾塑性地盤バネ）し、設計に反映。安全策として地下水位の制御も採用し、計測でも確認 <sup>6)</sup> 。トンネル上部で掘削幅が大きい箇所については、頂版の逆巻き施工による剛性アップや、土留め壁を路下施工（中間土留め）して土荷重の確保といった対策も併用。
⑤土留め、鋼殻、躯体等の変形による緩み等周辺地盤への影響やトンネルの安定性、内空断面の確保が懸念される。	鋼殻の逐次解析の中で地盤バネの弾塑性を考慮し、許容変位量内に収まるように設計を実施。また、鋼殻だけでなく上部の土留め壁・切梁支保工も含め全体系を対象としたFEM地盤解析も併用し、土留め間の掘削も含めたトンネル間・トンネル周囲の地盤の安全性評価や地表面等への影響検討を実施。なお、路面覆工支持杭については、鋼殻の変形を受ける土留め壁と兼用せずに単独で設置。

## 2.2 切抜き施工の課題と対応策

シールドトンネルの切抜き施工は、地下鉄駅舎等の実績があるものの、大断面・併設シールドトンネル間の切抜き、1本柱構造など特殊な形状、鋼殻と躯体の接合構造、根入れのない上部土留め構造、切抜きに伴うトンネル安定性の確保、施工ステップを考慮した設計法など図-6に示すような多くの課題があった。設計・施工方式

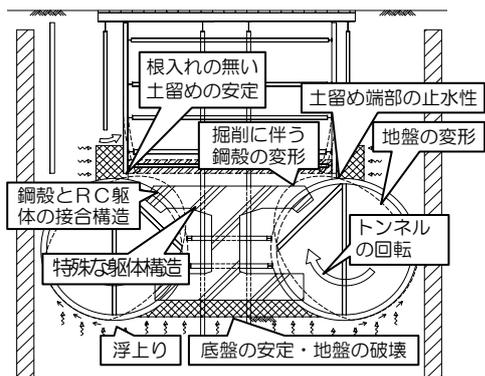


図-6 切抜き工の課題<sup>5)</sup>

であることから、発注者と他工区を含めたシールドおよび切抜き施工者が協力しながら検討を進め、表-1に示すように対応策を具体化していった。

## 3. 開削方式による切抜き例<sup>5)</sup>

### 3.1 工事概要

本工区は、首都高速4号線連絡路（南連絡路）および南新宿出入口の分合流部としてφ12.83m×2本の大断面シールドを対象に、SMWによる開削方式で切抜きを行なう工事である（表-2参照）。

表-2 開削方式による切抜き施工例

工事名称：S J 2 3 工区(2)新宿南出入口トンネル工事 施工者：間・東鉄・大木JV 施工場所：渋谷区元代々木町，初台二丁目，代々木五丁目 契約工期：平成14年3月～平成19年3月 延長：190m 掘削寸法：幅約17～21m，床付け深度約24～27m
--

本工区の切掘げ施工の特徴は、次のとおりである。

- ①上部の出入口トンネルと切掘げ施工の対象となる連結路トンネルのダブルデッキ構造となっている（図-7参照）。
- ②延長が長く、躯体構造が2本柱、1本柱、ボックス構造と連続的かつ縦断的に変化する（図-7参照）。
- ③地下埋設物等により左右の土留め位置や鋼殻の剛性が左右対称でない断面が数多く存在する。さらに同時に施工する電力洞道の推進工事により開削幅が広い区間があることから、逆巻き施工、鉛直荷重を確保する二次土留め、地下水制御などによるトンネル安定対策を併用している（図-8参照）。

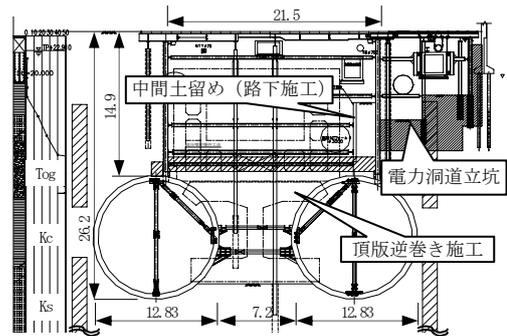


図-8 掘削幅が広い断面 (NO.121) <sup>5)</sup>

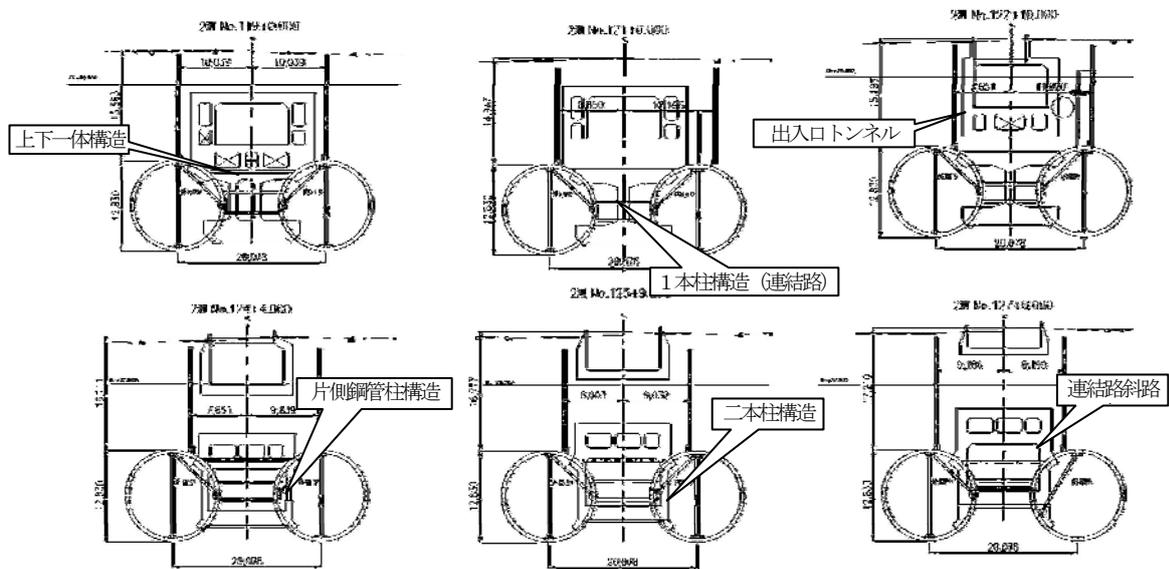


図-7 S J 2 3工区・断面変化 <sup>5)</sup>

なお、当初は掘削底面の安定に必要なSMWの根入れをシールド下部まで伸ばし（φ850×壁長50m弱）、背面側に坑内からの止水注入で地下水対策としていたが（図-9参照）、シールド通過等の工程の制約条件を考慮し、シールド下部のSMW施工・背面注入に代え、薬液注入工法による外側遮水壁の施工を実施した。また、トンネ

ル間底盤部（固結砂層：Ks層）に先行地中梁があったが、対象地盤の物性値を調査し粘着力等を再評価し地盤改良を省略した。

### 3.2 事前検討

設計にあたっては、上部土留め弾塑性解析、耐震検討、接合部変形解析、浸透流解析なども行なったが、ここでは代表的な鋼殻逐次解析とFEMによる掘削影響検討について紹介する。

#### (1) 鋼殻逐次解析

190m区間の中で躯体や鋼殻構造の違い、上部土留め位置（鉛直荷重の作用範囲）、施工法（順巻き／逆巻き）、地下水水位制御などの荷重・構造系から検討断面を抽出（ここでは6断面）し、鋼殻設置～完成後剛性低下まで、構造・荷重変化により18ステップで逐次解析を行なっている。解析例を図-10に示す。ここで得られた断面力、鋼殻の安全性照査、躯体との接合部の設計、トンネル間・トンネル内部支保工設計などへ反映している。

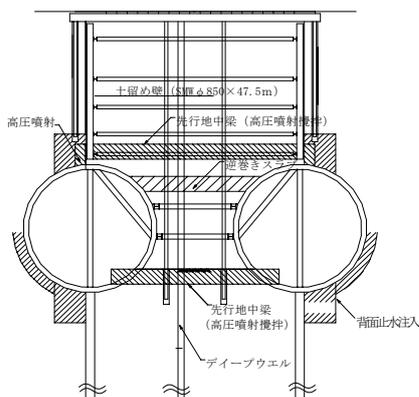


図-9 当初の施工方法案 <sup>5)</sup>

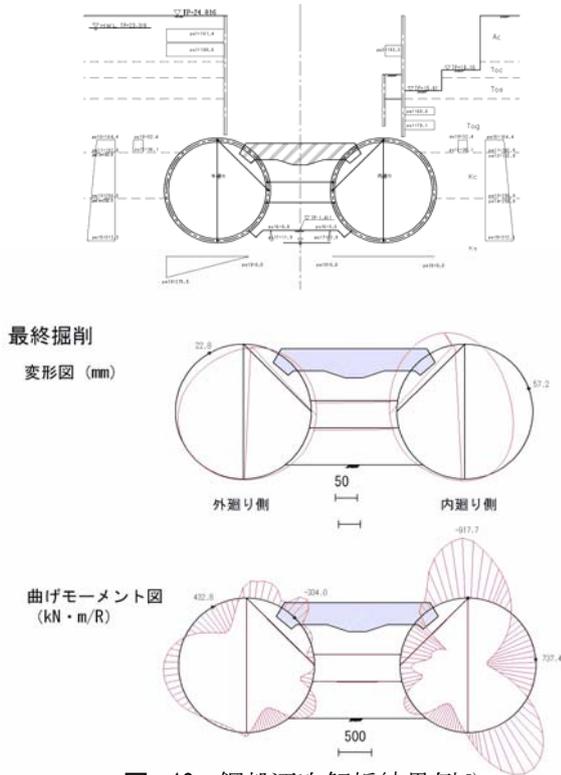


図-10 鋼殻逐次解析結果例<sup>5)</sup>

### (2) 掘削影響検討

左右非対称な土留め構造・荷重状態・鋼殻変形による土留め構造の安全性照査, 別々に検討されている上部土留め構造と下部トンネル構造の相互影響の評価, および周辺地盤の挙動把握を行なう目的で, シールド掘進からトンネル間掘削・躯体築造・埋戻しまでを2次元弾性FEMで掘削解析を行なっている(図-11参照)。

その結果から, 左右非対称における影響は比較的小さいこと, トンネル間支保工の撤去時に背面の地盤を介して上部土留め支保工に荷重が作用することなどが確認でき, 設計に反映している。

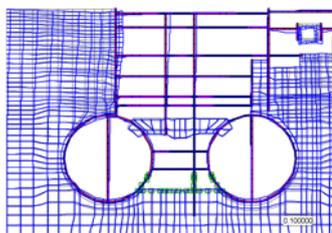


図-11 FEMによる掘削解析結果例<sup>5)</sup>

## 3.3 施工状況

2006年9月末時点では, 掘削が完了し構築を順次行なっている。

### (1) 計測工<sup>6)</sup>

施工にあたっては多数の計測を行い, 安全性の確認と

同時に設計の妥当性を確認している。土留め, 支保工および鋼殻の変形・応力だけでなく, トンネルの浮上り・回転等の安定確保の上で必要な挙動についてもトータルステーション等による自動観測を行なっている(図-12参照)。また, 複数の工区に関係することから, 情報を共有化するため, インターネットを介して発注者および各JV事務所で監視できるようになっている。

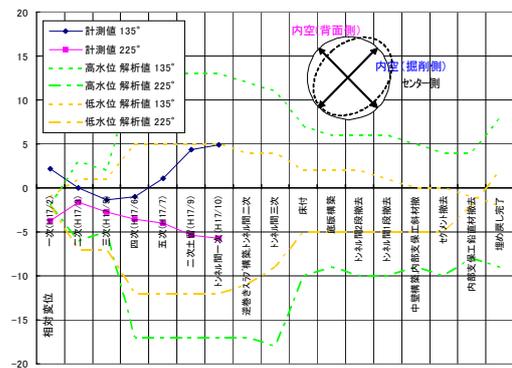


図-12 計測結果の例(内空変位)<sup>5)</sup>

### (2) 接合部配筋

接合部には, 鋼殻主桁・シェアーコネクタおよびスタッドジベルから軸力, 曲げモーメント, せん断力が集中荷重として作用するため, 断面力を確実に躯体に伝達でき, かつ, 躯体端部が破壊しないよう多数の鉄筋を補強しており, 試験施工により施工性を検証した上で非常に密な配筋となっている(図-13参照)。

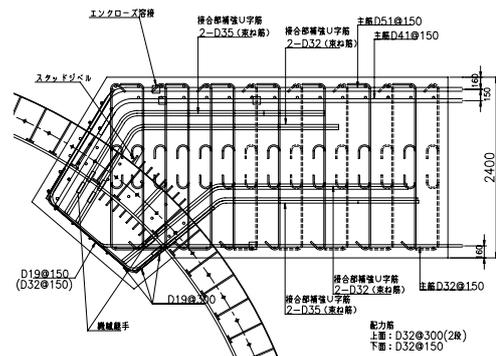


図-13 鋼殻・躯体接合部配筋<sup>5)</sup>

## 4. 非開削方式による切上げ<sup>5)</sup>

### 4.1 工事概要

本工事は, 首都高速4号線連絡路との分合流部として約100mにわたり2本の断面シールドトンネル(鋼殻外径φ11.36m)を切上げて新設する工事である。工事区域が交通量の多い交差点に位置し, 地中には約275kVの電力管路をはじめ, 老朽化した大型下水道など多数の

重要埋設物が存在することから、路上を占有せず、隣接したシールドのUターン立坑から施工できるパイプルーフ工法を利用した非開削方式を採用している。

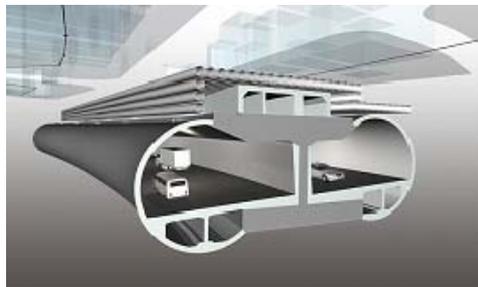


図-14 S J 3 4 工区完成予想図<sup>5)</sup>

表-3 非開削工法による切掘げ施工例の概要

工事名称：SJ34 工区(1-4・2) 西新宿北連絡路トンネル工事  
 施工場所：東京都渋谷区本町(清水橋交差点・方南通り)  
 契約工期：平成14年10月～平成19年2月  
 延長：約100m  
 代表工種：パイプルーフ(φ812.8×32本、回収型泥水推進工法)、遮水壁(t1.5m×D45m 薬液注入)、先行切梁(φ355.6×34本)

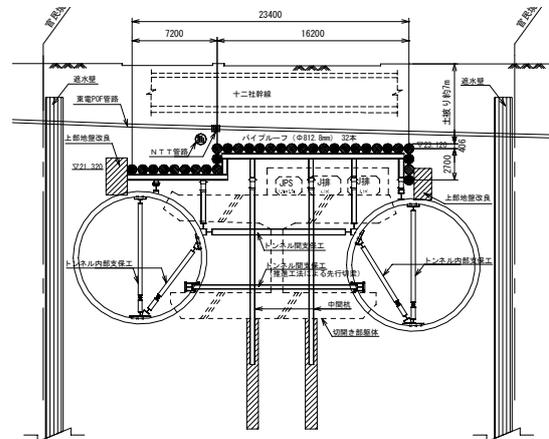


図-15 S J 3 4 工区・横断面<sup>5)</sup>

表-4 VE提案比較表<sup>5)</sup>

		当初設計	VE提案
概要図		<p>当初計画</p> <p>凍結工</p> <p>凍結工</p>	<p>変更計画 (VE提案)</p> <p>地盤改良</p> <p>先行切梁</p> <p>遮水壁</p> <p>▽GL-約50m</p>
主要工種	パイプルーフ端部止水	凍結工	高圧噴射攪拌工による地盤改良
	下部止水対策	凍結工(弧状、厚さ3.8m)	遮水壁+地下水位低下工法
	トンネル間安定対策工	同上	先行切梁工(小口径推進)
	パイプルーフ下部掘削	先行導坑×2本+左右切開き	全断面掘削方式
	パイプルーフ用支保工	@1.5m	@3.0m+プレロード併用
	トンネル間支保工	中間杭径：φ700mm	中間杭径：φ800mm(TBH)
	トンネル内部支保工	切梁2段@1.5m	切梁2段@3m(下部切梁は先行切梁)
長所	鉛直材×2本(鉛直荷重のみに対応)	中央鉛直材+斜材(水平・鉛直荷重対応)	
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・周辺の地下水環境への影響が小さく、地下水位低下も不要。</li> <li>・地上からの施工がないため、交通への支障がなく、埋設物・道路使用などの協議が少なく済む</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プレロード実施によりパイプルーフによる沈下が低減でき、全断面掘削方式とすることで工期が短縮できる。</li> <li>・先行切梁・地下水位低下等によりほぼ同レベルの変形となり、掘削段階での発生断面力が小さい。</li> <li>・遮水壁と地下水位低下工法により浮上りに対応。</li> <li>・支保工ピッチが3mと広く、施工性向上。</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・凍土圧が鋼殻へ及ぼす影響、凍上・解凍沈下が不確実。</li> <li>・土被りが浅く、浮上りが懸念される。</li> <li>・出水時の対応が困難。</li> <li>・パイプルーフによる沈下が大い</li> <li>・導坑掘削では工期かかる。</li> <li>・支保工等の仮設材ピッチが1.5mと狭く、施工性が悪い。</li> <li>・コストが高く、凍結工、導坑掘削、順巻き施工、切梁2段掘削と工程が長くなってしまふ。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・先行切梁施工にあたっては、鋼殻割付・工程・作業スペース等の調整が必要。</li> <li>・周辺の地下水環境への影響が懸念される。</li> <li>・上部地盤改良、遮水壁工は路上施工となり、道路使用および埋設物協議が必要。</li> </ul>	
工期	(標準案)	8ヶ月程度短縮	
経済性	(標準案)	若干の低減可能	
評価	凍結工に伴う凍上・解凍沈下、浮上り・出水等リスクが多くコスト・工期の面で課題が多い。	施工性・リスク、コスト・工程面から考えて有利。	

## 4.2 VE提案および課題と対策

### (1) VE提案と施工法変更

表-4 に示すように当初設計から沈下・変形等を抑制しつつ、安全性の向上、コストの低減と工期の短縮を目指したVE提案により、例えばトンネル安定用のアーチ状の下部凍結工法を取りやめ遮水壁+小口径推進による先行切梁方式への変更や、パイプルーフ用支保工にプレロードを導入し支保工ピッチを1.5⇒3.0mに拡幅し、さらに、パイプルーフ下部の掘削を導坑掘削方式から全断面掘削方式へ変更など施工法全体にかかわる提案を行ない、協議の結果、採用された。

### (2) 特徴と施工手順

VE提案を踏まえ、本工事の特徴を次に示す。

- ①長距離かつ地下水以下で施工可能であり、回収可能なφ800mmの泥水推進工法によるパイプルーフ施工
- ②パイプルーフを支える支保工へのプレロードの導入と支保工間隔の拡大(1.5m⇒3.0m)、全断面掘削方式の採用
- ③パイプルーフ用支保工からの鉛直荷重とトンネル間支保工からの水平荷重を考慮したトンネル内部支保工配置
- ④小口径推進工法による先行切梁の採用
- ⑤底盤安定、浮上り対策としての遮水壁と地下水位低下工法の採用

施工ステップを図-16に示す。

### (3) 課題と対応策

開削方式による切開き施工の課題については前述したが(表-2)、非開削方式の課題はそれに加えて、地表面等沈下の抑制、地下水対策などがある。また、本工事特有の課題として、パイプルーフ用支保工軸力による鋼殻の変形や浅い土被りによるトンネルの安定確保などがあり、表-5、図-17に対処策を含めて示す。

## 4.3 非開削切開き方式の設計

軸方向パイプルーフによる非開削方式の設計にあたって、主に以下の項目について設計を行った(表-6参照)。この中から特徴となる①, ②, ⑤, ⑥について紹介する。

### (1) 軸方向パイプルーフの設計

パイプルーフ構造の仕様を決定するため、土留めの弾塑性解析を適用した。モデルとしては、パイプルーフを土留め壁、土被り等による鉛直荷重を側圧、中間杭および柱等鉛直方向の支保工を切梁といったようにみなして逐次解析を行った(図-18参照)。

切羽より前方のパイプに作用する地盤反力に対して、緩み範囲を考慮し支持地盤の一軸圧縮強度を最大値とした弾塑性バネとみなした。発生断面力および支点反力

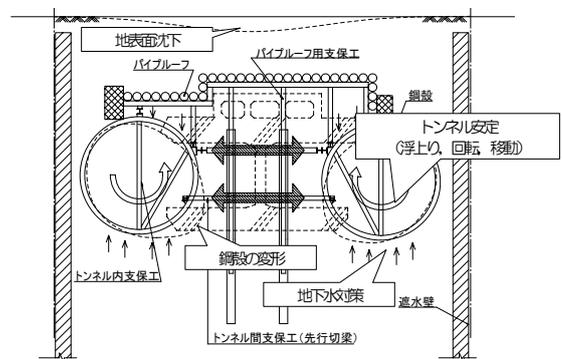


図-17 非開削切開き方式の課題<sup>5)</sup>

を用いてパイプルーフ用の鋼管ならびに支保工等の仮設材を検討し、さらに変位を予測した。パイプルーフの変位は地表面の沈下に直接影響を及ぼすため、支保工に油圧ジャッキによるプレロードを導入し、沈下量を20mm以内に抑制することとした。プレロードは支点反力の80%とし、最大で2.4MN/本となった。

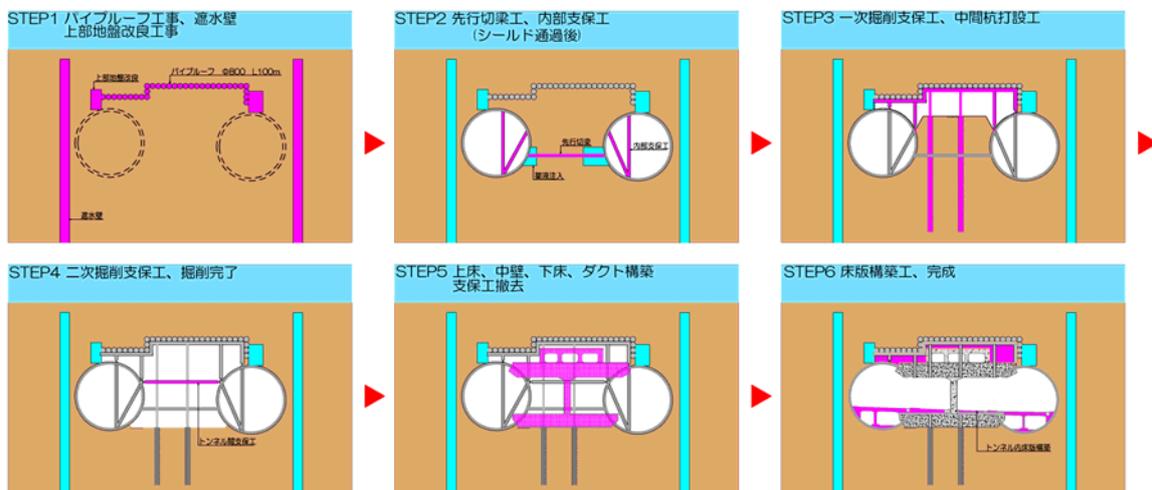


図-16 非開削切開き施工手順<sup>5)</sup>

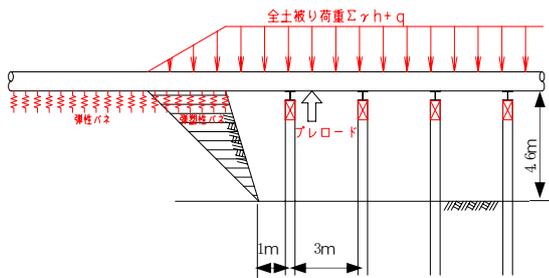


図-18 パイプルーフ解析モデル

(2) 鋼殻の逐次解析

トンネル間の離隔、躯体構造の変化、パイプルーフ用支保工の平面位置等構造的な違いから代表的な3断面を抽出した。また、荷重としては地下水位低下工法の有無等複数のケースを行なった。ここで、またパイプルーフおよび支保工については、剛性を考慮せず、鉛直集中

荷重で評価している（図-19 参照）。その結果、鋼殻外径φ11.36m×幅1.5m×桁高450mmの3本主桁（フランジ付き）が採用された。

前述したように掘削に伴うトンネル安定対策として、鋼管による先行切梁（φ355.6mm鋼管@3.0m、t=14、16mm L=約10~15m）を採用した。また、パイプルーフ用支保工、トンネル間支保工が3mピッチ、トンネル内支保工が1.5mピッチ、鋼殻主桁が0.75mピッチであり、取付け位置がずれていることから、それぞれ腹起し（もしくは枕桁）を設け、荷重の支持および分散を図った。

なお、鋼殻の設計はシールドJVが行い、切抜げJVはトンネル間およびトンネル内支保工の設計と鋼殻の施工法変更などによる安全性を照査する逐次解析を行なった。

表-5 非開削施工の課題と対応策<sup>5)</sup>

課題	対応策
① 地表面の沈下 i) パイプルーフの変形 ii) 支持力不足 iii) 切羽崩壊（切羽高さ4.6m。洪積粘性土・砂質土）	軸方向パイプルーフ下部掘削にあたり下記の対策を行なう。 i) 掘削に伴うパイプルーフの変形を抑制するため、剛性の高い鋼管（φ812.8mm、t=12mm）の使用、大きな切羽勾配（1:0.3）による無支保区間の低減、プレロードによる累積沈下の防止で対応する。 ii) パイプルーフ用支保工の支持力を確保するため、基礎となる鋼殻の剛性と内部支保工の適切な配置、長く太い中間杭（φ800×L=18m）で支持力を確保している。 iii) 掘削に伴う切羽安定について、パイプルーフの支持力を考慮した円弧すべり等で検討し、弱点となる介在する砂層を薬液注入により補強している（湧水に対しては地下水位低下で対応）。
② 地下水環境への影響	本線トンネル外側に不透水層にまで根入れした遮水壁を設け、その内側で地下水位低下工法を採用している（上部についてはパイプルーフジャンクション、ルーフ側部と鋼殻間については高圧噴射攪拌工法で対応）。
③ 鋼殻の変形 i) 土被り荷重が集中荷重としてパイプルーフ支保工から伝達される。 iii) 鋼殻下端まで掘削するため底盤部分に地山が残らず、側圧に対する地山の水平方向の地盤反力が喪失する。	i) トンネル内部支保工の配置を集中荷重作用点に取付けた鉛直材と斜材（鉛直・水平荷重対応）で下部にスムーズに伝達する（腹起し付き）。また、鋼殻の広い範囲で土被りによる分布荷重が喪失し大きな断面力が発生するため、大きな剛性の鋼殻が採用された（φ11,360×桁高450×幅1,500mm・3本主桁。中主桁最大板厚118mm・フランジ付き） ii) トンネル間水平反力確保対策として、トンネル間に小口径推進工法で施工する鋼管を先行切梁として採用する。なお、頂版の逆巻き施工も検討したが、鋼殻に発生する残留応力が大きく、採用を見送った。
④ トンネル安定（浮上り、回転、移動） i) 上部の土荷重が少ないため、揚圧力により浮上りが生じやすい。 ii) 水平方向については③-ii) 参照 iii) 掘削で解放される範囲が広いので回転しやすい。	i) ②で述べたように切抜げ施工中は底盤部に作用する揚圧力を低下させている。また、周辺の地下水位、底盤部への作用水圧については間隙水圧計を設け常時監視している。 ii) 略（③・ii 参照） iii) パイプルーフ用支保工の支持力で回転を抑制。

表-6 非開削方式・設計項目の一覧<sup>5)</sup>

設計項目	解析	概要
① 上部パイプルーフ・支保工	土留め弾塑性解析の応用	解析に土留めの弾塑性解析を適用した。発生断面力をもとにパイプルーフの仕様を決定し、また、その支点反力を用いて、パイプルーフ受桁、中間杭等の仮設材を検討した。また、切羽上部に作用する地盤反力を考慮して円弧すべりを実施し、切羽の安定性を評価した。
② 鋼殻、内部・トンネル間支保工	2次元逐次フレーム解析	表-2(1)②と同じ解析。パイプルーフ上載荷重は、パイプルーフ用支保工を伝達した鉛直荷重として評価した。
③ 切開き躯体	2次元フレーム解析 耐震照査	2次元のフレーム解析を用いて躯体の設計を行った。設計は常時、レベル1地震時、およびレベル2地震時の3種類行った。なお、SRC構造についても検討したが、中間杭などによる欠損、接合構造、坑内でのハンドリング等を考慮してRC構造を選択した。
④ 躯体と鋼殻接合部	2次元逐次・単独フレーム解析	表-2(1)③、④と同じ対応。
⑤ 周辺地盤の挙動	2次元FEM	地下埋設構造物を含めて2次元FEM解析を実施し、影響検討を行った。
⑥ 全体系の挙動	3次元フレーム解析	パイプルーフおよびその支保工、鋼殻とトンネル内部支保工、トンネル間支保工と複数の構造系から全体構造が構成され、かつ、掘削は上部から水平方向に行なわれるため、施工ステップも考慮した全体系の挙動予測、①と②の設計の妥当性の評価、バランスのとれたプレロード量の推定に利用した。

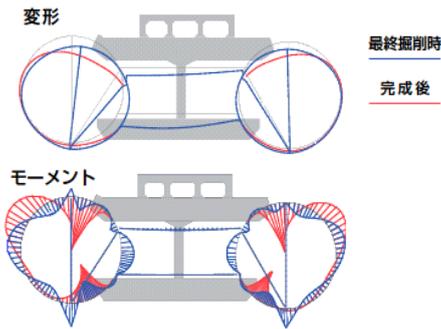


図-19 鋼殻・躯体の逐次解析<sup>5)</sup>

### (3) 周辺地盤への影響検討

周辺地盤および重要埋設物への影響検討を行なう目的で、パイプルーフ施工時・シールド掘進～トンネル間掘削・躯体築造・埋戻しまでを2次元線形FEMで地盤掘削解析を行なった。とくに、パイプルーフ下部の掘削については、前述した土留め弾塑性解析によるパイプルーフの変形とFEMの変位が適合するように掘削解放率を調整した。地表面の変位は、パイプルーフ下部の掘削時の変位が支配的であり、最終沈下量としては最大26mm程度を想定した(図-20参照)。



図-20 FEMによる非開削掘削解析<sup>5)</sup>

### (4) 仮設構造全体の挙動把握

本工事の仮設構造は、パイプルーフならびに各支保工腹起しは縦断方向の構造物であり、鋼殻と内部支保工、トンネル間支保工およびパイプルーフの受桁・鉛直支保工ならびに中間杭は横断方向の構造物であるというように、荷重伝達・支持機構として、縦断と横断の両方向の剛性を組み合わせた構造物である。また、掘削は縦断方向に行ない、掘削に伴い各部材に作用する荷重が縦断、横断の両方向に変化していく構造特性も有している。そこで、本解析は次の目的で実施することとし、解析を実施した(図-21参照)。

- ・縦横両方向に発生している断面力・変形の確認と部材の見直し。
- ・局部的に応力集中が生じやすい鋼殻と支保工接続部の安全性の照査。
- ・横断、縦断方向に変位のバランスがとれたプレロード量の推定

3次元解析の結果、全体系の構造安全性は確認されたが、一部、パイプルーフの変位が大きい箇所があり、鉛直支保工配置の見直しを行なった。今後、支保工、鋼殻の撤去時についても検討していく予定である。

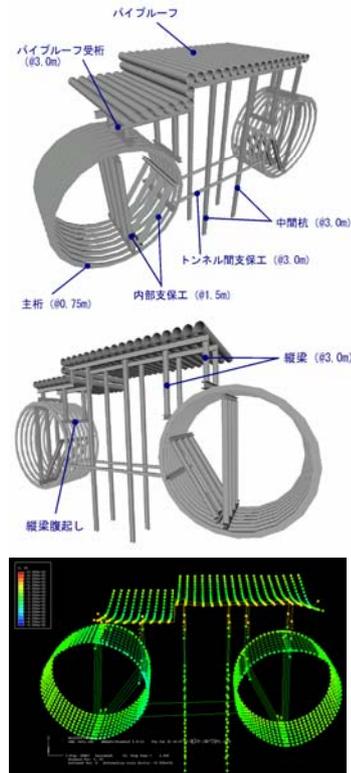


図-21 仮設構造3次元骨組解析例<sup>5)</sup>

## 4.4 施工状況

2006年5月に掘削が完了し、9月末現在では、図-16に示す施工手順図のステップ5にあたり、RC躯体の構築を行っている。特徴的な工事状況を紹介する。

### (1) パイプルーフ工

シールド掘進に先立って、切抜け区間に隣接した立坑から、延長100m×32本のパイプルーフ工事を、立坑掘削と並行して行なった。パイプルーフ(外径φ812.8mm・ジャンクション付き)施工には、パイプ内から推進機が回収でき、切羽安定性に優れた回収型泥水推進工法を採用した(写真-1参照)。地下埋設物に最小離隔620mmで近接し、φ300mmの玉石を含んだ砂礫地盤、100mの長距離施工であることから、切羽安定と精度管理を重視して行った。この結果、地表面の沈下もなく、左右上下で50mm以内の精度で施工できた。

### (2) シールド掘進と内部支保工の設置工

併設シールドがUターンおよび通過したのち、トンネル内部支保工の設置を、シールド掘進と並行しながら行なった(写真-2)。



写真-1 パイプルーフ施工状況<sup>5)</sup>

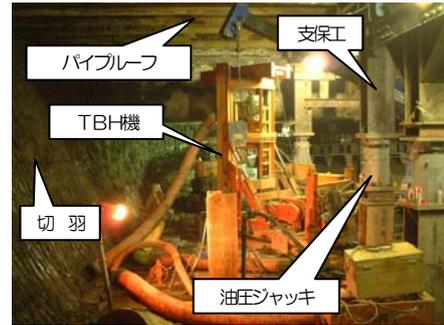


写真-3 パイプルーフ下部掘削状況<sup>5)</sup>



写真-2 内部支保工設置状況<sup>5)</sup>

### (3) 先行切梁工

シールド通過後、34本のトンネル間先行切梁の設置を小口径推進工法により施工した。まず、推進の発進および到達部に鋼殻から防護注入を行ない、泥水式推進機により片方の鋼殻主桁間から発進し、もう一方の鋼殻主桁間に到達させ、推進機の回収を行った。さらに、施工環境が掘進中のトンネル内ということで、特殊なステージを用いて、枕木の下で行なった(図-22参照)。

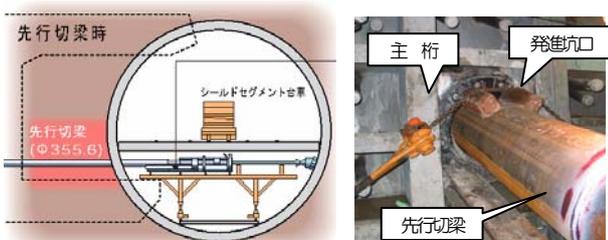


図-22 先行切梁の施工方法および施工状況<sup>5)</sup>

### (4) 一次掘削・支保工設置

掘削に先立ち、パイプルーフの沈下を抑制し、切羽の安定を保つため、挟在砂層(Tos)に対してトンネル坑内から薬液注入を行なった。その後、パイプルーフ下部の掘削、TBHによるφ800中間杭打設(写真-3)、パイプルーフ用の支保工の設置、さらに油圧ジャッキによるプレロードをサイクル的に行なった。

### (5) 計測工<sup>7)</sup>

施工実績がなかったことから、計測を実施し、管理値との比較などにより安全性を確認すると同時に、パイプルーフの沈下量とプレロード量など、挙動予測と計測

結果との相違を把握し、次の施工ステップへフィードバックすることとした(図-23)。主な計測項目としては、パイプルーフの沈下、各支保工軸力、セグメントの変位・変形・応力状態、間隙水圧および周辺の地下水位である。

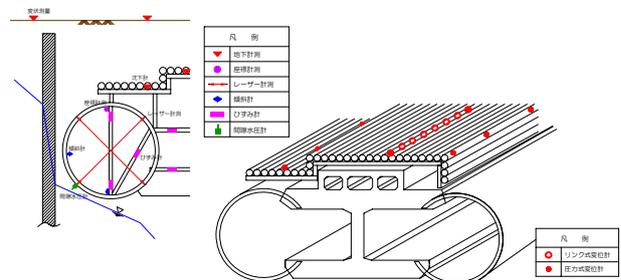


図-23 計測項目の一覧<sup>7)</sup>

代表的な計測結果を以下に示す。計測値が事前解析の予測値と比べ小さいことから、安全に施工が進められていることを確認している。また、今後さらに地盤や荷重等を適切に評価することによって、より合理的な設計が可能であると考えられる。なお、鋼殻および内部支保工の撤去による影響についても事前解析と計測を行う予定にしている。

#### a) パイプルーフの沈下

パイプルーフの沈下計測の結果と解析結果を図-24に示す。パイプルーフの変状は計測、解析ともに同じ沈下のモードを示すが、計測結果の方がより小さい曲率の変形となった。理由としては、①パイプルーフに中詰めしたエアーモルタルによる剛性の向上、②想定より大きな切羽法肩部の地盤反力等が考えられる。

#### b) シールドトンネルの変位、変形

掘削完了時におけるシールドトンネルの絶対変位を図-25に示す(工区中央付近)。変位の大きさおよび変形モードは、事前解析と計測結果で比較的大きな乖離が見られた。この原因としては次のように考える。

①トンネルの回転が少なく、かつ、回転方向も逆である理由としては、シールドトンネル周囲に働く地盤のせん断抵抗が大きく回転を抑制したことと、地盤反力や地

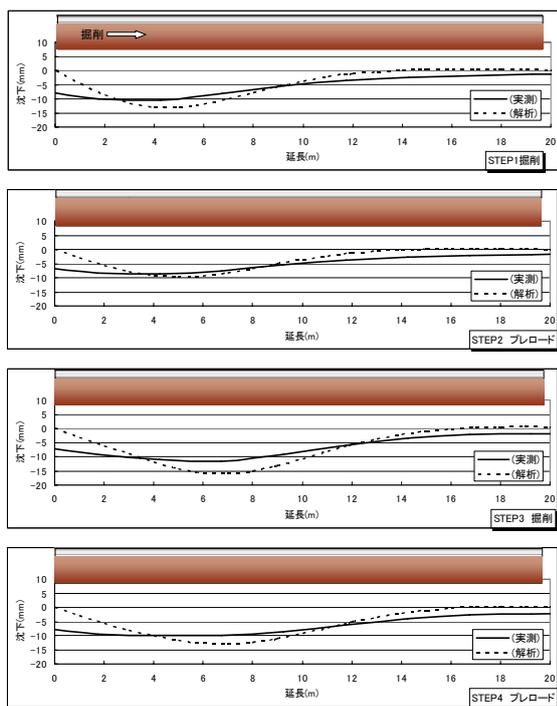


図-24 パイプルーフ沈下の計測結果<sup>7)</sup>

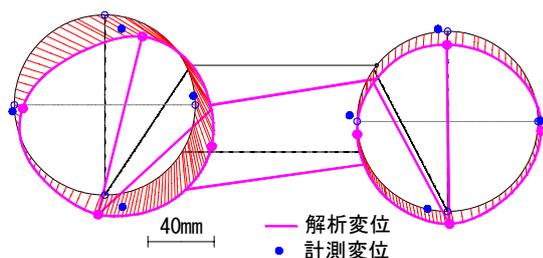


図-25 鋼殻の変形の計測結果 (最終掘削時)<sup>7)</sup>

下水圧など想定した回転と反対方向の力が予想より大きく作用したことによるものと考えられる。

②トンネル全体の沈下量が小さい理由としては、土荷重や上載荷重など鉛直荷重が想定より小さいことのほか、①と同様にトンネル下側から上向きに作用する地盤反力や地下水圧や、トンネル側部に作用するせん断抵抗力などが想定より大きいことと考える。

## 5. おわりに

ここで紹介した二つの工事は現在も施工中であり、完成まで安全な施工に努めていく所存である。また、前例のない難易度の高い工事であり、発注者とハザマを含めた切掘げとシールド施工者が協力して、多くの方々からアイデアやご意見をいただき、解析や実験などを行ないながら数年間かけて設計と施工方法を具体化してきたものである。また、着工後もさまざまなリスクを想定し、対策を講じながら慎重に施工を進めてきている。

これらの工事の中から得られた知見をもとに、より安全で合理的な分合流部など切掘げ施工の体系化やその改善に取組み、大深度における非開削方式等、今後の道路シールドトンネルの分合流部施工に活用していきたいと考える。最後に、本報告をまとめるにあたり、ご協力いただいた関係者の皆様に誌面を借りて心から感謝を申し上げるものである。

## 参考文献

- 1) 大場・小島, シールドトンネル開削切開き工法の概要について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, VI-137, 2003
- 2) 大場・小島他, シールドトンネル開削切開き部における鋼殻の設計法について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, VI-138, 2003
- 3) 土橋・川田他, 鋼製セグメントとRC躯体の接合部応力伝達に関する一考察, 土木学会構造工学論文集, Vol. 51A, 2005
- 4) 渡辺・川田他, 鋼製セグメントとRC躯体接合部の実証試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, CS2-036, 2005
- 5) 土橋・名倉・宮脇・三木, 道路分合流における大断面・併設シールドの切開き施工, 日本プロジェクトリサーチ第 50 回「シールドトンネル工法施工技術」講習会, pp48~67, 2006
- 6) 土橋・名倉ほか, 都市トンネル工事の計測一大断面・道路シールドトンネルの技術的課題と計測例一, トンネルと地下, 430 号, pp57~66, 2006
- 7) 土橋・宮脇・名倉ほか, 非開削工法による道路シールドトンネル掘削部の設計施工, トンネル工学報告集, 第 15 巻, pp477~484, 2006

## Space Enlargement Methods of Shield Tunnels for Constructing Branch Connections - Examples of the Open Cut Method and the Non-Open Cut Method -

Hiroshi NAGURA, Takuya MIYAWAKI and Akio MIKI

The greater part of The Central Circular Shinjuku Route of Tokyo Metropolitan Expressway is constructed by the shield tunneling. The branch connections and ramps are constructed by space enlargement methods for parallel large shield tunnels. In this paper, we report outlines of design and construction methods and a VE proposal on two sites. One is the construction of south branch connections for 4 line way and ramps which have the double deck structure. Extending over 190m long, using of the earth retaining wall installed on the shield tunnels, the branch connection and ramp are constructed by the open-cut method. Another is the north branch connections for 4 line way. The branch connection under a large road intersection is constructed by the non-open-cut method with the pipe roofing method totally over 100m long.