

既設トンネルの断面を拡大する掘削における周辺地山の挙動に関する実験的検討

国立研究開発法人土木研究所 正会員
 首都大学東京大学 正会員

○小出孝明・日下敦・巽義知
 砂金伸治

1. はじめに

道路トンネルにおいては、小さいトンネルの断面を拡大する掘削(以降、拡大掘削)が必要になる場合がある(図-1)。これに関して、拡大掘削と何も無い地山に新たにトンネルを掘削する場合(以降、新設掘削)を数値解析により比較した既往の報告²⁾があり、拡大掘削において新たに設置するトンネルの支保構造に生じる変位や応力は新設掘削時と比較して小さくなる傾向が示唆されている。また、既設トンネルを掘削した際に周辺地山の応力の再配分が既に発生していること、掘削断面積が比較的小さいこと等の条件に起因してこの傾向が発生していると推察されている。本稿ではこの報告を踏まえ、拡大掘削と新設掘削を模擬した室内実験を行い、掘削時の周辺地山の挙動を比較検討した結果を報告する。

2. 実験の概要

2-1 実験ケース

同一の荷重を載荷した状態の地山に対して、 $\phi 180\text{mm}$ で掘削した後に $\phi 300\text{mm}$ で掘削する拡大掘削を模擬する CASE1 と、 $\phi 300\text{mm}$ の断面を一度に掘削する新設掘削を模擬する CASE2 の2つを実施して比較することとした。

2-2.実験装置

実験には図-2 に示す2次元載荷装置を用いた。この装置は鋼材を組み立てて、縦 1210mm、横 1210mm、深さ 300mm の直方体の空間が形成されており、更に図-3 に示すような鋼製で剛性の高い蓋を固定して空間を密閉することができる。また、左右と下方の鋼壁は鋼製の支保工で固定されていて、上方に設置された3個の油圧ジャッキにより載荷することができる。

拡大掘削を再現するためには、装置内の地山に対して2段階の掘削を実施する必要がある。そのため、蓋の中心部に設けた 300mm の円孔を、写真-1 に示すように加工した厚さ 9mm の鋼製の円蓋で塞いだ。この円蓋は $\phi 360\text{mm}$ の円形の鉄板の中央に $\phi 180\text{mm}$ の円孔を設けたものに、 $\phi 240\text{mm}$ の円形の鉄板をボルトで固定できる構造であり、2枚の円蓋を一体化した状態で図-3 に示されているような装置の蓋の円孔部にボルトで固定することで、装置内の模擬地山を平面ひずみ状態に保てる。

2-3 地山を模擬する材料

模擬地山は貧配合モルタルで製作することとし、既往の実験³⁾を参考にした配合案を用いて配合試験を行い、掘削の作業性等を確認した上で目標強度を 0.6N/mm^2 程度に決定した。加えて、モルタルの打設日から目標強度発現までが概ね 3 日間前後となるように表-1 の配合を決定した。装置内に供試体を作成する際には、あらかじめ装置と地山の間にはテフロンシートを挟み、摩擦力が極力発生しないようにした。試験日の供試体の圧縮強度は CASE1 で 0.68N/mm^2 、CASE2 で 0.63N/mm^2 であった。

2-4 測定項目と測定方法

測定項目は模擬地山のひずみとし、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $L=54\text{mm}$ 、定格出力 $\pm 5000\mu$ 、見かけの弾性係数 40N/mm^2 のひずみ計(KM-50F)により測定した。ひずみ計は図-4 に示すように縦、横、斜め 45° の測線上に計 9 個を配置した。配置間隔は掘削面から 70mm の位置に最も近いひずみ計の中心を合わせ、そこから次のひずみ計の中心までの距離を 100mm、更に 150mm 離れた位置に最も遠いひずみ計の中心を合わせた。また、設置深さは全てのひずみ計を装置内の深さ 150mm の位置に設置した。

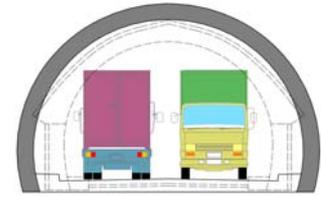


図-1 拡大掘削のイメージ

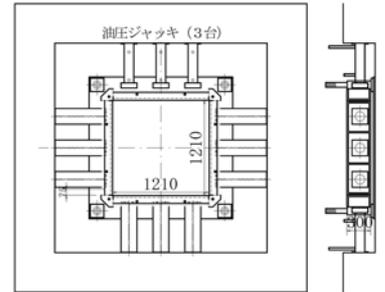


図-2 2次元載荷装置

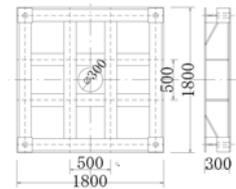


図-3 2次元載荷装置の蓋



写真-1 掘削部の円蓋

表-1 貧配合モルタルの配合

W/C	セメント(kg)	水(kg)	砂(kg)
1.407	75.0	105.5	1000.0

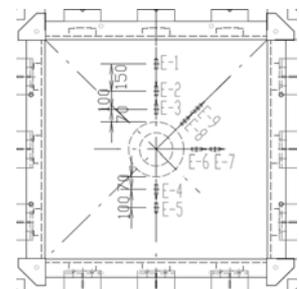


図-4 ひずみ計の配置

表-2 ひずみ計の測定値

(単位 μ -: 圧縮, +: 引張)

測線	位置	L [*]	No.	CASE1(拡大掘削)				CASE2(新設掘削)		
				ϕ 180mmの掘削深さ		ϕ 300mmの掘削深さ		ϕ 300mmの掘削深さ		
				0mm	300mm	0mm	300mm	0mm	300mm	
上下	トンネル上部	470	E-1	-198 (1.00)	-194 (0.98)	-199 (1.01)	-188 (0.95)	-180 (1.00)	-165 (0.92)	
		320	E-2	-114 (1.00)	-97 (0.85)	-99 (0.87)	-73 (0.64)	-106 (1.00)	-63 (0.59)	
		220	E-3	-118 (1.00)	-84 (0.71)	-85 (0.72)	-66 (0.56)	-117 (1.00)	-27 (0.23)	
左右	トンネル下部	220	E-4	-84 (1.00)	-38 (0.45)	-40 (0.48)	-17 (0.20)	-109 (1.00)	-30 (0.28)	
		320	E-5	-88 (1.00)	-71 (0.81)	-70 (0.80)	-44 (0.50)	-82 (1.00)	-38 (0.46)	
		E-6	220	E-6	-2	-18	-20	-22	+4	-7
斜め	E-7	320	E-7	-1	-6	-7	-10	+3	-12	
		E-8	220	E-8	-17	-27	-33	-46	-40	-11
		E-9	320	E-9	-5	-6	-6	-11	-35	-18

表中の()内に掘削開始時点のひずみを1.00とした場合の各段階のひずみを比率で示した。
 ※トンネル中心からひずみ計中心までの距離

2-5 載荷重

載荷重については、トンネルの上下方向の測線(以降、上下測線)に設置した5個のひずみ計の平均値が概ね100 μ 程度になるように設定し、1ジャッキあたり20kNで合計60kNを載荷した。油圧ジャッキの制御は荷重制御とし、実験を通して荷重を常に一定に保った。

2-6 掘削方法

模擬地山の掘削は2CASEともに、まず、 ϕ 180mmのコアカッターにより掘削部の中心に深さ約100mm程度のコア孔を開け、以降はエアピックと溝掘り用スコップを使用して削り取る方法とし、可能な限り掘削面が水平を保つように掘り下げた。

3. 実験の結果および分析

表-2に各掘削におけるひずみ計の測定値を整理した。まず、2CASEともに円蓋を開けた時点掘削深さ0mmの測定値とした。上下測線に発生している圧縮ひずみの分布は2CASEで概ね同程度であり、これを1.00として掘削過程において測定されるひずみを比率により比較した。掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合は、E-1、E-2、E-4、E-5では2CASEで概ね同程度といえる。E-3では拡大掘削で44%が解放されているのに対して、新設掘削では77%が解放されており、明確な差が生じた。次に、図-5に整理した掘削過程と上下測線のひずみの関係を確認する。E-1、E-2、E-4、E-5について、掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合は同程度であると前述したが、拡大掘削においては ϕ 180mmと ϕ 300mmの2段階の掘削があり、例えばE-4に着目すると、 ϕ 180mmの掘削で55%の圧縮ひずみが解放され、 ϕ 300mmの掘削では25%が解放されている。それに対して、新設掘削では ϕ 300mmの掘削のみで72%の圧縮ひずみが解放されている。これらは素掘りの条件下での結果ではあるが、支保工に発生する変位や応力の大きさは基本的に地山のひずみの大きさと比例する関係にあるため、既往の報告で示唆される拡大掘削において新たに設置するトンネルの支保構造に生じる変位や応力が新設掘削時よりも小さくなる傾向と概ね一致していると考えられる。

上下測線以外のひずみについて、E-6、E-7では載荷方向とひずみ計の向きが直交するため掘削開始時点ではひずみが発生しておらず、掘削の影響で若干の圧縮ひずみが発生した。E-8、E-9では拡大掘削では圧縮ひずみが増加したが、新設掘削では圧縮ひずみが減少し、挙動が一致しなかった。

4. おわりに

本実験では、拡大掘削時に周辺地山の圧縮ひずみが解放される割合が新設掘削時と比較して小さくなる結果が確認された。しかしながら、一組のケースを比較するに留まり、追加実験によるデータの蓄積が望まれる。今後は、数値解析により実験結果の詳細な分析を実施する等により検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 例えば、野村和夫：一般交通を確保しながらの現道トンネル拡幅工事，第23回日本道路会議 pp.222-223, 2001.
- 2) 小出孝明，日下敦，吉岡知哉，砂金伸治：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，トンネル工学報告集，第28巻，I-45, pp.1-5, 2018.
- 3) 河田皓介，砂金伸治，日下敦，真下英人：変状対策工を適用した山岳トンネルの耐震性に関する実験的考察，トンネル工学報告集，第23巻，I-40, pp.277-284, 2013.

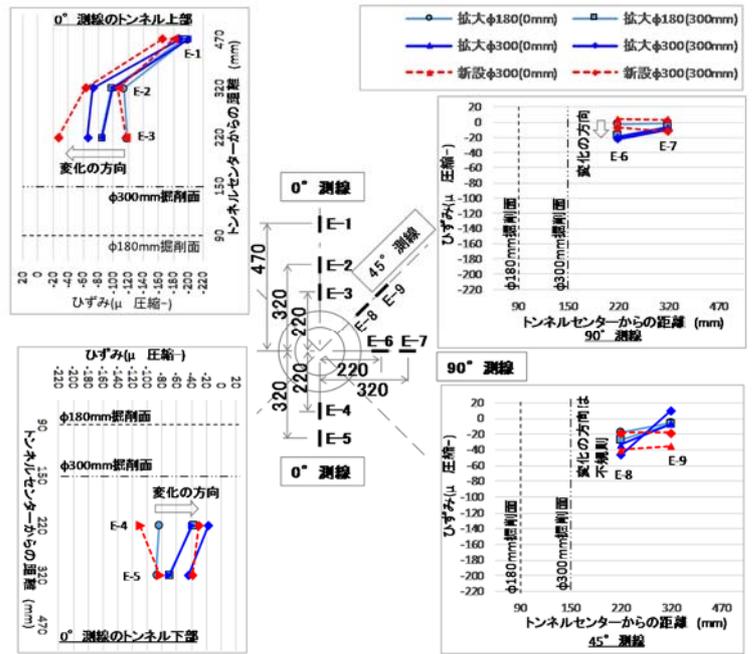


図-5 掘削過程とひずみの関係