

# 中央構造線に近接する不良地山での 山岳トンネルの施工

湯本 健寛<sup>1</sup>・辰巳 順一<sup>2</sup>・小池 良宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 安藤ハザマ 名古屋支店土木部 (〒460-0002 愛知県名古屋市中区丸の内 1-8-20)  
E-mail: yumoto.takahiro@ad-hzm.co.jp

<sup>2</sup>正会員 安藤ハザマ 建設本部土木技術統括部技術第三部 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)  
E-mail: tatsumi.junichi@ad-hzm.co.jp

<sup>3</sup>国土交通省 中部地方整備局 飯田国道事務所 (〒395-0024 長野県飯田市東栄町 3350)  
E-mail: koike-y85ab@mlit.go.jp

青崩峠トンネル(仮称)は、長野県と静岡県との県境に位置する全長 4,998m の山岳トンネルである。本トンネルは中央構造線に対して離隔距離約 500m で平行に位置するため、断層運動の影響を受けた複雑な地質が切羽に出現した。青崩峠トンネル(仮称)のうち静岡県側工区(L=2,144m)では、土被りが 300m を超えるところから、脆弱な泥質変成岩が分布する箇所では変位が増大する傾向が確認され、支保工の変状が断続的に発生した。本トンネル特有の変位傾向と変状形態を分析し、増しロックボルトによる初期変位抑制対策を実施し効果を得た。本稿では、中央構造線近傍の脆弱な変成岩類に起因する変位と変状の特徴、および対策工の詳細について報告する。

**Key Words:** mountain tunnel, Median Tectonic Line, metamorphic rock, additional rock bolt

## 1. はじめに

三遠南信自動車道は、長野県飯田市の中央自動車道を起点として、静岡県浜松市北区引佐町に至る延長約 100km の高規格幹線道路である。

青崩峠トンネル(仮称)は、三遠南信自動車道のうち長野県飯田市南信濃八重河内から静岡県浜松市天竜区水窪町奥領家に至る全長 4,998m の片側 1 車線の道路トンネルであり、長野県側工区 L=2,854m と静岡県側工区 L=2,144m に分かれて両側から施工している。国内最大の断層である中央構造線に対して離隔距離約 500m で平

行に位置するため、静岡県側工区では断層運動の影響を受けた複雑な地質がトンネル全線にわたって出現することが予測されていた。

今回報告する静岡県側工区では、とくに脆弱な領家変成岩類が出現するとともに最大土被りが 610m と大きく、掘削時に大きな土圧が作用することが想定されており、設計段階から特殊パターンである E パターンが計画されていた。

本稿では、中央構造線近傍の脆弱な変成岩類に起因する変位と変状の特徴、および対策工の詳細について報告する。

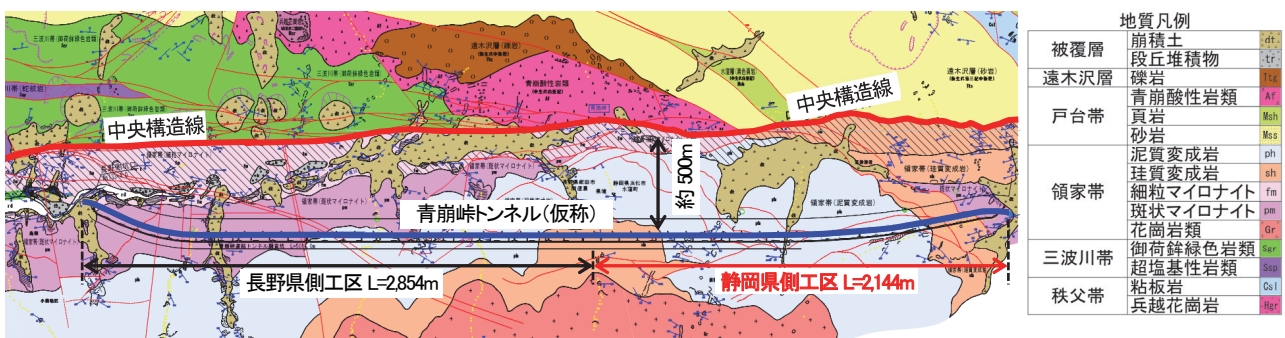


図-1 トンネル位置図

## 2. 地形・地質概要

### (1) 地形概要

青崩峠トンネル（仮称）は、長野県南端～静岡県北西端の県境に位置している。青崩峠を挟んで、長野県側の小嵐川と静岡県側の翁川とはほぼ南北に伸びる直線的なV字谷を形成するが、これは中央構造線による構造谷である。この谷の東側は三波川帯、秩父帯などから構成される外帯地域であり、緩やかな斜面勾配となっている。一方、西側では領家帯の花崗岩類が分布しており、地形は急峻である。青崩峠トンネル（仮称）はこの谷の西側に位置し、中央構造線と平行に約500mの離隔で並走する。

### (2) 地質概要

図-2に地質縦断図を示す。施工箇所の地質は、領家花崗岩類と領家変成岩類で、長野県側工区では主に領家花崗岩類が分布し、静岡県側工区では、主に領家変成岩類が分布する。

領家変成岩類は主に泥質変成岩、砂質変成岩、珪質変成岩、細粒マイロナイトの4種類に分類される。

領家変成岩類のうち、泥質変成岩は頁岩が変成作用を受けて形成された岩石であり、概ね黒色を呈する。変

成時の圧力により形成された片理面が5～10mm間隔で発達し、剥離性に富むため、トンネル掘削時に緩みやすい性質を持つ。写真-1に泥質変成岩の岩片を示す。

泥質変成岩が、脆弱であるのに対し、砂質変成岩は砂岩が変成作用を受けて形成された岩石であり、比較的硬質である。

珪質変成岩は、層状チャートが変成作用を受けて形成された岩石である。主成分がSiO<sub>2</sub>となっており、非常に硬質で、ハンマーでたたくと火花が出るほどである。

細粒マイロナイトは、これら、泥質変成岩、砂質変成岩と珪質変成岩が、深さ15～30kmの高圧条件下での断層運動により形成された岩石で、石英や黒雲母は溶かされ再結晶化しているため、流動的な組織を示す。数mm間隔のせん断面が発達し、剥離性に富む。

各地層の幅は、厚くても数m程度であり、これらの地質が中央構造線の断層活動などの影響により、もみ込まれているため、切羽では非常に複雑な岩相を呈している

（図-3）。脆弱な泥質変成岩や細粒マイロナイト部は、掘削により切羽を開放すると、切羽表面部の割れ目が開口し、肌落ちを生じる。一方で、砂質変成岩や珪質変成岩は比較的硬質であることに加え、未掘削の地山では割れ目は密着しており、機械による掘削は困難であることから、発破方式により掘削を行っている。

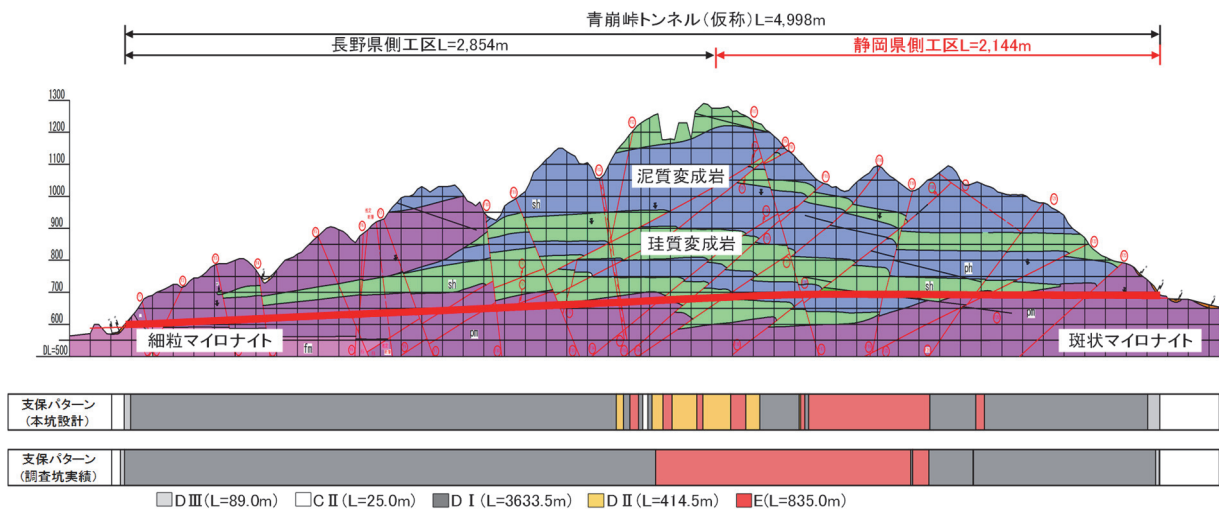


図-2 地質縦断図

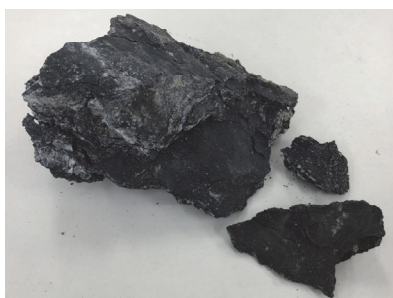


写真-1 泥質変成岩

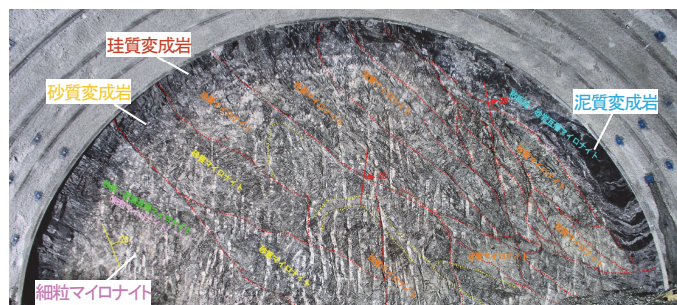


図-3 切羽の地質状況

### 3. 支保構造

#### (1) 支保パターン設計

本トンネルは複雑な地質構造を貫くため、避難坑を調査坑と位置付けて、本坑に先立ち施工を行い、地質を確認している。本トンネルの支保パターンは、調査坑の施工結果をもとに設計されている。

調査坑のうち領家変成岩類が分布する区間では、土被りの増加に伴って変位が増大したため、土被りが 300m を越える区間には、特殊支保パターンである E パターンが適用されている。本トンネルにおいても、土被りが大きくなる区間は、設計段階から E パターンが見込まれており、E パターンは、静岡県側工区の約 1/3 を占める (図-2)。

図-4 に本トンネルにおける E パターンの支保パターン図を示す。E パターンは、変形余裕量 20cm を有し、高規格鋼製支保工 (HH-200)、高耐力ロックボルト (耐力 290kN 以上)、高強度吹付けコンクリート (設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup>) の高強度部材を用い、一次インバートにより断面を閉合する計画となっている。

#### (2) 速硬膨張型モルタルを使用した後注入型ロックボルトの適用

調査坑の施工実績<sup>1)</sup>から、本トンネルの地山は、掘削後に急激に緩みが生じ、初期変位が増大する傾向がある。このことから、ロックボルトの効果の発現が早いほど高い変位抑制効果が得られると考えられる。このため、本トンネルのロックボルトには速硬膨張型モルタルを使用した後注入型ロックボルトを適用することとした。

速硬膨張型モルタルは、材令 1 日で 10N/mm<sup>2</sup> 以上の強度発現があり、より早期にロックボルトの定着を得られるものである。また、流動性の高いモルタルを後注入することで、ボアホール周辺のゆるみにもなる空隙や亀裂を充填することができる。さらに、硬化時に約 5% 体積が膨張するため、ボアホールの内壁が加圧されること

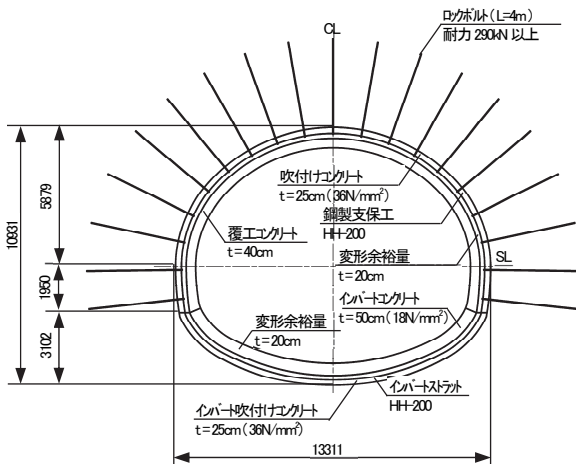


図-4 支保パターン図 (E パターン)

により、地山との付着力を向上させることができる。

なお、施工の初期段階に実施した試験施工により、打設後 1 時間で所定の引抜き耐力を得られ、他の定着方式と比較して早期にロックボルトの効果が得られることを確認している<sup>2)</sup>。

### 4. 支保工の変状対策

本トンネルの掘削を開始し、坑口部以降、設計通りの D I-b パターン施工を進めていたところ、土被りが約 300m に達する TD.590m 付近から変位が増大し、トンネルに変状が生じはじめた。変状は以降も断続して発生したが、変状形態や変位傾向は類似しており、本トンネル地山特有のものであると考えられた。このため、変状状況や計測結果を分析することで、今後始まる E パターンの施工にフィードバックすることを考えた。

本章では、E パターンの施工に至るまでに支保工に発生した変状について、変状形態や計測結果の分析で得た知見について詳述する。

#### (1) 変状の形態

TD.590m で発生した変状は、天端から右肩部にかけての吹付けコンクリートの圧ざ (圧縮破壊)、および側壁部のロックボルトプレートの変形であった (写真-2、写真-3)。また、それ以降で発生した変状についても概ね同様の形態で、吹付けコンクリートの変状は天端から肩部にかけての圧ざ、ロックボルトの変状は側壁部のロックボルトプレートの変形であった。



写真-2 吹付けコンクリートの圧ざ



写真-3 ロックボルトプレートの変形

## (2) 変位の傾向

TD.590m 付近の天端沈下、脚部沈下は、最大 20mm 程度であるものの、側壁部の押し出しが大きく、内空変位は上半水平測線で 35.7mm、下半水平測線で 62.6mm と卓越して発生していた(図-5)。また、それ以降の変位の傾向についても概ね同様の傾向であった。

図-6 に土被り 350m 程度までの土被りと変位比との関係を示す。ここで変位比とは、内空変位(上半および下半の水平側線)と天端沈下との変位量の比を表している。これによれば、土被りが 300m を超えると、内空変位が天端沈下の 2 倍以上となり、側壁部の内空側への押し出しが卓越する傾向が確認できる。

## (3) 変状の発生原因

最初に変状が発生したのは、土被りが約 300m に達した TD.590m 付近であり、以降も土被りが増加を続けている。また、変状は以降も断続して発生したが、変状が発生するのは概ね脆弱な泥質変成岩が切羽周辺に分布する区間であり、砂質変成岩や珪質変成岩が主体となる区間で発生することはほとんどなかった。泥質変成岩はハンマーの軽打で容易に砕けるほど脆く、推定強度は 5~10N/mm<sup>2</sup> 程度であった。

以上から、泥質変成岩が分布する区間において、土被

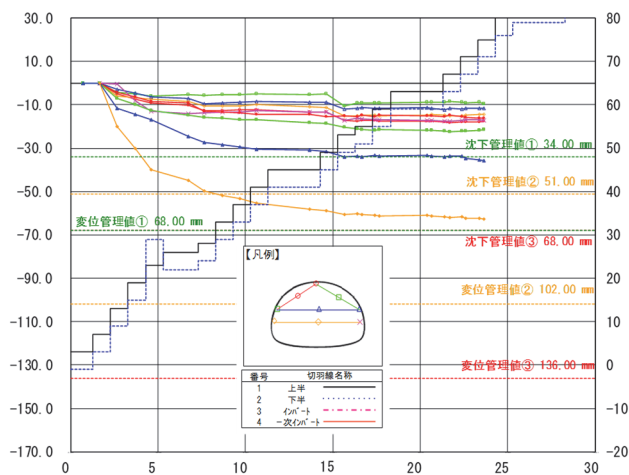


図-5 変位計測結果 (TD.590m)

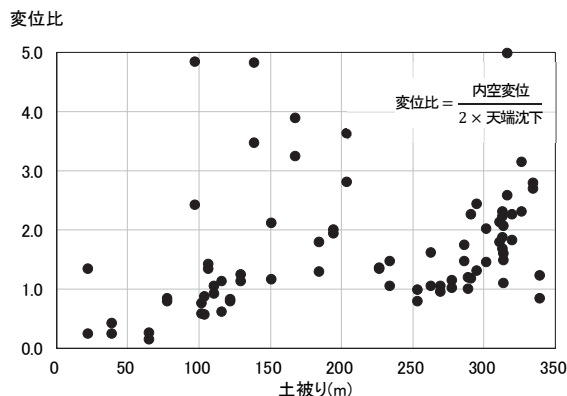


図-6 土被りと変位比との関係

りの増加に伴って地山強度比が低下し、塑性土圧が増加したことが原因であると推定した。

## (4) 対策工

E パターンに至るまでの対策工としては、側壁部への増しロックボルト、DII パターンへのランクアップ、および吹付けコンクリートの高強度化を段階的に実施した。なお、本変状区間では一次インバートによる早期閉合は実施していない。

## (5) 計測 B の考察

この変状区間においては、支保構造の妥当性確認、および以降の対策工検討のために計測 B を適宜実施している。ここでは、E パターンの直前の支保パターンとなった DII(H)-L パターンの計測結果について考察する。

図-7 にロックボルト軸力計測結果断面図を示す。これを見ると、天端から両肩部にかけては、ロックボルトに軸力があまり発生していない。これに対し、側壁部では、耐力の限界 (290kN) 近くまで軸力が発生しており、内空に近いほど大きな軸力が作用している。

図-8 に右下半部のロックボルト軸力計測結果を示す。ロックボルトの軸力の最大値は、内空側に近いほど大きく、地山の深部に向かうほど小さくなる。また、軸力の発生速度も内空側に近いほど大きくなり、地山の深部に

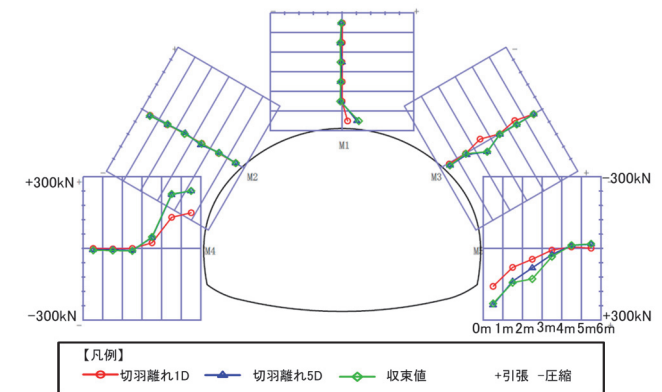


図-7 ロックボルト軸力計測結果断面図 (DII(H)-Lパターン)

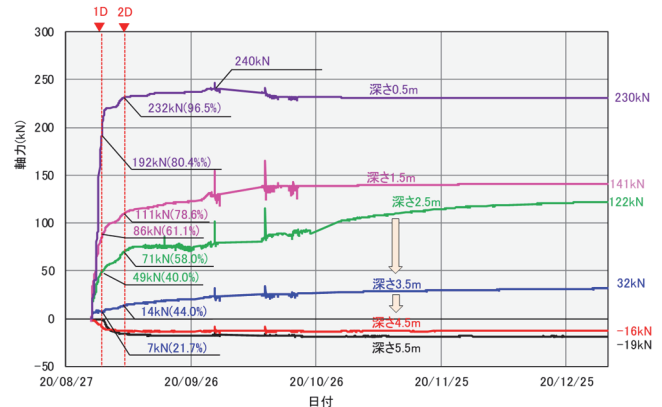


図-8 右下半部のロックボルト軸力計測結果の経時変化 (DII(H)-Lパターン)

向かうほど小さくなる。深さ 0.5m をみると、切羽離れが 1D (D=13m) の時点で最大値の約 80%の軸力が発生しており、最大値も 240kN と設計の耐力 290kN の 80%以上の軸力が発生している。

図-9に同断面での地中変位計測結果を示す。天端から肩部は、内空から 6m 以上離れた場所から、変位が生じている。ロックボルトの先端より奥から変位が生じているためロックボルトにほとんど軸力が作用していなかったものと考えられる。

これに対し、側壁部は、内空に近い表層付近で変位が急激に増加している。ロックボルトの軸力も、内空の表層に近いほど軸力が大きく、急激に発生している。この内空の表層付近での変位に対して、ロックボルトが抵抗しているものと考えられる。

これらのことから、本トンネルの特徴として以下のことが考えられた。

- ① 側壁部は、表層に近いほど掘削後、急激に変位が増大する。
- ② この表層に近い箇所での急激な変位に対し、側壁部のロックボルトが非常に有効に作用している。
- ③ 天端から肩部にかけては、地山深部から変位が発生しており、ロックボルトによる変位抑制効果は、あまり期待できない。
- ④ 地山深部からの変位は緩やかであるため、直ちに早期閉合を実施して収束させる必要はない。

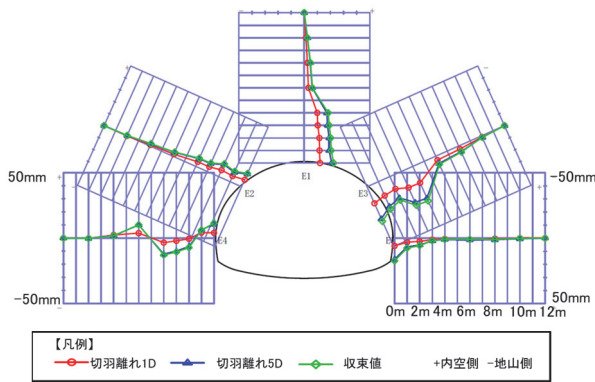


図-9 地中変位計測結果 (DII(H)-Lパターン)

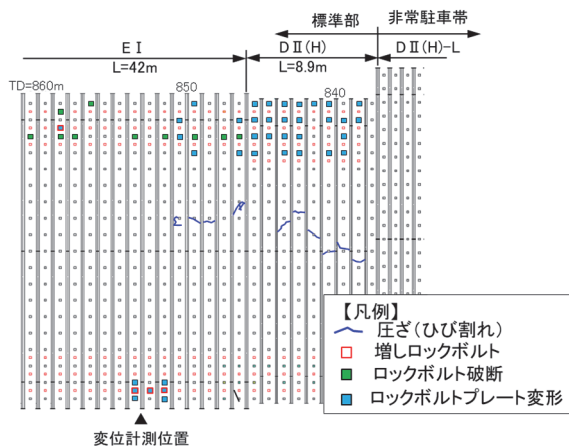


図-10 変位の発生状況 (TD = 850m 付近)

## 5. Eパターンの施工

TD.850m 付近の L=42.0m 区間は、調査坑で断層の存在が確認されており、調査坑の施工実績に準じて E I パターンが計画されていた。

非常駐車帯以降の L=8.9m を DII(H)パターンで施工完了した後、設計通り E I パターンに変更し、14m ほど掘削を進めたところ、切羽の天端から右側壁にかけて、脆弱な泥質変成岩が出現した。この泥質変成岩は、薄層の珪質変成岩を挟在しており、層理面に沿って細かく砕ける。この泥質変成岩の出現にとまらぬ、非常駐車帯以降の DII(H)パターン及び E I パターンの天端部に圧力が発生するとともに、側壁部のロックボルトが破断した(図-10)。坑内変位は、内空変位で 31.6mm/日(上半水平側線)、沈下で 26.7mm/日(右側壁部)の変位が発生した。このため、前章で得られた知見から、ただちに左右の側壁部に増しロックボルト(L=4m)を各 3 本打設した。

変位を収束させるためには早期閉合が有効であるが、切羽近傍で下半施工基面から 3m 以上掘り下げて一次インバートを設置する必要があるため、切羽作業員にとって鏡面崩壊に対する危険がともなう。一方で、本トンネルの変位の傾向としては、初期変位は大きいものの、その後の変位は緩やかに推移する。さらに、Eパターンでは変形余裕量を 20cm 見込んでおり、発生する変位に対して余裕が大きい状況であった。このため、本トンネルの Eパターンでは、変位や変状状況に応じて増しロックボルトを打設して変位速度をある程度低下させてから、切羽と 1D~2D の離隔を確保しながら一次インバートを施工する方法をとることとした。ただし、増しボルトを打設しても変位速度が低下しない場合には、ただちに閉合距離を 1D 以内に短縮することとした。

施工の結果、増しロックボルトの打設により、最大 18.1mm/日あった下半水平側線の変位速度を、4.8mm/日まで低減することができた。その後、一次インバート設置することで、変位は収束した(図-11)。

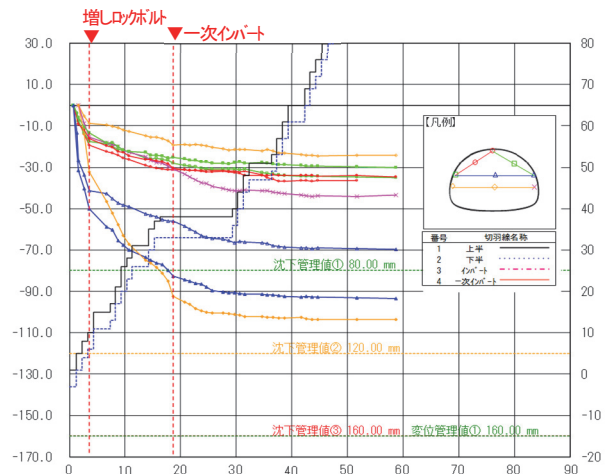


図-11 内空変位結果 (TD .850m)

## 6. おわりに

本報告では、大土被りかつ中央構造線に近接する領家変成岩類を掘削するトンネルの施工において、以下の知見を得た。

- ・切羽に泥質変成岩が分布する区間では、土被りが増加するにつれ、側壁部の押出しが卓越し、それにとともに、側壁部のロックボルトと天端や肩部の吹付けコンクリートに変状が生じる。
- ・側壁部は、表層に近いほど掘削直後に変位が急激に増大し、この表層に近い箇所での急激な変位に対し、ロックボルトが有効に作用する。
- ・速硬膨張型モルタルを使用した後注入型ロックボルトにより、早期にロックボルトの効果を得ることができた。
- ・Eパターンでは、ロックボルトにより初期変位速度をある程度低下させてから、切羽との一定の離隔（1D～2D）を確保しながら一次インバートを施工する施工方法が合理的であった。

現在も掘削を進めており、変位、変状に対応するように段階的に支保パターンをランクアップし、現在は二重

支保工による施工を開始したところである。今後、地山深部に向かい、土被りも最大 610m まで増加していくため、さらなる土圧の増加が想定される。今後も、これまでに得られた知見とともに、発生した状況を分析しながら、適切に対応していきたいと考えている。二重支保工の施工については、次回以降での報告を考えている。

**謝辞：**本工事の施工にあたっては、青崩峠道路トンネル施工検討委員会の方々からご教授賜りました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 石川滋，中斉剛，小出孝明：中央構造線に沿ったトンネルを二重支保工で掘削，土木学会トンネル工学報告集，第30巻，I-19，2020.11
- 2) 油井敦弘，湯本健寛：速硬膨張モルタルを用いた後注入型ロックボルトにおける初期材齢の定着力について，第76回土木学会年次学術講演会，2021.

(2022. 8. 26 受付)

## CONSTRUCTION OF A MOUNTAIN TUNNEL IN SOFT GROUND NEAR BY MEDIAN TECTONIC LINE

Takahiro YUMOTO, Junichi TATSUMI and Yoshihiro KOIKE

Aokuzure-pass Tunnel (provisional name) is a mountain tunnel with a total length of 4,998m located on the border of Nagano and Shizuoka prefectures. Since this tunnel is located parallel to Median Tectonic Line with a distance of about 500m, complex geology affected by fault movement appeared on the face. In the construction section on the Shizuoka Prefecture side (L=2,144m) of the Aokuzure-pass Tunnel (provisional name), it was confirmed that once the overburden exceeded 300m, the displacement tended to increase in places where fragile muddy metamorphic rocks were distributed, and deformations of supports occurred intermittently. We analyzed the displacement tendency and deformation pattern peculiar to this tunnel, and implemented countermeasures to suppress initial displacement using additional rock bolts. In this paper, we report the characteristics of displacement and deformation caused by fragile metamorphic rocks near by Median Tectonic Line and the details of countermeasures.