

非開削切り拡げ工法の設計における 構造解析手法に関する一考察

稗田 拓也¹・山口 哲司²・岩波 基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 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

³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

非開削切り拡げ工法は、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、現在まで合理的な設計方法に関する研究はされてきておらず、本工法の設計手法としてまとめられたものは無い。そのため、山岳工法に則り2次元FEM解析を用いて先行と補強の支保工の仕様を定めるように設計が行われているのが現状である。この設計方法は学術的な背景に基づいた合理的で経済的なものとは言えない。本研究の研究対象である工事においても、支保工材やセグメントに発生する断面力の設計値と実測値に大きな差が生じていた。そこで本報告では、実設計で用いられる2次元FEM解析では明らかでなかった開口部をはじめとするセグメントの複雑で細かい構造をセグメント間、リング間継手を検討できる「はりばねモデル」を用いて解明することで解析精度の向上を試みた。

Key Words: shield tunnel, design, FEM, non-cutting and expanding method, beam spring model

1. はじめに

非開削切り拡げ工法¹⁾は既設のシールドトンネルからトンネル外部に出て、非開削で拡幅する、切り拡げることで新たな地下空間を構築できる技術である。そのため、路上の交通量が多く、地下部に多数の大型埋設物がすでに存在する都市部の地下空間の拡幅を行う際に、本工法は期待されている。しかし、本工法は50年たらずの発展途上の技術であり、施工技術の開発が先行し、設計方法は学術的に十分な検討に基づき確立されておらず、検証が不十分なまま多くの工事で採用されているのが現状である。本研究で対象とする東京メトロ13号線雑司ヶ谷駅～西早稲田駅間の中間ポンプ室構築工事²⁾でも設計値と実測値の間に大きな差が生じたため、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考えられる。筆者らは、まず、3次元FEM解析でセグメントと仮設支保工に生じる断面力を再現した。その結果、一次掘削の解放力が3次元効果から40%にすること、ポンプ室コンクリートの打設時に作用プルーフの軸剛性を軽減することで解析値が計測値にほぼ一致することが

判明した³⁾。その知見を考慮した2次元FEM解析を行った結果、曲線パイプルーフの発生断面力は計測値に一致したが、セグメントリングの断面力は解析値と計測値に大きな差が生じた⁴⁾。そこで、セグメントリング間に生じる力の伝達や開口部といった複雑な構造、セグメント力学伝達を表現できる「はりばねモデル」で、セグメントの力の分担の実挙動を再現することを目指す。

2. 検討対象

(1) 工事概要

対象工事のシールドトンネルは、東京メトロ13号線雑司ヶ谷駅～西早稲田間であり、単線シールドトンネル間に中間ポンプ室⁵⁾を非開削切り拡げ工法を採用し、施工したものである。東京メトロ13号線の池袋駅～渋谷駅間8.9kmのうち雑司ヶ谷駅～西早稲田駅間のトンネルは、直上を明治通りが走っており交通量が多く、路下には電気、通信、水道などのインフラ埋設物が多数存在するため深い位置を通る必要があり、土被りが大きい。さらに、神田川が流れているためトンネル縦断線形は図-1

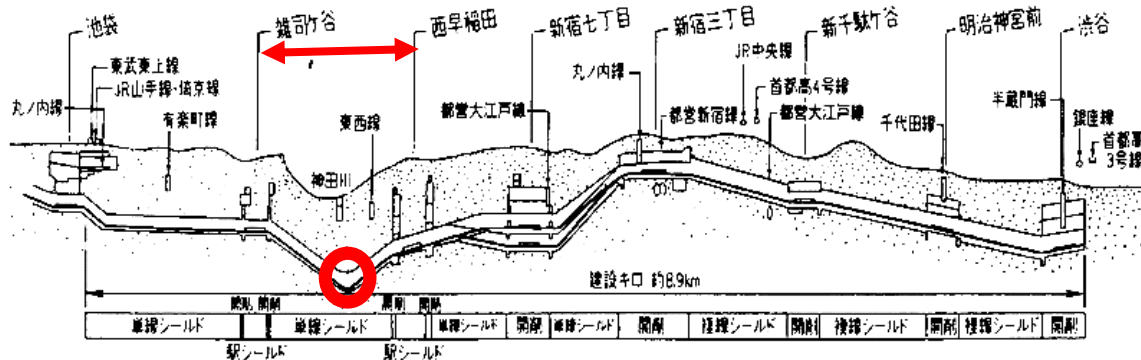


図-1 東京メトロ13号線トンネル縦断面図

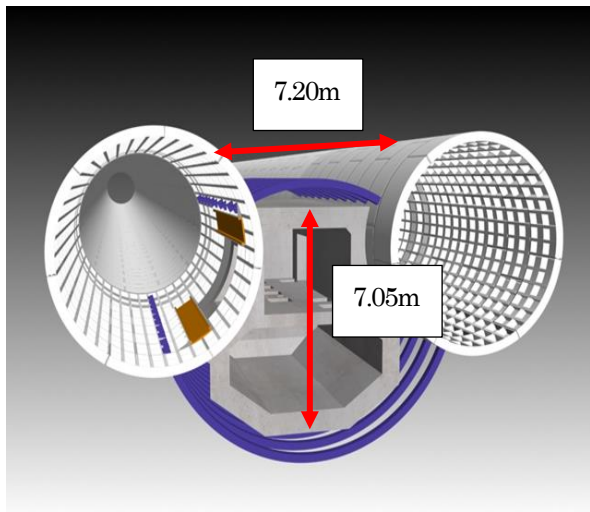


図-2 中間ポンプ室の構造概要

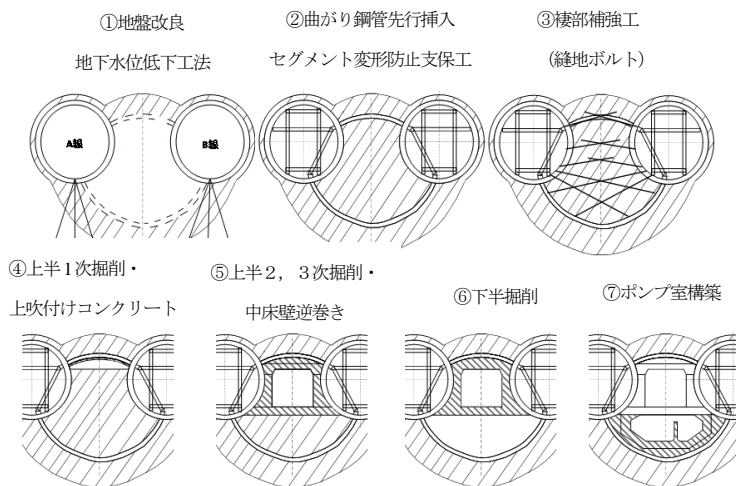


図-3 中間ポンプ室の施工手順

に示すようにV字型の線形となり、トンネル中間地点付近が13号線最深部となることから中間ポンプ室が設置された。図-1の赤丸印に示す。

(2) 構造概要

対象工事で構築する中間ポンプ室は、躯体幅 7.20m、全高さ 7.05m、奥行き 9.4mの2層構造である。

その上部はトンネル開口部と繋がっている内空高さ 2.6mの機械室で、下部は内空高さ 2.7mの排水ピットの層からなる。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3分割の逆巻き施工が採用されている。この施工手順を図-3の①～⑦に示す。

(4) 施工条件

トンネル・中間ポンプ室掘削箇所は、上総層群の砂土層 (Kasl) と粘性土層 (Kacl) から構成されている。ポンプ室の上半は、上総層粘性土層 (Kacl)、ポンプ室の下半は上総層砂質土 (Kasl) である。また、土被りは約 30.7m である。

3. 計測工

(1) 計測項目

掘削時のトンネル構造物・仮設部材への影響を確認するためにセグメント、曲線パイプルーフと変形防止鋼材のひずみをひずみゲージを用いて計測した。計測位置、計測項目は図-4と表-1に示す通りである。計測したひずみ値の初期値は、セグメント開口部の撤去を行う直前の値とした。

4. 解析概要

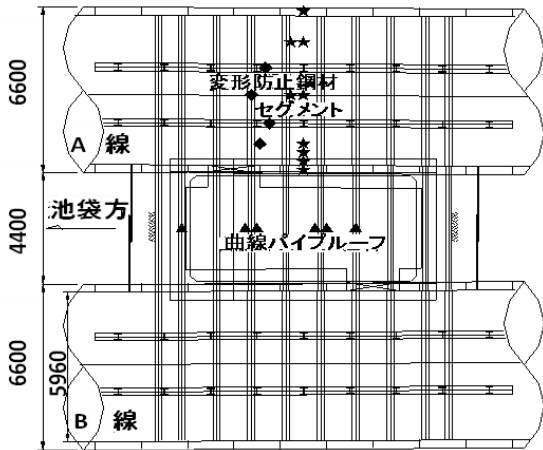
表-1 計測項目

	計測項目	断面	箇所
セグメント	曲げモーメント 軸力	1	8
曲線パイプルーフ	曲げモーメント 軸力	4	2
変形防止鋼材	軸力	1	4

表-2 回転ばね定数

	セグメント継手正曲げ		セグメント継手負曲げ	
	ばね定数 kN・m/rad	離間モーメン トkN・m	ばね定数 kN・m/rad	離間モーメン トkN・m
離間前	5.02E+03	5.00E-01	5.59E+03	無限大
離間後	5.02E+02	無限大	5.59E+02	無限大
2次塑性	無限大	×	無限大	×

平面図



断面図

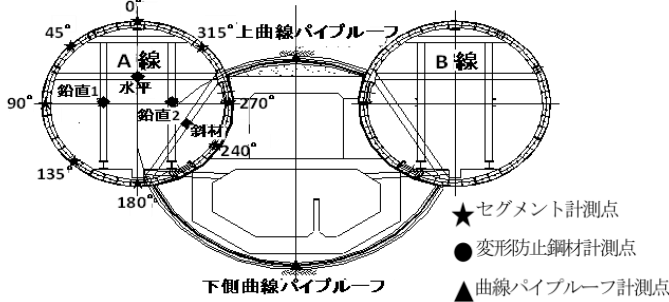


図-4 計測位置図

表-3 せん断ばね定数

	リング継手トンネル半径方向		リング継手トンネル周方向	
	ばね定数 kN/m	降伏力 kN	ばね定数 kN/m	降伏力 kN
弾性	4.20E+04	無限大	3.96E+05	無限大
1次塑性	4.20E+04	無限大	3.96E+05	無限大
2次塑性	4.20E+04	×	3.96E+05	×

表-4 セグメントの物性値

ヤング率(kN/m ²)	2.10E+08
断面2次モーメント(m ⁴)	1.14E-03
セグメント幅(m)	1.6
断面積(m ²)	0.025326
単位長重量(kN/m)	12.58081
層厚(m)	0.32

(1) 解析方針

はりばねモデルには moleman を、2次元 FEM 解析コードには Soil plus を使用する。本報告では、2次元 FEM 解析で有効であった⁴⁾ 中間ポンプ室施工の際のコンクリート打設圧を外荷重として設定し、開口部端部に 2次元 FEM 解析での軸力を抽出し、外荷重として入力した。また、地盤のばねについて FEM 解析で考慮した弾性係数に対して、moleman では MuirWood のばね値を設定した。そうすることで、セグメント開口部周辺の応力の分担を明らかにし、セグメントの実挙動を 2次元 FEM 解析でより高い精度で再現することを試みる。

(2) 解析条件

表-2に解析で設定したセグメント継手に関する回転ばね定数、表-3にリング継手に関するせん断ばね定数を示す。そして、セグメントの物性値を表-4に示す。計測値

は、トンネル設置時以降の変動に関するものである。したがって、荷重は 2次元 FEM 解析結果によるセグメント開口部における軸力とポンプ室コンクリート構造物を施工する際に生じるフレッシュコンクリートの側圧を考慮した。その側圧として構造条件、コンクリート条件および施工条件に応じたコンクリート打設圧を作用させた。その値の計算式を式(1)に示す。コンクリート打設圧の適用が有効であることを数値的根拠は論文の「非開削切り掘り工法の設計方法における構造設計用2次元FEM解析モデルの確立に向けた研究」⁶⁾を参考とした。また、鉄道トンネルでは、ばね値は MuirWood, A.M.の理論解を設定するため、本研究対象においても、地盤ばねのばね値として MuirWood, A.M.の理論解をばね値として設定した⁷⁾。その値の計算式を式(2)に示す。

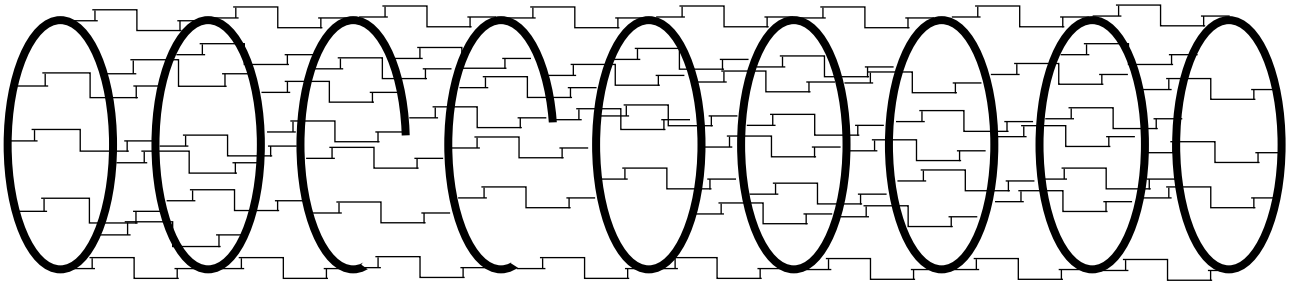


図-5 セン断ばねを考慮したセグメントリング

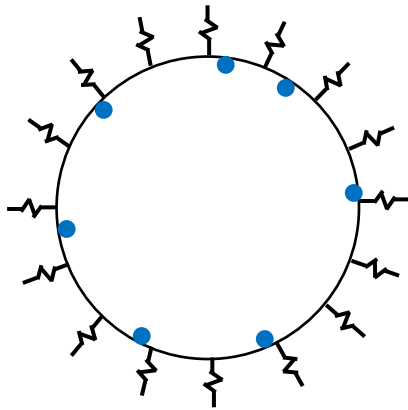


図-6 はりばねモデル図

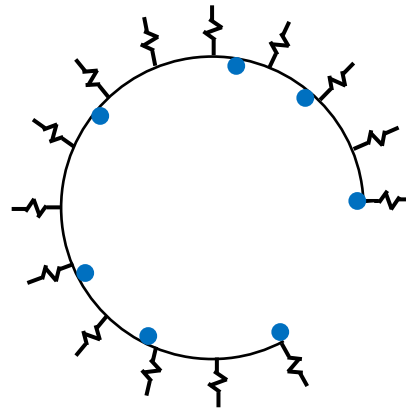


図-7 開口部はりばねモデル図

$$\gamma_c = W_c \times h \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

γ_c : 側圧 (kN/m²)

W_c : コンクリートの単位重量 (kN/m³)

h : 掘削高さ (m)

$$K_r = 3E_0 / (1 + \nu)(5 - 6\nu)R_c \quad (2)$$

K_r : 半径方向の地盤反力係数 (kN/m³)

E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)

ν : 地盤のポアソン比 (0.35 とする)

R_c : セグメント図心線の半径 (m)

(3) 解析モデル

図-5 に解析対象の中間ポンプ室のセグメント9リング配置形状と、リング継手にせん断ばねを考慮した簡易的な図を示した。また、図-6、図-7 にはりばねモデルの簡易的な構造モデルを示した。外荷重が作用しない開口部には、地盤ばねは考慮しない。青い丸はセグメント継手部分である。拘束条件は、地盤ばねでシールドトンネルの全周を拘束した。

(4) 解析ステップ

2次元FEM解析では、実際の施工ステップに合わせて解析ステップを設定し、計 28 ステップとなった。中でも、上半の1次掘削後・2次掘削後・3次掘削後、下半の

1次掘削後の4ステップにおいてははりばねモデルとともに結果を比較する。

5. 解析結果

(1) 解析結果の概要

先述した解析条件の下で解析を行った。施工時計測データの値を実測値、2次元 FEM 解析モデルの解析値を FEM、はりばねモデルでの解析値をモールマンとして、結果を示す。支保工材を設置するステップでの値を初期値とし、先述した4ステップは初期値からの変化量を解析値として示す。軸力は圧縮力を正としている。

(2) 解析結果

セグメントのリング方向軸力の解析結果を図-8から図-15に示す。図-8から図-11に示す地山側のセグメント(0°~135°)において、0°を除き FEM 解析と比較し、解析精度は向上した。また、本報告で着目している図-12から図-15に示す開口部周辺のセグメント(180°~315°)では 315°を除き、はりばねモデルでの解析値がより実測値に近づいた。また、240°、270°では挙動傾向が近づいた。セグメント 180°、315°に示すセグメント開口部端部付近において、実測値における軸引張力を解析上で表現することができなかった。

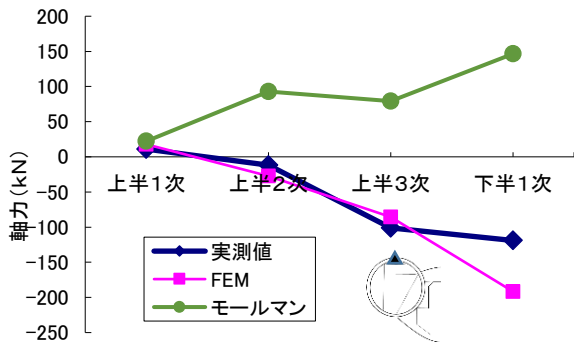


図-8 セグメント(0°)

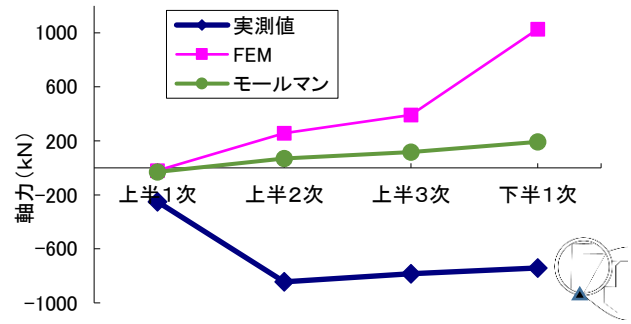


図-12 セグメント(180°)

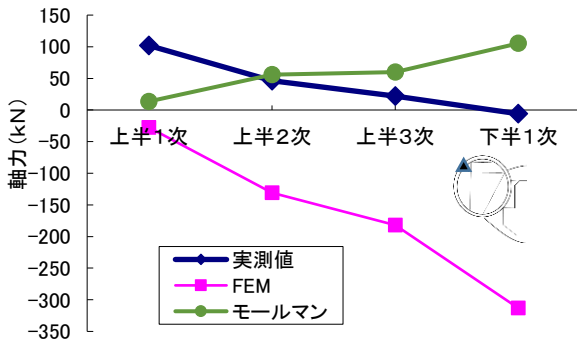


図-9 セグメント(45°)

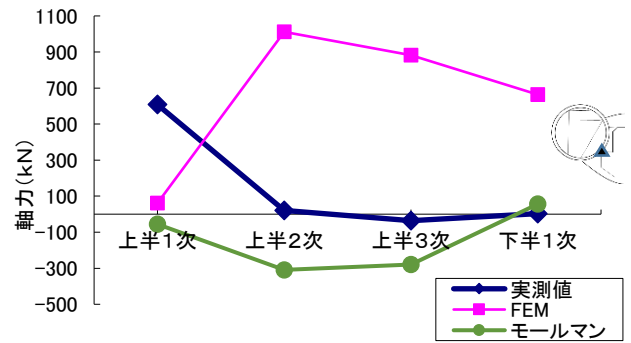


図-13 セグメント(240°)

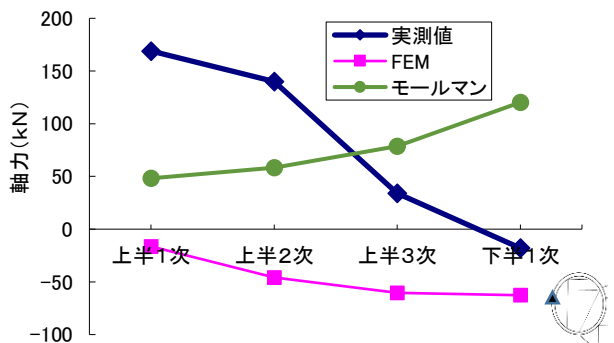


図-10 セグメント(90°)

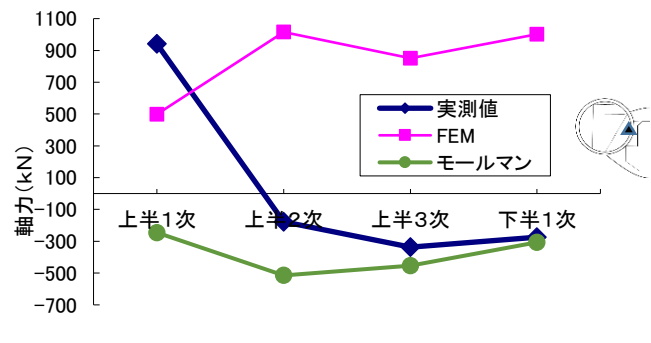


図-14 セグメント(270°)

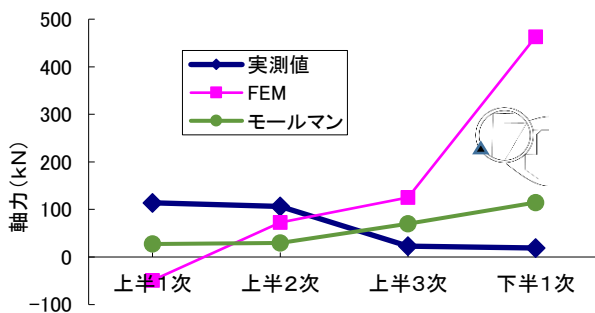


図-11 セグメント(135°)

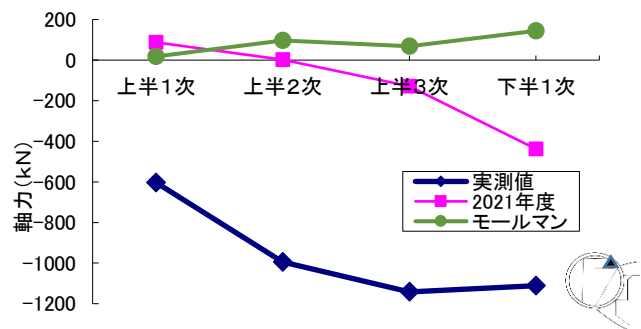


図-15 セグメント(315°)

6. おわりに

4章で示した解析条件で解析を行うことで、開口部周辺のセグメント(180° ~ 315°)では315°を除き、はりばねモデルでの解析値が実測値に近づいた。また、240°、

270°では挙動傾向が近づいた。しかし、依然として開口部付近の複雑な構造を把握できるとは言い難い。その原因として、今回は2次元FEM解析で算定されたセグメント軸力のみを考慮したが、その他のセグメントの挙動に影響する内部支保工材の断面力を外荷重として考慮すると共に、セグメント周辺地盤の応力変動を考慮することが必要であると考えている。今後は、以上の知見を生かして、より詳細に検討しセグメントの解析精度を向上させ、応力分担を明らかにしていく。その結果を基に構造設計で用いられる適切な2次元FEM解析モデルの構築を試みる。

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) 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
- 3) 二宮優太：非開削切り上げ工法の設計構造解析における適正な3次元FEM解析モデルに関する研究, 早稲田大学大学院修士論文, 2021
- 4) 稗田拓也, 岩波基, 山口哲司：非開削切り上げ工法の設計方法における構造設計用2次元FEM解析モデルの構築に関する一考察, 第77回年次学術講演会, 2022
- 5) 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
- 6) 森田遼太郎：非開削切り上げ工法の設計方法における構造設計用2次元FEM解析モデルの確立に向けた研究, 早稲田大学大学院修士論文, 2022
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル, 2002.12

(2022. 8. 26 受付)

A STUDY ON STRUCTURAL ANALYSIS METHODS FOR THE DESIGN OF NON-CUTTING AND EXPANDING METHOD

Takuya Hieda, Tetuji YAMAGUCHI and Motoi IWANAMI

The non-cutting and expanding method is expected to add value to underground structures in the future, such as for renewal of aging or deteriorating underground structures and construction of bypasses, and for widening underground spaces in urban areas where it is difficult to excavate from the surface. However, no rational design method has been studied to date, and no design method has been compiled for this method. Therefore, the current design method is based on the mountain construction method, using 2D FEM analysis to determine the specifications of the preceding and reinforcing supports. This design method is not rational and economical based on an academic background. In the construction project that is the subject of this study, there was a large difference between the design value of the cross-sectional force generated in the support members and segments and the actual measured value. In this report, we attempted to improve the accuracy of the analysis by using the "beam spring model" to clarify the complex and detailed structure of segments, including openings, which was not clear in the two-dimensional FEM analysis used in actual design. As a result, the stress distribution around the segment aperture was clarified.