

2次元 FEM 解析を用いた活線拡幅工事による非対称トンネルの基礎的検討

茨城大学 学生会員 ○中尾 亮輔 茨城大学大学院 正会員 小林 薫
飛鳥建設 正会員 熊谷 幸樹 飛鳥建設 正会員 西原 圭美

1. はじめに

近年、高度経済成長期に造られたトンネルの老朽化が進み、全国にあるトンネルのうち建設後 50 年を経過したトンネルは 2019 年には 21%、2029 年には 35%¹⁾ となっており、既設のトンネルの改修あるいは拡幅するリニューアル工事の需要が高まっている。

一般的な山岳トンネルの施工では、トンネルの支保構造は左右対称となる、しかし、迂回路を確保できない場合に、既設トンネルにプロテクターを設置し一般車両を通しながらトンネルの拡幅を行う活線拡幅工事では、施工機械の作業するスペースの関係等で左右均等に掘削することが困難になり、トンネルの拡幅掘削中及び掘削完了後に、トンネルの非対称な構造になる場合がある。活線拡幅工事の場合、トンネルに作用する荷重が左右均等にかからず、トンネルの安定性を確保することが通常のトンネル施工時に比べ格段に困難である。また、トンネル支保構造が非対称となる活線拡幅工事は現在事例が少ないが²⁾、今後リニューアル工事の増加に伴い、活線拡幅工事の需要が高まることが考えられるため、安全性を確保した設計手法や施工方法を確立する必要がある。

以上より、本研究では実際に千葉県君津市国道 465 号で行われた活線拡幅工事³⁾の設計断面と施工手順をもとに、掘削に伴うトンネルの変位抑制および支持力向上に用いられる支保工の 1 つであるフットパイル（以下、FP と記す）に着目し、非対称の合理的な支保構造を明らかにすることを目的とする。FP は下半掘削時の地山崩落防止の効果と上半支保工接地部の応力集中の緩和の効果が期待できる。そこで、FP の打設角度の違いによる支保の効果と FP に生じる断面力の影響を有限要素法(FEM)による 2 次元トンネル施工段階解析によって検討した。

2. 2次元 FEM 解析によるフットパイルの打設角度が断面力に及ぼす影響の検討

2.1 解析概要

解析を行うトンネルの断面図を図-1 に示す。モデルはトンネル掘削幅 $D=12.7$ m とし、トンネル数値解析マニュアル⁴⁾ に示されている境界条件をもとに、図-2 に示すように解析領域をモデル化し、2次元弾性 FEM 解析で基本性状について検討した。解析プログラムは汎用性の高い GTS NX⁵⁾ を用いた。この解析では、手順を設定することで施工段階ごとの支保工や FP の断面力と共に、トンネルの内空変位や地表面等の変位等が分かる。全体モデルの境界条件（図-2 は、モデル側面は鉛直方向ローラー、モデル底面は完全固定とした。地山は、平面ひずみ要素でモデル化し、数値解析により山岳トンネルの設計を行う場合に一般的に用いられている地山物性値のうち、地山等級 DII を参考に表-1 のように入力物性値を設定した。また、支保工は、道路トンネルで採用される支保パターン⁶⁾ を参考に表-2 のように設定し、鋼アーチ支保工、FP は梁要素、ロックボルトはトラス要素としてモデル化した。モデルに使用した FP 等の物性値を表-1 に示す。解析手順

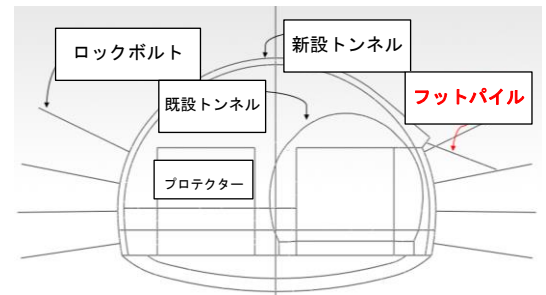


図-1 トンネル断面図

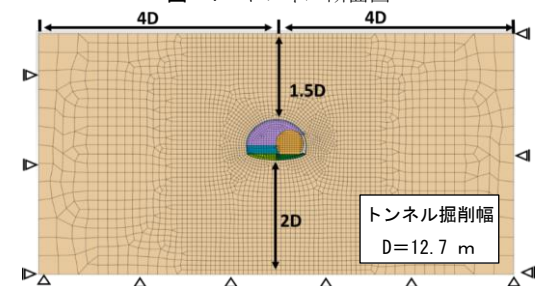


図-2 解析モデルと境界条件

は蔵玉トンネルの実施工の手順をもとに設定した。蔵玉トンネルの施工手順を図-3 に示す。また、FP の打設角度を変動パラメーターとし、水平打設を 0° として 0° 、 15° 、 30° 、 45° および 60° の 5 パターンで解析を行う。

キーワード 活線拡幅工事、非対称トンネル、フットパイル、FEM 解析

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4 丁目 12-1 茨城大学工学部 TEL : 090-4169-7062 E-mail : 19t5047a@vc.ibaraki.ac.jp

2.2 解析結果

図 - 4 に解析結果を示す。FP にかかる軸力と曲げモーメントはトンネルとの接合部から 0.5, 1.5 および 2.5 m の位置での値を打設角度毎に示したグラフを示す。図 - 4 (左図) より軸力は FP の打設角度が大きいほど、圧縮方向の軸力が大きくなることわかる。また、図 - 4 (右図) より、曲げモーメントは打設角度が 30°, 40° の角度に近づくにつれて、ゼロに近づく傾向を示している。

次に、トンネル周辺地盤のひずみを計算し、地山の限界ひずみと比較し、周辺地山の安定性に及ぼす FP の打設角度の影響についての検討を行った。表 - 2 に解析より得られた、DII地山における地盤のひずみと解析に用いた地山の限界ひずみを示す。表 - 2 よりそれぞれの打設角度で限界ひずみの値を下回る結果となった。最もひずみの大きい FP の打設角度が 0° の時、限界ひずみの約 15 % 程度であった。本解析条件では、各打設角度の最大断面力は許容値の軸力で 73%程度 (60° 時) でありトンネルの安定性に及ぼす打設角度の影響は大きくないことが明らかになった。

2.3 考察

FP の打設角度が大きくなるにつれて軸力が大きくなったが、周辺地山のひずみに大きな差はなかった。これらは、打設角度が大きくなるほどトンネル全体にかかっていた応力が FP に負担されるためだと考えられる。また、曲げモーメントは打設角度が 30° および 40° の時ゼロに近づくのは、FP にかかる応力が曲げ方向ではなく、軸力方向に力がかかっているためだと考えられる。また、今回の解析条件の D2 地山では、比較的硬い地山であったため、ひずみが小さかったと考えられる。

3. まとめ

本研究では以下の知見が得られた。

- 1) FP 打設角度が大きくなるにつれて、軸力が大きくなる。また、曲げモーメントは打設角度が 30°, 40° の角度に近づくにつれて、ゼロに近づく傾向を示している。
- 2) DII地山において FP がどの打設角度においても、限界ひずみを下回り、安定性が確保されていることが示された。

参考文献

- 1) 道路メンテナンス年報 国土交通 省道路局 令和元年 8 月 <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/h30/R1_03maint.pdf> (2023 年 1 月 16 日閲覧)
- 2) 町永正樹, 岩田航司: NATM および開削工法による供用中のトンネル拡幅工事, 第 78 回 (山岳) 施工体験発表会, pp.3-10, 2016.
- 3) 西原圭美, 熊谷幸樹: 活線拡幅工事における非対称なトンネル支保構造の施工性と作用効果, トンネル工学研究発表会, p.2
- 4) 日本道路公団: トンネル数値解析マニュアル, (株)高速道路総合技術研究所 技術資料, pp.3-9, 3-13, 2017.
- 5) WHY GTS NX New Experience of Geotechnical Analysis System <https://patch.midasiat.com/00_MODS/jp/02_catalog/GTS-NX-catalog.pdf> (2023 年 1 月 16 日閲覧)
- 6) 土木学会: トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説, p.69. 1964.

表 - 1 解析に用いた入力物性値

	地山	鋼製支保工 フットパイル	吹付け コンクリート	インバート コンクリート
仕様	DII	H-150	t = 25 cm	t = 50 cm
ヤング係数 [kN/m ²]	150000	2.0 × 10 ⁸	4.0 × 10 ⁶	7.0 × 10 ⁶
ポアソン比	0.35	0.3	0.2	0.2
湿潤単位重量 [kN/m ³]	21	77	23	23

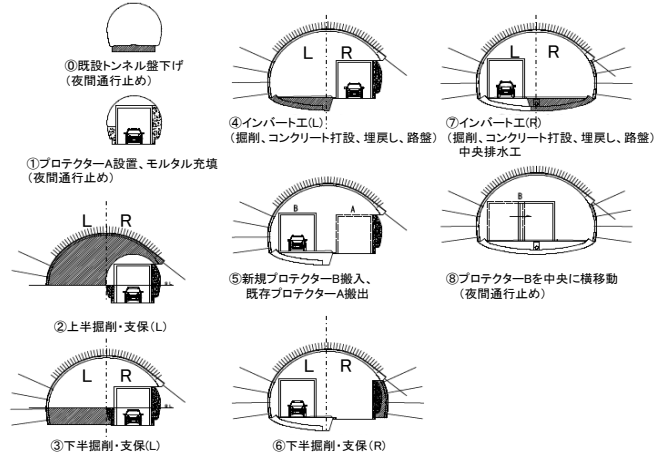


図 - 3 蔵玉トンネルの施工手順

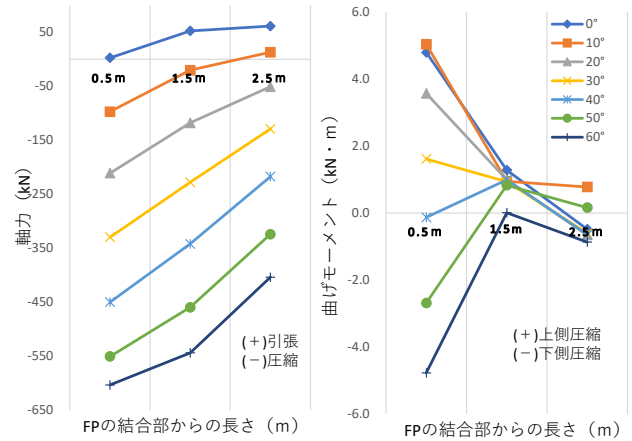


図 - 4 FP にかかる軸力(左)と曲げモーメント(右)

表 - 2 地盤のひずみと限界ひずみ

角度	0°	10°	20°	30°
地盤のひずみ	0.00391	0.00390	0.00387	0.00384
角度	40°	50°	60°	限界ひずみ
地盤のひずみ	0.00380	0.00376	0.00373	0.0255