

単線シールド断面から複線 NATM 断面への地中拡幅施工 と都市部における洪積埋没谷の施工

阿部 浩

正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部(〒105-8007 東京都港区芝浦1丁目2-3)

高速鉄道4号線は東急東横線日吉駅からJR横浜線中山駅間の約13.1kmの路線で、これまでの横浜駅を中心とする放射状の鉄道を、環状型の鉄道ネットワークで結ぶ横浜環状鉄道の一部となる。

本工事は、低土被りで未固結地山の住宅および商店街の地下を山岳トンネル工法で掘削するだけでなく、小断面のシールド区間から立坑を施工することなく直接大断面の山岳トンネルに移行する前例のない工事であった。また、トンネル掘削断面内に未取得用地や建物基礎杭が存在する、厳しい施工条件、環境条件下で、地表面に与える影響を最小限に抑え、第三者に対する安全性を確保することが求められた。

キーワード：山岳トンネル，低土被，未固結地山，市街地の地下，地中拡幅

1. はじめに

横浜市では、環状型鉄道の整備を進めており、既存の放射型鉄道と合わせた鉄道ネットワークは、地域の交通利便性を飛躍的に向上させるものとして期待されている。横浜環状鉄道4号線（グリーンライン）は、この環状型鉄道の一部区間として、東急東横線日吉駅からJR横浜線中山駅間の約13.1kmの

地下鉄であり、平成20年3月30日開業した。グリーンラインは、利用者の需要に見合う小型車両を採用するとともに、起伏に富む地形の中で急勾配に対応できるリニアモーター推進方式を採用していることが特徴である。

当工区は、図-1 および図-2 に示すように日吉駅から日吉本町駅までの約1.3kmの区間に地下鉄トンネルを構築するものであった。



図-1 路線平面図

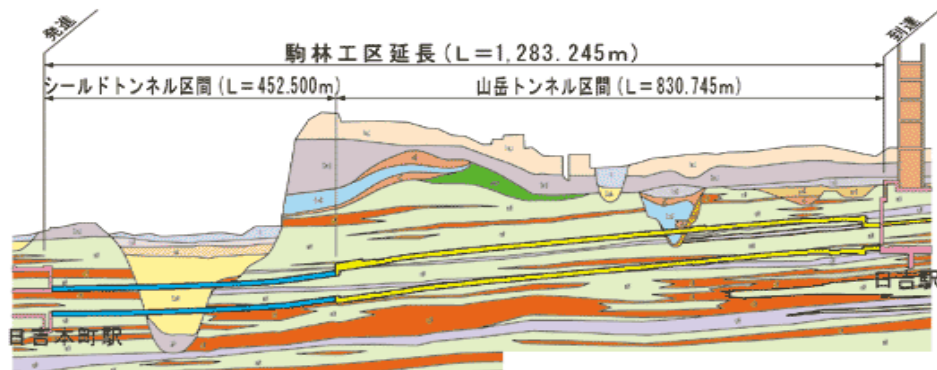


図-2 路線縦断面図

表-1 工事概要

工 事 名	高速鉄道 4 号線駒林工区土木工事
発 注 者	横浜市交通局
施 工 者	清水・大日本・不動・松村・馬淵建設共同企業体
工 事 場 所	(自)横浜市港北区日吉 2 丁目 1 番地先 (至)横浜市港北区日吉本町 5 丁目 491 番
工 事 期 間	平成 14 年 3 月 13 日～平成 20 年 2 月 29 日
工 事 内 容	単線並列シールドトンネル：452.5m 複線断面山岳トンネル：817.3m 単線並列山岳トンネル：13.4m

地質は上総層群の泥岩が大半を占めており、砂層がレンズ状に介在した。また、全路線のうち約 70% は民家の下を通過するため、地表面沈下、地下水の低下に対しては細心の注意を払う必要があった。

NATM 施工区間の補助工法は、地山状況に応じてフォアボーリングまたは AGF を採用した。一部、洪積埋没谷を掘削する箇所については、周辺地盤への影響、切羽崩壊の抑制効果、および施工性を総合的に比較検討し、補助工法として小口径 AGF を採用した。

本稿は、シールドの到達地点より複線 NATM 断面への地中拡幅工事の施工事例、および様々な制約条件の中、家屋が密集した市街地の直下を NATM で施工した事例を報告するものである。

2. 工事概要と工法選定の経緯

工事の概要を表-1 に示す。全路線のうち発進側の日吉本町駅から約 1/3 の区間は、①低土被り(約 10m)、②民家の下を通過、③途中で軟弱な沖積粘土層のおぼれ谷が存在するなどの理由により、2 台のシールドを使用して同時に掘進し、単線並列断面トンネルを築造する工法を採用した。

それより到達までの約 2/3 の区間は、①土被りが 13m～32m で固結した泥岩層であること、②到達駅部の直前に取付けポイント配置のために断面変化が必要なことなどの理由により、NATM による複線断面(到達までの約 13m は単線並列断面)でトンネルを築造する工法を採用していた。また、複線並列シールドの場合には用地の取得面積が大きくなり、総事業費が増大するといった点も NATM が採用された一因となった。シールドから NATM への移行は、土被りが 32m で上部に建物が存在しない地点(グラウンドの直下)で行った。

3. 地形・地質概要

本工区の広域的な地形的特徴は、横浜市の北東部を占める「下末吉台地」と呼ばれる地質の北東端に位置し、北は多摩川、南は鶴見川とその支流により浸食され数多くの谷が形成された、東西方向に細長く伸びる地形を呈している。

横浜市における下末吉台地の一般的な地層構成は、上総層群を基盤とし、下末吉海進時の堆積物である下末吉層がその上位に堆積する。上総層群は広く横浜地域の基盤を形成する鮮新世～前期更新世の地層で、主に軟泥岩(いわゆる土丹)や締まった砂、あるいはこれらの互層で構成される。下末吉層は、この基盤層にある谷状の地形(おぼれ谷)を埋積する地層で、貝化石を含む青灰色の泥層を主体とする。また、下末吉台地が途切れた低地のおぼれ谷には、基盤層に直接沖積層が堆積している。沖積層はシルト層で、貝殻片や有機物が混入しており N 値は 10 未満である。

当該工区は、下末吉台地とそれに隣接する沖積層の低地を掘削対象地盤としており、標高差約 30m と起伏に富んだ地形となっている。

4. NATM 断面への地中拡幅

(1) 工法変更の段取替え

シールドが A 線、B 線の順に拡幅地点に到達した後、NATM への段取替えを行った。シールドは図-3 に示す泥土圧式であり、到達直後はチャンバ内に土砂が充填された状態にある。チャンバ内の土砂をゲートから排土しながら、高濃度の作泥材を注入して置換した。到達地点の地質は固結した泥岩層であり、土圧を下げて切羽は自立していると考えられることから、作泥材の排出後マンロックを開けて介在砂層からの湧水を確認した。切羽面は、カッタービットによる規則的な切削跡を鮮明に確認することができ、砂層からの湧水およびテールからの浸水も少なかった(写真-1)。チャンバ内の作泥材は、ゲートを全開にしても半分程度しか排出できないため、圧縮空気を送ってゲートより排出した。

切羽は十分自立していることは確認できたが、バルクヘッド解体後の崩壊防止のために、チャンバ内で作業できる小型の吹付け装置でファイバーモルタルを吹付け、切羽の安定をより確実なものとした。さらに、砂層からの湧水は少ないものの地下水の低下による周辺地盤への影響を考慮し、溶液系の注入

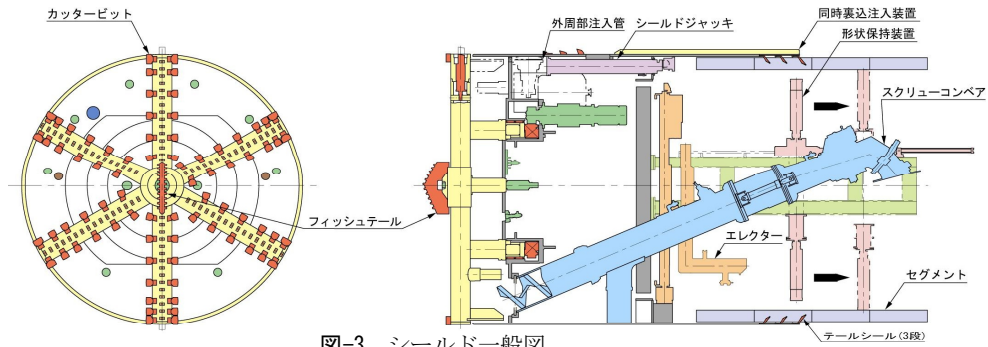


図-3 シールド一般図



写真-1 カッタービットによる切削跡

材による止水注入を行った。

つづいてA, B線シールド共に坑内で解体した。A線シールド内からNATMによる掘削を開始するため、A線シールドでは軌条の盛替え、重機の搬入、重機足場の設置といったNATMへの段取替えを行った。B線シールドはNATM側からの掘削となるため、カッタスポークは残置した。地上設備は、シールドとNATMでは大きく異なるが、ずりピット、立坑クレーン、各種配管系統などは、極力そのまま転用できるように計画した。シールドとNATMの立坑設備の比較を図-4および図-5に示す。



図-4 シールド地上設備



図-5 NATM 地上設備

(2) 地中拡幅掘削

a) 使用機械

NATM の掘削はミニベンチカット工法、機械掘削方式によって行った。掘削対象となる地山は一軸圧縮強度が約 15N/mm^2 の泥岩層が主体であり、複線断面の掘削にはツインヘッダー (BH0.9 m^3 級)、単線断面、およびシールドから NATM へ拡幅する際の掘削にはカッターローダー (56kw 級) を使用した。ツインヘッダーの切削能力は一軸圧縮強度が 49N/mm^2 まで適応可能なため、砂分の含有が少ない固結した泥岩層でも支障なく掘削することができた。トンネル全線を通して、介在砂層からの湧水による肌落ちの危険性があるため、鏡吹付けを行った。

ずり処理および資機材の運搬は、セグメント内を通過することからレール方式とした。NATMで軌道上

を運行する車両は、シールド時の車両と比較して重量が重い、シールド工法で掘進することに延長する軌道は NATM 用の枕木およびピッチで敷設し、シールド到達後、レールゲージを NATM 用に敷設替えした。また、待機する車両が多いため、全線で離合できるように等 3 線レールとし、シールド区間内には分岐を 3 箇所設置した。

吹付け方法は湿式で、コンクリートの運搬には 6m^3 のアジテーターカーを使用した。これにローター型吹付け機と急結材添加装置を搭載した台車を連結し、12t のサーボロコで切羽へ牽引してロボット



写真-2 セグメント内での作業状況

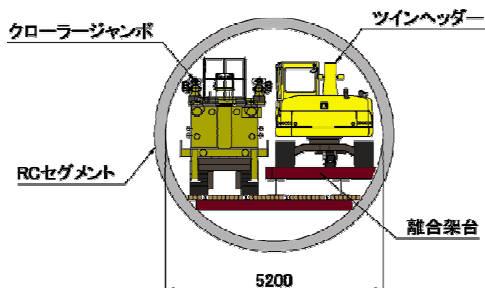


図-6 離合断面図

で吹付け作業を行った。圧縮空気は坑外のコンプレッサーから配管により切羽へ供給したが、その配管はシールド掘進時に作泥管として使用していたものを転用した。鋼製支保工の建込み、およびフォアポーリング(または AGF)には、2B2B(2 プーム 2 バスケット)のドリルジャンボ(シールドからの拡張時は 2B1B のドリルジャンボ)を使用した。

b) 重機の選定

シールドの到達地点から NATM により断面を拡張する場合、重機の選定が重要なポイントとなった。重機の制約条件としては、セグメント内空断面内で①掘削、残土積込・運搬、支保工、吹付けの作業が可能なこと、②重機がサイクル毎の入替時に離合できることなどが挙げられた(写真-2)。また、全ての重機は掘削断面を徐々に拡張することが可能な能力(大きさ)が必要であった。セグメント内空断面内で作業する重機(拡張断面用重機)と、通常断面で使用した重機の比較を表-2 に示す。セグメント内において、最も離合条件が厳しい重機の組合せは図-6 に示すクローラージャンボとツインヘッダーであり、セグメントとのクリアを確保するため離合架台を設置した。

c) 掘削設備

切羽付近では、重機が頻繁に入れ替わって掘削・

表-2 重機の比較表

機械種類	拡張断面用重機	通常断面用重機
クローラージャンボ	2B1B GH75-TR-2B	2B2B THCJ2400-2B
掘削機械	カッタローダー CL9E-1	0.9 m ³ MT-2000
サイドダンプ	0.4 m ³ FL302	2.3 m ³ CAT950F
吹付けロボット	MR-II (ベースマシン 0.1 m ³)	AL306(ベースマシン 0.45 m ³)
ブレイカー	ベースマシン 0.25 m ³	ベースマシン 0.45 m ³
バックホウ	0.1 m ³	0.45 m ³
バッテリー機関車	12t サーボロコ	
ずり鋼車	6 m ³ エアバック式	
アジテーターカー	6 m ³	
吹付け機	ローター型(アリバ 285)	



写真-3 木製重機足場

支保工・吹付け・先受工といった作業を行うために、レール天端の高さで作業床をそろえて効率良く重機が作業できる「木製重機足場」を設置した(写真-3)。また、吹付け時には多量の粉じんが発生するため、送気設備に加えて集じん設備を設置し坑内環境の保全に努めた。

4) 掘削順序

拡張掘削部の平面図と施工フローを図-7 に示す。まず、通常断面用重機が離合できる断面の大きさになるまで、拡張断面用重機にて徐々に拡張しながら掘削を行った。掘削機械の性能を考慮し、掘削工法はショートベンチ工法とした。次に通常断面用重機が全て待機できるスペース(延長約 30m)を確保できるまで掘削を続けた。そして拡張断面用重機を通常断面用重機に入れ替えた後、同様に通常断面の大きさになるまで徐々に拡張しながら掘削を行い、さらに通常断面で重機が待機できるスペースが確保できるまで掘削を続けた。そして拡張断面用重機を通常断面用重機に入れ替えた後、同様に通常断面の大きさになるまで徐々に拡張しながら掘削を行い、さらに通常断面で重機が待機できるスペースが確保できるまで掘削を続けた。所定の延長まで掘削後、すべ

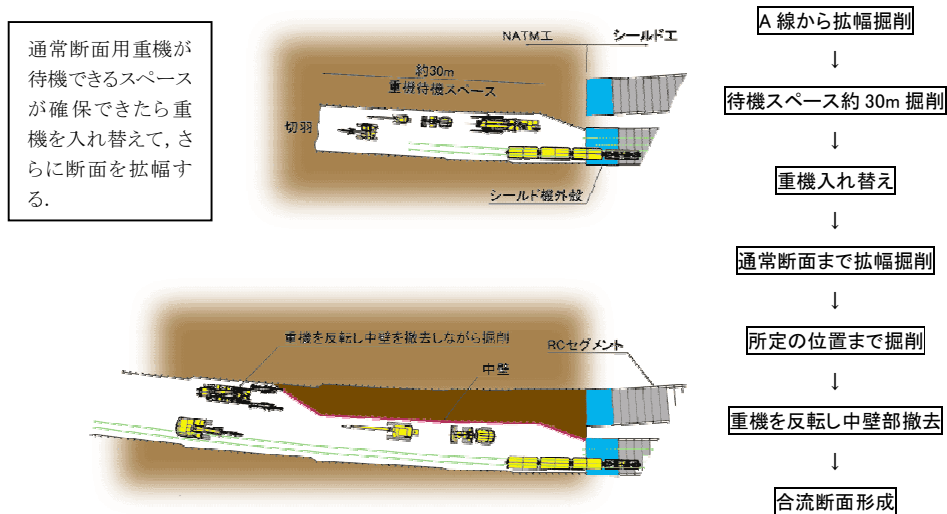


図-7 拡幅施工の概略図



写真-4 拡幅部の掘削状況 (1)



写真-5 拡幅部の掘削状況 (2)

ての重機を反転し、掘削開始地点へ向かって分割断面の中壁を撤去しながら本断面まで切り抜けを行った。シールドから NATM への段取替え、および地中拡幅による切り広げが完了するまでの工期は約 5 ヶ月であった。

5. 洪積埋没谷の掘削(小口径 AGF)

NATM 施工区間の一部に洪積埋没谷の直下を通過する箇所があり、掘削断面の上部には地下水豊富な砂礫層が出現した。また、トンネルの直上には家屋が密集しており、ビルの基礎杭が掘削断面内に入っている箇所があった。この砂礫層を掘削する約 30m 区間の補助工法には小口径 AGF を採用した。小口径 AGF は AGF の打設管を小口径および短尺化したもので、本工法を採用した理由は次のとおりである。

- ① 打設長が短く小口径であることから(今回選択した鋼管長は 3.0m、口径は 60.5 mm)、砂礫層でも安定した削孔が可能である。
- ② 1 基ごとに鋼管を打設することから、前基の



写真-6 拡幅部の掘削状況 (3)

鋼管の先受効果も期待できるため AGF と同様の地表面沈下抑制効果を期待できる。

- ③ 鋼管が短いため均質で確実な改良体を築造することができる。
- ④ 打設位置の変更や増打ちなどの自由度が高く、地中に支障物がある場合の補助工法として適している。

洪積埋没谷の掘削時には、堅固な泥岩層と脆弱な砂礫層の明確な層境を確認したが、砂礫層は確実に改良されており、大きな肌落ちや崩落もなく無事施工することが出来た。また、トンネルの掘削から通

過に渡って、地表面沈下量の計測結果は、砂礫層を含む断面で解析した値以下に抑制することが出来た。

6. 計測工および安全設備

(1) 計測工

NATM 区間のトンネル直上は住宅密集市街地であり、ガス・上下水道などの地中埋設物が縦横に張り巡らされていた。掘削の対象の地質は、第四紀前期更新世上総層群が主体で、N 値 50 以上の泥岩層(土丹)が大半を占めている。泥岩層の変形係数は 230MPa (設計値) で比較的大きく、トンネル掘削に伴う近接構造物への影響は少ないと考えられた。

しかし、泥岩層には不規則に砂層あるいは軽石層が介在しており、高い含水状態にあると予想され、豊富な地下水により切羽から細砂が大量に流失した場合、泥岩層に水平な広がりを持つ空洞が発生し、この空洞の逐次崩壊による沈下によって近接構造物の健全性が損なわれることが最も懸念された現象であった。

トンネル掘削時の地山および近接構造部の挙動を予測する方法として FEM などの数値解析があるが、その挙動を正確に予測することは困難である。そこで、切羽の安定を図って効率よくトンネルを施工するためには、計測によって地山の挙動を正確に把握することが極めて重要となる。当工区では、掘削開始直後から通常の計測 A に加え計測 B を実施し、計測結果の評価・分析ならびに FEM による同定解析を行い、住宅が密集化する前に地山挙動と支保のメカニズムを把握した。これらの検討結果に基づき、計測結果の管理基準を 3 段階設定し、それぞれに応じて迅速な対応ができる管理体制を確立した。

(2) 安全設備

掘削中の切羽は、狭隘な場所にさまざまな重機が稼働しており非常に危険であるため、掘削中の切羽への立入禁止を徹底した。切羽作業区域は重機が待機している範囲と定め、掘削中には立入禁止の電光掲示板の設置および監視員の配置をした。掘削中に切羽へ立ち入る際は、切羽付近に設置した回転灯を設置し、この合図により重機が完全に停止したことを確認してから立ち入るルールを徹底した。

7. まとめ

シールドから NATM に工法を変更して掘削を継続する工事は前例がないため、全社一丸となって数多くの創意工夫と綿密に施工・設備計画を検討し慎重に施工に臨んだ結果、当初の工程を確保し順調に掘削を進めることができた。

洪積埋没谷の掘削では、砂礫層が介在し地下水を豊富に含む脆弱な地山で、なおかつ支障物を撤去しながら掘削するといった難しい施工条件であったにもかかわらず、小口径 AGF 等の補助工法を採用して、近接構造物に悪影響を及ぼすことなくこの区間を施工することができた。

その他様々な厳しい制約条件のなか、工事による影響を地上にほとんど与えることなく、厳しい工期を達成し後続工事に引渡し、平成 20 年 3 月 30 日グリーンライン開業を迎えることができた。最後に、本工事の施工にあたりご指導いただいた「高速鉄道 4 号線駒林工区土木工事トンネル検討会」の委員ならびに工事関係者に謝意を表する。



写真-7 到達部単線断面をのぞむ

参考文献

- 1) 荻野幸男, 谷畑一行, 橋本芳実: 単線並列シールドから複線山岳トンネルへの移行, トンネルと地下, VOL37, No.4, 2006. 4.
- 2) 谷畑一行, 鈴木康弘, 川島恵介, 矢部幸男: 単線シールド断面から複線 NATM 断面への地中拡幅施工, 平成 17 年度土木学会全国大会, 2005. 9.
- 3) 阿部浩, 矢部幸男, 川島恵介, 石黒聡: 単線シールド断面から複線 NATM 断面への地中拡幅施工と都市部における洪積埋没谷の施工, 平成 18 年度日本トンネル技術協会施工体験発表会, 2006. 11.