

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

西原 圭美¹・熊谷 幸樹²・川端 康夫³・野地 敦夫⁴・小西 裕之⁵

¹正会員 飛鳥建設 土木本部土木技術部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8番15号 Wビル 4F)
E-mail: Tamami_Nishihara@tobishima.co.jp

²正会員 飛鳥建設 土木本部土木技術部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8番15号 Wビル 4F)
E-mail: Koki_Kumagai@tobishima.co.jp

³正会員 飛鳥建設 土木本部インフラ RN 部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8番15号 Wビル 4F)
E-mail: Yasuo_Kawabata@tobishima.co.jp

⁴正会員 飛鳥建設 首都圏土木支店 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8番15号 Wビル 3F)
E-mail: Atsuo_Noji@tobishima.co.jp

⁵正会員 飛鳥建設 首都圏土木支店 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8番15号 Wビル 3F)
E-mail: Hiroyuki_Konishi@tobishima.co.jp

近年, 既設の道路トンネルを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. そのうち, 既設トンネルを供用しながら活線拡幅するリニューアル工事の事例は多くないことから, 非対称となるトンネル支保構造の安全な施工方法や設計手法が十分確立されているとは言えないのが現状である. そこで, 非対称なトンネル支保構造を有する道路トンネルの活線拡幅工事において, A 計測に加えてトンネル支保工の B 計測を実施し, 非対称なトンネル支保構造の変位挙動を把握し, 鋼製支保工やフットパイルに発生する断面力の増分や分布状況から支保機能について考察した. その結果, 鋼製支保工の軸力分布が非対称となることや既設側の鋼製支保工に負の曲げモーメントが発生することなどを明らかにした.

Key Words: overcutting, tunnel support structure, asymmetry, measurement, FEM

1. はじめに

一般に山岳トンネルの施工ではトンネル支保構造は左右対称の構造となるが, 既設トンネルが中央部に位置しない活線拡幅工事では, 左右均等に掘削して支保することが困難であるため, トンネル支保構造は掘削中だけでなく掘削完了後も非対称な構造になる場合がある. トンネル支保構造が非対称になる活線拡幅工事は現在事例は数少ないが¹⁾, 今後需要が高まることが考えられるため, 確実に安全な設計手法や施工方法を確立する必要がある. そこで, トンネル支保構造が非対称である活線拡幅工事の施工において, 鋼製支保工およびフットパイルの断面力測定 (B 計測) を実施し, 支保工およびフットパイルの作用効果を検証した.

本報告では, 非対称なトンネル支保構造の施工性について述べるとともに, B 計測結果に基づいて支保工の作用効果について考察する.

2. 工事概要と施工実績

(1) 工事概要

工事の概要を表-1に示す.

a) 地形・地質概要

図-1に地質縦断図を示す.

当該地は房総半島南部の上総丘陵内に位置し, 河川の

表-1 工事概要

工事名	県単道路改良 (幹線) 工事 (蔵玉隧道・拡幅工)
発注者	千葉県君津土木事務所
施工者	飛鳥・伊藤特定建設工事共同企業体
施工場所	一般国道 465 号君津市蔵玉
工期	2020 年 12 月 23 日 ～2023 年 1 月 10 日
トンネル掘削延長	152.0m
掘削方式	NATM 工法(機械掘削方式)
ずり運搬方式	タイヤ方式

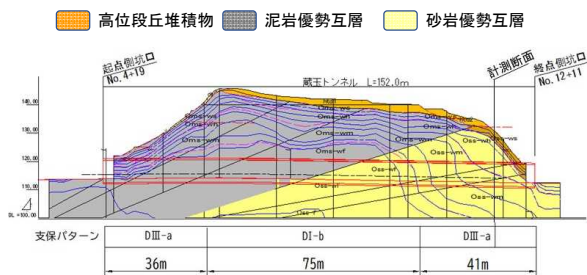


図-1 地質縦断面

浸食によって形成された段丘（台地）を横断する形となっている。

両坑口部は段丘崖にあたり急崖を成すが、トンネル部は段丘部を通過するため台地状の平坦な地形となっている。

地質は上総層群大田代（おおただい）層が分布する。上総層群はほぼ整合に重なる厚さ 3,000m 以上の深海成～浅海成の地層であり、前期から中期更新世の堆積とされる。上総層群は 12 層に分けられ、大田代層は上位（北）から 7 層目の中位に相当し、堆積年代は 120～90 万年前頃と推定され、最大層厚は 540m、蔵玉付近では 300m 程度の層厚がある。

泥岩と砂岩の互層からなり、泥岩優勢の部分と砂岩優勢の部分とを繰り返す。堆積環境は大陸斜面の中～上部と推定され、砂岩中にはスランプ構造が認められるため、泥質の堆積環境において一定間隔で海底地すべり等により砂質材料が供給されたと考えられる。

トンネル起点側は泥岩優勢であるが、終点側に向け砂岩優勢に遷移する。ただし、断層等の不連続面などは確認されない。泥岩は軟岩程度、砂岩は未固結から良く締まった砂質土程度の強度である。

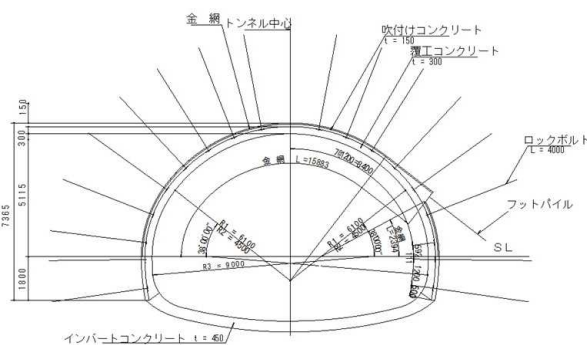


図-2 支保パターン図 (D I-b)

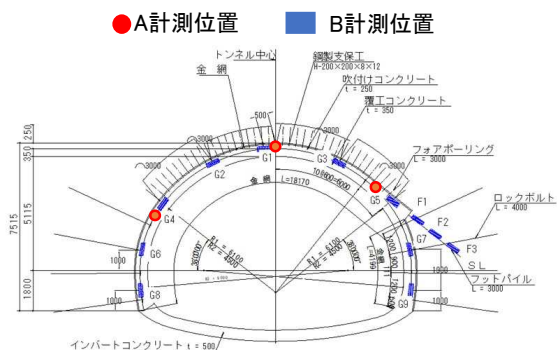


図-3 支保パターン図 (D III-a)

b) 非対称な支保構造と計測工の概要

本トンネルの非対称な支保パターンを図-2 および図-3 に示す。これらの図より両支保パターンとも、左側の鋼製支保工は全域で曲率を有する構造としているが、右側の鋼製支保工は一部に直線部を設けて端部にウイングリブとフットパイルで支持する構造としている。右側下半の鋼製支保工高さは、左側下半の鋼製支保工高さの 2.3 倍の 4.1m となっている。A 計測および B 計測を実施した断面位置は No.11+17.1 で、DIII-a パターンである。A 計測の計測点位置および鋼製支保工とフットパイルの断面力測定位置を図-3 に示す。なお、フットパイルの仕様は、φ114.3mm，t=6.0mm，STK400（短期許容応力度:235N/mm²）である。

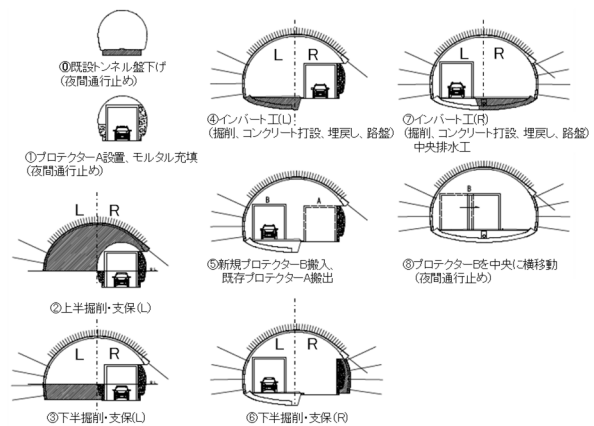


図-4 施工手順の断面図

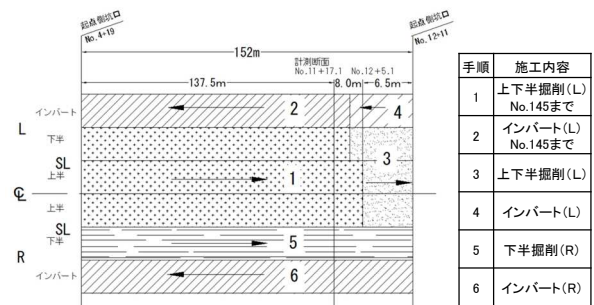


図-5 施工手順の縦断展開図

表-2 施工機械一覧

施工サイクル	施工機械	
	当初設計	実施工
掘削	油圧式トンネル切削機 (2100kg級) + ブレーカ (1300kg級)	同左
ずりだし	ダンプトラック	同左
鋼製支保工設置	ドリルジャンボ (2ブーム2バスケット)	エレクト付き吹付け機
吹付け	コンクリート吹付け機	エレクト付き吹付け機
ロックボルト	ドリルジャンボ (2ブーム2バスケット)	同左
インパート掘削	油圧ブレーカ (1300kg級)	油圧式トンネル切削機 (2100kg級)

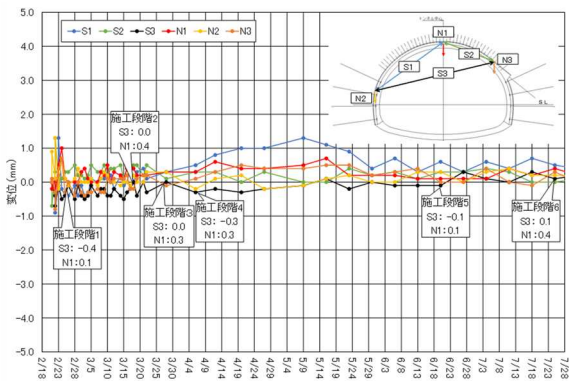


図-6 A計測結果

c) 施工手順および施工実績

図-4に施工手順の断面図、図-5に施工手順の縦断展開図、表-2に本工事で使用した施工機械の一覧を設計時と対比して示す。

ここでは起点側から終点側を見て、左側を「L」、右側を「R」と記す。トンネル掘削は原則的に起点側坑口から終点側坑口に向かって施工し、インバート工は終点側から起点側に向かって施工した。ただし、L側上下半部の掘削については貫通後のインバート掘削時の近隣民家に対する機械騒音を考慮し、計測断面でNo.11+17.1を過ぎたNo.12+5.1まで掘削した。その後L側インバート部の施工後にNo.12+5.1以奥のL側上下半部の掘削、L側インバート工の順に施工した。

表-2に示す通り、鋼製支保工の建込み設置はエレクトラ付吹付機を用いて行うこととした。これは、上半部掘削時の鋼製支保工が図-4に示す通り左右非対称であるため、確実に鋼製支保工を把持して設置する必要があったためである。また、R側上半脚部のフットパイルの施工ではドリルジャンボのドリフターが既設トンネル通行用のプロテクターと干渉したため、設計の打設角度39°よりも水平に近い約20°の打設角度となった。

3. 計測概要と計測結果

(1) 計測概要

No.11+17.1で実施したA計測およびB計測の結果を以下に示す。A計測は天端、上半左右SL付近の計3箇所にて天端沈下および内空変位を計測した。B計測は、鋼製支保工については軸力、曲げモーメント、せん断力、フットパイルについては軸力と曲げモーメントを計測した。

(2) 計測結果

a) A計測の結果

A計測の結果を図-6に示す。各施工段階時点の変位量

(S3, N1)を図中に示す。

坑内変位は、天端沈下、内空変位とも-1mm～+2mm間を推移しており、全体を通じて大きな変位はみられない。通常山岳トンネルの計測では内空変位のうち、上半水平側線であるS3を注視しながら施工を行うが、今回の計測結果では左斜側線のS1で最大の変位が発生している。これは、非対称支保構造であることから左上半の支保工が右上半の支保工より長い為、S1がS3よりもN2の沈下挙動に対して感度よく変位したためである。非対称な支保構造の計測断面において沈下挙動が卓越する場合は、S3よりむしろS1の変位挙動に注意する必要がある。

小さい変位となったA計測の結果のみでは各施工段階における支保工の作用効果を十分に分析評価することが困難であるため、以下ではB計測結果について考察する。

b) B計測の結果

B計測の経時変化を支保工については図-7、図-8、図-9、フットパイルについては図-10、図-11に示す。図中には、施工段階を1～6(図-5)としてプロットし、計測点は図-3に示すG1～G9で表す。

鋼製支保工の軸力は、正が引張、負が圧縮を示している。グラフ全体について、軸力はG2で最大値を示し、インバート支保完了まで保持していた。これは支保構造が左右非対称なため、上半支保工の構造上の中心がG2付近となっているためと考えられる。

以下に、各施工段階における特徴を列挙する。

施工段階1(L側上下半部No.145まで掘削時)：全計測点で圧縮力が発生した。これはB計測設置後に近接断面の下半部を掘削したためである。

施工段階2(L側インバート部No.145まで施工時)：初期では大きな圧縮力が発生し徐々に増加量は小さくなった。これはB計測断面から起点側坑口に向けて徐々に離れながらインバートを施工したためである。特に下半根足部のG8における軸力はインバート掘削の影響を最も受けて増加している。

施工段階3(L側上下半部貫通まで掘削時)：ほぼすべ

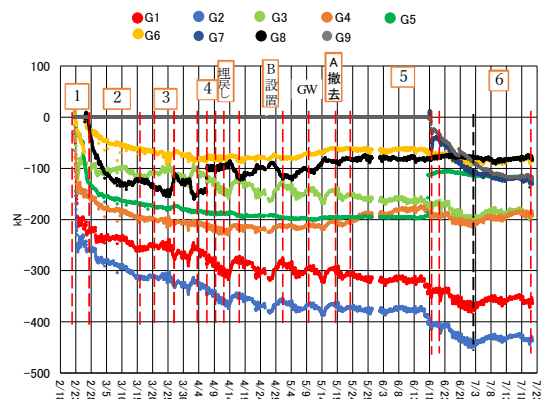


図-7 支保工軸力の経時変化図

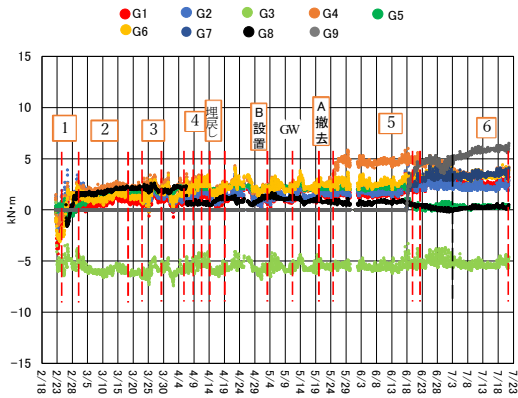


図-8 支保工曲げモーメントの経時変化図

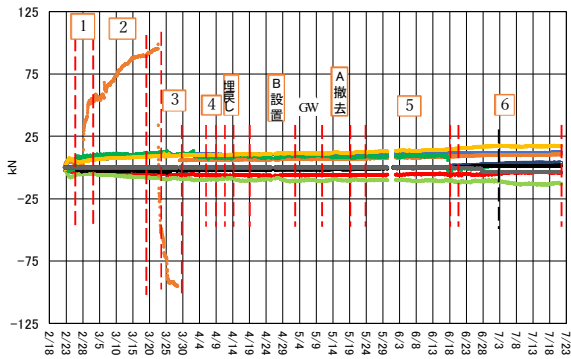


図-9 支保工せん断力の経時変化

での計測点で除荷の傾向がある。これはL側下半部の掘削再開とともにインバート施工済みの区間に地山内応力が再配分されたためと考えられる。

施工段階 4 (L側インバート部全線施工時) : 施工後に変状はほとんどみられない。これはインバート施工で支保の支持面積が増加したためであると考えられる。

施工段階 5 (R側下半部掘削時) : R側下半部掘削時にG1, G2では軸力は圧縮側へ増加し, G5では引張側へ増加している。これはR側下半部が支保されたことで支保工の中心とみなされたG2付近に圧縮力が集中し, 支持部が一時的に掘削されたG5では作用荷重が除荷されたためであると考えられる。

施工段階 6 (R側インバート部施工時) : 全計測点でインバート部の掘削開始とともに徐々に増加しているが, 7/3以降では変化はみられない。これはインバートコンクリート施工による閉合のリング効果であると考えられる。

支保工曲げモーメントについて, 正が内側圧縮, 負が内側引張を示している。

グラフ全体について, G5で曲げモーメントは最大値を示し, インバート支保完了まで保持していた。これはR側支保工の構造が, 天端からフットパイルにかけて曲率のない直線形状となったため, 天端とF3の直線部の中央で最大の負の曲げモーメントが発生したと考えられ

る。

以下に, 各施工段階における特徴を列挙する。

施工段階 5 : 内側に曲げ圧縮のモーメントが大きくなっている。これはR側下半部が支保されて支持されたことにより曲げモーメントが大きく発生したためである。
 施工段階 6 : R側下半部は内側曲げ圧縮, 他の計測点では施工段階 5以降ではほぼ一定値を示している。これはインバートコンクリート施工による閉合の作用効果である。

支保工せん断力について, 負が左上上がりを示している。

グラフ全体について G4 以外には顕著な変化がみられないため, 以下では各施工段階の G4 における特徴を列挙する。

施工段階 1, 2 : G4のせん断力は 100kN まで急激に上昇している。これは G4 が先受け工施工範囲との境界部に位置していたことが起因していると推察される。

施工段階 3 : G4のせん断力は 100kN まで急減した。これは残りのL側インバート部の掘削による除荷のためである。

施工段階 4以降 : G4のせん断力は 0kN 付近に収束した。

これはL側インバート施工による支保の支持面積が増加したことによる効果であると推察される。

フットパイルの断面力について, 軸力と曲げモーメントの両者の経時変化は似た変動を示している。これは,

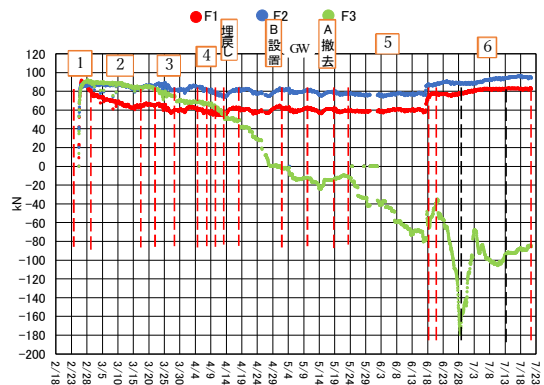


図-10 フットパイル軸力の経時変化図

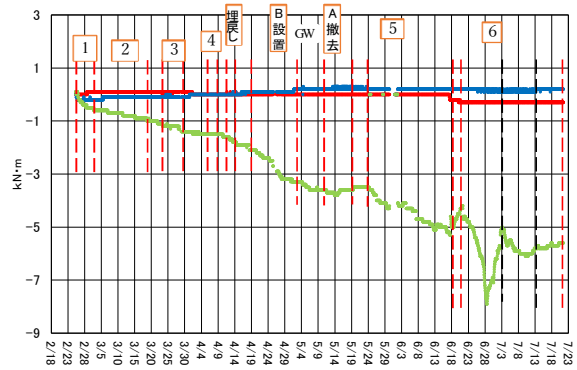


図-11 フットパイル曲げモーメントの経時変化図

フットパイルが水平に近い約 20° の角度で打設されたことにより、フットパイルには軸力だけでなく曲げモーメントが発生しやすい支保構造になったためと考えられる。

フットパイルの軸力について各施工段階の特徴を以下に列挙する。正負については支保工断面力と同様である。施工段階 1：掘削開始直後にすべての計測点で引張側に 100kN まで急上昇している。これは計測断面近傍の L 側下半部の施工を行ったことで、L 側上半脚部が沈下し、フットパイルに引張力が作用したためと推察される。

施工段階 2～4：すべての計測点で徐々に圧縮側へ変化している。これは L 側上下半部の支保工とインバートが施工されたことによりフットパイルに圧縮力が発生し、作用していた引張力が低下したためと推察される。

施工段階 5：F3 について、圧縮側へ増大している。これは、計測断面に徐々に近づき R 側下半部の掘削を行ったことによるものだが、6/18 には計測断面位置の R 側下半部の支保を施工したことで圧縮軸力が除荷されている。これに伴い F1, F2 についても計測断面部の R 側下半部掘削時に引張力が微増している。

施工段階 6：F3 について、6/21 から急激に圧縮側へ増大し、6/29 に引張側へ戻り、その後わずかに圧縮側へ増大するが 7/14 以降は落ち着いている。これは 6/21 以降にインバートの掘削を開始し、6/29 に計測断面のインバートが閉合されたためである。また、トンネル全線のインバートが 7/14 に閉合されたため、7/14 以降では変動はほとんどみられない。

また、フットパイルの軸力の許容値は 480kN(短期許容応力度:235N/mm²)であるから、計測の最大値 180kN は許容値の 38%である。

フットパイルの曲げモーメントの挙動は軸力と同様である。また、フットパイルの曲げモーメントの許容値は 12.3kN・m であるから、計測の最大値 8kN は許容値の 65%となる。以上のとおり、軸力よりも曲げモーメントの負担が大きくなったことから、当初計画通りの打設角度であれば軸力負担が卓越し、曲げモーメントの発生を抑制できた可能性があると考えられる。

また、施工段階 4 および 6 施工完了時の軸力分布図、曲げモーメント図、せん断力図を図-12、図-13 に示す。これらの計測結果を再現するために、計測断面において 2次元 FEM 解析を実施した。断面閉合時である施工段階 6 完了時の軸力分布図を図-14、曲げモーメント図を図-15、せん断力図を図-16 に示す。解析値と実測値は完全には一致していないが、断面力分布の最大値の発生位置を再現することができた。今後は解析値と実測値を一致させるために検討を加える必要がある。さらにより厳しい地質条件下における検討や 3次元 FEM 解析によるより施工手順を反映した検討を行い、非対称な支保構造の

作用効果を評価していきたい。

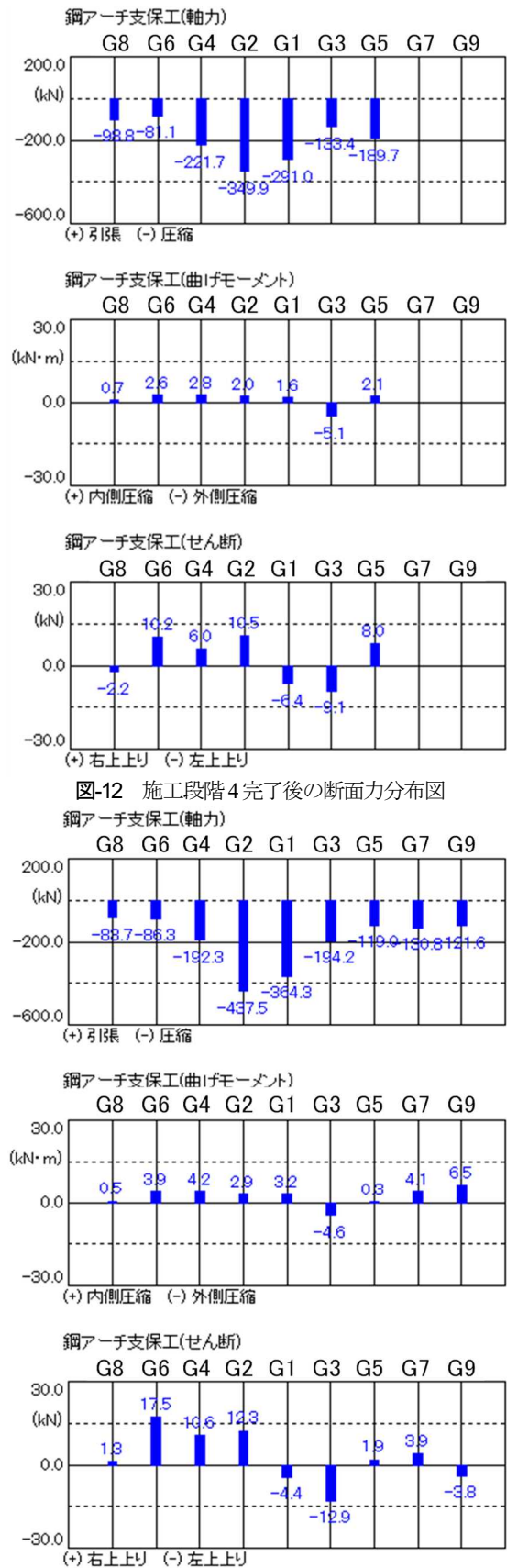


図-12 施工段階 4 完了後の断面力分布図

図-13 施工段階 6 完了後の断面力分布図

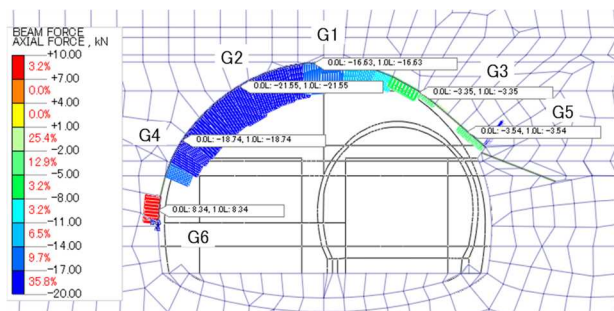


図-14 施工段階6完了後の軸力分布図（解析）

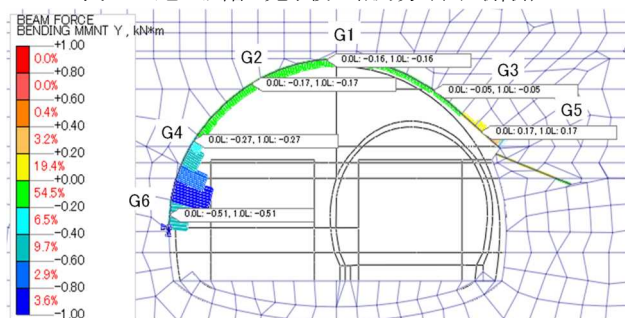


図-15 施工段階6完了後の曲げモーメント図（解析）

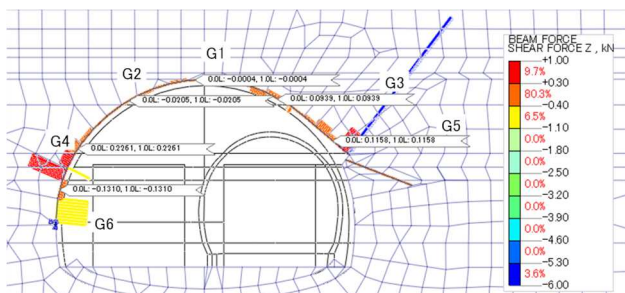


図-16 施工段階6完了後のせん断力図（解析）

4. まとめ

本検証では、供用中の既設トンネルを拡幅工事する際に非対称となるトンネル断面の支保構造の効果を明らかにすることを目的とし、トンネル支保工の断面力計測を実施した。B計測により、A計測では捉えられない非対称なトンネル支保構造の作用効果を一計測例ではあるが検証することができた。以下に得られた知見を示す。

- 支保工の軸力分布は、掘削初期から非対称となり閉合完了まで保持し続けた。

- 支保工の曲げモーメント分布は、支保工の直線形状の中央部で最大の曲げモーメントが発生した。

- 支保工のせん断力分布は、計測断面の掘削前後は影響を受けるものの、その後は全計測点で掘削の影響は受けなかった。

- フットパイルの軸力分布は、最下端部で最も効果を発揮し、施工段階に応じて支保工と力の分担がされていた。

- フットパイルの曲げモーメント分布は、本来大きな影響を受けることはないが、打設角度が浅いことによって曲げモーメントの負担が増大した。

今後の非対称な支保構造の既設トンネルの活線拡幅工事の合理的な設計手法の確立に活用するため、今回の施工で明らかとなった支保工の作用効果を解析的手法を用いて検証していく所存である。

参考文献

- 1) 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.

(2022. 8. 26 受付)

EFFECTS ON ASYMMETRIC TUNNEL SUPPORT STRUCTURE OF WIDENING CONSTRUCTION IN SERVICE

Tamami NISHIHARA, Koki KUMAGAI, Yasuo KAWABATA, Atsuo NOJI and Hiroyuki KONISHI

Recently, demands of the repairing or widening constructed tunnels are growing. Because the number of constructing to be widen tunnels in service is little nowadays, it cannot be certified the safety way of construction or design tunnel for asymmetric tunnel support structures is established enough. Therefore, we took detailed measurements of steel supports and footpile in the widening tunnel with asymmetric support structures. As a result, it was clarified that axial force on steel supports for widening was asymmetrical and negative bending moment happened on existing steel supports.