

シールドトンネル切開き技術による 西池袋出入口の設計と施工

Design and Construction of West Ikebukuro Ramp
Using the Shield Tunnel Expansion Methods (STEMs)

小川晃¹・川崎光洋²・松田満³・中村好伸⁴・石原陽介⁵

Akira Ogawa, Mitsuhiro Kawasaki, Mitsuru Matsuda, Yoshinobu Nakamura, Yosuke Ishihara

¹正会員 清水建設(株) 土木技術本部 都市基盤統括部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

E-mail:a-ogawa@shimz.co.jp

²正会員 五洋建設(株) 土木部門 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

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)

⁴正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 池袋工事グループ (〒171-0021 東京都豊島区西池袋5-13-13)

⁵正会員 首都高速道路(株) 建設事業部 建設企画グループ (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)

The West Ikebukuro ramp on Central Circular Shinjuku Route of Metropolitan Expressway was constructed using Shield Tunnel Expansion Methods (STEMs) by excavating the earth between two previously-constructed parallel tunnels, cutting portions of tunnel segments and creating a large section of irregular shape. This paper reports the outlines of the application of this Shield Tunnel Expansion Methods in design and construction of West Ikebukuro ramp.

Key Words : shield tunnel, expansion method, ramp, underground expressway

1. はじめに

首都高中央環状線山手トンネルの分岐合流部では、併設シールドトンネルを施工後、地表面から開削によりシールド間を掘削し、鋼殻セグメントの一部を切開いて大断面トンネルを構築する切開き技術¹⁾を適用した。このような前例の無い特殊かつ大規模な工事の実施にあたり、設計手法や施工方法などの課題に対して、種々の検討による解決を図りながら

建設を進めた。本稿は切開き技術を用いた西池袋出入口における設計と施工の概要を報告するものである。

2. 構造概要および施工手順

首都高中央環状線山手トンネルは3号渋谷線と4号新宿線および5号池袋線を連結する新路線であり、西池袋出入口は最も北側に位置する渋谷方向サービス

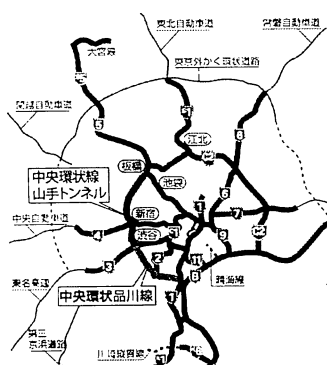


図-1 中央環状新宿線

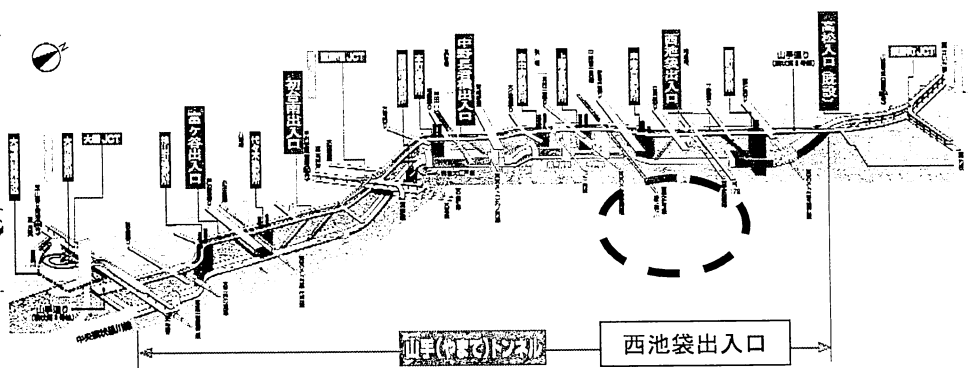


図-2 西池袋出入口位置

である。図-1、図-2 に首都高中央環状線山手トンネルと西池袋出入口の位置を示す。本出入口の単独区間は往復2車線のボックスカルバート構造であるが、本線分岐合流部では、図-3 に示すように鋼殻とRC躯体を一体化した複合構造により、往復6車線の大断面を確保する。全体施工手順は次頁 図-6 に示すように、まずシールドトンネル外側に遮水壁を造成し、山留め壁として柱列式連続壁を構築する。次に路面覆工および地盤改良の施工後に、山留め壁間およびシールドトンネル内部とトンネル間に支保工を設置しながら地上から掘削を進め、RC躯体を構築した後、埋め戻すという複雑な手順によった。

3. 切開きによる出入口の設計概要

(1) 鋼殻の設計

a) 鋼殻の設計手順とモデル

鋼殻に発生する断面力は、セグメント組立から掘削、躯体構築、埋戻し後長期経過後までの期間、外力や構造系、境界条件の変化の影響を受ける。また、鋼殻は躯体と一体で挙動する複合構造であるため構造全体系の剛性を適切に評価する必要がある。このようなことから、鋼殻の設計においては躯体を平面ひずみ要素、鋼殻をビーム要素としたモデルによる逐次解析によって断面力を算定することとした²⁾。また、断面力に対する照査は施工ステップや部材ごとに照査レベル（応力度の制限値）を設定して、構造安全性を確保することとした。これらをまとめて表-1 に示す。

b) 鋼殻の合理化

鋼殻の合理化への取組みとして、同一鋼殻リング内で発生断面力分布に応じて断面係数の大きい補強ピースと断面係数の小さい一般ピースを使い分け、更には補強ピースの主桁断面には図-4 に示すようにフランジを設置して断面係数の増加により鋼材量を低減した。また逐次解析の結果から、鋼殻リングはトンネル間掘削時の偏荷重の影響により、大きな変形と断面力が発生し、完成後まで残留・累積することが判ったため、図-5 に示すトンネル内部支保工を設置して変形と断面力の抑制を図った。

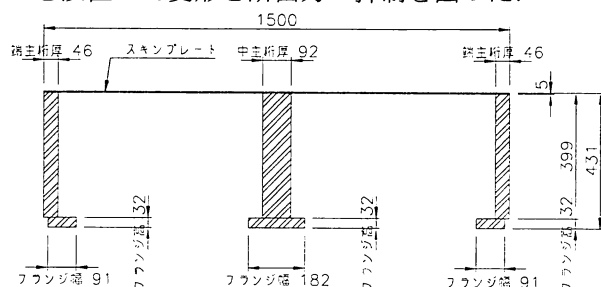


図-4 切開き部鋼殻断面（補強主桁）

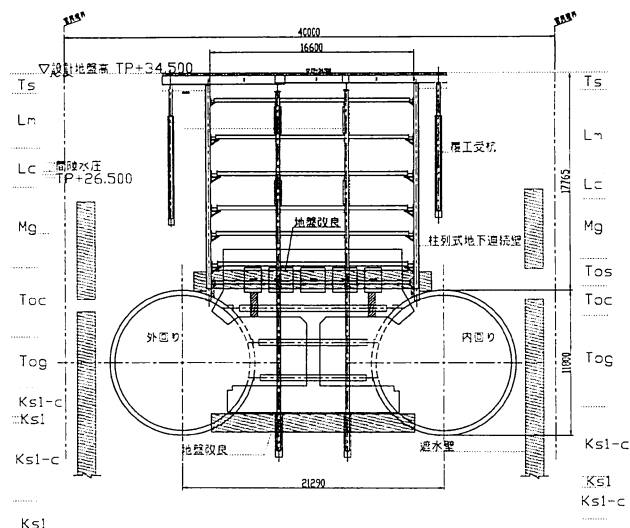


図-3 構造断面図 (1本柱区間)

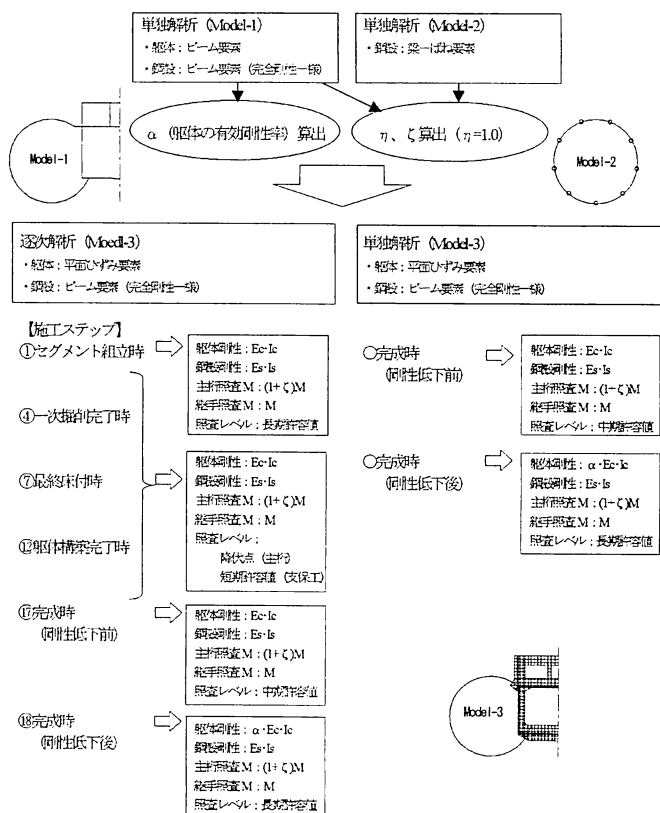


表-1 切開き部鋼殻の設計手順

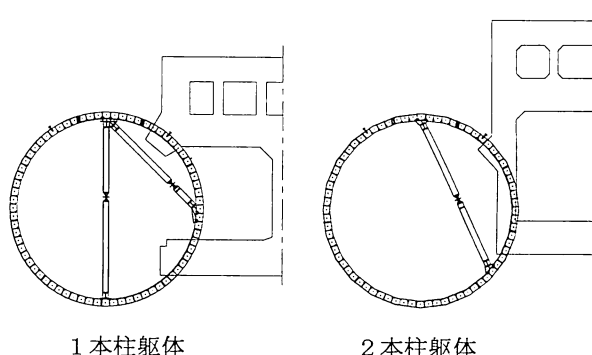
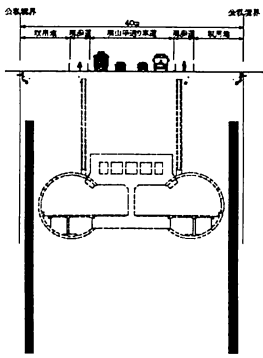
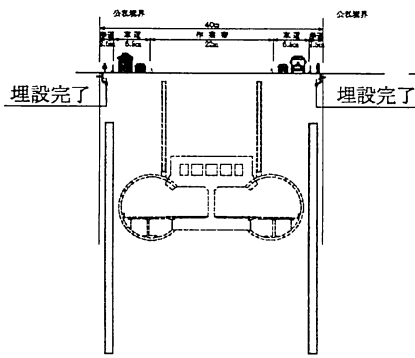


図-5 トンネル内部支保工

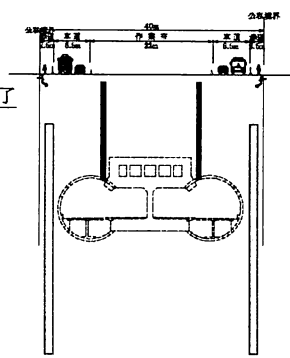
①. 埋設物移設工, 遮水壁工



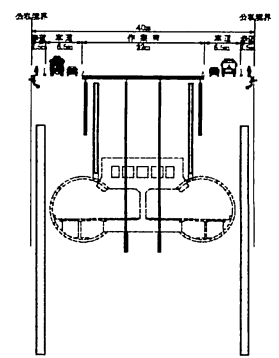
②. 道路切替え工(中央常設作業帯)



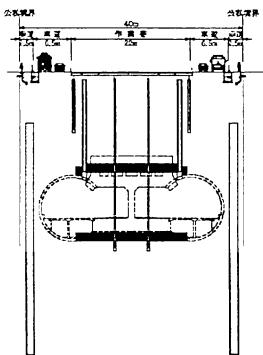
③. 柱列式地中連続壁工(SMW)



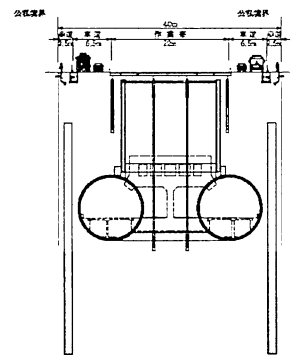
④. 中間杭工, 路面覆工



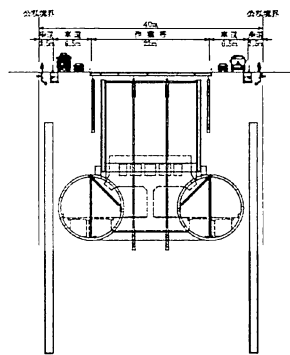
⑤. 地盤改良



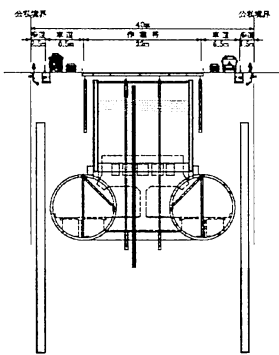
⑥. シールド掘進工



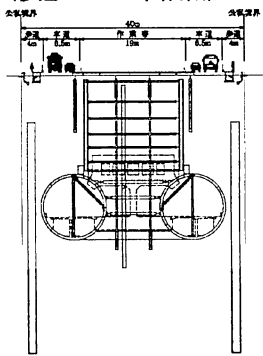
⑦. シールドセグメント補強工



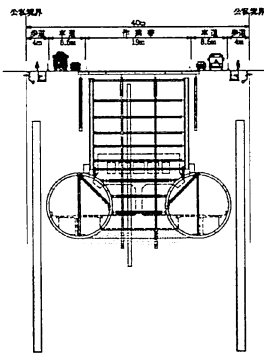
⑧. 一次掘削工



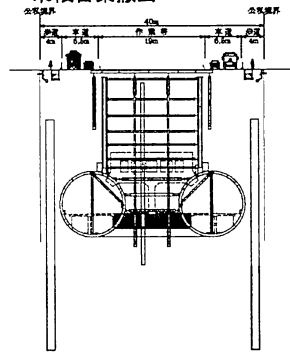
⑨. 二次掘削工～七次掘削工
(歩道2.5m→4m, 作業帯22m→19m)



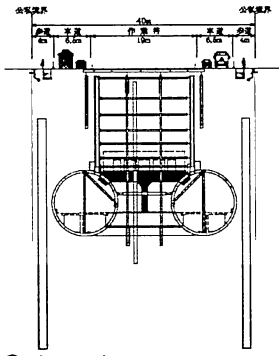
⑩. 掘削工(トンネル間)



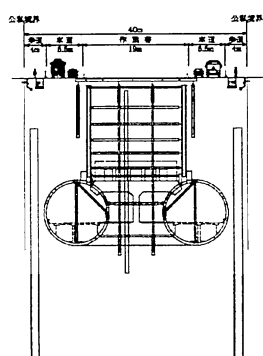
⑪. 下床版構築
1,3段目梁撤去



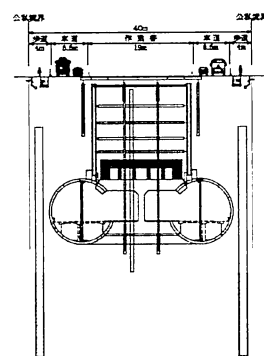
⑫. 中床版構築完了



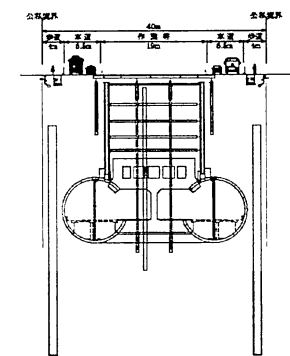
⑬. 内部支保工斜材
トンネル間支保工2段梁撤去
シールドセグメント撤去



⑭. 躯体構築完了



⑮. 内部支保工垂直材撤去



⑯. 埋戻し完了

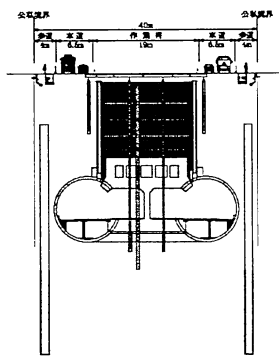


図-6 西池袋出入口施工手順図

(2) RC躯体の設計

R C 躯体の断面力の算定は、通常の開削トンネルと同様に完成形のトンネル直角方向断面を対象に行い、各部材を棒部材に置き換えて地盤をバネにモデル化した平面骨組解析により行なうことを基本とした。ただし、西池袋出入口の 1 本柱型構造では中床版構築後にトンネル内部支保工と鋼殻の撤去を行なう施工手順から、構造系の変化による影響が無視できないと考え、単独解析と併せて逐次解析を実施した。また、U ターン路や鋼管柱区間などのトンネル縦断方向の剛性により安全性を確保する構造形式においてはトンネル縦断方向の検討も必要に応じて実施した。

1本柱型構造の設計に用いた解析モデルおよび荷重を図-7に示す。また、これにより決定した主鉄筋の配筋図を図-8に示す。

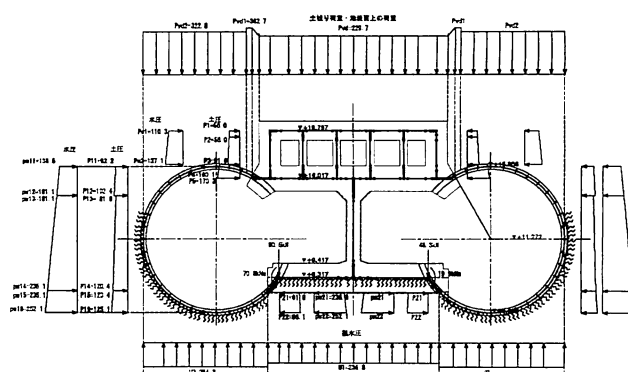


図-7 躯体設計モデル・荷重図

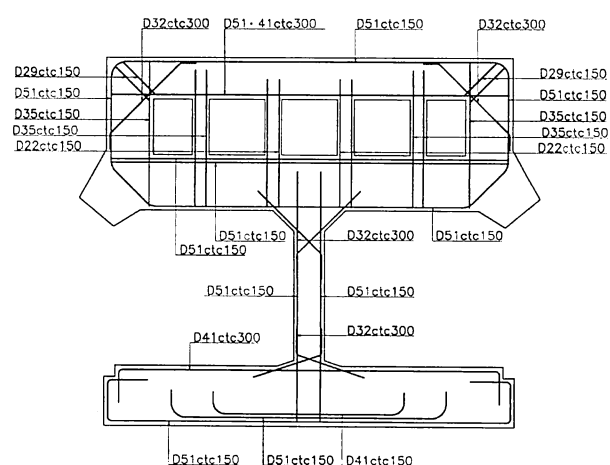


图-8 1 本柱躯体配筋图 (主铁筋)

(4) 鋼殻とRC躯体の接合部の設計

a) 接合部構造の設計

鋼殻躯体接合部の構造を図-9 に示す。接合部では鋼殻縦リブを利用したシアコネクタで軸力を伝達し、曲げモーメントとせん断力は鋼殻主桁の R C への根入れにより伝達させる剛結構造である。

接合部の照査は、鋼殻設計時の逐次解析と完成形単独解析値、RC 躯体設計時の解析値を対象に、①シアコネクタの伝達軸力、②コンクリートの支圧応力度、③接合部補強筋（U 字筋）の引張応力度、④縁端部コンクリートの割裂の各項目を行なった。これらの照査方法は、既往の理論式³⁾を基に、先だって実施されたシアコネクタのせん断試験^{4) 5)}と接合部縮小模型実験⁶⁾の結果から設定したものである。

b) 止水構造の設計

止水の基本構造であるRC躯体の外周防水シートと鋼殻の止水シールは接合部において連続性を保つことが出来ないことから、接合部は止水上の弱点となりやすく、長期耐久性に悪影響を及ぼすことが考えられた。このため、接合部における地下水浸入経路を想定し、各々二重の止水措置を行なうことにより確実な止水を確保することとした。表-2、図-10 に想定した地下水浸入経路と止水機構を示す。

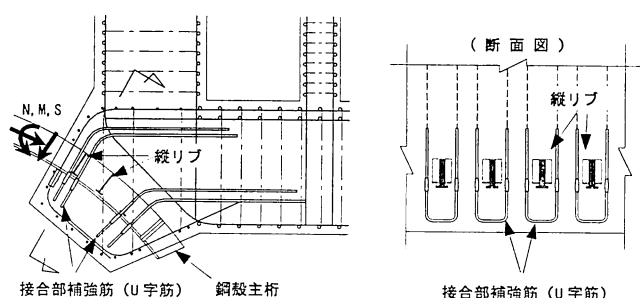


図-9 鋼殻躯体接合構造

表-2 想定した地下水浸入経路

地下水浸入経路	止水機構
鋼殻外側シール材と 外縁の間のリング間	(一次) リング間削孔と疎水性ウレタン 樹脂充填
鋼殻外側シール材と 内側シール材の間	(二次) 接合部内側継手溝コーキング
スキンプレート外側	(一次) 接合部外側塗膜防水 (二次) 鋼殻周りに不定形水膨張シール材

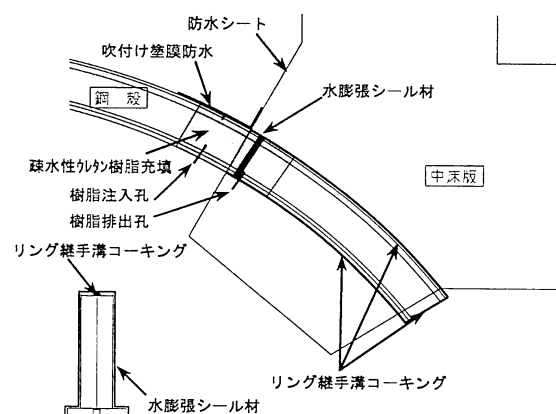


图-10 接合部止水構造

3. 切開きによる出入口の施工

切開き特有の課題に対しては、通常の開削トンネルとは異なる方法を用いて解決を図りつつ施工を進めた。以下に、代表的な工種についての概要を示す。

(1) 二次土留め工の概要

切開き工法における山留め壁は、下端がシールドトンネルと不連続となり、かつ、背面には帯水層である武蔵野礫層が存在したことから、この部分からの出水事故が懸念された。このため、図-11 および写真-1 に示すような止水鉄板と裏込めコンクリートおよび内部にグラウト材を充填した注入袋による二次土留を施工した。

(2) トンネル間支保工の概要

シールドトンネル間の掘削時に偏荷重を受けた際のトンネル全体の安定性確保と、鋼殻の過大な変形および断面力の発生を抑えるためにトンネル間支保工を設置した。円形のシールドトンネルに腹起しと切梁を設置するにあたり、確実に断面力を伝達するために、写真-2 に示すような接合治具を設置した。

(3)トンネル内部支保工撤去手順の検討

縦断方向に 1.5m 間隔で設置されるトンネル内部支保工の撤去過程ではトンネル縦断方向に隣接する未撤去の支保工への軸力再分配によって、鋼殻に過大な支保工反力が作用することが懸念された。このため、事前検討により安全な撤去手順を計画して施工に反映した。

事前検討は、試験撤去工により隣接する支保工の軸力変動を計測し、図-12に示す骨組みモデルによって計測値の逆解析を行った。次に、本モデルを用いて本撤去手順をシミュレーションし、変動軸力に対する鋼殻の安全性を確認することにより撤去手順を定めた。なお、ここで用いた解析モデルはトンネル横断方向と縦断方向の剛性をバネと仮想梁により個々に表現できるものであり、剛性をフィッティングすることにより図-13に示すように良好に軸力変動計測値を再現することができた。写真-3にトンネル内部支保工撤去状況を示す。

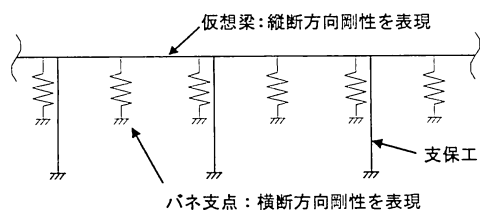


図-12 逆解析用2次元骨組みモデル概念図

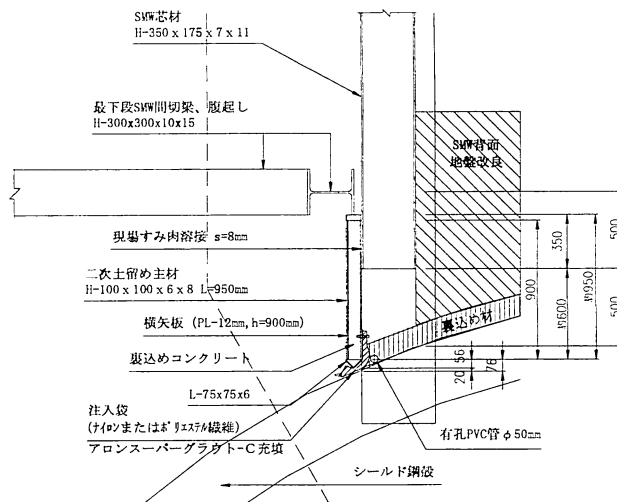


図-11 二次土留め構造図



写真-1 二次土留め

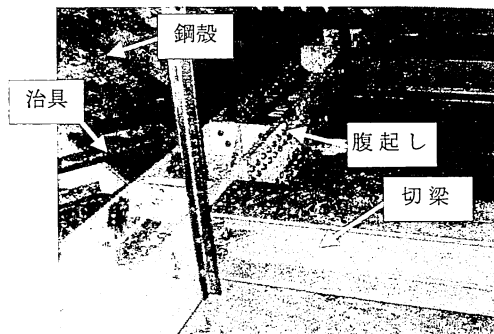


写真-2 トンネル間支保工



写真-3 トンネル内部支保工撤去状況

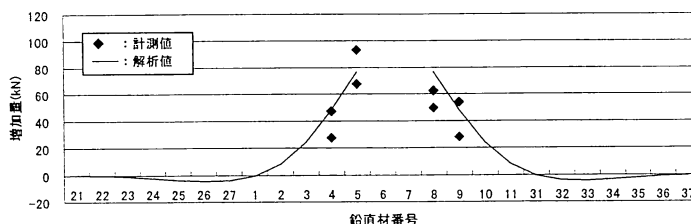


図-13 試験撤去工における再現解析結果

(4)鋼殻切断撤去工

中床版打設完了後、不要範囲の鋼殻の切断撤去を行った。撤去前に設置した道路床版を施工面として、スキンプレート、縦リブ、主桁の順にガス溶断により切断を行った。主桁の切断位置は躯体への熱の影響を考慮して、躯体表面から100mmの位置とした。写真-4、5 に鋼殻切断および撤去の状況を示す。

(5)接合部の鉄筋組立工

接合部は、躯体本体の多段配筋に接合部補強筋が加わるため過密配筋となっているうえ、鋼殻主桁による作業空間の制限を受けるため、難易度の高い鉄筋組立が求められた。一方、当該部位は本構造の最も重要な部位であり、これらの難条件を克服しながら施工を進めた。一例として写真-6 に鋼殻接合部近傍での鉄筋のエンクローズド溶接による継手の施工状況を示す。

4. 切開き設計手法の検証

切開きの設計手法は、施工時の安全性と構造の合理性の確保を指標に設定され、施工は計測を行いながら注意深く進めた。計測値に基づく各部材の挙動は、いずれも設計の想定範囲内にあり、設計手法が適切であったこと、切開き構造は十分な安全性を有していることが確認されている。以下に代表的な計測項目として、トンネル間支保工とトンネル内部支保工の計測結果と設計値との比較による評価を行なった内容を示す。

トンネル間支保工3段の合計軸力の計測結果を図-14 に、トンネル内部支保工軸力の計測結果を図-15 にそれぞれ計算値と併せて示す。

これらの結果から、それぞれの支保工は鋼殻の変形・変位量の抑制に有効に働いていること、設計時に実施したFEM逐次解析による設計手法は実際の挙動を安全側に評価していることが確認できた。

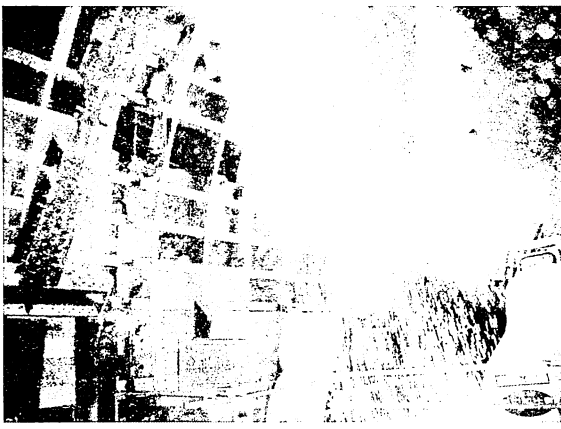


写真-4 鋼殻切断状況



写真-5 鋼殻撤去状況



写真-6 鋼殻接合部エンクローズド溶接状況

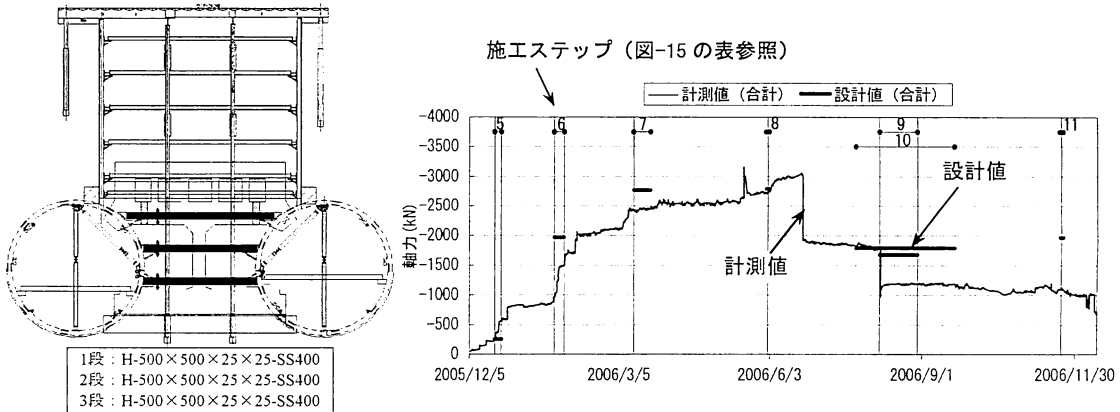


図-14 トンネル間支保工軸力計測結果 (3段合計値)

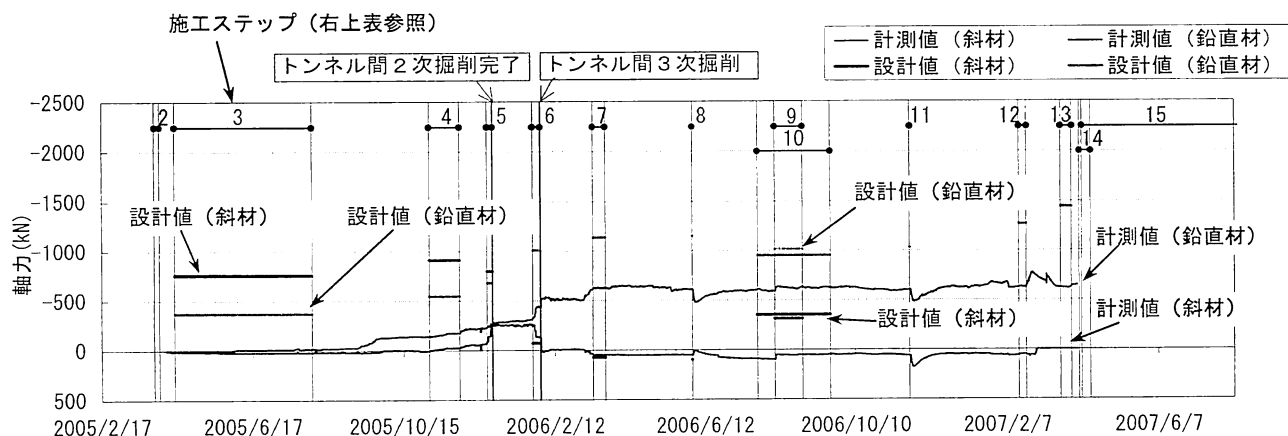
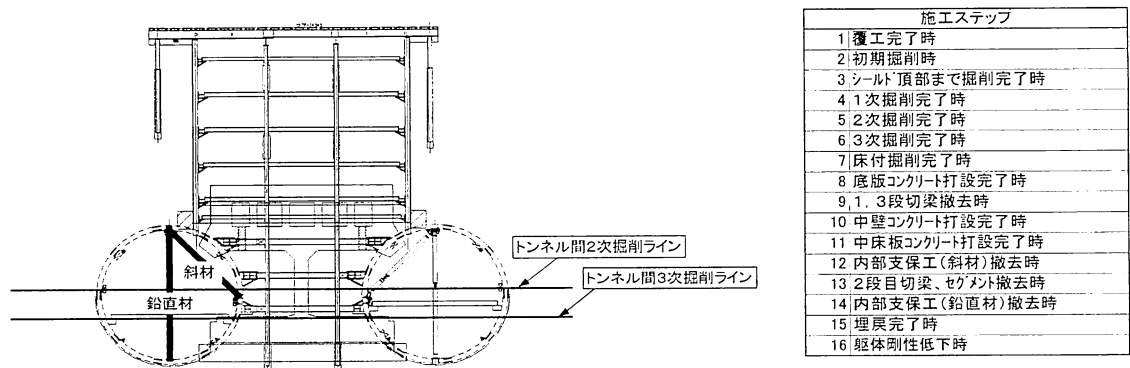


図-15 トンネル内部支保工(斜材, 鉛直材)軸力計測結果

5. まとめ

シールドトンネル切開き技術による西池袋出入口の分合流部の建設にあたり、事前の想定された課題に対する検証と情報化施工によって大きなトラブルもなく工事を完了し、平成19年12月に開通を迎えた。

当該出入口は当初立坑を利用した開削工法による建設も検討されたが、用地確保や地下埋設物回避の遅れに伴う工程遅延の懸念から現行計画に決定した。その結果として、中落合シールドトンネルの到達後、約2年半で当該出入口を含む4～5号間が完成したことは、切開き技術への取組みの成果であると考えている。

本工事への取組みによって得た知見と経験が、今後の都市部における地下道路等の同種工事における参考となれば幸甚である。

参考文献

- 1) 大場, 土橋: 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, pp.273-274, 2003.
- 2) 大場, 小島, 山中, 森: シールドトンネル開削切開き部における鋼殻の設計手法について, 土木学会第58回年次学術講演会, VI-138, pp.275-276, 2003.
- 3) 土木学会: 鋼・コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案), pp.17-20, 1992.7
- 4) 大場, 小島, 岡島, 一宮, 吉田: 大規模複合構造の接合部におけるシアコネクタの検討, 土木学会第58回年次学術講演会, VI-170, pp.339-340, 2003.
- 5) 川田, 白鳥, 小島, 森口, 山中, 一宮, 吉田: 大規模複合構造の接合部におけるシアコネクタのせん断耐力, 土木学会第59回年次学術講演会, I-684, pp.1365-1366, 2004.
- 6) 渡辺, 川田, 白鳥, 山田, 吉岡, 篠崎: 鋼製セグメントとRC躯体接合部の実証実験, 土木学会第60回年次学術講演会, CS2-036, pp.115-116, 2005.