

営業線下を施工する小田急小田原線 双設シールドトンネル工事 THE SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION OF ODAKYU ODAWARA LINE THAT IS CONSTRUCTED UNDER THE EXISTING RAILWAY

小川 司¹・中込 芳雄²・田口 龍二³・日高 直俊⁴

Tsukasa OGAWA・Yoshio NAKAGOME・Tatsumi TAGUCHI・Naotoshi HIDAKA

The project for continuous underpass and quadruple track were carried out simultaneously in about 2.2km of the distances between Yoyogi-uehara Station and Umegaoka Station.

In the Shimo-Kitazawa station, the structural form is Two line two layer type that uses the shield tunneling with cut-and-open method.

Because it was necessary to restrain the deformation of the lining from the viewpoint of safety of the railway, the bending rigidity equal to the main girder of the segment is given to the segment joint.

In this thesis, the concept of the design of steel segment that considered construction step, and the result of the full-scale model experiment with segment joint is described.

Key Words: shield tunnel, open cut construction, cut and open, construction step, segment joint

1. はじめに

小田急線は新宿を起点とし，都心と神奈川県中部方面を結ぶ延長約120kmにわたる鉄道路線で，1日189万人が利用する首都圏の重要路線であるため，最混雑区間である世田谷代田駅～下北沢駅間では，朝のラッシュ時には，190%の混雑率にまで達し，さらに，過密ダイヤにより列車速度が低下する等，輸送改善が必要となっている。また，これに関係する踏切は，1時間に50分以上遮断し，周辺道路は慢性的な交通渋滞が生じている。

これらの問題を解決するため，東京都と小田急電鉄は，連続立体交差事業と複々線化事業（4線化）を代々木上原駅～和泉多摩川駅間において一体的に進めており，すでに郊外方の梅ヶ丘駅～和泉多摩川駅間8.8kmの4線高架化（一部掘割化）が完成し，30箇所の踏切が解消された（図-1参照）

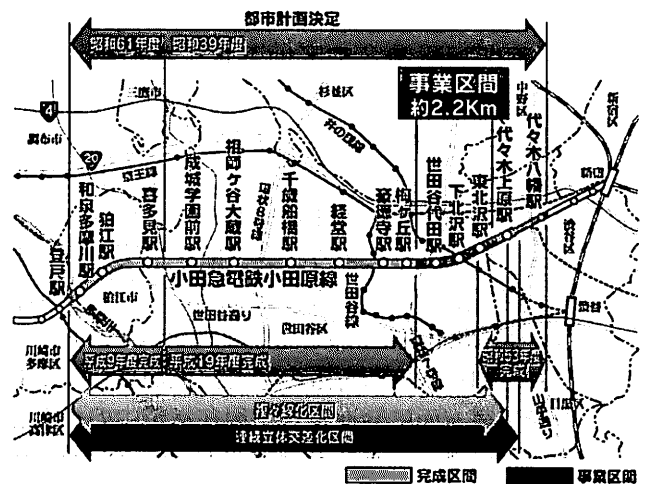


図-1 都市計画決定区間

キーワード：シールド工法，開削工法，切抜げ，施工手順，セグメント継手

¹小田急電鉄株式会社 複々線建設部 課長

²小田急電鉄株式会社 下北沢工事事務所 所長

³大成建設株式会社 東京支店

⁴正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部

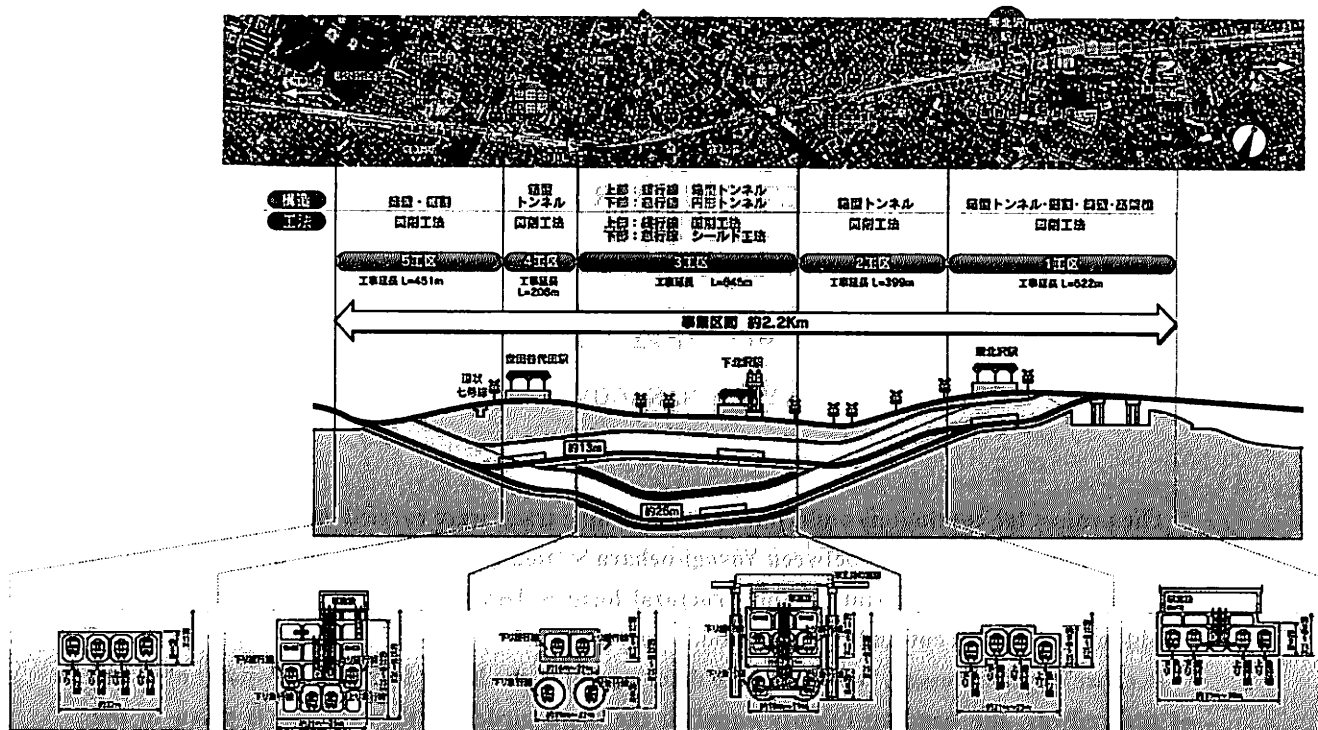


図-2 代々木上原駅～梅ヶ丘駅間の連続立体交差および複々線化事業

現在、都心方の代々木上原駅～梅ヶ丘駅間に残された 1.6km の地下化事業を進めている。このうち、下北沢～世田谷代田区間における複々線化工事は、図-2 に示すとおりシールド工法と開削工法により 2 線 2 層構造を 2 期にわたり施工する。

本稿は、本事業における、下北沢駅部切抜け部の施工手順を考慮したセグメントの設計、およびセグメント継手部実物大模型実験結果について報告するものである。

2. 下北沢駅第3工区地下化工事概要

(1) 第3工区工事概要

第3工区は、地下に急行線（シールドトンネル）と緩行線（ボックスカルバート）およびシールドセグメントの切抜けにより下北沢駅を構築する工事であり、施工延長は約 645m となる。

図-3 に駅部切抜け部断面概要図を示す。1 期工事では、世田谷代田駅付近の発進立坑からシールドマシンを新宿方面に発進させ、現在営業中の小田急小田原線の直下を掘り進み、下北沢駅直下を通過後、回転立坑で反転して小田原方面に向かって掘り進み、直径 8.1m、延長 645m のシールドトンネルを 2 本築造する。同時に下北沢駅部約 180m の軌道の仮受けを行い、その直下を掘削しシールドトンネルと接続し、地下の駅構造物となる上部ボックスカルバートを構築する。工事完了後、既設路線を地下トンネル内に切り替え、道路と鉄道の立体交差化が完了し、事業区間全体で 9 箇所の踏切が取り除かれる。

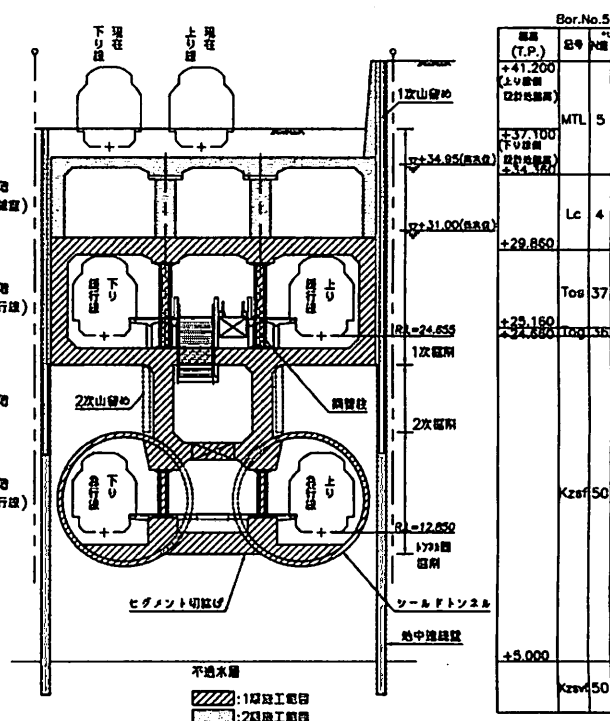


図-3 駅部切抜け部 構造概要

2期工事では、下北沢駅から新宿側約155mの区間と小田原側310m区間を地上から開削工法により、営業線直上を低土被りで掘削し、ボックスカルバートを構築する。緩行線が上部ボックスカルバート、急行線が下部シールドトンネルを運行し、複々線化が完了する。

これ以降において、セグメントの切掘げを伴い、ボックスカルバートと一体化する下北沢駅部の区間を駅部切掘げ部、ボックスカルバートと一体化しない区間を一般部と称する。

図-4に本工区の土質縦断面図を示す。

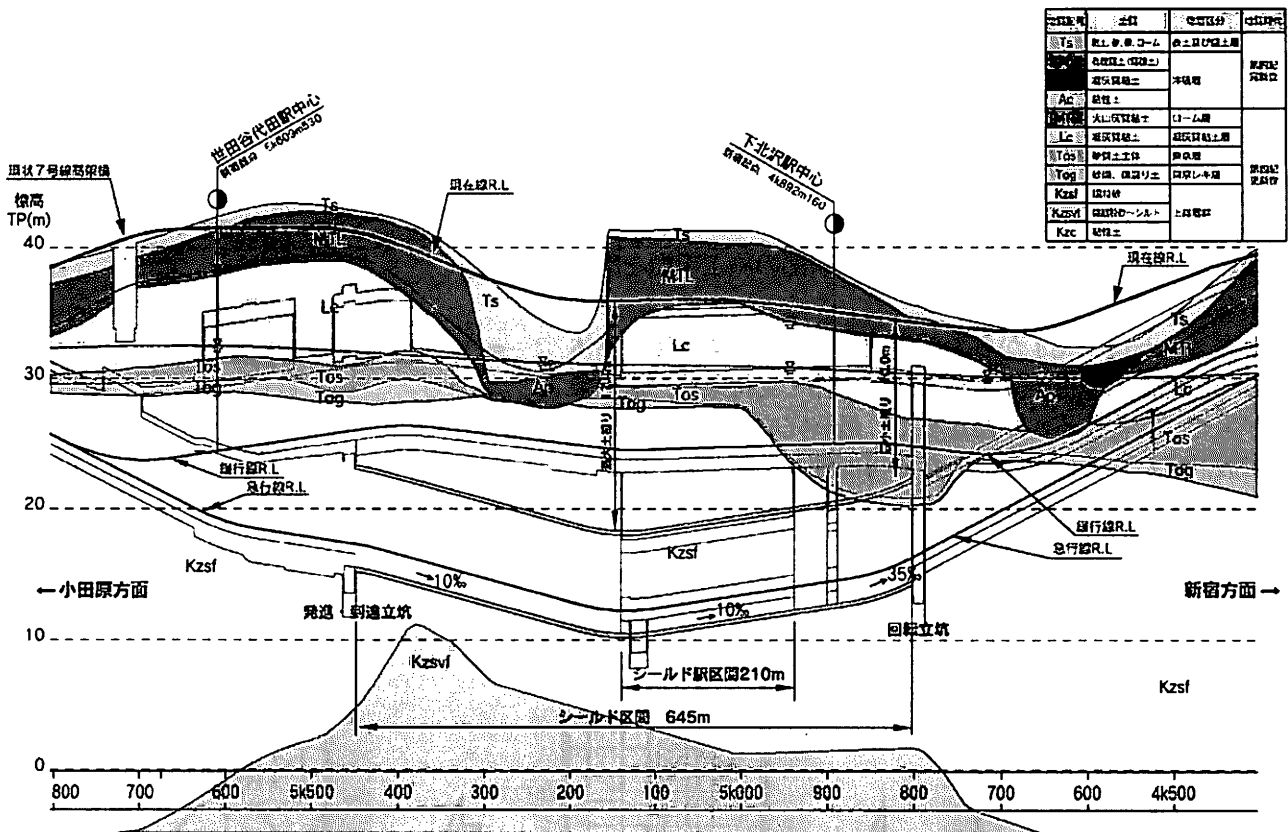


図-4 土質縦断面図

(2) シールドトンネル工事の特徴

本事業のシールドトンネル工事は下北沢～世田谷代田間（下北沢駅を含む）を結ぶ併設単線シールドで、世田谷代田駅付近の立坑を発進し、下北沢駅付近（新宿方）の立坑でUターンして2本（上下線）のシールドトンネルを構築する計画である。トンネル外径 $\phi 8,100\text{mm}$ 、掘削延長1,290mを泥水式シールド工法により施工する。

本工事で使用するシールドマシンを写真-1に示す。マシン外径は $\phi 8,260\text{mm}$ 、機長8,820mm、総重量約550tである。トンネル土かぶりは約13～20mで、シールドトンネル部の土質は、図-4に示すように良好な上総層（N値50以上）内に位置する。

本工事の特徴を以下に示す。

- ①過去に例が少ない、在来線直下を並行して掘進するシールド工事
- ②京王井の頭線交差部直下の掘進
- ③住宅密集市街地での工事
- ④併設シールドの切り掘げによる駅舎構築（下北沢駅）
- ⑤在来線地下化後、シールドトンネル上部を開削工法にて、緩行線トンネルを構築

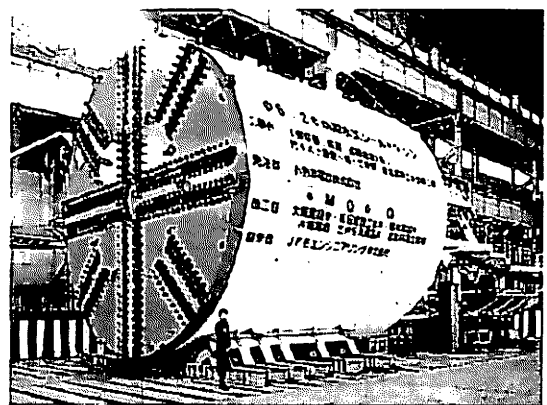


写真-1 泥水式シールドマシン

3. 駅部切上げ部の設計

(1) セグメントの設計概要

当該工事区間は、全域にわたり既設電車線の直下であり、かつ、下北沢駅部は下受けした橋上駅舎となるため、電車運行の安全性を確保できる詳細な設計と施工を行う必要がある。そこで、以下に示す主な課題とその対策について検討を行い、セグメントおよび変形防止工の仕様を決定した。

- ① 掘削に伴うトンネル変形と被圧地下水対策
- ② シールド切上げ工事における地盤とトンネル本体の安全性
- ③ セグメントリングの剛性一様性の確保

決定したセグメント構造を図-5に、駅部の施工手順を図-6に示す。

セグメント覆工完了から上部開削、切上げによるRC 躯体との一体化、躯体構築完了まで荷重条件・支持条件・構造条件が大きく変化する。したがって、最終完成時の単独解析のみで設計することは危険側となる可能性があるため、施工手順を考慮した逐次解析を併用することとした。

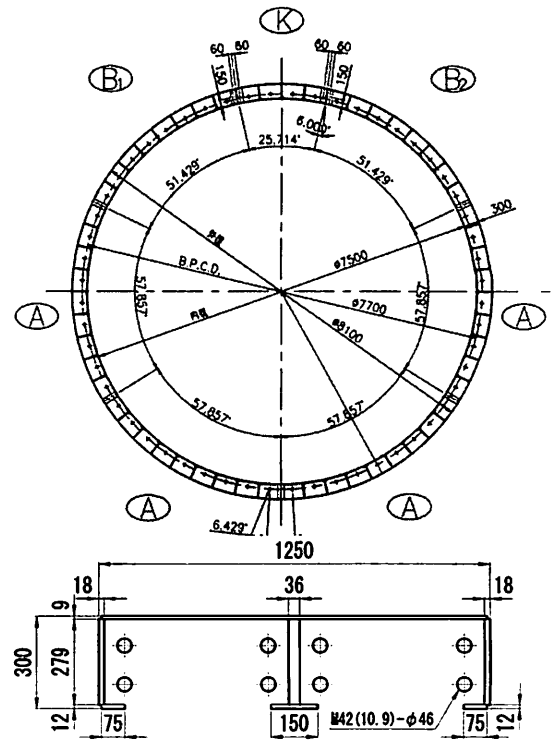
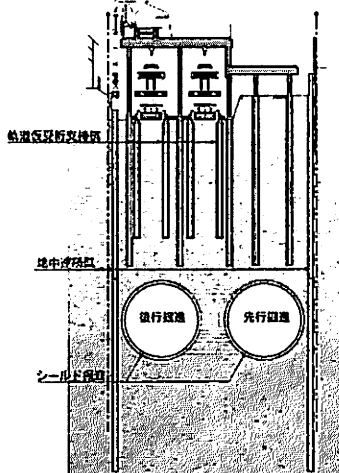
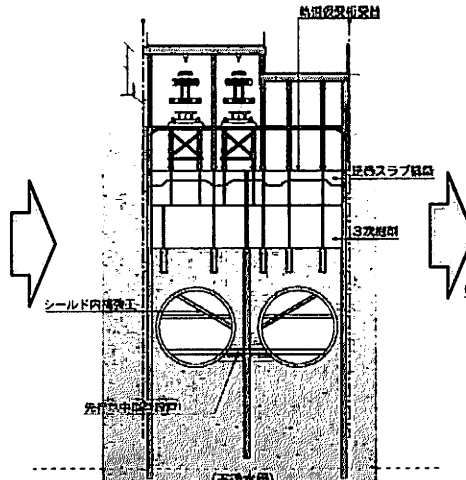


図-5 駅部切上げ部セグメント構造図

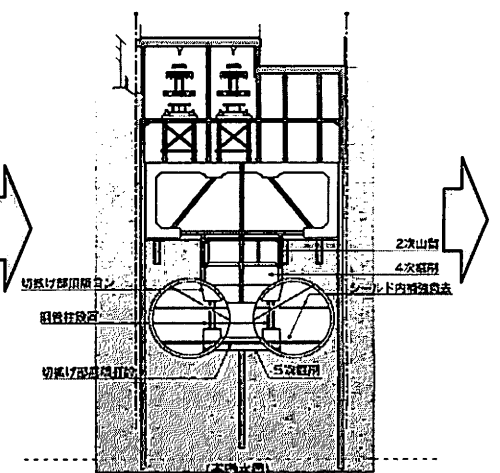
① 作業構台設置・軌道仮受桁設置・シールド掘進



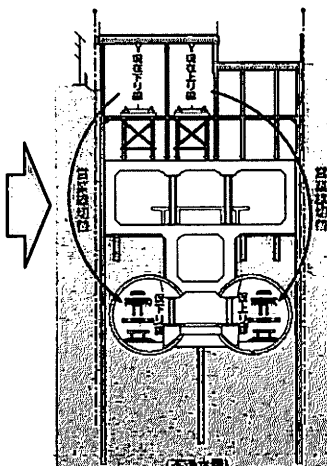
② 掘削・B2Fスラブ構築・軌道仮受桁受替



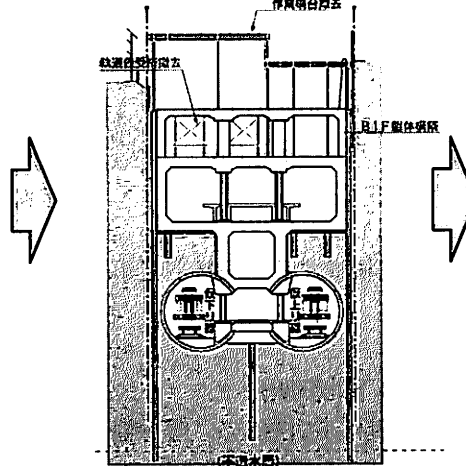
③ トンネル間掘削・切上げ部躯体構築



④ B2F～B3F 残躯体構築 1期工事完成(現在線地下化)



⑤ 軌道仮受桁、作業構台撤去 B1F 躯体構築



⑥ 完成

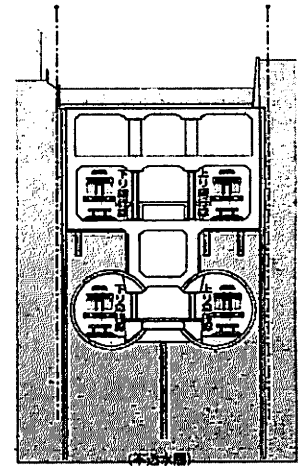


図-6 駅部施工手順概要

4. 掘削に伴うトンネル変形と被圧地下水対策

本工事における変形防止工配置計画を図-7 に示す。切抜げ工事においては、施工時のセグメント発生断面力を抑制するために変形防止工を配置する。従来の鉄道工事では、変形防止工を井形配置としている例が多く見られる。水平材を2本配置しているのは、上部掘削時の鉛直荷重減による偏圧の影響により、セグメントが縦長に変形するのを効果的に抑制するためである。また、斜材を配置することで、併設トンネル間の上部掘削時におけるセグメントの変形および発生断面力を抑制する。なお、トンネル間掘削前に推進工法にて鋼管を施工し先行地中梁とすること、および盛替トンネル間支保工を設置することでトンネル間掘削時の構造安定性を確保する。

被圧地下水対策としては、シールドトンネル上部およびシールドトンネル間掘削時において浮上りに対する安定を確保するために、SMW と薬液注入で構成される土留め壁内の水位をシールドトンネル下端以下までディープウェルで低下させることとした。

5. シールド切抜げ工事における地盤とトンネル本体の安全性

解析モデル図を図-8 に示す。地盤の塑性化を考慮したバイリニア型の地盤ばねをセグメント周面に付して逐次解析を行って構造不安定とならないことを確認しており、各施工段階における地盤とトンネル全体系の安定性を確保できると判断した。

トンネル本体の安全性を確かめるために施工段階を考慮した逐次解析および完成時単独解析を行った。その解析結果と部材の照査結果を表-1 に示す。主桁は逐次解析の最終完成時、ボルトは施工時で最大応力度比率となっており、施工段階を考慮した設計手法を採用したことにより安全性を確保できたと考える。

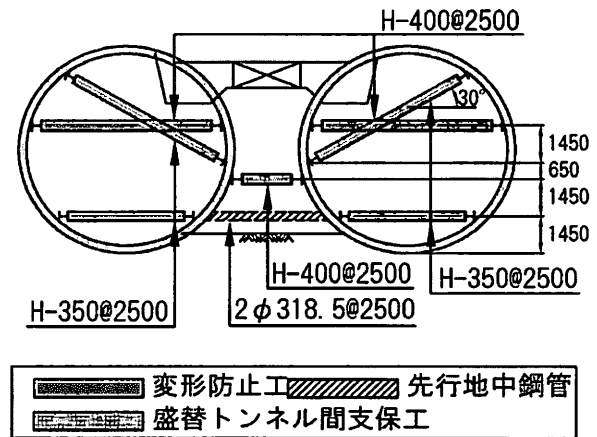


図-7 変形防止工配置計画

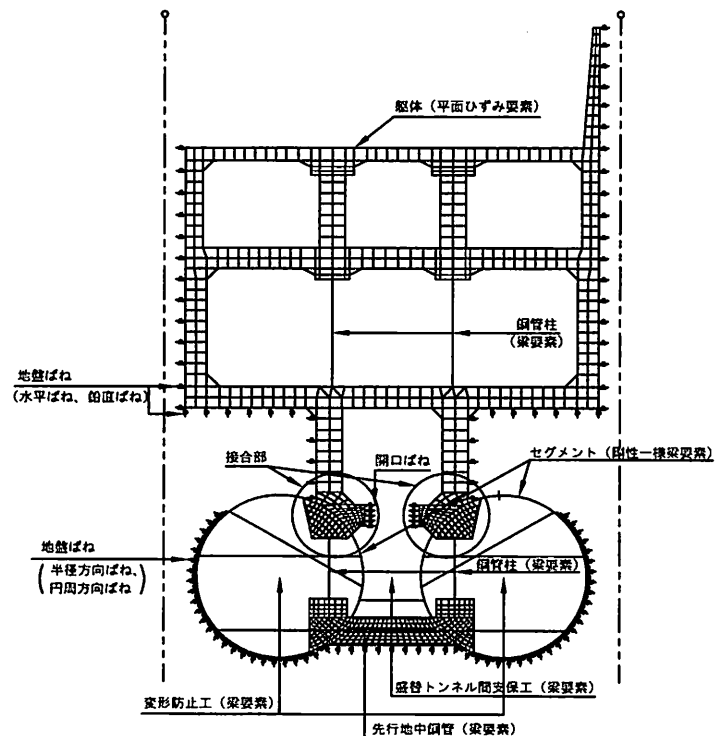


図-8 解析モデル図

表-1 駅部切抜げ部セグメント照査結果

解析条件	逐次解析		単独解析
	施工時(底版打設時)	最終完成時	完成時
曲げモーメント図 (kNm/R)			
設計断面力	M=630 kNm/R, N=-350kN/R	M=264 kNm/R, N=-1221kN/R	M=331 kNm/R, N=-1451kN/R
応力度	主桁 288 ≤ 315 N/mm2 (91%)	212 ≤ 218 N/mm2 (97%)	205 ≤ 218 N/mm2 (94%)
照査	ボルト 532 ≤ 560 N/mm2 (95%)	153 ≤ 380 N/mm2 (40%)	124 ≤ 380 N/mm2 (33%)

6. セグメントリングの剛性一様性の確保

(1) セグメント継手構造

シールドトンネルのセグメントは施工時の影響により、複雑な変形および応力履歴を経ることとなる。特に2期施工は営業線を運行しながら実施するため、軌道の安全性確保の観点から覆工の変形を抑制する必要がある。そのため、セグメント本体と同程度の剛性をセグメント継手（以下、継手部）に付与し、剛性一様のセグメントリングにすべきであると判断した。

駅部切上げ部のセグメント継手の諸元を図-9に示す。

シールドトンネルには鋼製およびダクタイルセグメントを採用し、継手部は実績と施工性からボルト継手とした。ボルトの初期導入応力度については許容応力度の80%としている企業者があるが、一般に基準等に明記されていない。初期導入応力度を高めれば継手板接合面に発生する圧縮応力が増加するため、継手部の離間モーメントが大きくなり、継手部剛性の向上が期待できる。これに着目して継手部の実物大模型実験を行い、剛性一様の仮定が成立することを確認することとした。なお、初期導入応力度は「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針：（社）日本鋼構造協会」（以下、引張接合指針）を参考に降伏点の75%とした。

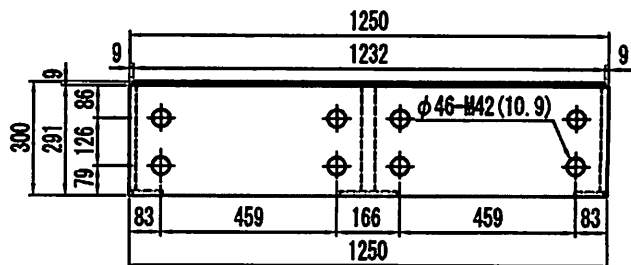


図-9 駅部切上げ部セグメント継手の諸元

(2) セグメント継手確認実物模型による実証実験概要

実験対象は駅部に採用する鋼製セグメントとし、実物大供試体を用いた軸力载荷継手曲げ試験を行った。実験概要図を図-10に示す。载荷時の継手部の挙動に着目するため、供試体の全体形状は直線とし、2ピース分を模擬した。

計測項目、計測目的および計測機器を表-2に示す。継手部の剛性向上により剛性一様とするためには、同断面を有する継手のない梁（以下、基準梁）と同様の変位性状および応力勾配を呈する必要がある。

比較対象となる基準梁の変位および発生応力度の理論値を算定する場合、スキンプレーットの取り扱いが課題となる。道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（以下、道示）によれば、鋼の応力度と変形を計算するためのフランジの片側有効幅は、等価支間長と腹板の間隔で決定される。これにより算定したスキンプレーットの片側有効幅は300mmとなり、3主桁分の合計は1200mmとほぼ全断面が有効となる。これに対し、トンネル標準示方書 シールド工法・同解説によると、セグメントの設計におけるスキンプレーットの有効幅は25t（tはスキンプレーット厚）と規定されており、片側有効幅は225mm（道示の75%）となる。そこで、理論値としてはスキンプレーット全考慮と有効幅25tのみ考慮の2種を設定するが、設計対象がセグメントであることから、設計荷重レベルの範囲内で後者の理論値と同等以下であれば、剛性一様の仮定が成立すると判断する。

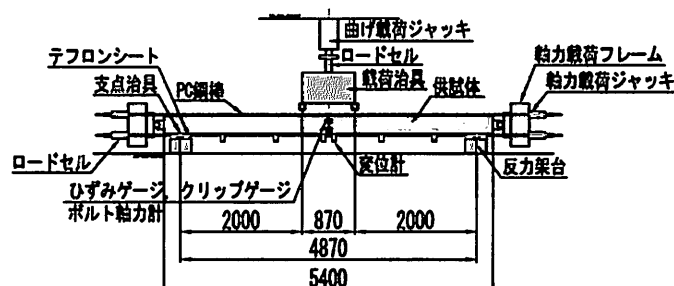


図-10 実験概要図

表-2 計測項目、計測目的および計測機器

計測項目	計測目的	計測機器
供試体変位	・理論値との比較により、剛性一様状態となっていることを確認	変位計
スキンプレーット、主桁およびフランジ応力度	・発生応力度の理論値との比較 ・平面保持の仮定が成立していることを確認	ひずみゲージ
継手板目開き	・設計荷重範囲内で目開きが抑制されていることの確認 ・変位性状との相関性の確認	クリップゲージ
ボルト軸力	・継手部での釣り合い状態の確認 ・継手部の安全性の確認	ボルト軸力計

(3) 実証実験結果

a) 実験結果概要

変位および発生応力度の実測値は、各施工段階における設計荷重レベルの範囲内で、スキンプレート有効幅 25t のみ考慮の理論値以下となった。よって、ボルトの初期導入軸力を降伏点の 75% とすれば、剛性一様の仮定が成立するといえる。

b) 変位性状

鉛直荷重—最大変位相関図を図-11 に示す。鉛直荷重増加に伴い荷重—変位関係の勾配変化が見られる。載荷初期は全幅理論値と同等であるが、設計荷重レベルでは有効幅理論値に漸近する。この勾配変化は、鉛直荷重増加に伴って初期導入軸力による継手板の圧縮応力（以下、継手板応力）が完全に解放され、目開きが発生するために起こると考えられる。

変位分布図（正曲げ）を図-12 に示す。スパン方向の変位分布は有効幅理論値と同等であり、負曲げも同様の傾向であったことから、剛性一様の仮定が成立すると考える。

c) 主桁応力度

主桁応力度の分布図を図-13 に示す。設計荷重レベルで平面保持が成立しており、中立軸は全幅理論値と同等である。

d) ボルト軸力

鉛直荷重—ボルト軸力相関図を図-14 に示す。供試体断面の中立軸より圧縮側のボルトを圧縮側ボルト、引張側のボルトを引張側ボルトとする。降伏点の 75% とした初期導入応力度に相当するボルト軸力は 790kN である。圧縮側ボルト軸力は鉛直荷重増加による変動はないが、引張側ボルト軸力は鉛直荷重 400kN 付近から増加する。この荷重レベルを軸力増加点と定義すると、図-11 の勾配変化点とほぼ同値であることがわかる。すなわち、曲げ応力度の引張合力により継手板応力が解放されて目開きが発生し、引張側ボルトが応力を負担するため軸力が増加する。

引張接合指針では許容応力度を降伏点の 90% としており、これに相当する許容軸力は 947kN となる。設計荷重レベルにおけるボルト軸力の最大値は正曲げで 910~930kN、負曲げで 820~850kN であり、許容軸力以下となっている。

e) 目開き

鉛直荷重—目開き相関図を図-15 に示す。正負曲げともに鉛直荷重 400kN 付近での勾配変化が見られる。これは目開きが発生したことを表しており、図-11 の勾配変化点、図-14 の軸力増加点と同値であることから、変位・ボルト軸力・目開きが相互に関連しているといえる。なお、正負曲げで載荷初期の勾配が異なるのは、正曲げ

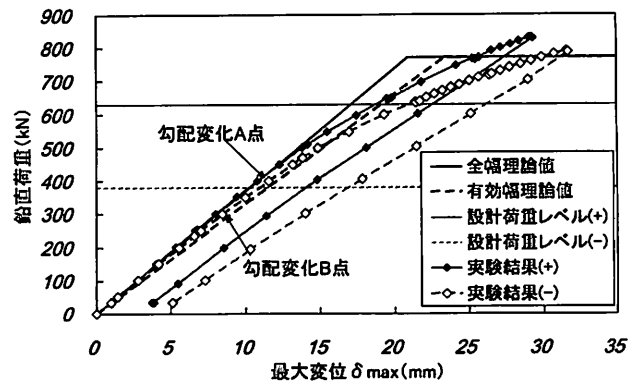


図-11 鉛直荷重—最大変位相関図

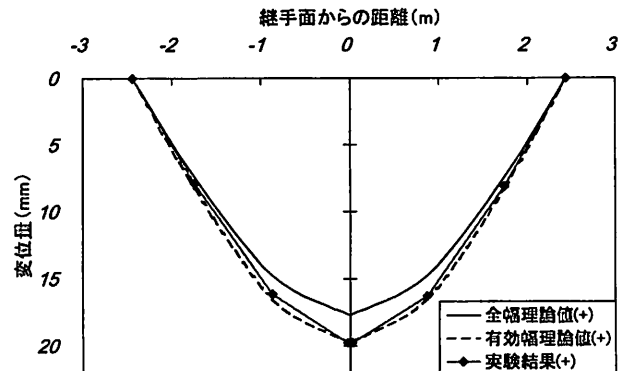


図-12 変位分布図

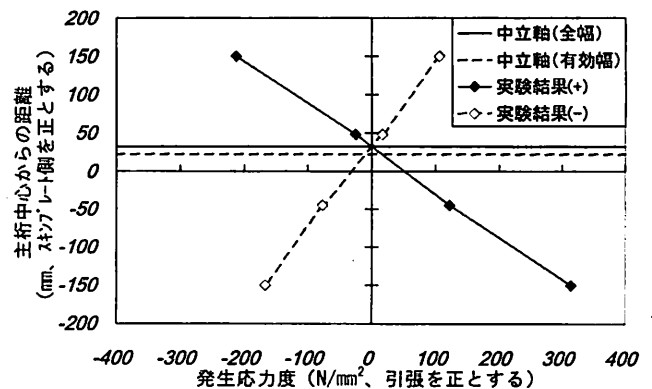


図-13 主桁応力度分布図

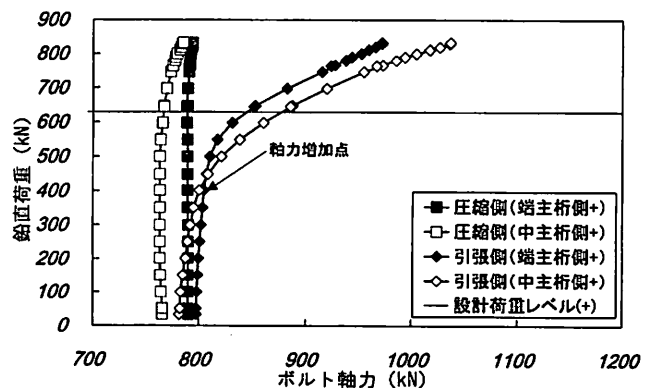


図-14 鉛直荷重—ボルト軸力相関図(+)

は負曲げと比較してボルト位置が引張縁に近く、継手板応力の分布範囲が引張縁近傍に及ぶため目開きしにくいことによると考えられる。

基本ケースでの設計荷重レベルにおける目開き量は 0.5mm 程度と微小であり、実施工において十分な止水性能を確保できる。

f) まとめ

- ・基本ケースにおいて、勾配変化点は正負曲げにより異なるが、両者とも設計荷重レベルでの変位は有効幅の理論値以下となる。したがって、ボルト初期導入応力度を降伏点の 75% とすることで、正負曲げによらず剛性一様の仮定が成立する。

- ・主桁応力度とその分布状況から、平面保持が成立しており、中立軸は全幅理論値と同等である。

- ・ボルトの初期導入応力度を降伏点の 75% とした場合、鉛直荷重増加に伴う軸力増加は、引張ボルトのみ発生する。設計荷重レベルにおけるボルト軸力は引張接合指針の許容軸力以下であり、設計上の安全性は確保されている。

- ・基本ケースでの設計荷重レベルにおける目開き量は 0.5mm 程度と微小であり、十分な止水性能を有する。

- ・変位の勾配変化、ボルトの軸力増加および目開き発生の荷重レベルはほぼ同値であり、変位、ボルト軸力および目開きは相互に関連している。

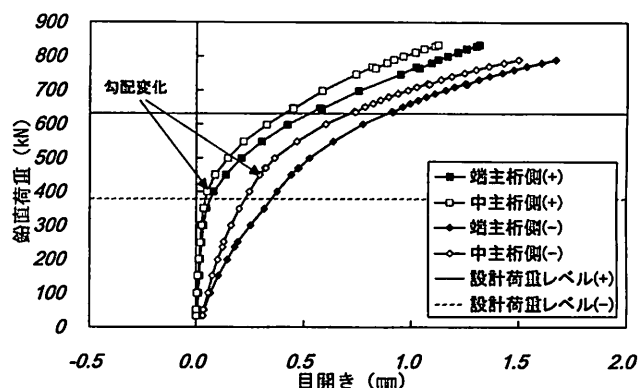


図-15 鉛直荷重－目開き相関図

7 おわりに

本工事においては、各施工ステップによって、荷重・地盤・構造に関する条件が大きく変化することを考慮したトンネル設計を実施して、シールドは、平成20年6月23日発進立坑を、土留め壁直接切削により発進した。

初期掘進においては、営業線直下のシールド工事であることから、各種計測機器によりトライアル計測を実施し慎重な施工を繰返した結果、掘進管理の安全を確保し周辺環境の保全が確認された。

7月31日までに約70mの掘進を行い50リングのセグメント組立てを完了して、段取換えに入り約2ヶ月の一時停止を終えた後、本格的な掘進が10月初旬より始まる。

本掘進においては、地盤挙動の把握とトンネル本体の計測による情報化施工を実施することにより、小田急小田原線の安全運行の確保を第一目標としたうえで、従来のシールド工事において解明できない事象を検証し、本工事における設計の妥当性と工事の安全性を確認していく予定である。

参考文献

- 1) 財団法人首都高速道路技術センター：トンネル技術講演会，平成17年5月18日
- 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法について，第58回土木学会年次講演会論文集第VI部門，pp275～276，平成15年9月
- 3) 種田・高嶋・西田・和田：超近接併設トンネルを泥土圧シールドで挑む，トンネルと地下，平成15年5月