

# 大断面シールドにおける 発進方法の改善について

高橋博威<sup>1</sup>・高瀬隼人<sup>2</sup>・永井政伸<sup>3</sup>・松原健太<sup>4</sup>・高浜達矢<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 首都高速道路（株）東京建設局改築推進グループ（〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-3）  
E-mail: h.takahashi1182@shutoko.jp

<sup>2</sup>正会員 首都高速道路（株）神奈川建設局横浜工事事務所（〒222-0033 横浜市港北区新横浜3-20-8）  
E-mail: h.takase118@shutoko.jp

<sup>3</sup>正会員 首都高速道路（株）神奈川建設局設計グループ（〒221-0013 横浜市神奈川区新子安1-2-4）  
E-mail: m.nagai1310@shutoko.jp

<sup>4</sup>正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体  
（〒223-0059 横浜市港北区北新横浜2-7-3）  
E-mail: matsubara.kenta@obayashi.co.jp

<sup>5</sup>正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体  
（〒223-0059 横浜市港北区北新横浜2-7-3）  
E-mail: takahama.tatsuya@obayashi.co.jp

シールド工において、鏡切り時には一般的に地盤改良等の発進防護が用いられている。本工事においては、地盤改良による発進防護を行った場合、多数の介在砂層が存在することから、地下水に流出に伴う流砂による切羽崩壊の危険性が高いことが懸念された。そこで、より安全で確実な施工法として、遮水壁による発進防護を適用した。

また、シールド発進・初期掘進時には、一般的に鋼材等により反力壁を設置し、仮組セグメントを利用した発進方法が用いられている。しかし、一般的な手法では、段取替え等における資材投入に時間を要するという課題があった。本工事においては、工程短縮を目的として、移動式反力壁による発進方法を採用した。

本稿では、遮水壁による発進防護と移動式反力壁によるシールド発進・初期掘進の概要と施工結果について報告する。

**Key Words :** launch protection, initial drive, movable thrust frame

## 1. 工事概要

現在、首都高速道路株式会社が整備を進めている横浜環状北線（以下、北線）は、横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間であり、第三京浜道路「港北インターチェンジ」と首都高速横浜羽線「生麦ジャンクション」をつなぐ延長約8.2kmの自動車専用道路である（図-1参照）。北線は、家屋の移転を少なくし、周辺環境を保全するために、全体の約7割をトンネル構造としている。北線のうち、横浜環状北線シールドトンネル工事では、新横浜発進立坑を起点に子安台換気所を終点とする延長約5.5kmの大断面併設トンネルを2台の泥土圧シールド機（外径φ12.49m）によって構築する。

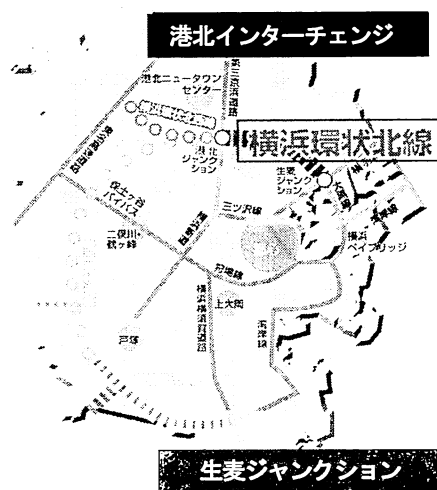


図-1 横浜環状北線の概要

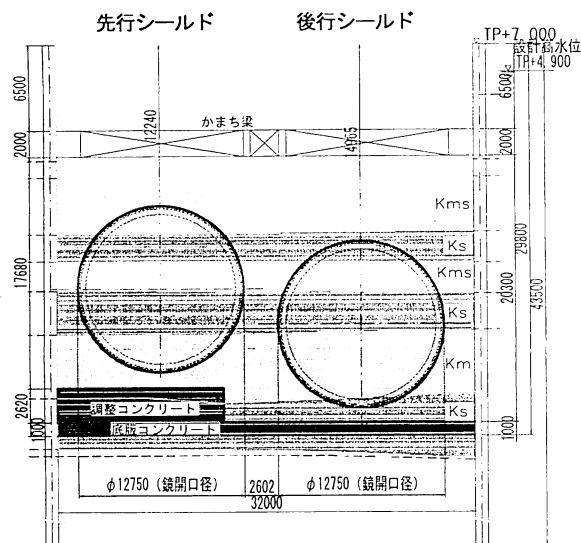


図-2 発進立坑部横断面図

本シールドの発進部については、図-2 に示すように、土被りが 12.2m (先行シールド) , 15.0m (後行シールド) で、併設トンネルの離隔は約 3.0m である。発進立坑の反力壁側には、開削工法により施工したトンネル躯体の施工が完了している (図-3 参照)。

## 2. 本工事における課題

近年、シールド工事においては、シールド設備の進歩や組立時間の短縮を図るセグメントの開発などから、高速施工化が進んでいる。しかし、シールド工事のうち、鏡切りや初期掘進・段取替え等の工種においては、依然として手間がかかり時間を要しているのが現状である。

一般に、鏡切りにおいては、土留壁の芯材撤去後の鏡部の自立性と止水性を確保するために、土留壁背面に地盤改良等の発進防護を行う。本工事の発進部の土質は泥岩 (Km) , 砂質泥岩 (Kms) , 砂・砂岩 (Ks) の互層で、Km 及び Kms は一軸圧縮強度が  $1000\text{kN/m}^2$  以上、Ks は N 値が 50 以上と硬質な地盤で自立性が高い。しかし、Ks 層は均等係数が 2.5 程度と小さく被圧 (0.24MPa 程度) されており、地下水の流出に伴う流砂現象が生じる可能性がある。また、本シールドは大断面であるため鏡切り時の地山露出面積が大きく、切羽崩壊の危険性が高いことが懸念された。そこで、より安全・確実に効率的な発進防護・鏡切り方法の検討を行った。

シールド発進については、一般に、鋼材等で反力壁を設置後、仮組セグメントを組立て、これにシールド推力を伝達させて掘進する。また、初期掘進中はシールド後続台車を地上に配置し、初期掘進完了後に坑内に投入することが多い。これらの方法の場合、反力設備が支障してセグメント等の坑内投入に手間がかかる、段取替えに時間を要する、といった課題があった。そこで、これら

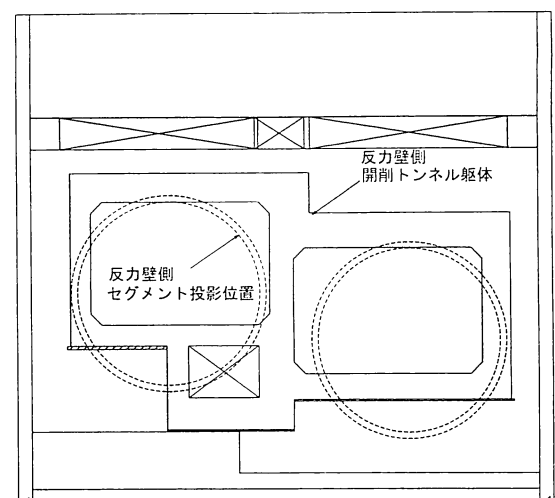


図-3 発進立坑部横断面図

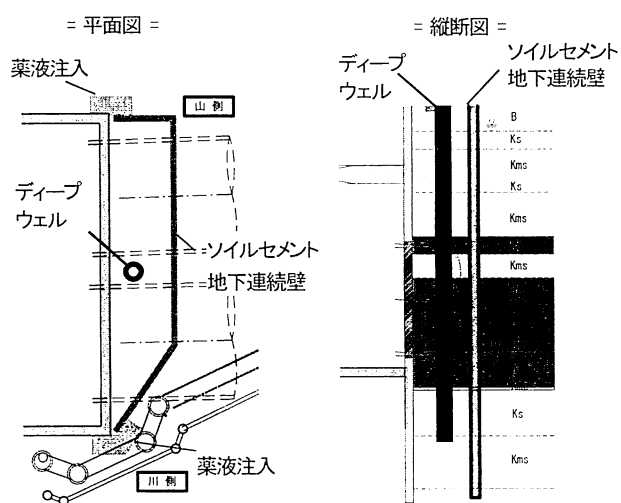


図-4 遮水壁による発進防護工

の課題を解消し工程短縮を図るために、効率的なシールド発進・初期掘進方法の検討を行った。

## 3. 発進防護・鏡切り方法

### (1) 改善案

発進部の土層は、Km 層、Kms 層のいずれも硬質で自立性が高く、Ks 層についても地下水の流出がなければ自立する。また、立坑掘削時の状況を考慮すると、ボーリング柱状図に反映されていない層状の Ks 層が多数介在していると想定された。これらから、鏡切にあたっては、Ks 層の止水を確実に行うことが重要と考えた。

Ks 層の止水方法としては、薬液注入や地盤改良を考えたが、施工中の立坑土留壁への影響を防止するためには大規模な補強が必要であった。そこで、鏡部は硬質な地盤で地下水の流出がなければ自立することに着目し、図-4 に示す発進防護・鏡切り方法を立案した。

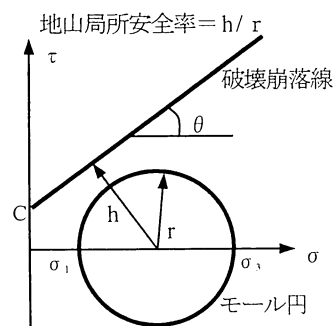
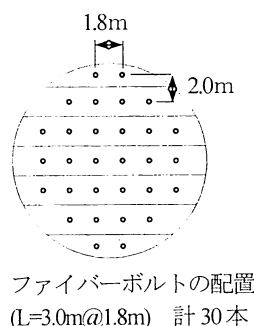
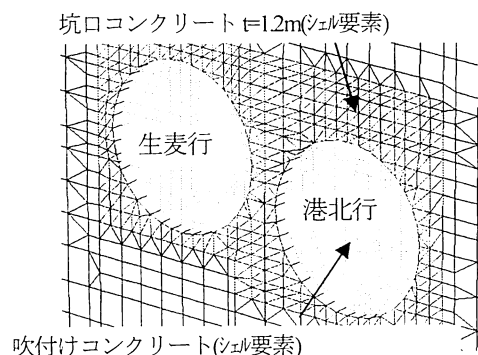
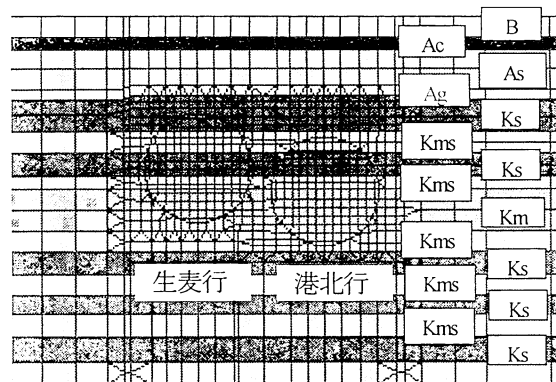
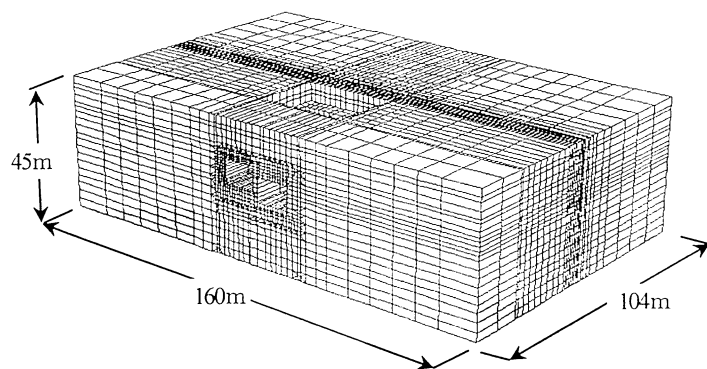


図-5 鏡部 三次元 FEM 安定解析モデル

図-6 地山局所安全率

表-1 限界せん断ひずみ一覧表

| 地層  | 弾性係数              | 内部摩擦角 |       | ポアソン比 | 平均応力              | 限界<br>ひずみ | 限界せん断<br>ひずみ |
|-----|-------------------|-------|-------|-------|-------------------|-----------|--------------|
|     | E                 | φ     |       | ν     | γ H               | ε 〇       | γ c          |
|     | MN/m <sup>2</sup> | 度     | rad   |       | MN/m <sup>2</sup> |           |              |
| Km  | 703.8             | 6     | 0.105 | 0.35  | 0.82000           | 0.7%      | 0.8%         |
| Ks  | 107.3             | 42    | 0.733 | 0.35  | 0.82000           | 1.1%      | 1.9%         |
| Kms | 284.3             | 11    | 0.192 | 0.35  | 0.82000           | 0.8%      | 1.1%         |

本方法は、土留壁背面を遮水壁（ソイルセメント壁、 $t=700\text{mm}$ ）で囲い、土留壁と遮水壁の接合部については薬液注入により止水性を高める。その後、ディープウェルで遮水壁内の地下水位を低下させて鏡切を行うものである。鏡切の手順は、鏡部の下側から高さ約 2m 毎に土留壁を撤去し、露出した地山にモルタル吹付を行う。吹付モルタルの剥離防止を目的として、吹付前に地山面にはシールド機で切削できるファイバーメッシュ（ $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）を設置し、モルタルには繊維を混入する。また、Km 層に対しては、鏡切時の大割れ防止と作業時の安全性確保を目的として土留壁撤去前にファイバーボルト（ $\phi 23\text{mm}$ ， $L=3.0\text{m}$ ）を打設する。

## （２）鏡部の安定検討

本方法を用いた場合の鏡部の安定性を FEM 解析により評価した。

図-5 に示すように発進部をモデル化して、前述の鏡切手順にしたがったステップで三次元 FEM 解析を行った。三次元 FEM 解析では、坑口コン

クリート及び鏡部の吹付コンクリートをシェル要素としてモデル化し、ファイバーボルトを引張材とした解析を行った。鏡部の安定性は、①解析で算出したせん断ひずみが、限界せん断ひずみ（表-1 参照）以下であること、②地山局所安全率が 1 以上であることから判断した。なお、限界せん断ひずみは、弾塑性境界上の最大せん断ひずみと定義したものであり<sup>1)</sup>、地山局所安全率とは、破壊崩落線に対し、モール円が近接する程度を表すもので、地山局所安全率 $=h/r$ で示す（図-6）。また、遮水壁に作用する水圧に対し、遮水壁のせん断応力を算出し、鏡切り時の遮水壁の健全性も評価した。

解析の結果、図-7に示すように鏡切時に発生するせん断ひずみは限界せん断ひずみ以下で、地山局所安全率は1以上となり、鏡部の安定性については問題ないと判断した。また、遮水壁のせん断応力は安全率2を確保しており、鏡切り時、遮水壁は健全性を保つと判断した。鏡切に伴う地山の押出し量は、トンネル中央部で外回り側が5mm、内回り側が

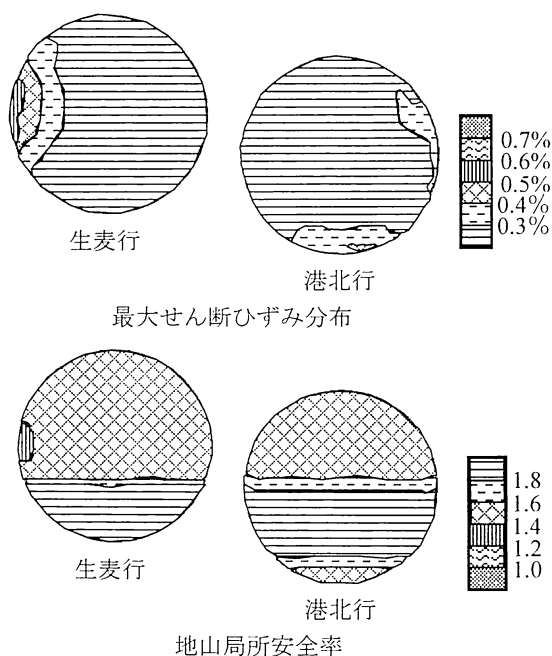


図-7 三次元 FEM 解析結果

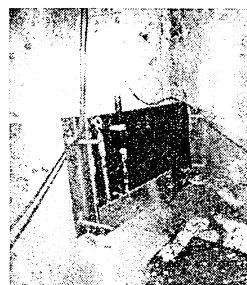


写真-1 光る変位計

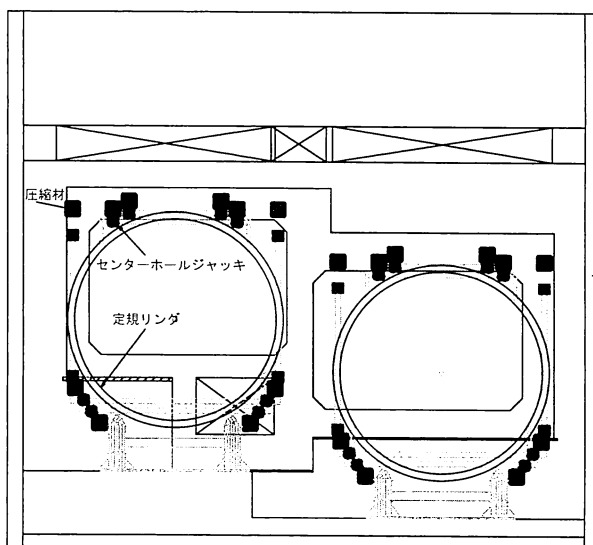
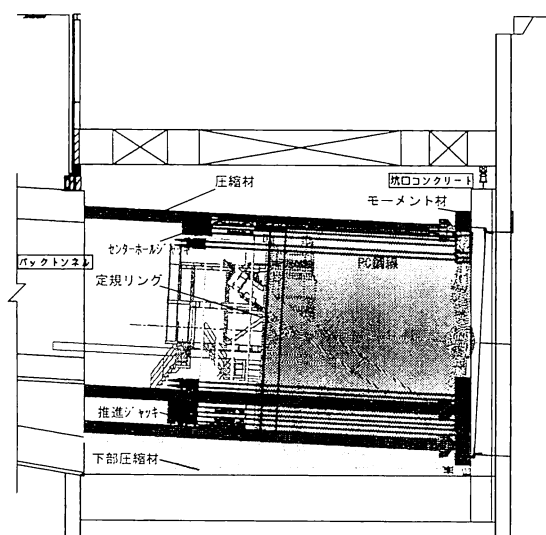


図-8 移動式反力壁による発進方法

7mm と予測した。これらの値については、管理値として施工に反映させた。

### (3) 施工結果

施工にあたっては、遮水壁内外に観測孔を設置して、遮水壁内外の地下水位の状況を観察しながら施工を進めた。また、鏡部の変位量を計測した。計測は光波測量に加えて写真-1 に示す「光る変位計」（変位量に応じて LED 色の変化）でも管理しリアルタイムに安全監視を実施した。

両トンネルとも問題なく鏡切を行うことができ、鏡切りに要した期間は約2週間であった。鏡部の変位量については、トンネル上部、中央部、下部のモルタル吹付面で計測したところ、変位はみられなかった。

## 4. シールド発進・初期掘進方法

### (1) 改善案

本工事においては、反力設備に仮組セグメントを用いず、センターホールジャッキ、推進ジャッキ、移動式反力壁によりシールドを発進させる方法を検討した（図-8 参照）。シールド推力は、センターホールジャッキから推力伝達材を介して定規リングに伝達させ、センターホールジャッキの反力は坑口部に設置した PC 鋼線定着材から圧縮材を介してバックトンネル側に伝達させる。定規リングはシールドテール内に設置しシールドジャッキで支持している。なお、シールド下部については、発進架台と反力設備を兼用するため、シールド推力を推進ジャッキ

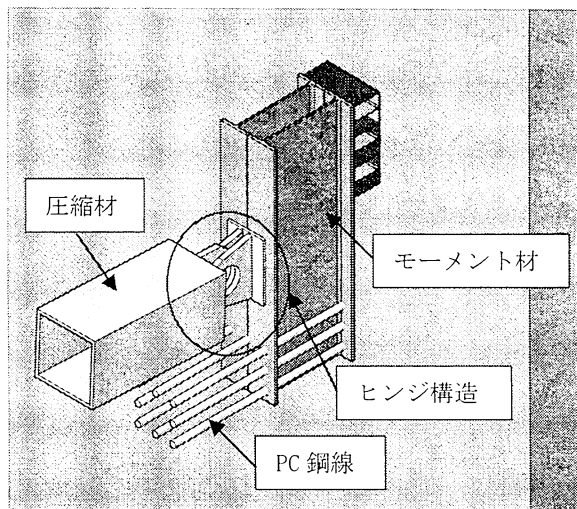


図-9 PC 鋼線-圧縮材接合部詳細図

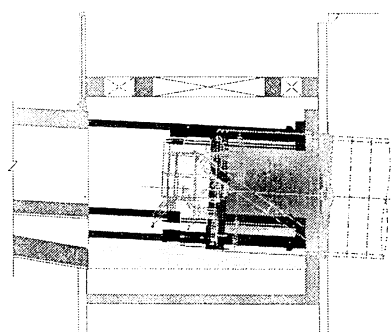
キから定規リングに伝達させ、推進ジャッキの反力は、発進架台下部の圧縮材を介して坑口に伝達させる。図-3 に示すように、発進立坑の反力壁側には、開削工法により施工した構築済みのトンネル躯体があるため、これを避けた位置に圧縮材を配置する必要があった。圧縮材の設置できる位置が限定され、圧縮材と PC 鋼線及びモーメント材との偏心量が大きくなるため、圧縮材に曲げモーメントが作用しないように、PC 鋼線定着材及びモーメント材と圧縮材の接合部をピン構造とした（図-9 参照）。本設 1 リング目のセグメントは、図-10 に示すように、シールドを掘進し定規リングが坑口部にきた時点で定規リングに合わせて組立てを行う。その後は、センターホールジャッキを固定し、シールドジャッキによる掘進に移行する。

今回の発進方法は、センターホールジャッキ・推力伝達材・定規リングがシールドと一体となって進むため、図-10に示すように立坑内の作業空間がシールドの掘進に伴い広がる。そのため、初期掘進時の資材搬入効率が向上する。また、初期掘進完了時の段取り替えにおいて、従来の仮組セグメントを用いた発進方法に比べて設備撤去が容易であるため、段取替え工程の短縮を図ることができる。

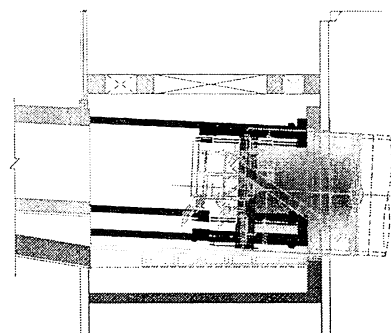
また、シールド後続台車は反力壁側の開削トンネル内に並べ、シールドの進行にあわせて坑内に引込む方法を考えた。この方法によって初期掘進完了時には後続台車が全て坑内に投入された状態になるため、段取替えに要する期間を短縮することができる。

## (2) 本設セグメントへの影響検討

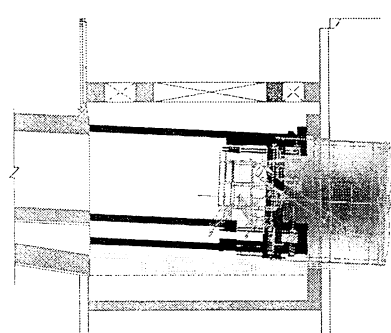
本工事においては、圧縮材の配置は、①バックトンネルの開口を避ける、②立坑開口からの資材投入に支障をきたさない、といった位置に限定された。そのため、圧縮材の設置できる位置を考慮して、PC 鋼線の配置と推力伝達材の大きさを決定する必要があった。その結果、今回の移動式反力壁は、定規リングが推力伝達材によって支持され



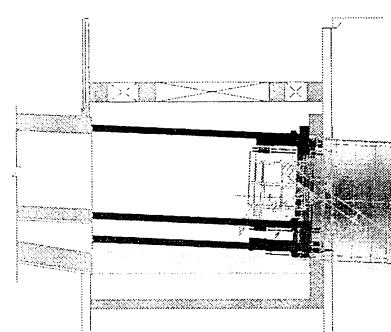
下部圧縮材盛替 (1 回目)



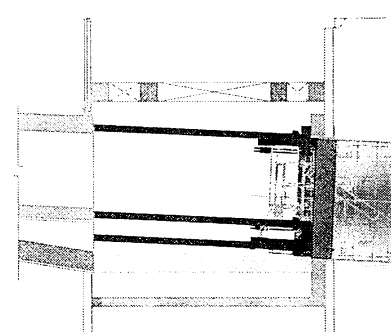
下部圧縮材盛替 (2 回目)



下部圧縮材盛替 (3 回目)



下部圧縮材盛替 (4 回目) センターホールジャッキ固定



シールドジャッキによる掘進 1 リング目組立

図-10 掘進ステップ図

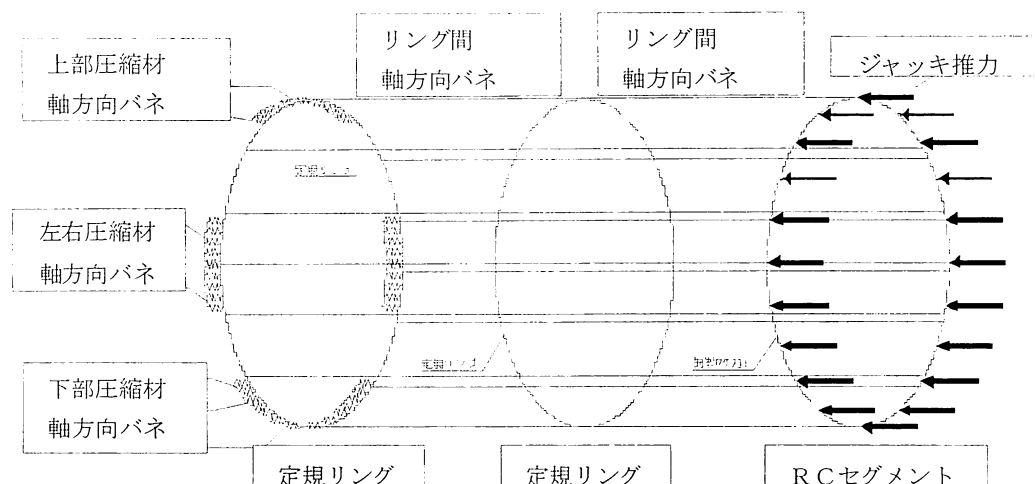


図-11 初期掘進セグメント解析モデル

ている支間が大きい構造となった。このような構造を勘案すると、シールド推力の作用時、定規リングに変形が生じ本設 RC セグメント（以下、RC セグメント）に損傷を与えることが懸念された。

そこで、図-11 に示すように定規リングと RC セグメントをモデル化してフレーム解析を行い、RC セグメントへの影響の有無を確認した。影響の有無は、RC セグメントにひび割れが発生するか否かで評価した。解析の結果、RC セグメントにひび割れが生じることが判明したため、定規リングと RC セグメントの間に鋼製セグメントを設置し、影響を低減することを考えた。図-11 に示した解析モデルで鋼製セグメントも考慮して同様の解析を行った結果、2 リング目まで図-12 に示す鋼製セグメントを組立、3 リング目に RC セグメントを組めば、RC セグメントにひび割れが発生しないことがわかった（表-2 参照）。

#### （５）施工結果

施工時は圧縮材、推力伝達材の応力を計測し、安全性を確認しながら掘進を行った。掘進中に発生した応力は計算値の概ね110%であり、偏心による曲げモーメントの影響によるものであると考えられる。

解析結果から、3 リング目からRCセグメントを施工したが、シールドジャッキの推力作用時にひび割れが発生することはなかった。

初期掘進長は計算上74mであったが、実施工においては、圧縮材および推力伝達材に作用する応力の減衰を評価して初期掘進長を決めた。その結果、初期掘進長は62mとなった。

当初計画において、初期掘進・段取替え期間は約2.5カ月を予定していたが、約2.0カ月に工程を短縮することができた。

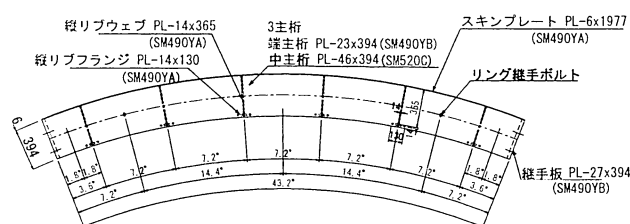


図-12 鋼製セグメント構造図

表-2 RCセグメント応力度照査結果

| リング本体              |                       | 2リング目に<br>RCセグメントを<br>設置した場合    | 3リング目に<br>RCセグメントを<br>設置した場合 |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 最大曲げ<br>モーメント      | Mmax kN・m             | 1094.5                          | 817.3                        |
| 最大せん断力             | Smax kN               | 797.8                           | 819.9                        |
| 断面積                | A m <sup>2</sup>      | 0.800                           | 0.800                        |
| 断面係数               | Z m <sup>3</sup>      | 0.267                           | 0.267                        |
| SFRC発生<br>応力度      | sct N/mm <sup>2</sup> | -1.10                           | -3.06                        |
| せん断応力              | t N/mm <sup>2</sup>   | 1.00                            | 1.02                         |
| コンクリート<br>引張強度     | N/mm <sup>2</sup>     | 3.53<br>実強度 60N/mm <sup>2</sup> |                              |
| コンクリート<br>許容せん断応力度 | N/mm <sup>2</sup>     | 1.13<br>SFRC(?=1)               |                              |
| 判定                 |                       | NG                              | OK                           |

#### 5. まとめ

本工事の施工において、硬質地盤における大断面シールドの発進防護として遮水壁による発進防護が適用可能であること、また移動式反力壁による発進方法により初期掘進、段取替えに要する期間を短縮可能であることが確認できた。本報文が今後のシールドトンネル計画の参考になれば、幸いである。

#### 参考文献

- 1) 桜井他「計測変位に基づく地価空洞周辺地山に発生する塑性領域の推定法」（土木学会論文集 第 391 号/Ⅲ-9 1988 年 6 月）

## Improved Launch Method for a Large Cross Section EPB TBM

Hirotake TAKAHASHI, Hayato TAKASE, Masanobu NAGAI,  
Kenta MATSUBARA and Tatsuya TAKAHAMA

Ground improvement technique such as jet grouting is generally employed as a protection for the launch of the tunnel boring machine (hereafter TBM). In this project, however, application of jet grouting was not a preferable technique provided that the shaft had already been sunk to the bottom and therefore numbers of supports would have been required to retain the shaft wall against grout pressure. Furthermore, there was a risk of tunnel face collapse due to the movement of sand particles induced by ingress of underground water. Therefore, water cut-off wall together with dewatering provision was applied as a safer launch protection.

As to a thrust mechanism during the TBM launch, a reaction frame and temporary segments have been generally used. However, this method requires more time in transporting materials into the tunnel and in rearranging the shaft and tunnel facilities for main drive. Therefore, in this project, a movable reaction frame was employed instead of the above-mentioned conventional method in order to shorten the construction duration.

This paper reports the overview and the findings upon the construction with regard to water cut-off wall as a launch protection and movable reaction frame as a thrust mechanism during the initial drive.