

非開削工法による道路シールドトンネル 拡幅部の設計施工

Design and construction of enlarging tunnel sections of
large dimensional road shield tunnels by the non-open-cut method

土橋浩¹・白鳥明²・深山大介³・名倉浩⁴・宮脇卓哉⁵

Hiroshi Dobashi, Akira Shiratori, Daisuke Miyama, Hiroshi Nagura, Takuya Miyawaki

¹正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 設計第一グループ (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-6-2)

²正会員 首都高速道路(株) 建設管理部 技術管理室 構造技術グループ (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)

³正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 設計第一グループ (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-6-2)

d.miyama2013@shutoko.jp

⁴正会員 ハザマ 土木事業本部 技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

⁵正会員 ハザマ 土木事業本部 技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

The use of the enlarging method for large dimensional shield tunnel construction is essential in the building of branch connections and ramps, particularly when constructing underground roads in narrow urban areas. In this paper, the non-open-cut method, which excavates underground, used in The Central Circular Shinjuku Route of Tokyo Metropolitan Expressway is reported.

This paper describes the construction of the cut and open of a part of steel segments installed in two-parallel large dimensional shield tunnels over a total length of 100 m using the non-open-cut method, which used various detailed methods; 100m pipe roofing, preceding struts, preloading for pipe roof.

Key Words : enlarging shield tunnel, non-open-cut method, pipe roof

1. はじめに

(1) 路線計画と整備目的

現在、首都高速道路株式会社は、中央環状新宿線（以下、新宿線）の建設を進めている。新宿線は、東京都心部から半径約8kmに位置する環状道路であり、その延長は11kmで、大部分の区間がトンネル構造である。また、新宿線は、首都高速3号渋谷線、4号新宿線、5号池袋線と接続し、また、6ヶ所

の出入口が設けられている（図-1参照）。新宿線の建設にあたっては、工事に伴う周辺環境や路上交通への影響を低減するため、トンネル区間の約7割にφ11～13mの大断面シールド工法を採用し、それに伴い新たな施工法を開発している。

(2) 分岐合流部における切開き工事

新宿線では、シールドトンネル区間に出入口等を構築するため、セグメントを部分的に撤去し、RC

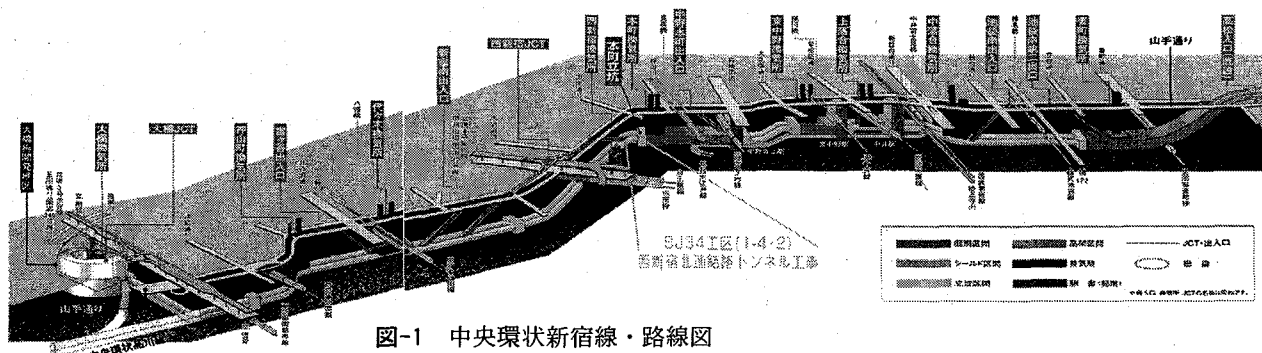


図-1 中央環状新宿線・路線図

躯体を接合するシールド切開き工法を開発した。特に出入口等の分合流部を築造するために、5ヶ所で最大500mの長い区間で併設する大口径シールドトンネルの間を掘削する切開き工法（図-2参照）を採用しており、その総延長は1.3kmにおよぶ。従来、このような切開き工事は地下鉄道の駅の建設などに用いられていたが、このように大規模、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。

この切開き工法には、シールドトンネル間および上部に位置する分合流部躯体を地上から開削工法により構築する工法と、隣接する立坑から上部の地山を支保しながら併設されたシールドトンネル間の地山を掘削して躯体を構築する非開削工法がある。

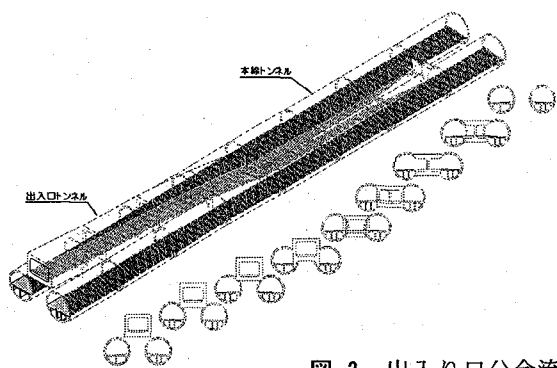


図-2 出入口分合流部・縦断方向の構造変化

(3) 切り開き施工方法の選定

新宿線では、地上から掘削する開削方式を標準的な方法としているが、開削方式では地上交通への影響が依然として残ること、また、地下埋設物の移設が困難または時間を要する場合には、非開削方式を適用した（表-1）。

非開削工法の適用にあたっては、トンネル上部にパイプルーフを設置し、隣接する立坑から地中掘削を行なう山岳方式を採用した。

表-1 切開き方式の例

開削方式の例	非開削方式の例
中央環状新宿線で適用している基本的な施工法。土留めを設け、地上から掘削・切開きを行なう。さらに路面覆工を設置し、路面を開放しながら工事を行う。	トンネル上部にルーフを設け、立坑から横方向に地中掘削を行ない、切開きを行なう方法。地上を占有することなく施工ができ、交通量の多い交差点、重要埋設物等がある場合に適用。

開削方式の設計・施工については、すでに報告しているため^{1), 2)}、ここでは、トンネル軸方向のパイプルーフ方式による非開削方式による切開き工事について報告する。

2. 非開削切開き工事の概要

(1) 計画条件

西新宿JCT北側で施工している非開削切開き工事（以下、非開削切開き）の計画条件を以下に示す（図-3）。

- ・交通量の多い大型交差点直下
- ・大型の下水道幹線など多数の埋設物と、慎重な取扱いが必要な特殊高压電線の埋設管路が存在
- ・約7mの比較的小さい土被り
- ・礫層、砂層、粘土層という複雑な地層構成と高い地下水位
- ・切開き対象の左右のトンネルの離隔が大きく、上部に換気用のダクトを設けた特殊な断面形状

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）
 工期：平成14年10月～平成19年2月
 延長：約100m
 トンネル外径：φ11.36m
 代表工種：パイプルーフ（φ812.8×32本）
 （仮設）遮水壁（t=1.5m×D=45m 薬液注入）
 先行切梁（φ355.6×34本）

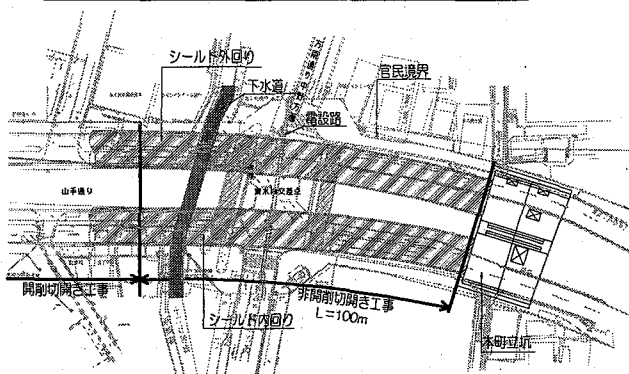
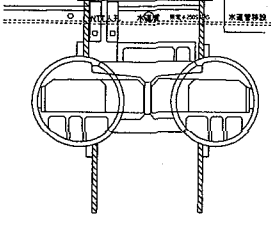
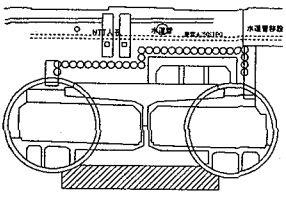
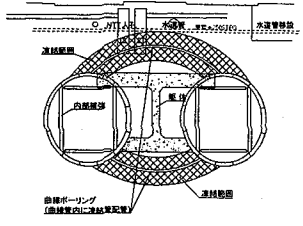


図-3 計画条件

(2) 工法の選定

切開き工法として開削方式と非開削方式とを比較し、交差点前後の延長100m区間については非開削方式を採用した。その理由は、大型交差点直下に位置し、開削方式では防護が難しい特殊高压電線の埋設管路があることによる。また、土被りが浅いこと、埋設物との離隔が小さいこと、断面形状が複雑であることから、非開削方式の中からパイプルーフ工法による施工法を選択した（表-2）。

表-2 施工法比較表

A案：開削方式	非開削方式	
	B案：パイプルーフ工法	C案：曲線ボーリング+凍結工法
		
埋設物の移設および防護が困難。大型交差点で作業時間が制約を受けるため、経済性、工期ともに不利。	埋設物をかわして直線状にルーフを配置することが可能である。また、埋設物や路上交通に対しても影響が少ない。経済性、工期に対しても最も有利。	土被りが浅くアーチ形状をしたルーフは、地中埋設物に支障する。また、凍結工法による凍上・融解による地表面への影響が大きい。経済性、工期でB案より不利。
△	○	×

(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すでに文献^{1), 2)}で述べたが、非開削方式ではその課題に加えて、土被りによる鉛直荷重を支持し、沈下を抑制しながら、地中にて切開きを行うため、いくつかの特徴的な課題がある。図-4、表-3にその課題と対応策を示す。

(4) 工事の特徴と施工手順

課題への対応を含め本工事の特徴を以下に示す。また、図-5に施工手順を示す。

- ①長距離かつ地下水以下でのパイプルーフ施工に対応し、パイプ内から回収可能なφ800mm泥水推進機をパイプルーフ施工に適用
- ②沈下対策として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)
- ③トンネル間掘削、および、パイプルーフの支保工からの鉛直集中荷重に対応したトンネル内部支保

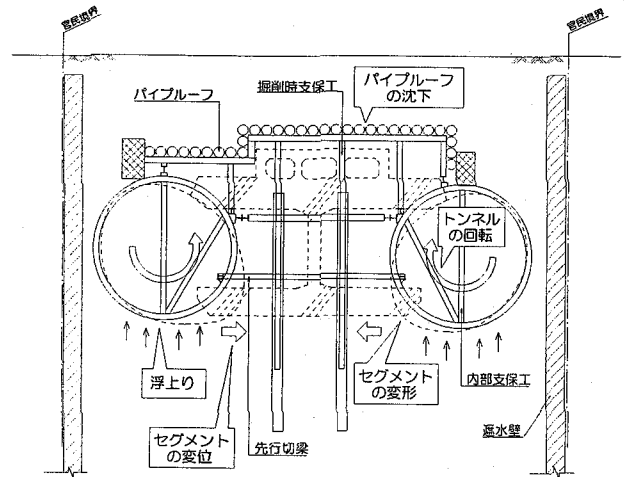


図-4 非開削施工の課題

工の配置

- ④トンネル間掘削時におけるトンネルと土留め支保工の安定とセグメントの変形を抑制するため、トンネル内から小口径推進機にて設置する先行切梁を採用
- ⑤底盤の安定と施工時の浮き上がり防止対策とした遮水壁と地下水位低下工法の適用

表-3 課題と対応策

課 題	対 応 策
①地表面の沈下抑制と合理的なパイプルーフおよびパイプルーフ支保工の設計・施工。とくに支保工ピッチが狭い(通常0.15m)ことと、高耐力が必要な躯体施工の妨げとなる。	パイプルーフの剛性を利用し、パイプルーフ支保工のピッチを3m間隔とする。同時に掘削にともない累積していく沈下をプレロードの採用により低減する。これにより全断面掘削が可能になり、支保工数量の低減、工期短縮効果が期待できる。なお、切羽安定のためには、補助工法の検討が必要となる。
②掘削・切掘げに伴うトンネルの変状の抑制。とくにトンネル上部掘削により鉛直荷重がなくなるため、荷重バランスから大きな曲げモーメントが発生する。また、底盤部のかかりが小さく、側圧に対する受働抵抗が期待できない。	鉛直荷重が分布荷重から、パイプルーフ支保工から伝達される集中荷重になる。そのため、トンネル内部支保工の配置を荷重作用点に取り付けたトンネル中央の鉛直材と斜材(鉛直・水平荷重対応)で下部にスムーズに伝達する。また、掘削に伴うトンネル間受働抵抗の喪失対策として、トンネル間に小口径推進機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、鋼製セグメントの残留応力が大きくなるため採用を見送っている。
③浮き上がり対策。上部の土砂荷重が少ないため、揚圧力が作用すると浮上りが生じる。	DWによる地下水位低下工法により底部に作用する地下水位を低下させる。また、地下水位低下による周辺への影響低減のため、下部不透水層まで根入れした遮水壁をトンネル外側に設ける。また、周辺の地下水位、底部への作用水圧については計測で常時監視し、緊急時には、DWの稼働のほか、坑内に緊急水抜き弁を設ける。

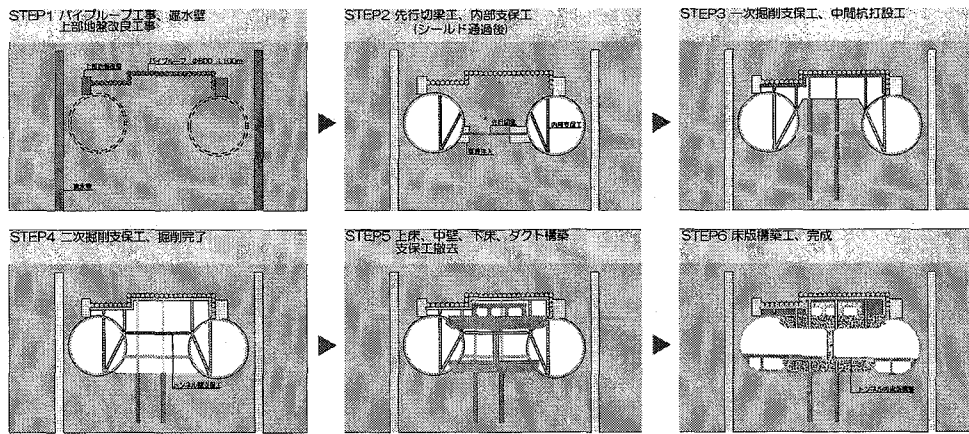


図-5 施工手順

3. 設計の概要

非開削工法の設計にあたって、主に以下の項目について解析を用いて検証した。このうち、特徴的な①、②、⑤、⑥について以下に述べる。

表-4 設計一覧

	項目	解析
①	パイプルーフ、支保工	土留め弾塑性解析の応用
②	セグメント、内部支保工 トンネル間支保工	2次元逐次FEM解析
③	切開き躯体の設計	2次元フレーム解析
④	R C躯体と鋼殻接合部	2次元逐次FEM解析 2次元フレーム解析
⑤	周辺地盤、埋設物の影響	2次元FEM解析
⑥	全体系の挙動	3次元フレーム解析

(1) 土留め弾塑性解析によるパイプルーフの設計

パイプルーフの構造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、土盛りなどによる鉛直荷重を側圧、中間杭等の支保工を切梁として掘削に伴う逐次解析を行った。地山中の鋼管に作用する地盤反力については、切羽の緩み範囲を考慮し、受働土圧を上限とした弾塑性バネとみなした。解析で得られた土留壁の断面力および切梁反力を用いてパイプルーフの鋼管ならびに支保工などを検討し、さらに、パイプルーフの変位を予測した。こ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、パイプルーフの沈下量を19mmに抑制した。プレロ

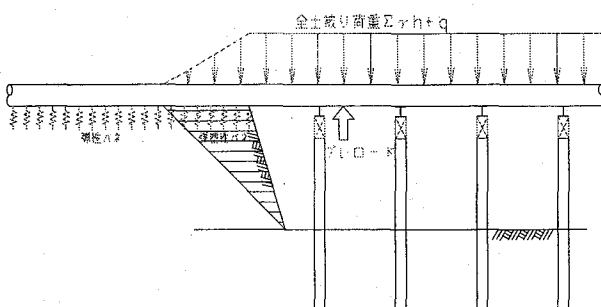


図-6 パイプルーフ解析モデル

ードは支保工反力の80%とし、最大で2.4MN/本とした。

(2) 2次元逐次FEM解析による切開き構造の設計

施工に伴う構造・作用荷重の変化が大きく、その挙動予測が重要であることから、セグメント、内部支保工、トンネル間支保工、躯体接合部を対象として、シールド施工～トンネル掘削・セグメント切開き～躯体築造～完成後の躯体の剛性低下までを、躯体については平面ひずみ要素を含んだ2次元FEMによりトンネル構造に関する逐次解析を行った(図-7参照)。解析手法の詳細については、文献⁹⁾に示している。

トンネル間の離隔、躯体構造の変化、パイプルーフ支保工の平面位置など構造的な違いから代表的な3断面(両端、中央)を抽出した。また、荷重としては地下水位低下工法の有無など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その支保工については考慮せず、パイプルーフおよびその鉛直土圧を支保工からの集中荷重で評価した。

この解析によって得られた断面力、変形の結果にもとづいて安全で経済的な施工手順の決定、セグメントの応力と変形の照査、躯体との接合部の設計用断面力抽出して、トンネル間・トンネル内支保工の選定、さらに解析結果をセグメントなどの計測管理へ反映した。

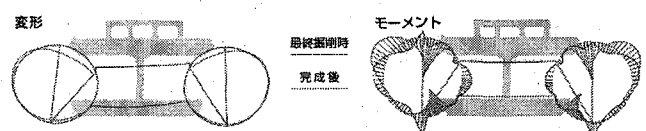


図-7 逐次解析の結果の例

(3) 周辺地盤、埋設物への影響検討

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、(1)で示した土留め弾塑性解析による変形とFEMの変位がパイプルーフ位置で適合するようにパイプルーフ下の掘削ステップにおける掘削解放率を調整した(支保工設置前17%)。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、切開き施工による最終沈下量としては最大26mm程度を想定した。

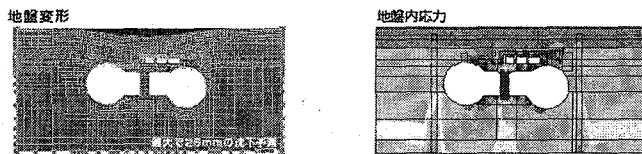


図-8 FEM解析

(4) 構造物全体を対象とした3次元フレーム解析

切開き施工時における本工事の構造系は、立坑の土留め壁と土留め支保工の構造と同様に、パイプルーフならびに各支保工の腹起しからなる縦断方向の構造物と、セグメントとその内部支保工、トンネル間支保工およびパイプルーフの受桁と鉛直支保工ならびに中間杭からなる横断方向の構造物である。そして、荷重伝達・支持機構としては、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、掘削は縦断方向に向かって行ない、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的な特性も有している。そこで、以下の目的のため、本解析を実施した。

- ・前述①、②の2次元逐次解析結果をもとにして設計した縦断、横断両方向の仮設構造物・セグメントに発生している断面力・変形の確認と部材などの照査

- ・局部的に応力集中が生じやすいセグメントと溶接などの支保工接続部の安全性照査。

- ・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

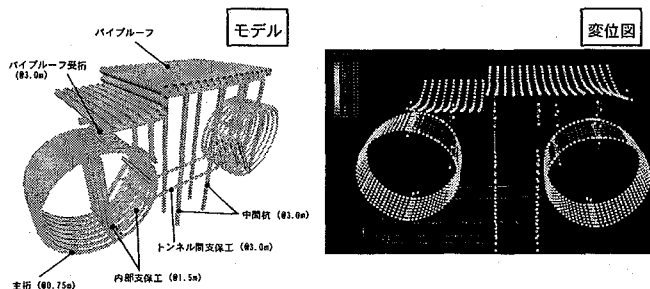


図-9 仮設構造の3次元フレーム解析例

この解析の結果、全体構造の安全性を確認したが、端部にてパイプルーフの変位が大きい箇所が

あり、鉛直支保工の配置やプレロード量の見直しを行なった。

4. 施工の概要

2006年9月現在で、図-6に示す施工手順図のステップ5にいたっている。以下に現在に至るまでの特徴的な工事を紹介する。

(1) パイプルーフおよび遮水壁設置工事 (Step1)

シールド掘進に先立って、切開き区間に隣接したシールドUターン立坑から、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。前述したよう



写真-1 パイプルーフ施工状況

にパイプルーフ (外径φ812.8mm・ジャンクション付き) は、パイプルーフ内から推進機が回収でき、切羽安定性と方向制御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、地表面の沈下なく、左右上下ともに50mm以内の精度で施工することができた。

また、シールド通過前に、トンネル外側に厚さ1.5m×深さ50mの遮水壁を薬液注入工法で造成した。遮水壁の先端部はトンネル下方の不透水層に根入れした。

(2) セグメント設置・内部支保工設置 (Step2-1)

シールド掘進には、外径φ11.56mの泥水式シールドを使用し、延長約760mの区間をUターン施工して併設シールドトンネルを施工した。切開き区間では、セグメント外径φ11.36m×幅1.5m×桁高450mmの3本主桁の鋼製セグメントを設置した。シールドが通過したのち、シールド掘進と平行しながらトンネル内部支保工を設置工した。

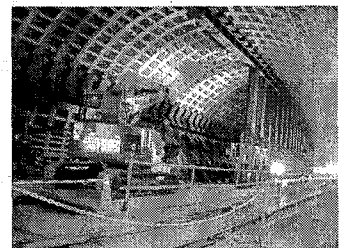


写真-2 内部支保工設置状況

(3) 先行切梁工事(Step2-2)

2. (3)で述べたように2本のシールド通過後、トンネル間掘削の安定と変形抑制を目的として、34本の先行切梁(φ355.6mm 鋼管, t=14,16mm L=約10~15m)を、小口径推進工法を利用

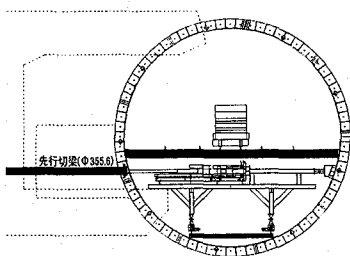
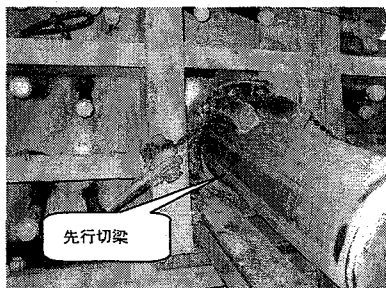


図-10 先行切梁の施工状況

して行なった。まず、小口径推進の発進および到達部にセグメントから防護注入を行ない、泥水式推進機により片方のセグメント主桁間から発進し、もう一本のトンネルのセグメント主桁間に到達させ、推進機の回収を行った。地山は約150kPaの比較的高い水圧があり、礫径約300mmの礫層と均等な粒径をした細砂層の互層構造であった。また、シールドトンネルは曲線部に位置し、鋼製セグメントの主桁間の寸法が500mmと狭かった。そのため、施工にあたっては、切羽水圧の制御および掘進精度の管理(許容誤差50mm以内)には細心の注



先行切梁

意を要した。写真-3 先行切梁の推進施工状況さらに、施工環境が掘進中のシールド坑内ということで、特殊なステージを用いて、枕木の下で行なった。結果としては、出水および精度とも問題なく完了することができた。

(4) 一次掘削・支保工工事, 中間杭打設(STEP-3)

掘削にあたっては、パイプルーフの沈下を抑制するため、切羽法面の勾配を1:0.3と急勾配にし、先掘り長さを短くする必要があった。そのため、切羽の安定を確保するため、挟在する砂層

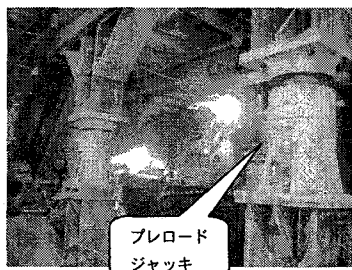


写真-4 一次掘削状況

(5) 二次掘削・支保工工事, 掘削完了(STEP-4)

二次掘削～床付けにいたる掘削期間において、

シールドトンネルが最も変状が生じることが予想された。そのため、100mの工区を5ブロックに分け、各ブロックの床付け完了し次第、順次均しコンクリートおよび底版構築に移行し、変状を抑制させる施工計画とした。結果として、次章で述べるように変位は大幅に低減された。

(6) 躯体構築(STEP-5)

躯体のコンクリートの設計強度は30~40N/mm²、床版厚は2.1~2.4mとなっており、温度ひび割れが懸念された。

そのため、3次元FEM解析によりひび割れ検討を行い、ひび割れ幅が0.05×C(かぶり厚)mmを超過する部材に対しては、補強鉄筋を追加する等のマスコン対策を行なった。

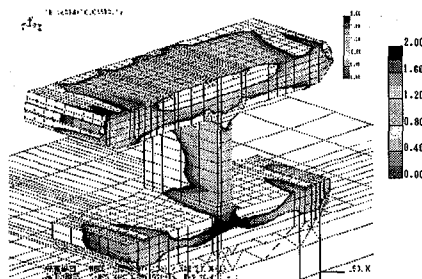


図-11 温度応力解析(ひび割れ指数)

5. 計測

(1) 計測計画

非開削方式により大口径シールドトンネル間を開削施工の実績がなかったことから、さまざまな事前解析によりその挙動予測を行なった。しかしながら、解析段階では多くの仮定条件を設けたため、実際の挙動を正確に予測することは困難であると考えた。そのため、計測管理を実施し、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

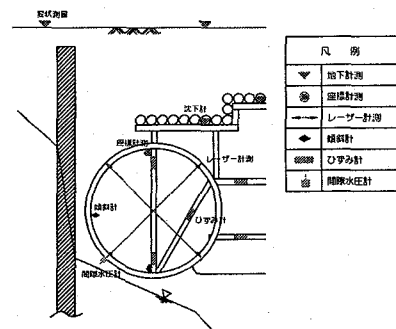


図-12 計測一覧

など、挙動予測と計測結果との相違を把

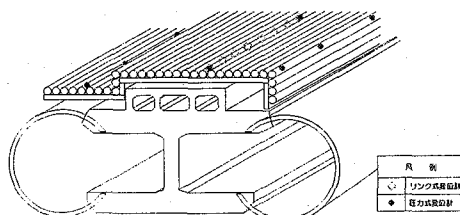


図-13 パイプルーフの沈下計測

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-12)。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。

(2) 計測結果

代表的な計測結果を以下に示す。

1) パイプルーフの計測

工区中程の点からのパイプルーフの沈下計測結果と解析結果を図-14に示す。

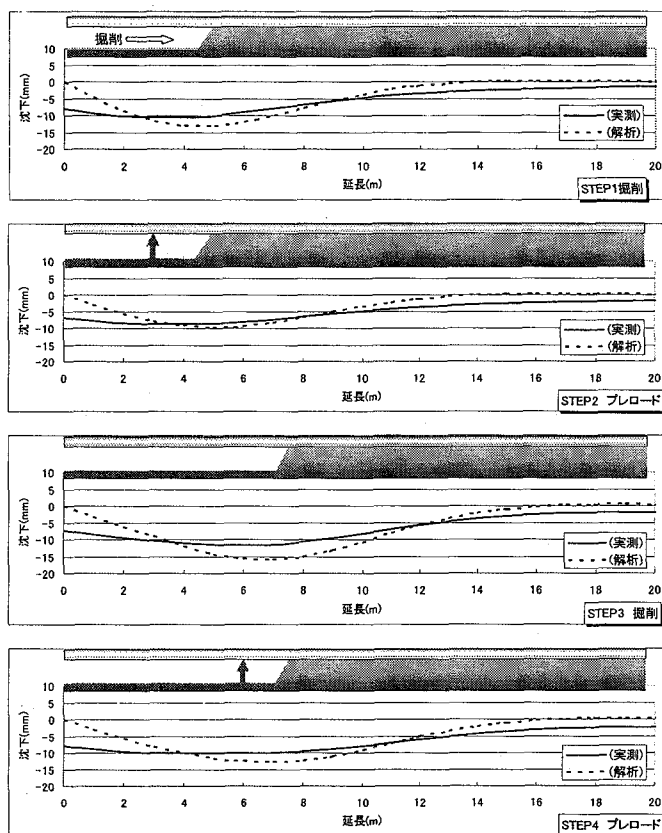


図-14 パイプルーフの沈下計測の結果

パイプルーフの変状は計測、解析ともに同じ沈下の傾向を示すが、計測結果の方がより曲率の小さい変形となった。この理由としては、①パイプルーフにエアーモルタルを中詰しているため、剛性が向上した。②切羽法肩の地盤反力が想定より大きいため、パイプルーフの曲率を増加させない、等が考えられる。

2) 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-15に示す。(工区中央付近)

シールドトンネルの変位は解析と計測結果で大きな乖離が見られた。この理由は以下の点が考えられる。

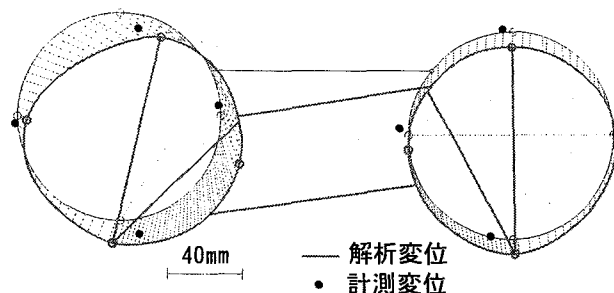


図-15 最終掘削時の解析と計測の比較

- ① 左トンネルの回転が少ない点に関しては、シールドトンネル周囲に働くせん断抵抗力、および、トンネル下側に働く地盤の剛性が大きく、トンネルの回転を抑制させた。
- ② 沈下量が小さい点に関しては、上載荷重や土被り厚による鉛直土荷重および側圧(土圧)が想定より小さく、また、トンネル下側に働く地盤反力、および、トンネル背面に働くせん断抵抗力が大きいことにより、トンネルが鉛直下方向に変動するのを抑制した。

以上の点については、今後、逆解析などにより検討していきたい。

今回の逐次解析によるシールドトンネルの変状予測と計測結果より、施工が安全に進められていることが確認できた。また、今後地盤反力など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。

6. おわりに

現在、躯体構築が進行している段階である。

この工事は、前例のないきわめて難易度の高い非開削切開き工事である。大都市部における高速道路の建設では、環境条件などの制約により、地下化、とくにシールド工法を代表とする非開削工法が主流になりつつある。その流れの中で、分合流部に代表される切開き部についても、ここに報告した非開削工事の適用が増えていくものと考ええる。今回、施工の中で得られた知見をもとに、より安全で合理的な設計・施工を目指して、非開削切開き施工法の改善に取り組んでいく所存である。

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) Dobashi, Kawada, et al, A Rational Design of Steel

Segmental Lining in Large Dimensional Shield
Tunnels for Rapid Post-Excavation Method,
Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel
Congress, 22-27 May 2004, Singapore

- 2) Dobashi, Kawada, et al. Overcoming Difficulties in
the Construction of Turnoffs for Underground
Expressways, Proceedings of the 15th International
Road Federation World Meeting 2005, 14-18 June
2005, BITEC, Bangkok, Thailand
- 3) 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,
2003
- 4) 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, 2003
- 5) Dobashi, Shiratori, et al, Design and construction of
enlarging shield tunnel sections of large
dimensional shield tunnels for the non-open-cut
method, Proceedings of the 30th ITA-AITES
World Tunnel Congress, 22-27 April 2006, Seoul
- 6) 土橋・川田他, 鋼製セグメントと R C 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, 2005
- 7) 渡辺・川田他, 鋼製セグメントと R C 躯体接合
部の実証試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会,
2005