

鉄道営業線直下式地下化工法を目的とした 長距離エレメント推進工法の開発

中井 寛¹・齋藤 雅春²・千々岩 三夫³・長尾 達児¹
十二 正義⁴・森山 智明⁵

¹正会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 土木技術部（〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3）

²正会員 鉄建建設株式会社 建設技術総合センター（〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1）

³正会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 技術企画部（〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3）

⁴正会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 研究開発部（〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1）

⁵正会員 JR東日本 建設工事事務 構造技術センター（〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2）

近年、踏切対策として実施されている連続立体交差事業において、都市部では用地取得が困難であることから、直上高架手法等の活用が検討されているところである。活用促進に向けては、コストの低減、適用条件等の課題も多く、一層の技術開発の促進が期待されている。

そこで、JES工法を併用した新しい直下式地下化工法について技術検討を行い、従来工法に対しての優位性を確認した。また、本工法の適用に不可欠となるJESエレメントの長距離推進技術の実証実験を行った。長距離推進の手法として、エレメントの中間部に中押し装置を装備することにより、推進力の分散と低減を図ることができ、長距離JES工法の適用が可能であることを確認した。

キーワード：営業線直下、連続立体交差、JES工法、長距離推進、中押し装置

1. はじめに

近年、都市部において踏切による交通渋滞等の解消を図るため、鉄道の連続立体交差化が実施されている。その際の施工手法としては、営業線の運行への影響を最小限とするため、仮線方式が一般化しており、直上高架手法等（直上高架工法（図-1）や直下式地下化工法（図-2）の総称とする）の活用は事例が少ない状況にある。

しかし、仮線方式による立体交差化にあたっては、用地取得に伴う事業の長期化等が問題になることも多いことから、直上高架手法等の活用がこのような課題の解決策に向けて期待されているところである。一方、直上高架手法等の活用促進に向けては、コストの低減、現場適用条件の改善等解決すべき課題も多く、一層の技術開発の促進が期待されている。

本検討では、直上高架手法等の推進を図るため、直下式地下化工法に着目し、線路下横断工等で実績があるJES（Jointed Element Structure）工法¹⁾を併用した新しい直下式地下化工法について、工法の適用性および実用性を検証するために実施した技術

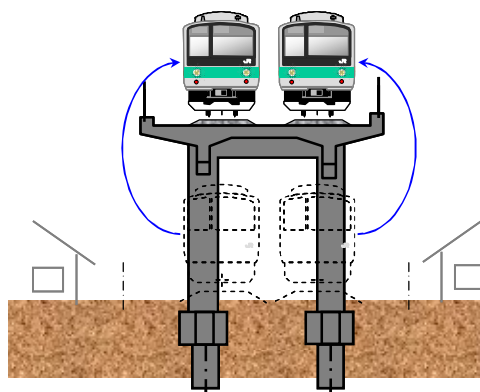


図-1 直上高架工法概要図

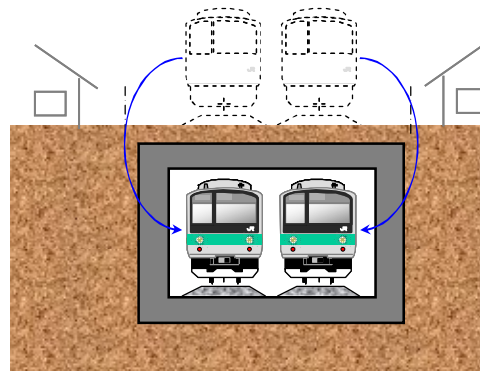


図-2 直下式地下化工法概要図

検討および実証実験について報告する。

2. 従来工法の課題

現在、直下式地下化工法として、開削・工事桁工法（図-3）とシールド工法（図-4）が一般的である。

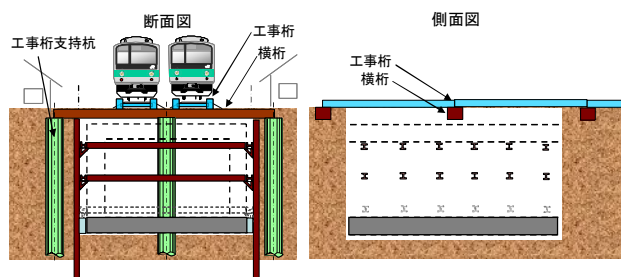


図-3 開削・工事桁工法概要図

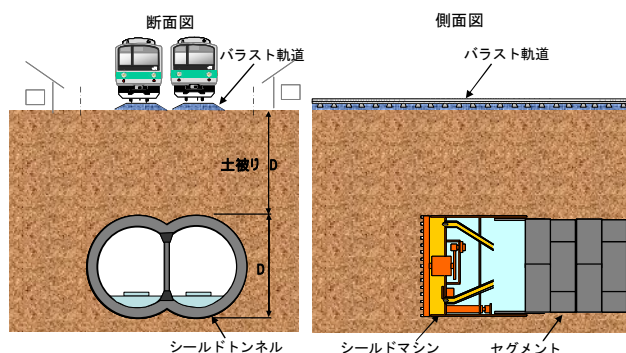


図-4 シールド工法概要図

(1) 開削・工事桁工法

開削・工事桁工法の場合は、都市部の連続立体交差事業では、多数の工事搬入路の確保や営業線用地外の施工ヤードの取得が困難等の理由により、施工区間の分割、同時施工が計画し難い傾向にある。また、全延長に渡って、仮土留壁や工事桁支持杭の打設、工事桁の架設、工事桁直下の掘削、工事桁撤去等、列車運行に影響を与える可能性のある工種については、線路閉鎖間合い作業、もしくはき電停止作業に限定される。このように、作業時間帯の制約を受ける工種が、全体工事の大半を占めることによって、機械設備や作業人員の効率が悪化し、単位作業当りに要する工期及び工費の増大が懸念される。さらに、土留壁や工事桁支持杭の打設箇所となる全延長に渡って、施工ヤードとして必要な用地の確保や、壁体の剛性が小さいため、掘削に伴う土留壁の変形に伴う地盤の隆起、沈下による地表面や民家の傾斜等、周辺への影響が懸念される。

(2) シールド工法

シールド工法の場合は、営業線直下においては、土被りを1D（シールド径）程度以深にする必要があ

り、立坑の掘削深度が深く大規模になり、土留め壁の高剛性化や土留め壁長および工事桁支持杭長の延長が必要となることや、構造物が深部に位置することに伴う、アプローチ部の施工区間の延長が必要となること等による全体事業費の増大が懸念される。また、シールド機による施工区間が短い場合には、機械設備費等の比率が増大し、工事費が割高になる等の問題がある。さらに、1D程度では、営業線直下の土被りが浅い位置での掘進作業となるため、軌道変状の抑制対策として、入念な切羽圧力管理および泥水の品質管理が必要となることや、軌道計測および徐行や、場合によっては、全長に渡り軌道防護工が必要となること等、不測の事態に対する列車運行の安全性の確保に課題がある。

3. 新工法の概要

従来工法の課題及び問題点を解決する方策として、JES工法を併用した新しい地下式連続立体交差工法を考案した（図-5）。

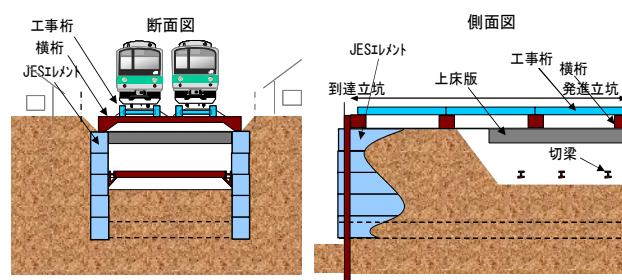


図-5 新工法概要図

(1) 工法概要

本工法は、開削・工事桁工法を改良したものであり、唯一工事用進入路が確保できる踏切付近の線路下に限定的に設置した立坑間の本体構造物側壁部に、非開削によってJESエレメントを推進し、土留壁と本体構造を兼用することにより、営業線直下に地下構造物を構築する工法である。

本工法の特徴は、営業線の影響範囲外となる側壁部に、土留壁兼用とするエレメントを昼間作業にて推進することにより、夜間の軌道上からの作業の減少による工期の短縮、工事費の削減を図れることである。

また、本工法では、JESエレメントによる側壁部は、本体構造物としての剛性を有しているため、土留壁として兼用することにより、掘削に伴う土留壁の変形を抑えることとなり、営業線及び近隣環境への影響を減少できる。本工法においても、営業線は

工事桁で仮受けすることとなるが、JESエレメントによる側壁部は工事桁の基礎としても利用することが出来るため、工事桁支持杭が不要となり、支障物の少ない地下空間を確保し、構造物を築造することができる。

(2) 新工法の課題

立坑位置が踏切付近に制約されると、立坑の配置間隔は 200～300m となるが、従来の JES 工法の施工延長の実績は、HEP 工法（エレメントけん引工法）の併用による、けん引延長 100m 程度である。

従来の HEP&JES 工法で施工する場合は、けん引ワイヤーの伸びによりけん引力が伝達不能となる。また、元押しによる推進工法で施工する場合は、推進ジャッキの能力が増大となることと、エレメントの座屈等により施工が困難となる（図-6）。

したがって、連続立体交差のような JES エレメントの長距離施工を行う場合、周面摩擦抵抗の増加による過大な推進力に対応出来る長距離推進技術が必要となる。

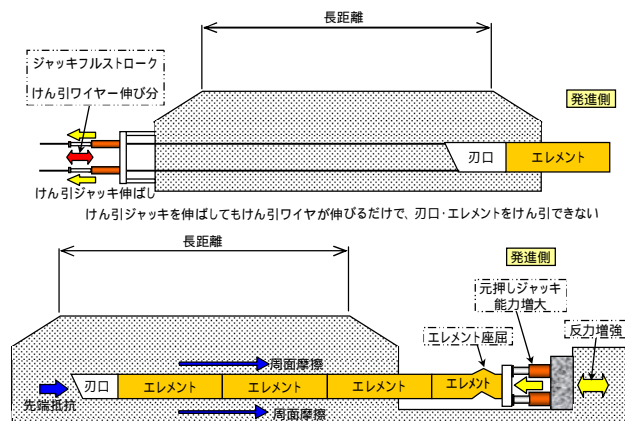


図-6 現状のエレメントけん引(推進)技術の課題

(3) 課題に対する対応策

JESエレメントの長距離施工を行うにあたり、長

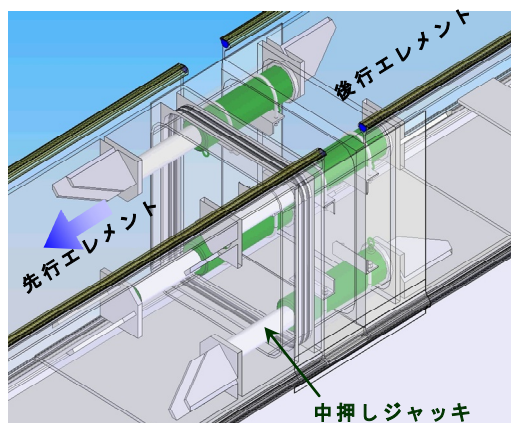


図-7 矩形対応型中押し装置概要図

距離施工を可能とする目的で、矩形対応型の中押し装置を開発した（図-7）。

JESエレメントの長距離施工は、施工延長に応じ、30～50m毎に中押し装置を複数箇所配置することで、元押し装置と中押し装置の伸縮を繰り返すことによって、エレメントの推進力を各推進装置に分散し、施工延長の制限を受けず施工可能となる（図-8）。

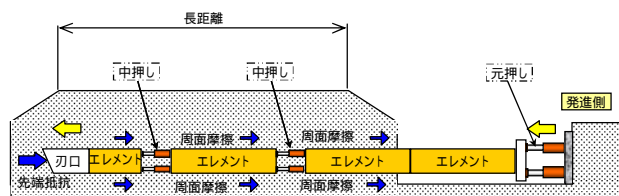


図-8 エレメント長距離推進概要図

4. 実証実験概要

開発した矩形対応型の中押し装置の妥当性を確認するために、実物大のエレメントと中押し装置を用いて実証試験を実施した（図-9）。

実証実験は、立坑間距離 30m の模擬地盤を造成し、中押し装置を有する JES エレメントを推進した。発進立坑内には、反力設備、元押し推進装置および中押し装置の油圧ユニットを設置し、JES エレメントには、上下 2 段それぞれ中間部 1 箇所

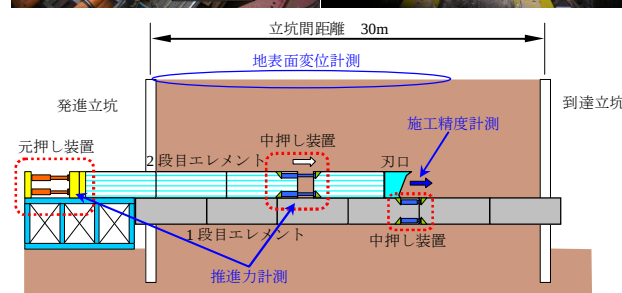
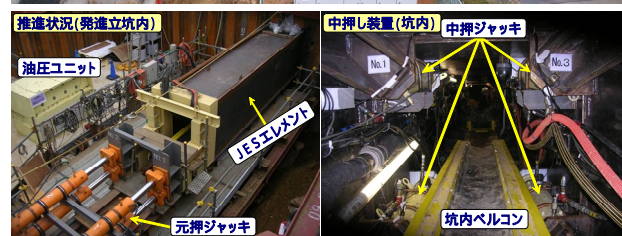


図-9 実験概要図

を装備した。推進は中押し装置と元押し装置を交互に使用して行い、推進力や施工精度及び地表面変位等を測定した。

5. 実証実験結果

(1) 推進力

本試験のエレメント推進力と既往のエレメント掘進工法の推力算定式²⁾を参考に定めた設計推進力（計算値）との関係について、1段目エレメント推進力図（図-10）、及び2段目エレメント推進力図（図-11）に示す。各推進設備に作用する推進力は、それぞれ①元押し装置（推進長に比例して、推進力は上昇する）、②中押し併用元押し装置（中押し以降の推進力のみ負担する）、③中押し装置（推進するエレメント長が変わらないため、ほぼ一定となる）によるものとして分類した。

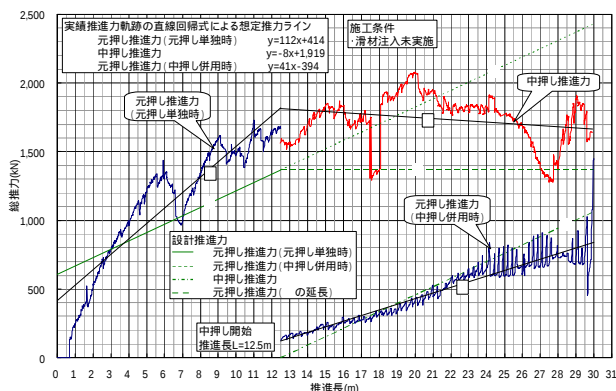


図-10 推進力図（1段目推進時）

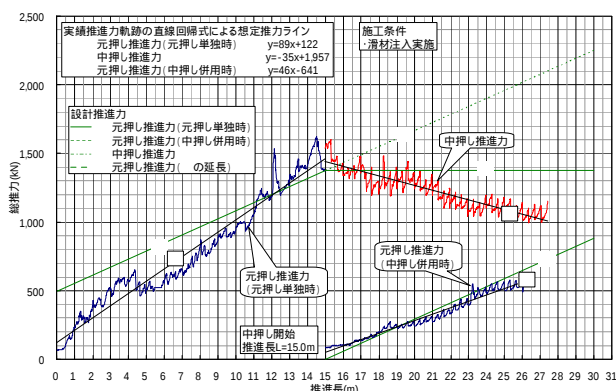


図-11 推進力図（2段目推進時）

1段目のエレメント推進では、発進後の元押し推進のみの場合（0～12.5m）において、実測値が設計値に対し大きくなっている（図-10図参照）。これは、1段目の施工は滑材注入を実施していないため、推進に伴う周面摩擦抵抗が大きくなったものと考えられる。中押し併用後（12.5～30m）の中押し推進力に

ついても同様に推移している（図-10図参照）。

1段目の実験結果を反映し、2段目の推進では、刃口貫入抵抗と周面摩擦抵抗の低減を図るため、刃口形状の改良、及び滑材注入を実施した。その結果、元押し単独時と中押し併用時の双方とも、計算値に近い値で推移しており、中押し装置を配置することによって、エレメント推進に伴う周面摩擦抵抗の低減効果が有効であることを確認した。

(2) 推進精度

1段目エレメント推進時の水平方向および鉛直方向の蛇行量をそれぞれ表-1、表-2、図-12、図-13に示す。

水平方向の蛇行量は、発進直後に右向き傾向が現れたが、刃口部とエレメント部の接合面に方向修正ジャッキを装備し、これを伸縮させることによって方向制御を行い、左方向7mm～右方向6mmの範囲の施工精度を確保した。

鉛直方向の蛇行量は、発進後推進長4m付近より下向き傾向が現れたことから、刃口部に装備した鉛直蛇行修正装置（スタビライザー）を使用して姿勢制御を行い、最大蛇行量として下方に12mm生じたが、到達時には下4mmまで回復した。

従来のエレメント掘進方法の施工実績では、掘進延長の1/500～1/1000程度の精度であり、掘進延長が300mの場合では、施工誤差が±300mm～600mmとなるが、今回の実証実験の結果、1段目エレメントの施工を人力掘削で行い、水平方向の精度が1/4000～1/5000程度、鉛直方向精度は1/2500程度であり、方向修正が可能であることを確認した。

表-1 水平方向蛇行量

	蛇行量
発進時蛇行量	右 2 mm
到達時蛇行量	左 6 mm
推進時蛇行量	右 6 mm～左 7 mm
施工精度（L=30m）	1/5000～1/4286

表-2 鉛直方向蛇行量

	蛇行量
発進時蛇行量	±0 mm
到達時蛇行量	下 4 mm
推進時蛇行量	±0 mm～下 12 mm
施工精度（L=30m）	0～1/2500

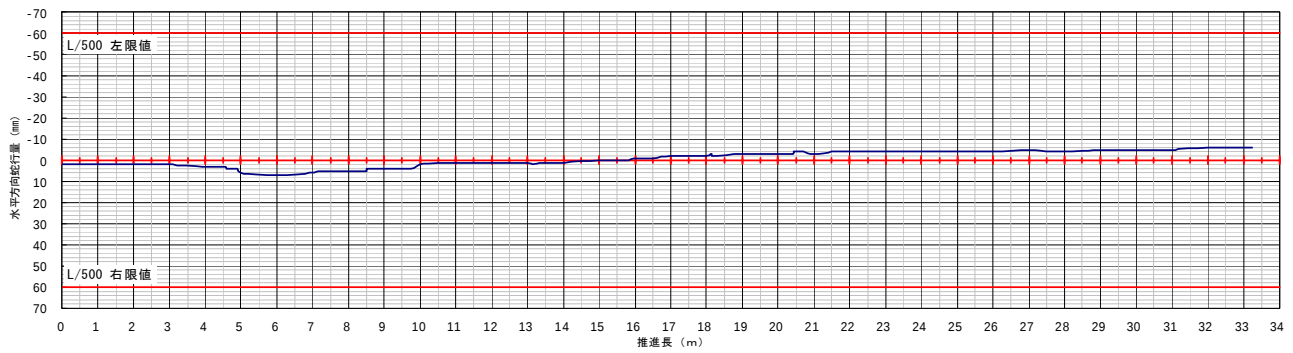


図-12 水平方向蛇行量

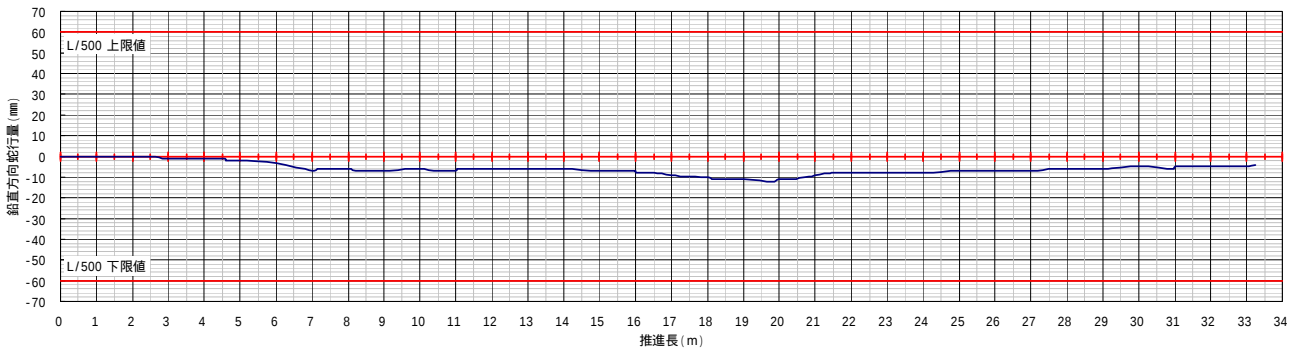


図-13 鉛直方向蛇行量

(3) 地表面変位

地表面変位については、刃口通過時に地表面の隆起が発生し、中押し装置通過後に徐々に沈下しているが、これらの変状は数ミリ程度と極めて微量である。また、工法の特徴として、営業線に影響の無い程度の離隔を確保した位置にエレメントを配置することから、営業線と周辺家屋に対する影響は軽微で

あり問題とならないと考えられる。(図-14, 15)

(4) 施工速度

実験による平均日進量(表-3)は、1 段目エレメント施工時では1.8m/日、2 段目エレメント施工時では2.7m/日であるが、「掘削方式」「エレメント寸法」「土質」「施工延長」等の施工条件により変

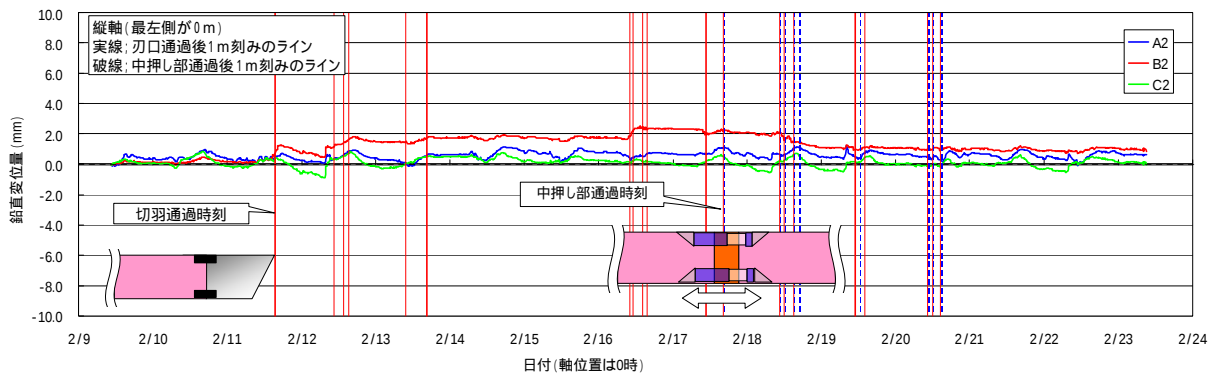


図-14 地表面変位量〔発進立坑より 7.5m地点〕(2 段目推進時)

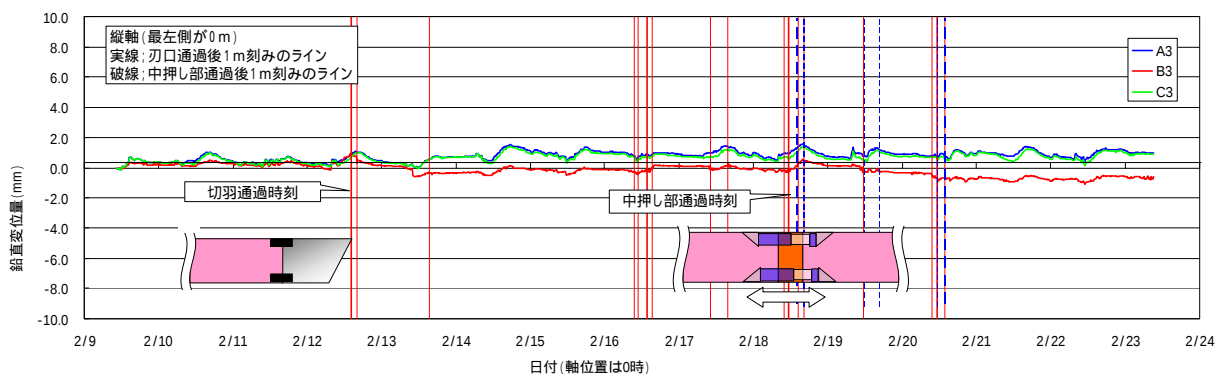


図-15 地表面変位量〔発進立坑より 10m地点〕(2 段目推進時)

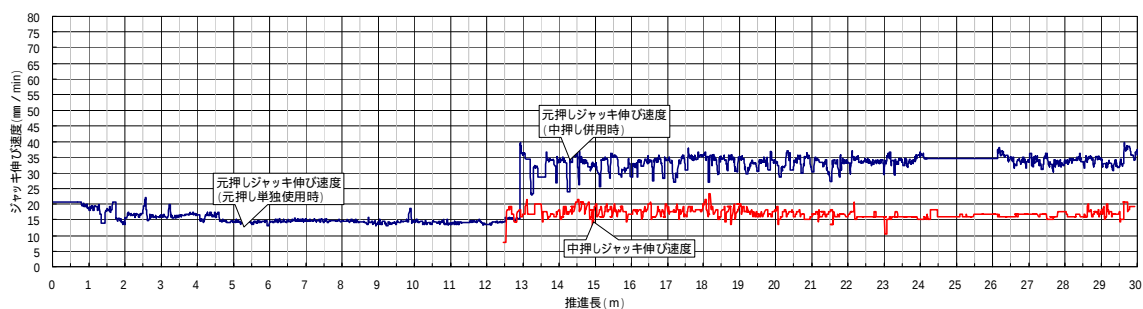


図-16 推進ジャッキ伸び速度推移図（1 段目推進時）

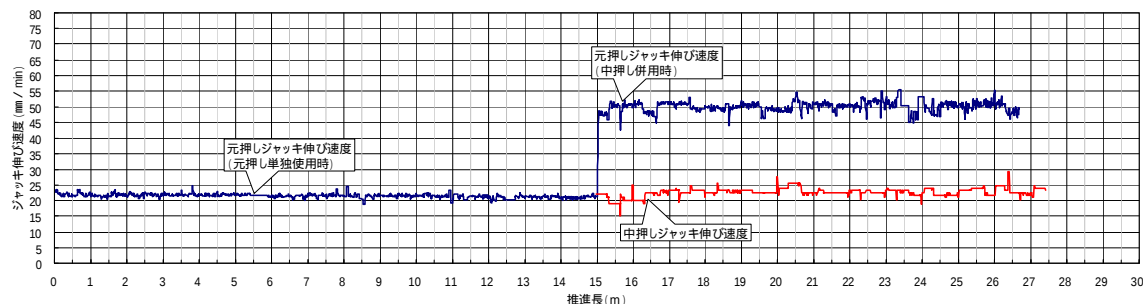


図-17 推進ジャッキ伸び速度推移図（2 段目推進時）

化すると考えられる。

表-3 推進工施工速度

	1 段目エレメント 施工時	2 段目エレメント 施工時
推進長 (m)	30.000 m	27.060m
所要日数 (日)	17 日	10 日
平均日進量 (m/日)	1.8 m/日	2.7 m/日

表-4 推進ジャッキ伸び速度（平均）

	1 段目エレメント 施工時	2 段目エレメント 施工時
元押しジャッキ伸び速度 (元押し推進単独時)	15.3 mm/min	21.9 mm/min
元押しジャッキ伸び速度 (中押し推進併用時)	33.4 mm/min	50.2 mm/min
中押しジャッキ伸び速度	17.0 mm/min	22.6 mm/min

ジャッキ伸び速度（表-4, 図-16, 17）は、1 段目エレメント施工時において、人力方式による掘削と施工精度に管理重点をおいていることから、2 段目エレメント施工時に比べ3割程度遅い速度となっている。切羽の断面積を考慮すると、2 段目エレメント施工時の平均速度は約22mm/minであり、1分間に0.033m³（約60kg）の土砂を掘削（搬送）していることに相当し、坑内幅1.2mにおける作業環境におい

ては、掘削速度（ジャッキ伸び速度）が妥当な速度であったと考えられる。

6. まとめ

本工法は、営業線に影響が無い側壁部に、土留壁兼用のJESエレメントを昼間作業にて推進することにより、従来工法に比べ、夜間線路閉鎖による軌道上からの作業工種の減少による工期の短縮、及び工事費の削減を図ることができると共に、非開削で剛性の高い土留壁を構築することができるため、営業線及び近隣環境への影響を減少できる。

試験結果より、JESエレメントに中押し装置を装備することにより、推進力の分散と低減を図ることができ、更なる改良を施すことで、長距離推進における中押し装置の妥当性を確認した。

今後は、機械掘削の適用、施工速度向上等、更なるコストダウンについて検討する。

なお、本研究は、国土交通省都市・地域整備局の実施する直上高架化等の改善方策に関する検討業務の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 清水, 森山他：鋼製エレメントを用いた線路下横断トンネルの設計法：第8回トンネル工学研究会，平成10年11月
- 2) HEP & JES 工法技術資料 追加改訂版：鉄道AC T研究会，平成18年8月