

地山特性による中央導坑の早期閉合が与える 本坑挙動への影響について

大森 禎敏¹・翟 思敏²・Abeyawardena Devini³・砂金 伸治⁴

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非会員 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: devini.abeyawardena@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 東京都立大学 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

脆弱な地山条件で導坑先進工法を適用する場合に期待される力学的効果として、本坑切上げ掘削後の変形や変位を小さくする「いなし効果」がある。一方で脆弱な地山条件では導坑でも早期閉合が適用されることがあるものの、本坑切上げ掘削後のいなし効果に与える影響については十分に検証されていない。本稿では、中央導坑先進工法を適用した四国横断自動車道 歯長山トンネルでの計測結果と数値解析結果を用いて、当該トンネルで実施された導坑の早期閉合が与える本坑挙動への影響を検証した。加えて、地山特性の違いによって導坑での早期閉合が与える本坑への影響を検証したものである。

Key Words: drift, dodging, early closure

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度の掘削では計画されたトンネル断面を施工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的効果に、本坑切上げ掘削後の変形や変位を小さくする「いなし効果」があることはこれまでも経験的に知られているところであるが、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。

筆者らは既に、中央導坑先進工法を適用した東九州自動車道 芳ノ元トンネルで見られた脆弱な地山条件では、いなし効果の発現は限定的、もしくはないと考えられることを計測結果と数値解析を用いて検証するとともに、いなし効果が得られる導坑の設計条件について考察をした¹⁾。その結果、芳ノ元トンネルのような極めて脆弱な地山条件ではいなし効果が期待できない場合があることを明らかにした。その一方で、地山等級DIやCIIでは導坑断面を大きくすることでいなし効果が期待できると考えられる場合があることも示した¹⁾。

一方、これまでの施工事例では脆弱な地山条件では導坑施工時にも早期閉合が適用されることがある^{例えば 2)}。

早期閉合の実施によって、前述の「いなし効果」や、地山のゆるみの発生に影響があると考えられるものの、導坑での早期閉合が本坑切上げ掘削後の挙動に与える影響については、十分に検証されていない。

本稿では、一部区間に中央導坑先進工法を適用した四国横断自動車道 歯長山トンネルでの数値解析によって再現した³⁾。歯長山トンネルでの中央導坑には、地山状況に応じて早期閉合を適用した区間と適用しない区間があった。このことから数値解析結果と計測結果を比較して当該トンネルにおける中央導坑の早期閉合が与える切上げ掘削後の本坑挙動への影響について検証する。さらに、同じ数値解析モデルを用いて一般的な道路トンネルでの地山等級E、DI、CIIを想定した地山条件でも数値解析を実施して、本坑でのいなし効果に与える中央導坑での早期閉合の影響を考察する。

2. 歯長山トンネルの概要³⁾

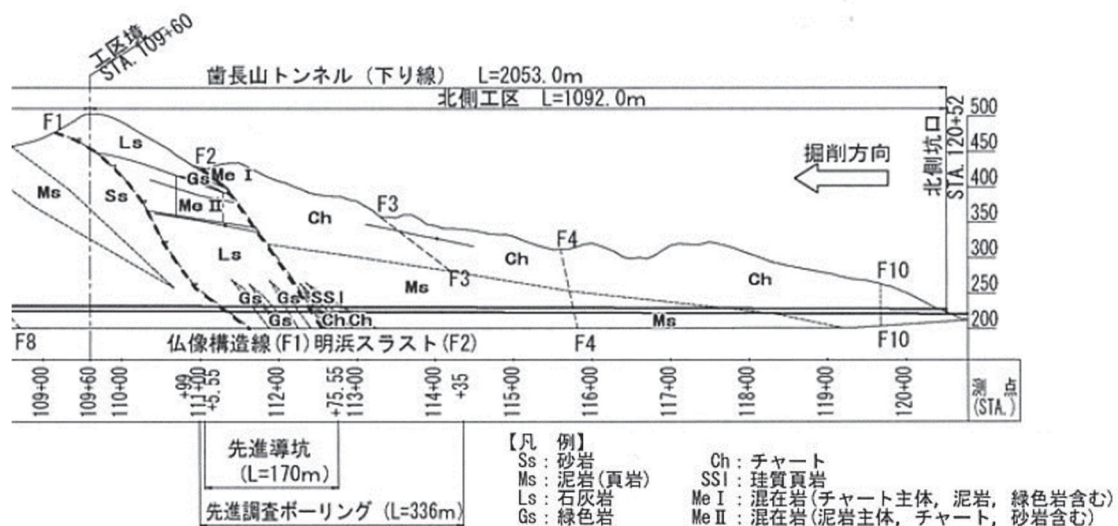


図-1 齒長山トンネルにおける中央導坑先進工法適用区間の地質縦断面図³⁾

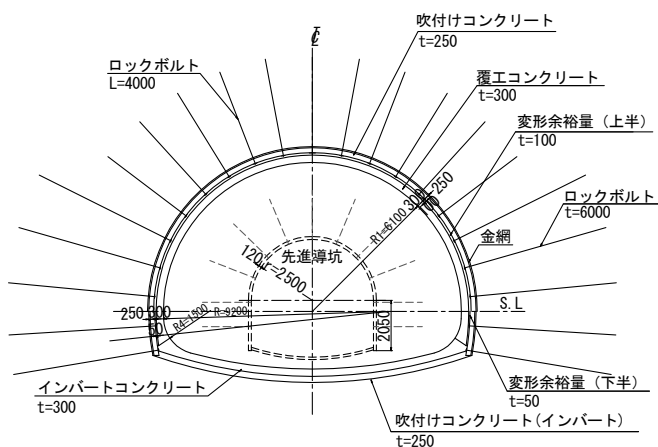


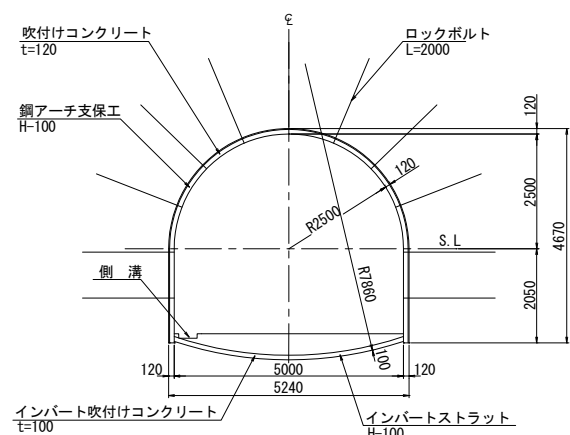
図-2 中央導坑適用区間の本坑支保パターン

(1) トンネルの概要

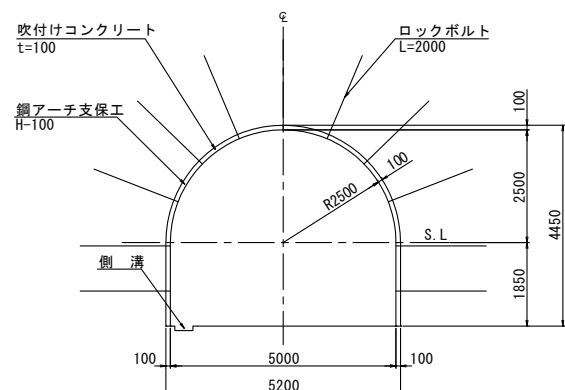
四国横断自動車道 齒長山トンネルは、愛媛県宇和町～宇和島市に計画された延長 2,053m の二車線道路トンネルである。図-1 に中央導坑先進工法適用区間の地質縦断面を示す。計画域に分布する地質は、中生代四万十帯の砂岩・泥岩互層と中～古生代秩父帯のチャート、緑色岩などである。導坑先進工法は四万十帯と秩父帯の境界である仏像構造線、明浜トラストの区間 170m で計画された。図-2 に中央導坑適用区間の本坑の、図-3 の(a), (b)に中央導坑の支保パターンを示す。導坑の掘削断面積は本坑断面積の 19%に相当する約 20m²で、地山状況によっては吹付けコンクリートとインパート鋼製支保工(インパートストラット)で早期閉合した。本坑の掘削断面積は約 105m²で、早期閉合を適用した。中央導坑、本坑とも発破掘削を適用しており、中央導坑先進工法を適用した区間の平均土被りは約 175m である。

(2) 中央導坑適用区間の計測結果⁴⁾

図-4 の(a), (b)は中央導坑先進工法適用区間における本坑の内空変位量と天端沈下量を導坑での早期閉合の有無によって整理した箱ひげ図である。これらの図から中央値を見ると、中央導坑掘削で早期閉合を適用した場合の

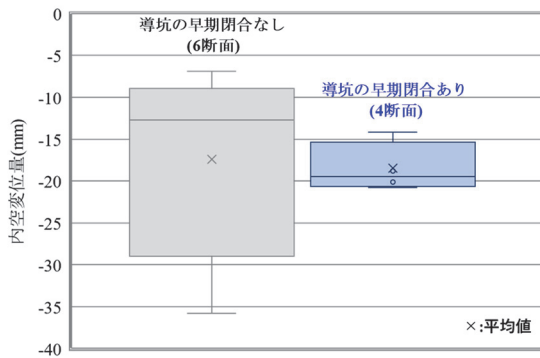


(a) 早期閉合なし

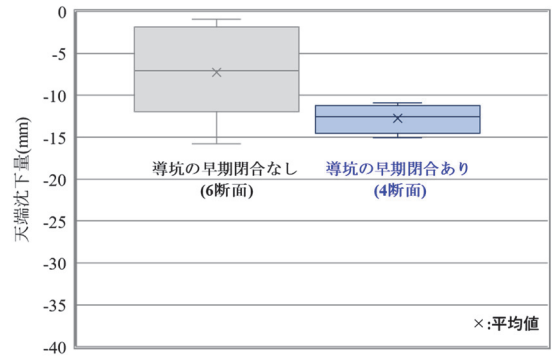


(b) 早期閉合あり

図-3 中央導坑の支保パターン



(a) 内空変位量



(b) 天端沈下量

図-4 中央導坑先進区間の本坑の内空変位量と天端沈下量

内空変位量と天端沈下量は、早期閉合を適用しない場合よりも大きくなる傾向があると考えられた。すなわち中央導坑での早期閉合が本坑切掘り掘削後の挙動に影響を与える一方で、地山の物性等によるばらつきの影響の程度を把握する必要があると考えられた。

3. 解析モデル

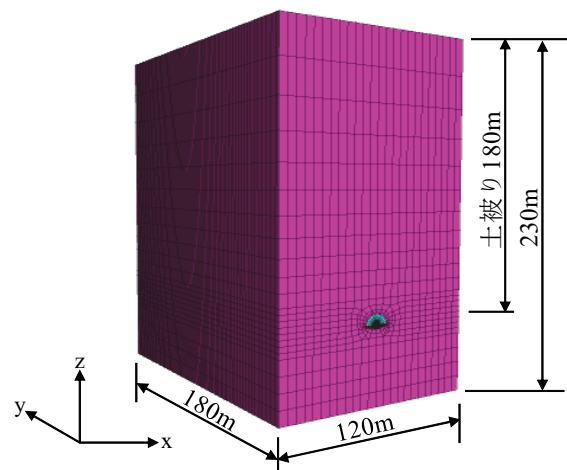
本研究では、中央導坑での早期閉合が本坑切掘り掘削後の変位と変形に与える影響を検証することを目的として、有限差分法による数値解析を行った。使用したコードはFLAC3Dで、地山はMohr-Coulombの破壊基準に従う弾塑性体と仮定しsolid要素とした。また、支保的インバートを含む支保部材は合成shellとし、入力物性値は表-1に示すとおりとした。解析モデルは、トンネル全断面を再現した3次元モデルとし図-5に示すものとした。具体的には土被りを180mとし、トンネル側方領域および下方領域は、トンネル数値解析マニュアルを参考にそれぞれ約53m(約4.0D)、約40m(約3.0D)とした⁹⁾。ここで、Dは本トンネルの掘削径である。なお、本検証においてロックボルトは支保効果が小さいと仮定しモデル化しないものとした。

4. 歯長山トンネルの検証結果⁴⁾

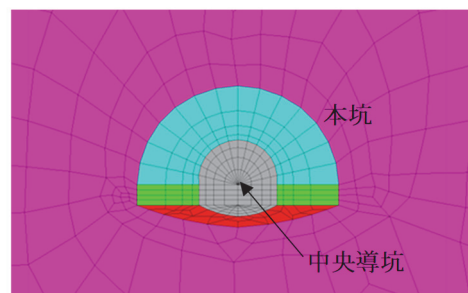
歯長山トンネルの検証に用いる地山物性値は、表-2に示した中央導坑での天端沈下量と内空変位量を再現するものをパラメーター解析を実施して決定した。ここで、表-2に示す中央導坑での内空変位量と天端沈下量は早期閉合を適用していない区間で、概ね収束と考えられる導坑での切羽距離2D'（ここで、D'は中央導坑の掘削径）時点のものである。パラメーター解析によって決定した地山物性を表-3に示す。また、表-3に示した地山物性値

表-1 支保部材の入力物性値

入力物性値	支保部材	
	吹付けコンクリート	鋼アーチ支保工
要素	合成 shell	
弾性係数 (kN/m ²)	4.0×10^6	2.1×10^8
ポアソン比	0.17	0.32



(a) 全景



(b) トンネル周辺

図-5 検証に用いた数値解析モデル

を用いて算定した中央導坑における内空変位量と天端沈下量を図-6および図-7のそれぞれ(a), (b)に示す。

これらの図のうち図-6 の(a), (b)は、初期地山状態と考えられた中央導坑の切羽前方 15m (切羽前方約 3D') から掘削後 15m までの内空変位量と天端沈下量である。図の横軸は切羽距離、縦軸は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、中央導坑では切羽前方の 5m 付近から変形が現れ始め、切羽到達時点では内空変

表-2 歯長山トンネル中央導坑での計測結果

計測断面	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)
STA.112+69	3.5	2.0
STA.112+59	1.9	3.0
STA.112+50	4.0	2.6
STA.112+45	2.5	6.5
STA.112+42	2.2	4.5
STA.112+32	2.3	2.6
STA.112+02	1.9	3.8
STA.111+93	3.0	2.4
STA.111+42	3.3	3.4
平均値	2.7	3.4

切羽距離 2D'地点

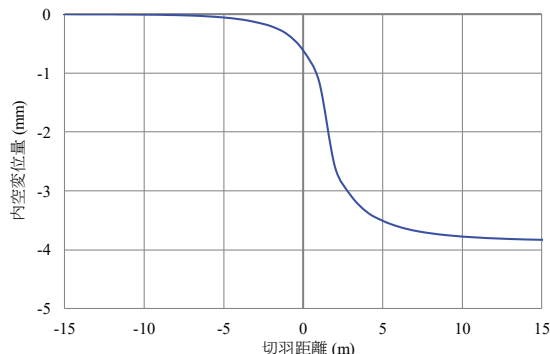
表-3 再現解析に用いた地山物性値

弾性係数 E (kN/m ²)	6.0×10^6
単位体積重量 γ (kN/m ³)	22
ポアソン比 ν	0.42
粘着力 c (kN/m ²)	6.0×10^3
内部摩擦角 ϕ (deg.)	45

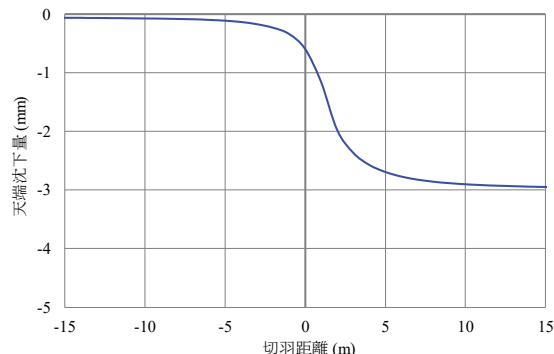
位量は、最終変位量の約 13% の 0.5mm 程度となることが分かる。また、天端沈下量は、最終変位量の約 17% となる 0.5mm 程度となることが分かる。初期値山状態からの最終的な内空変位量と天端沈下量は、それぞれ約 3.8mm, 約 3.0mm となる。

図-7 のそれぞれ(a), (b)は図-6 の(a), (b)に示したそれぞれ内空変位量、天端沈下量をトンネル掘削時の計測値と同じように中央導坑掘削時点を初期値として整理した内空変位量と天端沈下量である。図の横軸は、それぞれ中央導坑切羽からの切羽距離であり、縦軸はそれぞれ中央導坑の内空変位量と天端沈下量である。中央導坑切羽からの内空変位量は概ね収束と考えられる切羽距離 10m (約 2D') で約 3.1mm となり、天端沈下量は約 2.5mm となった。このことから、歯長山トンネルの中央導坑で計測された内空変位量と天端沈下量の平均値と概ね一致すると考え、表-3 に示した地山物性値を用いて、中央導坑における早期閉合が及ぼす本坑切上げ掘削後の影響について検証するものとした。

図-8 および図-9 のそれぞれ(a), (b)は、中央導坑先進工法を適用した場合の本坑切上げ掘削後の内空変位量と天端沈下量で、中央導坑の早期閉合の有無の違いについて比較したものがある。このうち図-8 のそれぞれ(a), (b)は、本坑切上げ掘削の影響がないと考えられた切羽前方 60m

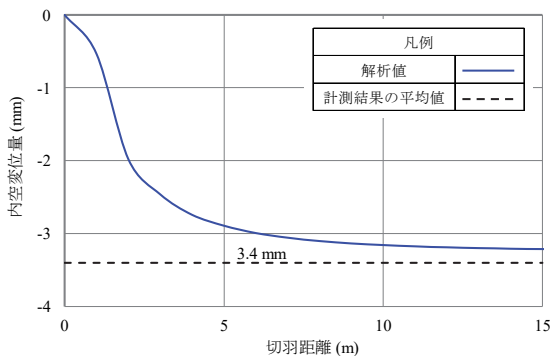


(a) 内空変位量

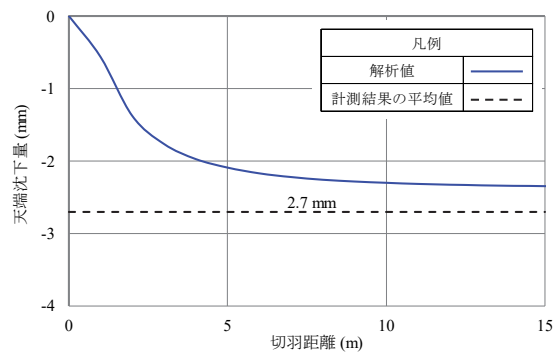


(b) 天端沈下量

図-6 中央導坑の内空変位量と天端沈下量 (初期地山から)

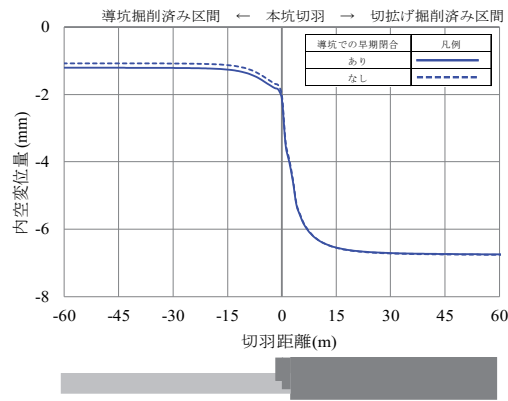


(a) 内空変位量

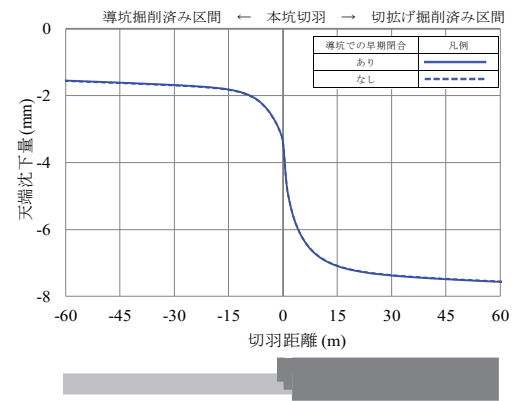


(b) 天端沈下量

図-7 中央導坑の内空変位量と天端沈下量 (中央導坑切羽から)

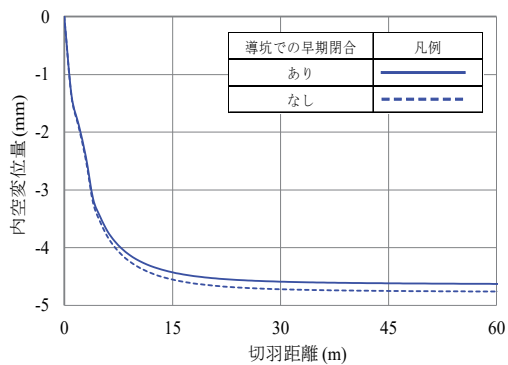


(a) 内空変位量

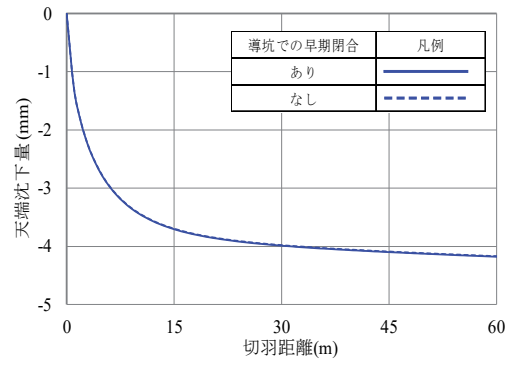


(b) 天端沈下量

図-8 本坑切上げ掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量（初期地山から）



(a) 内空変位量



(b) 天端沈下量

図-9 本坑切上げ掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量（本坑切羽から）

（約4.5D）から切上げ掘削後60mまでの内空変位量と天端沈下量で、横軸に切羽距離、縦軸にそれぞれ内空変位量と天端沈下量を示してある。この図から中央導坑での早期閉合の有無による本坑切上げ掘削後の内空変位量と天端沈下量には大きな違いがないことが分かる。

また、図-9のそれぞれ(a)、(b)は、図-8の(a)、(b)について本坑切上げ掘削時点を初期値にして整理した内空変位量と天端沈下量で、施工時の計測値に相当する。横軸の0は本坑切羽の位置となる。内空変位量を見ると中央導坑で早期閉合を適用しない場合のほうが若干大きくなるものの有意な違いがあるとは考えられなかった。また、天端沈下量についても中央導坑における早期閉合の有無によって有意な違いはないことが分かった。

この理由としては、パラメーター解析で想定された地山物性値が道路トンネルでの地山等級⁶⁾でCII～CI相当であり、本坑切上げ掘削後の変位量や変形量が比較的小さく、その差が発現しにくくなったことなどによるものと考えられた。

5. 地山特性の違いによる検証

これまでの検証の結果、中央導坑先進工法を適用した歯長山トンネルでは、道路トンネルでの地山等級でCII～CI相当であることで、切上げ掘削後の本坑の変位量や変形量が比較的小さいために、中央導坑での早期閉合の有無による本坑切上げ掘削後の内空変位量と天端沈下量に有意な違いは現れないと考えられた。

筆者らは、地山の弾性係数が20,000～35,000 kN/m²となる極めて脆弱な地山条件では、中央導坑先進工法を適用しても、本坑切上げ掘削後の変位と変形を小さくするいなし効果の発現は乏しく、中央導坑を適用することで本坑切上げ掘削後の内空変位量や天端沈下量が大きくなることを報告している¹⁾。合わせて、地山条件と導坑径をパラメーターにした数値解析の結果から、地山等級が良好な場合は本坑掘削面積に占める割合が大きい中央導坑を用いることでいなし効果が得られることも報告した¹⁾。

以上のことから、本稿においても表4に示す一般的な道路トンネルにおける地山等級E、DI、CIIに相当する地山条件で図-5に示したモデルを用いた数値解析を実施して、中央導坑における早期閉合の有無による本坑切上げ掘削時に及ぼす影響を検証した。その結果を図-10～15のそれぞれ(a)、(b)に示す。

図-10～15 のそれぞれ(a), (b)には中央導坑における早期閉合の有無に加えて中央導坑を適用しない場合の解析結果についても併記して比較した。図の横軸は切羽距離, (a), (b)のそれぞれ縦軸は内空変位量, 天端沈下量である。

図-10, 11のそれぞれ(a), (b)は表-4に示したCase1に示した地山等級 E の解析結果で, 図-11の(a), (b)は図-10の(a), (b)について施工時に得られる計測値と同様に本坑切掘り掘削時点を初期値として整理したものである。

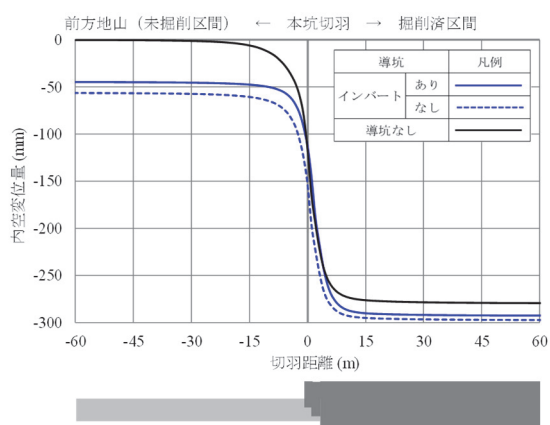
表-4 検証した地山特性

Case No.	1	2	3
地山等級	E	DI	CII
弾性係数 (kN/m ²)	200,000	500,000	1,000,000
単位体積重量 (kN/m ³)	22	22	22
粘着力 (kN/m ²)	400	1,000	2,000
内部摩擦角 (deg.)	25	35	40
ポアソン比	0.48	0.48	0.48

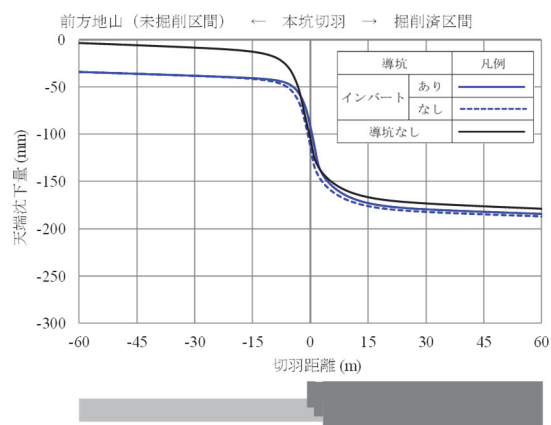
図-10 の(a)を見ると本坑切羽の前方地山では, 中央導坑で早期閉合を適用しないほうが適用した場合よりも内空変位量は大きくなる事が分かる。また, 同図(b)の天端沈下量については, 中央導坑での早期閉合によって有意な違いはなかった。また, 最終値としては中央導坑に早期閉合を適用しないほうが内空変位量, 天端沈下量ともに大きくなった。

本坑切掘り掘削時点から整理した図-11 の(a), (b)を見ると中央導坑で早期閉合を適用すると本坑切掘り後の内空変位量と天端沈下量は, 中央導坑を適用しない場合よりも大きくなる事が分かる。一方で中央導坑に早期閉合をしない場合には中央導坑を適用しない場合と比較して内空変位量は小さくなる事が分かった。また, 天端沈下量については, 中央導坑で早期閉合を適用しない場合と導坑を適用しない場合とでは同程度になり, 導坑に早期閉合を適用した場合よりも小さくなる事が分かった。以上のことから, 地山等級がEとなるような脆弱な地山条件では中央導坑に早期閉合を適用すると早期閉合を適用しない場合と比較して本坑切掘り掘削後の変位量, 変形量が大きくなる事が分かった。

一方で, 地山等級 DI および CII を想定した図-12 および 14 のそれぞれ(a), (b)を見ると初期地山からの内空変位量と天端沈下量は, 中央導坑を適用すると中央導坑を

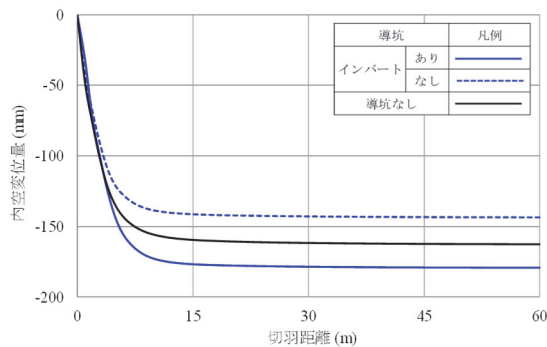


(a) 内空変位量

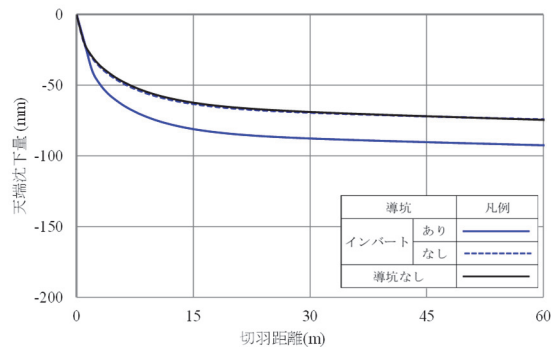


(b) 天端沈下量

図-10 本坑切掘り掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量 (地山等級 E/初期地山から)

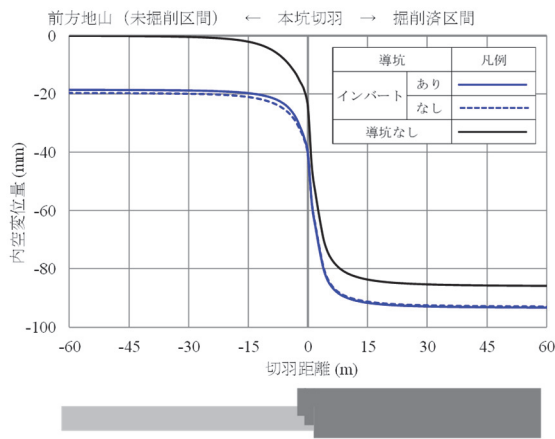


(a) 内空変位量

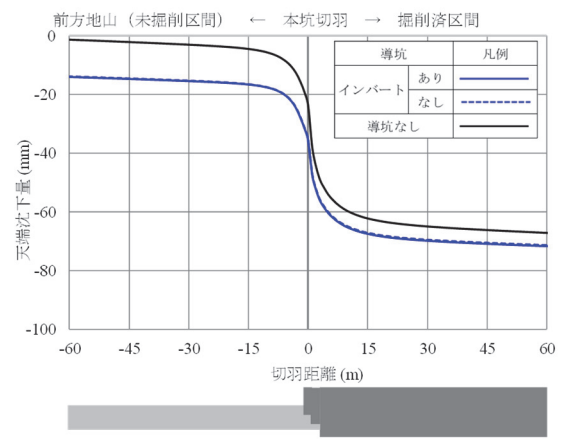


(b) 天端沈下量

図-11 本坑切掘り掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量 (地山等級 E/本坑切羽から)

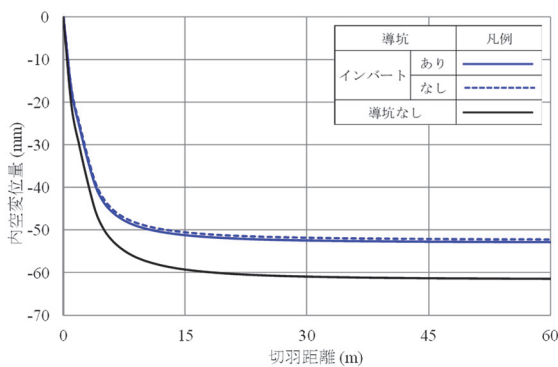


(a) 内空変位量

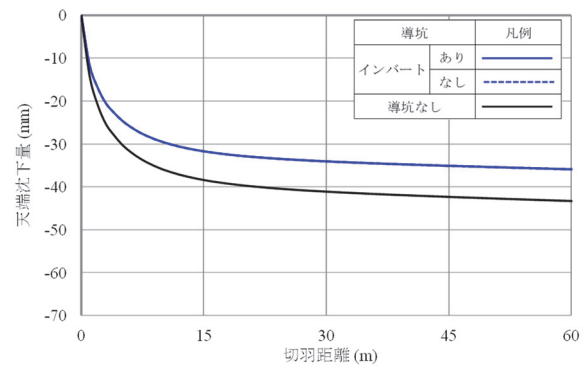


(b) 天端沈下量

図-12 本坑切掘り掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量（地山等級 DI/初期地山から）

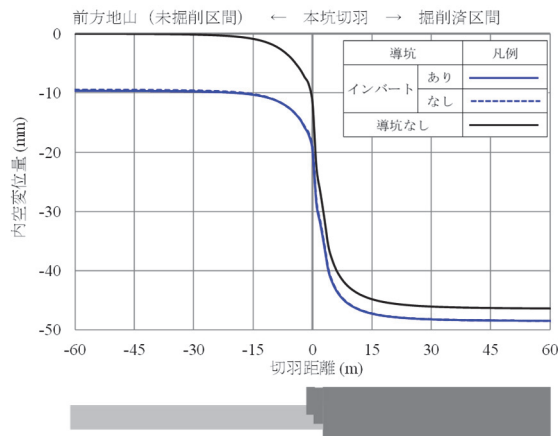


(a) 内空変位量

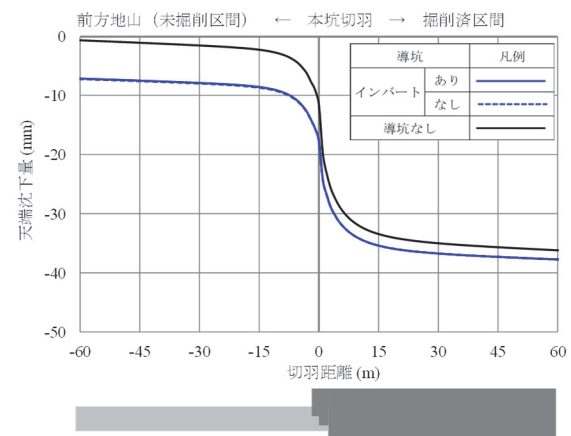


(b) 天端沈下量

図-13 本坑切掘り掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量（地山等級 DI/本坑切羽から）



(a) 内空変位量

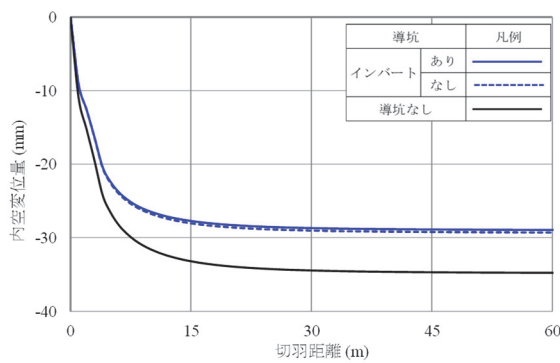


(b) 天端沈下量

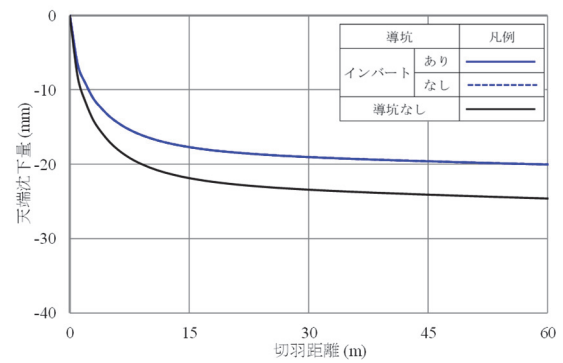
図-14 本坑切掘り掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量（地山等級 CII/初期地山から）

適用しない場合よりも大きくなることが分かる。また、中央導坑で早期閉合を適用した場合と適用しない場合では内空変位量および天端沈下量に有意な違いは見られなかった。計測値と同様に本坑切掘り掘削時を初期値にして整理した図-13および 15 のそれぞれ(a), (b)を見ると地山等級 DI および CII となる地山条件では中央導坑で早期閉合を適用した場合と適用しない場合に内空変位量と天

端沈下量に有意な違いは見られないものの、中央導坑を適用しない場合と比較して内空変位量と天端沈下量が小さくなることが分かった。このことから、地山等級 CII ～CI 相当に相当する歯長山トンネルで、中央導坑の早期閉合によって切掘り掘削後の本坑挙動に与えた影響が限定的だった結果と地山特性に基づいた本検証結果も同様の結果となった。



(a) 内空変位量



(b) 天端沈下量

図-15 本坑切詰め掘削後の本坑の内空変位量と天端沈下量（地山等級 CII／本坑切羽から）

6. 結論

数値解析を用いた本検証の結果、地山等級が E となるような脆弱な地山条件では、中央導坑で早期閉合を適用すると本坑切詰め掘削後の内空変位量、天端沈下量ともに中央導坑を適用しない場合よりも大きくなることが分かった。この理由としては、中央導坑掘削時に早期閉合を実施することによって、本坑切詰め掘削時に生じる本坑切羽前方地山の変位や変形を抑制する、すなわちゆるみを抑制する効果が発現する可能性があると考えられる。一方で、中央導坑で早期閉合を適用しない場合は、本坑切羽前方の地山の変位や変形を抑制する効果が小さくなり、中央導坑そのものを適用しない場合よりも本坑切詰め掘削後の内空変位量を小さくできると考えられる。このことから、地山等級が E となる脆弱な地山条件で、いなし効果を期待する場合には中央導坑における早期閉合の適用には慎重な検討を要すると考えられる。

また、地山等級が DI や CII となる比較的良好な地山条件では、本坑切詰め掘削後の内空変位量や天端沈下量に与える中央導坑での早期閉合による影響は限定的で有意なものではないと考えられた。この理由としては、良好な地山条件では、比較的小さい断面積の中央導坑での変位量や変形量そのものが小さいために本坑切詰め掘削後の変位量や変形量に有意な違いは現れなかったものと考えられた。一方で、中央導坑での早期閉合の有無にかかわらず、良好な地山条件では中央導坑を適用することによって、本坑切詰め掘削後の内空変位量や天端沈下量は小さくなり、いなし効果が期待できると考えられた。

以上のことから、本検証で得られた結論は、つぎのとおりとなる。

- 1) 地山等級が E 相当の脆弱な地山条件において、中央導坑掘削に早期閉合を適用すると中央導坑を適用しない場合よりも本坑切詰め掘削後の内空変位量および天端沈下量が大きくなることがある。このため、中央導坑掘削によるいなし効果を期待する

場合には中央導坑における早期閉合の適用の可否について慎重に検討する必要がある。

- 2) 地山等級が DI および CII 相当の地山条件では、中央導坑での早期閉合の有無が本坑切詰め掘削後の内空変位量や天端沈下量に与える影響は限定的で小さい。一方で、中央導坑での早期閉合の有無にかかわらず、本坑切詰め掘削後の内空変位量や天端沈下量を小さくするいなし効果が期待できる。

7. おわりに

これまで四国横断自動車道 齒長山トンネルでの中央導坑先進工法区間をモデル化して中央導坑での早期閉合が及ぼす本坑切詰め掘削後の変位や変形への影響を検証した。その結果、脆弱な地山条件では、中央導坑における早期閉合は適用しないほうが中央導坑掘削によるいなし効果を期待できる可能性があることが分かった。

一方で、中央導坑先進工法を適用した際に、中央導坑そのものにも早期閉合が施される地山条件では、中央導坑の支保工の変状や切羽が不安定になるなど、中央導坑そのものの安定性が確保できない場合が多いと考えられる。このことから中央導坑先進工法を適用して本坑切詰め掘削後の内空変位量や天端沈下量を小さくするいなし効果を期待するにあたっては、中央導坑の支保剛性なども含めて十分に検討する必要があると考えられる。

また、中央導坑によるいなし効果の発現は、地山の弾性係数だけでなく土被りや地山強度比などの地山特性に加えて、中央導坑の掘削断面積といった導坑の諸元や導坑と本坑の切羽位置の関係などによる影響も考えられる。今後は、これらのパラメーターなどに着目して、いなし効果が期待できる導坑の設計条件などについて検証を進める予定である。

謝辞：本検証を行う当たり齒長山トンネルの計測データ

の活用について、ご了解しました西日本高速道路株式会社に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 天野角雄, 下田哲史, 青嶋寿夫, 高橋浩: 押出し性泥岩を頂設導坑で貫く 上信越自動車道 日暮山トンネル II 期線工事, トンネルと地下, 351 号 Vol.30 No.11, pp.17-23, 1999.
- 3) 前田良文, 和田信良, 近森博, 土田淳也: 名水百選など周辺水環境に配慮し中央導坑方式を採用, トンネルと地下, 468 号 Vol.40 No.8, pp.17-25, 2009.
- 4) 大森 禎敏, 翟 思敏, アバヤワルダナ デビニ, 砂金伸治, 和田 吉憲, 中島 健二: 導坑の早期閉合による本坑挙動の違いについて, 土木学会 第 76 回年次学術講演会概要集, III-35, 2021.
- 5) 日本道路公団試験研究所: トンネル数値解析マニュアル, p.3_10, 1998.
- 6) 日本道路公団試験研究所: トンネル数値解析マニュアル, p.3_26, 1998.

(2021. 8. 6 受付)

THE EFFECT OF EARLY CLOSURE OF THE CENTER DRIFT DUE TO DIFFERENCES IN GROUND CHARACTERISTICS ON THE BEHAVIOR OF THE MAIN TUNNEL

Sadatoshi OHMORI, Shimin ZHAI, Abeyawardena DEVINI and Nobuharu ISAGO

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. On the other hand, under fragile ground conditions, even though the early closure may be applied in the center drift, the “dodging effect” of the widening excavation of the main tunnel has not been sufficiently verified. In this paper, the effect of early closure of the center drift on the behavior of the main tunnel was examined using the measurement results and numerical analysis results obtained at the Hanagayama Tunnel on the Shikoku Crossing Expressway, which applied the center drift advancing method. In addition, the effect of early closure at the center drift on the main tunnel due to the difference in ground characteristics was also examined.