

道路トンネル分岐・合流部における 超近接併設シールドの設計・施工

牛越 裕幸¹・中西 禎之²・井上 隆広³・小倉 靖之³・花島 常雄³

¹正会員 首都高速道路(株) 建設事業部 構造設計室 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)

²正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 大橋建設事務所 (〒153-0042 東京都目黒区青葉台3-6-16)

³正会員 (株)間組 関東土木支店 大橋出張所 (〒153-0044 東京都目黒区青葉台3-17-13)

E-mail: takinoue@hazama.co.jp

本工事は、外径9.5mの連結路シールドを外径12.3mの本線シールドに離隔0.5mで約200mに亘り近接して併設し、両者を切開いてセグメントで相互に接合することで、道路トンネル分岐、合流部を非開削で構築する。主に、併設に伴うセグメントへの影響や中間地山の安定、切開き部をセグメントで接合する場合のシールド施工誤差への対応が課題であった。これらに対して、FEMにより併設トンネルの影響や中間地山の安定性を評価し、地盤条件が良好なことから特に地盤改良やセグメント補強等の対策を施すことなく、また、施工誤差を見込んだ構造設計と綿密な施工管理により対応し、良好な施工結果が得られた。また、大断面シールドの転用にあたり内胴引抜き再利用方式を初めて適用し、工程短縮に寄与することができた。

Key Words : *shield tunnel, junction, adjacent construction, FEM analysis, construction error*

1. はじめに

首都高速道路中央環状品川線大橋連結路工事（以下、本工事と称す）では、上下2本の本線シールドトンネルとの分岐、合流部を非開削工法により構築するため、上下2本の連結路シールドを本線シールドとの左右離隔0.5mで併設し、計4本の大断面シールドが近接して施工される。本稿では、この4本の超近接併設シールドの設計および施工における課題と対応策、さらにシールドの施工結果について報告する。

2. 本工事の特徴

(1) 工事概要

首都高速道路中央環状品川線（以下、品川線と称す）は、中央環状線（全線約47km、図-1）の南西部を形成し、大井ジャンクションで高速湾岸線から分岐したのち、目黒川および環状6号線（山手通り）の地下をトンネルで北上して、中央環状新宿線および首都高速3号渋谷線に接続する路線である。本路線が完成することで、東京周辺の高速道路全体のネットワークが効率良く機能し、都心環状線などの慢性的な渋滞が緩和されるとともに、

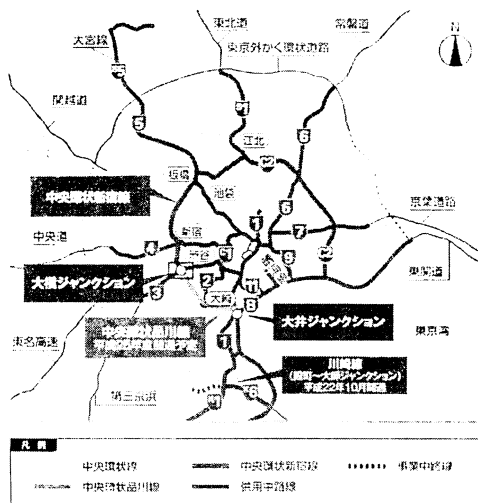


図-1 中央環状線概要図

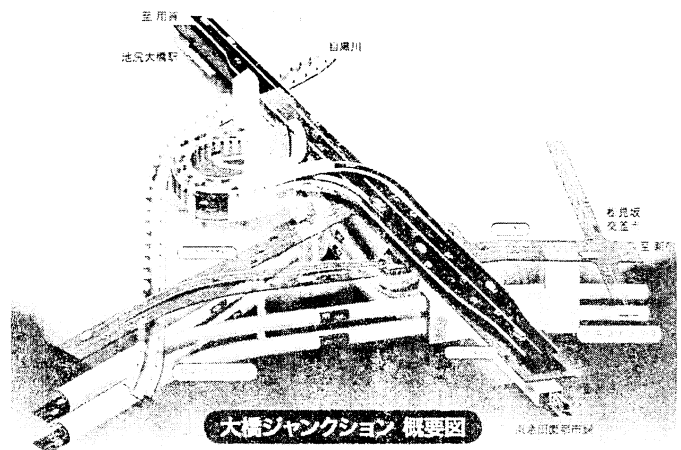
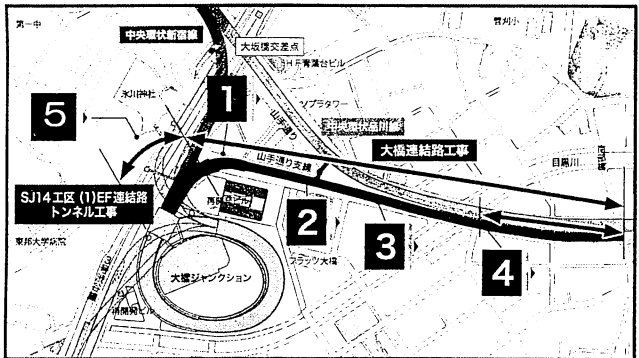


図-2 大橋ジャンクション概要図

一般道路の混雑も緩和されることで沿道の環境が改善される。また、品川線では沿道に与える影響を抑制するため、そのほぼ全線においてトンネル構造を採用している。

このうち、本工事は大橋ジャンクションの一部で、密集市街地において品川線本線トンネルと分岐、合流部を形成する連結路トンネルを建設するものである（図-2）。この連結路トンネルは、分合流区間を除く単路区間において縦断勾配7%を有する延長約610mの上下2層構造となっている。また、約110mの開削区間と約500mのシールド区間からなり、大橋ジャンクションとの分合流部およびシールド発進立坑部が開削区間である。さらに、シールド区間のうち到達側の約200mは品川線本線との分合流区間となっている。この区間では本線、連結路がそれぞれ上下2層構造となり、計4本のシールドトンネルが構築される。その後、本線と連結路の間を非開削で切開き、一体化して分合流区間を構築する（図-3）。

また、山手通りと山手通り支線の交差点付近においては、本線および連結路トンネルからの地上避難出口として外径5.1m、深さ約50mの大深度小型立坑を築造する。施工場所は幹線道路交差点の建物や地下埋設物に囲まれた三角形の狭隘地にあり、環境対策として防音ハウスを設置した中で施工を行う。



< 工 事 概 要 >

- 大橋連絡路工事
 - ①開削部（山手通り支線部）：
延長 55m×掘削幅 13～22m、掘削深度 29～33m
 - ②地上避難出口：掘削深度約 50m、掘削外径 φ 5.1m
 - ③シールド部（外径 φ 9.5m）：
上層トンネル延長 500m／下層トンネル 480m
 - ④分合流部：上層トンネル 210m／下層トンネル 180m
- S J 1 4 工区（1）E F 連絡路トンネル工事
 - ⑤開削延長 65m、掘削幅 12～22m、深度 30m、
切開き延長 40m

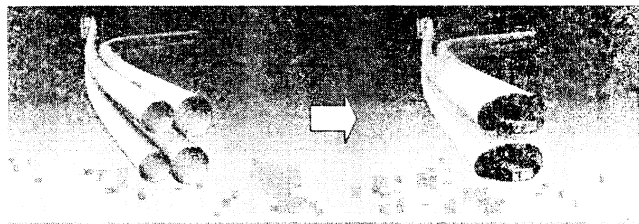


図-3 大橋連絡路工事の概要

さらに、開削区間においては中央環状新宿線のシールドトンネルを供用しながら約40mに亘って切開き、品川線の連結路下層との合流部を構築する。

(2) 地質概要

施工地点の地質は、新第三紀鮮新世～第四紀更新世の上総層群の泥岩層（Kc）を基盤岩とし、その上位に第四紀更新世武蔵野礫層（Mg）、東京層砂質土（Tos）、粘性土（Toc）、東京礫層（Tog）および埋土、ローム層、凝灰質粘性土などの地表層（B）が分布する（図-4）。

特に、GL-8～13m以深に泥岩層が厚く堆積している。この泥岩層は一軸圧縮強度が2,000kN/m²程度で自立性が高く、介在する砂層も薄く、湧水量が少ないと判断できる地層である。上下2層のシールドにおいて、上層シールドは小土かぶり発進（5.6m=0.6D）となり、初期掘進の約100m区間は帯水層内に位置する。それ以外の上層および下層シールドは泥岩層に位置する。

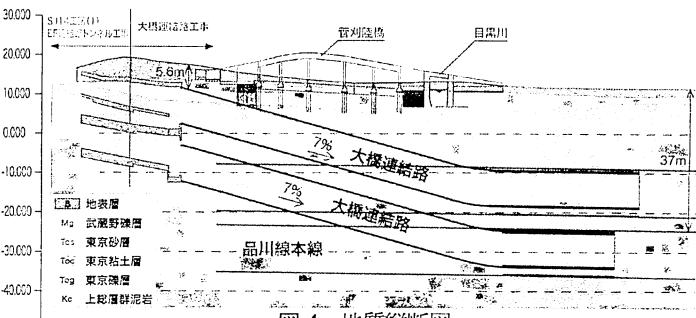


図-4 地質縦断面図

(3) 分岐、合流部の構造

分合流部の施工法は、交通渋滞や沿道環境への影響を緩和するため、非開削切開き工法を採用している。土かぶり約19m（上層）と約35m（下層）の泥岩層に位置し、離隔0.5mで併設する外径12.3mの本線と外径9.5mの連結路のシールドを切開き、延長210m（上層）、180m（下層）の上下2層の大断面トンネルを構築する（図-5）。

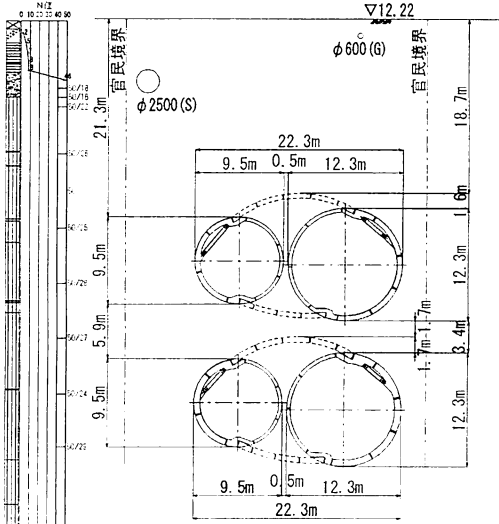


図-5 本線と連絡路シールドの近接状況

この分合流区間は、必要内空幅が9.0m～最大17.0m程度まで断面が変化する．そこで、分合流部の覆工構造を、必要内空幅および本線、連結路の線形と位置関係に応じて、TYPE-A～Dと称する4つのタイプに区分することで合理化を図っている（図-6）．

さらに、覆工の品質と耐久性の向上、狭隘空間での施工性向上による工期の短縮を図るため、場所打ち覆工コンクリートの代わりに、切開きを行う本線トンネルおよび連結路トンネルを、アーチ形状をした鋼製の拡幅セグメント（以下、WJセグメントと称す）で接合する新しい覆工構造を取り入れている（図-7、写真-1）．

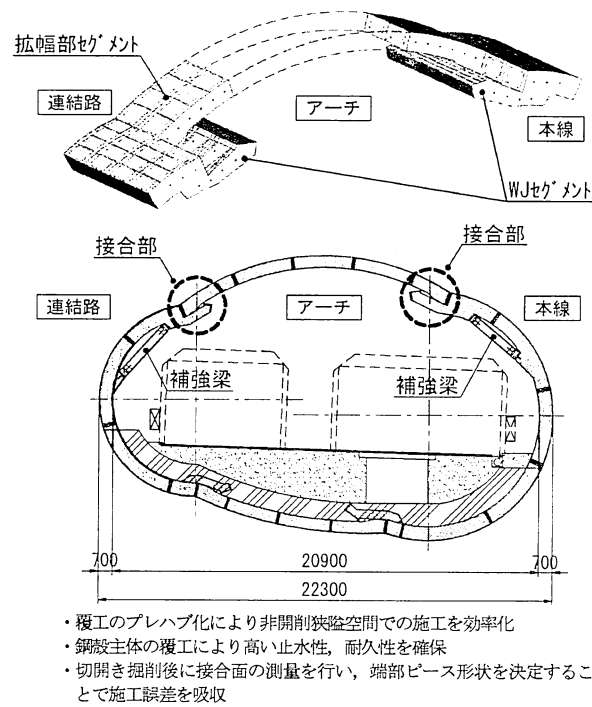


図-7 WJセグメント

特に、延長が長いTYPE-Cの覆工構造は、扁平な概略楕円形状（幅22.3m、高さ約14m）であり、本線および連結路のセグメントと切開き部のWJセグメントとが折れ角を持って接合している．また、その補強構造として接合部に斜め方向に補強梁を本体構造として設置しており、軸力伝達の円滑化、本体鋼殻セグメントの負荷軽減およびコスト削減を図っている．このような覆工構造は過去に実績がないことから、1/2スケールの実証実験を行い、接合部の力学的挙動と設計方法、補強梁の有効性を検証している⁹⁾．

3. 設計・施工上の課題と対応

(1) 併設トンネルの影響

トンネル覆工構造は、連結路単独部は幅1.5m×7等分割のコンクリートセグメント（以下、RCセグメントと称す）とし、分合流部や横連絡坑などの切開き部については幅12mの鋼殻セグメントを用いる．本工事では、上下左右に4本の大断面シールドが近接して併設されるため、先行シールドのセグメントには後行シールドの影響が複雑に作用する．

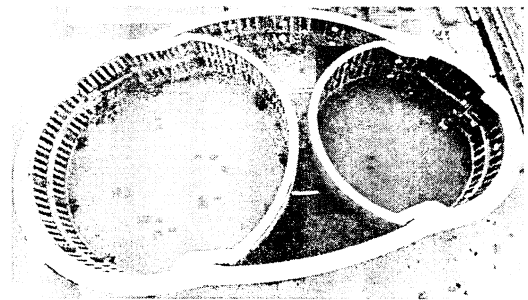


写真-1 WJセグメント

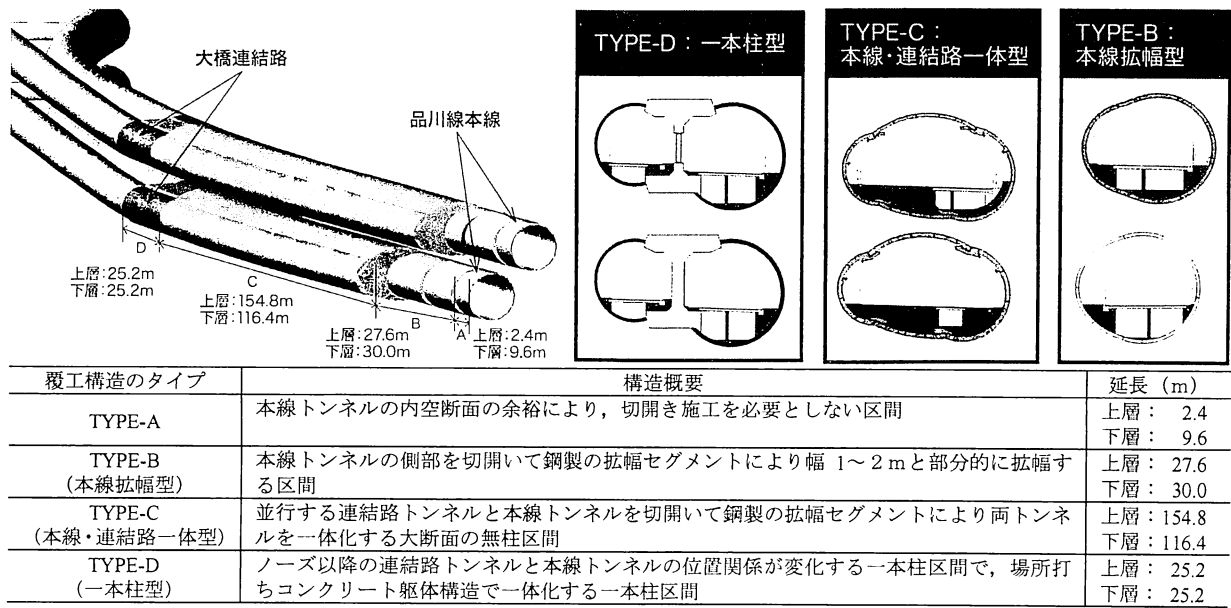


図-6 分合流部の覆工構造

そこで、セグメントの設計にあたっては、過去の類似事例（例えば文献²⁾など）を参照して、4本のシールド掘進に伴う応力解放をモデル化したFEM解析により、各トンネル覆工設置後の増加断面力を算定し、セグメントの構造設計に反映した。解析の概念を図-8に示す。

なお、大橋連結路部は約8kmの長距離を掘進する本線シールドの終点付近に位置するため、各シールドの進捗に応じて通過順序の変更リスクが懸念された。そこで、想定される全ての通過順序について解析し、各シールドセグメントの構造安全性を担保することとした³⁾。

その結果、連結路下層RCセグメントについて主鉄筋の補強（鉄筋比0.55%→1.71%，補強範囲は本線下層との離隔 $\leq 0.5D_o$ ， D_o =本線外径12.3m，約120m区間）が必要となり、その他は鋼殻セグメントを含めて補強は不要であった。なお、RCセグメントについては短期的な影響として後行シールドの裏込注入圧に対する構造照査を行い、安全性を確認している。したがって、これより靱性に優れる鋼殻セグメントについては検討を省略した。

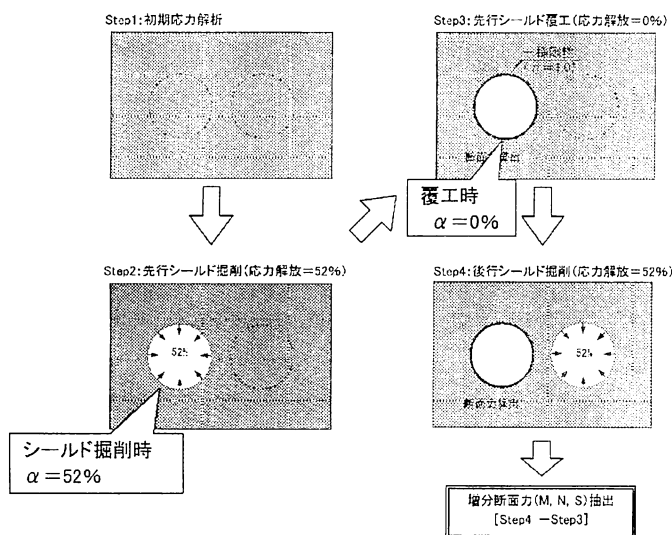


図-8 併設シールド影響解析の概念

(2) 中間地山の安定

本線と連結路の離隔は0.5mと非常に小さいため、後行シールドの掘削に伴って両者の中間地山に崩落や緩みが生じると、トンネルが不安定になる恐れがある。

そこで、4本のシールド施工過程、さらに、その後の切開き施工過程を反映した2次元弾性FEM解析を実施し、モール・クーロンの破壊基準により算定した安全率から中間地山の安定性を評価した。表-1に解析ステップを、表-2に解析に用いる地盤定数を示す。

図-9に安全率の解析結果を示す。地盤が非常に堅固なため、安全率は全施工ステップを通して1.0以上確保されている。したがって、地盤改良等の対策は不要であり、入念な切羽管理と裏込管理にて対応可能と判断した。

なお、中間地山は切開き施工時におけるトンネル全体

の安定を確保するうえで重要であり、シールド施工後に坑内から探査して、空洞や顕著な緩みなど、不良箇所があれば補足注入を行うこととした（図-10）。

表-1 FEM解析ステップ

STEP-1	STEP-2,3	STEP-4,5
STEP-6,7	STEP-8,9	STEP-10,11
STEP-12,13	STEP-14	STEP-15
STEP-16	STEP-17	STEP-18

STEP-1: 自重解析 ※【 】は応力解放率を表す。
STEP-2: 下層連結路掘削 【 $\alpha=12\%$ 】 STEP-3: 覆工 【 $\alpha=88\%$ 】
STEP-4: 上層本線掘削 【 $\alpha=12\%$ 】 STEP-5: 覆工 【 $\alpha=88\%$ 】
STEP-6: 上層連結路掘削 【 $\alpha=12\%$ 】 STEP-7: 覆工 【 $\alpha=88\%$ 】
STEP-8: 下層本線掘削 【 $\alpha=11\%$ 】 STEP-9: 覆工 【 $\alpha=89\%$ 】
STEP-10: 上下層内部支保工設置，下層上半掘削 【 $\alpha=40\%$ 】
STEP-11: 下層アーチ支保工設置 【 $\alpha=60\%$ 】
STEP-12: 上層上半掘削 【 $\alpha=40\%$ 】
STEP-13: 上層アーチ支保工設置 【 $\alpha=60\%$ 】
STEP-14: 上下層上半覆工，下層下半掘削 【 $\alpha=100\%$ 】
STEP-15: 上層下半掘削 【 $\alpha=100\%$ 】
STEP-16: 上下層補強梁設置，下半覆工，中間部掘削 【 $\alpha=100\%$ 】
STEP-17: 下層内部構築，内部支保工撤去
STEP-18: 上層内部構築，内部支保工撤去

表-2 解析に用いる地盤定数

土質	層厚 (m)	γ (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	E _o (kN/m ²)	ν
Mg	6.612	20.0	0	40	72,800	0.35
Tog	1.400	20.0	0	42	140,000	0.30
Kc	-	19.0	710	14	527,000	0.35

注) γ : 単体重量 C: 粘着力 ϕ : 内部摩擦角 E α : 変形係数 ν : ポアソン比

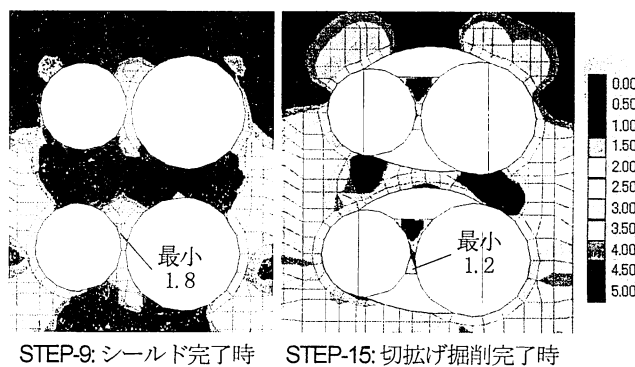


図-9 中間地山の破壊安全率

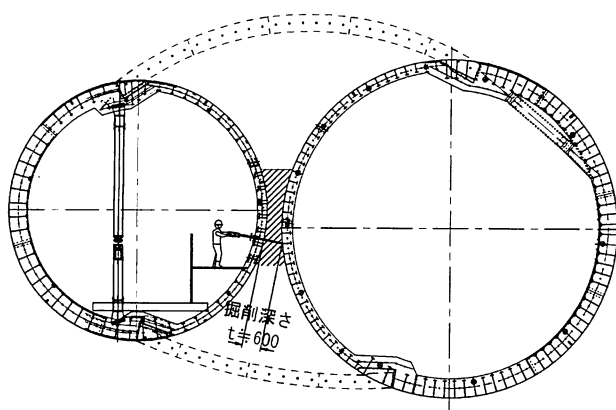


図-10 中間地山の空洞，緩み探査

(3) 施工誤差への対応

併走する本線と連結路は，シールド施工後に切開いて互いにセグメントにより閉合するため，蛇行やローリング，縦断方向のずれ等の施工誤差を制御し，高い精度で施工する必要がある（図-11）．

本工事では，過去（中央環状新宿線シールド）の施工実績を踏まえて，シールド施工誤差の管理値を表-3のように設定した．これに対して，設計および施工上の対策を以下のとおり実施した．

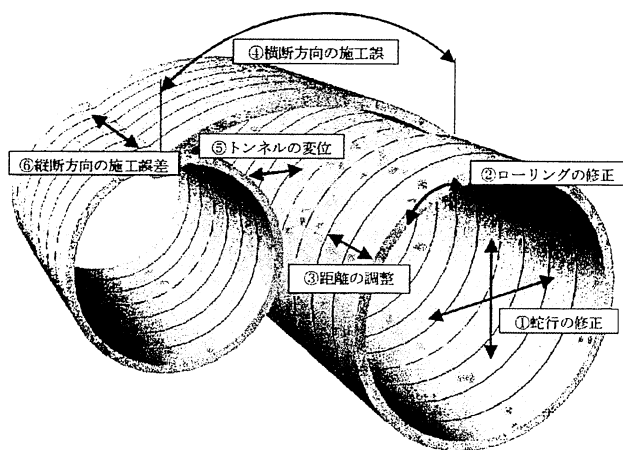


図-11 シールド施工誤差の概念

表-3 シールド施工誤差の管理値

	本線	連結路
蛇行（上下，左右）	±100mm	±50mm
ローリング	±100mm	±50mm
縦断方向のずれ	±50mm	

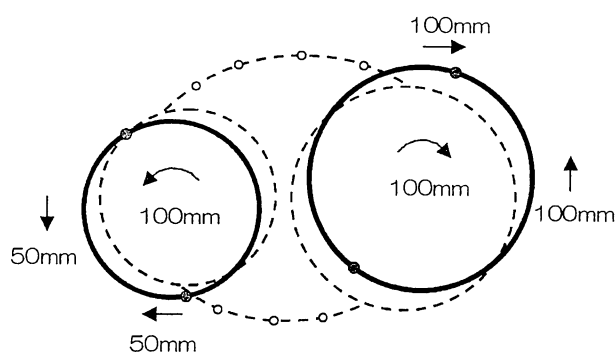
a) 設計上の対策

蛇行やローリングが生じると本線と連結路の位置関係が変化し，切開き完成系のセグメント応力度も変化する．そこで，この位置関係の変化を構造解析に反映し，増加する応力度を見込んで部材を設計した（図-12）．なお，

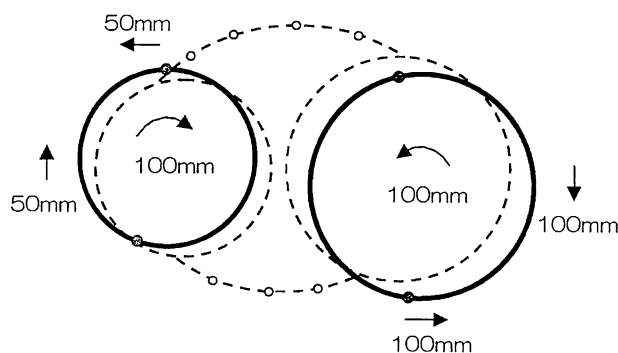
これによる応力度の増加率は6%程度である．

また，縦断方向のずれが生じると，本線および連結路のセグメントと切開き部のセグメントを同一横断面上で組み立てられない．そこで，本工事では切開き部のセグメントを本線セグメントの出来形位置に合せて組み立て，連結路セグメントとの接合部において主桁ずれを50mmまで許容することで施工誤差を吸収するものとした．

ここで，この接合部には主桁ずれにより偏心した軸力と曲げモーメントが作用し，継手板への過大な応力集中が懸念されるが，3次元FEM解析および1/2スケール要素載荷試験により，その安全性を検証した（図-13）．また，当該箇所はイモ継ぎとなり構造解析上は回転ばねとしているが，主桁ずれの分，継手板の変形が増加し回転剛性が低下することを考慮して設計した（図-14）．

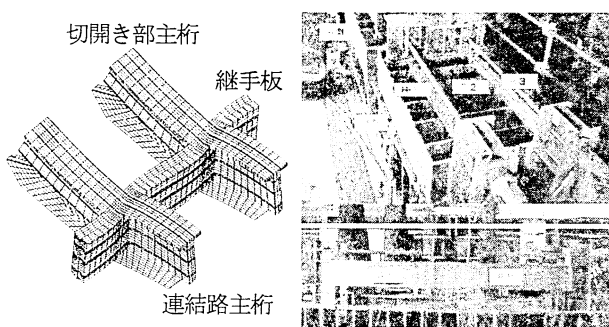


〔上部アーチ最長ケース〕



〔下部アーチ最長ケース〕

図-12 構造解析における蛇行，ローリングの考慮



〔3次元FEM変形図〕

〔1/2スケール要素載荷試験〕

図-13 主桁ずれに対する構造検証

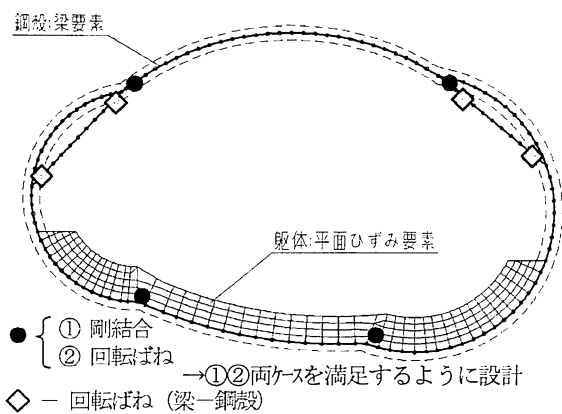


図-14 構造解析上のアーチ鋼殻接合部の取扱い

b) 施工上の対策

切開き部は特殊形状のセグメントを用いるため、通常のテーパリングによる蛇行修正が適用できない。そこで、本工事では板厚がテーパ状に変化するプレートリング間に挟む方法を採用し、また、縦断方向のずれを調整するストレート状のプレートも使用した（図-15）。なお、先行シールドは設計位置を基準に、後行シールドは先行シールドの出来形位置を基準に施工管理を行うことで、相対的な施工誤差を抑制するよう配慮した。

また、切開き部アーチ鋼殻の両端ピースは製作を保留しておき、アーチ掘削後に接合部を直接測量して、これに合せて弧長と継手板の面向きを調整して製作することで、最終的な施工誤差を吸収することとした。

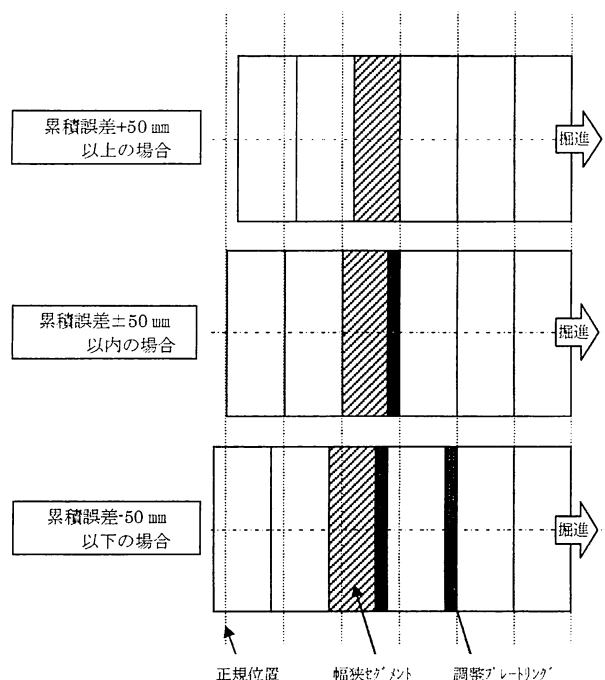


図-15 縦断方向ずれの調整方法

(4) 連結路シールドの転用

連結路シールドは延長が約500mと短く、上下層の2本

を施工するため、1台のシールドを転用するのが合理的である。しかし、Uターン方式は地上の制約から回転立坑の設置が困難であり、転用部品を分解、回収し、立坑等で再組立する方式は長期間を要する。

そこで、本工事ではシールドを内、外胴の二重構造とし、下層シールド到達後に駆動部を収納した内胴を引抜き、立坑まで坑内を搬送して上層シールドに組込むことで、転用工期の短縮、コスト低減を図った⁴⁾（図-16）。

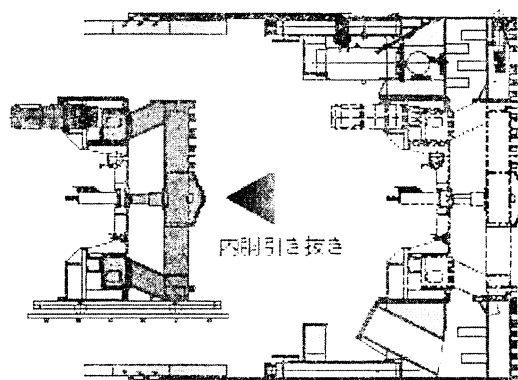


図-16 内胴引き抜き再利用シールドの概念

4. 施工結果

(1) 併設トンネルの影響

実施工におけるシールド通過順序は、①連結路下層、②本線上層、③連結路上層、④本線下層の順であった。本工事での代表的な挙動として、後行シールド④に相対する先行シールド①の側部セグメント変位は最大8mmほど内空側に押し込まれ、後行シールド通過後も残留する傾向を示した。一方で、先行シールドに設置した土圧計は後行シールド通過時に最大100kN/m²ほど上昇した後、概ね10日後には通過前と同程度まで下降して収束した。

以上から、超近接併設シールドの影響として、本工事ではシールド掘削による応力解放よりも裏込注入圧の方が支配的であり、間隙水の移動等により裏込注入圧が消散した後も、周囲地盤に拘束されて変形が残留するものと推察される。また、このような挙動は本工事のように自立性の高い固結した地盤における特徴であると考えられる。

(2) 中間地山の安定

後行シールドを代表して連結路上層シールドにおける切羽泥土圧、裏込注入率、排土率の実績を図-17～図-19に示す。分合流部におけるシールド掘進地盤は、全断面が自立性の高い泥岩層であることから、連結路シールドの切羽泥土圧、裏込注入圧を以下のように設定し、掘進管理を行った。

$$\text{切羽泥土圧} = \text{地下水圧} \pm 20 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{裏込注入圧} = \text{切羽泥土圧} + 200 \text{ kN/m}^2$$

この結果、切羽を安定的に管理することができ、裏込注入率および排土率の推移からも中間地山の崩落や取り込み過多が想定されるような事象は認められない。また、シールド施工後に実施した中間地山の探査（図-10）においても空洞や著しい緩み箇所は無く、本線と連結路の連絡用に設置した人通孔においても、写真-2に示すように中間地山および裏込注入層ともに密実で良好な状態であることが確認された。

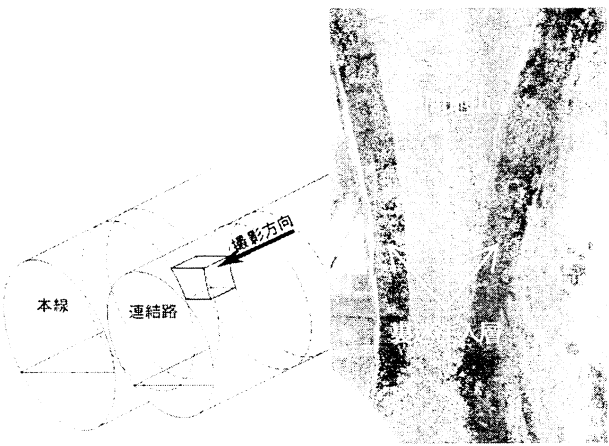


写真-2 中間地山の状況

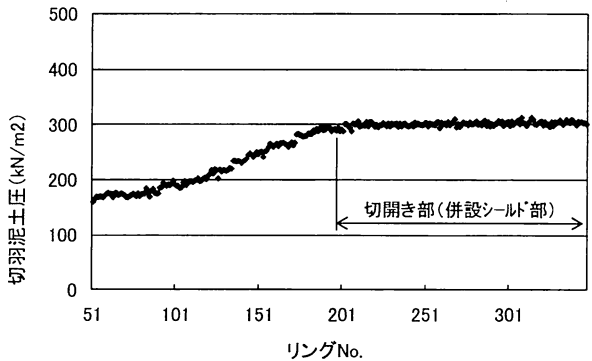
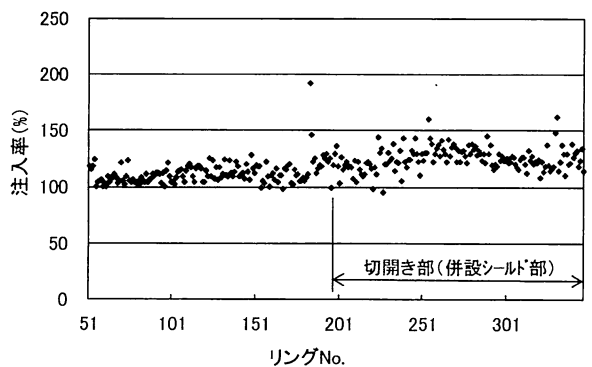


図-17 切羽泥土圧（連結路上層）



※切開き部（鋼殻セグメント）で増加傾向にあるが、スキンプレートの変形に起因すると考えられる。

図-18 裏込注入率（連結路上層）

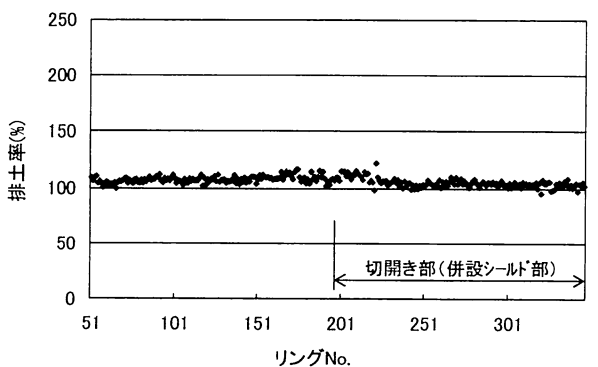


図-19 排土率（連結路上層）

(3) 施工誤差

シールド施工誤差の実績について、上層シールドの例を図-20に示す。

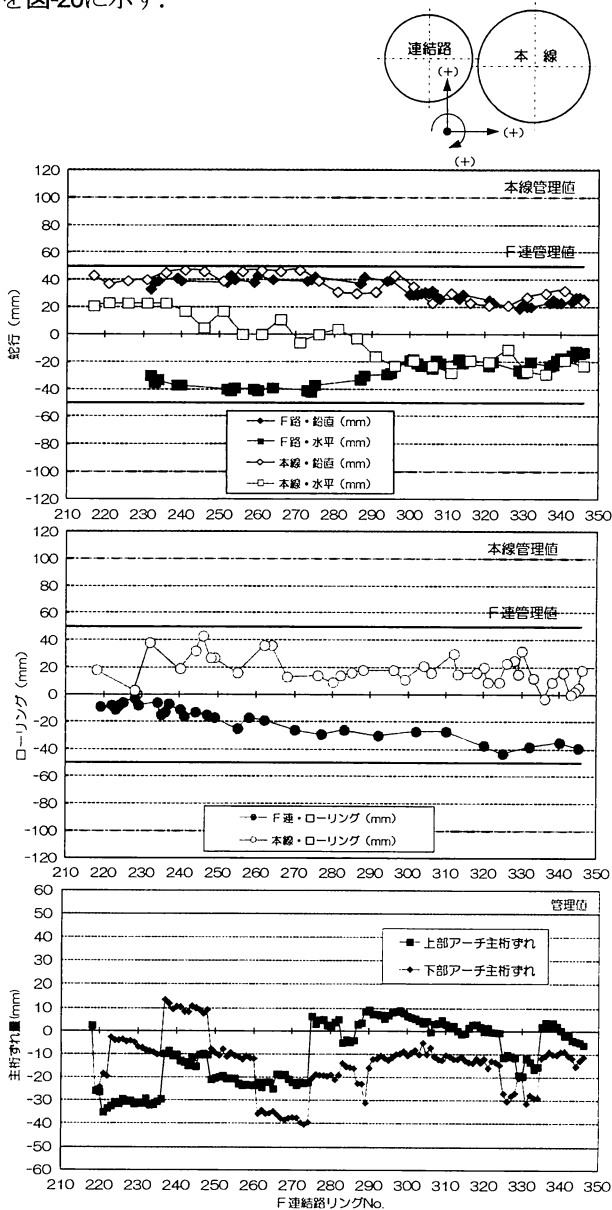


図-20 シールド施工誤差の実績（上層本線～連結路）

前述したシールド施工誤差の抑制対策により、上層、下層の本線、連結路全てについて管理値（表-3）を満足する結果が得られた。

(4) 連結路シールドの転用

連結路下層シールドの内胴引抜き、坑内搬送から連結路上層シールドへの組込みまでトラブル無く、約6日間（昼夜作業）で施工を完了した（写真-3）。大断面では初めて本工法を適用したが、下層シールド到達から上層シールド発進までの転用工程を約4ヶ月に短縮（分解、再組立方式では約7ヶ月）でき、優位性が確認された⁴⁾。

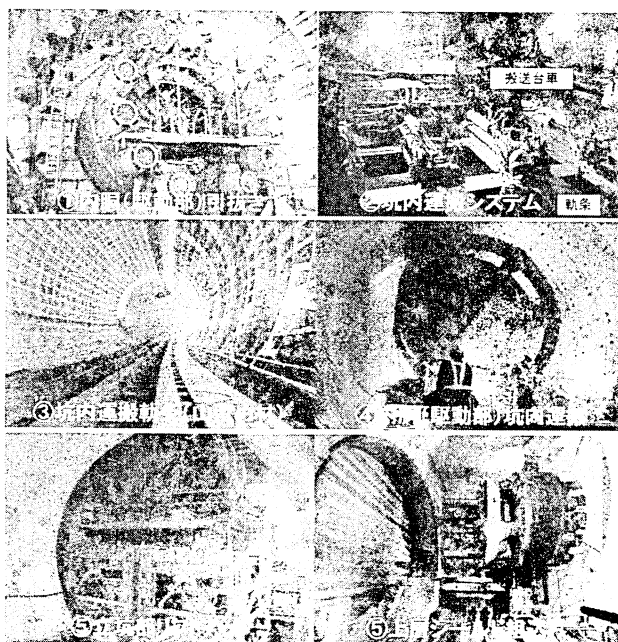


写真-3 内胴引抜き再利用シールドの実施状況

(5) まとめ

大断面シールドの超近接併設施工について、本工事により得られた知見を以下にまとめる。

①都市部大深度地下の自立性の高い固結地盤において

は、地盤改良や内部支保工等の特別な対策を施すことなく、離隔0.5m（本線シールド外径比0.04Do）で超近接併設シールドの施工が可能である。

②自立性の高い固結地盤では、併設トンネルの影響として掘削応力解放に比べて裏込注入圧が長期的に支配的となる場合があり、注意を要する。

③綿密な施工管理により高いシールド施工精度を確保可能であり、併設シールドを切開いてセグメントにより相互を接合する方法が実現可能である。

5. おわりに

2012年3月に中央環状品川線の全4本のシールド施工が完了し、同9月現在、大橋連結路工事では本線分合流部の切開き掘削を開始したところである。

今後、本格的に非開削切開き工事を進めるにあたり、中央環状新宿線で培った切開きに関する経験を活かし、さらに有識者の貴重なご意見を賜りながら、地質状況や地山挙動等に注意して、慎重に施工していく所存である。

参考文献

- 1) 石田高啓，齋藤亮，長田光正，井上隆広，小倉靖之：道路シールドトンネル分合流部における覆工構造の合理化に関する研究，トンネル工学報告集，第19巻，pp.257-262，2009。
- 2) 田嶋仁志，岸田政彦，川田成彦，小林靖典，斉藤正幸：併設シールドトンネルの影響評価方法に関する検討，トンネル工学研究論文・報告集，第13巻，pp.407-412，2003。
- 3) 石田高啓，齋藤亮，八木芳行，守田貴裕：超近接して施工する4シールドトンネルの併設の影響，第64回年次学術講演会講演概要集，pp.835-836，2009。
- 4) 中西禎之，前川敦，高橋潤，井上隆広：シールドの内胴転用を図った上下2層大断面トンネルの施工，トンネルと地下，Vol.43，No.6，pp.13-24，2012。

(2012.9.3 受付)

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SUPER ADJACENT QUADRUPLTS SHIELD TUNNELS FOR A JUNCTION TUNNEL

Hiroyuki USHIKOSHI, Yoshiyuki NAKANISHI, Takahiro INOUE,
Yasuyuki OGURA and Tsuneo HANASHIMA

This report describes a way to design and construct adjacent multiplex shield tunnels for a junction. FEM analysis was employed to study impact on the preceding tunnels by the following tunnels, and also stability of the ground between these shield tunnels. As another important issue, construction errors of shield tunnels were considered into the structural analysis of the segmental linings to integrate the access tunnel and the main tunnel driven individually. In addition, careful construction management was implemented, construction good result was obtained.