

道路盛土下における非開削トンネルの施工

山田博道¹・細谷政和¹・渡辺英樹²・池口潤一²
遠藤典之²・林田岳士³・仲西恵祐⁴・葭井公夫²

¹国土交通省 関東地方整備局 横浜国道事務所（〒221-0855 横浜市神奈川区三ツ沢西町13-2）

²三井住友建設株式会社 東京土木支店（〒160-0004 東京都中央区日本橋本町一丁目9-4）

³正会員 三井住友建設株式会社 土木技術部（〒164-0011 東京都中野区中央一丁目38-1）

⁴三井住友建設株式会社 横浜支店（〒231-0015 横浜市中区尾上町四丁目58）

上依知第2トンネル工事は、さがみ縦貫道路が国道129号と交差する区間を含むカルバートンネル工事である。国道129号は一日3万台以上の交通量を有する幹線道路であるため、交差区間では道路交通に影響を与えない非開削工法によりトンネルを築造する必要があった。そのため、非開削工法には、縦断勾配4.5%で約3万tの道路盛土を有し、道路交差角が30度の厳しい施工条件を鑑み、パイプルーフ工法によるアンダーピニングが採用された。この手法は、盛土内にパイプルーフを水平打設し、簡易シールド工法により掘削した導孔内で構築する支持杭により、盛土荷重を支保するものである。本稿では、本工事における道路盛土下での非開削トンネル施工技術について報告するものである。

キーワード：パイプルーフ工法、簡易シールド工法、非開削トンネル、アンダーピニング

1. はじめに

首都圏中央連絡自動車道(圏央道)の神奈川県区間であるさがみ縦貫道路は、茅ヶ崎市久保を起点とし、相模原市川尻を終点とする延長約34kmの自動車専用道路である。そのうち、新湘南バイパスから国道129号に接続する相模原ICまでの21.4kmについては、平成22年度の開通を目指して橋梁・トンネルなどの工事が最盛期を迎えている。

上依知第2トンネル工事は、さがみ縦貫道路が国道129号と交差する区間を含むカルバートンネル工事である(図-1)。国道129号は県中央部を南北

に繋ぐ幹線道路として一日3万台以上の交通量を有することから、交差区間では道路交通に支障を与えない非開削工法によりトンネルを築造する必要があった。そのため、非開削工法には、縦断勾配4.5%で約3万tの道路盛土を有し、道路交差角が30度の厳しい施工条件を鑑み、パイプルーフ工法によるアンダーピニングが採用された。この手法は、盛土内にパイプルーフを水平打設し、簡易シールド工法により先行掘削した導孔内で構築する支持杭により、盛土荷重を支保するものである。本稿では、本工事における道路盛土下での非開削トンネル施工技術について報告する。

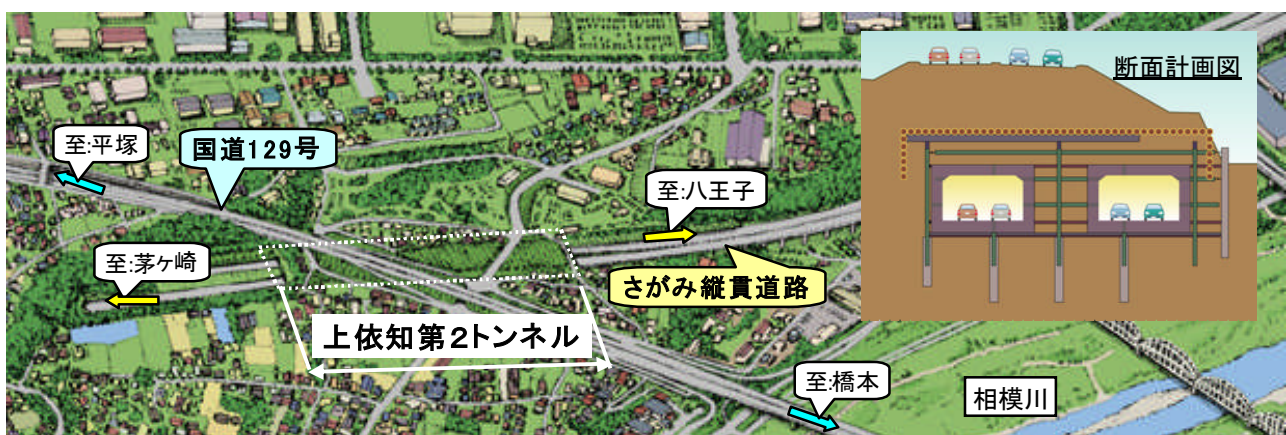


図-1 上依知第2トンネル計画図

2. 工事概要

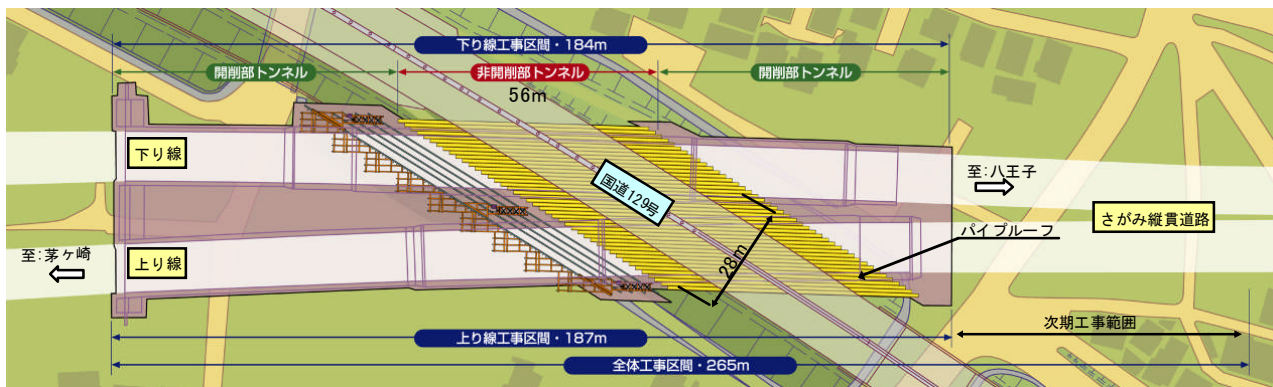


図-2 トンネル平面図

工 事 名：さがみ縦貫上依知第2トンネル工事

施工場所：神奈川県厚木市上依知地先

工 期：平成17年3月12日～平成20年3月28日

トンネル延長：上り線187m(うち非開削部56m)

下り線184m(うち非開削部56m)

トンネル内空：上り線 幅 9.90m×高さ 5.45m

下り線 幅 9.85m×高さ 5.50m

図-2, 図-3 に平面図および断面図を示す。

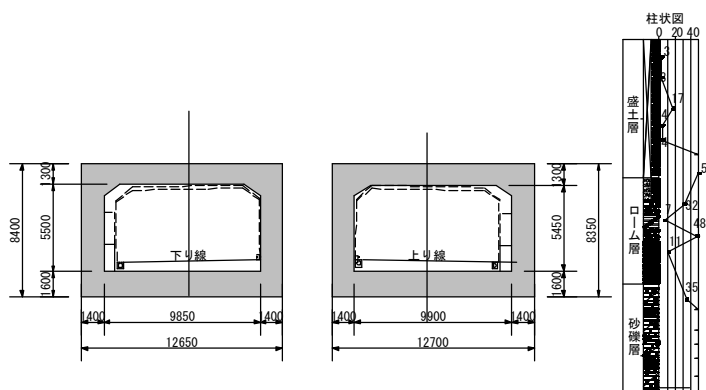


図-3 トンネル断面図(非開削部標準断面)

3. 非開削部掘削手法の選定

(1) 選定条件

国道129号との交差区間である非開削部を道路交通への影響なく安全に施工するに当たり、パイプルーフ下の掘削方法を選定し、掘削時の安全性を照査する必要があった。選定するに当たって、以下の施工条件を考慮した。

①道路盛土は縦断勾配が4.5%と急であるため、トンネル土被り厚が最大14mから6mと上載荷重が大きく変化する。

②トンネルは2連のカルバートンネルであるため構造物幅が広く、盛土下で32m程度になる。

③道路交差角が30度と鋭角に交わるため、非開削部延長は国道129号横断方向で28m、トンネル方向では56mとなる。

④当該範囲の土質構成は、上層より盛土層(N=4)、ローム層(N=12)、砂礫層(N=50)で構成され、地下水位は構造物床付面以深である。盛土層は昭和50年代前半に造成された道路盛土で、粘性の強いローム主体の層である。盛土層およびローム層ともに所々に円礫を含むが、粘着力30kN/m²以上の粘性土であり、地下水は存在しないことから地山の自立性は高い。

(2) 掘削工法の検討

道路盛土および交通荷重等の上載荷重は、パイプルーフを介してトンネル断面直角方向に配置した受桁および支持杭により支保し、道路盛土下の掘削を行う。掘削工法としては、①パイプルーフで門型に囲まれた全断面を掘削しながら、3.0m間隔で随時支保する手法(全断面掘削工法)、②先行して導孔掘削を行い、1.5m間隔で設置した矩形の導枠で一時的に支保した後に導孔内で支持杭を打設する。その後、導坑間の土砂を掘削しながら受桁を挿入し支保する手法(部分掘削工法)の2つに大別される(表-1)。

全断面掘削工法は、切羽のり面における応力解放領域が広く、上載荷重が最大165kN/m²となるため、パイプルーフ支持地盤への応力集中が懸念される。そのため、切羽のり面の安定およびパイプルーフ支持地盤の支持力の照査を実施したが、ともに所定の安全率、許容支持力を満足出来ず、切羽のり面の安全性および道路盛土の過大沈下により、道路交通に影響を及ぼす可能性が高いことが判明した。

部分掘削工法は、掘削幅が比較的広い同規模のパイプルーフ工法による非開削トンネルでの実績が多く、切羽面も狭くなることで滑り力に対して側面抵抗力が期待でき、切羽の安定が図れる。また、パイ

ブルーフ支持地盤での応力集中を低減でき、掘削時の切羽の安全性を確保できる。したがって、非開削部の掘削工法として部分掘削工法を採用した。

(3) 部分掘削工法の選定

部分掘削工法の選定は①簡易シールド工法、②メッセル工法、③在来トンネル工法により得失・工程および経済性を総合的に評価し決定した。表-2に部分掘削工法の比較表を示す。その結果、矩形シールド機で上載荷重および側圧を支保しながら、推進・掘削を繰り返し、導孔掘削を行う簡易シールド工法を採用した。

また、導孔掘削時に設置した導枠下面に上載荷重が集中して作用するため、現地盤での支持力確保が不可能となる。したがって、導枠下面に地盤改良を施し支持力を確保するものとし、国道上からの鉛直施工が困難なため、水平方向からの地盤改良が可能な全方位高圧噴射工法¹⁾ (M J S 工法)を採用した。

表-1 非開削部掘削工法比較表

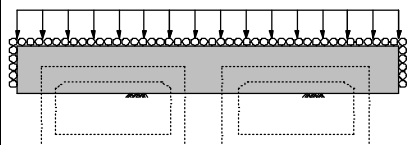
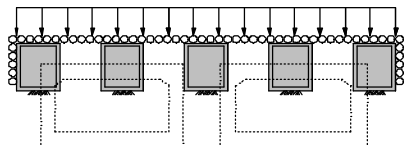
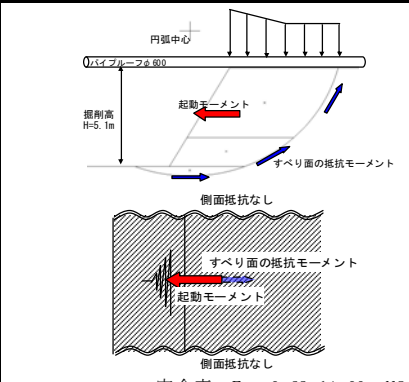
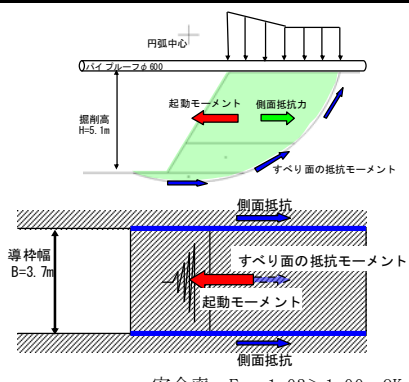
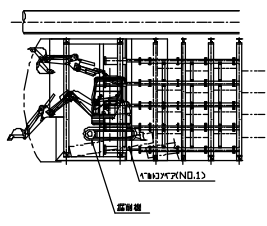
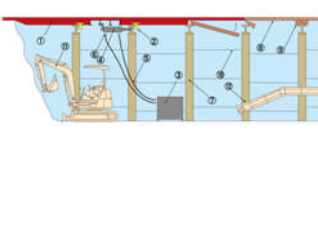
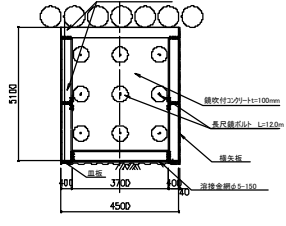
掘削工法	全断面掘削工法	部分掘削工法
掘削概要図		
切羽の安定 (側面図・平面図)		

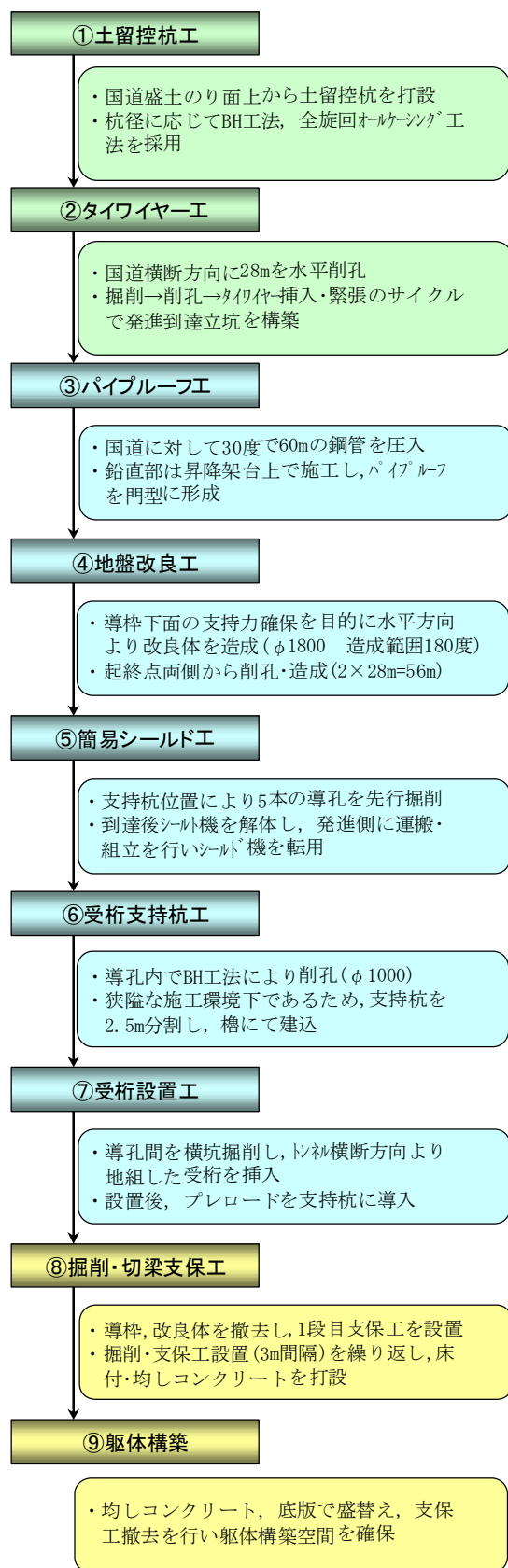
表-2 部分掘削工法比較表

	簡易シールド工法	メッセル工法	在来トンネル工法
概要図			
工法概要	シールドのフードを地山に貫入させ、シールド機本体でパイプブルーフを仮受けしながらバックホーにて地山を掘削する。次に、マシン後方のテール部に鋼製支保工・横矢板の設置を行う。	メッセルジャッキで既設鋼製支保工に反力をとりながらメッセルプレートを地山に押し込み、メッセルプレート内部の掘削、鋼製支保工設置、横矢板設置を繰り返して導坑掘削を進める方法。	地山応力を支保工と矢板で支える一般的な在来工法である。地山の崩壊に対しては、掘削後直ちに鋼製支保工および横矢板を設置する。掘削方法としては、断面の規模により機械及び人力による方法がある。
長所・短所	長所 ①フードの内部で掘削を行うため、地山の崩落などの安全性に優れる。 ②推進時、無支保状態になる部分がない。 ③シールド機を一体で推進することから、推進時間が短い。 短所 ①切羽の自立が必要条件である。	長所 ①掘削時、土留めとしてメッセルプレートが先行するため、地山の緩みを抑制できる。 ②無支保状態になる部分がない。 ③仮設備は比較的小規模である。 短所 ①推進に時間を要する。 ②緊急時、早急に推進できない。 ③切羽の自立が必要条件である。	長所 ①汎用建設機械での施工が可能である。 ②工期は単純な施工サイクルとなるため短い。 短所 ①切羽掘削～鋼製支保工架設までが無支保状態となるため、側部の地山崩壊が懸念される。 ②地山の安定を目的とした補助工法が必要である。
工 程	○ (1.0)	△ (2.0)	○ (1.0)
経済性	○ (1.0)	△ (1.2)	△ (1.3)
評 価	◎	△	×

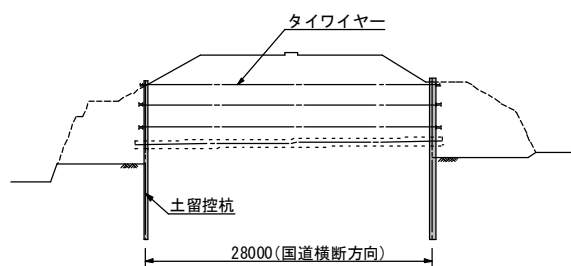
4. 非開削トンネルの施工

(1) 施工順序

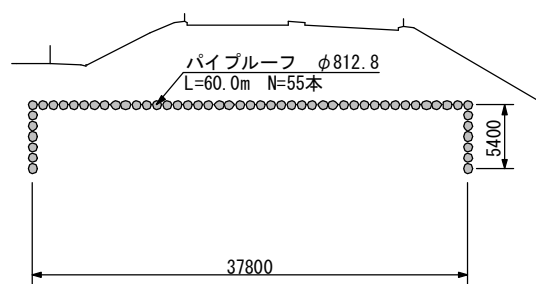
図-4に非開削部の施工順序を示す。



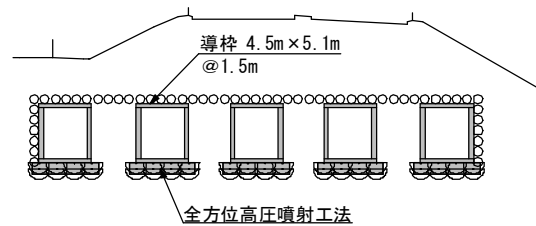
立坑掘削



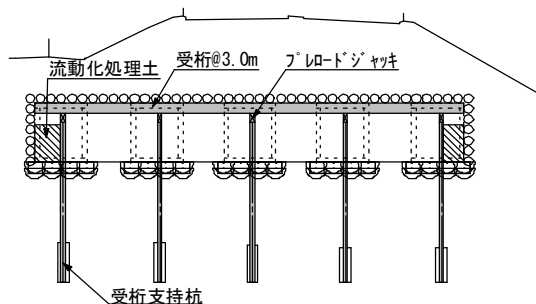
①土留控杭工 ②タイワイヤー工



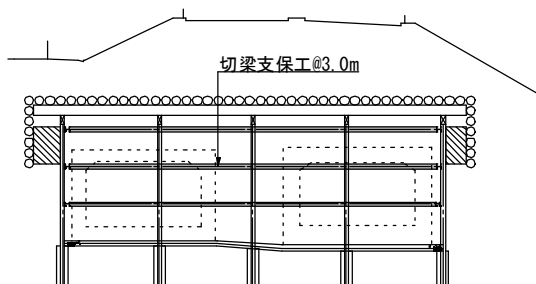
③パイプルーフ工



④地盤改良工 ⑤簡易シールド工



⑥受桁支持杭工 ⑦受桁設置工



⑧掘削・切梁支保工 ⑨躯体構築

躯体構築

図-4 非開削部施工順序図

(2) タイワイヤー工

a) 概要

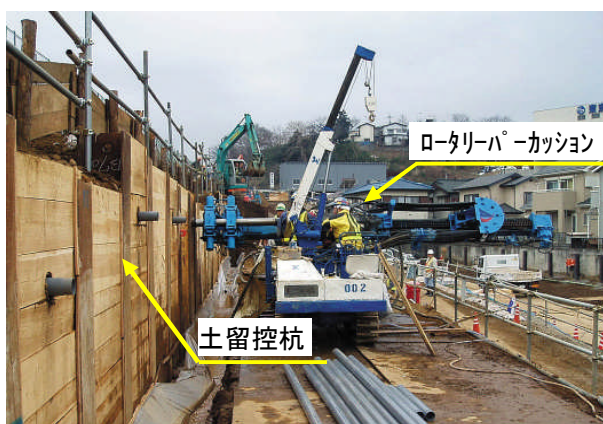


写真-1 タイワイヤー施工状況

タイワイヤー工は国道129号両脇に平行して打設した土留控杭間に、支保工としてタイワイヤーを設置しながら道路盛土を切り下げ、非開削部施工の発進及び到達立坑を構築するものである。削孔はロータリーパーカッションにて終点側から水平方向に28mの長さで行い、タイワイヤーには支保工反力の50%をプレロードとして導入し定着した(写真-1)。

b) 水平削孔

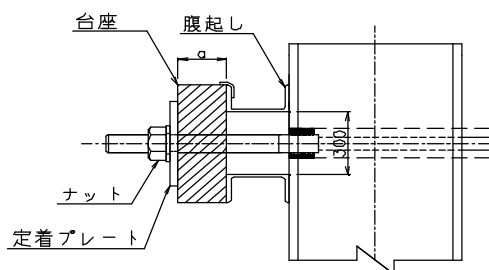


図-5 タイワイヤー定着台座構造図

タイワイヤー削孔位置は、舗装面からの最低土被りが2.0m程度で、パイプルーフとのクリアランスも確保する必要があった。そのため、高い施工精度が必要となり、平面誤差の管理値を $L/200$ 以下(140mm)に設定した。削孔精度を確保するためには盛土内の土質性状、ケーシング自重によるたわみを考慮して鉛直打設角度を補正する必要があった。本工事では事前調査および試験削孔により、打設角度を上向きに0.5度補正した結果、全本数(94本)で所定の管理値を満足できた。また、削孔誤差に対応できる腹起し定着構造するため、削孔出口側の腹起し(溝形鋼)と定着プレートの間に台座を設け誤差を許容させた(図-5)。

(3) パイプルーフ工

a) 概要

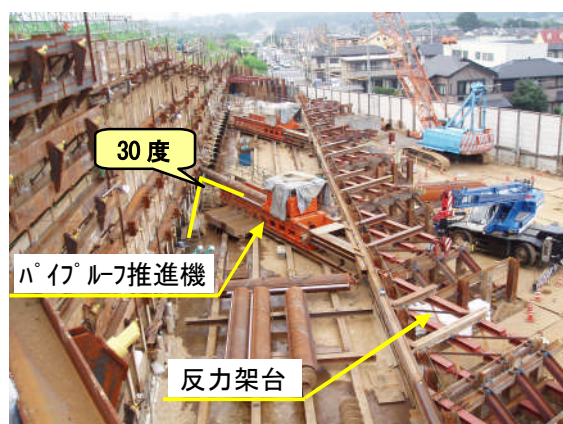


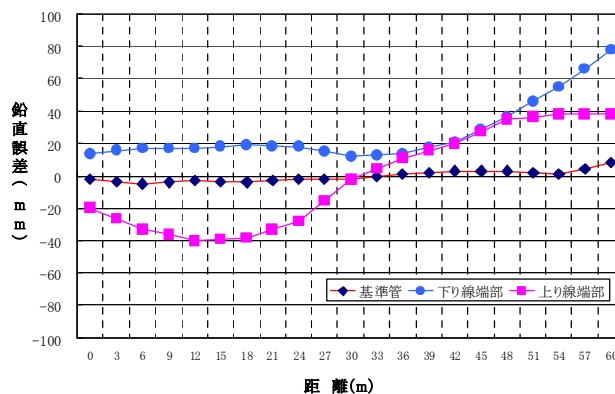
写真-2 パイプルーフ施工状況(水平部)

本工事におけるパイプルーフは水平部43本、鉛直部12本の鋼管(φ812.8mm)をダブルアングル接合で門型に形成し、上載荷重、側圧を支保する。また、鋼管厚は上載荷重の変化に伴い $t=13\text{mm}$, 15mm , 16mm に区分され、経済的に設計されている。施工は6m/本の鋼管を特殊資格者による溶接作業を行いながら、推力3000kN級のパイプルーフ推進機2セットにより盛土中に中掘圧入した(写真-2)。鉛直部では昇降架台上に推進機を設置し、クライム型ベルトコンベアにより掘削残土を立坑外に排土した。

b) 反力構造

パイプルーフの必要推進力は①鋼管の先端抵抗力、②鋼管の外周摩擦による抵抗力、③鋼管自重による摩擦抵抗力の和によって求められ²⁾、本工事では対象地盤をローム層で算出し2100kNを要した。反力構造には、必要推進力に耐え得るように反力杭を打設し、推進方向との傾角が30度であることから、機械本体と反力架台の間で生じる滑り力を防止する構造とした。

c) 基準管の施工



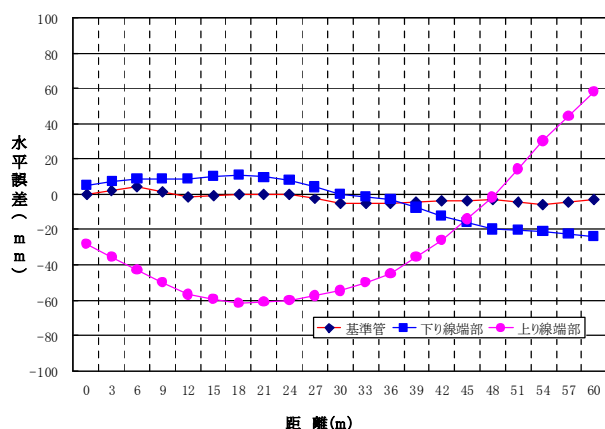


図-6 パイプルーフ精度管理図(鉛直・水平)

パイプルーフは各鋼管の配置誤差の累積が、最終的に全体の施工精度に影響を及ぼすため、水平部中央に高精度で基準管を打設する計画とした。基準管は手掘り推進とし、鋼管もストレートシーム管を使用することで継手部での回転を抑制し、施工精度の更なる向上を図った。施工には昼夜で12日(5m/日)を費やしたが、配置誤差は基準管管理値 $\pm 50\text{mm}$ ($L/1000$ 以内)に対して9mmの精度に収まった。これにより、パイプルーフ工完了時における全体の配置誤差は最大100mmとなり、管理値 $\pm 200\text{mm}$ を大きく下回り高い施工精度を確保した。図-6にパイプルーフの精度管理図を示す。

d) 排泥材のパイプルーフ中詰め材への利用

表-3 パイプルーフ中詰め材配合表

配合(kg/m^3)				
排泥(体積 m^3)	セメント	起泡剤	希釈水	混和剤
780(0.565)	75	0.66	15.84	1.5

パイプルーフ中詰め工では、充填材料として導孔下端の地盤改良工で発生する排泥材を有効利用することで、産廃処理量を抑制し、環境に対する負荷を低減させた。使用中詰め材は、地山と同等の一軸圧縮強度を有すること、ブリーディングによる充填後の体積減少がないこと、流動性に優れることを目標性能として、採取した排泥材により事前試験を実施し配合を決定した。排泥材はプレーンな状態ではブリーディング率が2%となりそのまま使用することは出来ないが、気泡を混入させることでブリーディングを抑制できた。表-3にパイプルーフ中詰め材の配合表を示す。

(4) 簡易シールド工

a) 簡易シールド機

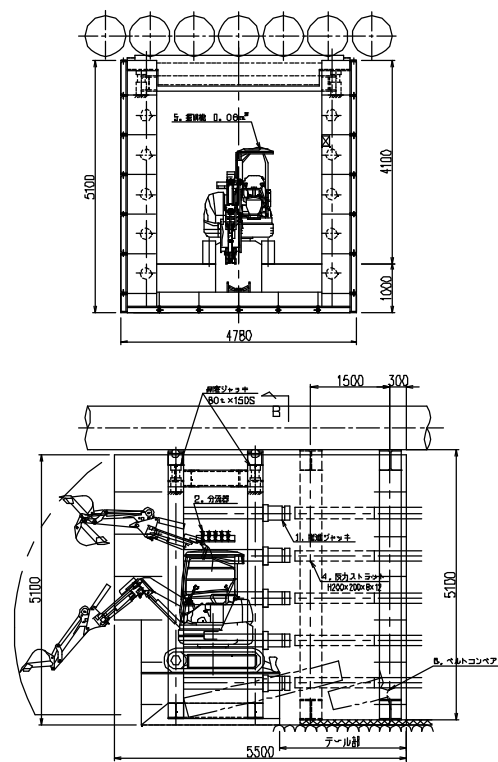


図-7 簡易シールド製作図(上段:正面, 下段:側面)

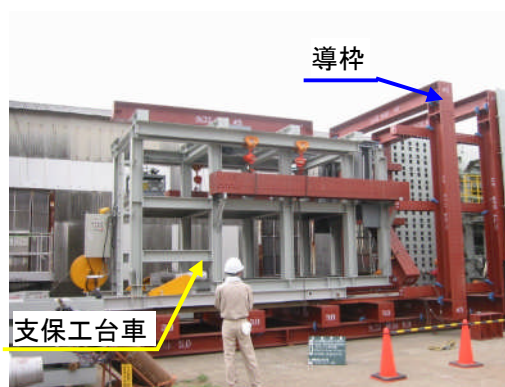


写真-3 支保工台車(組立試験状況)

導孔掘削に使用する簡易シールド機(図-7)は予め工場で製作した本体を分割運搬し、現地にて組立設置した。簡易シールド機は幅4.8m×高さ5.1m×長さ5.5mで、側部のフード部は鋼殻構造とし高力ボルト接合とした。推力1000kNのシールドジャッキを左右均等に12カ所配置し、後方の反力コンクリート壁から反力をとり推進を行った。また、シールド前方に昇降ジャッキを2箇所設置し、回転する構造の昇降梁にすることで、上載荷重を支保させながら推進可能な構造とした。導棒組立には作業の省力化を図る

ため、ターンテーブルを備えた支保工台車(写真-3)を製作し、組立試験により作業効率の確認を行った。

b) 施工サイクル

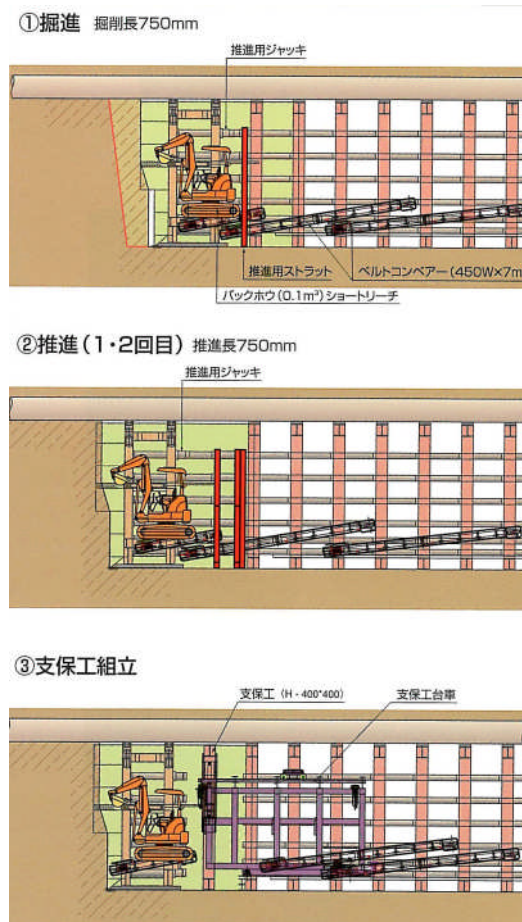


図-8 簡易シールド工施工サイクル図



写真-4 簡易シールド工施工状況(起点側)

掘削はショートリーチ型パワーショベルで行い、残土はベルトコンベアにより坑口まで運搬した。支保工間隔が1.5mであるため推進長を0.75mとし、2回に分けて推進を行い、推進完了後は、支保工組立台

車による導枠組立、横矢板設置及び矢板背面の間詰を行い1サイクルの工程が完了する。また、盛土荷重を導枠に確実に伝達させるため、パイプルーフと導枠の隙間に鋼管形状に合わせた鋼製のコマ材を溶接し堅固に接合した。図-8に簡易シールド工の施工順序、写真-4に施工状況を示す。

(5) 受桁支持杭工

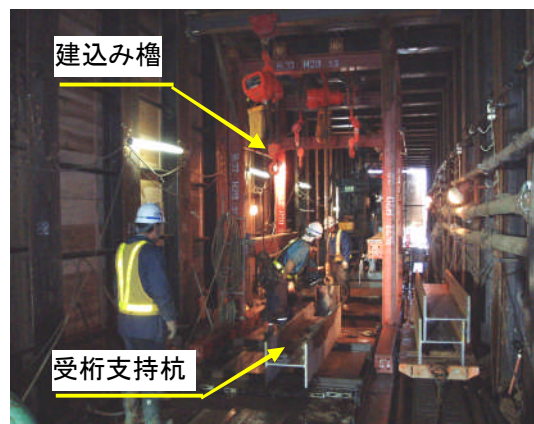


写真-5 受桁支持杭施工状況(杭建込み)

上載荷重を支える受桁支持杭は、内空高 4.2m の狭隘な導坑内での施工となるため、小型機械での削孔が可能な BH 工法を採用し、2.5m に分割した H 鋼杭を移動式槽を使用し建込み作業を行った。受桁支持杭の削孔径は $\phi 1000$ であり、支持層が巨礫・玉石を多量に含む硬質な砂礫層であるため、 $\phi 600$ の硬質岩盤用のトリコンビットで先行削孔を行った後に、 $\phi 1000$ のウイングビットで再削孔し所定の杭径を確保した。写真-5 に導坑内での施工状況を示す。

(6) 受桁設置工

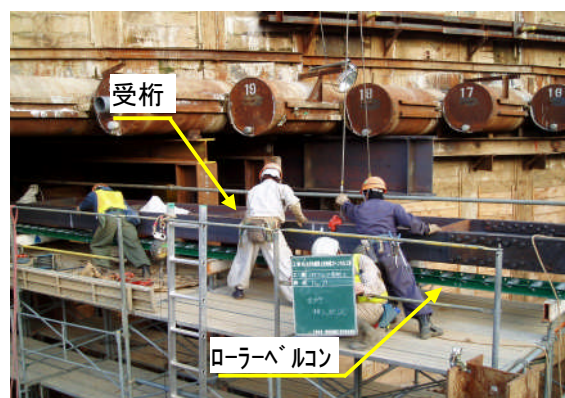


写真-6 受桁設置状況

受桁設置工では、トンネルと国道が 30 度に交差

している地形条件を有効に利用して、導枠が残置されている状態で横坑掘削を行い、横断方向から地組した受桁をラフタークレーンにより吊込み、ローラーコンベアにより送出し設置する方法を採用した。また、受桁設置後にプレロードジャッキにより、設計荷重相当のプレロードを支持杭に導入することで杭体の沈下を抑制した。写真-6 に施工状況を示す。

(7) 本体工



写真-7 鉄筋組立状況（頂版組立）

非開削区間のカルバートトンネルは、盛土荷重が大きいので、側壁：1.1m～1.4m・底版：1.2m～1.6m 頂版：1.0m～1.3mと部材断面が厚く、鉄筋量も235kg/m³で過密配筋となっている。また、道路盛土下での施工となるため型枠・鉄筋等の資機材運搬方法、コンクリートの打設手法について入念に策定する必要があった。そのため、非開削部のカルバートトンネルの品質・施工性の向上を図るために、以下の対策を講じた。

①温度応力によるひび割れ対策

温度応力解析に基づき、対策工を打設時期・断面形状によりグルーピングし実施した。対策はセメント種類の変更（高炉セメントから低発熱セメント）、誘発目地の増設（2カ所/ブロック）を講じ、0.2mm以上の有害なひび割れの発生を抑制した。

②流動化コンクリート³⁾の使用

非開削区間はポンプ圧送時の配管延長が最大40mとなり、コンクリート打設時のスランプロスによるポンパビリティーおよびワーカビリティーの低下が懸念された。そのため、ベースコンクリートに流動化剤を現地混練し、スランブを8cmから12cmに変更し対処した。

③非開削部内への資機材の運搬

非開削部内への資機材の運搬には、天井クレーン

を5台設置し作業の効率化を図った。また、頂版鉄筋組立時には切梁下にトロリーを設置することで、狭隘な箇所での鉄筋運搬を省力化した(写真-8)。

(8) 路面の動態観測

本工事の生命線は、国道129号の道路交通に支障なく、盛土変状を監視し施工することであった。そのため、事前に道路管理者と協議を行い、国道129号法肩及び中央分離帯に沈下測定用のプリズムを設置し、自動追尾型トータルステーションにより24時間の自動計測を行い、異常時の警報が担当者に自動転送されるシステムとした。沈下量の管理値については、土留控杭の変状に伴う背面沈下量が最大100mmになること、国道の縦断勾配が急で土被りが厚いため道路交通への直接的な影響が小さいことから、1次管理値を50mm、2次管理値を100mmに設定した。最大沈下量は中央部で最大80mmとなったが沈下勾配は1%以下であり、局所的な沈下による段差等は生じなかった。また、国道脇の土留控杭の変形、タイヤの軸力にも顕著な変状傾向は見られず、道路交通に影響を与えることなく非開削部の施工が完了した。

5. おわりに

本工事は、多くの工種が輻輳する厳しい施工条件下であったが、高度技術・創意工夫に加え綿密な計画・施工管理により一つ一つの課題を確実にクリアすることで無事竣工することが出来た。また、非開削部の掘削に着工から2年を要したため、躯体構築はコンクリート打設量1500m³/月の厳しい工程下であったが、温度応力によるひび割れ対策・施工方法の改善により高品質なコンクリート構造物が完成できたと考える。

最後に、本工事の計画・施工にあたり多大なる御指導・御支援を頂いた関係各位の皆様に対し、深く感謝の意を表すとともに、本稿が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 全方位高圧噴射工法協会：METRO JET SYSTEM 技術・積算資料，2007。
- 2) 成山元一，志田幸盛：推進工法，鹿島出版会，1978。
- 3) 土木学会コンクリート委員会：流動化コンクリート施工指針(改訂版)，(社)土木学会，1993。