円形トンネルの拡大掘削における周辺地山挙動に関する基礎的模型実験

巽　義知[1]・日下　敦[2]・小出　孝明[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1-6）
E-mail: tatsumi-y173bt@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1-6）
E-mail:kusaka@pwri.go.jp

[3]正会員　三井住友建設株式会社（〒104-0051 東京都中央区佃二丁目1番6号）（元土木研究所）
E-mail:tkoide@smcon.co.jp

[4]正会員　東京都立大学（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

トンネル掘削において，導坑や既設トンネルの周囲を掘り広げる等，トンネル断面を拡大する掘削（拡大掘削）が実施されている．この場合，掘削による応力再配分が発生した後の地山を掘削すること等により，既往の何もない地山に新たにトンネルを掘削（新設掘削）する場合とは，新たに設置する支保構造に生じる変位や応力が異なる可能性がある．本研究では，これまで先行的に，拡大掘削時の周辺地山の挙動に関する基礎的な検討として，拡大掘削と新設掘削を模擬した室内実験を 1 組（各 1 ケース）行い比較検証したことに続き，載荷条件を変えた 2 組のケースで実験を行い，既設トンネルがある状態でその断面を拡大掘削すると，周辺地山において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こと等を確認した．

Key Words: *re-excavation, circular tunnel,behavior of surrounding ground,laboratory test*

1. はじめに

トンネル掘削において，導坑や既設トンネルの周囲を掘り広げる等，トンネルの断面を拡大する掘削（以降，拡大掘削）が実施されている．拡大掘削は，工事実績が少なく技術的な知見の少ない現状では，既往の何もない地山に新たにトンネルを掘削（以降，新設掘削）する場合に用いる基準類を参考に設計・施工されることが多い．しかし，拡大掘削では，掘削による応力再配分が発生した後の地山を掘削すること等により，新設掘削する場合と比較して，新たに設置する支保構造に生じる変位や応力が異なる可能性がある．

既往の数値解析結果によると，拡大掘削では，新設掘削に比べ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小さくなる傾向が示唆されている [1]．これを実現場で検証するには，拡大掘削と新設掘削を同一の地山条件で比較する必要があるが，地山は不均質であることが多く困難である。そこで，先行研究 [2]において，拡大掘削時の周辺地山の挙動に関する基礎的な検討として，拡大掘削と新設掘削を模擬した室内実験を行い比較検証した．その結果，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こと等を確認している．しかし，これは 1 組のケースの限られた条件での比較結果であった．本研究では，載荷条件を変えた 2 組のケースでの実験を行い検討を進めた．

2. 実験概要

本研究では，2 次元載荷装置を用い，貧配合モルタルで作成した模擬地山を同一の載荷条件下で拡大掘削と新設掘削をそれぞれ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証した．

(1) 2 次元載荷装置概要，掘削手順

写真-1，**図-1** に本研究で用いた 2 次元載荷装置を示す．

2次元載荷装置は，鋼材により縦 1210mm，横 1210mm，深さ 300mm の大きさの直方体の空間が形成されており，**図-2** に示すような鋼製で剛性の高い蓋を固定することで，その空間を密閉することができる．また，**図-1** の上方と左方の壁は可動壁とすることができ，それぞれ 3 個の油圧ジャッキにより載荷できる．

蓋の中心部には，模擬地山を掘削するためのφ300mm の円孔を設けている．円孔は，蓋と同厚φ300mm の鉄板を付けたφ360 の円蓋をボルト固定することで密閉できる構造としている．さらに，円蓋の中央には，拡大掘削における 2 段階の掘削を実施するため，φ180mm の円孔を設け，その円孔は同厚φ180mm の鉄板を付けたφ240mm の円蓋をボルト固定することで密閉できる構造としている（**写真-2**）．

掘削手順は，**図-3** に示すように，拡大掘削はφ180mm の円孔で掘削した後に，φ300mm の円孔で掘削し，新設掘削はφ300mm の円孔で一度に掘削した．なお，模擬地山の掘削は，円孔内をエアピックでほぐしつつ，円孔の形状に合わせてスコップで削り取る方法とし，掘削面を可能な限り水平に保ちながら掘り下げた（**写真-3**）．

写真-1　2次元載荷装置

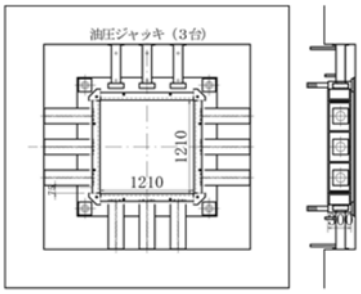


図-1　2次元載荷装置概要図

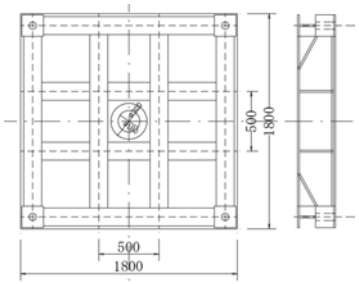


図-2　2次元載荷装置の蓋

(2)　載荷条件

表-1 に，先行研究[2]で実施の 1 組（Case0-1 と Case0-2）と今回実施の 2 組（Case1-1 と Case1-2，Case2-1 と Case2-2）のケースの載荷条件を示す．なお，Case0-1，Case1-1，Case2-1 は拡大掘削のケースであり， Case0-2，Case1-2，Case2-2 は新設掘削のケースである．

先行研究[2]の Case0-1 と Case0-2 の載荷条件（以降，載荷条件(A)）は，上方の 1 方向から，1 ジャッキあたり 20kN，合計 60kN で載荷し，他の 3 面は固定としていた．この載荷条件では，左右の側壁面の反力は約 1kN となり，つまり，側圧係数が約 0 の条件となっていた．

今回の Case1-1 と Case1-2 の載荷条件（以降，載荷条件(B)）は，上方の 1 方向から，1 ジャッキあたり 66.6kN，合計 200kN で載荷し，他の 3 面は固定とした．この載荷条件では，上方の載荷重と下方の反力の平均値と，左右

写真-2　掘削部の円蓋

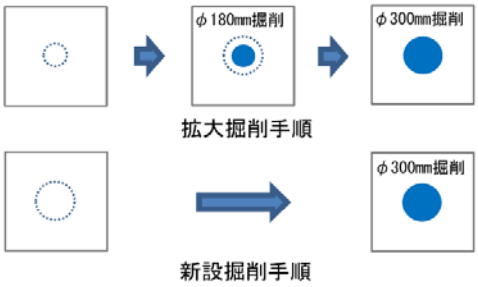


図-3　掘削手順

写真-3　φ300 掘削状況

表-1　載荷条件，実験時圧縮強度

ケース名	載荷条件	実験日における地山材料の圧縮強度
Case0-1　（拡大掘削）	載荷条件(A) 上方より60kN	0.68 N/mm2
Case0-2　（新設掘削）		0.63 N/mm2
Case1-1　（拡大掘削）	載荷条件(B) 上方より200kN	0.63 N/mm2
Case1-2　（新設掘削）		0.61 N/mm2
Case2-1　（拡大掘削）	載荷条件(C) 上方と左方より それぞれ150kN	0.61 N/mm2
Case2-2　（新設掘削）		0.67 N/mm2

表-2　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

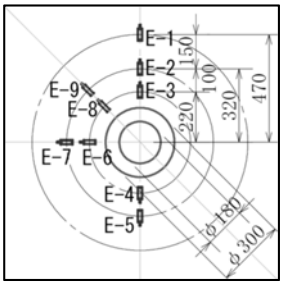


図-4　ひずみ計の配置

の反力の平均値との比が Case1-1 は 1：0.18，Case1-2 は 1：0.22 であったため，側圧係数が約 0.2 の条件となる．

Case2-1 と Case2-2 の載荷条件（以降，載荷条件(C)）は，上方と左方の 2 方向から，それぞれ 1 ジャッキあたり 50kN，合計 150kN で載荷し，他の 2 面は固定とした．この載荷条件では，上下方向と左右方向が同一の荷重であるため，側圧係数が約 1 の条件となる．

(3)　模擬地山に使用する材料

模擬地山は，先行研究 [2]と同様，表-2 に示す配合の貧配合モルタルで作成した．なお，同配合は，掘削の作業性を考慮して目標強度が 0.6N/mm^2，その発現が打設日から 3 日程度となるよう設定している．

各ケースの実験時における強度管理用円柱供試体の圧縮強度は表-1 に示す通りである．

(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，外径φ20mm，長さ L=54mm，容量±5000μひずみ，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（E-1～E-9）配置した．配置は，掘削中心から 220mm，320mm，および上方のみ 470mm の位置（φ300 の掘削面から 70mm，170mm，320mm の位置）にひずみ計の中心を合わせた．また，設置深さは全て，深さ方向中央の深さ 150mm の位置とした．

3.　実験結果

表-3(1)～(3)に各ケースの掘削過程におけるひずみの測定結果を示す．なお，掘削開始時の測定値は各ケース，最初の円蓋を開けた時点のものとした．同表 () 内には，掘削開始時の測定値を 100%とした圧縮ひずみの割合を記している．図-5 に圧縮ひずみの割合のグラフを示す．

表-3　ひずみ測定結果

(1)　載荷条件(A)　（上方より 60kN）

側線	位置	中心からの距離(mm)	測点	ひずみ（μ）				
				Case0-1（拡大）			Case0-2（新設）	
				φ180mm		φ300mm	φ300mm	
				掘削開始	掘削完了	掘削完了	掘削開始	掘削完了
上下	上部	470	E-1	−198 (100%)	−194 (98%)	−188 (95%)	−180 (100%)	−165 (92%)
		320	E-2	−114 (100%)	−97 (85%)	−73 (64%)	−106 (100%)	−63 (59%)
		220	E-3	−118 (100%)	−84 (71%)	−66 (56%)	−117 (100%)	−27 (23%)
	下部	−220	E-4	−84 (100%)	−38 (45%)	−17 (20%)	−109 (100%)	−30 (28%)
		−320	E-5	−88 (100%)	−71 (81%)	−44 (50%)	−82 (100%)	−38 (46%)
左右	近	220	E-6	−2 (100%)	−18 (900%)	−22 (1100%)	4 (100%)	−7 (−175%)
	遠	320	E-7	−1 (100%)	−6 (600%)	−10 (1000%)	3 (100%)	−12 (−400%)
斜め	近	220	E-8	−17 (100%)	−27 (159%)	−46 (271%)	−40 (100%)	−11 (28%)
	遠	320	E-9	−5 (100%)	−6 (120%)	−11 (220%)	−35 (100%)	−18 (51%)

(2)　載荷条件(B)　（上方より 200kN）

側線	位置	中心からの距離(mm)	測点	ひずみ（μ）				
				Case1-1（拡大）			Case1-2（新設）	
				φ180mm		φ300mm	φ300mm	
				掘削開始	掘削完了	掘削完了	掘削開始	掘削完了
上下	上部	470	E-1	−9527 (100%)	−9566 (100%)	−9552 (100%)	−9209 (100%)	−9147 (99%)
		320	E-2	−6383 (100%)	−6286 (98%)	−5964 (93%)	−10719 (100%)	−10860 (101%)
		220	E-3	−3781 (100%)	−3417 (90%)	−2486 (66%)	−4278 (100%)	−2906 (68%)
	下部	−220	E-4	−2205 (100%)	−1798 (82%)	−1087 (49%)	−4979 (100%)	−1862 (37%)
		−320	E-5	−4815 (100%)	−4641 (96%)	−4279 (89%)	−5780 (100%)	−5232 (91%)
左右	近	220	E-6	110 (100%)	−77 (−70%)	232 (211%)	−902 (100%)	−35 (4%)
	遠	320	E-7	279 (100%)	78 (28%)	−178 (−64%)	−295 (100%)	−431 (146%)
斜め	近	220	E-8	−1175 (100%)	−638 (54%)	145 (−12%)	−1850 (100%)	−27 (1%)
	遠	320	E-9	165 (100%)	202 (122%)	604 (366%)	−9135 (100%)	−9485 (104%)

(3)　載荷条件(C)（上方，左方より各 150kN）

側線	位置	中心からの距離(mm)	測点	ひずみ（μ）				
				Case2-1（拡大）			Case2-2（新設）	
				φ180mm		φ300mm	φ300mm	
				掘削開始	掘削完了	掘削完了	掘削開始	掘削完了
上下	上部	470	E-1	−1918 (100%)	−1898 (99%)	−1797 (94%)	−1529 (100%)	−1592 (104%)
		320	E-2	−2895 (100%)	−2955 (102%)	−2861 (99%)	−733 (100%)	−753 (103%)
		220	E-3	−2750 (100%)	−2598 (94%)	−1686 (61%)	−847 (100%)	−586 (69%)
	下部	−220	E-4	−2624 (100%)	−2364 (90%)	−1681 (64%)	−347 (100%)	13 (−4%)
		−320	E-5	−1037 (100%)	−996 (96%)	−898 (87%)	−420 (100%)	−368 (88%)
左右	近	220	E-6	−8659 (100%)	−8466 (98%)	−5574 (64%)	−953 (100%)	−539 (57%)
	遠	320	E-7	−6070 (100%)	−5939 (98%)	−5364 (88%)	−1506 (100%)	−1380 (92%)
斜め	近	220	E-8	−6652 (100%)	−6507 (98%)	−2351 (35%)	−776 (100%)	−453 (58%)
	遠	320	E-9	−5133 (100%)	−5078 (99%)	−4822 (94%)	−867 (100%)	−755 (87%)

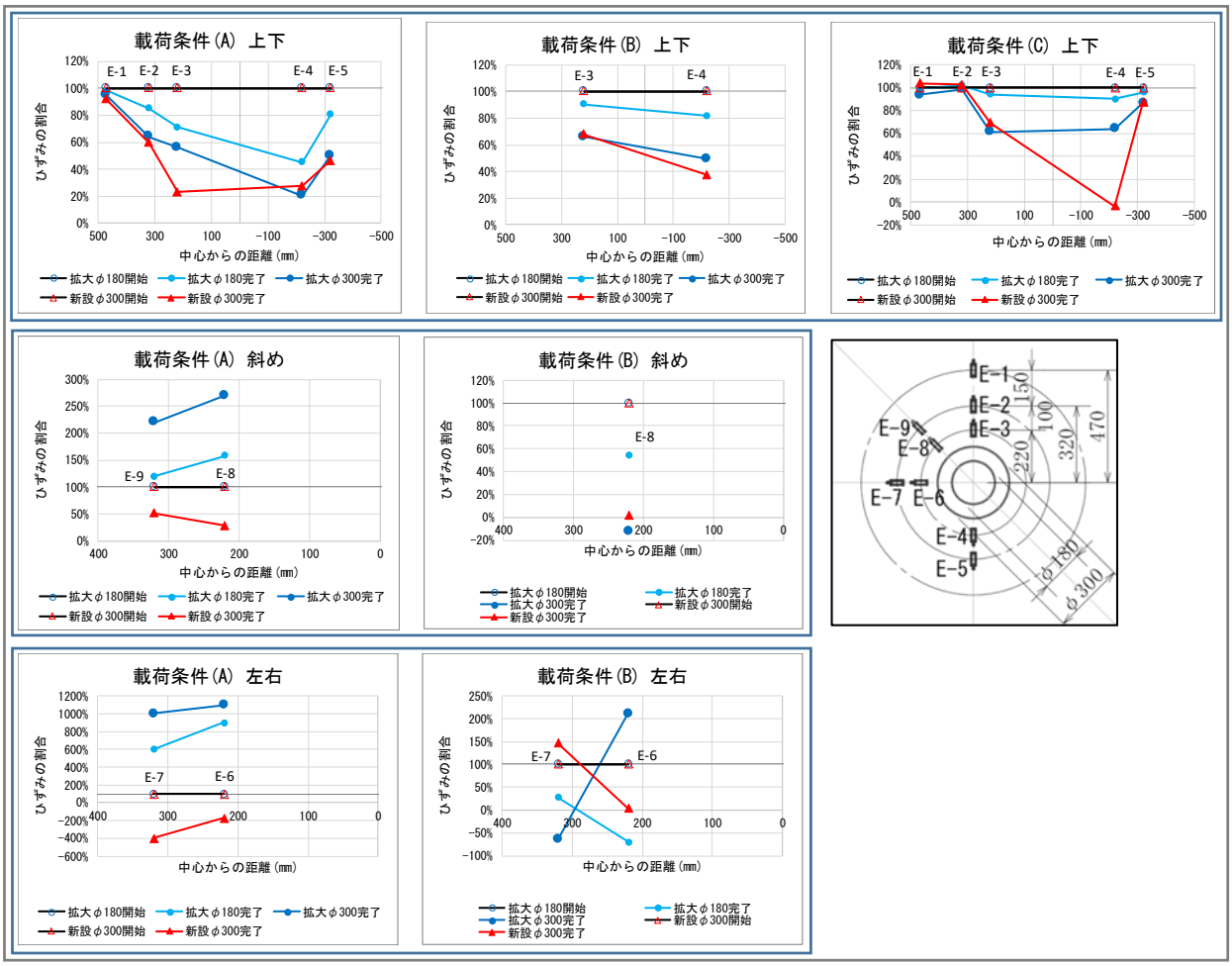
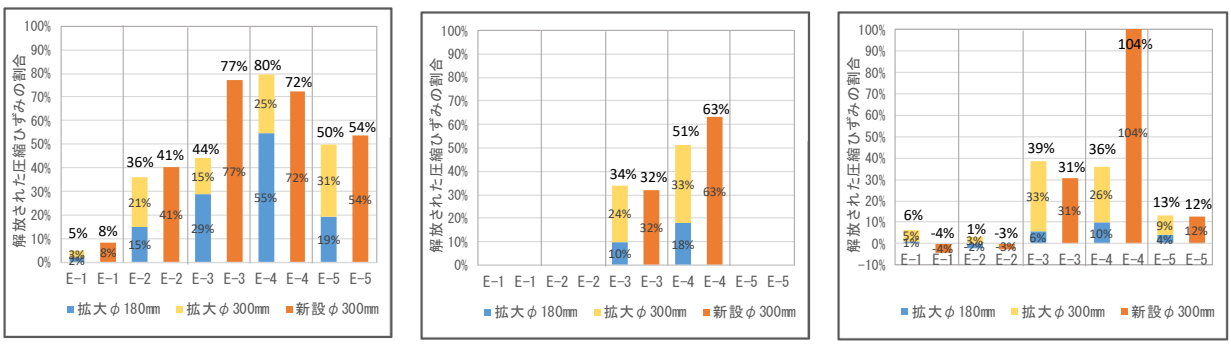


図-5　圧縮ひずみの割合

表-4　解放された圧縮ひずみの割合

側線	位置	中心からの距離(mm)	測点	載荷条件(A) 拡大掘削 Case0-1 φ180	φ300	掘削全体	新設掘削 Case0-2 φ300(掘削全体)	載荷条件(B) 拡大掘削 Case1-1 φ180	φ300	掘削全体	新設掘削 Case1-2 φ300(掘削全体)	載荷条件(C) 拡大掘削 Case2-1 φ180	φ300	掘削全体	新設掘削 Case2-2 φ300(掘削全体)
上下	上部	470	E-1	2%	3%	5%	8%	–	–	–	–	1%	5%	6%	-4%
		320	E-2	15%	21%	36%	41%	–	–	–	–	-2%	3%	1%	-3%
		220	E-3	29%	15%	44%	77%	10%	24%	34%	32%	6%	33%	39%	31%
	下部	-220	E-4	55%	25%	80%	72%	18%	33%	51%	63%	10%	26%	36%	104%
		-320	E-5	19%	31%	50%	54%	–	–	–	–	4%	9%	13%	12%
左右	近	220	E-6	-800%	-200%	-1000%	275%	170%	-281%	-111%	96%	–	–	–	–
	遠	320	E-7	-500%	-400%	-900%	500%	72%	92%	164%	-46%	–	–	–	–
斜め	近	220	E-8	-59%	-112%	-171%	73%	46%	66%	112%	99%	–	–	–	–
	遠	320	E-9	-20%	-100%	-120%	49%	–	–	–	–	–	–	–	–



(1) 載荷条件(A)　　(2) 載荷条件(B)　　(3) 載荷条件(C)

図-6　解放された圧縮ひずみの割合（E-1～E-5）

本研究では，各掘削，各測点における圧縮ひずみの割合の減少量を，解放された圧縮ひずみの割合と捉え，拡大掘削と新規掘削で比較検討した．**表-4**，**図-6** に拡大掘削におけるφ180とφ300の各掘削で解放された圧縮ひずみの割合，および拡大掘削と新設掘削における掘削開始からφ300 掘削完了までの掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合を示す．

なお，**表-3(1)～(3)**，**表-4** 内網掛け部分の測点は，拡大掘削，または新設掘削のひずみの値が，掘削開始以前にひずみ計の容量（±5000μ）を超え，ひずみ計が損傷した可能性があるため，本検討からは除外した．

(1) 掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合

掘削開始からφ300 掘削完了までの掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合について考察する．

上下測線において，**表-4**，**図-6** より，先行研究 [2]で実施の載荷条件(A)では，E-1，E-2，E-4，E-5 は，拡大掘削と新設掘削でそれぞれ，E-1 が 5%と 8%，E-4 が 80%と 72%，E-5 が 50%と 54%と概ね同程度であった． E-3 は拡大掘削で 44%に対し，新設掘削で 77%となり，拡大掘削の方が明確に小さくなっていた．

今回実施の載荷条件(B)では E-3，E-4 は，拡大掘削と新設掘削でそれぞれ，E-3 が 34%と 32%，E-4 が 51%と 63%と概ね同程度であった．

また，載荷条件(C)では E-1，E-2，E-3，E-5 は，拡大掘削と新設掘削でそれぞれ，E-1 が 6%と-4%，E-2 が 1%と-3%，E-3 が 39%と 31%，E-5 が 13%と 12%と概ね同程度であった．E-4 は拡大掘削で 36%に対し，新設掘削で 104%となり，拡大掘削の方が明確に小さくなった．

斜め測線，左右測線においては，明確な傾向が見られなかった．載荷条件(A)，載荷条件(B)は実験条件上，左右が固定されており，初期ひずみが小さくなることが原因と考えられる．なお，載荷条件(C)は，今回，拡大掘削の方で計測不能となり，比較検証できなかった．しかし，**表-3** より，新設掘削において，中心からの距離が 220mm の E-6，E-8 は掘削後の圧縮ひずみの割合がそれぞれ 57%，58%であり，同距離の E-3 の 69%と概ね近く，上下測線と同様の比較ができる可能性は考えられる．

以上より，掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合は，先行研究 [2]と同様，今回の載荷条件でも，拡大掘削と新設掘削は概ね同程度であることが確認された．

(2) 拡大掘削時に解放された圧縮ひずみの割合

拡大掘削と新設掘削におけるφ300mm の掘削で解放されたひずみの割合について考察する．

先行研究 [2]で実施の載荷条件(A)では，2 段階の掘削を行う拡大掘削では，**表-4**，**図-6** より，例えば E-4 ではφ180mm の掘削で 55%の圧縮ひずみが解放され，そこからφ300mm の掘削では 25%の圧縮ひずみが解放されている．これに対し新設掘削のφ300mm の掘削では一度に 72%の圧縮ひずみが解放されている．掘削全体を通じて解放された圧縮ひずみの割合は上述の通り，同程度であるが，拡大掘削時を想定したφ300mm の掘削のみに着目すると新設掘削でφ300mm を一度に掘削するよりも解放された圧縮ひずみの割合は小さいことが言える．

今回実施の載荷条件(B)では，拡大掘削において，例えば E-4 ではφ180mm の掘削で 18%の圧縮ひずみが解放され，そこからφ300mm の掘削では 33%の圧縮ひずみが解放されている．これに対し新設掘削のφ300mm の掘削では一度に 63%の圧縮ひずみが解放されており，載荷条件(A)の結果と同様と言える．

載荷条件(C)では，新設掘削で値の大きい E-4 を除き，拡大掘削のφ300mm の掘削と新設掘削のφ300mm の掘削で解放された圧縮ひずみは概ね同程度であった． φ180mm の掘削での圧縮ひずみの解放が小さく，明確な差が出なかったと考えられる．

以上より，先行研究 [2]と同様，今回の実験結果からも拡大掘削時を想定したφ300mm の掘削で解放される圧縮ひずみの割合は，新設掘削でφ300mm を一度に掘削するよりも小さいことが確認された．

4. まとめ

今回の実験では，先行研究 [2]と同様，拡大掘削時に解放される周辺地山の圧縮ひずみの割合は，新設掘削で一度に掘削するよりも小さいことが確認された．これ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 [1]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．

今後は，数値解析による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) 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.
2) 小出孝明，日下敦，巽義知，砂金伸治：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，第 74 回土木学会年次学術講演会概要集，2019.

(2020. 8. 7 受付)

A BASIC MODEL EXPERIMENT OF THE BEHAVIOR SURROUNDING GROUND IN THE EXCAVATION OF A CIRCULAR TUNNEL

Yoshitomo TATSUMI,Atsushi KUSAKA,Takaaki KOIDE and Nobuharu ISAGO

In tunnel excavation, there are cases where re-excavation is carried out to widen the tunnel. In this case, by excavating the ground after stress redistribution due to excavation, etc., the displacement and stress generated in the newly installed supporting structure may be different compared to the case where a new tunnel is excavated. Regarding the behavior of surrounding ground during re-excavation, one group (1 case each) of laboratory experiments simulating re-excavation and new excavation was already conducted and we newly conducted an experiment in two cases in which the loading conditions were changed from the conditions of the previous study, and similar to the previous one. It was confirmed that when re-excavating the release rate of compressive strain in the surrounding ground is smaller than when newly excavating.