

地圧を受ける山岳トンネルへの対策工の効果

嶋本 敬介^{1*}・中根 利貴¹・水谷 真基¹・野城 一栄¹

¹公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

*E-mail: shimamoto.keisuke.00@rtri.or.jp

山岳トンネルでは、完成後の地圧の作用により、側壁の押出しや盤ぶくれといった変状が生じることがある。この地圧変状の対策工としては、裏込注入、ロックボルト、内巻工等があるが、現状では、これらの効果が十分には整理されておらず、対策しても効果が不足しており、追加対策が必要となることもある。そこで、本研究では、対策事例の分析、膨張モルタルで地圧を表現した模型実験、地山の強度劣化で地圧を表現した数値解析を実施し、対策工の効果を定量的に示した。また、対策工の検討をするに当たっては、調査・計測によりトンネル全体の変形モードを把握して、その変形を止めるのに効果的な対策工を検討することが重要であること等を示した。

Key Words : mountain tunnels, deformed tunnels, countermeasures, rock bolt

1. はじめに

山岳トンネルでは、地質や地形によってはトンネル完成後、塑性圧、偏圧といった外力が作用し、トンネルの変形が徐々に進行することがある。トンネル完成後に作用する塑性圧とは、経年に伴い地山の強度が低下し、それに伴い地山の塑性化が進行してトンネル覆工に外力として作用するものであり、地山強度比が小さいとともに、膨張性粘土鉱物を含み吸水劣化しやすい岩石からなる地質で発生しやすい。

塑性圧を受ける場合、変状現象として、側壁の押出しや盤ぶくれといった内空の縮小が見られる。トンネルの内空縮小は、一定の速度で長期にわたって進行する場合が多く、構造の不安定化や建築限界への支障を防ぐためにも、何らかの対策工を実施して、変状の進行を抑制することが重要となる。

地圧変状の対策工としては、裏込注入、ロックボルト、内巻工等があるが、現状では、これらの効果が十分には整理されていないため、効果を予測して対策工を設計することは難しいのが現状である。一般的には、対策工の仕様の設計は、過去の類似事例等を参考にして、行われることが多く、効果不足で追加対策が必要となったり、過剰な対策が実施されている場合もあると考える。

そこで、本研究では、対策事例の分析、膨張モルタルで地圧を表現した模型実験、地山の強度劣化で地圧を表現した数値解析を実施し、インバートなし、ありそれぞれの場合について、対策工の効果を定量的に示した。

2. 対策事例の分析

対策工の効果を事例から把握することを目的に、供用中の地圧による変状に対して実施された対策工の事例を公表文献より収集、整理した。対象とした文献は、変状対策前後の変位速度がおおよそ把握可能なグラフ等が示されている国内公表文献としている。ここで、対策前後の変位速度が明示されず、グラフが示されているのみの場合には、示されているグラフから定規を使って算定した。よって、必ずしも正確な値ではなく、おおよその値であることに注意を要する。対策工実施後の効果の確認結果まで示された文献は少なかったが、11 トンネル 13 カ所のデータを収集した。表-1に文献調査の結果として、実施された対策工とその効果を示す。

裏込注入だけの効果としては、番号2しか該当がなく、このトンネルでは効果が見られていない。文献1)や文献2)にも示される通り、裏込注入が実施されれば、アーチ部で地盤反力が取れるようになり、変形抑制効果は大きいと考えられるが、今回の事例ではそのような効果は見られなかった。

ロックボルトは、文献3)で示されている通り、裏込注入と併せて実施される事例が多く、ロックボルト単独の効果はわかりにくいだが、概ね50～90%の変位抑制効果となっている。

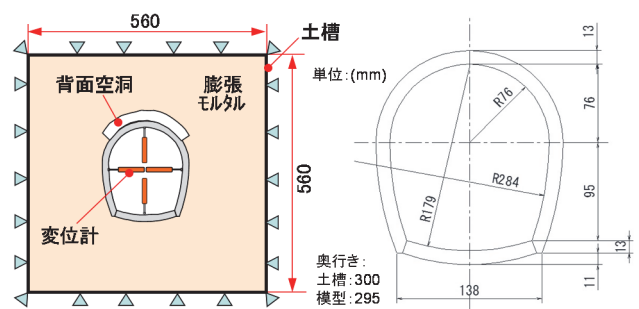
内巻工については、番号5のセントル補強で40%の効果が見られている。

以上、事例分析により、対策工の変位抑制効果について

表-1 対策工の効果に関する公表文献の事例分析結果

番号	トンネル名	形状	主な変状現象	対策工の種類、仕様	対策工の効果	定量的変位抑制効果(%)
1	A トンネル	単線馬蹄形 インバートなし	側壁押出し	・裏込注入 ・側壁 RB : 径 25mm,長さ 3m,6 本/断面	2→0.1mm/年	95
2	B トンネル	単線馬蹄形 インバートあり	側壁押出し	・裏込注入	1.7→1.7mm/年	0
3		単線馬蹄形 インバートあり	側壁押出し	・側壁 RB : 長さ 4.5~9m,8 本/断面,縦断ピッチ 1.2m	1.7→0.6mm/年	65
4	C トンネル	単線馬蹄形 インバートなし	側壁前傾	・側方 RB : 径 25mm,長さ 4m,縦断ピッチ 1.5m	1.5→0.2mm/年	90
5	D トンネル	単線側壁直 インバートなし	側壁前傾	・セントル補強 : H-145,縦断ピッチ 1m,延長 48m	10→6mm/年	40
6		単線側壁直 インバートなし	側壁前傾	・ロックアンカー (上記セントルに追加) : 径 26mm, 長さ 5.8m,4 本/断面,縦断ピッチ 1m	6→1.7mm/年	70
7	E トンネル	単線側壁直 インバートなし	側壁押出し 盤ぶくれ	・裏込注入 ・側壁 RB : 径 25mm,長さ 3m,4 本/断面,縦断ピッチ 1.2m	6.5→1.3mm/年	80
8		単線側壁直 インバートなし	側壁押出し 盤ぶくれ	・裏込注入 ・側壁・アーチ RB : 径 25mm,長さ 3m,10 本/断面,縦断 ピッチ 1.2m ・ストラット	15.7→3.1mm/年	80
9	F トンネル	単線側壁直 インバートなし	側壁押出し 盤ぶくれ	・裏込注入 ・側壁,斜め下向き RB : 径 25mm,長さ 5m,10 本/断面,縦 断ピッチ 1.5m,プレストレス 7tf ・サイドドレーン修繕	11→1.2mm/年	90
10	G トンネル	2車線 インバートなし	盤ぶくれ	・下向き RB : 長さ 5m,横断ピッチ 1.5m,縦断ピッチ 1m	26→6mm/年	80
11	H トンネル	2車線 インバートなし	盤ぶくれ	・下向き RB : 長さ 5m,横断ピッチ 1.5m,縦断ピッチ 1m	14→7mm/年	50
12	I トンネル	新幹線 インバートあり	盤ぶくれ	・下向き RB : 径 25mm,長さ:7-8m,縦断方向 1m,4 本/断 面,延長 20m,総本数 28 本,プレストレス 50kN	12→1mm/年	90
13	J トンネル	新幹線 インバートなし	盤ぶくれ	・下向き RB : 径 25mm,長さ:8m,縦断方向 1.5m,6 本/断 面,延長 20m,総本数 96 本	1.1→0.2mm/年	82

て、おおよそではあるが効果が把握できた。類似事例により対策工を設計する場合には、こういった事例を参考とすると良い。一方で、この事例分析は、対策工の補強量もばらばらであり、地山条件、構造条件も異なる中で、それぞれの対策工の効果を示しているものである。そこで、以降では、より一般化した条件での対策工の効果を把握することを目的に、模型実験、数値解析を実施した結果を示す。



a) 実験模式図

b) トンネル模型寸法

図-1 実験模式図とトンネル模型寸法

3. 模型実験

本章では、地圧を受けるトンネルに対する対策工の変位抑制効果を把握することを目的に、統一された条件の下で対策工の効果を、膨張モルタルの膨張圧で地圧を表現する模型実験により確認する。

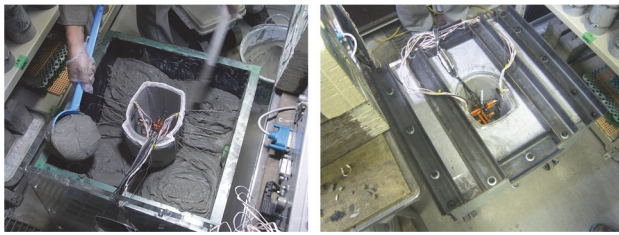
(1) 実験方法

実験模式図とトンネル模型の寸法を図-1に示す。トンネル模型は、単線非電化トンネル（インバートあり）の1/30スケールの寸法とした。560mm×560mm×300mmの

鋼製土槽の中心にトンネル模型を、鉛直方向をトンネル軸方向として設置し、トンネルの周囲に膨張モルタルを打設することで地圧を表現した。

トンネル模型は発泡スチロールで作製した型枠にモルタルを打設し、モルタル硬化後、発泡スチロールを除去することで作製した。トンネル模型に用いたモルタルの圧縮強度は、過去に実施した同配合のモルタルの一軸圧縮試験の結果より26MPa程度である。

膨張モルタルは、硅砂6号、早強セメント、流動化剤、増粘剤、静的破碎材を用いて作製した。配合は文献4)で



a) 膨張モルタル打設状況 b) 上蓋の固定状況

図-2 模型実験状況

表-2 模型実験ケース

ケース	概要	模式図
Case1	対策工なし	
Case2	補強ランクⅠ： 裏込注入	
Case3	補強ランクⅡ： 裏込注入＋ ロックボルト	
Case4	補強ランクⅢ： 裏込注入＋ ロックボルト＋内巻	

使用している膨張モルタルと同じである。

膨張モルタル打設後、厚さ 10mm のアクリル板で蓋をし、溝形鋼で固定した。図-2 に模型実験の状況として、膨張モルタルの打設状況と溝形鋼による固定状況を示す。膨張モルタルは時間の経過とともに徐々に膨張する。その膨張圧の大きさや増加速度は温度に依存するため、実験は、地下実験室において 23℃ の一定温度環境下で実施した。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-2 に示す。文献3) に示される補強ランクに合わせて、対策なしも含め 4 ケースを実施した。

Case1 はトンネル模型のアーチ背面側 120° 範囲に厚さ 20mm の発泡スチロールを接着し、背面空洞を表現した。

Case2～Case4 は Case1 で設置した発泡スチロールの範囲に対して、モルタルを打設し、裏込注入を表現した。裏込注入を表現するモルタルが硬化後、土槽にトンネル模型をセットし、膨張モルタルを打設した。

Case3～Case4 に関しては、裏込注入に加えてロックボルトが設置された状態で膨張モルタルを打設している。ロックボルトは直径 1mm、長さ 133mm のステンレス棒にエポキシ樹脂を塗り、珪砂 6 号をまぶすことで表現した。ロックボルト頭部は、5mm 角 0.3mm 厚のアルミ板でベアリングプレートを表現している。ステンレス棒を

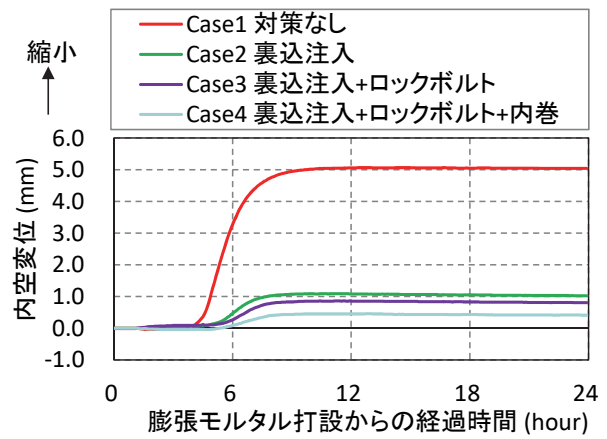


図-3 経過時間と内空変位の関係

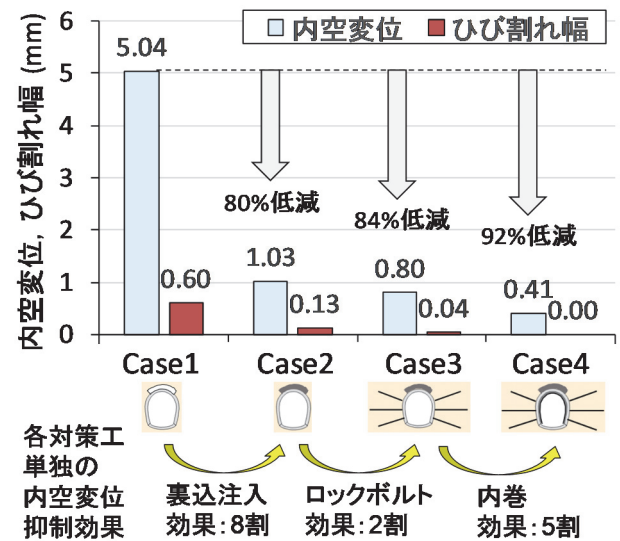


図-4 模型実験における対策工の変位抑制効果のまとめ

設置しやすいように、トンネル模型打設時に発泡スチロール型枠のロックボルト位置に予め、スペーサーを入れておき、ロックボルトを挿入しやすくしている。縦断ピッチは 150mm としている。

Case4 に関しては、さらに内巻工を設置している。内巻工は、トンネル模型の内側に 0.1mm 厚の鋼板を巻き、トンネル覆工と鋼板の間にモルタルを厚さ 5mm で充填することで表現した。

なお、各対策工の寸法は、1/30 スケールであることを踏まえ、概ね一般的な対策工の仕様の寸法としている。

(3) 実験結果

図-3 に膨張モルタル打設から 24 時間の内空変位の推移を示す。ここでの内空変位は、SL (スプリングライン) に設置した変位計により求めた内空の縮小変位である。これより、膨張モルタルにより、時間経過とともに進行する側壁押出しを表現できていることがわかる。膨張モルタルの膨張に伴い、4 時間経過頃から内空が縮小し、12 時間経過時には収束している。各ケースを比較

すると、補強ランクが上がるにつれて変位抑制効果が増加していることがわかる。

図-4に模型実験における対策工の変位抑制効果のまとめとして、実験終了である24時間経過時の内空変位およびひび割れ幅の結果を示す。ひび割れ幅は、左右側壁にひび割れが1つずつ発生したため、この左右のひび割れ幅の平均値を示している。

これより、内空変位に関しては、裏込注入により、80%、裏込注入+ロックボルトで84%、裏込注入+ロックボルト+内巻で92%低減できるという結果となった。各対策工単独での内空変位抑制効果としては、裏込注入は80%、ロックボルトは20%、内巻は50%となった。

ひび割れ幅についても、補強ランクの増加とともにひび割れ幅が小さくなるという結果が得られた。

4. 数値解析

本章では、地山の強度を低下させることで塑性圧を表現する数値解析により、塑性圧に対する各対策工の効果を、インバートなしの場合、ありの場合それぞれについて評価する

(1) 解析手法

a) 解析概要

解析には有限差分コードFLAC^{3D}を使用した。解析モデル図を図-5に示す。解析領域は横断方向20m（半断面）、鉛直方向40mとした。トンネル延長方向（y方向）は1mのみをモデル化し、1mを2要素に分割している。y=0, y=1のy方向変位を拘束することで平面ひずみ状態を表現している。

トンネル構造は、模型実験と同じく、鉄道単線トンネル非電化断面を実際のスケールでメッシュを作成した。ただし、インバートの形状は実際のトンネルのインバート形状を表現したため、模型実験と若干異なる。

解析は以下の手順で行った。

- ①土被り200m、側圧係数0.3とし、全要素に土被り荷重相当の応力を与え、上下面、側面をローラー支持とすることで初期応力状態を与える。
- ②掘削部の地山要素を取り除く（応力解放率100%）。
- ③トンネル覆工をモデル化する（トンネル完成）。
- ④トンネル完成後の地圧作用を表現するために、文献5)と同じ手法により、掘削解析による地山の緩み（破壊接近度）に応じて、地山要素のせん断強さを50ステップに分けて低下させる。

b) 解析ケース

解析ケースは模型実験に合わせて、表-3に示す8ケースとした。

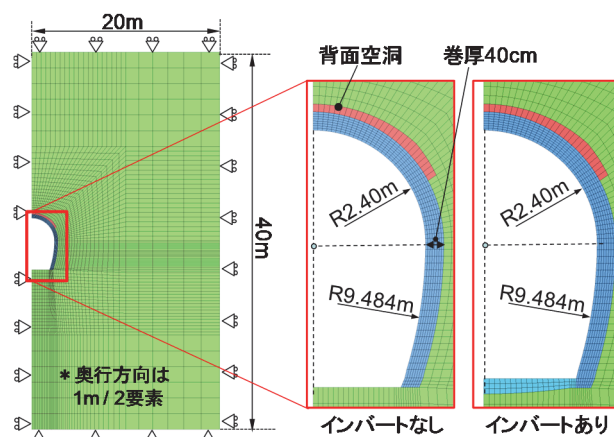


図-5 解析モデル

表-3 数値解析ケース

ケース	インバート	概要
Case1	なし	対策工なし
Case2		裏込注入
Case3		裏込注入+ロックボルト
Case4		裏込注入+ロックボルト+内巻
Case1i	あり	対策工なし
Case2i		裏込注入
Case3i		裏込注入+ロックボルト
Case4i		裏込注入+ロックボルト+内巻

対策工なしのケースにおける背面空洞は、弾性係数10MPa、ポアソン比0.1の弾性体として表現した。

裏込注入は背面空洞の要素の物性値を覆工コンクリートの物性値と同じとすることで表現した。

ロックボルトは径25mm、長さ4m、6本/断面の側方ロックボルトを独立した構造要素（Cable要素）にて表現した。Cable要素は近接する地山要素、覆工要素の節点との相対変位に応じて荷重が発生し、周囲摩擦抵抗を超える荷重が作用した場合には周辺要素との滑り（付着切れ）を表現する。覆工表面とロックボルト頭部のCable要素の節点は相対変位を生じないようにモデル化することでベアリングプレートを表現している。

内巻は、1mピッチ、H-100のセントル内巻工として表現した。すなわち、Beam要素でH-100の支保工を、y=0.5mの断面にモデル化するとともに、覆工コンクリートの内側に、覆工コンクリートと同じ物性値で10cm厚さの内巻コンクリートをモデル化することで表現した。

c) 入力物性値

解析の入力物性値を表-4に示す。地山および覆工・インバートコンクリートはMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化し、コンクリートは引張破壊による軟化についても表現した。地山の物性値は、地山強度比を1.0として一軸圧縮強さを設定し、他の物性値は軟岩における一軸圧縮強度と各種の物性値の相関

関係を参考にして設定した。地山のせん断強さはトンネル完成後の塑性圧を表現するために、50ステップにわけて、地山の破壊接近度に応じて指数関数で徐々に低下させた。すなわち、トンネル近傍の要素程、地山の破壊接近度は破壊に近く、強度の低下量が大きくなる。トンネル掘削時に塑性化した要素は最大限強度が低下することとなる。トンネル掘削時に塑性化したトンネル近傍の要素におけるせん断強さの低下曲線を図-6に示す。

ロックボルトの入力物性値は表-5の通り設定した。

(2) 解析結果

図-7にSLより2m下の水平測線の内空変位の経時変化を示す。最も建築限界余裕が狭くなる位置としてSLより2m下の水平測線で評価することとした。なお、ここで、塑性圧による変状では内空変位が長期間にわたって一定速度で進行することが一般的である⁹⁾ことに鑑み、Case1（インバートなし、対策工なし）のケースが5mm/年の一定の変位速度であると仮定して地山の強度低下と経過時間を関連付け、時間軸を導入した。

図-7より、インバートなしの場合の裏込注入の効果は見られなかったが、他は補強ランクが上がる程、内空変位抑制効果が大きくなっていることが分かる。

表-4 地山、コンクリートの解析入力物性値

	地山	コンクリート
変形係数 $E(\text{MPa})$	479	25,000
ポアソン比 ν	0.331	0.2
せん断強さ $c(\text{MPa})$	初期: $c=1.155$ 最終: $c=0.191$	5.60
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	30	40
引張強さ $\sigma_t(\text{MPa})$	1.0	1.91 引張破壊後 0.035

表-5 ロックボルトの解析入力物性値

項目	単位	覆工部*	地山部
弾性係数	E	GPa	210
せん断ばね剛性	k_g	MN/m ²	0(自由長)
付着強さ (kN/m)	c_g	kN/m	472
摩擦角	ϕ_g	$^{\circ}$	0
降伏荷重	F_v	kN	200

*ロックボルト頭部と覆工表面の相対変位を固定することでベアリングプレートを表現

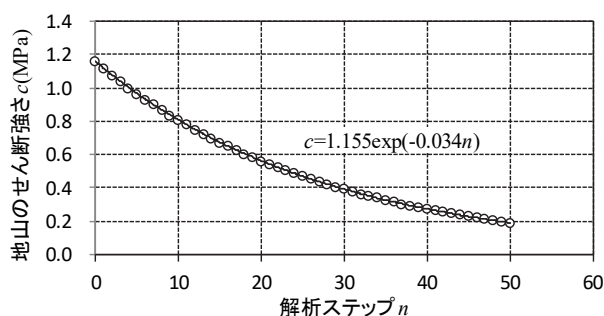


図-6 地山のせん断強さの低下曲線

図-8に各ケースのトンネルの変形形状を比較する。最終ステップ（40.5年経過時）までに発生した変形を10倍にして表示している。インバートなしとありでは変形モードが大きく異なり、インバートありでは側壁脚部の変位がほとんど発生していないことがわかる。また、図-7のように、SL-2m といった一測線のデータではトンネル全体の挙動を把握するには不十分であることがわかる。例えば、インバートなしの裏込注入の効果は、SLで見

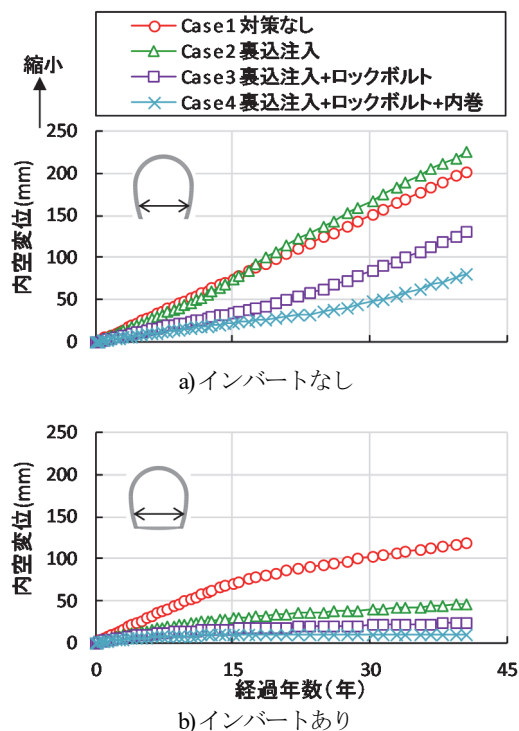


図-7 内空変位の経時変化 (SL-2m, 水平測線)

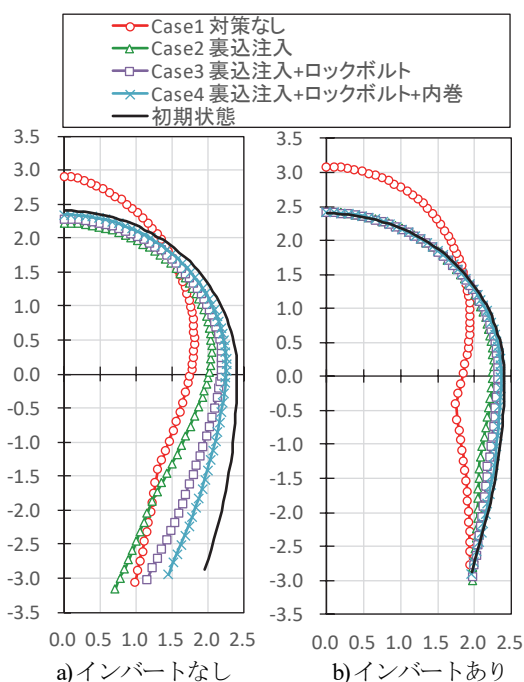


図-8 トンネルの変形形状の比較

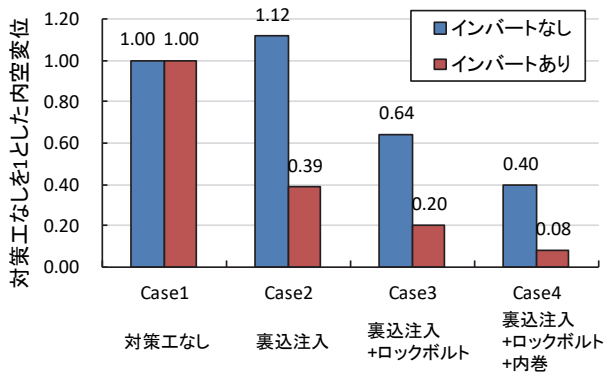


図-9 数値解析により得られた対策工の変位抑制効果 (SL-2m)

れば大きな変形抑制効果があったという評価になるが、SL-2m では、変形抑制効果は全く見られなかったという結果になる。

図-9 に最終ステップ (40.5 年経過時) の SL-2m 水平測線の各ケースの変位を基に、対策工なしのケースを 1 とした内空変位を示す。これより、総じてインバートありの場合の方が変位抑制効果が大きい結果となった。インバートなしの場合は、側壁脚部の変形を止めることが重要であり、脚部を止めなければ裏込注入や内巻を実施しても効果は限定的であると言える。このように、対策工の検討をするに当たっては、調査・計測によりトンネル全体の変形モードを把握して、その変形を止めるのに効果的な対策工を検討することが重要である。

図-9 においてインバートありの場合の対策効果としては、裏込注入で約 60%、裏込注入+ロックボルトで約 80%、裏込注入+ロックボルト+内巻で約 90%の変形を抑制できる結果となった。これは概ね模型実験と整合の取れた結果となっている。ただし、図-8 を見てもわかる通り、どの位置の変位で評価するかによって、対策工の効果は大きく異なる。また、裏込注入の効果は背面空洞の範囲や状況によって大きく異なるし、ロックボルトの効果も地山の状況によって大きく異なると考えられる。

5. おわりに

地圧を受ける山岳トンネルに対する対策工の効果を定量的に把握すべく事例分析、模型実験、数値解析を実施した。その結果、各対策工のおおよその効果を把握することができた。ただし、これら対策工の効果は、地山条件、構造条件等が違えば大きく異なってくるものである。本論文ではある条件の場合にどの程度効果が出るかを示したものであることに注意を要する。

ただし、本論文で示した事例分析や模型実験、数値解析の結果を把握していれば、実際のトンネルで対策工を選定する場合に、そのトンネルの条件と本論文で得られた知見を総合することで、ある程度対策工効果の予測精度は向上すると思われる。今後は調査・計測結果から合理的な対策工を選定できるよう、得られた知見をマニュアル化していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 安東豊弘, 小俣富士夫, 若菜和之, 松浦章夫: 欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果, 土木学会論文集, No.493, III-27, pp.89-98, 1994.
- 2) 野城一栄, 嶋本敬介, 小島芳之, 高橋幹夫, 松長剛, 朝倉俊弘: 地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用, 土木学会論文集C, Vol. 65, No. 1, pp.107-119, 2009.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.89-96, 1998.
- 4) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集F1特集号, Vol.68, No.3, pp.65-79, 2012.
- 5) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013.
- 6) 松長剛, 野城一栄, 朝倉俊弘: 地山劣化モデルによるトンネル変状の進展予測に関する研究, 土木学会論文集C, Vol. 65, No. 2, pp.467-479, 2009.

EFFECT OF COUNTERMEASURES ON MOUNTAIN TUNNELS WHICH SUFFER FROM GROUND PRESSURE

Keisuke SHIMAMOTO, Toshiki NAKANE,
Masaki MIZUTANI, and Kazuhide YASHIRO

In the mountain tunnel, due to the ground pressure after completion, there may be deformation like sidewall squeezing or heaving. As countermeasures against this ground pressure, there are backfill grouting, rock bolt, inner reinforcement concrete etc, but under the present circumstances these effects are not sufficiently revealed. In this research, the case study, model experiments expressing the ground pressure with expanded mortar, numerical analysis expressing the ground pressure by strength deterioration of the ground are carried out. As the results, the effect of the countermeasures are quantitatively showed. It was also shown that it is important to grasp the deformation mode of the entire tunnel by measurement for selecting reasonable countermeasures.