

# 非開削切り掘り工法の設計方法における FEM 解析モデルの精度向上に関する研究

森田 遼太郎<sup>1</sup>・山口 哲司<sup>2</sup>・岩波 基<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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: hydrangea1017@asagi.waseda.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

現在に至るまで非開削切り掘り工法の合理的な設計方法に焦点を当てた研究はされておらず，非開削切り掘り工法の設計手法としてまとめられたものは無いのが現状である．現行の考え方として，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．しかし，これら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．実際に，本研究の研究対象である東京メトロ 13 号線における雑司ヶ谷駅～西早稲田駅間の中間ポンプ室を非開削で切り掘った空間に構築した工事では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る．そこで，2 次元 FEM 解析が設計条件を検討してトンネル構造物と補強仮設材の解析断面力を計測断面力に近づけることで，構造物への作用土圧および，セグメントと支保工部材の力の分担の実挙動を再現精度向上を行った．その結果，支保工の挙動をほぼ再現できたことを報告するものである．

**Key Word:** shield tunnel, design

## 1. はじめに

非開削切り掘り工法<sup>1)</sup>は既存の地下インフラから新たな地下空間を構築することのできる技術である．それゆえ，地上部の交通量が激しく，地下部には大型埋設物がすでに存在する都市部の地下空間の拡張において，本工法の使用が期待されている．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，その設計方法の検証が不十分なまま多くのプロジェクトで採用されているのが実状である．本研究で対象とする東京メトロ 13 号線の雑司ヶ谷駅～西早稲田駅間における中間ポンプ室構築工事<sup>2)</sup>でも支保工やセグメントなどの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．そこで，本報告では，設計に用いた 2 次元 FEM 解析の設計条件を検討してトンネル構造物と補強仮設材の 2 次元 FEM 解析モデルの解析による断面力の値を計測の断面力の値に近づけることで，構造物への作用土圧および，セグメントと支保工部材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

当該工事のシールドトンネルは，東京メトロ 13 号線（地下鉄副都心線）における雑司ヶ谷駅～西早稲田間であり，単線シールドトンネル間に曲線パイプルーフを用いた中間ポンプ室<sup>3)</sup>を非開削切り掘り工法により施工したものである．東京メトロ副都心線の池袋駅～渋谷駅間 8.9km のうち雑司ヶ谷駅と西早稲田駅間のトンネルは，都道明治通りの路下にある東電とう道，NTTとう道などの大型埋設物を避けるために土盛りが大きい．さらに，神田川を通過するためにトンネル縦断線形は図-1に示すように V 字型となり，トンネル中間地点付近が最深部となることから中間ポンプ室が設置されている．

### (2) 構造概要

当該工事で構築する中間ポンプ室は，躯体幅 7.2m，全高さ 7.05m，軸方向の延長 9.4m の 2 層構造である．そ

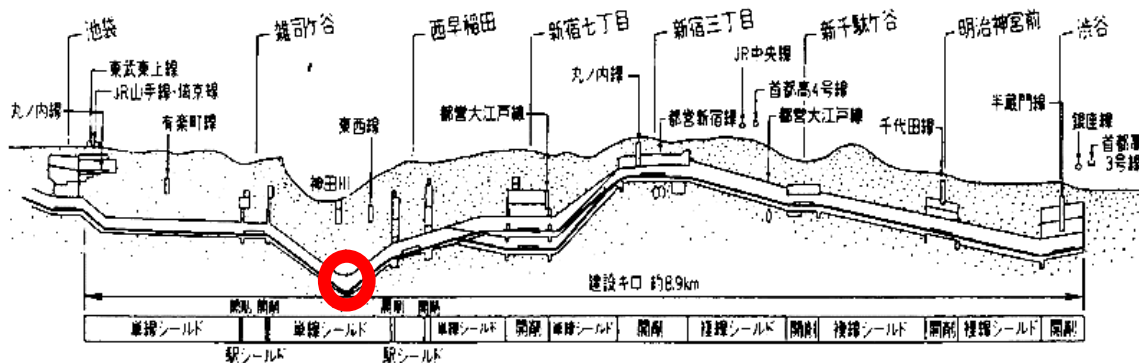


図-1 東京メトロ副都心線トンネル平面縦断面図

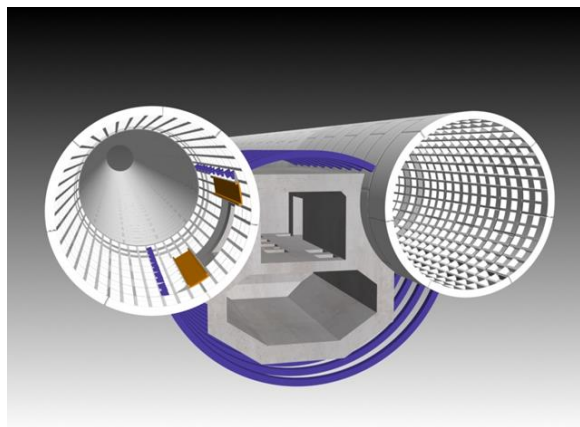


図-2 ポンプ室の構造概要

表-1 計測項目

|          | 測定項目    | 断面 | 箇所          |
|----------|---------|----|-------------|
| セグメント    | 曲げモーメント | 1  | 9           |
|          | 軸力      |    |             |
| 曲線パイプルーフ | 曲げモーメント | 3  | 1箇所<br>(中央) |
|          | 軸力      |    |             |
| 変形防止鋼材   | 軸力      | 1  | 4           |

の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 4 分割の坂巻き施工が採用されている。この施工の順序を図-3 に示す。

### (4) 施工条件

トンネルの掘削箇所は、第 4 紀更新世洪積層上総層群の砂質土層 (KasI) と粘性土層 (KacI) から構成されている。ポンプ室の上半は、上総層粘性土層 (KacI)、ポンプ室の下半は上総層砂質土 (KasI) が存在する。土被

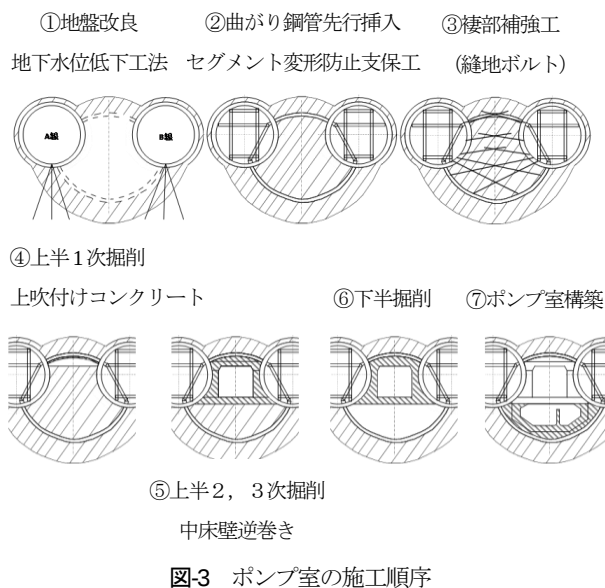


図-3 ポンプ室の施工順序

りは約 30.7m、地下水位はディープウェルにより掘削底盤以下である。

## 3. 計測工

### (1) 計測項目

掘削時の構造物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計測した。計測位置、測点数は図-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

### (1) 解析方針

2 次元 FEM 解析コードには Soil plus を使用する。本報告では、ポンプ室の施工の際のコンクリート打設圧や掘削時の 3 次元効果を考慮した掘削解放率の設定を新たに

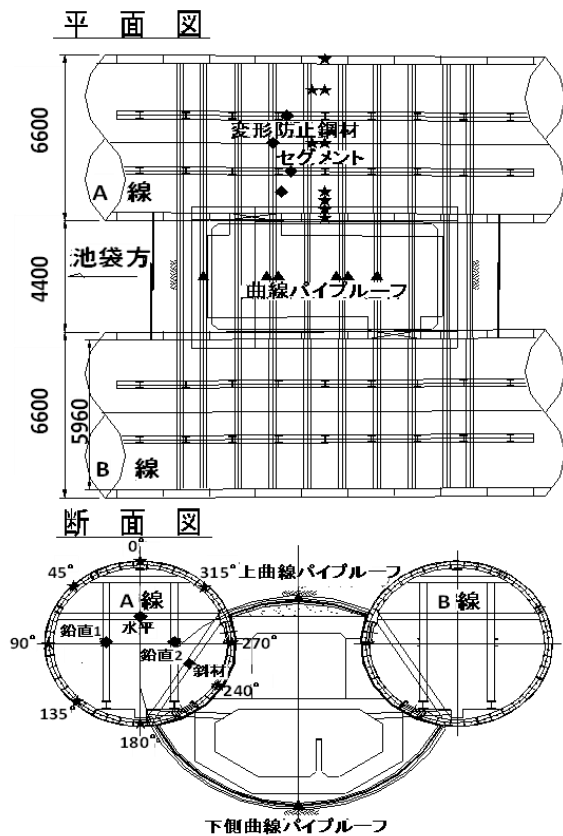


図-4 計測位置図

行うことでセグメント，曲線パイプルーフおよび変形防止鋼材における計測結果を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に解析で設定した地盤の物性値を示す．一般的にリバウンドが生じる地盤では変形係数を2倍から3倍に大きくすると解析値が実測値に一致することが経験的に知られている．そのため掘削以深の地盤である下総層砂質土（Kas1）の変形係数を3倍の値とした．

吹付けコンクリート，ポンプ室躯体，中床板開口部のポンプ室躯体の構築コンクリートの物性値は公称値を使用し，その値を表-3に示す．そして，セグメントとH型钢は設計に使用した値を1mあたりに換算して使用し，それぞれ表-4，表-5に示す．

また，コンクリート構造物を施工する際には一般にフレッシュコンクリートの側圧を考慮して設計しなければならないが，この側圧が一般的に解析上，反映されていないことに着目した．そのため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．また，3次元効果を考慮するために上半一次掘削において掘削解放率<sup>4)</sup>を適用し，上吹付けコンクリート打設の前後で掘削を40%と60%に分担した．3次元効果を考慮

表-2 地盤の物性値

|       | 単位体積重量<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 変形係数<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比 | 粘着力<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 内部摩擦角<br>(°) |
|-------|--------------------------------|------------------------------|-------|-----------------------------|--------------|
| 上総層粘土 | 17                             | 54400                        | 0.35  | 260                         | 0            |
| 下総層砂土 | 18                             | 225900                       | 0.35  | 0                           | 42           |

表-3 部材の物性値

|                                   | 変形係数 (kN/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比ν |
|-----------------------------------|---------------------------|--------|
| 吹付コンクリート                          | $3.4 \times 10^6$         | 0.2    |
| ポンプ室躯体                            | $2.5 \times 10^7$         | 0.2    |
| ポンプ室躯体<br>(中床板開口部)<br>開口比：8.0/9.4 | $3.72 \times 10^6$        | 0.2    |

表-4 セグメントの物性値 (1mあたり)

|                             | 1mあたり                 |
|-----------------------------|-----------------------|
| 変形係数 (kN/m <sup>2</sup> )   | $2.1 \times 10^8$     |
| ポアソン比                       | 0.3                   |
| 断面積 (m <sup>2</sup> )       | $1.58 \times 10^{-2}$ |
| 断面係数 (外) (m <sup>3</sup> )  | $1.24 \times 10^{-4}$ |
| 断面係数 (内) (m <sup>3</sup> )  | $7.13 \times 10^{-4}$ |
| 断面二次モーメント (m <sup>4</sup> ) | $1.29 \times 10^{-3}$ |

表-5 H型钢の物性値 (1mあたり)

|                             | 1mあたり                 |
|-----------------------------|-----------------------|
| 変形係数 (kN/m <sup>2</sup> )   | $2.1 \times 10^8$     |
| ポアソン比                       | 0.3                   |
| 断面積 (m <sup>2</sup> )       | $7.62 \times 10^{-3}$ |
| 断面係数 (外) (m <sup>3</sup> )  | $8.92 \times 10^{-5}$ |
| 断面二次モーメント (m <sup>4</sup> ) | $7.17 \times 10^{-4}$ |

するために掘削解放率の適用が有効であることと数値的根拠は論文の「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」を参考とした．

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

$\gamma_c$ ：側圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$W_c$ ：コンクリートの単位重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$h$ ：掘削高さ (m)

## (3) 解析モデル

図-5にモデル内のセグメントリング，支保工材，ポンプ室躯体のA線側のみを示した．また，解析では全土被りを考慮し水平方向に掘削幅の約4倍，下方向にトンネル径の2倍を解析領域として，境界条件は左右端がX方向で固定，Y方向で自由として，下端がX，Y方向で固

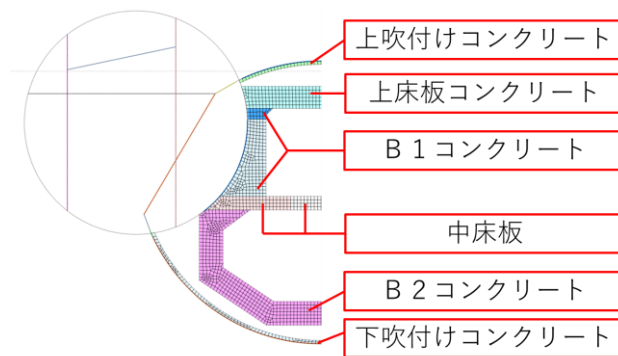


図-5 解析モデル図 (ポンプ室)

|                 |                             |                          |                         |                           |                     |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| STEP1:自重解析      | STEP6:変形防止鋼材、<br>曲線パイプルーフ設置 | STEP11:上半1次掘削<br>解放率60%  | STEP16:上半3次掘削           | STEP21:下吹付けコン<br>クリート物性変更 | STEP26:中床板開口部<br>打設 |
| STEP2:シールド掘削A   | STEP7:上半1次掘削<br>解放率40%      | STEP12:上半2次掘削            | STEP17:B1コンクリート<br>物性変更 | STEP22:下吹付けコン<br>クリート打設   | STEP27:支保工撤去A       |
| STEP3:シールド掘削B   | STEP8:上吹付け物性変更              | STEP13:上床板コンクリート<br>物性変更 | STEP18:B1コンクリート<br>打設   | STEP23:B2コンクリート<br>物性変更   | STEP28:支保工撤去B       |
| STEP4:泥水圧       | STEP9:上吹付け<br>コンクリート打設      | STEP14:上床板コンクリート<br>打設   | STEP19:B1コンクリート<br>打設圧  | STEP24:B2コンクリート<br>打設     |                     |
| STEP5:セグメント組み立て | STEP10:上吹付け<br>コンクリート打設圧    | STEP15:上床板コンクリート<br>打設圧  | STEP20:下半掘削             | STEP25:中床板開口部<br>物性変更     |                     |

図-6 解析ステップ図

定とした。地山、ポンプ室躯体、吹付けコンクリートは平面ひずみ要素で評価し、セグメントと曲線パイプルーフと変形防止鋼材を梁要素でモデル化した。

#### (4) 解析ステップ

図-6に解析ステップを示す。実際の施工ステップに合わせて解析ステップに合わせて設定した結果、計 28 ス

テップとなった。上半の1次掘削では掘削解放力における3次元効果を考慮して60%低減させた解放力を作用させた。また、ポンプ室の打設によるコンクリート圧を荷重として打設後に作用させた。

表-6 解析ケース

| 解析ケース | 掘削解放率 | 打設圧 |
|-------|-------|-----|
| case1 | ○     | ×   |
| case2 | ×     | ○   |
| case3 | ○     | ○   |

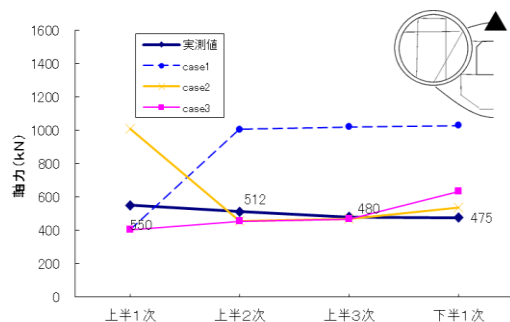


図-7 上側曲線パイプルーフ

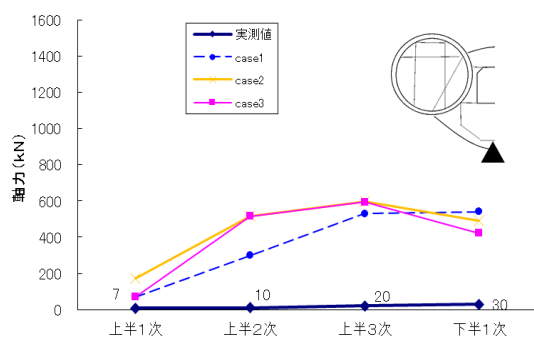


図-8 下側曲線パイプルーフ

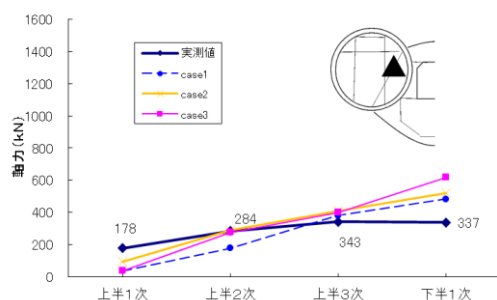


図-9 斜材

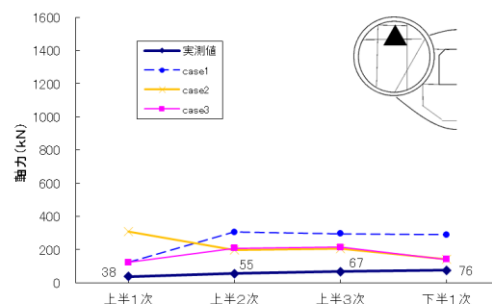


図-10 水平材

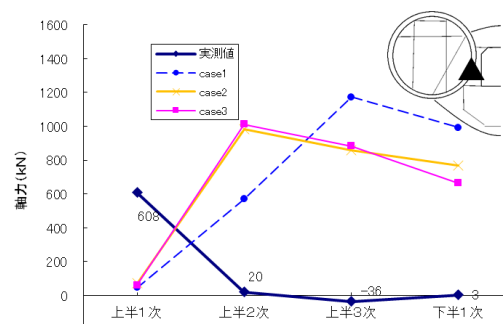


図-11 セグメント (240°)

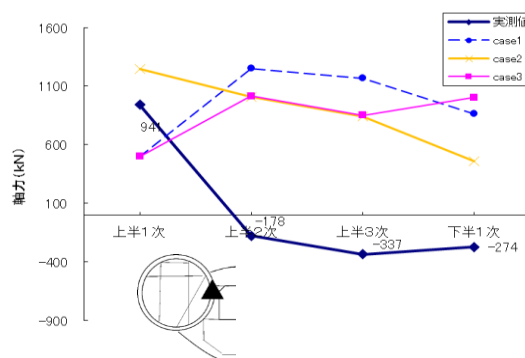


図-12 セグメント (270°)

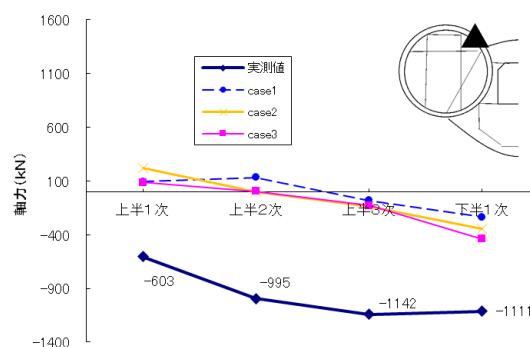


図-13 セグメント (315°)

## 5. 解析結果

### (1) 解析ケース

先述した解析条件の下で解析を行った。解析ケースを表-6に示す。解析ケースはそれぞれ case1 は掘削解放率を適用した場合、case2 は打設圧を作用させた場合、case3 は打設圧と掘削解放率の両方を設定した場合である。今回、図-7の赤枠で囲われたステップをそれぞれ解析結果として抽出する。

### (2) 解析結果

解析条件の違いによって差が大きい、曲線パイプルーフ、ポンプ室側のセグメント、水平材、斜材の解析結果図-7から図-13にそれぞれ示す。

上側曲線パイプルーフは上半掘削時の解放率に 60% を適用することで上半一次掘削の解析値が実測値に大き

く近づき、打設圧を導入することでその後の施工ステップの値も大きく実測値に近づいた。そのため case3 の解析値が最も実測値に近い値となった。

下側曲線パイプルーフは打設圧を導入することで解析が実測値に近づいたが全てのケースが実測値を大きく上回る結果となった。下側曲線パイプルーフは下半掘削後に連結先（B 線トンネルのセグメント）と溶接により繋がっているが、下半掘削までは溶接できないので、B 線側に固定できないため軸力が生じないものと考えられる。そのため実測値が非常に小さい値となり、解析値と実測で乖離が見られた。

鉛直材、斜材および水平材といった仮設補強材は解析値が実測値に概ね一致する結果となった。

セグメントは地山側（0° ～180°）では解析条件の変更による解析値の大きな変化は見られなかったが、全ての解析ケースで解析値と実測値が概ね一致した。ポンプ室側（240° ～315°）では解析条件を変更することで解析値に変化が見られた。240°、270°では実測値と解析値で挙動傾向にも乖離が見られた。315°では挙動傾向は近いが、実測値よりも小さい解析値が得られた。このような乖離は開口部付近のセグメントと補強材の構造が複雑なためモデルによる精巧な再現が出来なかったことが原因だと考えられる。

## 6. まとめ

4 章で示した通り、仮設補強材やセグメントなど多くの部材で打設圧と掘削解放率の 2 つを適用することで解析値が実測値に近づき挙動の再現を行うことが出来た。そのため、今回の新たな解析条件の適用は有効だといえる。一方で、ポンプ室側のセグメントは解析値が実測値と概ね一致する結果となった。先述の通り、開口部付近は構造が複雑であるためモデルでの再現が難しい。今後はポンプ室内掘削時の解放力の適用により開口部付近のセグメントの解析精度向上を図る予定である。

## 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) 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) 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.
- 4) 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，2021.

(2021. 8. 6 受付)

## RESEARCH ON IMPROVING THE ACCURACY OF FEM ANALYSIS MODEL IN THE DESIGN METHOD OF NON-CUTTING AND EXPANDING METHOD

Ryotaro MORITA, Tetsuji YAMAGUCHI and Motoi IWANAMI

Until now, research focusing on the rational design method of the non-cutting and expanding method has not been conducted, and the design method of the non-opening and expanding method has not yet been established based on sufficient research. Is the current situation. As a conventional way of thinking, it is designed to determine the specifications of the preceding support work using FEM analysis according to the mountain construction method. However, these design methods are not rational and economical based on academic background. In fact, in the construction of the intermediate pump room between Zoshigaya Station and Nishi-Waseda Station on Tokyo Metro Line 13, which is the subject of this research, in a space that was cut open without excavation, the cross section that occurs in the support materials and segments. There is a big difference between the design value and the measured value of the force. Therefore, the two-dimensional FEM analysis examines the design conditions and brings the analytical sectional force of the tunnel structure and the reinforcing temporary material closer to the measured sectional force, so that the acting earth pressure on the structure and the force of the segment and the support member are reduced. Improve the reproduction accuracy of the actual behavior of sharing. The text reports the results.