

エレメント連続施工時の 2次元解析手法の検討

丸子 文之¹・大塚 隆人²・仲山 貴司³

¹ 正会員 JR 東日本 東北工事事務所 (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町一丁目 3-1)
E-mail: f-maruko@jreast.co.jp

² 正会員 JR 東日本 東北工事事務所 (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町一丁目 3-1)
E-mail: taka-ootsuka@jreast.co.jp

³ 正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

線路下横断構造物を新設する場合に適用される非開削工法の一つである HEP&JES 工法は、通常、到達立坑側から 1 つのエレメントを PC 鋼より線を用いてけん引し、けん引設備を盛替えながら順次施工していく。これに対して、エレメントの施工速度を向上させ、工期短縮とコストダウンを図ることを目的に、刃口を連結するけん引設備を追加配置し、エレメントを連続的に施工する工法を開発した。本稿では、土槽実験と施工試験を通して検討した、エレメントを連続施工した際の地盤変形解析手法について報告する。

Key Words: *underpass, continuous construction of elements, Ground deformation analysis*

1. はじめに

(1) 背景と目的

踏切解消や河川改修などのため、線路下を横断する函体新設工事が数多く実施されており、この工事では、地上への影響を最小限にするため、分割した小断面のエレメントを掘進していく非開削工法が採用されている¹⁾。本研究では、その中の一つである HEP&JES 工法を対象として、エレメントの施工速度を向上させ、工期短縮とコストダウンを図ることができる施工法を開発した。

HEP&JES 工法とは、図-1 のように、力の伝達が可能な特殊な継手 (JES 継手) を有する鋼製エレメントを連続的に掘進、嵌合することで函体構造を構築する「JES 工法 (Jointed Element Structure method)」と、エレメント先端の刃口に定着した PC 鋼より線を到達側からけん引して、エレメントを土中に挿入する「HEP 工法 (High speed Element Pull method)」を組み合わせた工法である。

(2) 技術開発概要

通常、エレメントのけん引は到達側に設置したけん引設備を盛替えながら 1 本ずつ行うのに対して、本開発では、図-2 のように、刃口を連結するけん引設備を追加配置することで、刃口をずらした状態で複数本同時にけん

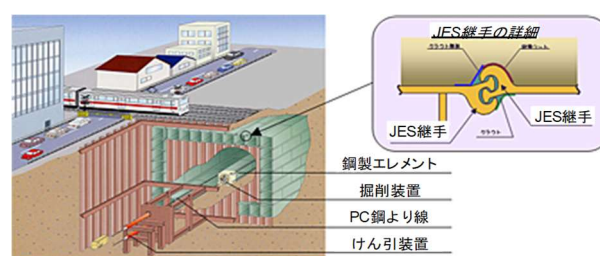


図-1 HEP&JES 工法の概念図²⁾

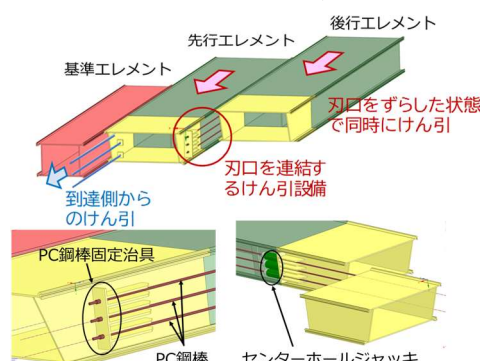
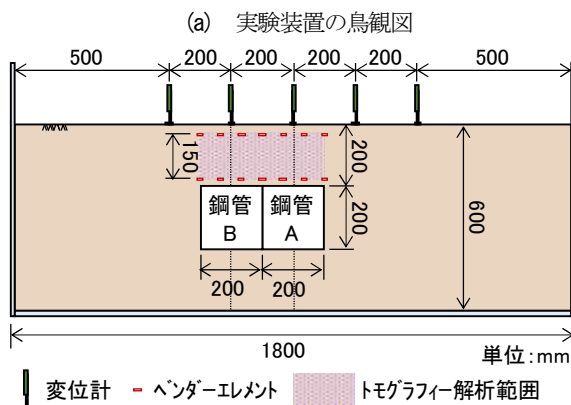
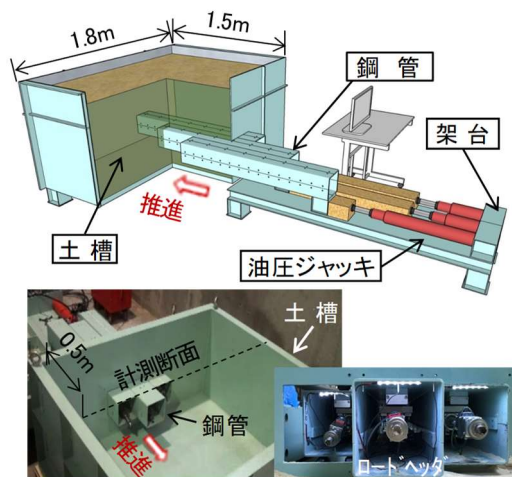


図-2 開発工法におけるけん引方法、刃口構造

ん引することを可能とした (以下、開発工法という。)

開発工法の実用化にあたっては、刃口位置で通常のけん引方法と同等の地盤の安定性を確保することが重要であり、地表面の最終変位量の事前予測手法も求められる。そこで本研究では、土槽実験と実寸大の施工試験を通してこれらの検討を行った。



(b) 計測断面における計測器の配置

図-3 使用した実験装置

2. エレメントの掘進を模擬した土槽実験

(1) 実験方法

a) 使用した実験装置

従来、刃口位置での地盤の安定性や地表面の最終変位量を検証する場合、降下床実験や引戸実験³⁾が行われてきた。ただし、これらの方法では開発工法の複数本同時掘進の再現が難しいことから、本研究では、1/4スケールの鋼管を実際に掘進する土槽実験を実施した。

実験装置を図-3(a)に示す。人力による掘進を模擬するため、刃口先端にロードヘッドを配置しており、これにより掘削したのち、油圧ジャッキで鋼管を推進する工程を繰り返すことで鋼管を土中に挿入した。

b) 模型地盤の挙動計測

降下床実験や引戸実験では、観察および移動床に作用する土圧を計測して地盤の安定性を評価するが、本実験では実際に掘削を行うため、同様の測定ができない。そこで、鋼管発進側の土槽壁面から500mm離れた位置に設けた計測断面において、図-3(b)のように、地表面変位を計測するとともに、地盤の複数のベンダーエレメント⁴⁾を土中に設置して弾性波トモグラフィーを実施した。

表-1 実験ケース

ケース	掘進パターン	一掘進長
Case1	先行鋼管 A を 850mm 掘進後、 後行鋼管 B を 550mm 掘進	0.5D
Case2	鋼管 2 本の刃口を揃えた状態で同 時に 550mm 掘進	
Case3	先行鋼管 A を 550mm 掘進後、 後行鋼管 B を 550mm 掘進	
Case4	鋼管 2 本の刃口を 1D ずらした 状態で 800mm 掘進	

D: 鋼管高さ

(2) 実験条件

a) 模型地盤の作成条件

実施工では、工法に関わらず経験的に2m(約2D, D:エレメント高さ)以上の土被りを確保することが推奨されてきた⁵⁾。ただし、近年ではアプローチ部も含めた工事全体の最適化のため、更に小さい土被りが要望されることもあり、施工法の改良や地盤改良の追加などを検討している現状もある¹⁾。

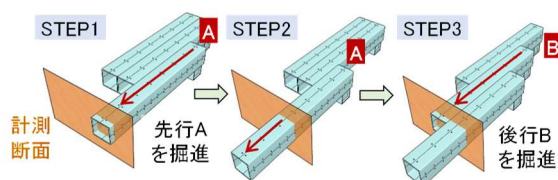
そこで、本実験では、後者の低土被りの原地盤を模した模型地盤を作成した。含水比1%に調整した珪砂7号を使用し、掘進時の土被りが200mm(1D)となるように相対密度80%で締め固めた。地表面付近は軟弱である場合も多いことから、含水比はこれを再現できるように設定した値である。この条件下での変形係数 E_{50} と拘束圧 σ には $E_{50}=5500\sigma^{1/2}$ (kN/m²)の関係が得られており、例えば、この関係式に土被り中心深さでの静止土圧状態を仮定した拘束圧を代入し、さらに、得られた変形係数を E_{50} とN値の関係式($E_{50}=2000N$ (kN/m²)⁶⁾)に代入すると、N値は2~3相当になる。

b) 実験ケース

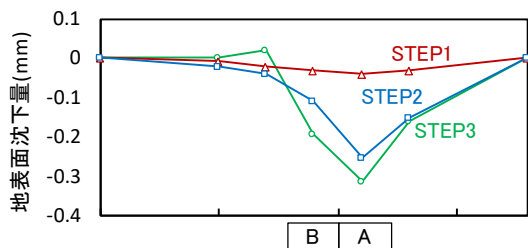
実験ケースを表-1に示す。Case1~Case3は、刃口位置での地盤の安定性を確保する観点から、開発工法で確保すべき刃口の離隔を把握するため実施したものである。比較対象として、まず、通常通り1本ずつ分割掘進するCase1、鋼管2本の刃口位置を揃えて同時掘進するCase2を実施した。開発工法は、刃口の離隔次第でCase1とCase2の中間的な挙動を示すと想定し、計測断面直下で刃口を近づけるCase3を実施して、Case1に近い挙動を示す刃口の離隔を確認した。

Case4は、Case3の結果を踏まえ、実際に刃口をずらして2本同時に掘進したものである。刃口位置での地盤の安定性を確保したうえで、地表面の最終変位量を把握することを目的とした。

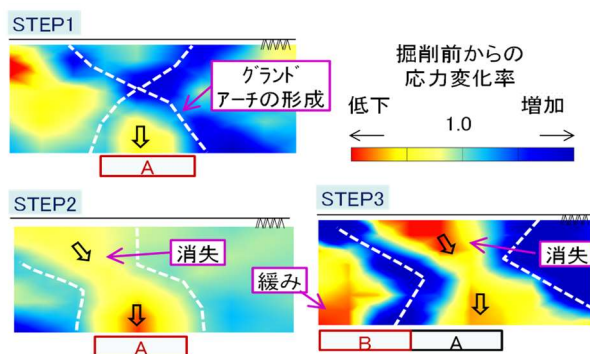
なお、1掘進長は、掘進長と地表面陥没の関係を把握した既往の実験⁷⁾で、刃口直上での地表面沈下の増加傾向が顕著になりはじめる0.5Dとした。



(a) 掘進ステップ

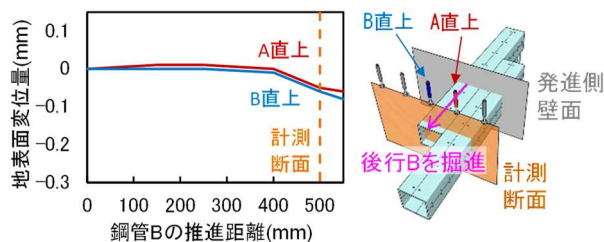


(b) 掘進ステップと横断方向の地表面変位分布

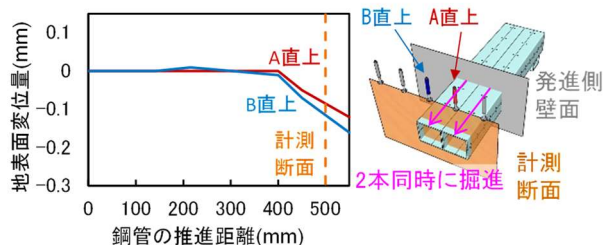


(c) 掘進ステップと土中応力の関係

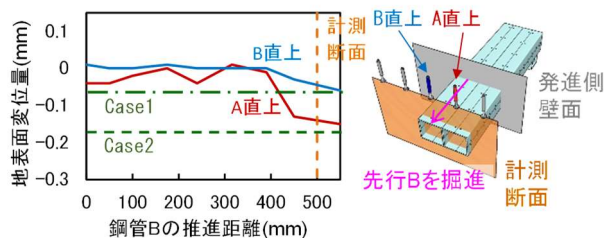
図-4 実験結果 (Case1)



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図-5 推進距離と地表面変位量の関係

(3) 実験結果

a) 通常の分割掘進 (Case1) における地盤挙動

Case1の掘進ステップと横断方向の地表面変位分布の関係を図-4(a), (b)に示す。掘進が進むにつれて先行した鋼管A直上を最大として沈下していく傾向が見られ、特に鋼管AのSTEP2に大きな沈下が生じた。一方、図-4(c)には弾性波トモグラフィー結果から換算⁹⁾した土中の応力分布を示す。STEP1では土中にグラウンドアーチが形成されているが、STEP2に一部が消失し、STEP3では完全に消失した。

一般に、グラウンドアーチの高さは掘削断面から1～2D程度であり、これが形成されている状態のほうが地盤の安定性が高まり、地表面沈下が小さい⁹⁾。実験結果は、このグラウンドアーチの形成と地表面沈下との関係と一致しており、グラウンドアーチが刃口通過後に消失して沈下が進行していることから、前述したような無対策の厳しい低土被り条件を再現していることがわかる。

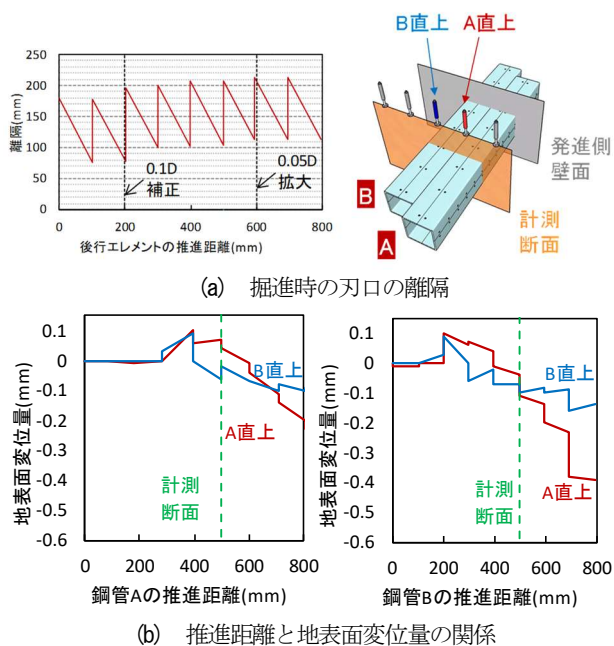
なお、他のケースにおいても同様の傾向が見られたことから、以降では刃口位置における周辺地盤の安定性を地表面沈下量を指標として相対比較することとした。

b) 同時掘進における刃口離隔の効果

Case1とCase2における鋼管の掘進距離と計測断面鋼管直上の地表面変位の関係を図-5(a), (b)に示す。なお、Case1はCase2, Case3との比較のため、鋼管Bの掘進開始時点を鋼管Aの沈下量の初期値とした。

両ケースとも、刃口が計測断面よりも200mm (0.5～1D)程度手前の位置から沈下を生じはじめ、刃口が計測断面を通過する時点の沈下量はCase2のほうが大きい結果となった。この先行沈下の傾向は切羽を開放して掘削する山岳工法と同様であり、切羽前方1Dから沈下は顕著になる傾向¹⁰⁾、トンネル断面が大きくなるに伴い周辺地盤への影響も大きくなる傾向が一致する。

図-5(c)は、刃口離隔の検証ケースであるCase3の後行した鋼管Bの掘進距離と計測断面鋼管直上の地表面変位の関係である。同図にはCase1, Case2において刃口が計測断面を通過した時点の沈下量も合わせて示した。鋼管Bの掘進距離が大きくなる(鋼管ABの刃口が近づく)につれて沈下が増加し、刃口位置が一致した最終状態では鋼管AB直上の沈下に偏りが生じた。後行した鋼管B



(a) 掘進時の刃口の離隔

(b) 推進距離と地表面変位量の関係

図-6 実験結果 (Case4)

は Case1 と同程度であるのに対し、先行した鋼管 A は Case2 と同程度になっており、この偏りが生じ始める鋼管 AB の刃口の離れは $0.5 \sim 1D$ の範囲であった。

c) 刃口離隔を設けた同時掘進における地表面変位の発生傾向

Case4 では、Case1～3 の結果から刃口離隔の閾値が $0.5 \sim 1D$ と想定されたため、 $1D$ 離れた状態で実際に掘進を行った。

図-6 に、刃口離隔の実績、鋼管の掘進距離と計測断面直上の地表面変位の関係を示す。両刃口が計測断面を通過する時点の地表面変位に着目すると、変動は 0.1mm 以内と 1 本ずつ掘進した Case1 に近い値となっていることがわかる。また、刃口が計測断面を通過した後に着目すると、Case1 と同様に後続沈下がみられた。ただし、特徴として Case1 (図-4(b)のステップ 3) と比べて先行した鋼管 A 直上の沈下量が大きく、鋼管 B 直上の沈下量が小さいという偏りが生じた。

以上の結果から、土槽実験では、開発工法において通常の分割掘削と同等の安定性を得るため、刃口を $1D$ 以上離すことが有効と考えられた。また、地表面の沈下量を事前予測するにあたっては、鋼管 A への偏りを捉えられる方法が必要と考えられた。

(4) 開発工法を対象とした掘削解析方法の検討

a) 従来のトンネルの掘削解析

トンネルでは、一般に掘削断面を 2 次元の平面ひずみ要素でモデル化し、掘削相当外力を作用させる解析手法が用いられている。この掘削相当外力は、掘削前の地盤内応力等に「応力解放率」を乗じて求められる¹⁾。

精緻にシミュレーションする場合には、断面形状を考

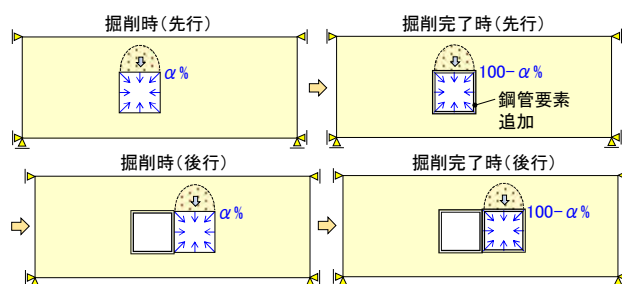


図-7 分割掘削する場合の一般的な解析手順 (2 エLEMENT の場合の例)

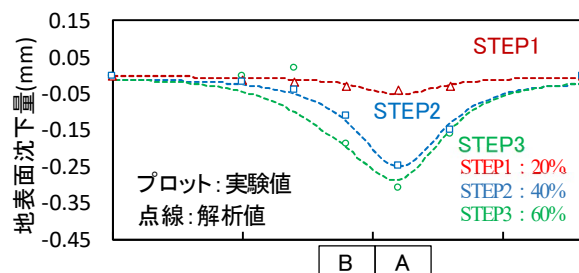
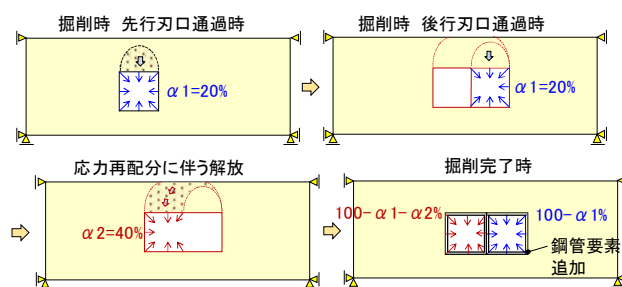
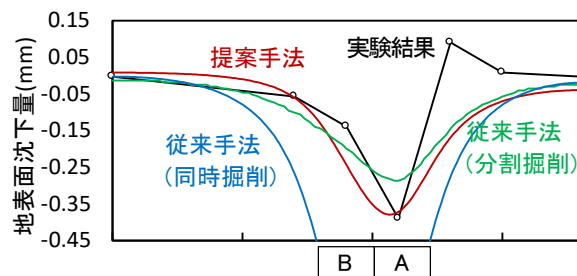


図-8 実験結果と掘削解析の比較 (Case1)
(ステップは図-4(a)と同様)



(a) 解析ステップ



(b) 解析結果 (地表面変位)

図-9 実験結果と掘削解析の比較 (Case4)

慮して断面内で異方性を持たせた応力解放率を与える方法¹²⁾や、変形係数に非線形性を与えること¹³⁾なども提案されているが、一般には、最終沈下量の最大値を捉える精度があれば十分な場合も多く、簡易に応力解放率を断面内一様で設定し、等価線形弾性係数が用いられる。

分割掘削の場合、通常は図-7 のように、掘削相当外力を作用させるステップと、鋼管要素を追加して残りの残留応力を作用させるステップを繰り返す方法が用いられ、応力解放率には通常 $30 \sim 40\%$ が多用される。

b) 開発工法を対象とした解析方法

まず、Case1 の結果を用いて、応力解放率のキャリブ

レーションを実施した。この結果、図-8 に示すように、鋼管 A、B ともに刃口通過時の応力解放率を 20%に設定し、後続沈下に対して付加的な解放を行うことで沈下分布を捉えることが可能であった。

次に、開発工法の Case4 は最終沈下が鋼管 A に偏る傾向を加味した解析方法を検討した(図-9)。具体的には、それぞれの刃口通過時の応力解放率には前述した値を用いるが、先行エレメントの刃口通過後に後行エレメント掘進時の影響があるものと仮定し、鋼管 AB の掘削面積を解放した状態で、鋼管 A 側に応力再配分に伴う付加的な解放を足し合わせることにした。最後に梁要素で鋼管 AB を挿入し、残りの応力を解放した。土槽実験とキャリブレーションした結果、鋼管 A 側にのみ 40%を付加することで実験の最大値を捉えられることができた。また、同図には、Case1 の方法で分割掘削した場合、刃口位置を一致させて同時掘進する場合について解析した結果も示した。この結果から、後続する沈下を考慮した場合にも分割掘削に近い沈下量となることがわかる。

これらの結果から、開発工法においても、鋼管 AB 間の応力解放率について、後行エレメント掘進時の影響を加味することで、従来のトンネル掘削解析法が利用できるものと考えられる。

3. 施工試験

(1) 試験概要

施工試験は、鋼材で模擬した基準エレメントをあらかじめ埋設したうえで、これをガイドにして 2 本分の幅(約 2.0m)がある広幅エレメントを 2 本同時にけん引した(図-10)。

掘進手順を図-11 に、試験条件を表-2 に示す。両刃口で同時に人力掘削したのち、先行エレメントをけん引(到達立坑のけん引設備を使用)し、次に後行エレメントのけん引(刃口内けん引設備を使用)を行う工程を 1 サイクルとした。これを繰り返すことで、発進・到達立坑間 24.6m のうち、先行エレメントは 20m、後行エレメントは 18m まで掘進した。

先行エレメントと後行エレメントの刃口の離隔は、前述した土槽実験より 1D 以上を確保することとし、まくら木の下に両方の刃口が同時に入らないことを考慮して約 2.0~4.0m とした。

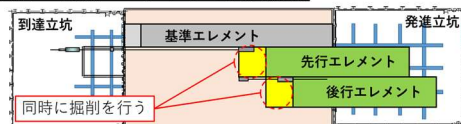
(2) 確認項目および計測方法

開発工法の施工精度や地表面への影響を確認するため、表-3 に示す確認項目に対して計測を実施した。本稿では、これらのうち、エレメント出来形および地表面変位の計測結果を報告する。



図-10 施工試験状況

① 先行・後行エレメントの同時掘削



② 後行刃口内のジャッキの固定解除



③ 先行エレメントの掘進



④ 後行刃口内のジャッキの固定



⑤ 後行エレメントの掘進



図-11 掘進手順

表-2 試験条件

先行エレメント	断面	高さ0.85m 幅2.07m
	延長	延長20.0m
後行エレメント	断面	高さ0.85m 幅1.99m
	延長	延長18.0m
地盤条件	エレメント 上面	セメント改良埋戻し土：路盤を想定 (K ₃₀ 値：平均303MN/m ³)
	エレメント 下面	埋戻し土：緩い砂質土を想定 (K ₃₀ 値：平均77MN/m ³)
土被り		1.0m
掘進延長		1サイクル0.30m

表-3 確認項目および計測方法

項 目	計測項目	計測方法
エレメント 出来形	移動距離	ロータリーエンコーダ
	刃口姿勢	ローテティングレーザー 電子レベルメジャー
	敷設精度	測量
地表面変位	鉛直変位	地表面変位計測 (5点/断面×10断面=50測点)
けん引力	ジャッキ圧	圧力計
地盤強度	地盤反力係数	小型FWD試験機
サイクルタイム	掘削・けん引	
	エレメント接続	

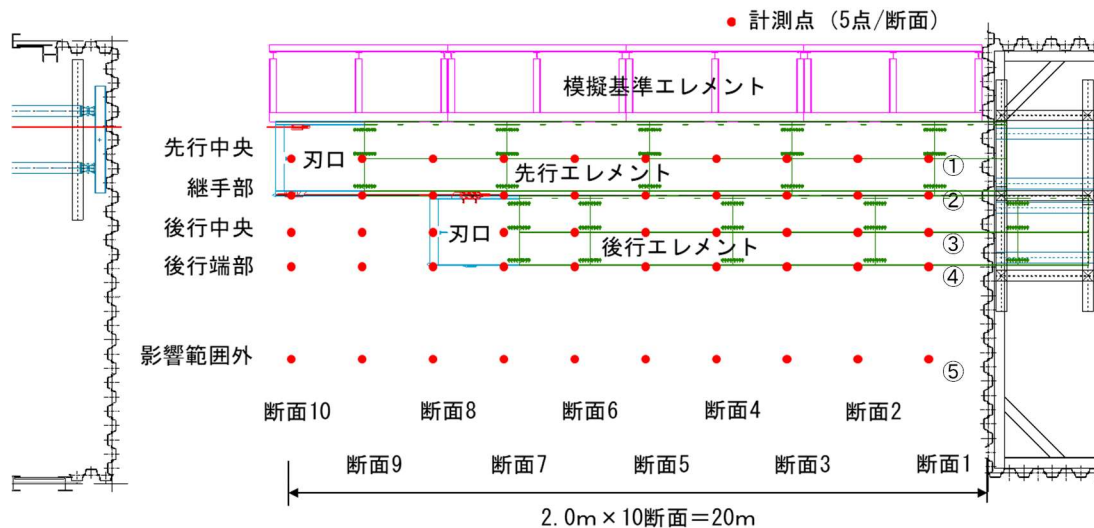


図-13 地表面変位計測位置図

a) エレメント出来形の計測

掘進中は、エレメントのけん引距離、到達立坑と刃口内部のジャッキのけん引力とともに、レーザー測量器を使用して刃口姿勢を計測した。また、掘進完了後には、レベル測量によりエレメント出来形を確認した。

b) 地表面変位の計測

地表面の鉛直変位を軌道スコープと地表面ターゲットを用いて1分間隔で計測した。図-12、図-13に示すように、計測断面を発進立坑から2.0m離れた位置を始点として2.0m間隔で10断面設け、各断面に測定点を5点設けた。



図-12 地表面変位計測状況

(3) 試験結果

a) エレメント出来形

図-14に、刃口およびエレメント出来形の計測結果を示す。横軸はけん引距離、縦軸は初めに刃口を水平に設置した時点からの変位量で、先行、後行エレメントともに、許容値(L/500, L:掘進延長)に十分に収まる精度であった。

b) 地表面変位

図-15に、掘進完了後の全測点の地表面鉛直変位量を示す。全体的に沈下傾向があり、先行、後行エレメント間の継手部の沈下が最も大きい結果となった。

図-16に刃口通過時の位置とエレメント出来形の差を表した略図を示す。この要因は、フリクション対策を実施しなかったため、エレメントけん引時に摩擦が生じた影響や裏込め注入を実施しなかった影響などが推測される。これらの沈下は2次元FEM解析で再現することは困難である。

図-17は、継手部直上における後行エレメント掘進完了後の各断面の沈下量と、刃口通過位置とエレメント出来形の差分(縦線)を重ね合わせたものである。掘削に

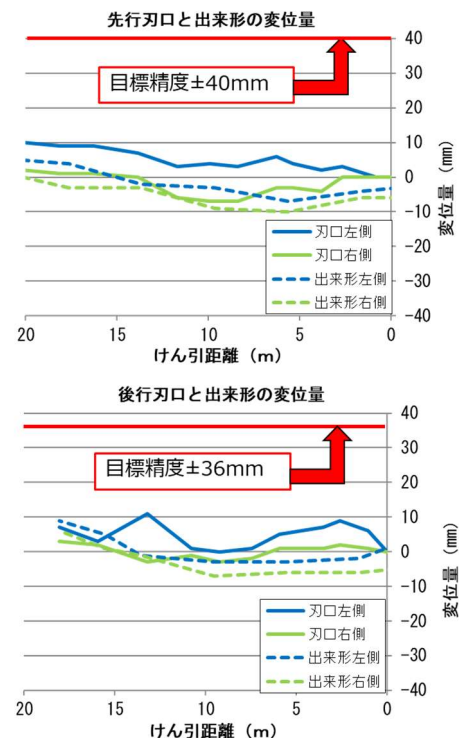


図-14 刃口・エレメント出来形の計測結果

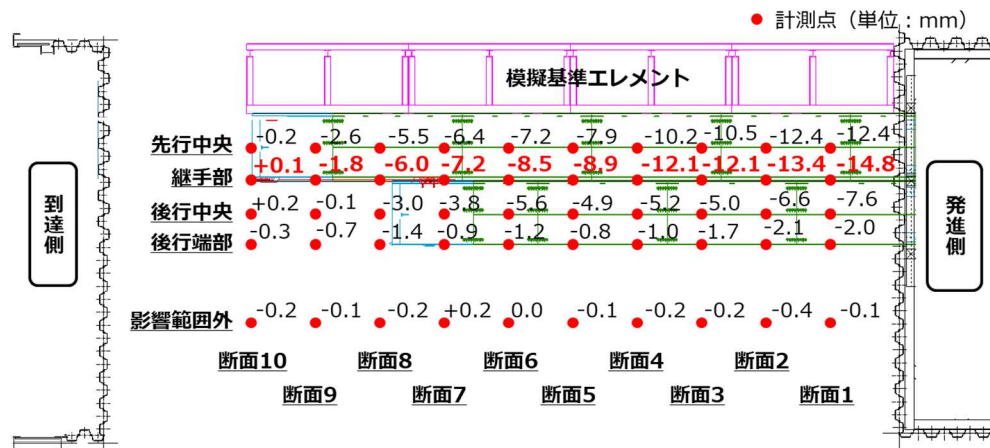


図-15 試験終了時点の地表面変位計測結果

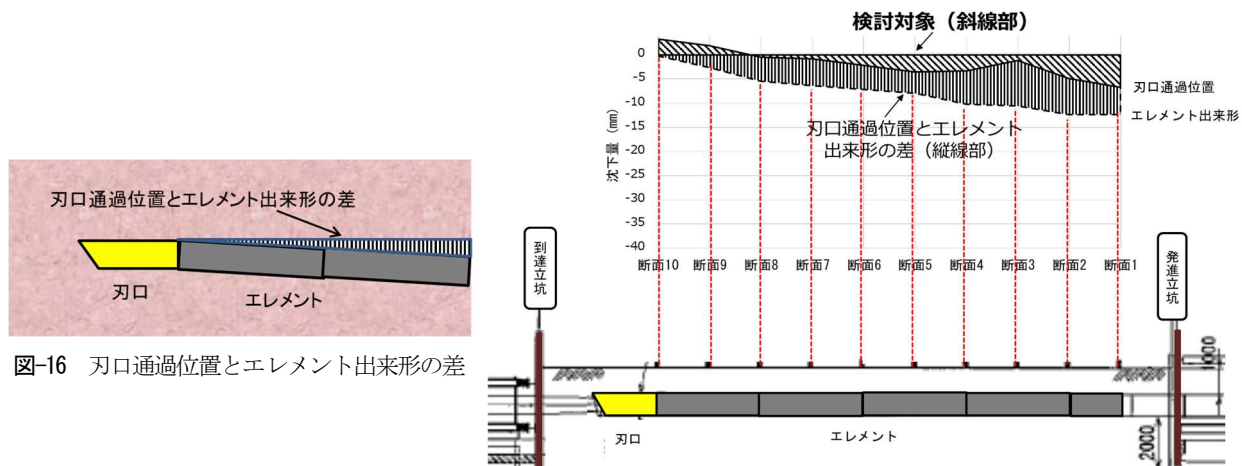


図-16 刃口通過位置とエレメント出来形の差

図-17 総沈下量と検討対象の沈下量の関係

伴う応力解放による沈下量は斜線部に近いと推測される。また、実際の施工ではフリクション対策や裏込め注入を実施するため、今回の解析手法を検討するにあたっては、斜線部分の沈下量を検討対象とした。

(4) 掘削解析手法の検証

図-18 に解析ステップ、表-4 に解析条件を示す。解析モデルは地盤を線形弾性要素、エレメントを梁要素とし、モデル化領域は深度方向をエレメント下から $2D$ (D :エレメント高さ)、モデル化幅をエレメント両端から $2W$ (W :エレメント幅) で設定した。地盤については、施工試験時に小型 FWD で計測した K_{30} 値の計測結果から、変形係数を設定し、それに近い砂質土を想定して単位体積重量とポアソン比を設定した。解析方法は、模擬エレメントが埋設された状態を STEP0 として初期化し、土槽実験で検討した方法を汎用ソフトに対応させて実施した。

施工試験の計測結果と解析結果を図-19 に示す。計測結果と比較すると、解析結果は、計測結果と同様に先行エレメント側の沈下量が大きくなる傾向を示し、最も沈下量の大きい断面①の計測結果も含めて、安全側に包含していることがわかる。

なお、提案する解析手法は、厳しい施工条件下を想定したものであり、実施工における検証も必要であること

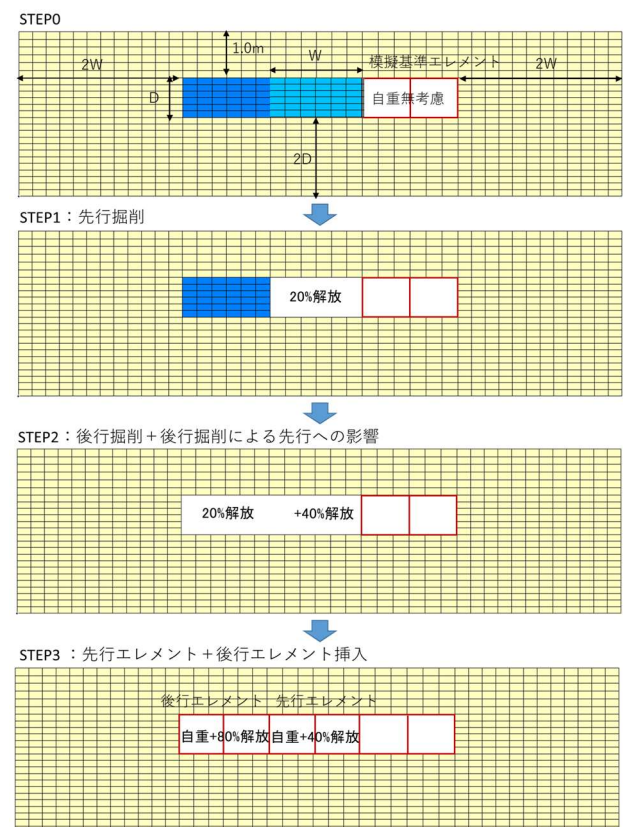


図-18 施工試験の解析ステップ

が課題として残されるが、開発工法の沈下量もトンネル掘削時に用いられる一般的な掘削解析手法を改良することで予測可能なことを確認できた。

4. まとめ

HEP&JES 工法の施工速度向上を目的として、刃口をずらした状態で複数本のエレメントを同時にけん引する工法を開発した。本研究では、前段で実施した土槽実験と施工試験を通して、地表面変位を予測する解析手法を検討し、この結果、以下の知見が得られた。

- ・エレメントの掘進を模擬した土槽実験から、先行、後行エレメントの刃口離隔が 1D 以上確保されれば、従来のけん引方法と同程度の地表面変位量となることが明らかになった。
- ・刃口位置をずらして掘進した場合、先行と後行エレメント掘進時の地表面変化を比較すると、先行エレメントが大きく沈下する傾向が確認され、後行エレメント掘進によるグラウンドアーチの消失が影響している。
- ・開発工法においても、従来のトンネルの解析手法を応用して、応力解放率の設定に後行エレメントの影響を加味することで、地表面変位量を予測する方法を構築し、土槽実験および施工試験でその妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：トンネル・ライブラリー31 特殊トンネル工法―道路や鉄道との立体交差トンネル、2019.
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社：建設プロジェクトを支える新技術 HEP&JES 工法 (https://www.jreast.co.jp/newtech/tech04_main.html)
- 3) 小西真治, 朝倉俊弘, 田村武, 辻鉄也：粘性土層が介在する砂地盤の切羽安定評価について, 土木学会論文集, Vol.659, pp.51-62, 2000.
- 4) 公益社団法人地盤工学会：ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法 (JGS0544), 2011.
- 5) 日本国有鉄道 構造物設計事務所：線路下横断構造物の計画及び施工法の選定の手引き, pp.51-52, 1986.

表-4 施工試験の解析条件

地盤	変形係数 (MN/m ²)	15
	ポアソン比	0.33
	単位体積重量 (MN/m ³)	14.9
エレメント	変形係数 (MN/m ²)	200000
	ポアソン比	0.33
	単位体積重量 (kN/m ³)	77
	厚さ (mm)	16

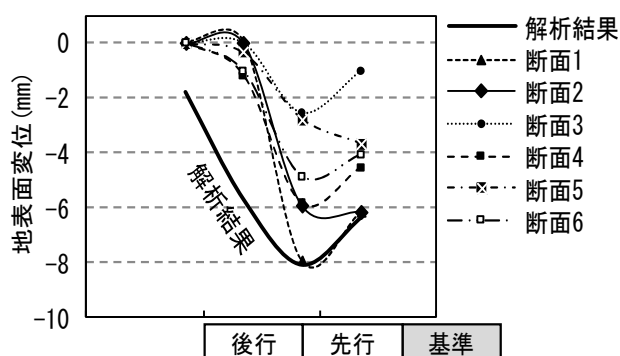


図-19 施工試験と解析の比較

- 6) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），p.99, 2012.
- 7) 中島卓哉, 仲山貴司, 西岡英俊, 岡野法之, 板谷創平：トンネル掘削における角型鋼管試験機を用いた基礎的研究, 2018.
- 8) 福王翔, 桑野玲子：ベンダーエレメント法を用いた弾性波測定による模型地盤内応力の推定, 生産研究, Vol.64, No.4, 2012.
- 9) 公益社団法人土木学会：トンネル標準示方書「共通編」・同解説／「シールド工法編」・同解説（2016年制定），pp.52-53, 2016.
- 10) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.430, 2008.
- 11) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, pp.159-160, 2008.
- 12) 西山和宣, 仲山貴司, 富樫陽太, 岡野法之：矩形断面掘削時の地表面変位応答の予測, 地下空間シンポジウム論文集, Vol.22, pp.151-154, 2017.
- 13) 土屋敬：NATM の設計プログラムの開発, 土木学会論文集, Vol.346/III-1（報告），1984.

TWO-DIMENTIONAL ANALYSIS METHOD FOR CONTINUOUS CONSTRUCTION OF ELEMENTS

Fumiyuki MARUKO, Takahito OOTSUKA and Takashi NAKAYAMA

HEP&JES method is one of the tunneling methods applied to construction of box culvert under railway track. In this method, pulling mechanical juck system is installed in arrival shaft, rectangular steel pipes with JES joints are inserted into ground for reduction of ground displacement and these pipes, connected using JES joint each other, are used as a tunnel lining. In this study, New pulling system is developed. It is possible to pull some steel pipes together because these digging faces of pipe are shifted. In this paper, we propose the ground deformation analysis method of HEP&JES method using this system.