

# 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

大森 禎敏<sup>1</sup>・岡部 正<sup>2</sup>・砂金 伸治<sup>3</sup>・弓場 進<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設(株) 本社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

<sup>2</sup>正会員 (株)ケー・エフ・シー 本社技術部 トンネル技術室

(〒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

<sup>3</sup>正会員 公立大学法人 首都大学東京 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

<sup>4</sup>非会員 国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所

(〒880-8523 宮崎県宮崎市大工町二丁目 39)

E-mail:syumiba-s8910@mlit.go.jp

東九州自動車道芳ノ元トンネルは、宮崎県南部に計画された延長 1,880m の二車線トンネルである。本トンネルでは計画域に分布する脆弱な日南層群に対して剛性の大きな支保工構造を有する導坑を用いた中央導坑先進ベンチカット工法を適用した。本稿では、剛性の大きな支保構造を有する導坑を適用した際の本坑計測結果をもとに、導坑の変位抑制効果について考察する。

**Key Words:** weak ground conditions, center drift, support effect, stiffness of support

## 1. はじめに

山岳トンネルの掘削工法のうち中央導坑先進工法は、本坑拡幅掘削前に地質状況を確認する必要がある場合に適用されることが多い。宮崎県南部の清武と日南間に計画された東九州自動車道 芳ノ元トンネル北工区でも本坑拡幅掘削時の支保選定のための地質情報を把握する目的で中央導坑先進ベンチカット工法を適用した。

適用した中央導坑の掘削形状は地質状況に関わらず直径 4.0m と 6.0m の真円とし、導坑の支保構造は、掘削径によらず同一の支保構造を採用し、その厚さが 20cm で設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup> の高強度吹付けコンクリートと H-150 の鋼アーチ支保工の小断面トンネルとしては大きな剛性を有する支保構造とした。

この大きな剛性を有する支保構造の中央導坑を適用した結果、本坑拡幅掘削後の本坑の変位と変形が中央導坑を適用しない区間と比較して大きくなっていると考えられた。また、直径 6.0m の導坑断面よりも直径 4.0m の導坑断面を適用した区間のほうが本坑拡幅掘削後の本坑の変位と変形が大きいとも考えられた。

これまでの既往の研究や報告によると、導坑によって本坑拡幅掘削時の変位が減少した施工実績<sup>1)</sup>や導坑掘削によって本坑拡幅掘削時の変位と変形の低減効果が数値解析を用いて検証<sup>2)3)</sup>されている。しかしながら、本トンネルのように導坑を適用したほうが本坑拡幅掘削時の変位や変形が大きくなるという報告は見当たらない。

本文では、本トンネルで得られた計測結果を紹介するとともに、計測結果から推察される中央導坑が与える本坑掘削時の変位抑制効果について考察する。

## 2. 芳ノ元トンネルの地質地形概要

図-1 に芳ノ元トンネルの施工位置と日南層群の分布域<sup>4)</sup>を示す。本トンネルは宮崎県の南部に計画され、計画域には砂岩と頁岩を主体とする古第三紀の日南層群が分布している。日南層群は地質が生成される過程では砂岩と頁岩の互層構造であったものが、1,700 万年前後に発生した海底での大規模地すべりによって乱されたオリストストロームで、地質構造を比較的保持した互層(整然層)と乱された混在層(乱雑層)に分別されると考え



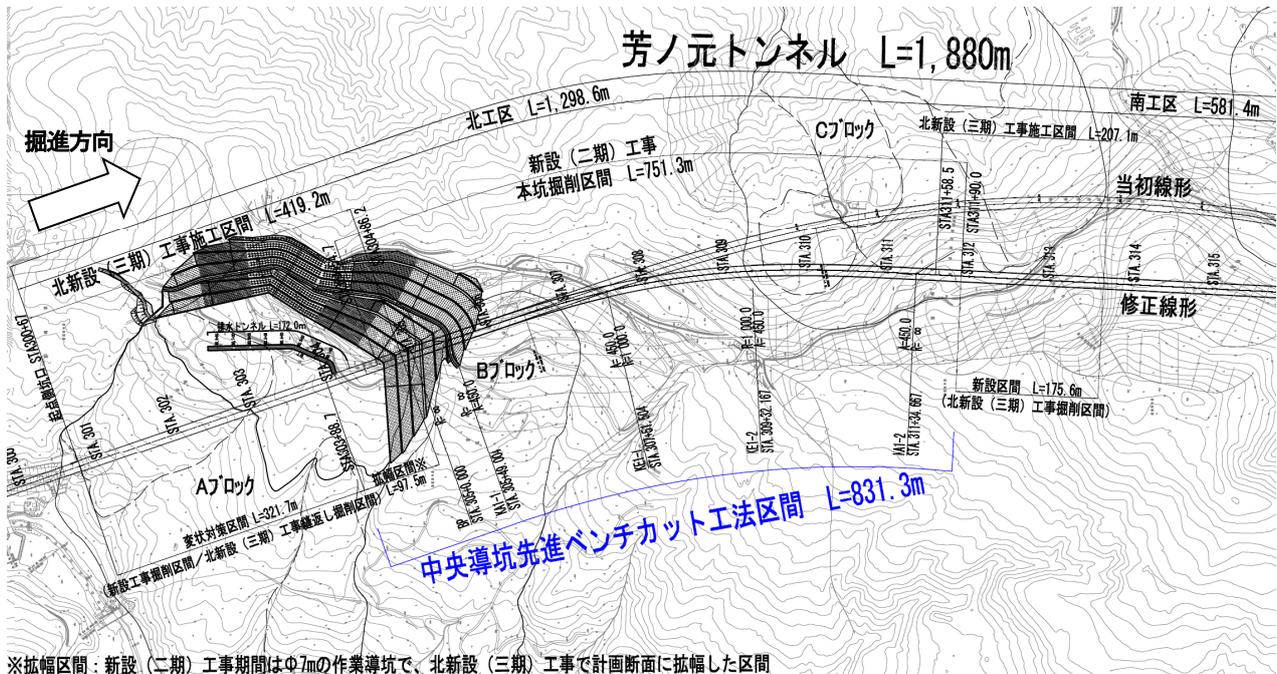


図4 トンネル北工区平面図

表-1 現位置試験での地山物性値

STANo	地質分類	地山の弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	試験方法
STA.304+38.7	砂岩頁岩混在層	31,040	孔内水平載荷試験
STA.304+87.7		36,670	平板載荷試験
STA.305+37.7	砂岩頁岩互層	30,789	孔内水平載荷試験
STA.305+87.7		33,480	平板載荷試験
【参考】 日本道路公団	地山等級E	20,000 ~300,000	-

ないと考えている。導坑を適用しない区間の土被り比は6.44~8.99であり、導坑適用区間よりも大きくなっている。これは導坑なしの区間が工区境の土被りが大きな区間に該当しているからである。

### 3. 中央導坑先進ベンチカット工法適用の経緯

本トンネルでは、掘削開始直後から切羽が不安定であり先受工に加えて鏡補強工を追加して切羽の安定を確保した。掘削にともなって土被りが大きくなると沈下挙動も大きくなり、トンネル脚部に変状が発生した。その結果、起点側坑口から322m地点で工事を一時中止してトンネル形状、支保構造および掘削工法の見直しを実施した。工事を一時中止する時点で適用していたトンネル形状と支保パターンを図-5に、支保工の変状状況を写真-1に示す。トンネルに作用した荷重がトンネルの下半脚部に集中したことで、このような変状が発生したと考えられた。すなわち、トンネル下半からインバートにかけての軸力伝達が阻害されるようなトンネル形状であることが、変状発生の変因として推定された。

表-2 各支保パターンの土被り比

支保パターン	導坑	土被り比(H/D)		
		最小	最大	平均
E-2	φ4m	5.26	7.80	6.57
	φ6m	5.79	7.63	6.77
E-2-L	導坑なし	7.23	8.99	8.23
	φ4m	5.44	5.78	5.63
	φ6m	-	-	-
E-3	導坑なし	6.44	7.83	6.99
	φ4m	5.17	6.87	6.06
	φ6m	5.54	5.94	5.75
	導坑なし	-	-	-

D: 本坑各支保パターンの掘削径

地質調査の結果、工事を中止した322m地点以奥についても表-1に示したように砂岩頁岩混在層と砂岩頁岩互層で弾性係数は大きく変化しないと考えられ、トンネルに作用する荷重も大きいと想定された。そのためトンネル形状を力学的に有利になるよう円形に近づけた(図-6)。支保パターンは表-3, 4に示すものとし、それぞれの適用区間はトンネルの縦横比を勘案した地山強度比に基づいて決定した。

トンネル掘削工法は、本坑拡幅掘削前に地質状況や弾性係数などの地山物性値を推定するために、中央導坑先進ベンチカット工法とした。中央導坑は本坑の掘削に先立って導坑適用区間全線の掘削を完了させた。中央導坑の標準断面の形状は、本坑拡幅掘削前の地山のゆるみができるだけ少なくするために図-7に示すようにφ4.0mの真円とした。ただし、図-8に示すように中央導坑掘削時の機械入替えのために導坑掘削60mごとにφ6.0mの拡幅断面区間を20mを設けた。

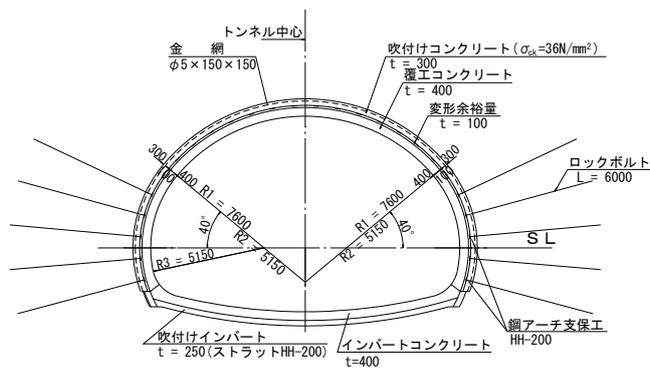


図5 工事中止した時点での支保パターン(E-1)



写真1 支保工の変状状況

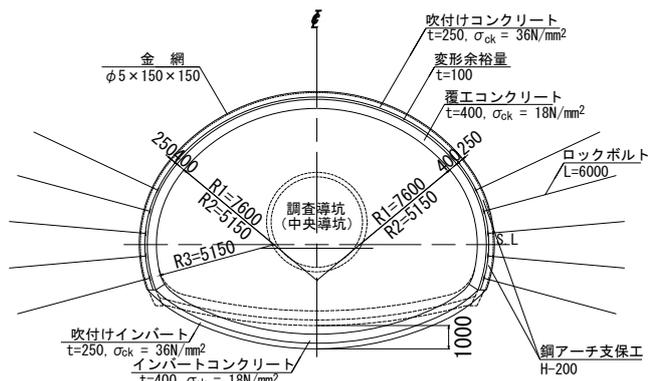
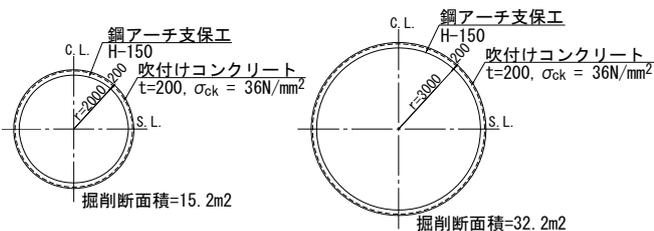


図6 新しいトンネル断面と支保パターン(E-2)

表3 修正設計後の支保パターン

支保パターン	吹付けコンクリート		鋼アーチ支保工	
	設計強度	厚さ	規格	サイズ
E-2	36N/mm <sup>2</sup>	25cm	ss400	H-200
E-3		30cm		H-250
E-4		30cm		H-250
(1次2次)		15cm		H-150
E-2-L*		40cm		H-250

※E-2-Lは非常駐車帯の支保パターン



(a) 標準断面 (φ4.0m) (b) 拡幅断面 (φ6.0m)

図7 中央導坑の支保パターン

表4 各支保パターンの掘削断面積 (導坑含む)

支保パターン	上半 (m <sup>2</sup> )	下半 (m <sup>2</sup> )	インバート (m <sup>2</sup> )	合計 (m <sup>2</sup> )
E-2	822	306	272	1400
E-3	833	309	280	1422
E-2-L	101.3	337	37.1	172.1

※E-4は未実施のため割愛

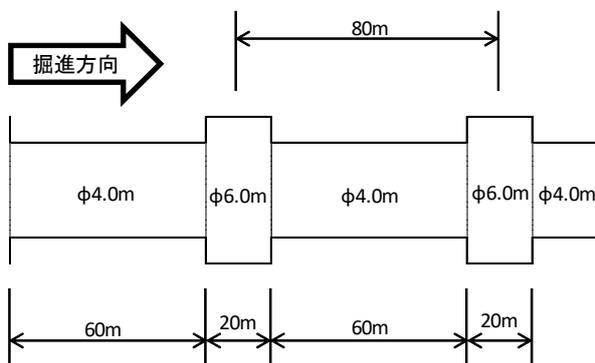


図8 中央導坑での拡幅断面適用概要

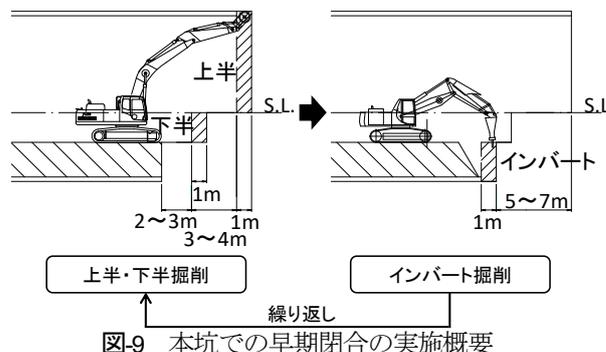


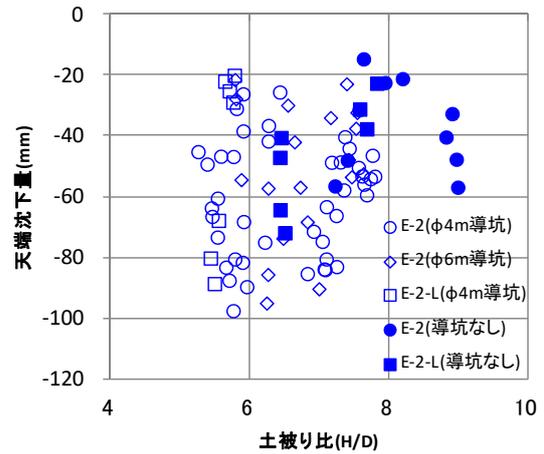
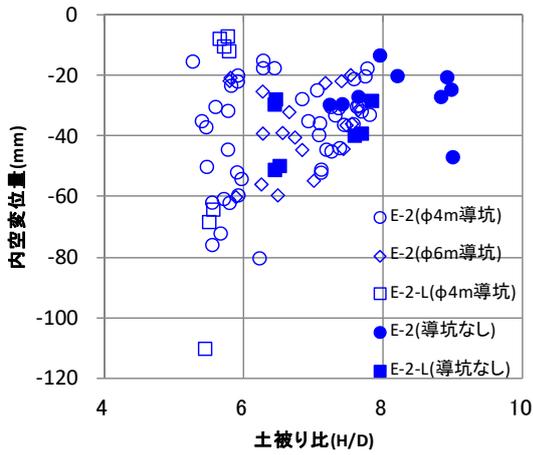
図9 本坑での早期閉合の実施概要

本坑拡幅掘削は、掘削後の変位と変形を抑制するために早期閉合を実施した。図9に示すように上半切羽から6~8m後方で鋼製インバート支保工と吹付けコンクリートで断面を閉合した。

#### 4. 本坑の計測結果

##### (1) 内空変位, 天端沈下測定結果

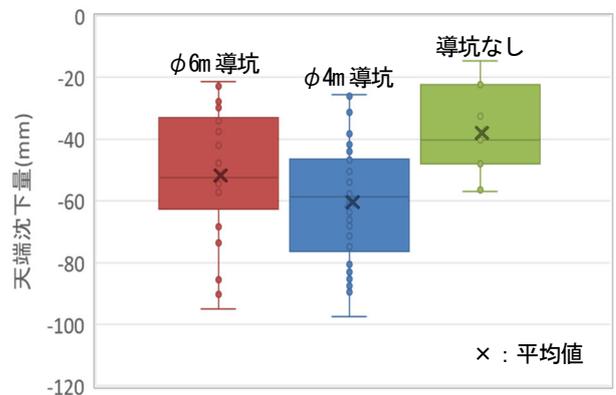
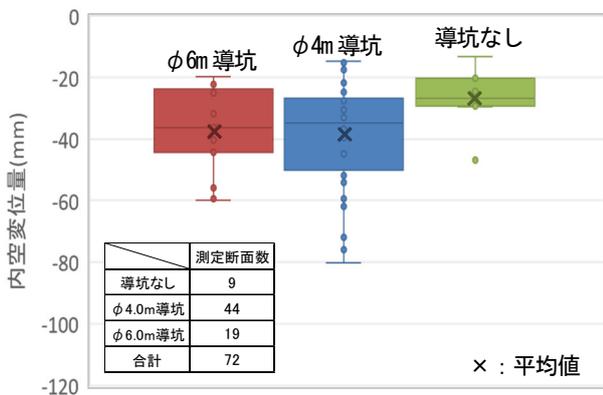
図10の(a),(b)に本坑拡幅掘削時の内空変位量と天端沈下量を示す。ここで、図示した内空変位量と天端沈下量は、変位と変形が収束した上半切羽からの距離が45m地点での値である。図の横軸には土被りをトンネル掘削径Dで除した土被り比を、縦軸にはそれぞれ内空変位量、天端沈下量としている。また、E-2は本坑標準断面の支保パターンであり、E-2-Lは非常駐車帯となる本坑



(a) 内空変位量

(b) 天端沈下量

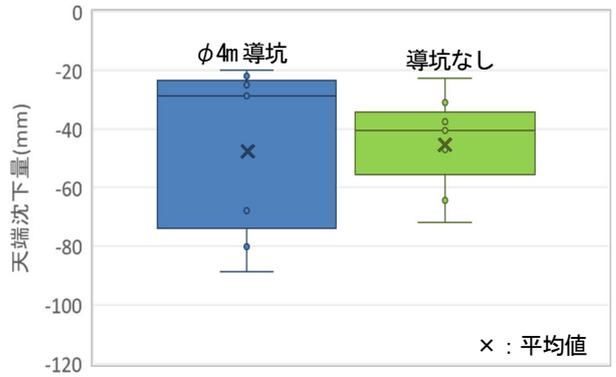
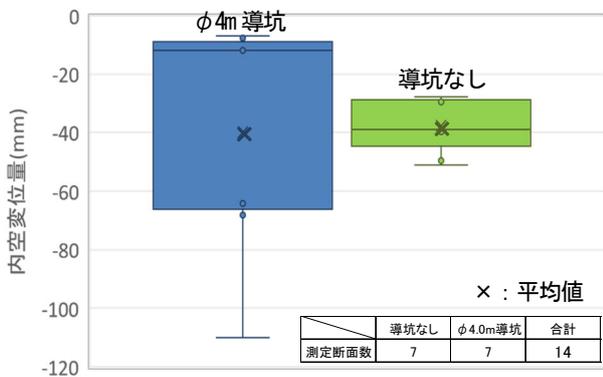
図-10 導坑先進区間の本坑の内空変位と天端沈下 (E-2およびE-2-L)



(a) 内空変位量

(b) 天端沈下量

図-11 支保パターン E-2 での内空変位量と天端沈下量



(a) 内空変位量

(b) 天端沈下量

図-12 支保パターン E-2-L での内空変位量と天端沈下量

拡幅断面の支保パターンである。これらの図から中央導坑があっても内空変位量や天端沈下量が必ずしも小さくならないと考えられた。図-11, 12 のひげ付き箱図は図-10 で得られた測定結果を φ9.0m の導坑あり, φ7.0m の導坑あり, 導坑なしごとに内空変位量, 天端沈下量について本坑支保パターン E-2, E-2-L で整理したものである。

ここで用いたひげ付き箱図は, 中央値を含めて第1四分位数と第3四分位数を決定していて, 四分位範囲の

1.5 倍を上下限とした。支保パターン E-2 の導坑なしに内空変位量で外れ値があった。

これらの図から, 支保パターン E-2 では導坑がある場合と比較して導坑を設けない場合のほうが内空変位量, 天端沈下量とともに小さくなる傾向があることが分かる。また, 導坑径で比較すると φ4.0m よりも φ6.0m の方が内空変位量と天端沈下量は小さくなっている。非常駐車帯用の本坑拡幅断面である支保パターン E-2-L では, 中央値で導坑なしのほうが φ4.0m 導坑よりも内空変位量

と天端沈下量ともに大きくなっているが、計測値の分布状況から導坑の有無による有意な差は見いだせなかった。

図-13の(a),(b)に支保パターン E-3 の内空変位量と天端沈下量を示す。支保パターン E-3 では、中央導坑なしで施工した区間はない。このため導坑の径による内空変位量と天端沈下量を比較した。内空変位量では導坑の径による明瞭な違いは見られないが、天端沈下量では導坑径が  $\phi 6.0\text{m}$  のほうが  $\phi 4.0\text{m}$  よりも小さくなっていると考えられた。支保パターン E-2 と同様に内空変位量と天端沈下量のひげ付き箱図を図-14の(a),(b)に示す。内空変位量では、支保パターン E-2 とは異なり導坑径  $\phi 4.0\text{m}$  のほうが  $\phi 6.0\text{m}$  よりも小さい傾向があり、天端沈下量では支保パターン E-2 と同様に導坑径  $\phi 6.0\text{m}$  のほうが  $\phi 4.0\text{m}$  よりも小さい傾向があることが分かった。

支保パターン E-2 では、本坑拡幅掘削後の内空変位量と天端沈下量が導坑がないと小さく、また、導坑径が大きいと小さくなる傾向が見られた。しかし、本坑拡幅断面である支保パターン E-2-L と支保パターン E-3 では、導坑の有無、導坑径の違いによる本坑拡幅掘削後の内空変位量と天端沈下量の現れ方に E-2 と同様の傾向があることは確認できなかった。その理由としては、支保パターン E-2-L および E-3 の適用区間が短いためにデータ数が少なかったことに加えて、切羽ごとの地質状況や施工

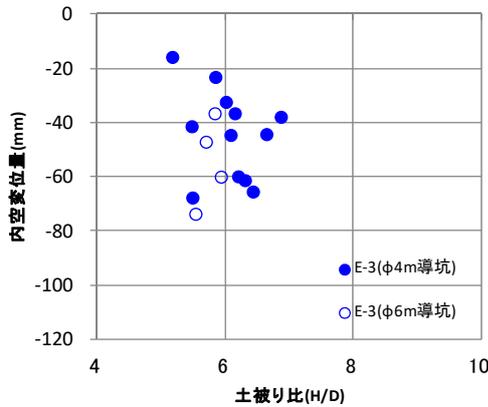
サイクルの影響などが考えられるが、定かではない。

しかしながら、計測断面数の多い支保パターン E-2 での計測結果から、本坑拡幅掘削時の内空変位量と天端沈下量が中央導坑がある場合よりもない場合のほうが小さくなり、導坑径が大きいほど小さくなると考えられた。

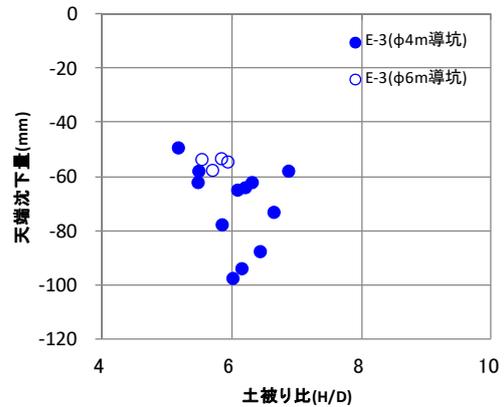
## (2) 支保部材の発生断面力

本トンネルでは、適用した本坑支保パターンの安定性を検証するため吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の応力測定を実施した。測定断面での測定位置を図-15に示す。図-16と図-17に鋼アーチ支保工の軸力と吹付けコンクリートの軸応力の測定結果を示す。いずれの測定結果も内空変位量、天端沈下量と同様、収束と考えられた上半切羽からの切羽距離 45m 地点での測定値である。鋼アーチ支保工の軸力、吹付けコンクリートの軸応力ともに図-15に示した測定断面あたり 8 測定点での平均値で、横軸は土被り比  $H/D$  とした。

測定断面ごとの地質状況の違いなどがあり、鋼アーチ支保工の軸力、吹付けコンクリートの軸応力ともにばらつきが多い結果となった。しかしながら図-16(a)および図-17(a)の鋼アーチ支保工の軸力測定結果では支保パターン E-2 では、明瞭な差が見られなかった。

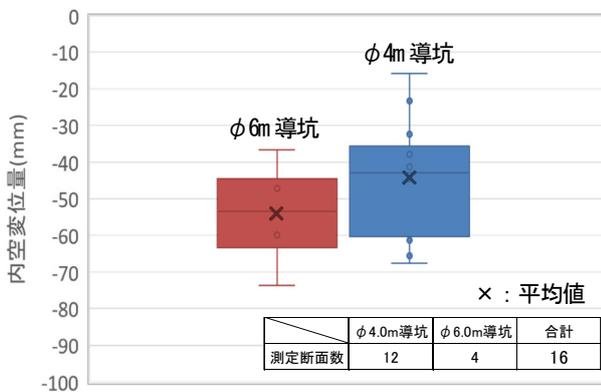


(a) 内空変位量

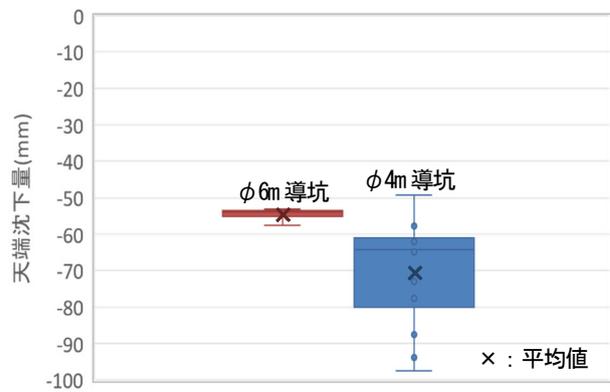


(b) 天端沈下量

図-13 導坑先進区間の本坑の内空変位と天端沈下 (E-3)



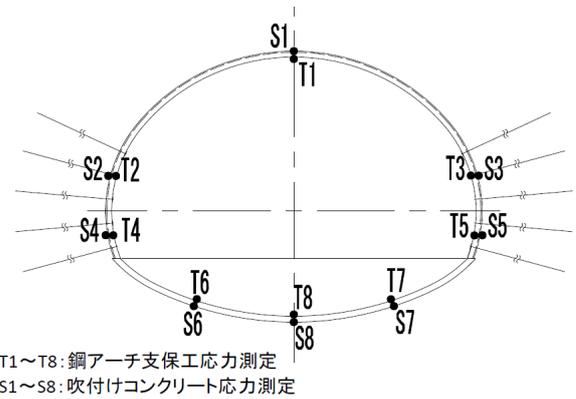
(a) 内空変位量



(b) 天端沈下量

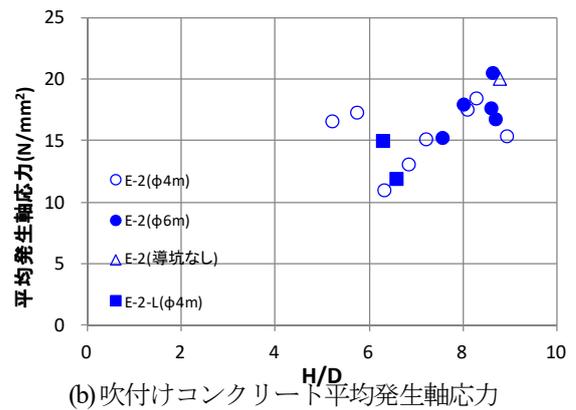
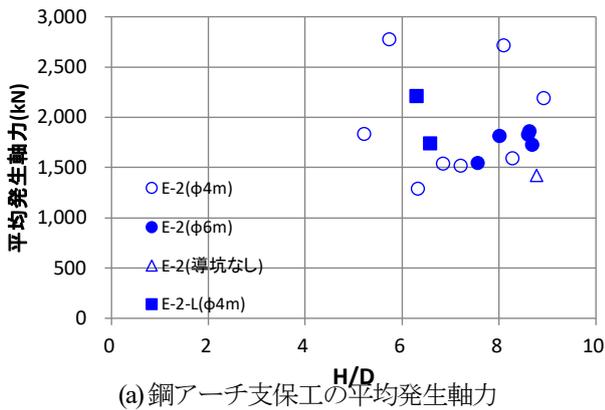
図-14 支保パターン E-3 での内空変位量と天端沈下量

図-18 の(a), (b)に導坑の有無，導坑径の違いが比較的明瞭であった鋼アーチ支保工の発生軸力のひげ付き箱図を示す．この図から支保パターン E-2 では中央値では異なるものの計測値の分布状況から中央導坑がある場合よりはるかにない場合の方が，また導坑径が大きいほど，発生軸力が小さい傾向となっていた．さらに支保パターン E-3 では， $\phi 4.0\text{m}$  導坑を適用した断面で外れ値があるものの，その傾向としては導坑径が小さいと鋼アーチ支保工の発生軸力が大きくなっていった．このことは本坑拡幅掘削時に計測された内空変位量および天端沈下量での導坑の有無，導坑径の大きさによる傾向と同じであった．



T1～T8: 鋼アーチ支保工応力測定  
S1～S8: 吹付けコンクリート応力測定

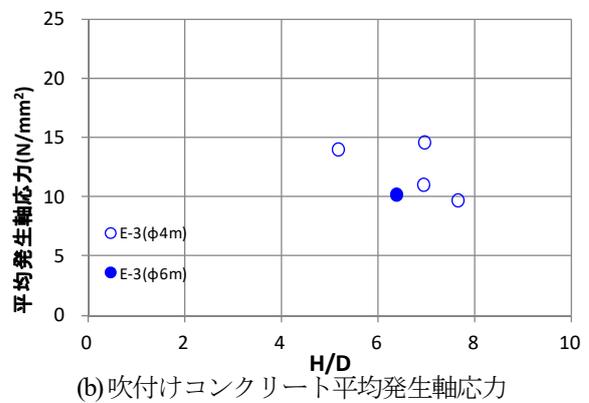
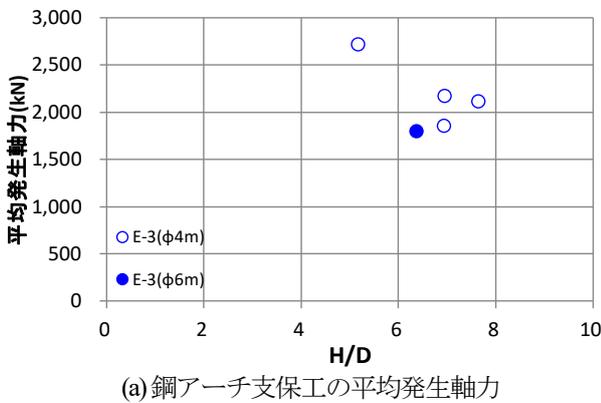
図-15 支保部材の応力測定位置



(a) 鋼アーチ支保工の平均発生軸力

(b) 吹付けコンクリート平均発生軸力

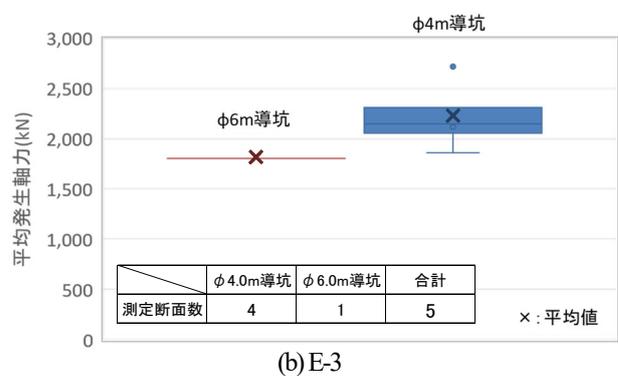
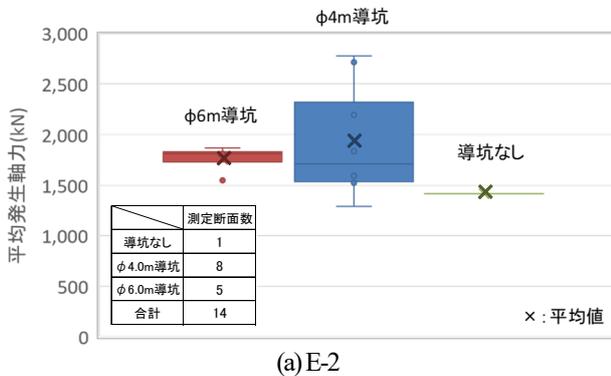
図-16 支保パターン E-2 および E-2-L での支保部材発生断面



(a) 鋼アーチ支保工の平均発生軸力

(b) 吹付けコンクリート平均発生軸力

図-17 支保パターン E-3 での支保部材発生断面力



(a) E-2

(b) E-3

図-18 鋼アーチ支保工の発生軸力

## 5. まとめ

古谷ら<sup>8)</sup>によると、先行して掘削する導坑によって地山応力が解放され、切広げ掘削時の応力解放を低減し、本坑支保工に作用する荷重が低減される効果を「いなし」としている。また、高橋ら<sup>9)</sup>は膨張性地山における導坑の適用性に関する実験的研究において、導坑があることで本坑拡幅時の内空変位量と天端沈下量が小さくなるとしている。

しかしながら、本トンネルでは内空変位量と天端沈下量は、導坑がある場合よりはない場合の方が、また導坑径が大きいほど小さくなる傾向を確認した。また、支保部材の発生断面力についても同様の傾向があると考えられた。このことから本トンネルのように軟弱な地山に、剛性の大きな支保構造を有する導坑を適用すると、本坑拡幅掘削の先行変位を抑制する先行支保的な効果があると推察された。

今後は、得られた計測結果をさらに分析するとともに数値解析などを用いて高剛性支保を有する導坑が与える本坑掘削時の影響について検証したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 御手洗良夫, 植松澄夫, 西間木朗: 大断面トンネルにおける導坑の三次元的地山改良効果の研究, トンネル工学研究発表会 論文・報告集 第5巻, pp.111-116, 1995.
- 3) 岩崎幸雄, 廣田政矢, 高橋浩, 黒川幸彦, 奥田雄大: 膨張性地山における円形導坑の有意性について, 土木学会第54回年次講演会III-B381, pp.762-763, 1999.
- 4) 宮崎地質研究会 編: 宮崎県の地質フィールドガイド, p4, 2013.
- 5) (財)みやざき長寿社会推進機構(じゅびあ財団): じゅびあ平成16年9月号, 2004.
- 6) 酒井治孝: 岬オリストストローム帯の成因と高千穂変動の再検討, 地質学会誌 Vol.94, No.12, 1988.
- 7) (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, p152, pp.161-162, 2006.
- 8) 古谷綾子, 高橋浩, 中川浩二: 数値解析からみた押し出し性地山におけるトンネル掘削挙動に関する研究, 土木学会中国支部第52回研究発表会, pp.373-374, 2000.

(2019. 8. 9 受付)

## DISPLACEMENT SUPPRESSION EFFECT OF DRIFTS WITH HIGH RIGIDITY SUPPORT IN WEAK GROUND CONDITION

Sadatoshi OHMORI, Tadashi OKABE ,Nobuharu ISAGO and Susumu YUMIBA

The Higashi Kyushu Expressway Yoshinmoto Tunnel is a two-lane tunnel with a length of 1,880 m, planned in the southern part of Miyazaki Prefecture. Vulnerable Nichinan Group is distributed in this project area. The authors applied a benchcut method using a center drift with a large supporting structure of rigidity in this project.

In this paper, we consider the effect of restraining the preceding displacement during widening excavation of the main tunnel by a drift with a rigid support structure.