

現地レポート

# 中尾山トンネルにおける切羽崩落と地山の大変形への対応

橋本和浩・瀬戸口大志・新宮信也

## 1. はじめに

中尾山トンネルは、南九州自動車道芦北出水道路29.6kmのうち、熊本県水俣市長野町に位置する全長 1,428m のトンネルである。中尾山は火砕岩類の地層に安山岩が覆いかぶさる地質構造であり、軟質な地質に対して土被りが大きいことから地山強度比が低く、大きな塑性変形が懸念されていた。本報告では、掘削における切羽安定対策と変位抑制対策について報告する。

## 2. 地質概要

中尾山トンネル周辺の地質は、新第三紀～第四紀の安山岩質の火山岩類（溶岩や凝灰角礫岩、軽石凝灰岩等）が分布し、その下位には四万十帯白亜紀堆積岩の砂岩・頁岩が分布している。トンネル計画高の地質は、全線で一軸圧縮強度が3N/mm<sup>2</sup>未満の凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩、軽石凝灰岩等の複数の岩相を含む火砕岩類であり、土被りが56mを超える区間は地山強度比が2以下と

なる軟弱地山が分布すると想定された（図-1）。

## 3. 発生現象

掘削においては、前方探査ボーリングを行って地質状況を確認しながら施工を進めていた。しかし、TD250m付近から地質が変化し、事前の地質調査で確認されていない断層を伴う凝灰岩がトンネル断面に出現した（写真-1）。この凝灰岩はスレーキング特性が顕著で大きな変位を及ぼすとともに、切羽を不安定化させた。さらに切羽が進行



写真-1 断層を伴う凝灰岩

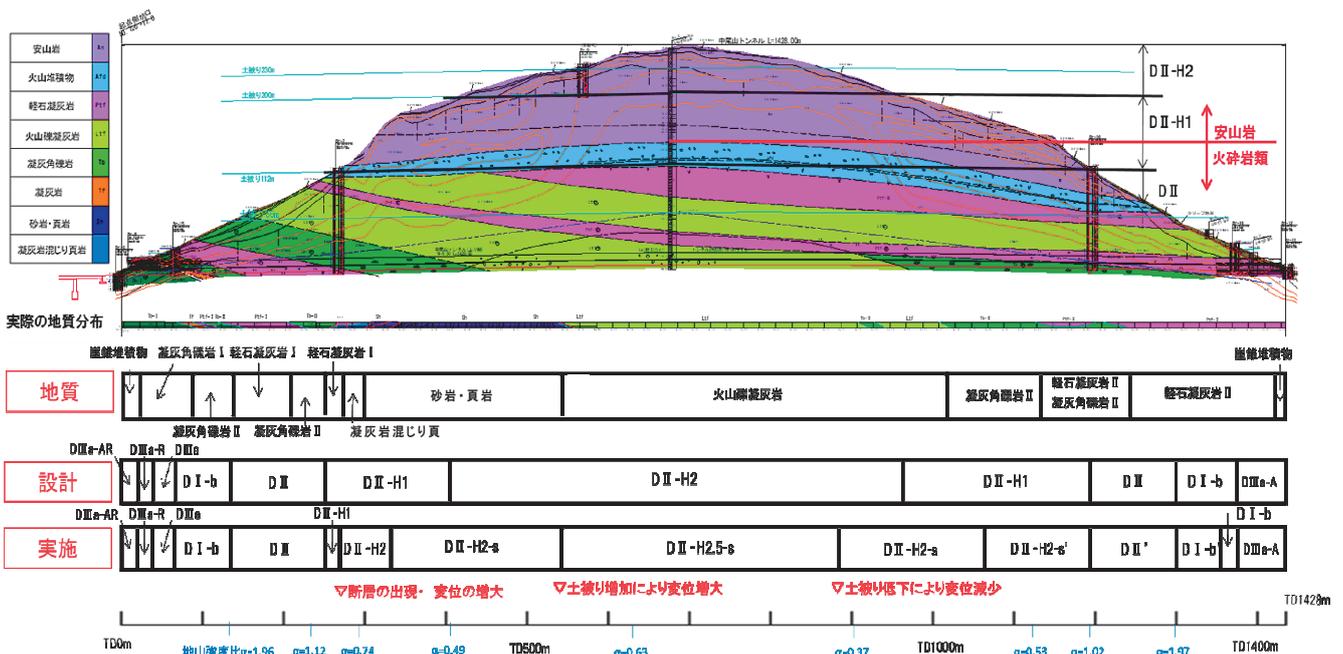


図-1 地質縦断図

するに従い、下層にある堆積岩類（強風化頁岩）が切羽に出現し、切羽部の崩落や支保の変状が発生した（写真-2、写真-3）。このような想定外の地層の分布がTD550m付近まで続いた。

計測工に関しては、TD250m～300m間で水平内空変位量が管理レベルⅡ（変位量76.5mm）を超える状態が続いた。特にTD280m付近では180mmの変位が発生し、管理レベルⅢ（変位量102mm）を超えた（図-2）。



写真-2 切羽部の崩落状況  
（左：天端崩落 右：鏡面崩落）



写真-3 支保の変状  
（左：ロックボルト座金の変形、ナットの脱着  
右：吹付コンクリートのひび割れ）

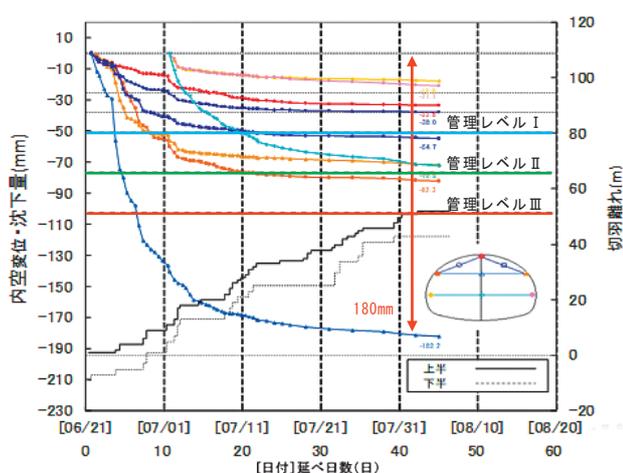


図-2 TD280mの内空変位経時変化図 (D II・H1)

#### 4. 切羽の安定対策

想定しない脆弱な地質に対し、核残しや部分掘削、鏡吹付コンクリートでは切羽の安定を維持できなかったため、天端および鏡面の安定を図る補

助工法を実施した（図-3）。注入式フォアポーリング（PUボルトL=3m、上半120° @600mm、19.5本）と注入式短尺鏡ボルト（GRPボルトL=4m、上半120°、14.5本）を実施して切羽近傍を部分的に補強することを試みた。しかし、ボルトも含めた大規模な崩落が発生したため、小口径長尺鋼管先受工（φ76.3mm、L=12.5m、上半120° @450mm、25本）と小口径長尺鋼管鏡ボルト（φ76.3mm、L=12.5m、上半120°、14.5本）に変更して切羽の安定を確保した。注入材はいずれもシリカレジンを使用した。

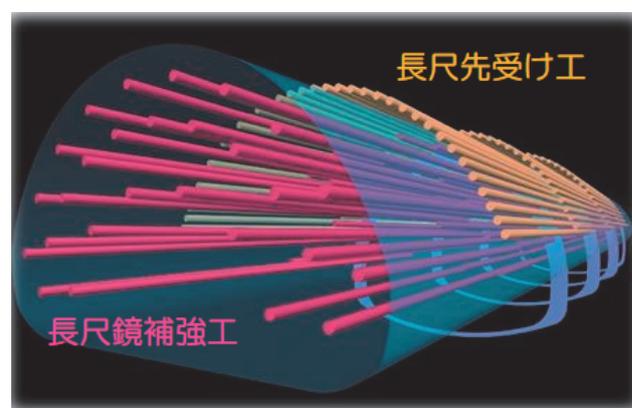


図-3 切羽の安定対策イメージ

### 5. 変位抑制対策

#### 5.1 支保パターンの変更

本トンネルの支保構造は地山強度比が2以下の区間を地山等級DⅡ（変形余裕100mm）とし、さらにFEM解析による許容限界に応じて、高強度吹付コンクリートと高規格鋼製支保工の採用による3段階のパターン（DⅡ、DⅡ・H1、DⅡ・H2）が設定されていた（表-1）。坑口部を除く約90%がDⅡであった。

表-1 支保パターン

支保パターン	土被り (m)	変形余裕量 (mm)	吹付けコンクリート		鋼アーチ支保工		ロックボルト		
			強度 (N/mm <sup>2</sup> )	吹付 厚さ (cm)	種類	建込 間隔 (m)	長さ (m)	周 方向 (m)	延長 方向 (m)
DⅡ	56～112	100	18	20	NH-150	1.0	4.0	1.2	1.0
DⅡ-H1	112～200	100	18	20	HH-154	1.0	4.0	1.2	1.0
DⅡ-H2	200以上	100	36	20	HH-154	1.0	4.0	1.2	1.0

前述のTD280m付近では支保パターンDⅡ・H1にて施工中であったが、水平内空変位が180mmに達し、管理レベルⅢを超えたため、高規格鋼製支保工に加え高強度吹付コンクリートを採用した支保パターンDⅡ・H2に変更した。しかし、期待した効果は得られず、依然として管理レベルⅢを

超える変位が継続した。変位は沈下量に対して水平方向の内空変位が卓越しており、初期変位が大きいことが特徴であった。また、切羽離れが2D (D:トンネル径) を超えても変位が進行するという状況であった。そこで、変位増大を抑制するため、支保を早期(切羽離れ1D以内)にリング構造としてインバートストラットと吹付コンクリートを施工する早期閉合(支保パターンDⅡ-H2-s)を行った(図-4、写真-4)。その結果、ただちに収束傾向を示す結果となった(図-5)。

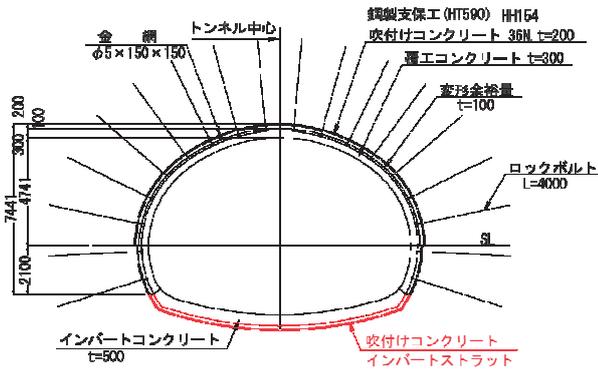


図-4 支保パターン図



写真-4 早期閉合施工状況

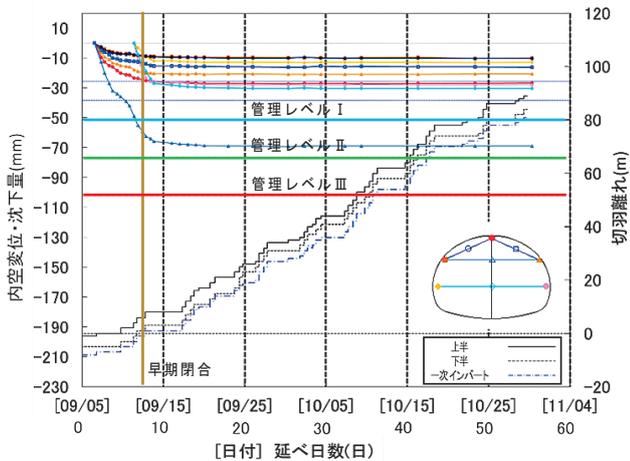


図-5 TD360mの内空変位経時変化図 (DⅡ-H2-s)

5.2 初期変位抑制対策

切羽安定対策と早期閉合により施工を進めていたが、土被りの増加(地山強度比の減少)に伴い、

早期閉合を施工するまでの初期内空変位が管理レベルⅢまで進行する状況となった(図-6)。この変位増大は地山からの応力に対して支保圧が不足していることが原因であると推察した。そのため、支保のランクアップにより部材厚を大きくし、支保圧を向上させることで断面閉合までの内空変位を抑制する方針とした。そこで、鋼製支保工をHH154からNH200に、吹付コンクリート厚さを200mmから250mmとすることで支保圧を増強した支保パターンDⅡ-H2.5-sに変更した。この結果、初期変位を抑制し、早期閉合時の変位が管理レベルⅠ程度になり、安定した施工を進めることが可能となった(図-7)。こうした一連の変位抑制対策は、国立研究開発法人土木研究所(以下「土木研究所」という。)より、支保の軸力の伝達を考慮したストラットの形状等、貴重なご助言を

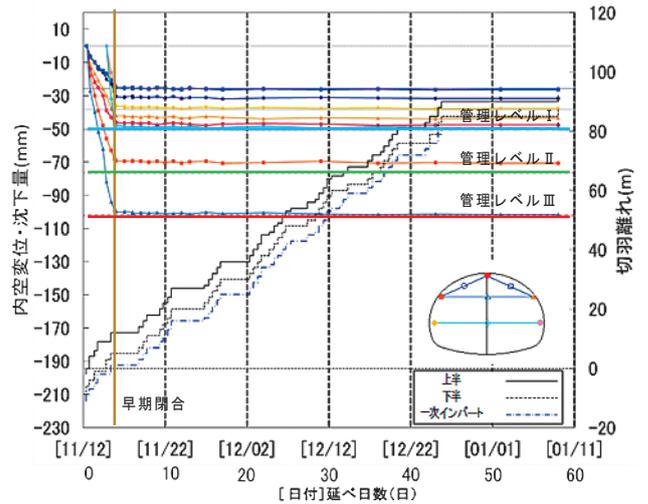


図-6 TD480mの内空変位経時変化図 (DⅡ-H2-s)

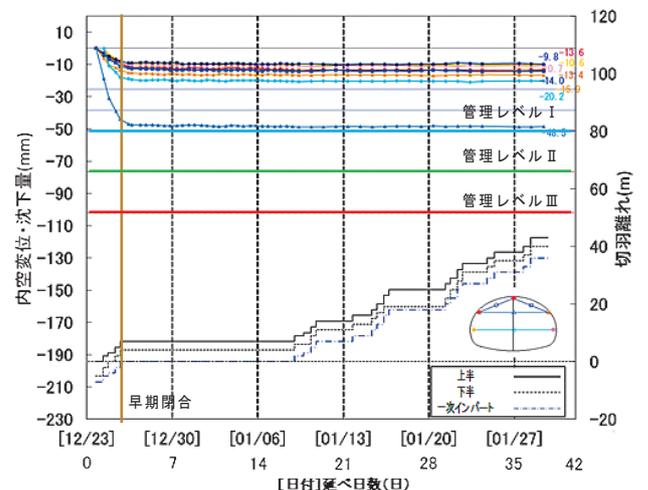


図-7 TD560mの内空変位経時変化図 (DⅡ-H2.5-s)

表-2 各支保パターンの仕様と変更の経緯

支保パターン	D I		D II						
	D I-b	D I-b' (新規)	D II	D II' (新規)	D II-H1	D II-H2	D II-H2-s' (新規)	D II-H2-s (新規)	D II-H2.5-s (新規)
早期閉合	なし	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり
鋼製支保	NH-125	NH-125	NH-150	NH-150	HH-154	HH-154	HH-154	HH-154	NH-200
鋼製支保 (ストラット)	—	—	—	—	—	—	NH-150	HH-154	NH-200
吹付強度	18N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>	18N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>	18N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>
吹付厚さ	150mm	150mm	200mm	200mm	200mm	200mm	200mm	200mm	250mm
変形余裕量	0mm	0mm	100mm	100mm	100mm	100mm	100mm	100mm	100mm
ロックボルト	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m
支保圧 (MPa)	⑦0.754	④1.230	⑥0.952	③1.583	⑤1.149	②1.781			①1.996
ランクアップ	土被り、一軸圧縮強度の条件から設計どおりランクアップ		土被り、一軸圧縮強度の条件から設計どおりランクアップ		地質状況の悪化、支保の変状、変位の増大によりランクアップ	変位の増大によりランクアップ(早期閉合の付与)		変位の増大によりランクアップ	
ランクダウン				変位の減少によりランクダウン(支保圧の大きいD I-b'に変更)		変位の減少によりランクダウン(支保圧の大きいD II'に変更)	変位の減少によりランクダウン(早期閉合廃止)	変位の減少によりランクダウン(ストラットを普通鋼にしてコストダウンを図る)	変位の減少によりランクダウン

※支保圧の欄では上位から①～⑦で評価し不等号で工程を表現した

頂いた。

## 6. 支保パターン変更の経緯

本トンネルでは支保圧に着目し、高強度吹付コンクリートを採用した新パターンを多く採用した。これは、応力分担率の大きい吹付コンクリートの高強度化により効率的に支保圧を向上し、内空変位を抑制するためである。表-2に各支保パターンの仕様と変更の経緯を示す。

## 7. まとめ

本トンネルは、当初より軟弱地山であることから大きな塑性変形が想定されていたものの、実施工では想定外の断層および不良地山が出現し、切羽の崩落や大きな変位が発生した。これに対し、前方探査ボーリングを実施し、事前に切羽の安定対策を検討するとともに、内空変位を指標とした

支保圧の向上によるパターン変更を行った。本工事は、経済的な観点より、対策ありきではなく、発生した事象に段階的に対応することで対策が過剰とならないようにした。これらの対策により、無事故でトンネルの貫通を迎えることができた。

## 謝辞

本工事の施工にあたり、技術のご指導・ご助言を頂いた土木研究所の砂金伸治 上席研究員（当時）、日下敦 上席研究員に感謝する。

## 参考文献

- 1) 小辻英俊、矢野幸樹、瀬戸口大志、小松花穂里：断層の影響を受けた不良地山のトンネル掘削（施工経過報告）、令和2年度土木学会全国大会
- 2) 橋本和浩、重黒木幸英、新宮信也、瀬戸口大志：断層の影響を受けた低地山強度比・脆弱地山でのトンネル掘削—芦北出水道路 中尾山トンネル—、トンネルと地下、Vol.53、No.2、pp.123～134、2022

橋本和浩



国土交通省 九州地方整備局  
八代河川国道事務所 工務  
第2課長  
HASHIMOTO Kazuhiro

瀬戸口大志



(株) 熊谷組九州支店  
SETOGUCHI Taishi

新宮信也



(株) 熊谷組九州支店  
SHINGUU Shinya