

小土被り・併設条件下における 道路シールドトンネルの設計施工

林 成卓¹・蛭子 延彦²・西岡 恭輔³・吉田 公宏⁴

¹ 正会員 株式会社大林組 東京本店 八王子館シールド JV 工事事務所（〒193-0942 東京都八王子市櫛田町 554-4-103）

E-mail: hayashi.masataka@obayashi.co.jp

² 正会員 株式会社大林組 東京本店 八王子館シールド JV 工事事務所（〒193-0942 東京都八王子市櫛田町 554-4-103）

E-mail: ebisu.nobuhiko@obayashi.co.jp

³ 正会員 株式会社大林組 東京本店 八王子館シールド JV 工事事務所（〒193-0942 東京都八王子市櫛田町 554-4-103）

E-mail: nishioka.kyosuke@obayashi.co.jp

⁴ 正会員 株式会社大林組 本社 土木本部生産技術本部設計第一部（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2）

E-mail: yoshida.masahiro@obayashi.co.jp

現在整備中の一般国道 20 号八王子南バイパスは、八王子市域を東西につなぐ幹線道路である。バイパス中央付近の団地を通過する区間は開削工法が想定されていたが、その後に宅地化が進んだため、周辺環境への影響を考慮して、シールド工法で施工することとなった。用地幅の制約で上下線トンネルの離隔は全線にわたり僅か 0.9m であり、土被りも 2.6~9.9m でシールド外径 11.15m に対して極めて小さい。

そこで覆工構造設計では、土被りや地下水位に対して複数の荷重ケースを想定するとともに、トンネルの変形モードに応じて、併設施工の影響など、後行トンネルの施工時荷重が先行トンネルに与える影響を考慮した。実施工では、覆工構造設計にもとづき先行トンネル側に内部支保工の補強を行い、変位を計測しながら施工するとともに、小土被りで安全に施工するための各種対策を施した。

Key Words: Road shield, Small overburden, Two parallel tunnels, Neighboring construction, Construction Loads, Launching and arrival of shield tunnelling at ground level

1. はじめに

関東地方整備局が進める国道 20 号のバイパス事業のうち、八王子南バイパスは八王子市域を東西につなぐ延長 9.6km の幹線道路であり、周辺地域の交通混雑緩和などによる交通円滑化、地域の安全性向上、災害時の交通ネットワーク強化などを目的として整備が進められている（図-1）。そのうちバイパス中央付近のゆりのき台団地を通過する区間は、当初、開削工法による施工を想定していたが、その後に宅地化が進み家屋が連担していることから、周辺環境への影響を考慮して非開削工法で施工することとなった。これらの施工条件に対して幅広く提案を求める「設計・施工一括発注方式」で発注がなされ、泥土圧シールド工法で、小土被りでの地上発進が可能である URUP 工法が採用された。

2. 工事概要と設計・施工上の課題

本工事の概要を表-1 に、平面・縦断図を図-2、横断図を図-3 に示す。仕上り内径 9,950mm の上り線、下り線の 2 本のトンネルを、延長 455m の全線にわたって離隔 900mm で併設する。土被りは 2.6m~9.9m であり、3 本の



図-1 八王子南バイパス事業計画

市道と交差する位置関係にある。掘削対象土質はN値2～15の多摩ロームが主体であり、地下水位はトンネル中心以深で、発進側作業ヤード部ではトンネル断面より下側となっている。

施工は、シールドを発進側作業ヤードより発進し、下り線トンネルを先行して掘進した後、回転側作業ヤードに造成した回転立坑内にてUターンし、上り線トンネルを掘進する。発進側作業ヤードにはシールド設備を配置し、残土搬出やセグメント供給など、掘進の拠点とする。本工事の設計・施工における課題を以下に示す。

①覆工構造設計での課題

- ・土被りが小さいため、設計荷重の設定によってはセグメントの変形モード（縦つぶれ・横つぶれ）が変化する。
- ・併設トンネルであり、後行トンネル掘進後における周辺地盤状態の変化を考慮した覆工の安全性を確保する必要がある。
- ・離隔 900mm と超近接しているため、後行トンネル施工時の切羽圧や裏込め注入圧に対して、先行トンネルの覆工の安全性を確保する必要がある。

②施工における課題

- ・小土被り条件であり、3本の市道をはじめ地上部の影響を抑制して掘進する必要がある。
- ・併設トンネルであり、後行トンネル施工時の切羽圧や裏込め注入圧による、先行トンネル覆工への影響を確認しながら施工する必要がある。

これらの課題を踏まえた覆工構造設計、施工計画について「3. 小土被り、併設条件を考慮した覆工構造設計」、「4. 小土被り、併設条件に対する施工計画」にてそれぞれ述べる。また、「5. 施工結果」では、これらの併設施工、小土被り対策を施して施工した結果につ

表-1 工事概要

工事名称	八王子南バイパス館第一トンネル工事
発注者	国土交通省関東地方整備局
施工者	大林・西武特定建設工事共同企業体
施工場所	東京都八王子市館町地先
工事内容	一次覆工・シールド総延長 L=455m×2本 ・シールド 型式：泥土圧 シールド外径：11,150mm 装備推力：99,000kN ・RC セグメント 外径：φ10,950mm 内径：φ9,950mm 厚さ：500mm、幅：1,700mm
	仮設工 ・発進側作業ヤード：ヤード造成一式 ・回転側作業ヤード：回転立坑造成（地盤改良土留め）一式
	路体工 ・流動化処理土埋戻し

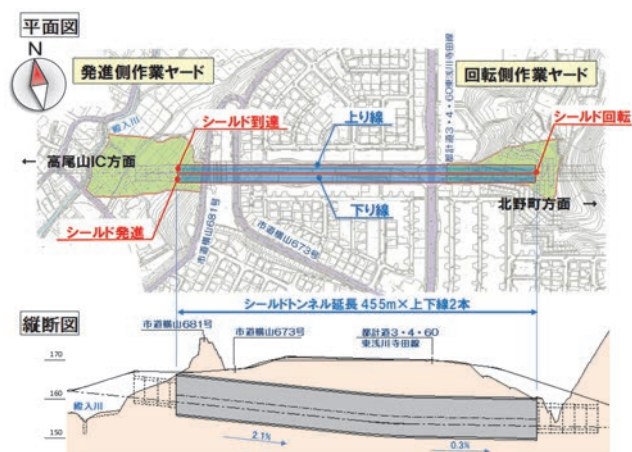


図-2 平面・縦断面図

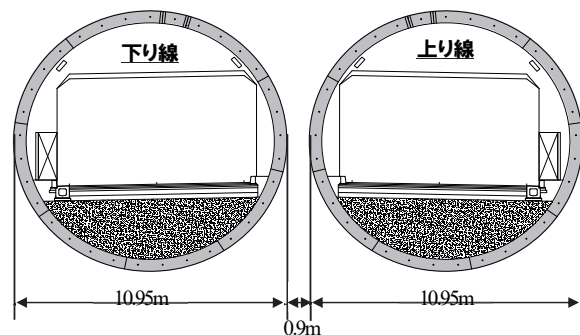


図-3 横断面図

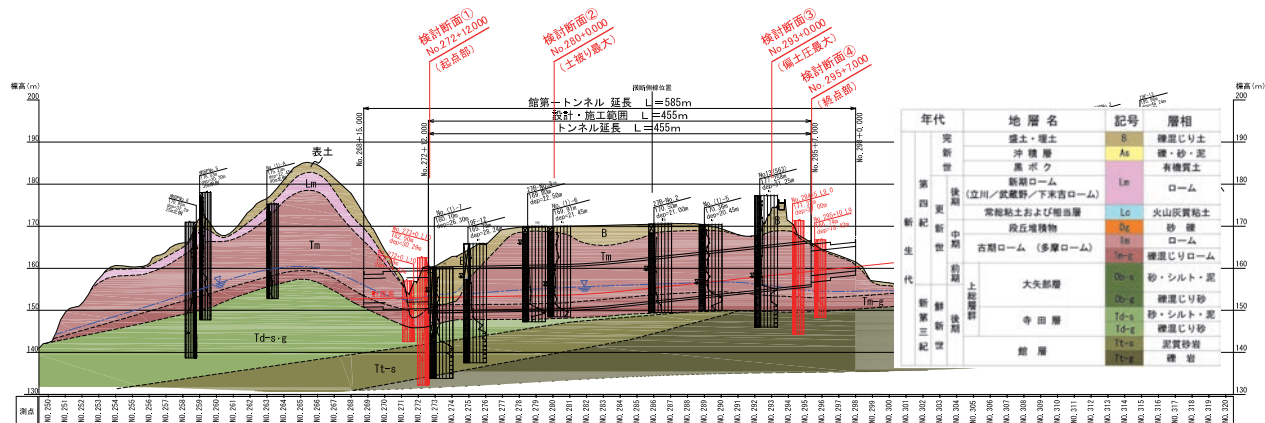


図-4 検討位置図

年代	地層名	記号	層相
更新世	礫土・埋土	S	礫混じり土
	沖積層	As	礫・砂・泥
	黒ボク	Am	有機質土
	新羅ーム	Ln	ローム
第四紀	(立川/新羅ーム/下木吉ローム)	Ln	ローム
	常盤粘土および相田層	Ln	火山灰質粘土
	段丘堆積物	Ln	砂・礫
	古期ローム (多摩ローム)	Ln	ローム
第三紀	上野層	Ln	礫混じり土
	大矢部層	Ln	砂・シルト・泥
	寺田層	Ln	砂・シルト・泥
	館層	Ln	泥質砂岩

表-2 設計計算を行う荷重の組合せ（検討断面④）

計算ケース	土水の扱い	土圧						水圧			自重 (セグメント)	地盤反力	併設の影響				備考			
		鉛直			水平			高 (季節変動)	平常 (自然水位)	低 (季節変動)			後行トンネル完成時							
		土被り	上載荷重		土被り	上載荷重							なし	解放率 $\alpha=10\%$	解放率 $\alpha=30\%$	応力解放まで		復工設置まで	応力解放まで	復工設置まで
			なし	10kN/m ²		なし	10kN/m ²													
1	土水一体	○			○						○	○	○				縦つぶれ最大			
2		○		○	○	○					○	○			○	横つぶれ最大				
3	土水分離	○	○		○		○				○	○	○				縦つぶれ最大			
4		○		○	○	○					○	○			○	横つぶれ最大				

いて述べる。

3. 小土被り，併設条件を考慮した覆工構造設計

(1) 設計概要

検討断面位置を図-4に示す。本工事のような小土被り条件では，土圧の相対値が小さく，地下水位の季節変動や上載荷重の有無がトンネルの変形モードに影響する。一般的な土被り条件では，鉛直方向の荷重が卓越し，変形モードは横つぶれとなるが，小土被り条件では，トンネル上部の鉛直土圧が小さく縦つぶれとなる場合がある。これに併設による側方からの影響を考慮する場合は，変形モードに応じて安全側となるような荷重の組合せを設定する必要がある。

そこで，①土水の扱い，②鉛直土圧，③水平土圧，④水圧，⑤併設の影響について，最も厳しくなる組合せ（「最も縦つぶれになる組合せ」および「最も横つぶれになる組合せ」）を抽出し，設計計算を行った。表-2には，代表として小土被り断面（検討断面④）での荷重の組合せを示す。

設定した荷重条件に対する断面力の算定には，はり一ばねモデルを用いた。併設影響のうち，長期的に扱うものとして図-5に示す方法で，掘削の影響を考慮する。一方，短期的に扱う一時荷重として切羽圧や裏込め注入圧を考え，図-7図-8に示す方法でその影響を考慮した。

次節より，併設影響について，「後行トンネル完成時（長期）」と「後行トンネル施工時（短期）」の2つの状態の検討方法について述べる。

(2) 後行トンネル完成時の影響検討（長期）

後行トンネル完成時の先行トンネル覆工の安全性は，影響を考慮する前の断面力に，後行トンネル施工による断面力の変化量を加えて確認する。後行トンネル施工による断面力の変化量は，施工過程を考慮した FEM 解析（図-5）により求める。STEP-3（先行トンネル覆工設置）から，STEP-4（後行トンネル地山掘削）または STEP-5（後行トンネル覆工設置）までの断面力変化分を，先行トンネルの変形モード（縦つぶれ あるいは 横つぶれ）に応じて，安全側となるように採用する（図-6）。一般的に，泥土圧シールドでの応力解放率 α は 10%～30%と

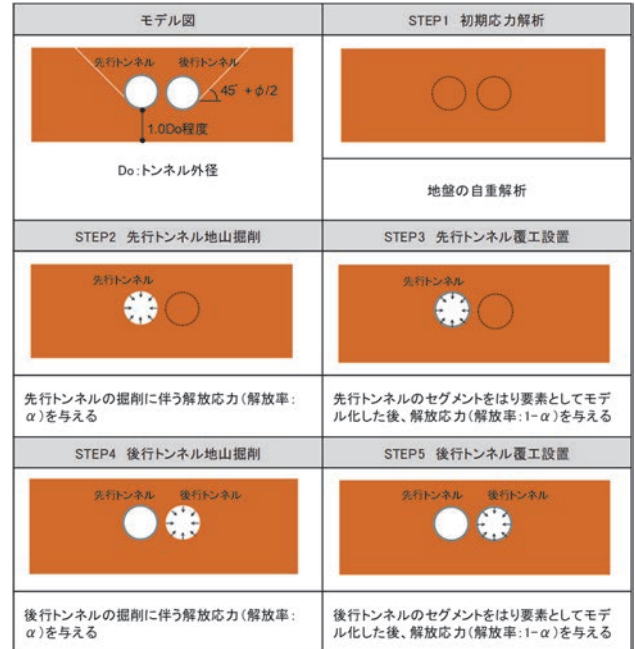


図-5 FEM解析ステップ

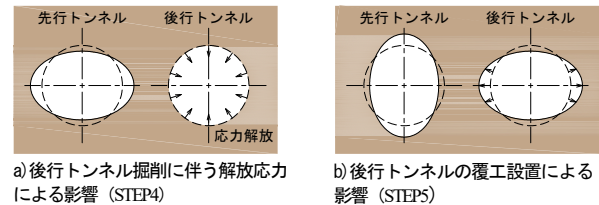


図-6 変形モードと後行トンネルの影響

されており，本検討では 10%と 30%のそれぞれで解析し，影響の大きくなる方を用いて検討した。

(3) 後行トンネル施工時の影響検討（短期）

後行トンネル施工時の切羽圧および裏込め注入圧が，先行トンネルに与える影響について，横断方向の検討を行った。

後行トンネル施工時の先行トンネル覆工の安全性は，影響を考慮する前の荷重に，後行トンネルの切羽圧および裏込め注入による荷重を加えた荷重モデルにより，断面力を算出して確認する。後行トンネルによる荷重は，以下の2つの場合を想定して設定する。

- ①切羽圧および裏込め注入圧が液圧として先行トンネルに作用する場合（図-7）
- ②切羽圧および裏込め注入圧が地盤を介して先行トン

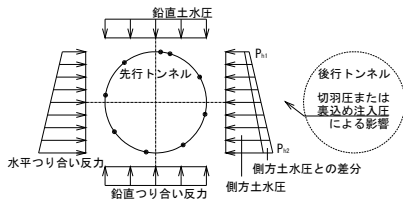


図-7 液圧として考えた場合の荷重モデル

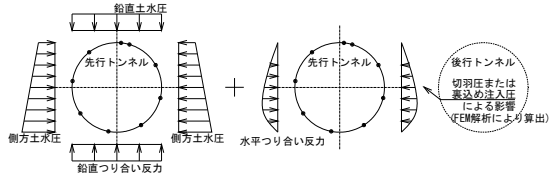


図-8 地盤を介して圧力が伝搬すると考えた場合の荷重モデル

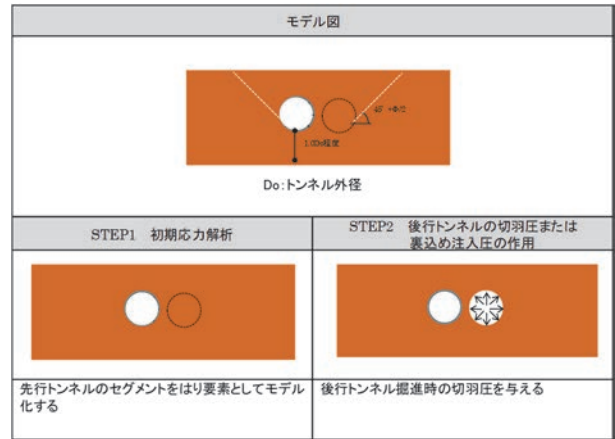


図-9 解析ステップ

ネルに作用する場合 (図-8)

地盤を介して先行トンネルに与える影響については、図-9のFEM解析によりSTEP-1からSTEP-2までの断面力の増加分を用いる。検討は、土被り最大となる「検討断面②」および土被り最小となる「検討断面④」の2断面にて行う。

(4) 設計結果

後行トンネル完成時の影響検討を行い、覆工の安全性が得られることを確認した。一方、後行トンネル施工時の照査では、切羽圧が地盤を介して後行トンネルに作用させたケースで、本体、継手に発生する応力が短期許容応力度以上となることがわかった (図-10)。後行トンネル施工時の一時的な荷重に対しての影響低減が必要であることに注目し、セグメントの仕様変更といった恒久的な対策ではなく、一時的な仮設物で先行トンネルを支持する方法を検討した。その結果、図-11に示す位置に内部支保工 (H-400 相当) を設置することで安全性が得られることを確認した (図-12)。なお、一時荷重によるトンネル縦断方向への影響については、別途、弾性支承上のはりモデルにより断面力を算出し、各部材の応力度、目開き量について、安全性を確認している。

4. 小土被り、併設条件に対する施工計画

本工事では、小土被り条件で3本の市道をはじめ地上部の影響を抑制して掘進する必要がある。とくに市道横山 681 号および市道横山 673 号は、発進直後約 80m の区間にあり初期掘進で通過することとなる。また、市道横山 681 号の土被りが 9.8m に対して、市道横山 673 号は 2.6m であり土被りの急激な変化に対応する必要がある。さらに、覆工構造設計において、後行トンネルの施工時

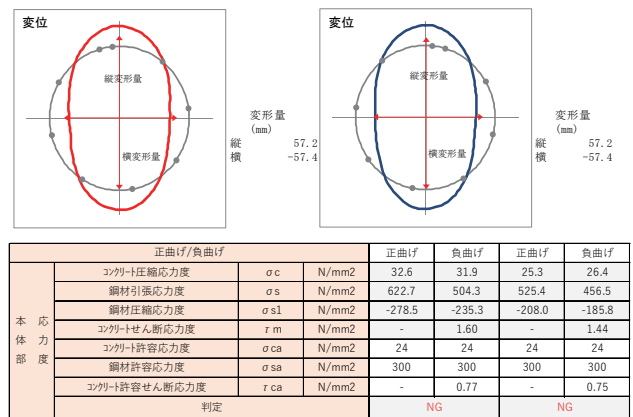


図-10 後行トンネル掘進時の検討結果【対策前】
(切羽圧が地盤を介して作用)

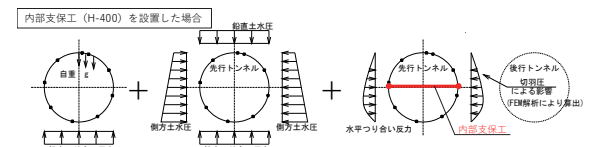


図-11 荷重モデル

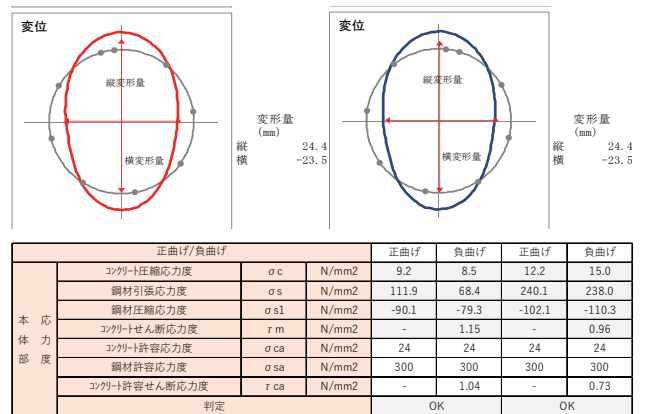


図-12 後行トンネル掘進時の検討結果【対策後】
(切羽圧が地盤を介して作用)

荷重に対して、先行トンネル覆工の支保が必要となっている。

本章では、これらの施工条件を踏まえた合理的な施工計画について述べる。

(1) 地上発進による初期掘進時の進捗確保

一般に立坑からシールドを発進させる場合、排土やその他の諸設備はすべてを立坑下には配置できない。そのため設備が初期掘進用となり、本掘進と比べて進捗が遅くなる。地盤変位抑制をするためには、切羽で掘削した箇所は速やかに裏込め注入を施工し、通過する方が優位である。本工事ではURUP工法を採用することで発進部後方に必要なヤードスペースが確保できる。あらかじめヤード内に後方台車や排土設備をすべて装備し本掘進の状態ですぐ地上発進させることで、発進直後の交差市道の下をスムーズに施工できる計画とした(図-13)。地山との付着抵抗により必要推力が確保される延長は土被りが最も小さい市道横山 673 号線の手前であったが、今回は2本の市道を通するまでを連続施工することで、段取り替え時にシールドを市道の直下で長期間停止させない計画とした。

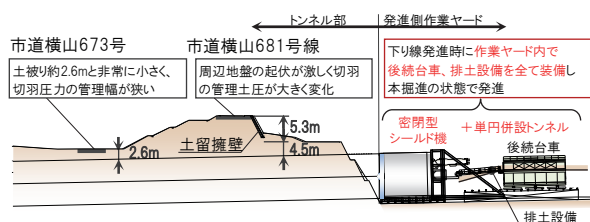


図-13 シールド発進概要図

(2) 施工管理計画

a) 切羽土圧管理

大断面シールドトンネルでは、上下の土圧差が大きい。ため地表に最も影響する上部の土圧を正確に把握する必要がある。そのため、シールドの土圧計は3段配置(上・中・下段)とし、上部の土圧計を重点的に管理した。

管理土圧は「静止土圧+地下水圧+予備圧(15kPa)」を基本とした。発進側作業ヤード側の2本の市道との交差区間では土被りが急激に変化するため、1リングごとに切羽土圧の管理値を見直した。また全線にわたって地表変位の計測結果に基づき管理土圧を見直すことで地表変位を抑制した。

切羽に泥土圧を確実に伝達するために、シールド隔壁にチャンバー内可視化装置¹⁾を設置し、リアルタイムに土砂流動解析を行うことで、掘削土の塑性流動状態を常時把握して添加剤の注入量、注入位置に反映させた。

b) 排土量管理

排土量管理では、シールド排土口後方のベルトコンベアに、レーザースキャンとベルトスケールを設置して、体積計測と重量計測を並行して実施することで計測の確実性を向上させた。計測値は統計処理をして、掘進管理に反映させた。

(3) 計測計画

市道との交差部の手前や土被りの変化点には層別沈下計を設置し、トライアル計測を行うことで掘進管理手法の妥当性を確認した(図-14)。また、交差道路横断中の路

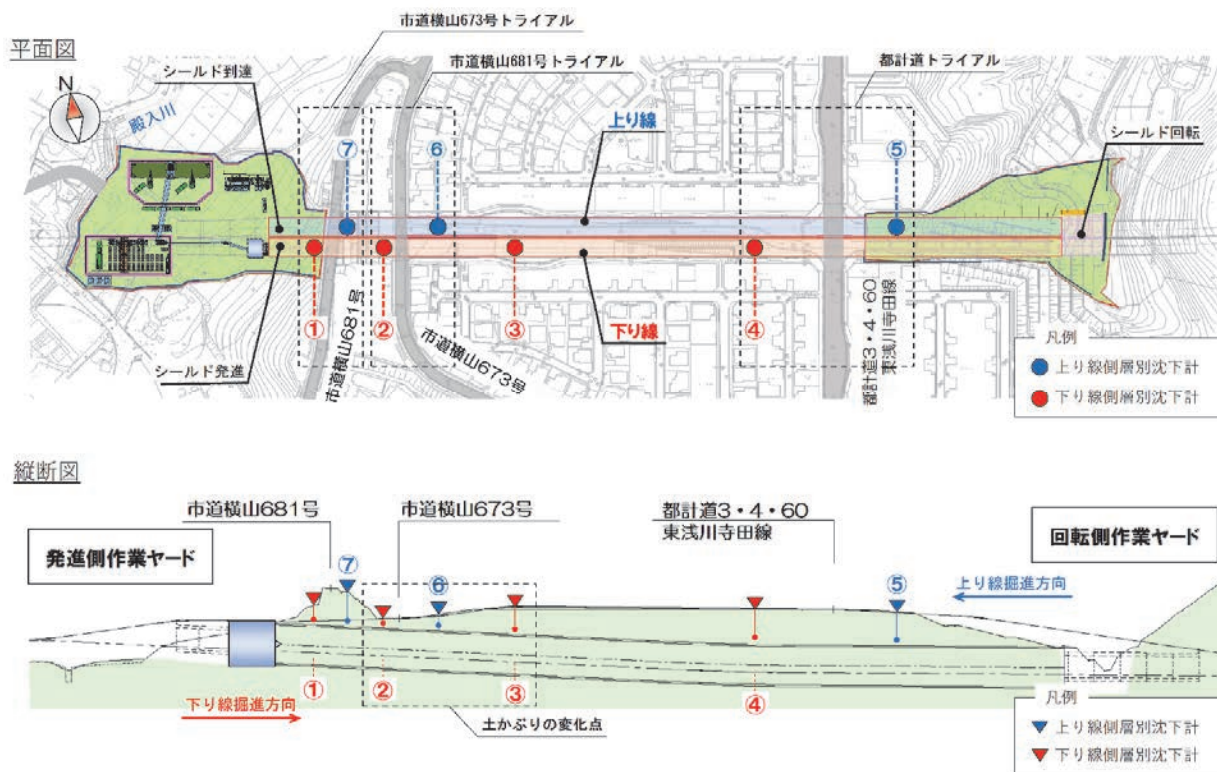


図-14 層別沈下計設置位置

面と擁壁の変状については、トータルステーションを用いた自動計測システムにてリアルタイム計測を行い、影響を確認しながら施工した(写真-1)。これらの変位計測値は、掘進データとともにシールド運転席で一元管理し、計測結果をリアルタイムに切羽圧や裏込め注入圧などの掘進管理へフィードバックした。

(4) 併設施工管理計画

a) 内部支保工

内部支保工の構造検討では、下記条件に配慮した。

- ・後行トンネル施工時においても、先行トンネル内にセグメントなどの資材および掘削土の動線を確保する
- ・内部支保工の設置にあたり、シールドの掘進サイクルに影響を与えない構造とする

内部支保工は自走式の台車形式とし、約10mの台車を3基設置した。支保部材は覆工構造設計に基づき H-400 の山留材とした。山留材には油圧ジャッキを設置し、電動ポンプにより伸縮する構造とした(写真-2)。

内部支保工の設置範囲は、先行トンネル施工時に多段式傾斜計による地中変位の計測を実施し、その結果から設定することとした。

計測位置と結果を図-15 に示す。切羽通過 5m 手前から、切羽圧により押される方向の変位が確認され、テール通過時に少し戻っている。テール通過後 5m までは、地上では裏込め注入圧力による影響が確認されたが、地中ではほとんどないことがわかった。これは裏込め注入孔の位置が上部にあることに加え、計測断面の土被りが約 3m であり上方へ圧力が抜けやすいことが要因であると考えられる。変位の大きさはスプリングライン位置で最大 4mm 程度であった。この結果より、切羽圧および裏込め注入圧の影響は切羽の前方 3R (5.1m) から裏込め注入箇所の後方 3R (5.1m) までと判断した。内部支保工の設置範囲は、切羽圧および裏込め注入圧による影響範囲とシールド機長および一日の最大掘進延長を考慮して



写真-1 トータルステーションを用いた自動計測システム

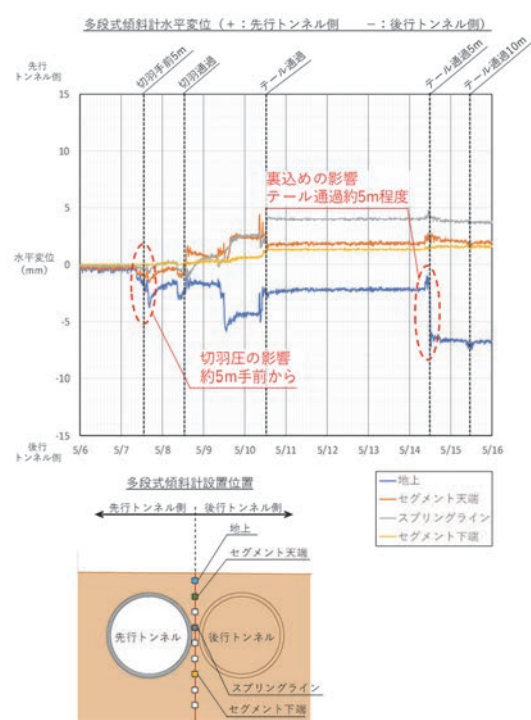


図-15 多段式傾斜計による地中変位計測結果



写真-2 内部支保工台車

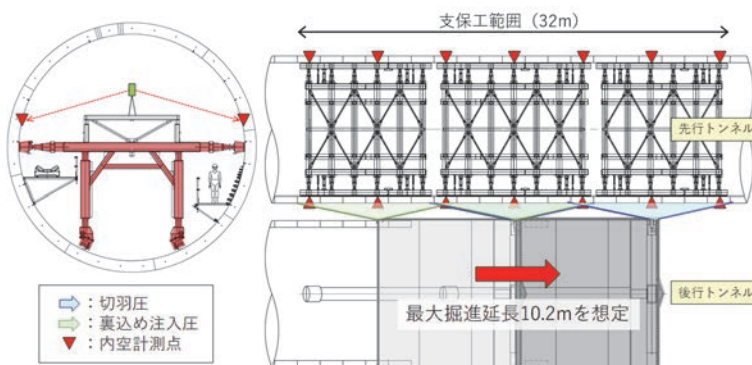


図-16 内空計測位置

32mとし、後行トンネルの掘進に合わせて設置位置を移動させることとした。内部支保工台車の移動、設置は、毎朝、後行トンネルのセグメント組立てと同時に行うことで内部支保工の設置に伴う時間のロスをなくした。

b) 内空計測

後行トンネル施工時は、自動追尾式トータルステーションにより先行トンネルの内空を計測し、シールド運転席でリアルタイムに監視しながら掘削することとした(図-16)。計測結果は、地表面変位などの計測項目と総合的に判断した上で管理土圧の再設定を行うなど、掘進管理ヘフィードバックする計画とした。

5. 施工結果

(1) 小土被り部の施工

上記の対策を総合的に行うことで、市道や擁壁などの道路付属物に設置したすべての計測点で変位を管理値以内に抑制することができた。とくに管理土圧の設定において各種計測結果をもとに適宜見直しを行ったことが影響の抑制に効果的であった。管理土圧の実績を図-17に示す。市道横山 681号では、計算上の静止土圧に対して予備圧を高めとする必要があった。当該道路は、埋め土により造成されたものであり、土質が不均一だったなどの要因で、想定されていた土質定数と実際の土質定数に誤差があったことが考えられる。計測結果に応じて適宜管理土圧を見直したことで、このようなケースでも変位

を抑制しながら施工ができた。

(2) 併設施工

a) 内部支保工設置範囲の妥当性

図-18に地中計測を行った断面位置における先行トンネルの内空変位の計測結果を示す。切羽圧による影響は①シールドマシン切羽が5m手前の位置から生じており、②切羽が真横を通過した後で最も大きく影響が出ている。その後は切羽圧の影響が少なくなり後行トンネル側に引っ張られる。これはオーバーカット分の変位が戻っているものと考えられる。③裏込め注入圧による影響は裏込め注入位置が近づくにつれて大きくなり、④裏込め注入位置が通過して5m程度まで続いている。裏込め注入位置が5m以上離れ、裏込め材が硬化した翌日には変位は見られなくなっている。掘進による影響と思われる変位

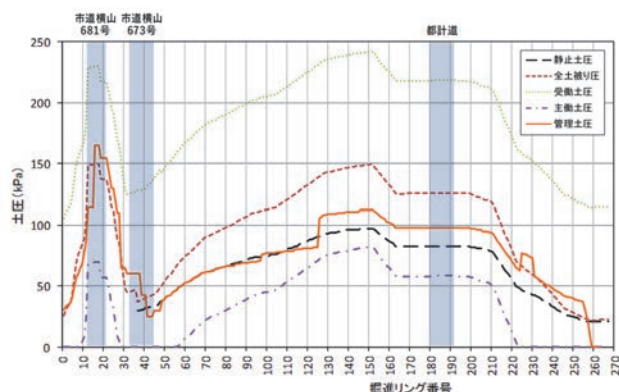


図-17 管理土圧の実績

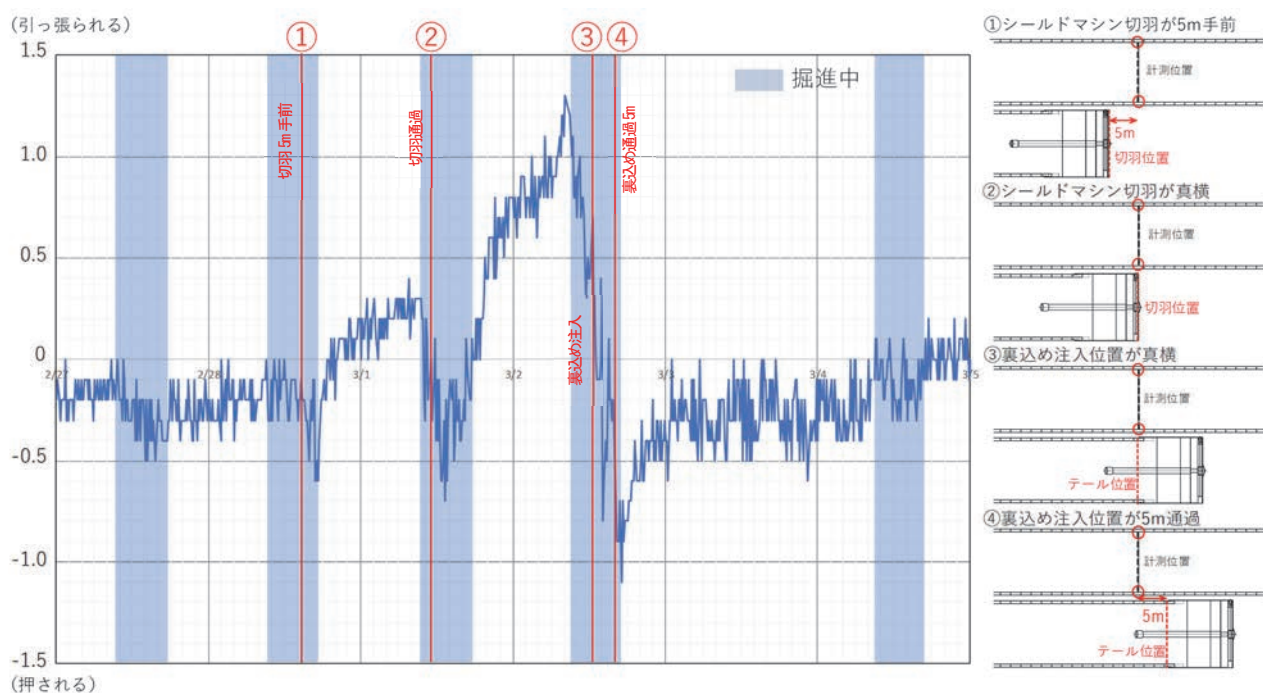


図-18 内空計測結果

は一日で最大 2mm 程度であった。この結果から設定した支保範囲は合理的であったと判断できる。

b) 先行トンネル覆工への影響

内空計測結果をマシン運転席で監視しながら後行トンネルの施工を行ったが、併設施工による影響は先行トンネルの内空変位が内部支保工を設置しない場合における想定値の 10%以下であった。結果、先行トンネル覆工にはひび割れや漏水を発生させることなく、健全性を保ちながら後行トンネルの施工を行うことができた。また、台車形式を採用したことにより支保工を設置することによる掘進サイクルへの影響はなく、スムーズに掘進を完了することができた。

併設施工の影響など、後行トンネルの施工時荷重が先行トンネルに与える影響を考慮した。実施工では、覆工構造設計にもとづき先行トンネル側に内部支保工の補強を行い、変位を計測しながら施工するとともに、小土被りで安全に施工するための各種対策を施した。その結果、覆工構造および周辺環境の安全性を確保して施工を完了した。

本稿が、同様工事の参考になれば幸いである。

謝辞：本工事の施工および本稿の執筆あたりご指導を賜った、国土交通省関東地方整備局相武国道事務所の方々をはじめ、関係各位にこの場を借りてお礼申し上げます。

6. 終わりに

本稿では、小土被り、併設条件下における道路シールドトンネルの設計・施工について報告した。覆工構造の設計では、土被りや地下水位に対して複数の荷重ケースを想定するとともに、トンネルの変形モードに応じて、

参考文献

- 1) 香川敦, 菅野静ほか：チャンバー内土砂流動性可視化システムの開発, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.73, No.3 (特集号), I_61-I_74, 2017.

DESIGN AND CONSTRUCTION FOR ROAD SHIELD TUNNELS UNDER SMALL OVERBURDEN AND TWO PARALLEL TUNNELS

Masataka HAYASHI, Nobuhiko EBISU, Kyosuke NISHIOKA and Masahiro YOSHIDA

National Route 20 Hachioji Minami by-pass that is currently under development, is a main road that connects between east area and west area of Hachioji city. The section near the center of the by-pass that passes through the apartment block was supposed to be the cut and cover tunnel method. But since then the residential area has become bigger and bigger, it was decided to construct by the shield tunnel method in consideration of the influence on the surrounding environment.

Due to the construction area limitation, the clearance between the upper-bound tunnel and the lower-bound tunnel is only 0.9m along the entire route, and the overburden is from 2.6m to 9.9m, which is extremely small compared to the outer diameter of shield machine that is 11.15m.

Therefore, in the design of lining structure, multiple load cases were assumed for the overburden and the ground water level, and the effect on the former tunnel by the construction load of the latter tunnel, such as the parallel tunnel construction, was considered according to the tunnel deformation mode. In the construction work, the former tunnel was reinforced by the internal supports based on the design of lining, and various measures were taken to ensure safe construction for the small overburden in addition to the construction while monitoring the deformation and displacement of the former tunnel.