

トンネル更新時の拡大掘削における支保構造に関する解析的検討

小出 孝明¹・日下 敦²・吉岡 知哉³・砂金 伸治⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
E-mail: t-koide@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

³正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒530-0005 大阪府大阪市中之島3-2-18)
(元 国立研究開発法人 土木研究所)
E-mail: yoshioka-tmy@oriconsul.com

⁴正会員 首都大学東京 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
(元 国立研究開発法人 土木研究所)
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

古い道路トンネルには断面積が小さいものなどがあり, 必要に応じてトンネル断面を拡大する掘削が実施されている. この場合, 何も無い地山に新たにトンネルを掘削する場合は力学的な条件が異なることなどから, 新たに設置される支保構造に必要なとされる力学的特性などに違いが生じている可能性がある. しかしながら, 工事实績が少なく技術的な知見は十分ではないため, 現状では既往の基準類に従い設計・施工されている. このような状況を踏まえ, 筆者らは, まず, 数値解析によりトンネル拡大掘削時の支保構造の力学的特性や周辺地山の力学的な挙動などについて確認した. 加えて, 従来の掘進長を変更した解析を行い, 拡大掘削の特徴に合わせた支保構造の目安について検討した.

Key Words : re-excavation, mechanical behavior, excavating length, numerical analysis

1. はじめに

古い道路トンネルの中には断面積が小さいものがあり, 図-1に示すように, 必要に応じてトンネル断面を拡大する掘削 (以降, 拡大掘削) が実施されている. このような場合, 現状では既往の基準類¹⁾に従い設計・施工されているが, 何も無い地山に新たにトンネルを掘削 (以降, 新設掘削) する場合と比べて, 力学的条件に以下のような違いがあると考えられる.

- ・既設トンネルの掘削時に周辺地山の応力の再配分が発生している.
- ・既設トンネルの周囲を切抜ける掘削となるため, 新設掘削と比較して掘削断面積が小さいとともに掘削部の形状が異なる.
- ・切羽前方に既設トンネルが存在し, 地山の変形に対する抵抗性が異なる可能性がある. など

筆者らは, 条件の違いが拡大掘削と新設掘削の力学的特性にどの程度の差を与えるかという点に着目し, 数値解析により確認した. 加えて, 従来の掘進長を変更した解

析を行い, 拡大掘削の条件に合わせた支保構造の目安について検討した. 手順としては, CI~DIIを対象とした弾性解析を行った後に, CII~DIIを対象とした弾塑性解析により塑性化の影響を考慮した検討を行った. なお, 弾性解析による検討の一部は既に報告²⁾している.

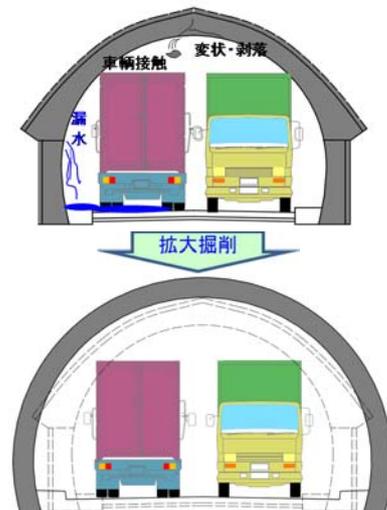


図-1 拡大掘削のイメージ

2. 数値解析の概要

(1) 解析モデル

3次元有限差分法による解析を実施し、解析モデルの設定は主に過去の拡大掘削の施工事例を参考に設定した。図-2に示すとおり、既設トンネルは1.5車線断面を想定して半径を3.4mに、拡大掘削後に新たに構築されるトンネルは2車線に歩道が付く断面を想定して半径を6.0mに設定し、左右対称の掘削を想定して半断面モデルとした。また、比較検討のために、新設掘削のトンネル断面は拡大掘削後に新たに構築されるトンネル断面と同一とした。次に、構成要素について、既設トンネルは矢板工法による構築とし、1次支保工はモデル化せず、厚さ40cmの覆工コンクリートをシェル要素でモデル化して地山荷重を支持する設定とした。また、拡大後に新たに構築するトンネルは吹付けコンクリートをシェル要素で、鋼アーチ支保工をビーム要素でそれぞれモデル化し、ロックボルトはモデル化しない。地山はソリッド要素でモデル化し、解析領域はトンネル掘削径Dに対して上下左右に5Dを確保し、モデルの延長は150mとして90m地点までを掘削する。最後に、境界条件については、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。

(2) 解析条件

主な解析条件については表-1のとおりとし、地山等級CI, CII, DIを対象とした弾性解析、地山等級CII, DI, DIIを対象とした弾塑性解析を行った。また、支

保部材の条件として、吹付けコンクリートの設計基準強度を18MPaとした。また、材齢による弾性係数の変化を考慮し、掘削サイクルを8時間として、掘削ステップごとの材齢強度に応じた弾性係数を適用した。材齢による弾性係数の変化の算定については、淡路ら³⁾が用いた方法に従った。また、トンネル支保構造は、道路トンネル技術基準に示される標準的な支保構造の組み合わせの目安に従い、各地山等級で設定した。掘削工法については、比較のために新設掘削、拡大掘削ともに、ベンチ長を3掘進長分とする補助ベンチ付き全断面掘削工法に統一した。また、既設トンネルの掘削については、1ステップで全区間を掘削することとし、掘削と同時に覆工コンクリートを設置する条件とした。

(3) 解析ケース

本解析では、表-2に示すとおり、既設トンネルを拡大掘削するケースと何も無い地山に新たにトンネルを建設する新設掘削のケースを設けて各地山等級毎に力学的な特性を比較した。ここで、拡大掘削時に新たに構築されるトンネル断面と新設掘削で構築されるトンネル断面は同一のものとした。また、拡大掘削における掘進長を延伸するCASEを設けて比較検討した。

3. 数値解析の結果

(1) トンネル支保構造における力学的挙動の比較

切羽から30m離れた位置の天端沈下量、SL位置の水平

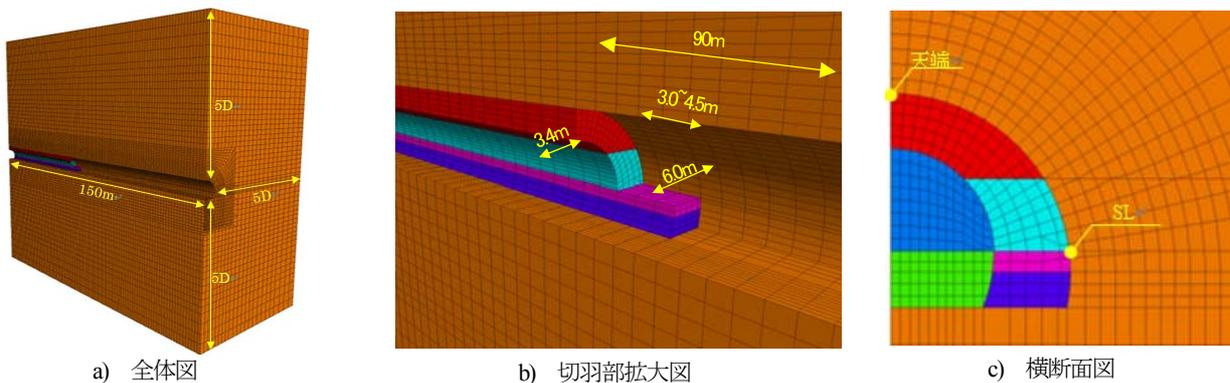


図-2 解析モデル

表-1 解析条件

要素タイプ	地山				吹付けコンクリート				鋼アーチ支保工				覆工コンクリート(既設トンネル)			
	CI	CII	DI	DII	CI	CII	DI	DII	CI	CII	DI	DII	CI	CII	DI	DII
モデルタイプ	ソリッド				シェル				ビーム				シェル			
弾性係数(MPa)	2,000	1,000	500	150	19,000(材齢を考慮)				— 210,000 210,000 210,000				22,000 22,000 22,000 22,000			
ポアソン比	0.30	0.30	0.35	0.35	0.20 0.20 0.20 0.20				— 0.30 0.30 0.30				0.30 0.30 0.30 0.30			
厚さ(cm)	—	—	—	—	10 10 15 20				— — — —				40 40 40 40			
断面二次モーメント y方向(m ⁴)	—	—	—	—	— — — —				— 6.99.E-06 8.39.E-06 1.62.E-05				5.33.E-03 5.33.E-03 5.33.E-03 5.33.E-03			

変位量および天端位置の吹付けコンクリート軸力について表-3にまとめる。表中には、地山等級毎に新設掘削を1.0とした場合の拡大掘削および拡大掘削で掘進長を延伸する場合（以降、拡大掘削(延伸)）との解析値の比率を示した。また、図-3にトンネル縦断方向の変位分布状況として、弾性解析における地山等級D Iを示した。

まず、拡大掘削では新設掘削と比較して、C Iでは沈下量で13%、水平変位量で26%、吹付けコンクリート軸力で26%発生量が小さい。C IIでは沈下量で8%、水平変位量で26%、吹付けコンクリート軸力で19%発生量が小さい。D Iでは塑性化の影響により変位量が大きくなっている弾塑性解析の結果でまとめると、沈下量で5%、水平変位量で23%、吹付けコンクリート軸力で12%発生量が小さい。D IIの拡大掘削では新設掘削と比較して沈下量で4%、水平変位量で27%、吹付けコンクリート軸力で4%発生量が小さい。これらの結果から、拡大掘削では新設掘削と比較して支保構造の負担が低減していることが示唆される。また、地山が軟らかくなるに従って負担の低減率が小さくなる傾向が確認された。

次に拡大掘削と拡大掘削(延伸)を比較すると、C I～C IIにおいては掘進長を延伸する影響は明確には現れていないが、D I～D IIにおいては沈下量で2～3%、水平変位量で1～3%の増加が確認された。吹付けコンクリート軸力ではD Iでは4%減少しているが、D IIでは2%増加する結果となった。これらの比較の結果から、拡大掘削において新設掘削の支保構造を適用している現状では、支保構造は比較的余裕のある仕様になっている可能性が示唆される。また、掘進長を指標として比較する解析の結果から、掘進長を20～30%長くすることにより支保構造に生じる影響は、拡大掘削の力学的条件の特徴により発生している余裕の範囲内にあり、掘進長を延伸した場合にも力学的な安定が確保されることが示唆された。

(2) 切羽前方地山および既設トンネルの力学的挙動に関する比較

既設トンネルの天端に発生する軸力および天端沈下量を表-4にまとめる。また、表中には拡大掘削の影響範囲外と判断される一定した値を定常値と称し、これを1.00とした場合の比率を示す。新たに構築するトンネルの掘削径12mをDとすると、全てのCASEで既設トンネルの軸力が顕著に増加している範囲は1D以内であることが確認された。また、掘進長の延伸による影響は微小であった。現れた傾向として、地山が軟らかくなるに従って、切羽から1D以内の軸力の増加率が大きくなることから、特に活線施工を計画する場合には、既設トンネルの材質劣化や巻き厚不足などの状態の確認、防護工の設置範囲や設計強度などの仕様について、事前に確認や検討を実施しておくことが重要になると考えられる。

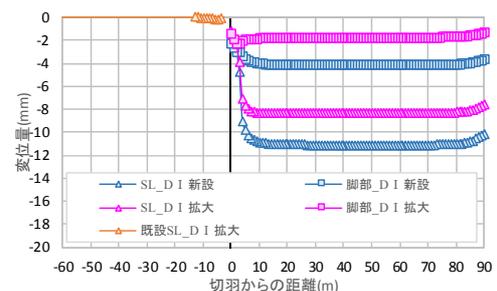
次に既設トンネルに発生する天端沈下量を表-5にまとめる。

表-2 解析 CASE

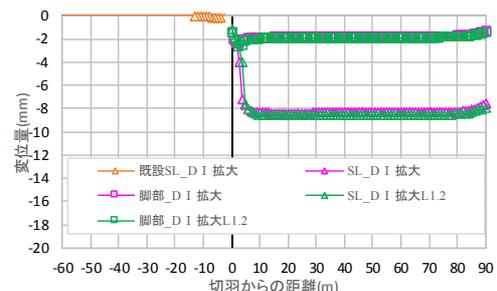
CASE	掘削条件	掘削方法	地山等級	掘進長
弾性解析	1	新設掘削	CI	1.5
	2		CII	1.2
	3		DI	1.0
	4	拡大掘削	CI	1.5
	5		CII	1.2
	6		DI	1.0
	7		CI	2.0
	8		CII	1.5
	9		DI	1.2
弾塑性解析	10	新設掘削	CII	1.2
	11		DI	1.0
	12		D II	1.0
	13	拡大掘削	CII	1.2
	14		DI	1.0
	15		D II	1.0
	16	拡大掘削(掘進長延伸)	CII	1.5
	17		DI	1.2
	18		D II	1.2

表-3 切羽から30m離れた位置の解析結果

CASE	地山等級	設定	掘進長(m)	沈下量		水平変位量		吹付けコンクリート軸力			
				天端		SL		天端			
				値(mm)	比率	値(mm)	比率	値(kN)	比率		
弾性解析	C I	新設	1.5	-6.0	1.00	-3.4	1.00	-232	1.00		
				4	拡大	-5.2	0.87	-2.5	0.74	-172	0.74
				7	拡大延伸	-5.2	0.87	-2.5	0.74	-150	0.65
弾性解析	C II	新設	1.2	-10.6	1.00	-6.1	1.00	-409	1.00		
				5	拡大	-9.8	0.92	-4.5	0.74	-332	0.81
				8	拡大延伸	-9.9	0.93	-4.6	0.75	-303	0.74
弾塑性解析	C II	新設	1.2	-10.6	1.00	-6.1	1.00	-409	1.00		
				13	拡大	-9.8	0.92	-4.5	0.74	-333	0.81
				16	拡大延伸	-9.9	0.93	-4.6	0.75	-303	0.74
弾性解析	D I	新設	1.0	-18.1	1.00	-11.1	1.00	-901	1.00		
				6	拡大	-17.3	0.96	-8.4	0.76	-803	0.89
				9	拡大延伸	-17.7	0.98	-8.6	0.77	-762	0.85
弾塑性解析	D I	新設	1.0	-18.7	1.00	-11.8	1.00	-937	1.00		
				14	拡大	-17.7	0.95	-9.1	0.77	-829	0.88
				17	拡大延伸	-18.2	0.97	-9.4	0.80	-790	0.84
弾塑性解析	D II	新設	1.0	-47.8	1.00	-32.2	1.00	-1124	1.00		
				15	拡大	-45.8	0.96	-23.6	0.73	-1080	0.96
				18	拡大延伸	-47.3	0.99	-24.6	0.76	-1098	0.98



a) D Iの新設掘削(CASE3)と拡大掘削(CASE6)



b) D Iの拡大掘削(CASE6)と拡大掘削(延伸)(CASE9)

図-3 水平変位量の比較

沈下量は総じて1mm未満と微小であり、また、地山等級による違いは明確には現れていない。この結果からは、既設トンネルのある一定の抵抗性が、地山の硬軟に起因する掘削時の地山の変形量の差を縮小している可能性が考えられる。このような既設トンネルの抵抗性は拡大掘削時の切羽の安定に寄与することが推定される。

図-4にトンネル縦断方向の水平変位の分布を示す。これによれば、拡大掘削では新設掘削と比較して変形量や変形の範囲が縮小されている状況が確認できる。縮小の程度について、それぞれの分布図に現れる水平変位の最大値で比較すると、地山等級毎に多少のばらつきはあるものの、拡大掘削では新設掘削と比較して、変位量が概ね半減していることが確認された。

4. 結論

今回の解析条件下では、拡大掘削において新設掘削と同様の支保工を適用する場合には、新設掘削と比較して支保構造に発生する荷重や変位量が小さくなり、比較的余裕がある可能性が示唆された。また、拡大掘削時の切羽は新設掘削と比較して安定的となる可能性が確認された。そのため、拡大掘削において掘進長を20~30%程度延伸する解析を行ったところ、新設掘削と比較して支保構造に発生する荷重や変位量が小さい状態が保たれており、拡大掘削における支保構造の目安となる可能性が示唆された。しかしながら、DIIにおいては新設掘削とほぼ同等の荷重や変位が発生する結果となり、掘進長の延伸を実行する際には、切羽観察および計測工などにより地山状況を確認した上で判断することが重要であると考えられる。更に、拡大掘削が既設トンネルに与える影響の程度などが確認され、活線施工時の施工方法や防護工などの検討に資する基礎的な情報が得られた。今後は試験施工などを実施して実測値を収集し、解析との整合を確認しながら検討を進めていきたい。

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，pp.125-131，2003.
- 2) 小出孝明，砂金伸治，日下敦，吉岡知哉：既設トンネルの断面を拡大する掘削に関する解析的検討，土木学会年次学術講演会論文集（投稿中），2018.
- 3) 淡路動太，砂金伸治，日下敦，河田皓介：支保剛性の材齢変化を考慮した山岳トンネル支保工の力学的挙動に関する一考察，土木学会年次学術講演会論文集 pp.437-438，2014.

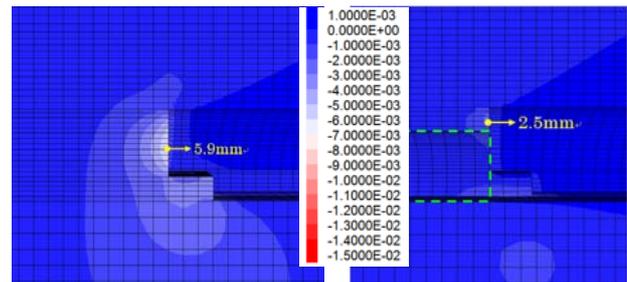
(2018. 8.10 受付)

表-4 既設トンネルの天端に発生する軸力

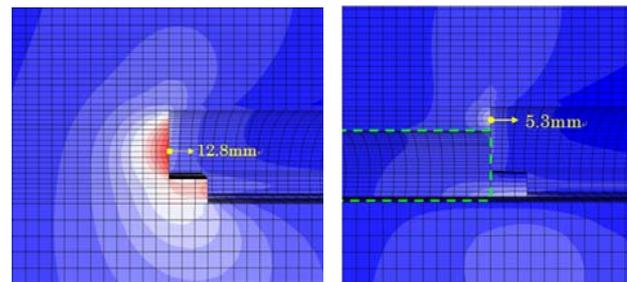
CASE	地山等級	設定	掘進長(m)	軸力(kN) ※ 0内は定常値を1.00とした場合の比率					
				切羽からの距離 (D:掘削径=12m)					
				0	-1D	-2D	-3D	-4D	定常値
4	C I	拡大	1.5	-4208 (1.20)	-3567 (1.00)	-3517 (1.00)	-3508 (1.00)	-3505 (1.00)	-3505 (1.00)
		拡大延伸	2.0	-4248	-3567	-3517	-3508	-3505	-3505
5	C II	拡大	1.2	-5559 (1.36)	-4180 (1.02)	-4118 (1.00)	-4106 (1.00)	-4103 (1.00)	-4101 (1.00)
		拡大延伸	1.5	-5539	-4178	-4118	-4106	-4103	-4102
14	D I	拡大	1.0	-6703 (1.49)	-4592 (1.02)	-4515 (1.00)	-4502 (1.00)	-4497 (1.00)	-4496 (1.00)
		拡大延伸	1.2	-6642	-4598	-4515	-4502	-4497	-4496
15	D II	拡大	1.0	-7525 (1.59)	-4878 (1.03)	-4744 (1.00)	-4748 (1.00)	-4745 (1.00)	-4744 (1.00)
		拡大延伸	1.2	-7395	-4894	-4742	-4749	-4744	-4744

表-5 既設トンネルの天端に発生する沈下量

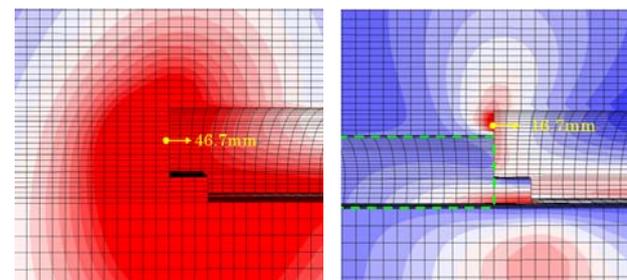
CASE	地山等級	設定	掘進長(m)	沈下量(mm) ※ 0内は定常値を1.00とした場合の比率					
				切羽からの距離 (D:掘削径=12m)					
				0	-1D	-2D	-3D	-4D	定常値
4	C I	拡大	1.5	-0.85 (14.2)	-0.17 (2.83)	-0.11 (1.83)	-0.08 (1.33)	-0.06 (1.00)	-0.06 (1.00)
		拡大延伸	2.0	-0.87	-0.18	-0.11	-0.07	-0.06	-0.06
5	C II	拡大	1.2	-0.81 (10.1)	-0.28 (3.50)	-0.16 (2.00)	-0.11 (1.38)	-0.08 (1.00)	-0.08 (1.00)
		拡大延伸	1.5	-0.77	-0.24	-0.16	-0.11	-0.07	-0.07
14	D I	拡大	1.0	-0.95 (7.92)	-0.40 (3.33)	-0.30 (2.50)	-0.20 (1.67)	-0.14 (1.17)	-0.12 (1.00)
		拡大延伸	1.2	-0.96	-0.43	-0.32	-0.22	-0.15	-0.13
15	D II	拡大	1.0	0.18 (-)	-0.78 (1.70)	-1.10 (2.39)	-0.70 (1.52)	-0.50 (1.09)	-0.46 (1.00)
		拡大延伸	1.2	0.29	-0.72	-1.07	-0.65	-0.45	-0.40



a) C IIの新設掘削(CASE10)と拡大掘削(CASE13)の比較



b) D Iの新設掘削(CASE11)と拡大掘削(CASE14)の比較



c) D IIの新設掘削(CASE12)と拡大掘削(CASE15)の比較

図-4 切羽前方地山の変位分布状況図

A STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF NEWLY-BUILT STRUCTURES DURING RE-EXCAVATION OF ROCK TUNNEL THROUGH NUMERICAL ANALYSIS

Takaaki KOIDE, Atsushi KUSAKA, Tomoya YOSHIOKA and Nobuharu ISAGO

As required we re-excavate old tunnel which is small. In such case, there is some possibility of difference in mechanical behavior between during re-excavation and during typical excavation, because mechanical situation is mutually different. However, newly-built structures are constructed on the basis of the existing typical tunnel criteria, because mechanical behavior during re-excavation is unclear due to lack of knowledge about it yet. Hence, we examine basic mechanical behavior during re-excavation through numerical analysis as a first step. And we consider the possibility of changing excavating-length for the purpose of matching structures to mechanical behavior during re-excavation.