

シールドトンネル切開き技術による 西新宿ジャンクション北連結路の設計と施工

Design and Construction of North Ramp Tunnel at Nishi-Shinjuku Junction Using the
Shield Tunnel Expansion Methods (STEMs)

山田明宏¹・宮本崇広²・波津久毅彦³・蔵治賢太郎³・蒲和也⁴
Akihiro Yamada, Takahiro Miyamoto, Takehiko Hatsuku, Kentarou Kuraji
and Kazuya Kaba

¹東亜建設工業株式会社東京支店土木部（〒102-8451 東京都千代田区四番町5）

²東亜建設工業株式会社土木事業本部設計部（〒102-8451 東京都千代田区四番町5）

E-mail:t_miyamoto@toa-const.co.jp

³正会員 首都高速道路株式会社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）

⁴正会員 首都高速道路株式会社東京建設局新宿工事グループ（〒160-0023 東京都4-15-3）

Shield Tunnel Expansion Methods (STEMs), which is developed for a RC ramp tunnel between parallel shield tunnels, are widely employed to the exits/entrances and junctions of the Central Circular Shinjuku Route of the Tokyo Metropolitan Expressway, to minimize earthworks and adverse effect on existing infrastructures/lifelines.

This paper describes the design and construction of the North Ramp of the Nishi-Shinjuku Junction of the Shinjuku Route, using STEM open cut method.

In this report, waterproof methods between temporary works and shield tunnel, stability of whole structure under construction and construction of a section with double walls/columns are highlighted.

Key Words : Shield Tunnel Expansion Methods(STEMs), open cut methods, road tunnels

1. はじめに

首都高速中央環状線西新宿ジャンクションは、中央環状線山手トンネルと4号新宿線を接続している。ジャンクションのランプトンネルは、単独部では片側1車線のRCボックスカルバート構造であるが、併設する本線シールドトンネルと深度が近づくにつれ、断面が多様に変化する。そのため、トンネル縦断方向に非常に複雑な構造となっている（図-1、表-1）。

分合流部付近、約25m区間の2本柱構造は、合流側側壁を鋼管柱構造（φ600mm、@2.4m）とし、合流車両が本線を見通せる構造である。2本柱構造と、分合流部の1本柱構造については開削切開き工法¹⁾が採用されている。

開削切開き工法は、シールドトンネル上方およびシールド間を掘削し、セグメント主桁と剛結させたRC躯体を構築したのち、セグメントの切断、撤去を行う工法である。

ここで、2本柱構造区間は、撤去されるセグメントがランプトンネル側壁に位置するため、先行してセグメントを撤去する必要があった。そのため、図-2に示すとおり、下床版構築後に中床版を構築し、側壁支保工により中床版を支保しながらセグメントを撤去し、その後、鋼管柱の建込みと側壁の構築を行う施工ステップを採用した。

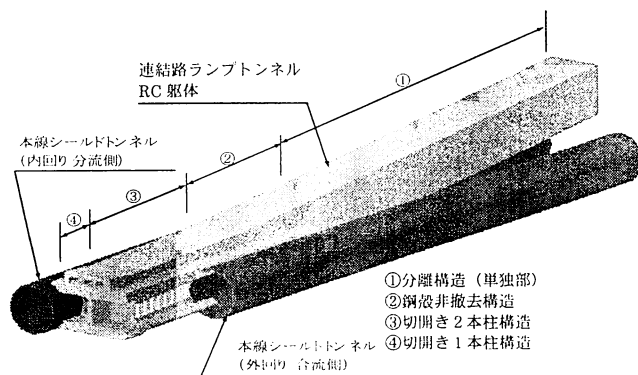
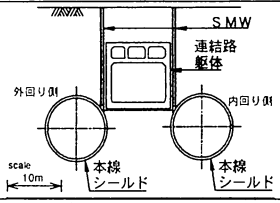
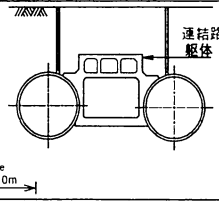
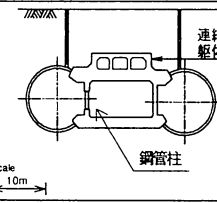
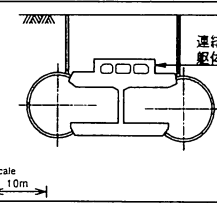


図-1 分合流部概要図

表-1 構造一覧表

分類	①連結路独立区間 [分離構造]	②連結路・本線併走区間 [鋼殻非撤去構造]	③分合流部見通し区間 [切開き 2 本柱構造]	④連結路・本線分合流区間 [切開き 1 本柱構造]
概要 図				
特徴	・連結路躯体とシールドが分離している構造	・連結路躯体とシールドが鋼殻に設置したスタッドにより接合している構造 ・鋼殻は撤去せず連結路躯体が接している	・連結路躯体とシールドが一体化している構造 ・切開き構造により一体化されている ・躯体の壁のうち片側は 2.4m 間隔で配置された鋼管柱構造	・連結路躯体とシールドが一体化している構造 ・切開き構造により一体化されている ・中央部に壁構造

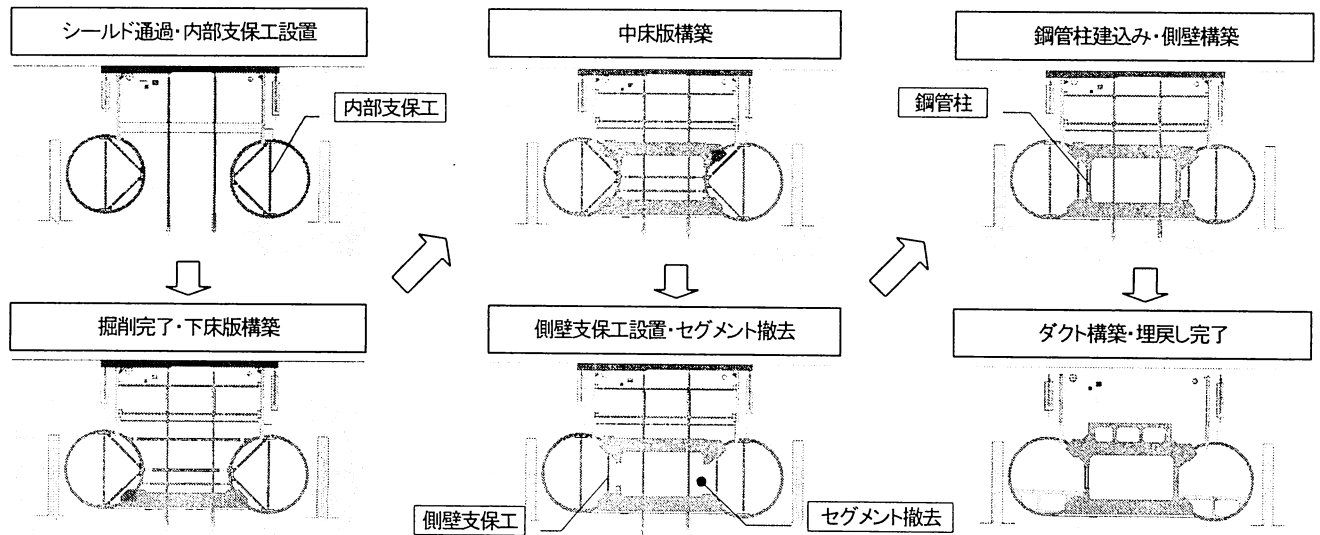


図-2 2本柱構造施工ステップ

2. 切開き 2 本柱区間の施工における問題点

切開き 2 本柱区間の施工上の主な問題点は以下のとおりである¹⁾ (図-3)。

(1) 土留め壁とトンネル不連続部の止水

シールドトンネルと土留め壁は不連続な構造となっている。そのため、図-3 に示すように施工時の土留め壁の変形(破線)とシールドトンネルの変形(一点鎖線)により不連続部から出水するおそれがある。

(2) 掘削時のトンネル全体の安定

最終掘削時には、掘削側のシールドセグメントの大部分が露出し、背面側からの土水圧、浮力により、シールドが図-3 の一点鎖線に示すように変形、回転し、安定性を損なうおそれがある。

また、セグメントには各施工ステップにおいて残留応力の発生が予想される。

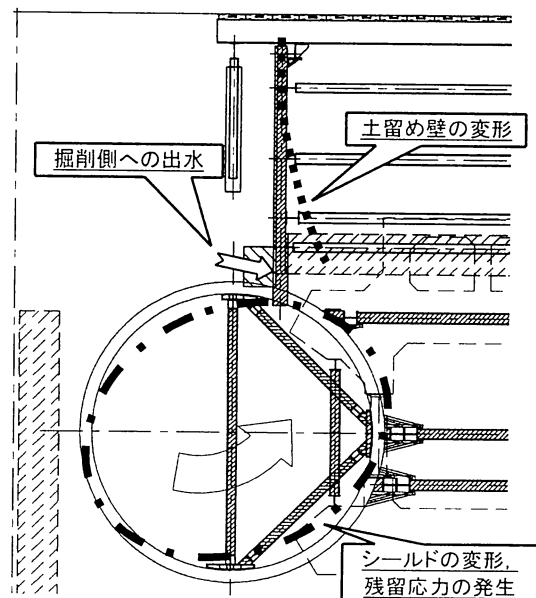


図-3 問題点概要図

3. 実施した対策工について

前述の問題点に対して実施した対策工は以下のとおりである（図-4）。

（1）トンネル不連続部からの止水構造

a) 先行地中梁

シールドトンネル間の掘削に伴い、土留め壁の根入れがゼロとなるため、土留め壁間の下端付近に、高圧噴射攪拌工法（Superjet）により先行地中梁を施工し、直上掘削時における受働抵抗の増強を図り、土留め壁の変形を抑止した。

「ジェットグラウト工法 技術資料 日本ジェットグラウト協会」に準拠し、先行地中梁の改良厚さは1.5mとした。また、平面配置は土留め壁芯材下端の間の荷重を確実に伝達し、かつ経済性に配慮した切梁腹起し形状とした。改良率は50%とし、改良体は横断方向完全ラップ配置とした（図-5）。

b) 背面側地盤改良

土留め壁芯材下端から鋼殻までの区間（500mm）は応力材が無いことから、高圧噴射攪拌工法（Superjet-Midi）により土留め壁背面側の地盤改良を行い、土留め壁不連続部の補強を行った。改良厚さは1.5mとし、先行地中梁掘削時における土留め壁芯材下端からシールドまでの主働土圧と水圧を芯材に確実に伝達させるよう改良幅を構造計算により決定した。改良体上端位置は土留め壁芯材と1.0m ラップする位置とし、下端位置はシールドと改良体全幅が接する位置とした（図-6）。

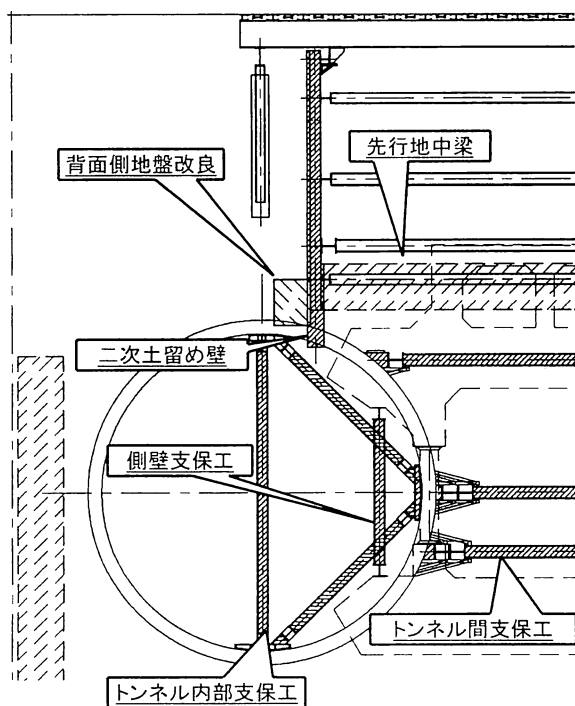


図-4 対策工概要図

c) 二次土留め壁

土留め壁下端とシールドトンネルの不連続部に、二次土留め壁による出水対策工を実施した（図-7、図-8、写真-1）。二次土留め壁は、土留め壁芯材に溶接したH鋼に横矢板を設置し、H鋼下端に設置した注入袋に充填材を注入する出水対策工である。

充填材には水密性と変形追随性が求められるため、アクリル系止水注入材を採用した。注入袋についてはナイロン繊維の注入袋を採用した。アクリル系止水注入材を充填した注入袋とシールドセグメントが密着することで掘削側への出水を防いだ。

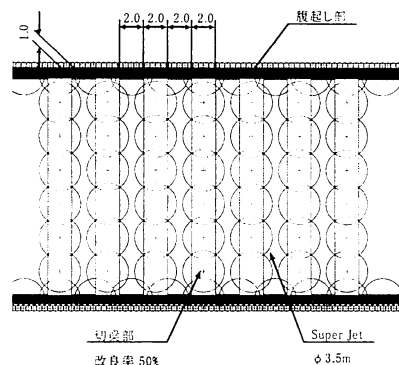


図-5 先行地中梁平面図

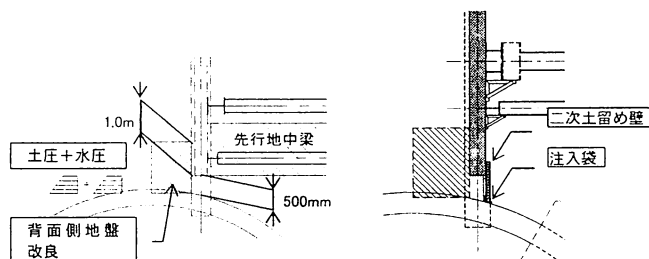


図-6 背面側地盤改良概念図

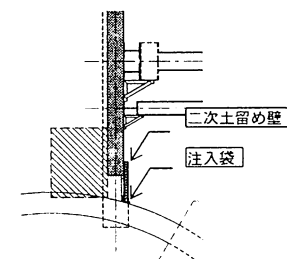


図-7 二次土留め壁概要図

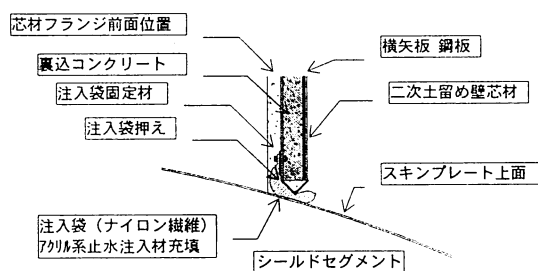


図-8 二次土留め壁詳細図

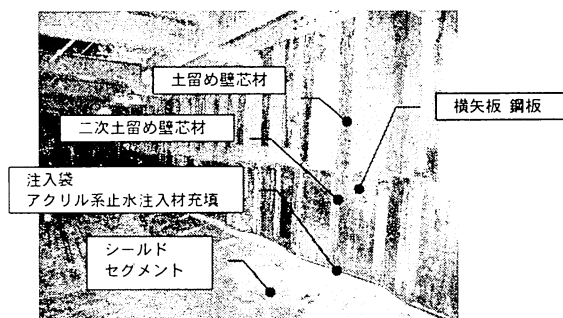


写真-1 二次土留め壁

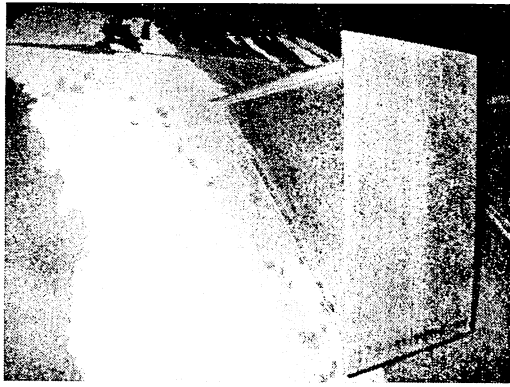


写真-2 トンネル間支保工接合治具

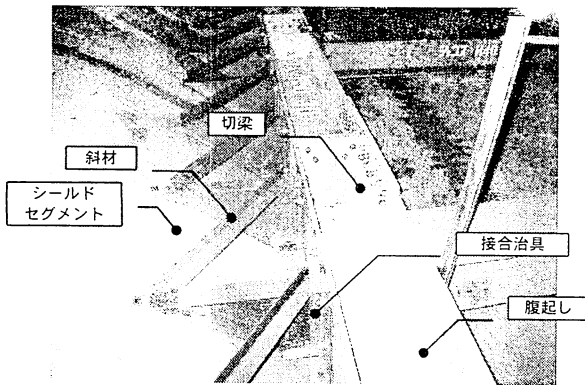


写真-3 トンネル間支保工

(2) トンネル全体の安定対策

a) トンネル間支保工，トンネル内部支保工

本工事ではシールドトンネル間に躯体を構築するため，シールド間をシールド下端まで掘削する．掘削の進行に伴い，シールドへの背面側圧，浮力により，シールドの変形，掘削側への変位が想定された．そのためトンネル内部にトンネル内部支保工を，内回り側と外回り側のシールド間にトンネル間支保工を設置することでシールドの変形，回転を抑止した．

トンネル内部支保工については，別途シールド工事によりトンネル変形や発生断面力の抑制に効果的な支保形状（縦梁・斜梁）が計画された．本工事においては，連結路構築に伴う条件の変更等を反映した FEM 逐次解析を実施して，内部支保工の照査を行った．

トンネル間支保工は，円形のシールドに支保工荷重を確実に伝達するよう，セグメント主桁部のスキンプレーートを撤去し，主桁に溶接した接合治具（写真-2）を介して接続する支保工である．トンネル間支保工は接合治具，腹起し，切梁等により構成され，必要に応じて斜材等を設置し安定を図った（写真-3）．

トンネル間支保工の設計荷重は FEM 逐次解析結果と，別途実施した鋼殻を剛体壁と評価した弾塑性計算結果より求まる荷重の最大値とした．弾塑性計算の検討モデル図を図-9 に示す．

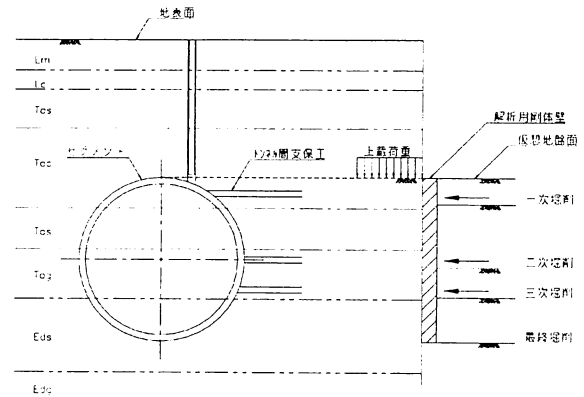


図-9 トンネル間支保工弾塑性計算モデル概要図

b) 地下水位低下工

掘削側の地下水位低下は施工時のシールドトンネルの安定上必要不可欠のものであった．地下水位低下工法はディープウェル工法を採用した．本数の決定にあたっては，隣接工区の揚水試験結果をもとに決定した．地下水位低下工により浮力を低減し，掘削地盤の安定およびシールドの安定を図った．

揚水した地下水の一部は，周辺地盤への影響の低減のため，リチャージウェル工法にて復水した．

c) FEM 逐次解析による検証

切開き 2 本柱構造は，特殊な施工ステップ，特殊な構造であり，躯体構築課程において，荷重状態，支持条件，構造系が経時的に変化する．そのため，鋼殻だけでなく，躯体においてもシールドの変形等により先行応力の残留が懸念された．鋼殻と内部支保工の健全性を確保できるよう，施工時の躯体構造照査，トンネル間支保工の検討等のため FEM 逐次解析を実施した．詳細は後述の「4. FEM 逐次解析」に述べる．

d) 計測工

FEM 逐次解析等の事前検証のもと，施工中は土留め壁，支保工，セグメントに各種計器を設置し，軸力，曲げ，内空変位，絶対変位などの自動計測を行い，計測値と，計算値および材料の許容値にもとづいた管理値とを比較検討しながら安全に施工を行った．詳細は後述の「6. 計測工」に述べる．

4. FEM 逐次解析

躯体構造検討は躯体および鋼殻を線形弾性部材とした完成時 FRAME 解析が基本であるが，切開き 2 本柱構造では躯体構築課程における先行応力を評価する必要があった．また，鋼殻の仕様決定に支配的となる躯体との接合部断面力を適正に評価する必要があった．そのため，躯体に平面歪み要素を，鋼殻や支保工に梁要素を用いたモデルにより FEM 逐次

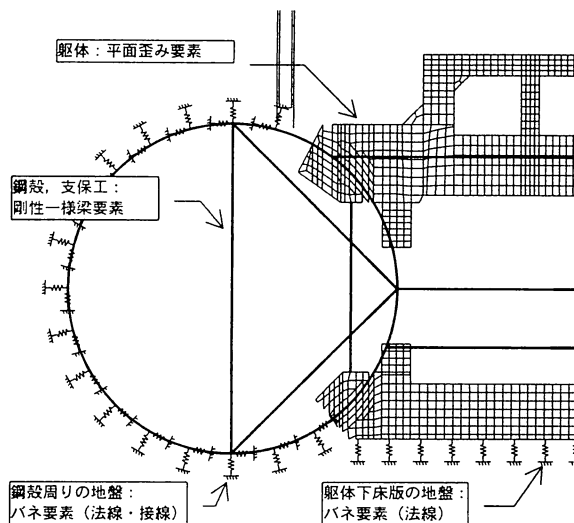


図-10 逐次解析モデル図

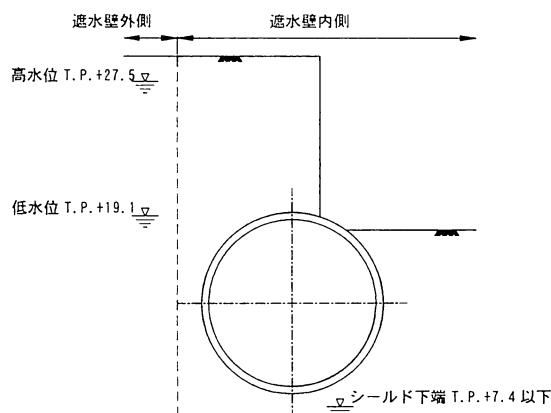


図-11 地下水位

解析を行った²⁾。解析モデルを図-10に示す。

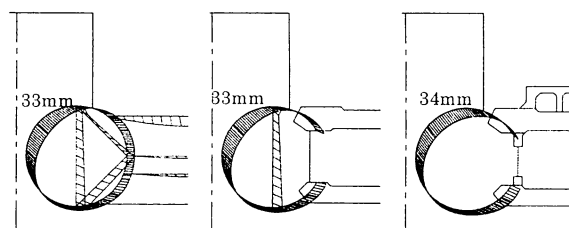
シールド工事による鋼殻の設計では、以下の理由により高水位（孔内水位）および低水位（被圧水位）の両方の水位条件で照査を行っている。

- ① 鋼殻の主桁と継手の両方で発生応力が大きくなる水位条件が異なる場合がある
- ② 鋼殻を補強ピースと一般ピースの2つの部位に区分しており、発生応力が大きくなる水位条件が異なる場合がある

また、土留内に設置したディープウェルによる地下水位低下を考慮した水位条件とした（図-11）。

鋼殻周りの地盤バネについては、施工ステップ毎に有効範囲が変化する。法線方向地盤バネは圧縮反力についてのみ有効とし、引張反力が発生する場合は無効とした。ただし、次ステップ以降で圧縮反力に転じた場合は再度有効に働くものとした。また、シールドスプリングラインより上方においては、掘削による地盤の緩みを考慮して地盤バネの設置範囲を決定した。

接線方向地盤バネは、「道路橋示方書・同解説Ⅳ下



(a)最終掘削完了時 (b)セグメント撤去 (c)躯体構築完了時

図-12 変位図（逐次解析）

表-2 中床版断面力比較

		M (kN・m)	N (kN)
中床版 負曲げ	完成時	-829	710
	FRAME解析		
	FEM 逐次解析	-1003	431
中床版 正曲げ	完成時	758	594
	FRAME解析		
	FEM 逐次解析	1059	635

部構造編 H14.3」の杭の最大周面摩擦度を参考に、その反力の上限値を 100kN/m^2 としたパイリニア型とした。設置範囲は、法線方向地盤バネが有効である範囲のみとした。

施工時の躯体構造については、FEM 逐次解析結果より得られた要素応力を断面の図心軸回りに積分することにより断面力を求めて照査を行った。

逐次解析結果（高水位）のシールド変位図を図-12に示す。また、FEM 逐次解析を行った結果、中床版と下床版においては発生断面力が完成時FRAME 解析結果よりも厳しい値となった。中床版発生断面力の違いを表-2に示す。

5. 切開き2本柱構造の施工

切開き2本柱構造区間は、切断する鋼殻セグメント位置に連結路側壁が位置することから、通常の順巻き（鋼管柱、側壁構築後のセグメント撤去）による施工が困難であり、特殊な施工ステップを採用した。鋼殻切断の施工フローを図-13に示す。

側壁支保工は、鋼殻撤去前に設置するため、連結路側から支保工を建て込むことが困難であった。また、シールド内からの搬入も困難であったため、側壁支保工縦梁はトンネル内部支保工斜梁を流用した。側壁支保工設置完了写真を写真-6に示す。

鋼殻主桁の切断は主桁の厚さが 96mm （工区内最大値）であることから、当初ガスによる切断が困難であると想定されたが、試験施工を行うことでその可否を確認し、ガスにより切断した（写真-5）。

鋼管柱の設置は中床版構築後であり、クレーン作

業に必要な空頭が確保できなかった。そのため、チェーンブロックによる引き込みを併用して設置した(写真-6)。

また、2本柱構造は躯体コンクリート設計基準強度 30N/mm^2 以上、最大部材厚 2.6m 、延長約 25m であり、温度ひび割れの発生が懸念された。

そのため、3次元 FEM 解析による温度ひび割れ対策検討を実施し(図-14)、有害なひび割れが発生しないように対策を講じた。経済比較を実施した結果、ダクト部については配力筋増、側壁については低熱コンクリートを使用した。

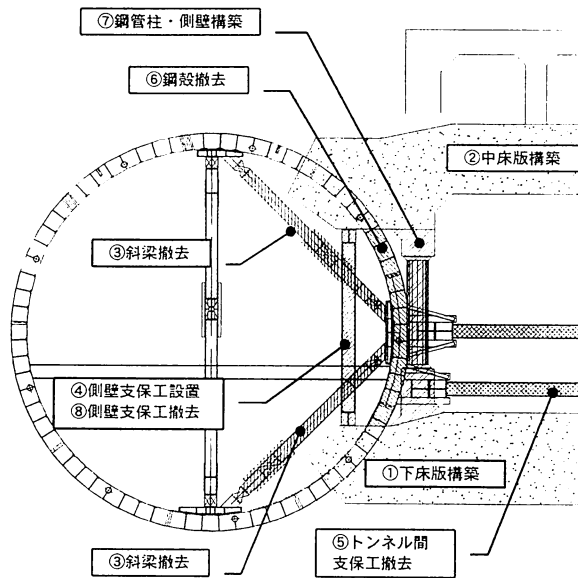


図-13 施工フロー図

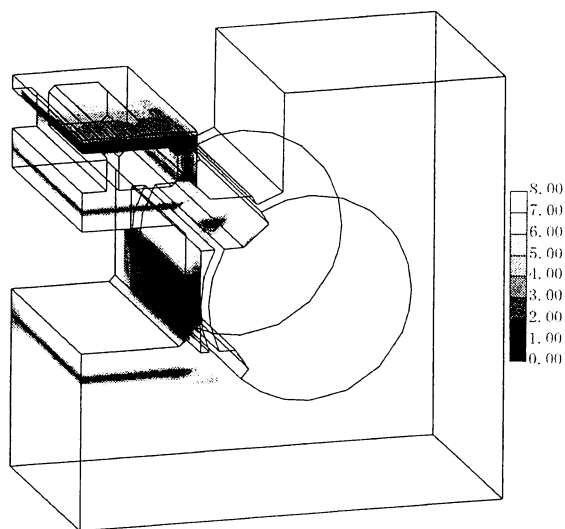


図-14 ひび割れ指数コンター図



写真-4 側壁支保工設置完了(シールド内から撮影)

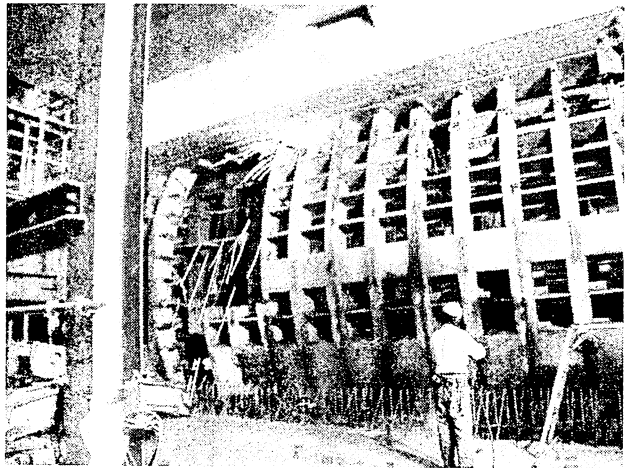


写真-5 鋼殻切断状況(連結路側から撮影)

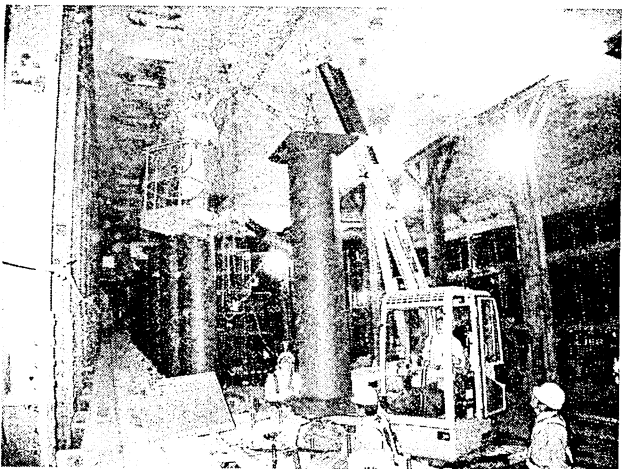


写真-6 鋼管柱建て込み状況

6. 計測工

(1) 概要

トンネルの構造および、施工時の安全性については、設計・計画段階で十分な検討を行ったが、前提とした条件が異なり、予測できない状況が生じることも考えられた。この場合、状況に応じて条件の見直しが必要となるとともに、構造、施工方法を見直さなければならない場合も考えられ、慎重な対応が必要であった。

また、施工箇所は都市内の幹線道路下に位置し、切開き施工に伴い地下埋設物・近接構造物への影響を与える可能性があったため、計測値をリアルタイ

ムで把握し、近隣へ支障を与えないような配慮も必要であった。以上より、施工時の安全性を確保するために計測器を設置し、情報化施工を行った。設置した計器位置図を図-15に、施工ステップを表-3に示す。

(2) 地下水位

土留め壁背面側と掘削側で実施した地下水位の計測結果を図-16に示す。工事完了まで、土留め壁背面側の水位は設計で想定している高水位を上回ることは無かった。

(3) シールド変位

シールドの絶対変位について、FEM 逐次解析（高水位、低水位）による計算値と計測値を図-17に示す。

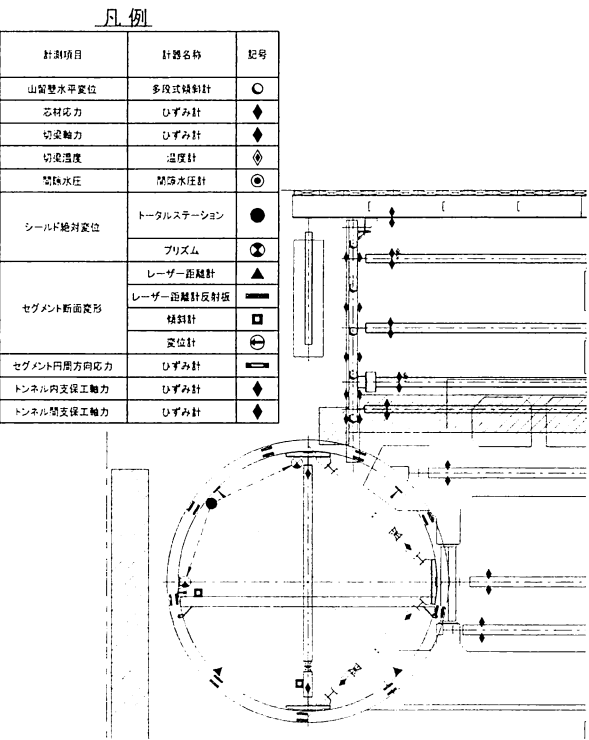


図-15 計器設置位置図

表-3 施工ステップ

1	シールド施工完了	10	内部支保工(斜梁)・二・三段梁撤去
2	先行掘削(GL-1.2m)	11	側壁支保工撤去
3	一次掘削	12	セグメント撤去
4	二次掘削	13	側壁打設
5	三次掘削	14	内部支保工(縦梁)・側壁支保工撤去
6	最終掘削	15	ダクト打設
7	下床板打設	16	埋戻し
8	I段梁撤去	17	復水完了
9	中床版打設		

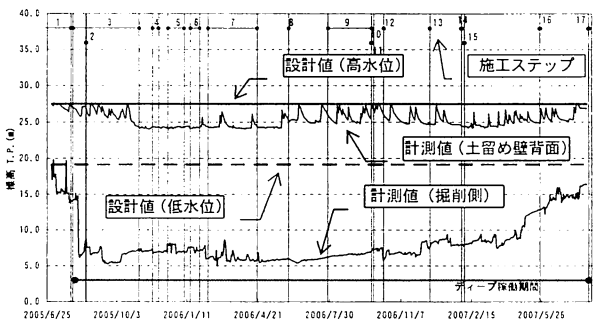


図-16 地下水位比較

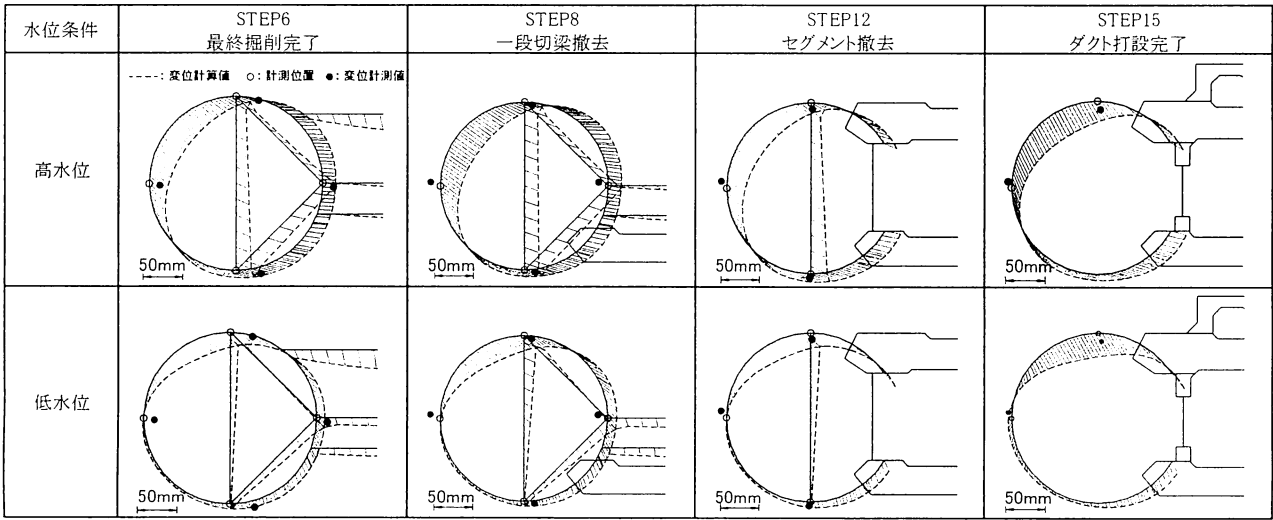


図-17 シールド変位比較

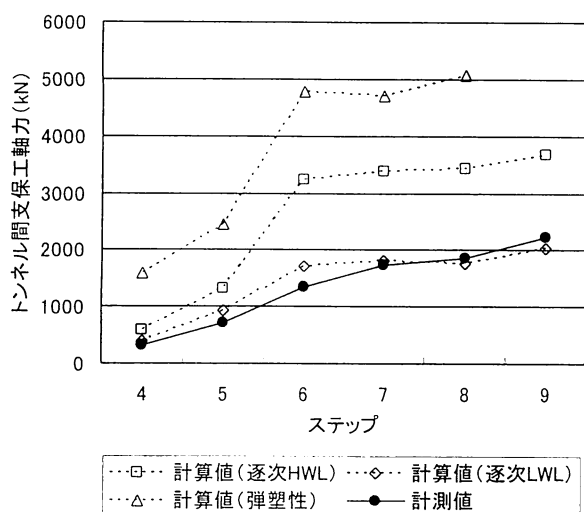


図-18 トンネル間支保工軸力比較

最終掘削までのシールドの変形は FEM 逐次解析高水位計算値と傾向が一致している。しかし、一段切梁撤去から変形のモードが計算値とは異なり、背面側への変位が発生している。その後、躯体構築完了までさらに変位が増大することはなかった。最終掘削時等の一部の施工ステップでは、実測値が水位条件によってはその計算値を上回る場合もあったが、全ステップにわたり許容値 50mm 以下であり、工事を安全に進めることができた。

(4) トンネル間支保工軸力

トンネル間支保工の軸力計測値（3 段の合計）について、計算値との比較を図-18 に示す。

軸力計測値の合計は逐次解析低水位の計算値とほぼ同等の値であった。各段それぞれの軸力計測値については計算値との差があったものの、3 ケースの計算値の最大値を上回ることなく、工事を安全に進めることができた。

(5) 土留め壁変位

土留め壁の変位計測値について、一次掘削完了時と、土留め壁下端までの最終掘削完了時の計算値との比較を図-19 に示す。土留め壁の設計は、弾塑性解析により行った。

変位計測値は計算値を大きく下回り、土留め壁頭部においても殆ど変位は発生しなかった。これは設計と実際の地下水位や作用土圧の差等が原因であると考えられる。

8. おわりに

首都高速中央環状線山手トンネルの切開き構造の中でも、本稿で述べた施工ステップを採用した工区

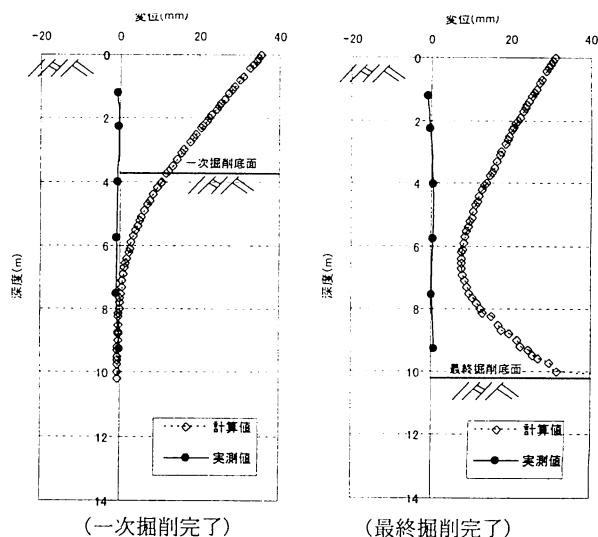


図-19 土留め壁変位比較

は少ないが、想定される様々な問題点に対する対策工の実施、施工履歴を考慮した FEM 逐次解析による事前検討、計測の実施、計測値の確認を行うことで大きなトラブルもなく、安全に工事を終えることができた。

ただし、計算値と計測値を比較すると、シールドの変形、回転のモードが一段切梁撤去後から、設計で想定していたものと異なる傾向を示しており、計算モデルの妥当性検証の必要がある。また、土留め壁についても計算値を大幅に下回る変位量であり、設計で想定していた地盤バネや土水圧の設定等、さらに合理的な設計が可能であったことを示している。

本工事で適用された開削切開き工法は、道路トンネルでは初めて適用された工法である。今後増加していくと考えられるシールドトンネルの分合流部、拡幅部等の地下トンネル工事において適用される工法の一つとして、より安全で合理的な設計、施工が行われることが期待される。

最後に、本工事の設計施工に関して、ご協力いただいた関係機関の皆様に対し、誌面を借りて深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 大場新哉，小島直之：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，IV-137，pp. 273-274，2003.
- 2) 大場新哉，小島直之，山中宏之，森益基：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，IV-138，pp. 275-276，2003.