

非開削切り拡げ工法の設計方法における 適正な FEM 解析モデルに関する研究

稗田 拓也¹・岩波 基²・山口 哲司³

¹ 学生会員 早稲田大学理工学術院 建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1）

E-mail: hieda@ruri.waseda.jp

² 正会員 早稲田大学理工学術院 社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1）

E-mail: miwanami@waseda.jp

³ 正会員 株式会社熊谷組 土木設計部（〒162-0004 東京都新宿区津久戸町 2）

E-mail: tyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

新たに地下空間を構築するために、既設シールドトンネルの覆工に開口部を造り、トンネル外部の地下空間にトンネル構造物を拡幅する工法を非開削切り拡げ工法という。本工法は、今後、老朽化や経年劣化する地下構造物のリニューアルやバイパス構築などの地下構造物の高付加価値化や、地上からの開削工事を行うことが困難な都市部での地下空間拡幅の際に期待されている。しかし、発展途上の技術であるため、今後の活用が期待されているにもかかわらず、明確な設計方法が確立されていないのが現状である。そこで本報告では、当工法を採用してポンプ室構築した工事で詳細な計測を行い、スチールシールドセグメントと仮設鋼材に生じた挙動を3次元 FEM 解析によって再現し、設計法の改善に用いる基礎データを作成したものである。

Key Words: shield tunnel, non-open-cut and enlarge method, non-linear

1. はじめに

非開削切り拡げ工法は既設のシールドトンネルのシールドセグメントに開口部を造り、そこからトンネル外部に出て、非開削によって新たな地下空間を拡幅してポンプ室を構築する技術である。そのため、路上の交通量が多く、地下の浅い位置にすでに多数のライフラインが存在する都市部の地下空間の拡幅を行う工事に、当工法は改良が期待されている。この工法は 1970 年代から東京の地下鉄で 2 本のシールドトンネルの間を切り拡げて、駅を構築する工事などに用いられてきたが、設計方法は未だ十分な研究に基づいて確立されておらず、検証が不十分なまま多くの工事で採用されている。そのため、安全性や経済性が明確になっていないのが現状である。本報告の対象である図 1 の工事でも設計値と計測値の間に大きな差が生じており、支保工やシールドトンネルなどの設計方法の見直しが必要であるといえる。そこで、本報告では、実際の設計に用いた構造解析の設計条件を検討するため、仮設補強鋼材とトンネル構造物の断面力の 3 次元 FEM 解析値を計測値に近づけて実挙動を再現する

ことを試みる。そして、設計時の構造解析と異なっている 3 次元効果や部材接合部の剛性、その他荷重等の適切な値を検討する。

2. 検討対象

(1) 工事概要

当該工事は、図 1 に示した東京メトロ 13 号線の雑司が谷駅～西早稲田駅間の中間ポンプ室を、単線並列のシールドトンネル内から非開削切り拡げ工法により構築したものである。



図-1 東京メトロ副都心線平面・縦断図

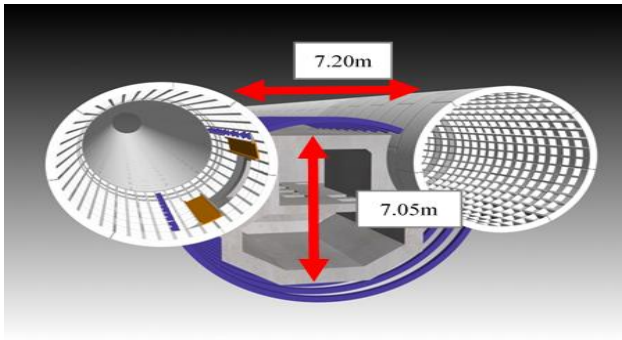


図-2 中間ポンプ室の構造概要

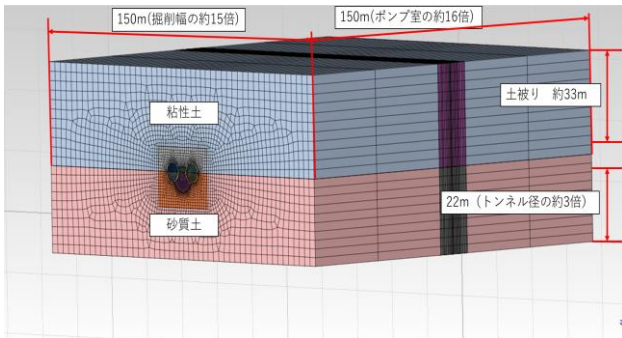


図-3 3次元解析モデル図 (全体)

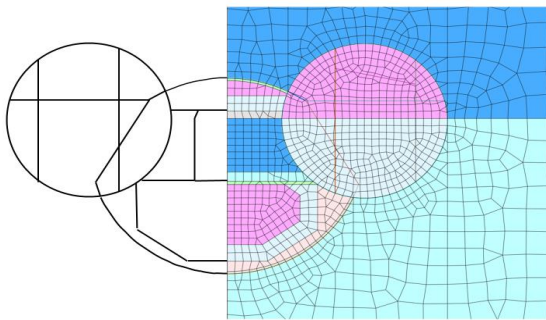


図-4 解析モデル図 (横断面)

表-1 地盤の概要

項目	単位	上総層粘性土	上総層砂質土
N 値	—	30~50	50 以上
単位体積重量	kN/m ³	17	18
粘着力	kN/m ²	260	0
内部摩擦角	°	0	42
変形係数	kN/m ²	54,400	75,300
透水係数	cm/sec	—	1×10 ⁻³

(2) 構造概要

中間ポンプ室は2層構造から成り、躯体幅7.2m、高さ7.05m、奥行き9.4mである。上部はトンネル部と連結する内空高さ2.6mの機械室で、下部は内空高さ2.7mの排水ピットである。図2に中間ポンプ室の構造概要を示す。

(3) 施工手順

中間ポンプ室の掘削においては、施工の安全性と設計の合理化を目的として三分割の逆巻き施工が採用されている。

(4) 施工条件

ポンプ室の上半は上総層粘性土、下半は上総層砂質土となっている。土被りは約30.7m、地下水は被圧され掘削底盤で約0.32MPaである。表-1に地盤条件の概要と地盤の物性値を示す。

3. 解析概要

(1) 解析方針

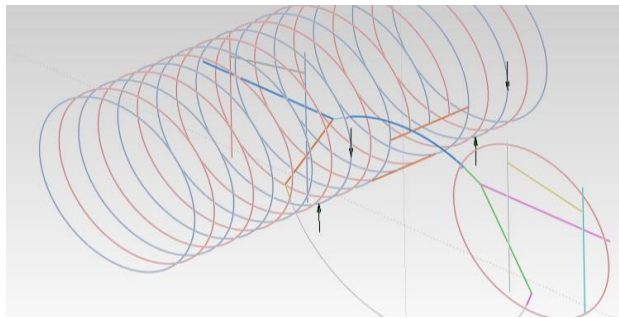
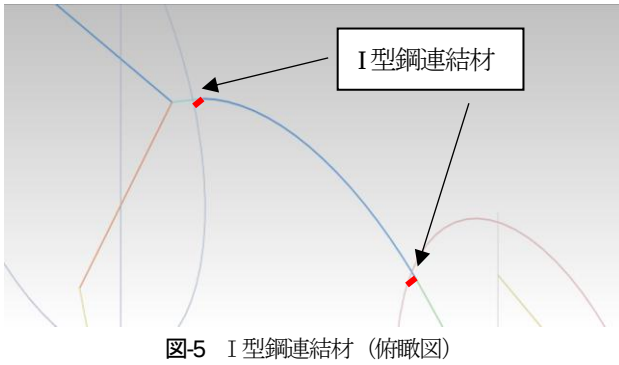
一昨年度より筆者らが3次元FEM解析によってセグメント、曲線パイプルーフおよび変形防止鋼材の施工時挙動を再現することを試みた結果、鋼管とセグメントリングの力の伝達と開口部の影響により、大半の解析値が実測値とほぼ一致したが、一部実測値と解析値が大きく異なる結果となった。そこで、解析による精度をより高めるために、鋼管とセグメントリングの力の伝達および開口部の影響に着目して解析条件の修正を行い解析値を実測値に近づけることを試みることにした。

(2) 解析モデル

図3は今回使用した3次元解析モデルを示したものである。解析領域は、トンネル掘削の影響を考慮し、水平方向は掘削幅の15倍の150m、ポンプ室の上方向はセグメント天端から30m、鉛直下方向は掘削幅の3倍とした。また、境界条件は下端でX、Y、Zの3方向で固定し、正面は直角方向で固定、側面は面の垂直方向で固定した。モデルを構成する要素数は約25万となった。図4に横断面を示す。

(3) 解析条件

地盤の物性値は、リバウンドを生じると考えられる上総層砂質土では、土質試験から求めた地盤の変形係数を3倍にした値を用いた。吹付コンクリート、ポンプ室躯体の物性値は一般的な値、セグメントの物性値は、設計に用いた物性値を使用する。また、セグメントスキンプレート厚さは、主桁の物性値に含まれているため実際の9mmではなく0.01mmとした。変形防止鋼材のH型鋼の値はH-250の公称値を使用した。斜材の物性値は、以前の解析結果から、連結部の軸剛性が過大であることから、軸圧縮力も過大になったため、剛性を1/100に低減した。また、コンクリート打設時の液圧を考慮し、3次元FEM解析では掘削開放率は100%で解析を行った。



STEP1:自重解析	STEP6:泥水圧の解放率50%	STEP11:上吹付け物性変更	STEP16:二次掘削解放力	STEP21:中床版物性変更	STEP26:下吹付けエンクリート打設	STEP31:中床版開口部物性変更
STEP2:シールド	STEP7:支保工設置	STEP12:上吹付けエンクリート打設	STEP17:上床版物性変更	STEP22:中床版打設	STEP27:4次エンクリート打設	STEP32:中床版開口部打設
STEP3:泥水圧解放率10%	STEP8:上半1次掘削	STEP13:上吹付けエンクリート変更	STEP18:上床版打設	STEP23:3次エンクリート打設	STEP28:3次エンクリート打設	STEP33:支保工撤去
STEP4:セグメント組立	STEP9:開口部掘削解放力	STEP14:1次エンクリート打設	STEP19:3次エンクリート打設	STEP24:下半1次掘削	STEP29:下床版物性変更	
STEP5:シールド掘削	STEP10:一次掘削解放力	STEP15:上半2次掘削	STEP20:上半3次掘削	STEP25:下吹付け物性変更	STEP30:下床版打設	

図-7 解析ステップ図

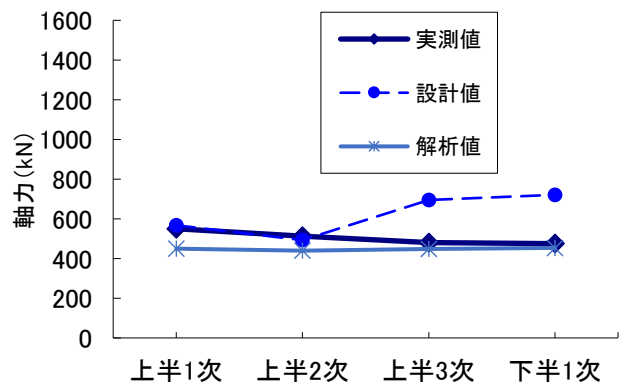


図-8 実測値と解析値の比較 (上側曲線パイプ)

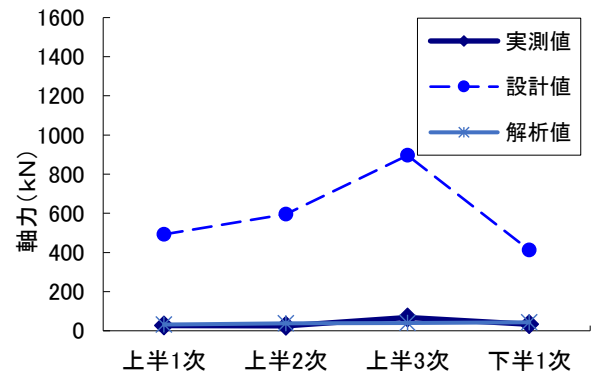


図-9 実測値と解析値の比較 (下側曲線パイプ)

a) 鋼管とセグメントリングの力の伝達の考慮

セグメントと曲線パイプの計測位置はトンネル奥行き方向に0.2mのずれが生じている。そこで、図5に示すようにセグメントと上鋼管パイプをI型鋼の連結材を用いて結び、梁要素の端部をそれぞれ固定した。

b) 開口部の影響の考慮

シールドトンネルに開口部を設ける際に、リング方向に発生する軸力を分担させるために実際に設置してあるI字型の開口部補強受梁桁部材を今回の解析では考慮して5リング分の長さの梁をモデルに加えた。図6に俯瞰図を示す。

(4) 解析ステップ

解析は実際の施工手順に合わせて、全33ステップで設定した。解析ステップを図7に示す。

4. 解析結果

(1) 解析結果の概要

3(1)で述べたとおり解析を行った。解析値には図7に示されている解析ステップのうち、STEP6のシールド泥水圧作用、STEP10の一次掘削解放力、STEP16の二次掘削解放力、STEP21の中床版物性変更、STEP25の下吹付け物性変更の断面力を抽出した。そのうち、STEP6で示された値を初期値として、それ以降のステップは初期値からの変化量を示し、それぞれの部材における解析値と実測値と比較した。軸力は圧縮力を正とする。

(2) 曲線パイプの解析結果

曲線パイプの軸力の解析結果を図8、図9に示す。

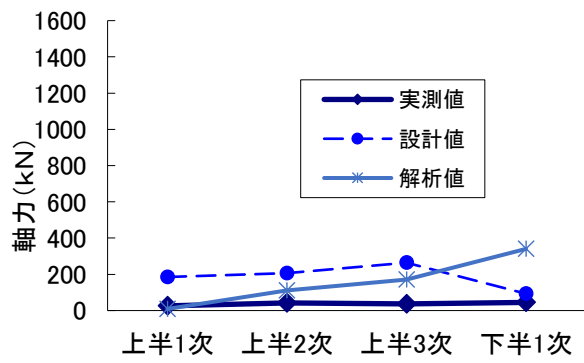


図-10 実測値と解析値の比較（外側鉛直材）

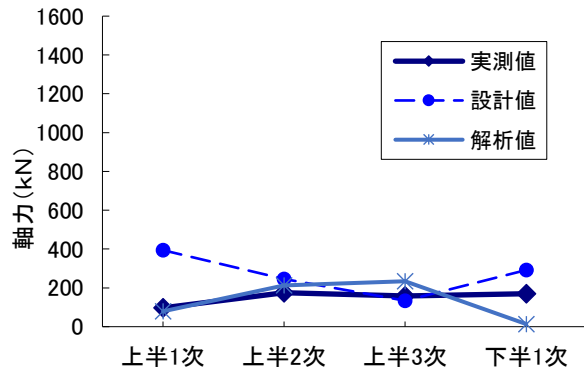


図-11 実測値と解析値の比較（内側鉛直材）

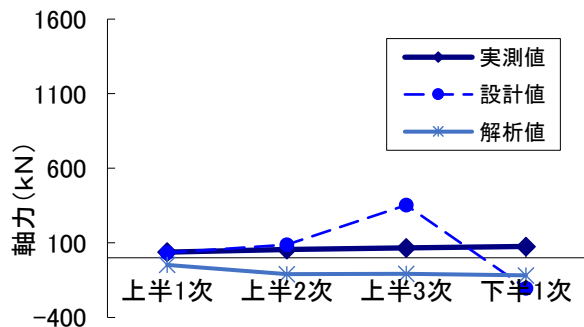


図-12 実測値と解析値の比較（水平材）

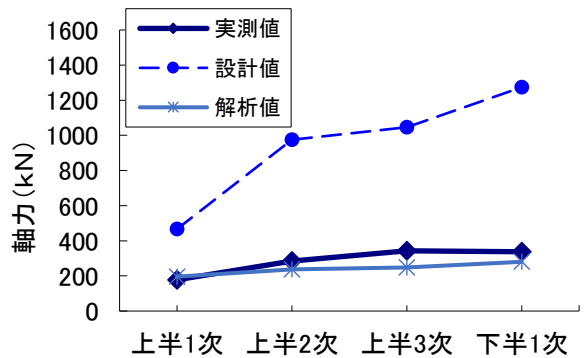


図-13 実測値と解析値の比較（斜材）

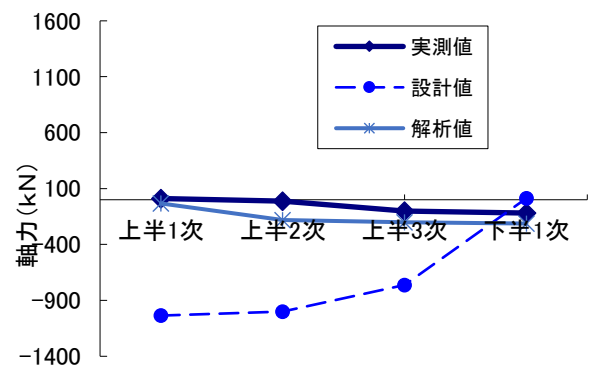


図-14 実測値と解析値の比較（セグメント 0°）

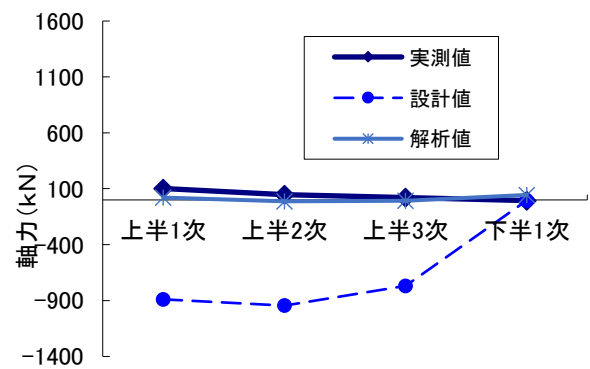


図-15 実測値と解析値の比較（セグメント 45°）

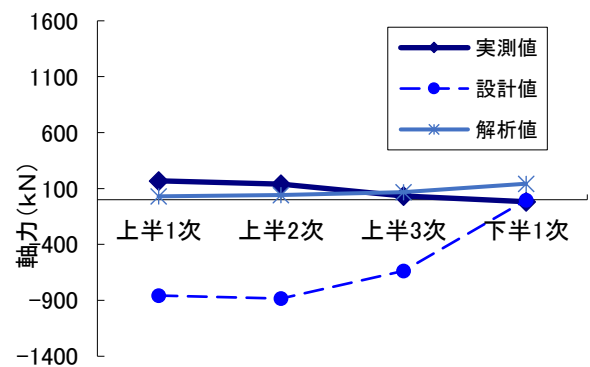


図-16 実測値と解析値の比較（セグメント 90°）

(3) 変形防止鋼材の解析結果

変形防止鋼材の軸力の解析結果を図 10～図 13 に示す。

(4) セグメントの解析結果

セグメントの軸力の解析結果を図 14～図 21 に示す。

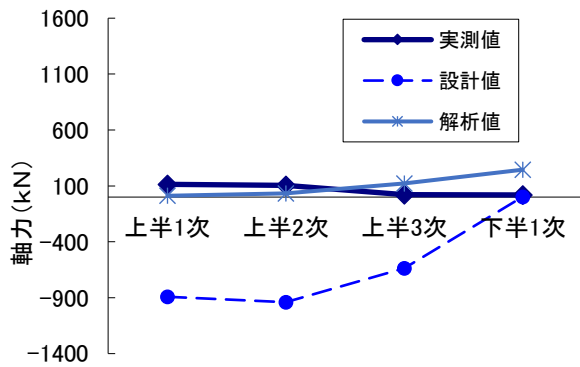


図-17 実測値と解析値の比較（セグメント 135°）

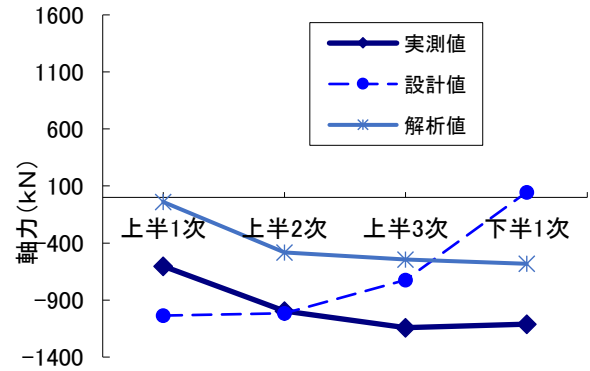


図-21 実測値と解析値の比較（セグメント 315°）

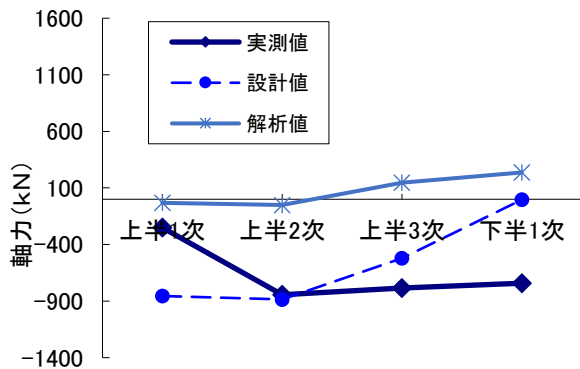


図-18 実測値と解析値の比較（セグメント 180°）

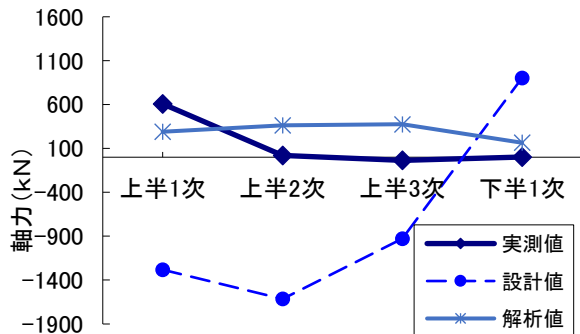


図-19 実測値と解析値の比較（セグメント 240°）

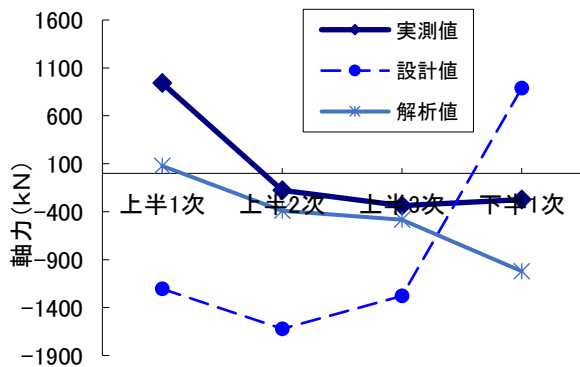


図-20 実測値と解析値の比較（セグメント 270°）

5. まとめ

4章で曲線パイプルーフ，変形防止鋼材，セグメントそれぞれの軸力の結果を示した。

(1) 曲線パイプルーフに対するまとめ

図8に示したように上側曲線パイプルーフの軸力は，どの施工段階においても実測値と解析値がほぼ一致した。このことから，連結材は正しく表現されていたと言える。また，図9より，下側曲線パイプルーフの軸力も実測値と解析値はほぼ一致した。

(2) 変形防止鋼材に対するまとめ

まず初めに，図10と図11で示した外側鉛直材と内側鉛直材について述べる。外側鉛直材は上半掘削後においては実測値と解析値が一致している。しかし，下半掘削後において，実測値よりも8倍程度大きな軸圧縮力が発生していた。内側鉛直材も上半掘削後では，両者の値はほぼ一致したが，下半掘削後に解析上で僅かな軸圧縮力しか発生しておらず，差が生じてしまった。

次に，図12と図13で示した水平材および斜材について述べる。水平材は実測値と解析値が概ね一致した。しかし，実測値は小さな圧縮力が生じていたが，解析値では小さな引張力が生じていた。斜材は全ての施工段階において，実測値と解析値がほぼ一致した。斜材に過大な圧縮力が発生することを想定し，斜材の剛性を1/100に低減させたことでこのような結果が得られたと推測される。

(3) セグメントに対するまとめ

図14～図17で示したセグメントの地山側の0°～135°の軸力は実測値も解析値も非常に小さな値ではあったが，どの施工段階においても値がそれぞれほぼ一致した。

次に、図 18～図 21 で示したセグメントの 180°～315°について述べる。180°の軸力は上半 1 次掘削後での解析値が実測値と概ね一致した。しかし、上半 2 次掘削以降、過大な軸引張力を解析上で表現することができなかった。240°の上半 1 次掘削後の軸力の解析値は比較的良好だが、まだまだ実測値との差が見られた。270°の上半 1 次掘削後の軸力の解析値は、微小な軸力しか出力されなかった。240°と 270°の上半 1 次掘削後の軸力の実測値はどちらも大きな圧縮力を示しており、上半 2 次掘削以降初期値との値の差が生じていなかった。240°～315°の解析値はこれまでと比較すると改善の傾向にあるが、開口部周辺の細かい構造を詳細に表現することができなかった点は課題となった。315°の軸力は、実測値では大きな引張力が生じており、解析上でこれらの値を再現することができなかった。

6. おわりに

本報告では、斜材の軸剛性低下とコンクリート打設圧の考慮、開口補強材の考慮によって、3 次元 FEM 解析の精度を向上させることができた。しかし、セグメントの中間ポンプ室側（180°～315°）の軸力の解析値と実測値では依然として乖離が散見された。

実際の構造設計で使用されるのは 2 次元 FEM 解析モデルである。そこで、本検討で得られた 3 次元 FEM 解析モデルでの知見を 2 次元 FEM 解析モデルに反映

させ解析値を実測値に近づけて設計精度の向上を図る。なお、中間ポンプ室側セグメントの設計照査は、2 次元 FEM 解析結果をはりばねモデルに作用させて検討するので、その解析方法の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー28 シールドトンネルにおける切り上げ技術
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法編（2006 年制定），2006.7
- 3) 荻野竹敏，松村泰，本村高志，梶山雅生：地下鉄 13 号線（副都心線）中間ポンプ室（その 2）（Pss-Arch 工法の計測結果のまとめ），第 62 回年次学術講演会公演概要集，6-102，2007
- 4) 辻正之，松村泰，梶山雅生，岩崎肇，岩波基：都市部における非開削地下空間施工法の仮設設計に関する一考察，トンネル工学論文集，第 17 巻，pp93-103，2007
- 5) 千代啓三，辻正之，松村泰，梶山雅生，岩波基：都市部での非開削切り上げ施工の計測結果と解析に関する一考察，トンネル工学論文集，第 18 巻，pp89-110，2008. 11
- 6) 岩波基，西村高明，大石敬司，梶山雅生：都市部での非開削切り上げ施工時の挙動に関する研究，トンネル工学論文集，第 19 巻，pp87-98，2009. 11

(2021. 8. 6 受付)

IN THE DESIGN METHOD OF NON-OPEN-CUT AND ENLARGE METHOD RESEARCH ON A SUITABLE FEM ANALYSIS MODEL

Takuya HIEDA, Motoi IWANAMI and Tetuji YAMAGUCHI

In order to construct a new underground space, the method of opening the lining of the existing shield tunnel and widening the outside of the tunnel is called the non-open-cut and enlarge0 method. In the future, this method will increase the added value of underground structures such as renewal of underground structures that deteriorate over time and construction of bypasses, and widen the underground space in urban areas where it is difficult to perform excavation work from above ground. It is expected at the time. However, since it is a developing technology for less than 50 years, a clear design method and construction method have not been established even though it is expected to be used in the future. Therefore, in the main text, the behavior that occurs in the shield segment and the temporary steel material when this method is performed will be clarified by 3D FEM analysis.