

中央導坑の先行長や残延長が及ぼす 本坑挙動への影響についての考察

大森 禎敏¹・翟 思敏²・岡部 正³・五味 綾子⁴・
砂金 伸治⁵・篠田かれん⁶

¹正会員 五洋建設(株) 土木部門土木本部土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: sadatoshi.oomori@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設(株) 土木部門土木本部土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: shibin.taku@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 (株)ケー・エフ・シー 本社技術部 トンネル・基礎技術室
(〒105-0011 東京都港区二丁目 4-1 芝パークビル B 館 11F)
E-mail: okabe.tadashi@kfc-net.co.jp

⁴正会員 (株)ケー・エフ・シー 本社技術部 トンネル・基礎技術室
(〒105-0011 東京都港区二丁目 4-1 芝パークビル B 館 11F)
E-mail: gomi.ayako@kfc-net.co.jp

⁵正会員 東京都立大学 教授 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

⁶正会員 首都高速道路株式会社更新・建設局 日本橋プロジェクト設計課
(〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 2-2-1 KANDA SQUARE 17F)
E-mail: k.shinoda3324@shutoko.jp

導坑掘削によって期待される力学効果に、本坑切掘削後の変形や変位を小さくする「いなし効果」があるが、いなし効果が得られる導坑の設計条件などについては十分に検証されていない。本稿では、芳ノ元トンネルで見られた脆弱な地山条件において、中央導坑先進工法を適用した場合に導坑の先行長や残延長が切掘削後の本坑挙動に及ぼす影響について数値解析を用いて検証した。

Key Words: center advancing drift, center drift, dodging effect, expand excavation, numerical analysis

1. はじめに

中央導坑先進工法は、脆弱な地山条件などで前方の地質を調査する必要があったり、1度では計画されたトンネル断面を掘削することができない場合に適用されることが多い。導坑掘削によって期待される力学効果に、本坑切掘削後の変形や変位を小さくする「いなし効果」があるが、いなし効果が得られる導坑の設計条件などについては十分に検証されていない。

筆者らは、導坑先進工法を適用した極めて脆弱な地山条件における計測結果と数値解析を用いて検証し、いなし効果が得られる導坑の設計条件について考察した¹⁾²⁾。その結果、施工等の条件によってはいなし効果が期待できない場合がある地山条件が存在する可能性がある一方で、地山等級DIやCIIでは導坑断面を大きくするまたは

先行長を長くすることでいなし効果が期待できると考えられた。

導坑の設計条件としては、支保構造などの断面的な諸元の他に本坑切羽からの先進距離がある。すでに高橋らは、膨張性地山で導坑先進工法を適用した場合の本坑切掘削後の変位抑制効果は、導坑の先行長、断面形状、掘削断面形状、掘削断面積および支保剛性などにほとんど影響を受けないとしている³⁾。しかしながら、極めて脆弱な地山で導坑先進工法を適用したほうが本坑切掘削後の変位や変形が大きくなるような条件での検証は十分ではない場合も見られた。

本稿では、極めて脆弱な地山条件における導坑の先行長や残延長が与える本坑切掘削後の変位や変形への影響を、数値解析を用いて検証した。あわせて導坑先進工法を適用した場合に本坑切掘削後の閉合距離が及

ばす変位や変形への影響を検証した。

2. 数値解析モデルおよび入力物性値

本検証に用いるトンネル断面は、図-1の(a)、(b)に示す東九州道 芳ノ元トンネル北工区で適用した支保パターン E-2 とした¹⁾。掘削断面積は約 140 m²で、鋼アーチ支保工には H-200、吹付けコンクリートの設計基準強度は 36 N/mm²で厚さは 250 mm である。また中央導坑は、支保施工後の直径が 4 m の真円形状で鋼アーチ支保工には H-150、吹付けコンクリートの設計基準強度は 36 N/mm²で厚さは 150 mm である。

検証に用いた数値解析モデルを図-2に示す。解析領域は、日本道路公団 試験研究所「トンネル数値解析マニュアル」⁴⁾に基づいてトンネル中心から左右に 100m、トンネル縦断方向 150 m とした。インバートの下方領域は約 4.5 D (D: トンネル掘削径) の 60 m を確保し、土被りは芳ノ元トンネルの導坑先進区間の平均値である 90 m (約 6.6D) とした。

表-1 に数値解析に用いた入力物性値を示す。地山の入力物性値は、中央導坑先進工法を適用するような脆弱な地山条件を仮定して、筆者らがすでに用いた芳ノ元トンネルでのものとした。解析コードは有限差分法 (FLAC-3D) を用い、地山は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾塑性体と仮定した。

吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工は合成シェル⁵⁾とし、導坑については本坑切広げ掘削時には吹付けコンクリートが十分に強度発現していると考え、設計基準強度相当の弾性係数を与えることとした。ここで、各トンネル掘削時の吹付けコンクリートの弾性係数は、土屋の研究成果に基づいて 8.0×10⁶ kN/m² とした⁶⁾。

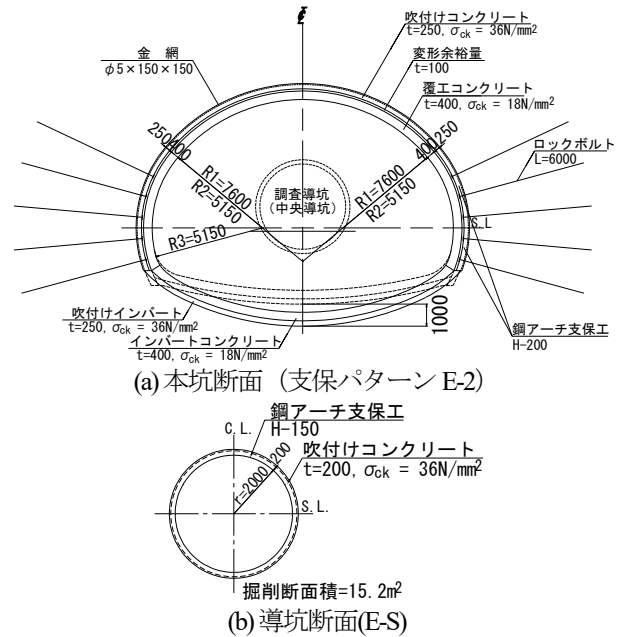
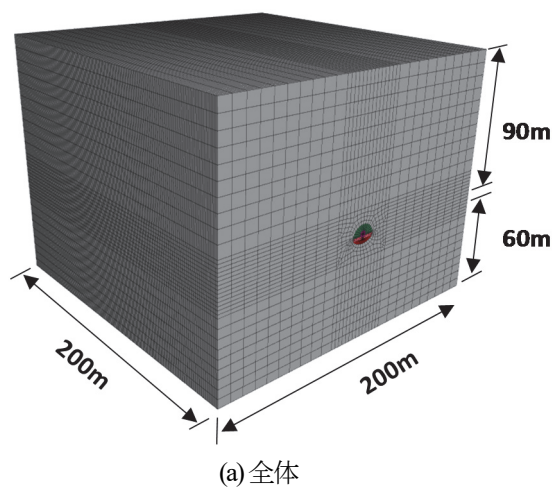


図-1 検証に用いた芳ノ元トンネル断面と支保パターン¹⁾

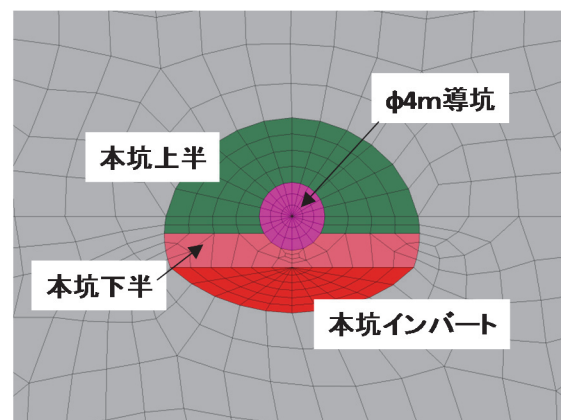
表-1 検証解析の入力物性値

入力物性値	弾塑性地山	支保部材	
		吹付けコンクリート	鋼アーチ支保工
要素	solid	合成shell	
弾性係数 E(kN/m ²)	200,000	8.0×10 ⁶ (3.0×10 ⁷)	2.1×10 ⁸
単位体積重量 γ (kN/m ³)	22	-	-
ポアソン比 ν	0.48	0.17	0.32
粘着力 c (kN/m ²)	200	-	-
内部摩擦角 φ (deg.)	20	-	-
備考	-	-	本坑: H-200 導坑: H-150

(): 本坑掘削時の導坑の吹付けコンクリート



(a) 全体



(b) トンネル周辺

図-2 検証に用いた解析モデル

なお、本検証では地山条件からロックボルトの支保効果は十分に小さいと仮定してモデル化しないものとした。

3. 検証ケース

表-2, 3に本検証での検証ケースを示す。ケース1とケース2は中央導坑の先行長および残延長が及ぼす影響を検証するグループである。ケース1のグループは導坑の先行長を7, 15, 30mと変化させ残延長が40mとなるまで本坑を切掘り掘削することで導坑の先行長が本坑切掘り掘削後の挙動に与える影響を検証するもので、それぞれケース1-1~1-3とした。また、ケース2のグループは導坑の先行長を15, 30, 60mとして残延長を7, 15, 30mとして導坑の残延長が切掘り掘削後の本坑挙動に与

える影響を検証するもので、それぞれケース2-1~2-3とした。ケース1, 2ともに本坑の閉合距離は本坑上半から6m一定とした。

全てのケースにおいて導坑は全断面掘削とし、本坑の

表-3 検証ケースにおける導坑の先行長, 残延長および本坑の閉合距離

単位:m

Case No.	導坑		本坑 閉合距離	
	先行長	残延長		
1	1	7	0	6
	2	15	0	6
	3	30	0	6
2	1	15	7	6
	2	30	15	6
	3	60	30	6

表-2 検証に用いた検証ケース



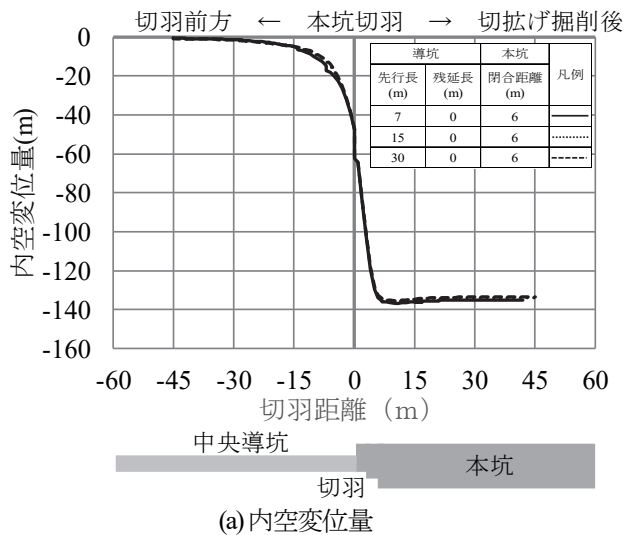
上半および下半については補助ベンチ付き全断面掘削工法で1m単位での交互並進とし、表-3に示した位置で掘進1mごとに閉合するものとした。

4. 検証結果

(1) 導坑の先行長

図-3の(a), (b)はケース1に示した導坑の先行長を変化させて残延長が0mとなるまで本坑切上げ掘削を行った場合の内空変位量と天端沈下量に関して、初期地山から切上げ掘削後の変位と変形が収束と考えられた切羽距離45mまでの計算結果である。図の横軸は切羽距離(m)であり、縦軸は(a), (b)それぞれ内空変位量と天端沈下量である。これらの図から中央導坑の先行長を変化させても本坑の内空変位量と天端沈下量に有意な違いはみられなかった。

図-4の(a), (b)は、図-3の(a), (b)それぞれに示した内



空変位量、天端沈下量について本坑切羽を初期値にして整理したもので、実際のトンネル掘削時に得られる計測値に相当するものである。これらの図からも中央導坑の先行長は、本坑切上げ掘削後の内空変位量および天端沈下量に有意な違いが現れなかった。

以上のことから、極めて脆弱な地山条件で本坑の掘削断面積に対して40%程度の円形導坑を適用した中央導坑先進工法での本坑切上げ掘削後の挙動に与える影響は、導坑の先行長が7m(約0.5D, Dは本坑の掘削幅)以上になれば有意な違いが現れないことが分かった。

(2) 導坑の残延長

図-5の(a), (b)はケース2に示した導坑の残延長を変化させた場合の本坑切上げ掘削後の内空変位量と天端沈下量を初期値山から収束と考えられた切羽距離45mまでの計算結果である。また、図-6の(a), (b)は図-4と同様に図-5の(a), (b)の結果について本坑切羽を初期値として整理したものである。

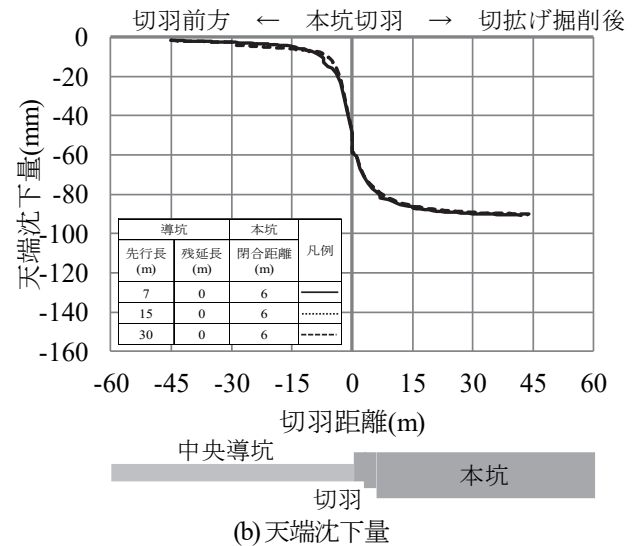


図-3 導坑の先行長を変化させた場合の本坑の内空変位量と天端沈下量(初期地山から)

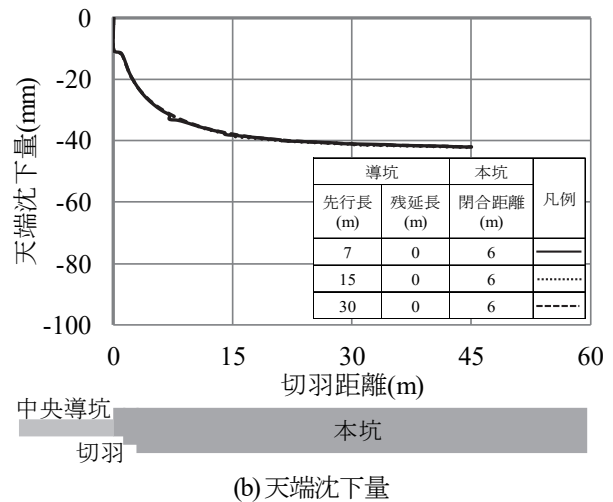
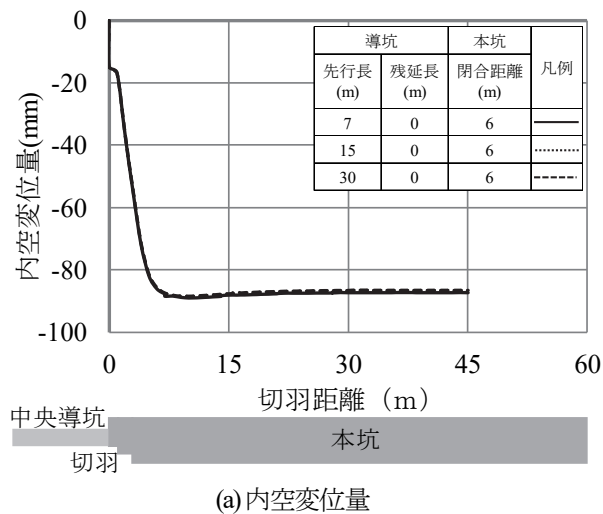


図-4 導坑の先行長を変化させた場合の本坑の内空変位量と天端沈下量(本坑切羽から)

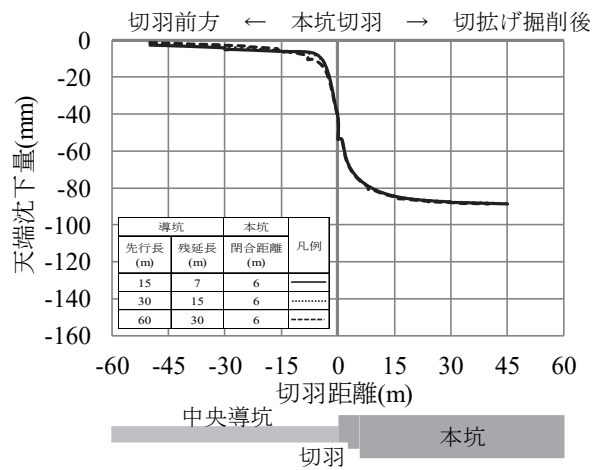
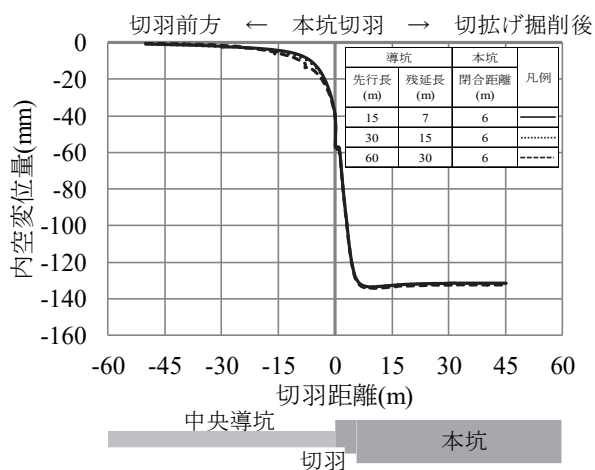


図-5 導坑の残延長を変化させた場合の本坑の内空変位量と天端沈下量（初期地山から）

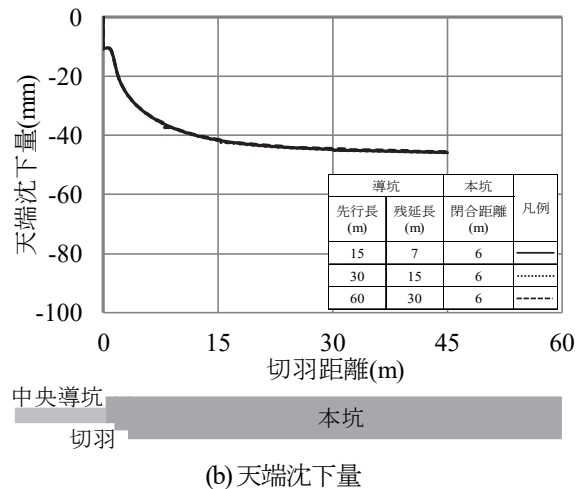
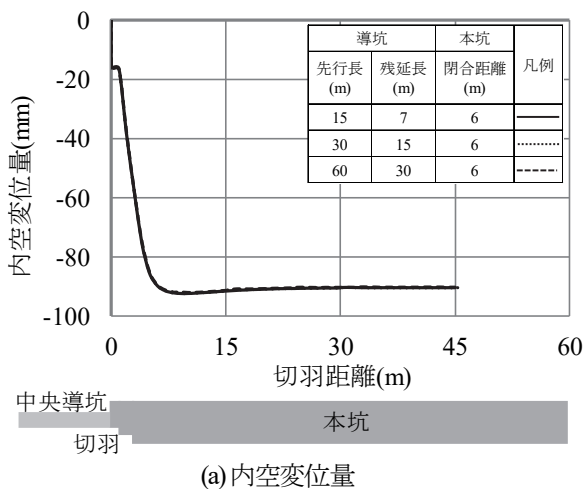


図-6 導坑の残延長を変化させた場合の本坑の内空変位量と天端沈下量（本坑切羽から）

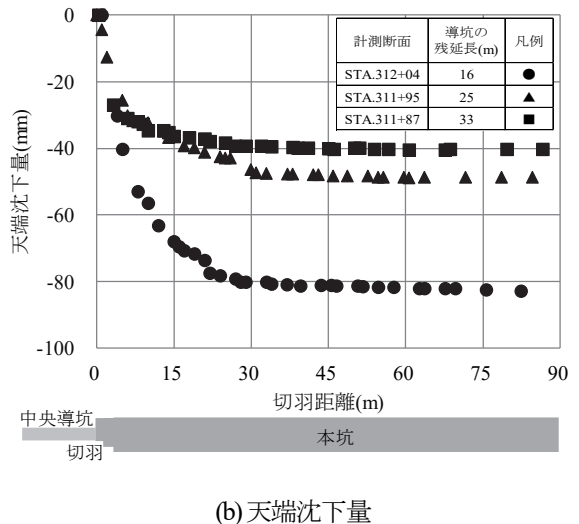
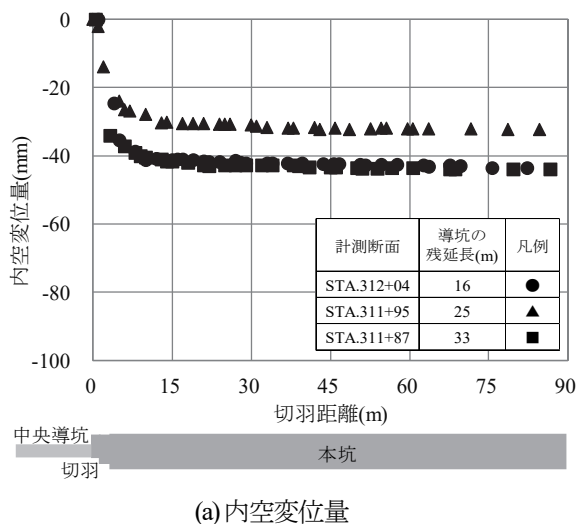


図-7 芳ノ元トンネル北工区における導坑の残延長ごとの内空変位量と天端沈下量

これらの図から中央導坑の残延長を変化させても本坑切羽掘削後の内空変位量と天端沈下量に有意な違いが表れないことが分かった。

図-7の(a), (b)は東九州道 芳ノ元トンネル北工区で

確認した中央導坑の残延長が16m, 25m, 33m地点での内空変位量と天端沈下量である。土被りは112~114mで有意な違いはなく、地質は日南層群の砂岩頁岩互層で支保パターンも図-1に示したE-2である。図-7(a)に示した

内空変位量についてみると切羽距離 45 m 地点では導坑の残延長 33 m となる STA.311+87 および残延長が 16 m となる STA.312+04 で概ね一致し、導坑の残延長が 25 m となる STA.311+95 が他の 2 地点と比較して 10mm ほど小さくなるものの地質の不均一性などを勘案すると有意な違いではないと考えられる。

また、天端沈下量についてみると残延長が 16 m となる STA.312+04 で他の 2 地点で比較して大きくなっているものの、残延長 33 m となる STA.311+87 および残延長が 25 m となる STA.311+95 では有意な違いはないと考えられた。

このことから数値解析による検証の結果および前述の計測結果から中央導坑先進工法を適用した場合、導坑の残延長による本坑切上げ掘削後の本坑挙動に与える影響は小さいと考えられる。

5. 結論

これまで数値解析を用いた検証において中央導坑の先行長と残延長が本坑切上げ掘削後の挙動と中央導坑先進工法を適用した場合の本坑閉合距離の影響を検証した。

その結果、芳ノ元トンネルのような脆弱な地山条件では、中央導坑を本坑掘削幅の 0.5 倍程度先行させれば、それ以上先行させても中央導坑が与える本坑切上げ掘削後の挙動に有意な影響はないことが分かった。また、中央導坑の残延長が切上げ掘削後の本坑挙動に与える影響も小さいと考えられた。この結果については、ある程度の先行距離があれば、本坑切上げ掘削後の変位や変形に与える影響に違いはないとした高橋らの研究成果と一致するものとなった³⁾。このことから、中央導坑の先行長および残延長は、地質調査、水抜き効果、施工効率など導坑に求められる力学的な機能以外の要素と合わせて決定することになると考えられる。

本稿での結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 切上げ掘削後の本坑挙動に与える中央導坑の先行長の影響は、本坑掘削幅の 0.5 倍程度の延長で先行させることで現れ、それよりも導坑を先行させても有意な違いはない。
- (2) 切上げ掘削後の本坑挙動に与える中央導坑の残延長の影響も小さく、導坑の残延長についても導坑に求められる力学的な効果以外の目的と合わせて総合的に判断することで問題はない。

一方で、本検証で用いた地山物性値よりもより脆弱な地山条件では導坑掘削による本坑切上げ掘削時の変位抑

制効果が大きくなることが考えられる⁷⁾。このことから、本検証で用いた地山条件よりも脆弱となる条件下では、導坑の先行長や残延長が切上げ掘削後の本坑挙動に与える影響も異なることが予想されるために、更なる検証が必要と考えられる。

6. おわりに

数値解析を用いた検証は、地山を均一と仮定するなど実際の地山を完全に模擬することはできないものの、一般的な傾向を見いだすことはできると考えられる。

本稿では、中央導坑先進工法を適用した場合における導坑の先行長と残延長が及ぼす本坑切上げ掘削後の挙動への影響を数値解析を用いて検証した。これまで導坑が本坑切上げ掘削に与える力学的な効果に導坑を適用したことによって切上げ掘削後の本坑の変位や変形を小さくするいなし効果がある。しかしながら、いなし効果が期待できる地山条件などについての検証は十分ではないと考えられる。今後は、地山の圧縮強度や地山強度比などのパラメーターに着目して、いなし効果が期待できる導坑の設計条件について検証を引き続き行う予定である。

参考文献

- 1) 大森禎敏, 岡部正, 砂金伸治, 弓場進: 脆弱地山における高剛性支保を有する導坑の変位抑制効果について, 土木学会トンネル工学研究発表会報告集, I-42, 2019.
- 2) 大森禎敏, 岡部正, 五味綾子, 砂金伸治: 中央導坑先進工法を適用した場合の本坑挙動と導坑の設計指標に関する考察, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.76, No.2 (特集号), I_1-I_20, 2020.
- 3) 高橋浩, 谷井敬春, 岩井克彦, 桑原秀樹, 進士正人, 中川浩二: 膨張性地山における導坑の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 728/VI-58, pp. 27-39, 2003.
- 4) 日本道路公団 試験研究室: トンネル数値解析マニュアル (都市部トンネル解析留意事項編), p. 11, 2004.
- 5) (社) 土木学会: 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, p. 152, pp. 161-162, 2006.
- 6) 土屋敬: トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究, 土木学会論文集, 第 364 号/III-4, 1985.
- 7) 篠田かれん, 砂金伸治, 大森禎敏, 河田皓介: 不良地山における先進導坑の効果とトンネル構造安定性に関する解析的考察, 令和 4 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 III-173.

(2022. 8. 26 受付)

THE EFFECT OF THE LEADING LENGTH AND REMAINING EXTENSION OF THE CENTER DRIFT ON THE BEHAVIOR OF THE MAIN TUNNEL

Sadatoshi OHMORI, Shimin ZHAI, Tadashi OKABE, Ayako GOMI,
Nobuharu ISAGO and Karen SHINODA

As a mechanical effect expected from the excavation of the drift, there is a "dodging effect" that reduces the deformation and displacement after the excavation of the main tunnel. However, the design conditions of the drift where the effect can be obtained have not been sufficiently verified. In this paper, numerical analysis is performed on the effects of the leading length and remaining length of the drift on the behavior of the main tunnel after excavation when the center drift advancing method is applied under the fragile ground conditions found in the Yoshinomoto tunnel.