

山岳トンネルにおける一掘進長延伸に伴う 支保の健全性に関する一考察

吉岡 知哉¹・砂金 伸治²・日下 敦³・小出 孝明⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: t-yoshioka55@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: n-isago@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

⁴正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: t-koide@pwri.go.jp

近年, 山岳トンネルの施工において建設コストの縮減や工期短縮といった施工の合理化が求められている. その取組みの一つである一掘進長延伸は, 標準的な一掘進長に比べ, 掘削および支保の設置間隔が広がるため, 支保規模の削減や施工の高速化につながる可能性がある. しかし, 一掘進長延伸をすることで, 素掘り面積が大きくなることによる施工時の安全性低下や支保に発生する変形や応力増加による中長期的な支保の不安定化などの可能性が懸念される.

筆者らは, これまで一掘進長延伸を適用するにあたっての効果が見込める地山条件や施工時の安全性および中長期的な支保の安定性等の検証を目的に一掘進長を延伸した試験施工を実施してきた. 本稿では, 一掘進長を延伸したことによる地山の変位, 支保工に発生する応力等を数値解析にて再現し, 試験施工により得られた計測結果の傾向を分析した.

Key Words : mountain tunnel, extended cycle length, numerical analysis, monitoring

1. はじめに

近年, 山岳トンネルの施工において建設コストの縮減や工期短縮といった施工の合理化が求められており, その一つの対応として一掘進長延伸が挙げられる. 標準的な一掘進長で施工する場合に比較して施工の高速化につながるとともに, 地山条件によっては支保規模の削減の可能性もある. しかし, 一掘進長を延伸することにより, 掘削中の素掘り面の面積が大きくなることによる施工時の安全性の低下や, 支保に発生する変形や応力の増加による中長期的な支保の不安定化などの可能性が考えられる. そのため, 掘進長延伸を適用するにあたっては, 期待される効果が発現しやすい地山条件を明らかにしたうえで, 施工時の安全性や中長期的な支保の安定性や健全性などの更なる検証が必要であると考えられた.

筆者らは, これまで道路トンネル技術基準・同解説¹⁾

に規定される値よりも一掘進長を延伸した試験施工を実施してきた. これまでの研究から地山条件によっては, 標準区間と延伸区間において, 計測された変位や支保工に発生した応力が同程度であることが確認された. 本稿では, これらの傾向を検証するため, 一掘進長を延伸したことによる地山の変位, 支保工に発生する応力等を有限差分法による数値解析にて再現し, 試験施工で得られた計測結果と併せて分析をした.

2. 数値解析

(1) 解析条件

本稿では, 一掘進長を延伸したことによる地山の変位および支保工に発生する応力等を検証するため, 三次元有限差分法(FLAC3D)によって掘削過程を模擬した数値

解析を実施した。本解析では、国土交通省の道路トンネルにおけるCII-bパターン(インバートなし)を対象に実施した。

図-1に解析モデルを示す。同モデルでは、試験施工を実施した標準的な2車線道路トンネル（後述する表-4のAトンネルを参考）を想定し、トンネル掘削径 $D=12.4\text{m}$ 、土被り 80m とし、側方向はSL位置より $5D$ 、下方向は $3D$ とし、奥行きは手前側と奥側の境界面の影響に配慮して 150m (掘進 120m)でモデル化した。解析領域は掘削の対称性を考慮した半断面とし、境界条件は、上面を自由面、側面をローラー境界、底面を固定境界とした。初期応力は側圧係数を 1.0 として、各要素に土被り相当の自重を作用させた。

掘削については、標準的なCII-bパターンの掘削方法である補助ベンチ付全断面工法を模擬し、上下半を掘進長に合わせた逐次解析とした。一般的なベンチ長は $2\sim 3\text{m}$ 程度であるため、本解析では2サイクル上半(掘進長 $\times 2$ サイクル)を掘削後、下半を掘削するステップとした。掘進長については、一掘進長延伸に伴う影響を検証するため、CII-bパターンの標準一掘進長 1.2m と標準一掘進長から延伸した 1.5m の2ケースで解析を実施した。各支保工の設置間隔は、掘進長に併せることとし、上下半の各切羽 $1.2\sim 1.5\text{m}$ 後方の位置から設置することとした。

表-1に解析に用いた地山物性値を示す。本解析では、基礎的な挙動を把握する観点から地山を線形弾性体とし、物性値はトンネル数値解析マニュアル³⁾におけるCIIに相当する値を採用した。実際のCIIの地山では亀裂・割目の影響が多いことが考えられ、本研究で実施した解析ではその影響を考慮することには限界があることに留意しておく必要がある。また、同支保パターンでの延伸に際して、地山が悪化した場合を想定し、DIに相当する地山においても解析を実施した。表-2に解析に用いた支保工仕様を示す。支保部材の断面積や断面二次モーメント等の物性値は、トンネル標準示方書⁴⁾の各支保部材仕様に相当する値を用いた。吹付けコンクリートについては、試験施工において初期強度確保のために高強度(36N/mm^2)の吹付けコンクリートを使用している実例が多いため、設計基準強度 18N/mm^2 、 36N/mm^2 の2ケースで解析を実施した。物性値は、材齢による弾性係数の変化を考慮し、トンネル掘削1サイクルを標準を7時間、延伸を8時間と設定し、掘削ステップごとに材齢強度に応じた弾性係数を適用した。材齢と吹付けコンクリート強度の関係は、瀬崎ら⁵⁾に示されている関係式を材齢28日で所定の設計基準強度となるように補正したものを用いた。これらを踏まえ、表-3に示す解析ケースを実施した。

(2) 解析結果

掘削切羽面から 30m 後方位置の天端部、肩部、SL部に

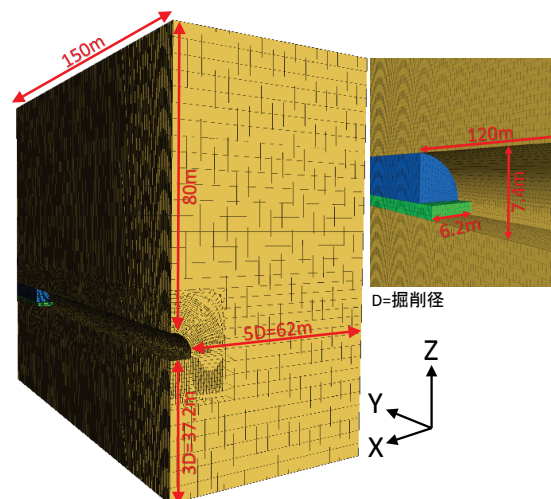


図-1 解析モデル

表-1 地山物性値

	CII	DI
地山モデル	線形弾性体	
単位体積重量 γ (kN/m^3)	23	
変形係数 E (MPa)	1,000	500
ポアソン比 ν	0.30	0.35

表-2 支保工部材の仕様

	仕様	要素モデル	変形係数
吹付けコンクリート ($18, 36 \text{ N/mm}^2$)	$t=100\text{mm}$	Shell	強度発現考慮
鋼アーチ支保工	H-125	Beam	$2 \times 10^5 \text{ MPa}$
ロックボルト	D25, $L=3\text{m}$	Beam	$2 \times 10^5 \text{ MPa}$

表-3 解析ケース

解析ケース	掘進長 (m)	吹付け強度 (N/mm^2)	変形係数(地山) (MPa)
Case1	1.2	18	1,000
Case2	1.5	18	1,000
Case3	1.5	36	1,000
Case4	1.2	18	500
Case5	1.5	18	500
Case6	1.5	36	500

における沈下量と吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工に発生する軸力の解析結果を図-2、図-3に示す。縦軸は、標準一掘進長の解析結果を基準とした比率を表しており、図-2はCase1、図-3はCase4を基準としている。また、図内には各部位、ケース毎の沈下量および軸力も記載する。

CII地山における解析結果(図-2)においては、沈下量では、天端部で最も大きな変位量を示しており、標準一掘進長となるCase1で 14.6mm となった。Case1に対して一掘進長を延伸したCase2の解析結果では、Case1と比較して天端部と肩部に1%程度の変位増分しかなく、SL部では変位の増減が見られなかった。また、高強度吹付けコンクリートを適用したCase3では、Case1と同程度の変位量

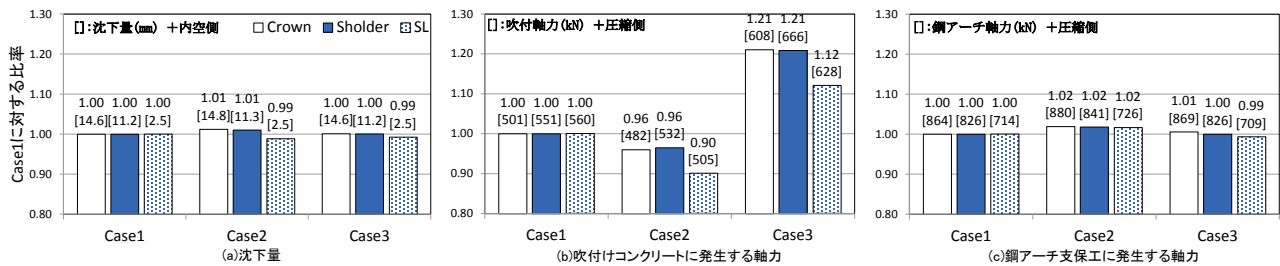


図-2 CII 地山における解析結果

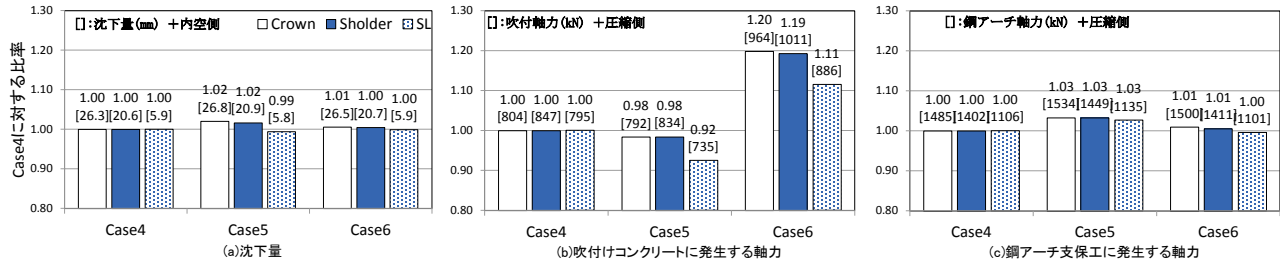


図-3 DI 地山における解析結果

表-4 試験施工の概要

トンネル	トンネル 延長 (m)	延伸 区間長 (m)	地質	岩石 グループ	支保 パターン	一掘進長 (m)		吹付けコンクリート		鋼アーチ支保工			ロックボルト			掘削 方式	
								強度(N/mm ²)	厚さ (cm)	規格	間隔 (m)	範囲	長さ (m)	間隔 (m)	範囲		
						標準	延伸	標準	試験施工								
A	2380.0	37.5	砂岩・泥岩	中硬質岩(層状)	CII-b	1.2	1.5	18	36	10	H-125	1.5	上半	3	1.5	上下半	発破
B	1530.0	200	粘板岩	硬質岩	CII-b	1.2	1.5	18	18	10	H-125	1.5	上半	3	1.5	上下半	発破

となった。吹付けコンクリートに発生する軸力においては、各部位に同程度の圧縮力が発生していることがCase1で確認される。支保工に作用する軸力については、一掘進長を延伸することで、延伸分の地山荷重が支保工に作用するため、軸力が増加することが想定されたが、Case2の解析結果では減少する傾向を示す結果となった。一方、Case3ではCase1と比較して20%程度の軸力増加が見受けられた。これは、高強度吹付けコンクリートの強度発現特性により、初期材齢時における軸力負担率が増加したことによる影響と考えられる。また、各部位の鋼アーチ支保工に発生する軸力においては、掘進長延伸に伴い2%程度の軸力増加が確認された。

続いて、DI地山における解析結果(図-3)を述べる。前述したCII地山の解析結果と同様に、掘進長延伸に伴う変位や支保工応力の増分は微小であり、Case4と比較して、Case5の沈下量は2%程度の変位増分、Case5の鋼アーチ支保工では3%程度の軸力増分が確認された。また吹付けコンクリートにおける軸力の発生傾向もCII地山の解析結果と同様の傾向を示した。発生した変位量や軸力については、地山が悪化した分、CI地山におけるCase1の解析結果より1.5~1.8倍程度の変位および軸力が発生している。

これらの解析結果から、同一支保パターンにおいて延伸した場合、延伸に伴う変位および支保応力は増加傾向にあるが、これらの増分は微量であり、標準一掘進長を採用した区間と数値解析上は殆ど差がでない結果となった。

3. 試験施工における計測結果

ここでは、CII-bパターンで実施した2トンネルの試験施工で得られた計測結果を整理するとともに、前項で述べた解析結果の検証を行った。

(1) 試験施工の概要

表-4に試験施工の概要を示す。試験施工においては、一掘進長の延伸に伴う効果を分析するため、施工現場において地質状況が同程度と判断される区間に関して、一掘進長の延伸を実施する区間(以後延伸区間)と実施しない区間(以後標準区間)を設けることで、各区間で得られる切羽観察と計測結果を比較して、一掘進長延伸の適用性を検討した。

本稿で対象とした支保パターンは、CII-bであり、標準一掘進長1.2mから1.5mに延伸し、標準および延伸区間における鋼アーチ支保工とロックボルトの延長方向の設置間隔は、それぞれの一掘進長に合わせて設定した。また、延伸区間における吹付けコンクリートの強度は、Aトンネルでは初期強度の高い36N/mm²を採用し、Bトンネルでは標準区間と同様の一般的な仕様である18N/mm²を採用した。対象トンネルにおいては、計測工Aに加え、ロックボルト軸力測定、吹付けコンクリート応力測定、鋼アーチ支保工応力測定の計測工Bを実施している。

(2) 計測結果

図-4に天端沈下および内空変位の計測データを示す。

Aトンネルでは、標準区間と比較して延伸区間の変位が相対的に小さい傾向にあり、Bトンネルでは延伸区間の変位が標準区間と比較して若干大きい傾向にある。両トンネルともに、天端沈下は10mm以下、水平内空変位は5mm以下となっており、各トンネル現場における管理レベルIを下回っており、施工時に発生した変位としては問題ないと判断されている。

図-5、図-6に対象トンネルにおける天端、肩部、側部の吹付けコンクリート(SC)と鋼アーチ支保工(SS)に発生している軸力、およびそれらの軸力合計値(SUM)を示す。Bトンネルにおいては、天端と側部のみの計測となる。Aトンネルにおいては、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工に発生する軸力は降伏応力以下となっており、変位の発生も報告されていない。また、天端部、右肩、右側部においては、吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工ともに、標準区間と比較して延伸区間に発生している軸力は小さい。軸力合計値においても、左側部を除いた全部位で延伸区間の軸力が標準区間に比べ大きく、延伸区間が標準区間と比較して良好な状態であったことが伺える。Bトンネルにおいては、試験施工を実施した標準区間と延伸区間にて岩石試験を実施しており、薄い層が重なる堆積岩という岩質や良好な岩質部で供試体を採取しているなど、試験結果の取り扱いには留意が必要であるものの、両区間における一軸圧縮強度、ヤング率、単位体積重量の値に差がない試験結果が得られていることから、標準区間と延伸区間の岩質は同等であったと見なせることが想定される。このような地山条件での試験施工が想定されるBトンネルの試験施工結果では、標準区間と比較して、延伸区間の変位量と吹付けコンクリートの軸力が増加する傾向にあることが確認される。ただし、延伸区間の変位増分は微量であり、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工に発生する軸力は降伏応力以下となっている。

(3) 考察

試験施工における計測結果では、一掘進長を延伸した場合でも地山条件によっては変位や支保工応力は増加しない傾向にあるとともに、増加したとしてもその増分は微量な値である。これらの傾向は、解析結果の傾向と概ね一致し、同一支保パターンにおいて延伸した場合でも、標準区間と同等程度の中長期的な支保の安全性や健全性を確保できる可能性があることを示していると考えられる。ただし、Bトンネルにおいて、延伸に伴い吹付けコンクリートに発生する軸力が増加する傾向にあり、数値解析においては減少する傾向となっているため、現場における詳細な分析と同時に数値解析における吹付けコンクリ

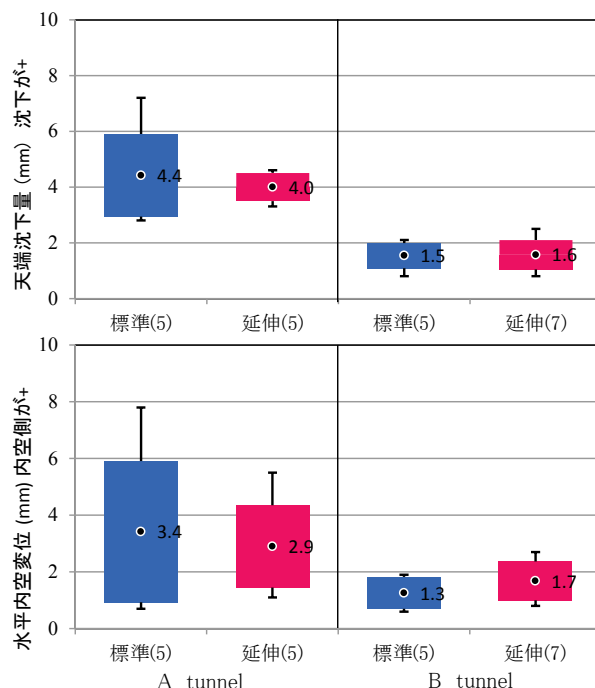


図-4 天端沈下および内空変位の計測結果

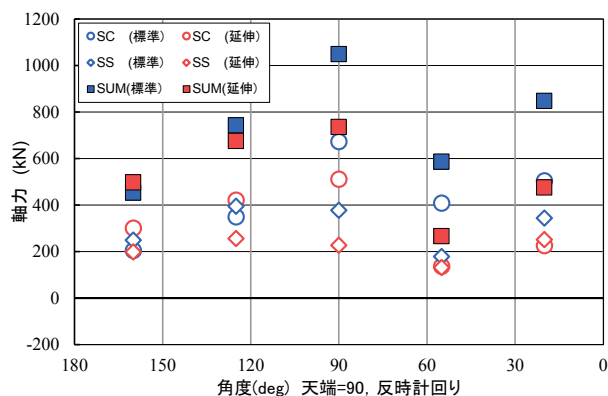


図-5 Aトンネルの軸力計測結果

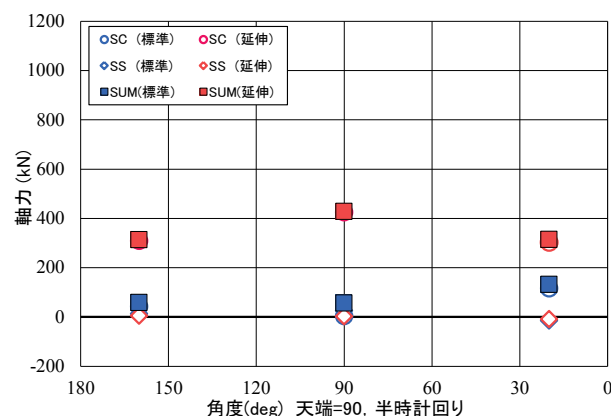


図-6 Bトンネルの軸力計測結果

ートの発生応力の再現性について検討が必要である。また、実施工において岩盤の不連続面に起因する抜け落ち等の荷重が作用する可能性があり、本数値解析ではモデル化できてない。解析値と計測値の差異は、これらの現象に起因する可能性も考えられるため、今後の検討課題である。

4. おわりに

本稿では、国土交通省のトンネルにおけるCII-bパターンを対象とし、標準的な一掘進長1.2mから1.5mに延伸したことによる地山の変位、支保工に発生する応力等を数値解析により再現することで、試験施工により得られた計測結果の傾向の検証を行った。

その結果、同一支保パターンにおいて延伸した場合、延伸に伴う変位および支保応力は増加傾向にあるが、これらの増分は微量であり、標準一掘進長を採用した区間と数値解析上は殆ど差がでない結果となった。このことから、標準一掘進長を採用した区間と同等程度の支保の安全性や健全性そのものは、連続体の地山である前提においては確保できる可能性があることが推察される。また計測結果においても、一掘進長を延伸した場合でも地山条件によっては変位や支保工応力は増加しない傾向にあるとともに、増加した場合でもその増分は微量な値であることから、解析結果の傾向と概ね一致する結果となった。

今後の課題としては、吹付けコンクリートの発生応力については、解析結果と計測結果の傾向が一致しなかったため、数値解析における吹付けコンクリートの発生応力の再現性について検討が必要である。また、掘進長の

延伸の際には、支保の健全性等のみで判断するのではなく、切羽や素掘り面の安定性に関する評価も重要である。今後の研究においては、施工時に一掘進長延伸の可否を判断できる材料を整理する必要があるとともに、実際に運用するうえで必要となる経済性や工期短縮に関する検討を行うことで、掘進長延伸が可能な場合の適用条件を検討する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説，平成 15 年 11 月
- 2) 河田皓介，砂金伸治，淡路動太，日下敦，真下英人：一掘進長延伸を適用した山岳トンネルの観察・計測結果に関する一考察，第 49 回地盤工学研究発表会，pp1301-1302，2014.7
- 3) 日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル，1998.
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説，2016.
- 5) 瀬崎満弘，岐部哲郎，市川康明，川本朧万：吹付コンクリートの強度と変形特性に関する研究，材料，Vol.38，No.434，pp.1336-1340，1989.

(2017. 8. 11 受付)

A STUDY OF SAFETY OF SUPPORT IN THE CASE OF EXTENDING A CYCLE LENGTH

Tomoya YOSHIOKA, Nobuharu ISAGO, Atushi KUSAKA and Takaaki KOIDE

Rationalization of construction in mountain tunnels is required recently. For example, reduction of cost and shortening of construction period are included. The extended cycle length is possible for reduction of support degree and increase of speed of construction, because the installation interval of excavation and support is expanded compared with the standard cycle length. But conditions of unsupported excavation becomes larger, so there are some concerns about lowering of safety at the time of construction and instability of support due to deformation or stress increase acting on the support.

For the purpose of the rational design and construction numerical analysis are performed and its result are compared with the actual measurement results in site. It was shown that the extended length of excavation may lead to the possibility of construction rationality from this study.