

地盤切削機構を有する 小断面ボックス推進工法の開発

郡司 圭悟¹・本田 諭²・齋藤 貴³・中村 征史⁴・長尾 達児⁵・桑原 清⁶

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6)

E-mail: keigo-gunji@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6)

E-mail: hondas@jreast.co.jp

³フェロー会員 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6)

E-mail: tk-saito@jreast.co.jp

⁴正会員 鉄建建設(株) 建設技術総合センター (〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1)

E-mail: seishi-nakamura@tekken.co.jp

⁵正会員 鉄建建設(株) 建設技術総合センター (〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1)

E-mail: tatsuji-nagao@tekken.co.jp

⁶フェロー会員 (株)ジェイテック (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町3-12-3)

E-mail: kiyoshi-kuwabara@j-t-e-c.co.jp

切削ワイヤにより地盤を切断しながらプレキャストボックスを推進し，線路下に小断面ボックス構造物を非開削で構築する工法の開発を行った．開発工法では，刃口と後続ボックスの間に姿勢制御アダプターを設け，刃口姿勢を制御しながらの掘進を可能とした．また，立坑スペース確保が困難な狭隘条件下でも施工を可能とするため，刃口および姿勢制御アダプターを分割，回収可能な構造とすることで，到達立坑サイズを最小化した．試験ヤード内にて掘進試験を実施した結果，開発工法の実用性を確認した．

Key Words : small section underground structure, ground cutting wire saw, non-open cut method, attitude control, full-scale test

1. はじめに

非開削による小断面ボックスカルバートの構築工法の一つとしてCOMPASS工法（COMPAct Support Structure method）（以下，従来工法という．）がある¹⁾．従来工法は，地表面変状を抑制するために，地盤切削ワイヤで地盤を切削しながら鋼板（以下，防護鋼板という．）を先行挿入しボックス全周の防護を行ったのちに，鋼板内部を掘削しながら支保工の建込みと場所打ちコンクリートボックスの構築を行う，もしくはプレキャストボックスを推進して函体の構築を行う施工法である（図-1）．

従来工法の課題として，地盤切削ワイヤを到達立坑側に設置した切削装置ユニットにより回転させるため，切削ワイヤの長さにより施工延長が約25mに制限されていた．また，従来工法では一定面積の到達立坑スペースが必要となり，狭隘な施工条件下では適用が困難といった

課題もあげられている．

そこで，従来工法の課題を解決し，地表面変状リスクを抑えながら小断面ボックス構造物を非開削で構築する工法（以下，本工法という．）を新たに開発した（図-2）．

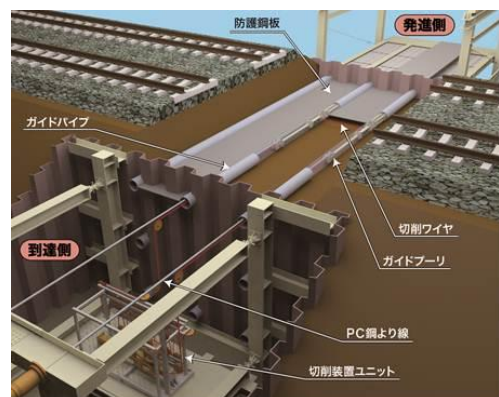


図-1 COMPASS工法の概要図

本工法の特徴は次のとおりである。

- 1) 刃口の前方で地盤切削ワイヤを回転させ支障物を切断しながら掘進する（以下、地盤切削機構という。）ことで、刃口が支障物を押し込むことや過度に取り込むことによる地表面変状を抑制する。また、地盤切削ワイヤの駆動装置を刃口内部に収納することで、施工可能延長を無制限化した。
- 2) 施工精度の向上と刃口姿勢の修正時における地表面変状リスクを抑制するために、刃口と後続ボックス間にジャッキにより刃口の角度を修正する機構（以下、姿勢制御アダプターという。）を取り入れた。
- 3) 刃口および姿勢制御アダプターを分割可能な構造とすることで、到達立坑スペースに制限がある場合においても刃口の回収を可能とした。

2. 工法概要

本工法は2~5mサイズのプレキャストボックスを推進することを想定している。基本的な施工方法は、刃口内部での人力による掘削と発進立坑での元押しジャッキによる推進をサイクルで行うものである。

図-3は本工法の施工手順を従来工法と比較したものである。従来工法ではボックス全周に防護鋼板を挿入した上でボックスを掘進していた。それに対して本工法では、防護鋼板を用いず、刃口上床の地盤切削機構を駆動させながら掘進を行う。

以下では本工法の各機能について説明する。

(1) 地盤切削機構

地盤切削ワイヤは、従来工法と同様にφ10.5mmの無水ワイヤを用いる。地盤切削ワイヤおよび先端プーリーを通すためのガイドパイプは、硬質ポリ塩化ビニル厚肉

管（VP管：φ300mm）を使用する。

地盤切削ワイヤの駆動装置（電動モーター）は、刃口内部の天井部分に設置し、複数のプーリーを介して刃口先端部で回転させる。これにより、従来工法の課題であったワイヤ長さに伴う施工延長制限を解消した。

(2) 姿勢制御アダプター

本工法では、地盤切削ワイヤで切削した地盤に上床ルーフを貫入させて掘進するため、刃口前方の余堀りが不可能である。そのため、刃口姿勢を綿密に管理し、掘進距離に応じた角度修正が必要である。なお、刃口姿勢の急激な変化は、刃口上部の地盤を押し上げ、地表面を隆起させる懸念があった。そこで、刃口の姿勢制御および地表面の変状を低減させるため、姿勢制御アダプターを開発した（写真-1）。姿勢制御アダプターは、前胴（刃口側）と後胴（ボックス側）からなり、装備した4台のジャッキにより前胴（刃口）の方向修正を行う。また後胴に反力を取り前胴（刃口）を押し出す操作（中押し操作）も可能である。前胴と後胴間の伸縮部は楕型の形状とし

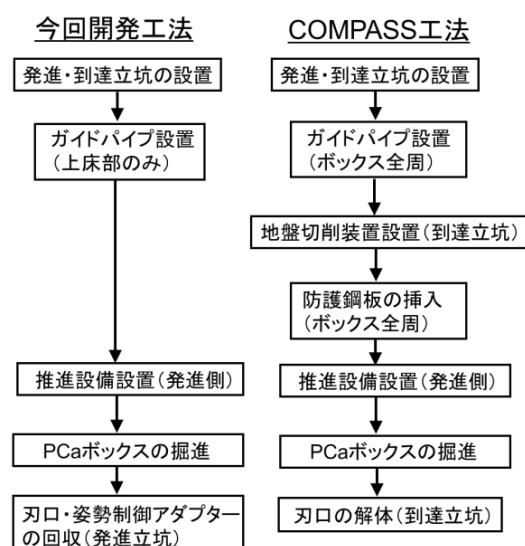


図-3 施工フローの比較

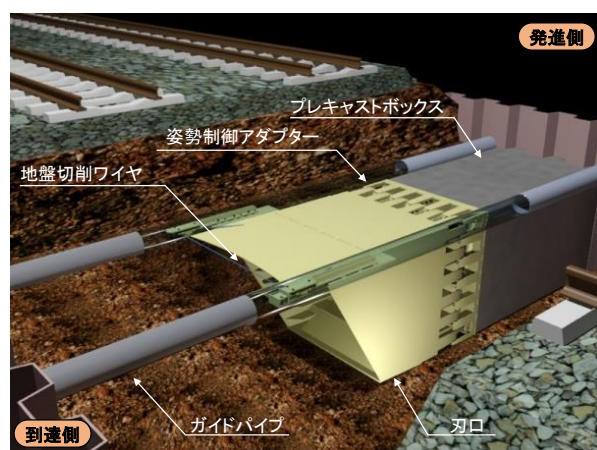


図-2 開発工法のイメージ



写真-1 姿勢制御アダプター

外部に開放する面積を少なくした。また施工中は外周に土砂侵入防止板を設置し、土砂の内部への進入による動作不良リスクを低減する。

姿勢制御アダプターの適用は、図-4 に示すように、常時は微細な修正を繰り返し、刃口姿勢が一定となるように掘進管理を行う。また刃口姿勢を変化させる場合は、上下ジャッキのストローク長を調整し、掘進距離に応じて徐々に刃口角度を修正しながら掘進することで、地表面への影響を低減する。

(3) 分割、回収可能な刃口構造

従来工法の到達立坑は、刃口けん引装置や地盤切削装置の配置スペースを含め、刃口搬出に伴うスペースを確保する必要があった。しかし、駅改良工事等で到達立坑スペースが十分に確保できない場合も想定され、到達立坑寸法を極力縮小することが望まれる。本工法では図-5 に示す、刃口および姿勢制御アダプターをブロック化しボルト接合として、到達後の分割解体が可能な構造とし

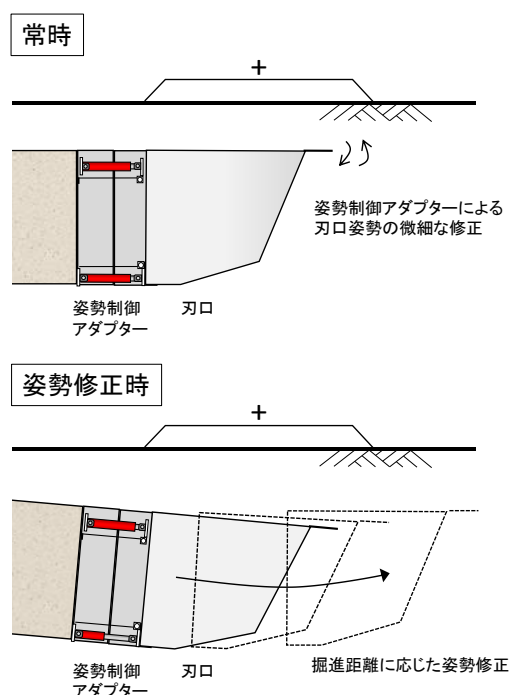


図-4 姿勢制御アダプターによる方向修正

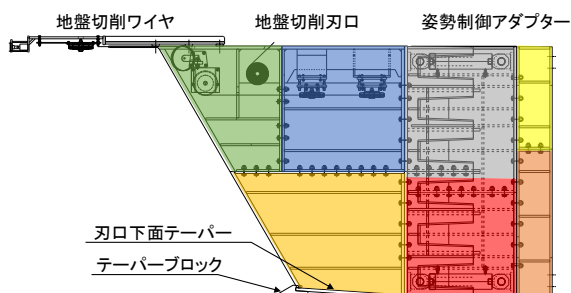


図-5 刃口、姿勢制御アダプターの分割例

た。地盤切削機構を刃口に設置することとあわせて、到達立坑寸法の最小化を図った。

今回の試験では幅2mのボックスを推進するものであり、その場合の作業に必要な最小立坑寸法を図-6に示す。矩形の深礎（立坑）で施工する場合には、3.0m×2.0m、円形の深礎の場合にはφ3.0mと寸法を設定した。

3. 掘進試験

開発した本工法の施工性および各機能の有効性を確認するために、試験ヤードにて掘進試験を実施した。

(1) 試験概要

掘進試験の概要を図-7に、試験条件を表-1に示す。掘進延長は発進、到達立坑間の24.5mであり、長さ2mのプレキャストボックスを14体使用した。刃口および姿勢制御アダプターの全体が地山に貫入するまでの距離（0~5m）を初期掘進区間とし、それ以降（5~24.5m）を本掘進区間と呼ぶ。

試験において設定した計画縦断勾配を図-8に示す。実際の施工では延長方向に対して一定の縦断勾配にて施工を行うが、今回の試験では刃口姿勢が悪化した場合の姿勢制御アダプターによる制御について検証することを目的とし、上下方向に勾配を設けた計画とした。上下動の高さ（±15mm）は、ガイドパイプ（φ300mm）内に配置した先端プーリーの上下動の余裕より決定した。なお、実施工ではガイドパイプを水平ボーリング等により施工するが、今回の試験ではあらかじめ敷設したのちに埋戻しを行い設置した。

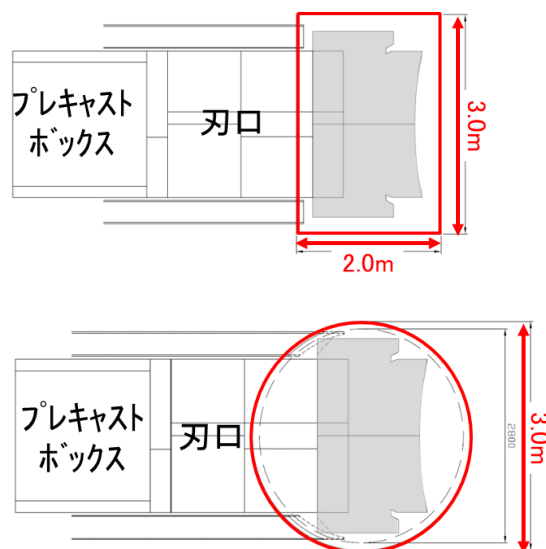


図-6 到達立坑の必要寸法
(上段：矩形、下段：円形)

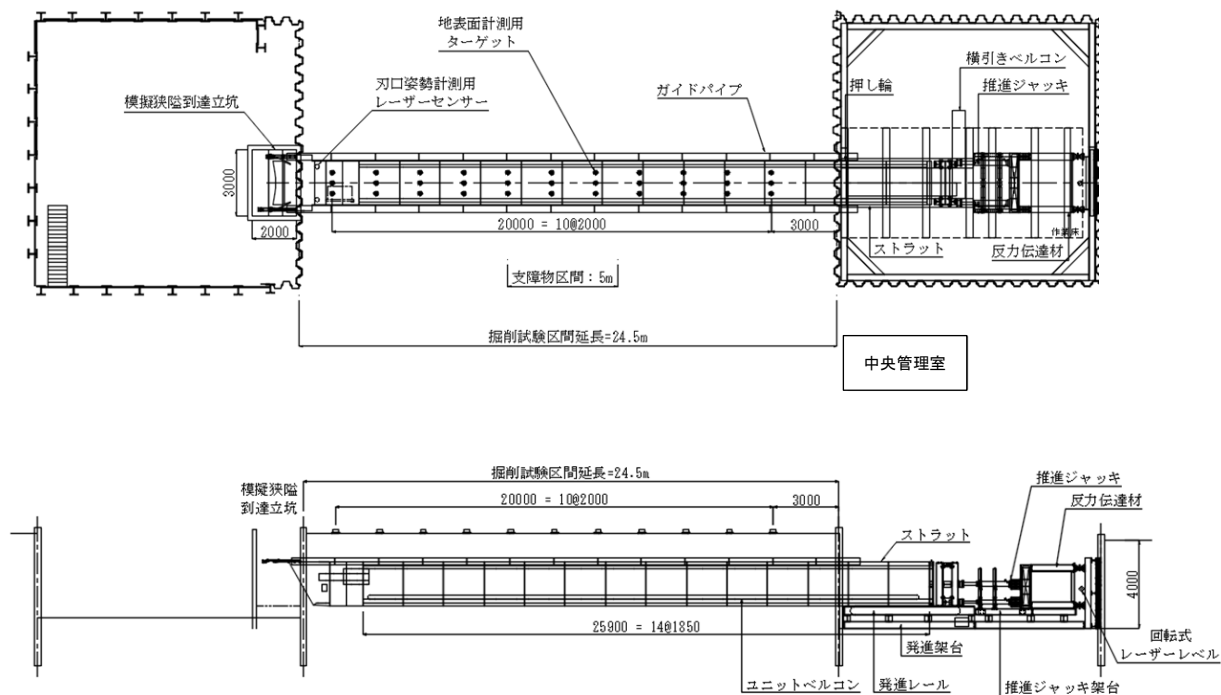


図-7 掘進試験の概要

表-1 試験条件

ボックス断面	高さ2.04m, 幅2.0m, 長さ2.0m
掘進延長	24.5m
土質	砂質土(N=10程度)
土かぶり	1.0m
その他	1サイクルの掘進長を0.25mとする

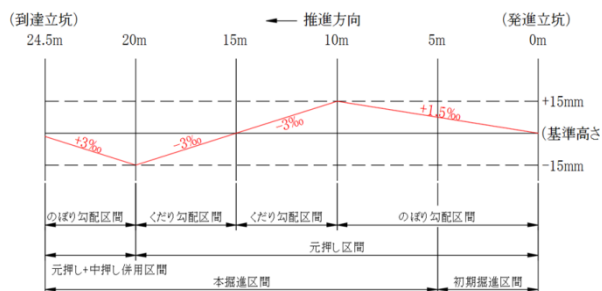


図-8 計画縦断勾配

a) 初期掘進区間 (0~5m)

初期掘進区間内では姿勢制御アダプターが発進架台上にあるため、この時点で姿勢制御アダプターを操作すると刃口姿勢が不安定になることが懸念された。また、発進直後に刃口の重心位置が前方にあることにより、刃口が下方向に向く傾向が出ることも懸念された。これらの影響を軽減させるため、初期掘進区間では姿勢制御アダプターを用いず、また発進架台上に上越し角度 (+3.0%) を付け、初期掘進を行った。

b) 本掘進区間 (5~24.5m)

本掘進における姿勢制御フローを図-9に示す。本掘進

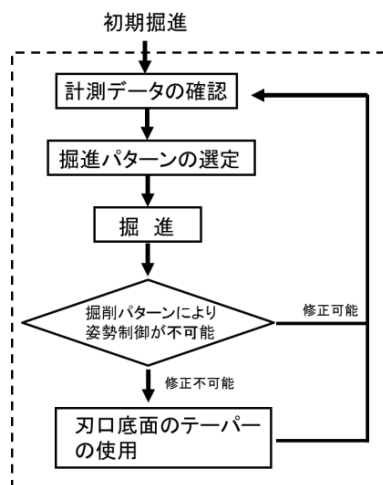


図-9 本掘進時の姿勢制御フロー

では、レーザーレベルにより計測された刃口高さと計画高さの差分および後胴傾斜計と計画角度の差分をもとに、掘進パターンを判断し、掘進長に応じた姿勢制御アダプターの角度設定を行うことで刃口姿勢を制御した。試験では、表-2に示す5段階の掘進パターンを設定した。また、姿勢制御アダプターのみでの姿勢回復が困難であると判断した場合には、刃口下面の土砂すきとりによる下向きへの修正、もしくは図-5に示す刃口のテーパブロックを撤去し、下面テーパを効かせて上向きへの修正を図ることとした。

(2) 計測機器

図-10に本工法で使用する計測機器および設置位置を

示す。掘進では、刃口と姿勢制御アダプターにそれぞれ傾斜計を設置し、傾斜角度を常時計測した。またレーザーレベルにより左右の刃口高さの測定を行い、姿勢制御アダプターの中押しジャッキおよび発進立坑内の元押しジャッキの推力について計測した。計測データは中央管理室において一元的に管理し、地盤切削ワイヤの回転速度、ジャッキ操作および姿勢制御アダプターの角度設定などを行うとともに、刃口内の作業員への指示を行う。

計測された刃口高さが計画高さから逸れる場合には、姿勢制御アダプターや刃口下面のテーパーにより姿勢の回復を行うこととした。

(3) 地盤条件

掘進試験の地盤は埋戻し砂地盤であり、小型FWD試験の結果、N値換算で10程度であった。また、掘進長10~15mの区間には、刃口上床ルーフ位置にあらかじめ支障物を埋設し、地盤切削機構による支障物の切断状況を確認した。今回埋設した支障物は、①玉石（径

200~300mm）3個、②コンクリート塊（□100×100mm、高さ400mm）3個、③木材（□200×140mm、高さ250mm）3本である。支障物の埋設状況を写真-2に示す。

(4) 地表面変位の確認

掘進中の地表面への影響を把握するために、軌道スコープ（TK-RS3500、㈱東京計測、東京）と地表面ターゲットを用いた計測を行った。計測点は発進立坑より3mを始点として2m間隔で計11断面に設置した。各断面にはボックス中央、左、右の3点に計測点を設けた。計測項目は鉛直変位量および掘進方向の水平変位量であり、掘進中は1分間隔で計測を行った。

(5) ボックス出来形の確認

レーザーレベルによる掘進時の刃口高さ測定とあわせて、掘進完了後にはレベル測量により函体の出来形確認を行った。

表-2 掘進パターン

パターン	計測データ	掘削方法
1	前胴レベルが計画高さより+5.0mm以上 後胴ピッチングが計画角度よりプラスの場合	前胴ピッチングを $-0.1^{\circ}/m$ にして2サイクル(0.5m)掘進する
2	前胴レベルが計画高さより+5.0mm以上 後胴ピッチングが計画角度よりマイナスの場合	前胴ピッチングを $-0.05^{\circ}/m$ にして2サイクル(0.5m)掘進する
3	前胴レベルが計画高さより-3.0~5.0mm	前胴ピッチングを保持して2サイクル(0.5m)掘進する
4	前胴レベルが計画高さより-3.0mm以上 後胴ピッチングが計画角度よりプラスの場合	前胴ピッチングを $+0.1^{\circ}/m$ にして2サイクル(0.5m)掘進する
5	前胴レベルが計画高さより-3.0mm以上 後胴ピッチングが計画角度よりマイナスの場合	前胴ピッチングを $+0.2^{\circ}/m$ にして2サイクル(0.5m)掘進する



写真-2 支障物設置状況

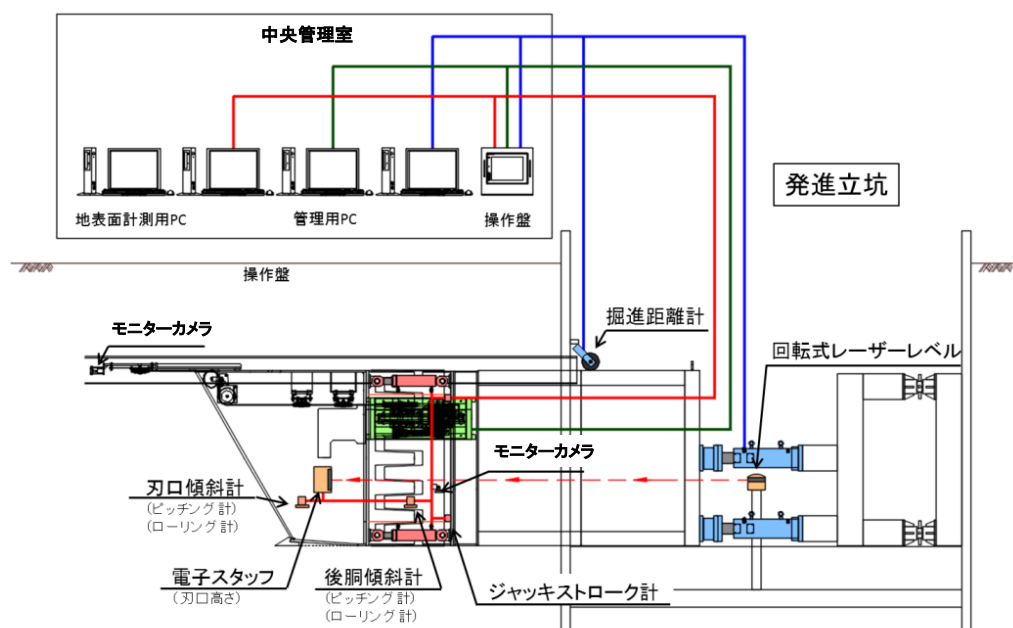


図-10 計測機器

(6) 刃口、姿勢制御アダプターの分解、回収の確認

到達立坑に幅3.0m、奥行き2.0mの仕切りを設け、最小化した狭隘立坑空間下での刃口および姿勢制御アダプターの分割、回収の施工性について確認を行った。

4. 試験結果

(1) 掘進中の刃口高さ

図-11は、刃口高さの計画値と実測値を比較したものである。横軸の掘進距離は、刃口内部の電子スタッフの位置（図-10）における計測値であり、刃口先端から-2.32mの位置を示している。

試験では初期掘進時に、刃口の上向き傾向が強く出たため、本掘進区間開始後、姿勢制御アダプターにより刃口姿勢（ピッチング）を下向きに制御し、あわせて刃口下面の土砂すきとりを行うことで、姿勢を下向きに変化させた。次に、掘進距離8.7m付近から刃口の下降傾向が強くなったため、当初の掘進パターンからは外れるものの上向きのピッチング制御を行った。しかし、その後も下降傾向が続いたため、姿勢制御アダプターのみでは刃口高さの修正が困難であると判断し、10.7m付近ではテーパブロックを撤去し、刃口下面のテーパを効かせ姿勢回復を図った。その後、14.9m以降は、刃口高さは

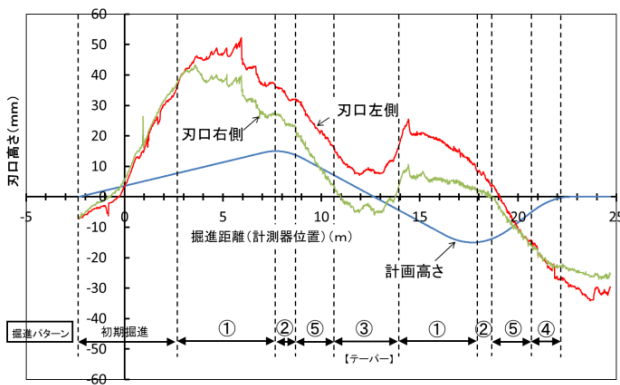


図-11 刃口高さの計測結果

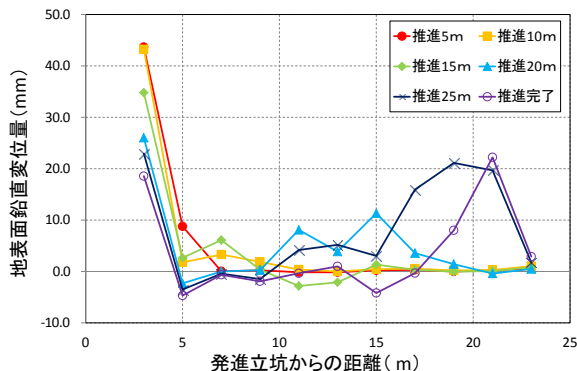


図-12 各推進段階における地表面変位分布

比較的安定し、計画勾配とほぼ平行に掘進することができた。

(2) 掘進に伴う地表面変位

図-12は、刃口先端が5m、10m、15m、20m、25mおよび掘進完了まで推進した時点における掘進方向の地表面鉛直変位分布の計測結果である。

初期掘進区間の0~5mでは、刃口姿勢に急激な上昇傾向が生じた区間であり、地表面にも隆起が生じた。掘進5~15mの間では姿勢制御アダプターを用いた掘進が行われ、過大な地表面変位は生じなかった。15m以降では再び地表面隆起が生じたが、これは下面テーパにより姿勢回復を行った際に刃口が上載地盤を隆起させ、その後の掘進で後続ボックスが隆起した地盤を前方に押し込みながら進行したことが原因と考えられる。したがって、実施工時には、刃口姿勢が一定となるよう姿勢制御アダプターによる微修正を繰り返しながら掘進を行い、下面テーパによる姿勢回復は極力行わないことが必要である。

(3) 刃口、後胴ピッチングと地表面変位量増分の関係

図-13、図-14はそれぞれ刃口および後胴ピッチングと地表面変位量の増分の関係を示したものである。地表面変位量の増分とは図-15に示すように、刃口先端位置（もしくは後胴中心位置）が各地表面計測点の前方1m

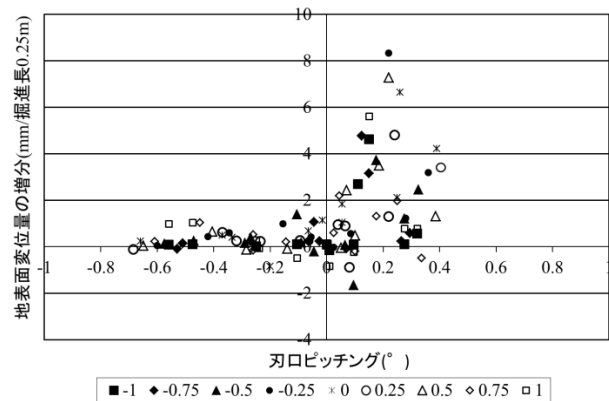


図-13 刃口ピッチングと地表面変位量増分の関係

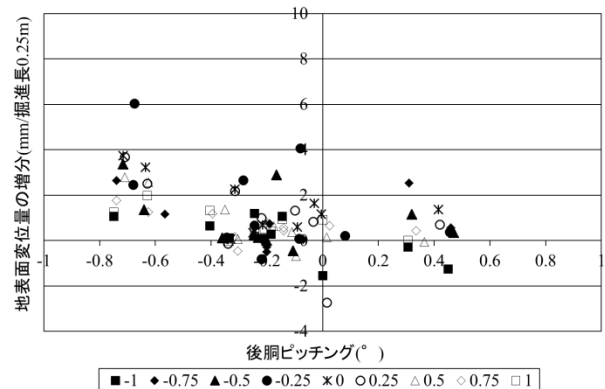


図-14 後胴ピッチングと地表面変位量増分の関係

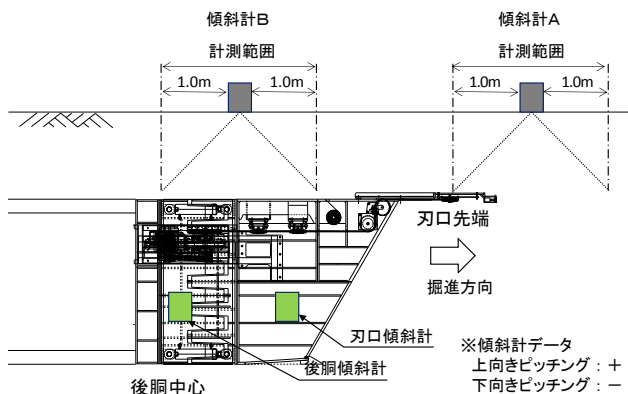


図-15 地表面変位量増分の考え方



写真-3 地盤切削機構により切断された支障物

から通過後1mの範囲において、0.25m掘進するごとの計測点で観測した地表面変位量の変化分である。この結果より、刃口ピッチングは上向き状態で掘進を行う場合に、また後胴ピッチングは下向きの状態で掘進を行う場合に、地表面の隆起が発生しやすいことが分かった。実際の施工にあたっては、今回の試験結果にもとづき閾値を設定し、刃口および後胴のピッチング計測値が閾値を超過する事前に姿勢制御アダプターによりピッチング修正を図る必要がある。

(4) 地盤切削機構による支障物切断状況

写真-3は、地盤切削機構により切断された支障物（玉石）である。埋設された支障物はいずれも確実に切断され、埋設区間（10～15m）において支障物に起因する地表面変状は生じないことを確認した。

(5) 刃口軌跡とボックス出来形の関係

図-16に、電子レベルにより計測した刃口軌跡と、到達立坑に達した時点で測量したボックスの縦断高さの比較結果を示す。掘進中は、ボックス連結部のボルトを緩めて刃口の動きに追従しやすくし、推進完了後にボルト締めを行った。試験結果では、刃口の軌跡とボックスの縦断高さは概ね一致しているが、掘進中に下面テーパを用いて姿勢回復を行った個所では最大20～30mmの差

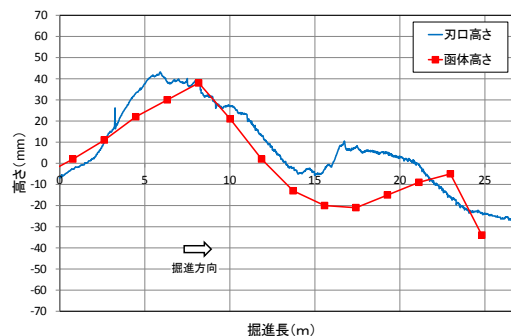


図-16 刃口軌跡とボックス出来形の関係

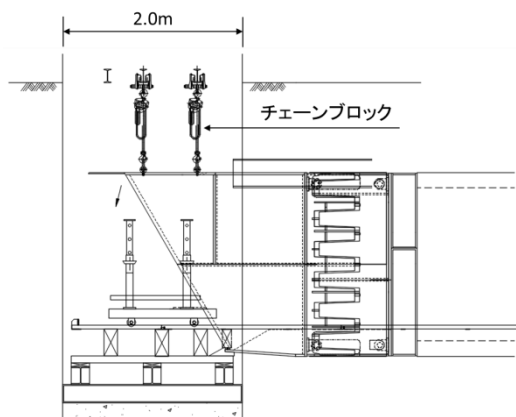


図-17 狭隘立坑内での刃口解体



写真-4 分割した刃口の引戻し

が生じた。刃口の姿勢制御は、ボックスの出来形管理に対しても有効であるが、刃口の軌跡よりもボックスの据付け位置が大幅に低い場合は地表面の後続沈下に繋がることから注意が必要である。

(6) 刃口の分割、回収性

掘進が完了した時点で、幅3.0m、奥行き2.0mの仕切りを設け、狭隘条件下での刃口および姿勢制御アダプターの分割、回収性を確認した。解体は、図-17に示すように立坑上部に設置した鋼材とチェンブロックを使用して行うため、重機の施工ヤードが確保できない狭隘な駅構内においても作業が可能である。解体作業では、刃口の空押しとブロックの解体を繰返し行い、解体したブロックはボックス内部に設置したレールと台車により発進立坑側へ運搬した（写真-4）。今回の試験では、刃口の

到達立坑への到達後、鏡切りから回収完了まで延べ作業時間は20.5時間であった。なお、今回は2.04m×2.0m断面寸法の刃口で試験を行ったが、分割部材を組み合わせることにより、よりサイズの大きい刃口にも適用が可能である。

5. まとめ

今回、小断面ボックス構造物を構築する非開削推進工法の開発を行った。工法の実用性を確認することを目的とした施工試験を実施したところ、以下の知見が得られた。

- 1) 地盤切削機構により、切羽の安定を図るとともに、玉石、コンクリート、木材等の支障物を切断しながら掘進可能であることを確認した。

- 2) 姿勢制御アダプターによるピッチング制御により、刃口の姿勢管理および地表面への影響低減が可能であることを確認した。
- 3) 刃口のピッチング操作に対するボックスの追従性およびこれに伴う地表面への影響の相関について確認した。
- 4) 刃口および姿勢制御アダプターの分割、回収試験により、到達立坑の最小化が図れることを確認した。

参考文献

- 1) 清水満，藤沢一，栗栖基彰，鈴木尊，長尾達児：新しい小断面地下構造物の構築工法の開発，トンネル工学報告集，Vol.14，pp.413-419，2004

(2016. 8. 5 受付)

DEVELOPMENT OF THE NEW JACKING METHOD FOR CONSTRUCTION OF A SMALL SECTION UNDERGROUND STRUCTURE

Keigo GUNJI, Satoshi HONDA, Takashi SAITO,
Seishi NAKAMURA, Tatsuji NAGAO and Kiyoshi KUWABARA

This study proposes a new construction method for constructing a small section structure under railway tracks by non-open cut method. This method has the following 3 characteristics; 1) Ground surface displacement is reduced by a ground cutting wire saw in front of a cutting edge. 2) Attitude control jacks between the cutting edge and pre-cast boxes achieves detailed excavation control. 3) Vertical shaft space is minimized by a dividable structure of the cutting edge. We conducted an excavating test to prove the efficiency and feasibility of this method and each characteristic. As a result of the test, we confirmed this method was effective for actual construction.