

地盤切削機構を用いた小断面ボックス推進工法の開発

DEVELOPMENT OF SMALL CROSS SECTION BOX CULVERT PROPULSION METHOD USING GROUND CUTTING MECHANISM

岩井 俊且^{1*}・本田 諭²・栗栖 基彰³・桑原 清⁴

Toshikatsu IWAI^{1*}, Satoshi HONDA², Motoaki KURISU³, Kiyoshi KUWABARA⁴

The COMPASS method (COMPAct Support Structure method) (hereinafter, referred to as a conventional construction method) is a construction method of small cross section box culvert by non-open cut method. As a problem of the conventional construction method, since the ground cutting wire is rotated by the driving device installed at the arrival shaft, the installation extension may be restricted to about 25m at the maximum due to the wire length. In addition, even when the ground condition is relatively good, the method may be disadvantageous in terms of cost due to the construction of the protective steel plate.

Meanwhile, in the station premises or the like, the construction in a narrow space is requested but there is no effective construction method due to a problem in securing the necessary shaft space. In order to solve these problems, we report on the development of a new non-open cut method of small cross section box culvert.

Key Words : COMPASS method, ground cutting mechanism, small cross section box culvert method

1. はじめに

非開削による小断面ボックスカルバートの施工方法に COMPASS 工法 (COMPAct Support Structure method) (以下, 従来工法という。)がある。従来工法は, 地盤切削ワイヤーにより地盤を切断しながら防護鋼板を挿入し, 防護鋼板で囲んだ内部に支保工を設置しながら場所打ちコンクリートボックスを構築するか, もしくはプレキャストボックスを掘進して函体を構築する施工法である。従来工法の課題として, 地盤切削ワイヤーを到達立坑に設置した駆動装置により回転させるため, ワイヤー長さにより施工延長が最大で約 25m に制約されることがある。また, 比較的地盤条件が良好な場合でも防護鋼板の施工を行うため, コスト面で不利になる場合がある。一方, 駅構内などで線路上空建築物を計画する場合, 線路下を横断する地中梁を非開削で施工する工法が望まれているが, 狭隘な場所で必要な立坑スペースを確保することに課題があり, 有効な工法がない状況である。これらの課題を解決するため, 図-1 に示す新しい小断面ボックスカルバートの非開削施工法¹⁾ (以下, 本工法とい

う。)を開発した。図-2 に試作した刃口および姿勢制御機構を示す。

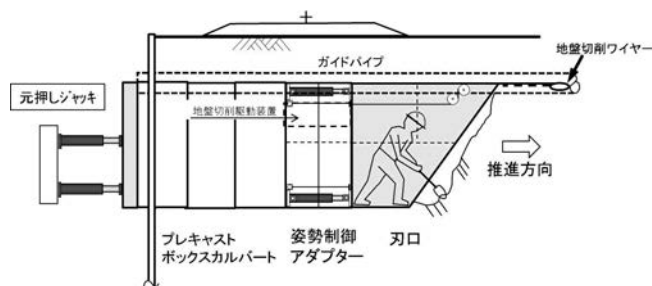


図-1 本工法のイメージ



図-2 試作した刃口および姿勢制御機構 (側面)

キーワード: コンパス工法, 地盤切削機構, 小断面ボックス推進工法

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター East Japan Railway Company (E-mail:t-iwai@jreast.co.jp)

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 East Japan Railway Company

³正会員 鉄建建設株式会社 土木技術部 TEKKEN CORPORATION

⁴正会員 株式会社ジェイテック 技術企画本部 J-TEC CORPORATION

本工法の主な特徴は、以下のとおりである。

- ① 刃口の前方で地盤切削ワイヤーを回転させ支障物を切断する機構（以下、地盤切削機構という。）を有することで、支障物の押し込みや過度の取り込みを防止し、軌道変状リスクを低減する。また、刃口内部に地盤切削機構の駆動部を収納することで施工延長の制限を無くした。
- ② 施工精度の向上および刃口の姿勢変更時の地表面への影響を低減することを目的として、ジャッキにより刃口の角度を修正する機構（以下、姿勢制御アダプタという。）を取り入れた。
- ③ 地盤切削機構および姿勢制御機構は、分割可能な構造とし、最小化を図った到達立坑でも解体を可能とした。

2. 工法の概要

本工法は、2～5m サイズのプレキャストボックス（以下、ボックスという。）を推進することを想定している。基本的な施工方法は、刃口内部での人力またはミニバックホウ掘削（排土はベルトコンベアー）と発進立坑での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うえでボックスを掘進していた。これに対して、本工法では、刃口内部に地盤切削機構を装備し、上床ルーフのみワイヤー切削を行うため、防護鋼板が不要であり、地盤切削ワイヤーおよび先端プーリーを通すガイド

パイプの施工数量を減らすことが可能である。また、ワイヤー長さによる施工延長の制約が不要になるなどの長所がある。

(1) 刃口形状の検討

線路下を低土かぶりで掘進するためには、軌道陥没のリスクを低減することが必要であり、切羽崩壊を防止する刃口形状の検討を行った。具体的には、刃口上部のルーフ長について、三次元円弧すべりの検討²⁾を行った。すべり土塊と抵抗力のモーメントのつりあいから安全率を算定し、必要な安全率（ $F_c=1.2$ ）を確保できるルーフ長を算定した。試算結果では、必要な安全率が確保されるルーフ長は約 2.5m となった。今回の試験では、試算条件に対して約半分程度のサイズの刃口を用いることから、ルーフ長を 1.5m と設定した（図-4）。また、刃口側面は、側面の土砂崩壊リスクを低減するためスラネット形状とした。

(2) 刃口底面のテーパ形状

刃口下面をテーパ形状とすることで、掘進中の刃口が下向きの傾向が強い場合の姿勢修正の手段とした。今回の試験では、刃口下面を高さ 50mm のテーパ形状に加工した。掘進中の刃口が計画高さから大きく逸脱した場合に、テーパ部分の土砂のすきとり量を変更することで刃口の姿勢を上向きに修正する。なお、テーパの効果が不要な場合には、爪状の治具を装着することでテーパ効果を消すことが可能である。

(3) 地盤切削機構

地盤切削ワイヤーは、従来工法と同様に $\phi 10.5\text{mm}$ の無水ワイヤー（ダイヤモンドビットを 50mm ピッチで配置）を用いる。地盤切削ワイヤーの駆動装置（電動モーター）は、刃口内部の天井部分に設置しており、複数のプーリーによりワイヤーを折り曲げて刃口先端部で回転させている。本工法では、地盤切削ワイヤーおよび先端プーリーを通すため、先行してガイドパイプを敷設する必要がある。ガイドパイプは、VP 管（ $\phi 300\text{mm}$ ）を使用する。試験では、ガイドパイプを刃口両脇の二箇所（約 2m 間隔）に設置したが、実施工において刃口の幅が広がる場合には、地盤切削ワイヤーのたるみや掘進に対するワイヤー切削位置の遅れが大きくなることから、中間にもガイドパイプを施工し、中間プーリーによりワイヤーの支点を追加する必要がある。

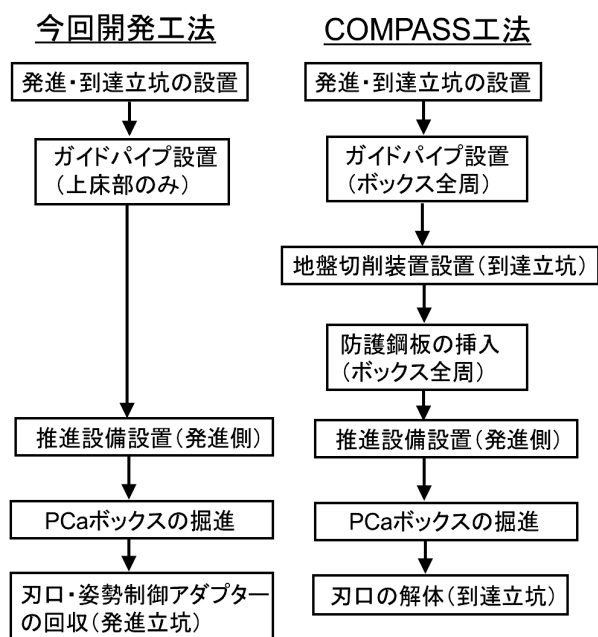


図-3 施工フローの比較

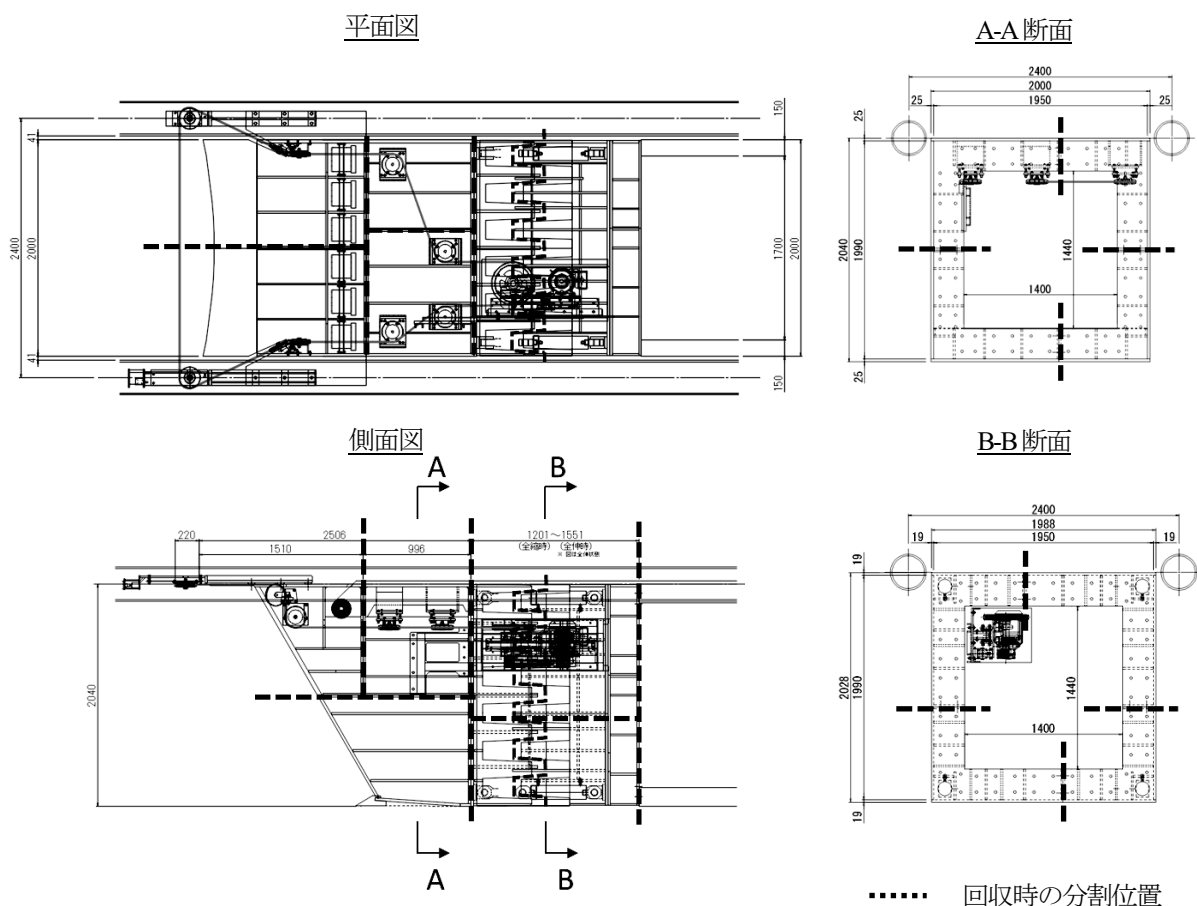


図-4 刃口および姿勢制御アダプタ

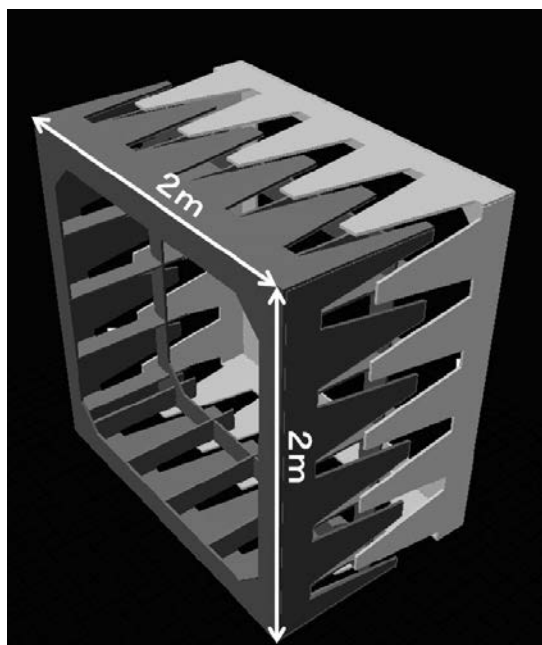


図-5 姿勢制御アダプタの形状

(4) 刃口・姿勢制御アダプタ

本工法では、地盤切削ワイヤーで切削し上床ルーフを地盤に貫入させて掘進することから、刃口前方の余堀り

が不可能である。そのため、掘進中に刃口高さの修正が必要な場合でも、刃口姿勢を急激に変えると上部の地盤を押し上げ、地表面を隆起させることが懸念された。そのため、地表面の変状リスクを低減させることを目的として、刃口高さを制御する際に掘進距離に応じて徐々に刃口の角度を修正する姿勢制御アダプタを追加した。姿勢制御アダプタは、前胴（刃口側）と後胴（ボックス側）からなり、4台のジャッキにより前胴（刃口）の方向修正を行うが、後胴に反力をとって前胴側（刃口）を押し出す（中押し）操作も可能である。前胴と後胴間の伸縮部は、図-5に示すとおり櫛型の形状とし外部に開放する面積を少なくした。さらに、施工中は外周に土砂進入防止板を設置して土砂の進入を防止する。

(5) 計測機器

図-6 に、本工法で設置する計測機器とその設置位置を示す。掘進では、刃口（前胴）と姿勢制御アダプタ（後胴）にそれぞれ傾斜計を設置し姿勢（傾斜角度）を計測する。また、レーザーレベルによる刃口高さの測定、姿勢制御アダプタおよび発進立抗のジャッキ推力等について計測している。これらのデータは中央監視室において一元的に管理し、地盤切削ワイヤーの回転速度、ジャ

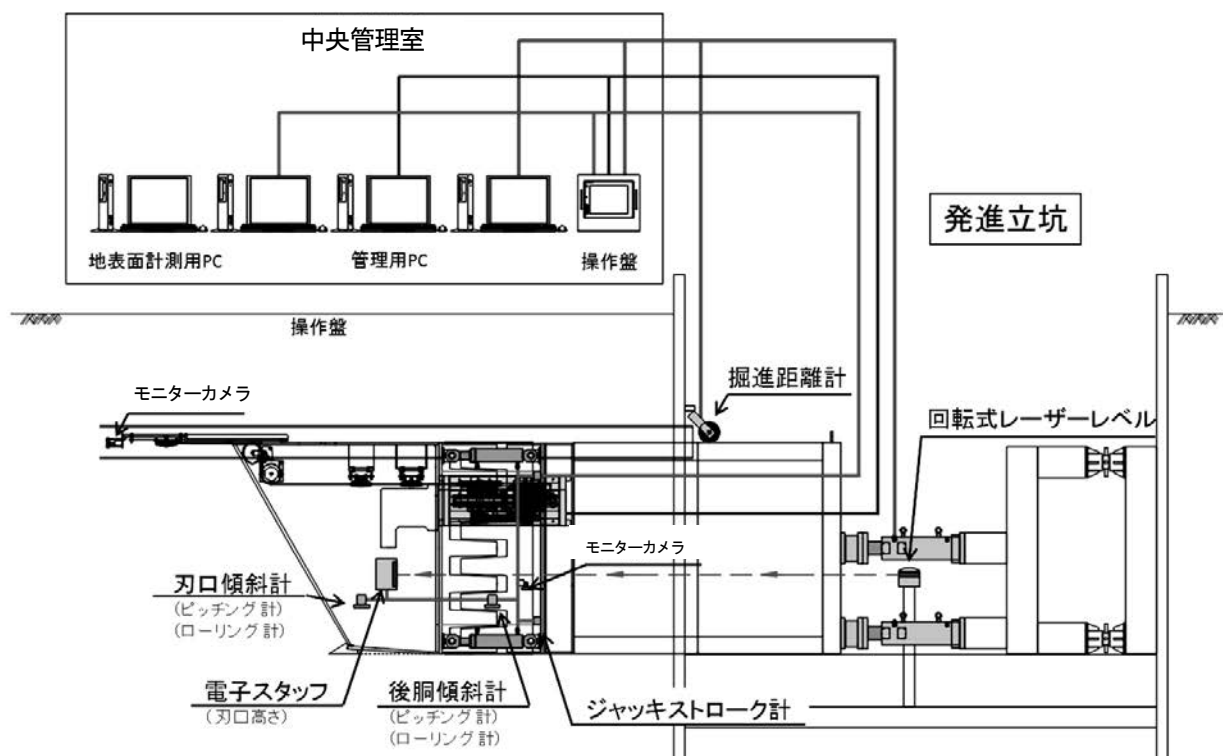


図-6 刃口および姿勢制御アダプタの計測機器

ツキ操作および姿勢制御アダプタの角度設定などを行うとともに、刃口内の掘削作業員への指示を行う。さらに、刃口高さが計画高さから大きく逸脱するような場合には、後述する掘進パターンの変更や刃口下面のテーパーを使った姿勢の回復を判断する。

(6) 分割・回収構造

従来工法では、到達立坑において刃口を解体して搬出するために、十分な大きさの立坑寸法を確保する必要があった。しかし、狭隘な施工環境では、到達立坑の寸法を極力縮小することが求められていた。本工法では、刃口および姿勢制御アダプタをブロック化しボルト接合することで、到達後の分割解体が可能な構造とした。これにより、刃口が到達した後に、立坑内でブロックごとに解体し、ボックス内部を台車により発進側に戻して回収することが可能となり、到達立坑寸法を最小化できる。今回の試験における、刃口および姿勢制御アダプタの分割構造は、図-4 のとおりである。試験は、幅 2m のボックスを推進するものであり、作業に必要な到達立坑の寸法を図-7 に示す。到達立坑を矩形の深礎（ライナー）で施工する場合には 3.0m×2.0m、円形の深礎の場合にはφ3mを設定した。

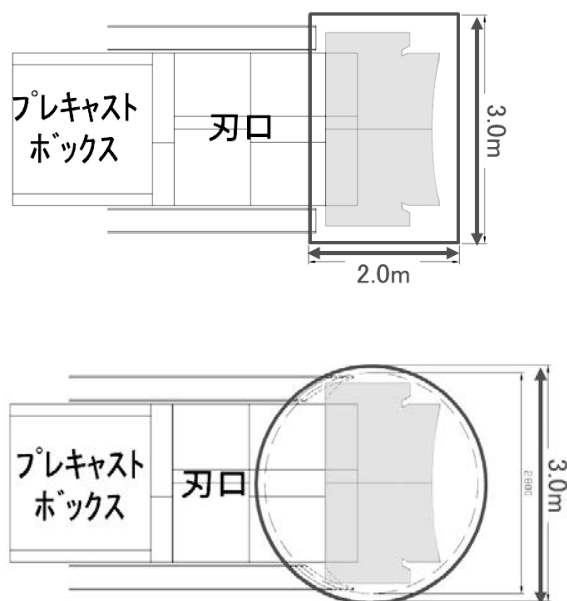


図-7 到達立坑の必要寸法の例
(上段：く形，下段：円形の場合)

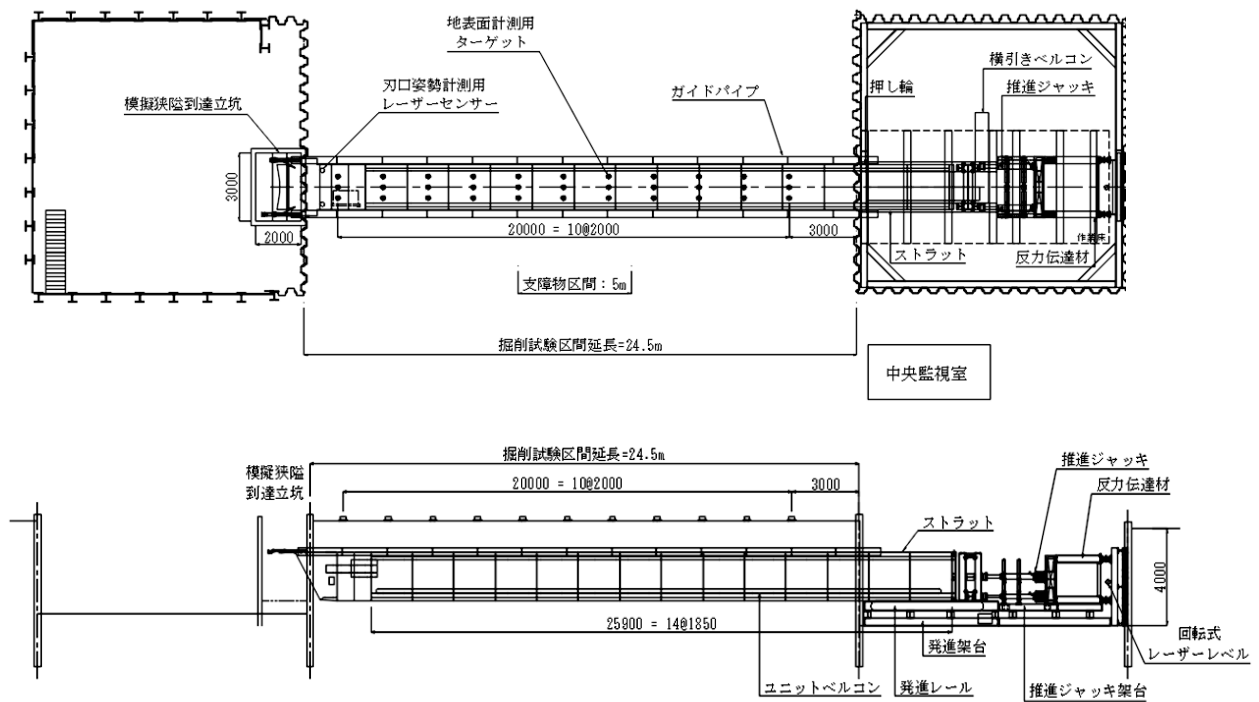


図-8 掘進試験の概要

試験ではあらかじめ開削により敷設した。

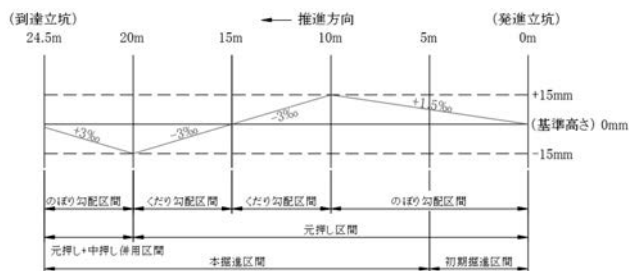


図-9 計画縦断勾配

3. 掘進試験

(1) 試験概要

掘進試験の概要を、図-8に示す。掘進延長は、発進・到達立坑間の24.5mであり、長さ2mのボックスを10体使用した。試験において、設定した計画縦断勾配を図-9に示す。実際の施工では、延長方向に一定の計画縦断勾配で推進を行うが、試験では施工精度が悪化した場合の刃口姿勢のコントロールとその影響について検証することを目的としたため、縦断方向に上下の勾配を付けた掘進計画とした。上下動の高さ(±15mm)は、ガイドパイプ内での先端プーリーの可動量である。刃口および姿勢制御アダプタの全体が、発進架台から地山に入りきるまでの距離(0～5m)を初期掘進として、それ以降(5m～24.5m)を本掘進区間とした。なお、実施工では、ガイドパイプを水平ボーリング等で施工する必要があるが、

【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：約1.0m

その他：1サイクルの掘進長を0.25mとする

a) 初期掘進区間(0m～5m)

初期掘進は、後胴がまだ発進架台上にある状態であるため、この時点で姿勢制御アダプタ操作することは、刃口姿勢が不安定になる懸念があった。また、刃口と後続のボックスの重量バランスが取れないために、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、発進架台に上げ越し角度(+3.0%)を付け、初期掘進を行った。

b) 本掘進(5m～24.5m)

本掘進における姿勢制御のフローを図-10に示す。本掘進では、計測された刃口高さと後胴の傾斜量(後胴ピッチング)を基に、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の角度設定を行うことで刃口姿勢を制御する。試験では、表-1に示す5段階の掘進パターンを設定した。また、掘進パターンによる刃口姿勢の修正が不可能な場合には、刃口下面のテーパーを効かせて上向きに姿勢を修正する。

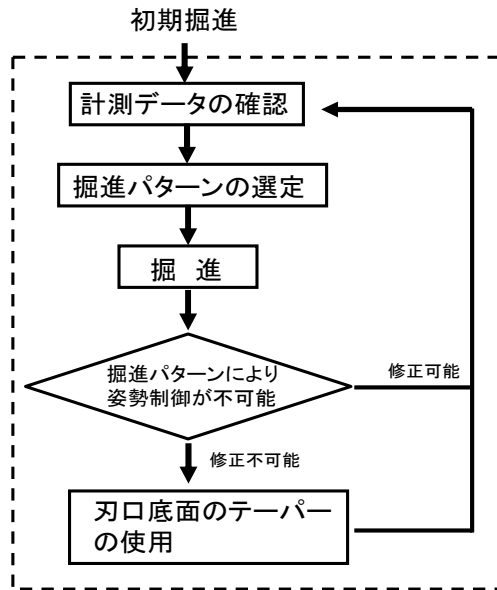


図-10 本掘進の姿勢制御フロー

表-1 掘進パターンの設定

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



図-11 支障物の埋設状況

(2) 地盤切削機構の確認

掘進に際し10~15mの区間には、上床ルーフ位置にあらかじめ支障物を埋設し、切削機構により支障物の切断状況を確認した。埋設した支障物は、①玉石（径200~300mm）3個、②コンクリート塊（ $\square 100 \times 100$ 、高さ400mm程度）3本および③木材（ $\square 200 \times 140$ mm、高さ250mm）3本である（図-11）。

(3) 地表面変位の確認、出来形の確認

掘進中の地表面への影響を把握するため、軌道スコープによる計測を行った。計測点（ターゲット）は、発進立坑より3mを始点として2m間隔で11断面に設置した。各断面の計測点は、左・中央・右の三点に設置した。計測項目は、鉛直変位量および水平変位量であり、掘進中は1分間隔で計測を行った。あわせて、掘進完了後には、測量により函体の出来形高さを確認した。

4. 試験結果

(1) 掘進中の刃口高さについて

図-12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-6参照）における計測値であり、刃口先端から-2.32m後方に位置している。図中には、適用した掘進パターンを併記した。試験では初期掘進から、刃口の上向き傾向が強く出たため、掘進パターン①により掘進したが、刃口底面の土砂すきとりを併用することで、姿勢を下向きに変化させた。次に8.7m付近から刃口の下降傾向が強くなったため、刃口の掘進パターンから外れるものの掘進パターン⑤を選択した。しかし、その後も下降傾向が解消できないため、掘進パターンによる制御だけでは刃口高さの修正が困難であると判断し、10.7m付近で刃口下面のテーパを効かせるとともに、刃口底面に矢板を挿入し姿勢の回復を図った。その後、14.9m以降は、刃口高さは比較的安定し、計画高さとはほぼ平行に掘進することができた。これらの結果より、刃口姿勢に下向きの傾向が強い場合には、刃口下面テーパを効かせることが必要であることが確認できた。

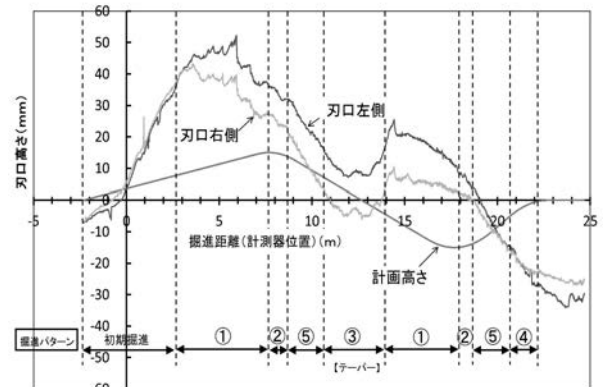


図-12 刃口高さの計測結果

(2) 地表面変位量の計測結果について

図-13 は、掘進における刃口先端位置とそれぞれ時点での地表面変位量の計測結果である。地表面変位量は、発進立坑より 3m 地点から 2m 間隔で設置された軌道スコープによる計測データである。図中では、刃口先端が発進立坑より 5m、10m、15m、20m、24m、27m に位置する時点および到達後のデータをプロットした。発進立坑より 0m～5m の区間では、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。15m 以降は、刃口下面のテーパによる刃口高さの修正を行った区間であり、後続のボックスが推進によって前方の地山を押し込んだことにより隆起が生じたものと考えられる。

図-15 は、刃口の傾斜角度（以下、ピッチングという。）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、刃口先端位置が各計測点の前方 1m から通過後 1m の範囲において 0.25m 掘進する毎に計測点に発生した地表面変位の変化量である。この結果より、刃口のピッチングが上向きの場合に地表面に隆起が発生しやすい傾向があることが分かった。図-16 は、後胴のピッチングと地表面変位量の増分の関係である。後胴ピッチングは、下向きの場合に地表面の隆起が発生しやすいが分かった。これは、刃口が上向きでありかつ後胴が下向きの場合に推進すると、前方の地盤を押し込み地表面隆起が発生しやすいためであると考えられる。

(3) 刃口の軌跡とボックスの縦断高さについて

図-17 に刃口の軌跡と推進後に測量したボックスの縦断高さの比較を示す。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、掘進中に大きく姿勢制御を行った箇所では最大で 20～30mm の差が出ている。刃口の姿勢制御は、ボックスの出来形管理に対して有効であるが、刃口の軌跡よりもボックスの設置位置が大幅に低い場合に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。

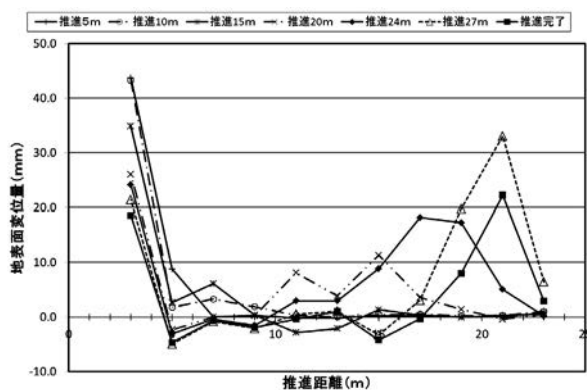


図-13 刃口先端位置と地表面変位量

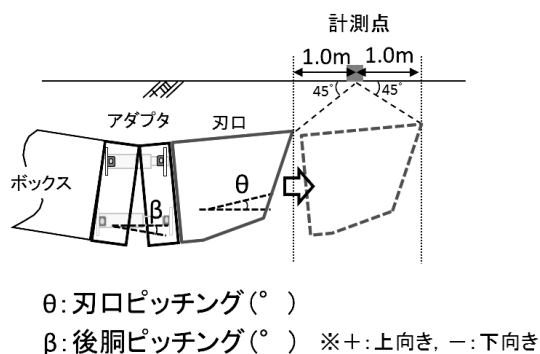


図-14 刃口および後胴のピッチングについて

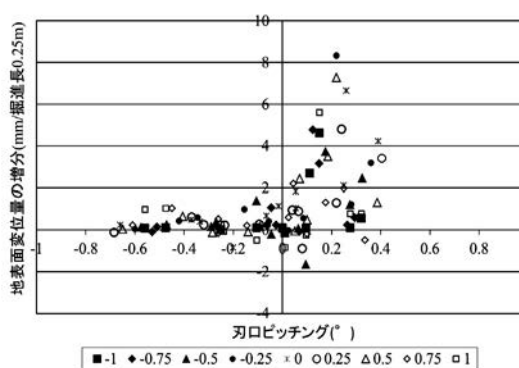


図-15 刃口ピッチングと地表面変位量の関係

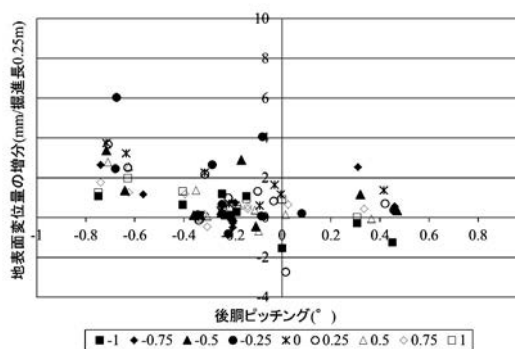


図-16 後胴ピッチングと地表面変位量の関係

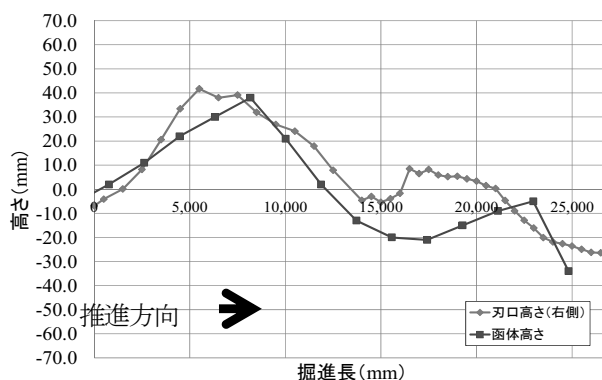


図-17 刃口の軌跡とボックスの出来形

(4) 支障物の切断状況について

図-18 は、掘進に伴い切削ワイヤーにより切断された支障物（玉石）である。埋設した支障物はいずれも問題なく切断された。

(5) 到達後の刃口の分割回収について

掘進試験の完了後、到達立坑に幅 3m、奥行き 2m の仕切りを設け、刃口および姿勢制御アダプタの分割解体試験を行った。解体は、図-19 に示すように立坑上部に設置した鋼材とチェーンブロックを使用し行うため、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り返し行い、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



図-18 切断された支障物（玉石）

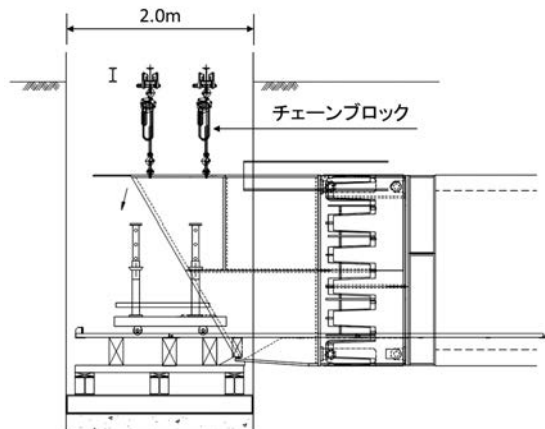


図-19 到達立坑での刃口解体



図-20 分割した刃口の引き戻し

発達立坑側へ運搬した（図-20）。試験では、刃口の到達立坑への到達後、鏡撤去から回収完了まで述べ作業時間は 20.5 時間であった。なお、刃口および姿勢制御アダプタは、分割部材を組み合わせたことが可能であり、よりサイズの大きい刃口にも適用可能である。

5. まとめ

- ① 地盤切削機構を用いた小断面ボックスカルバートの掘進試験を実施し、支障物の切断を含め問題なく掘進が可能であることを確認した。
- ② 姿勢制御アダプタによる刃口姿勢（ピッチング）制御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後続の後胴ピッチングの応答や刃口高さ、ボックスの追従性および地表面への影響について確認した。その結果、刃口レベルを下げるための操作（刃口：上向き、後胴：下向き）は、地表面の隆起に繋がりがやすいことが分かった。
- ④ 刃口および姿勢制御アダプタの分割・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。

6. おわりに

今回開発した地盤切削機構を用いた小断面ボックス推進工法により、地盤変状リスクを低減し、25m を越える施工延長や到達立坑寸法に制限のある箇所での施工が可能となった。今後は、駅構内など狭隘な箇所で行う線路下横断工事への適用を目指して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) SED No, 47, 2016-5, 東日本旅客鉄道株式会社 pp.112-119
- 2) 非開削工法設計施工マニュアル, 東日本旅客鉄道株式会社 附属資料 9-2