

二次元静的載荷実験の再現解析による山岳トンネルの耐震対策工の効果に関する一考察

日下 敦^{1*}・河田 皓介¹・砂金 伸治¹・真下 英人²

¹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)
²国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
*E-mail: kusaka@pwri.go.jp

地震時により山岳トンネルに発生した被害モードのひとつに、覆工天端部の圧縮破壊が挙げられる。本研究では、この被害モードを発生させると考えられる地山の水平圧縮変形を模擬した静的な二次元載荷実験および実験を模擬した数値解析を実施し、ロックボルト打設、炭素繊維シート貼付、単鉄筋補強といった対策工が発揮する効果について検討を行った。その結果、地山の水平圧縮変形が支配的となる変形モードに対しては、本来引張部材として期待されるロックボルト、炭素繊維シート、単鉄筋といった対策工を実施したとしても、これらの部材は天端部では圧縮応力を示すため、覆工天端部の圧縮破壊を抑制する補強材としての効果は期待しにくい可能性があること等が明らかとなった。

Key Words : rock tunnel, laboratory loading test, numerical analysis, countermeasures, earthquake

1. はじめに

主として岩盤に掘削される山岳トンネルにおいては、過去の地震でトンネル構造に大きな損傷を受けたのは非常に限定的な条件であり、一般に地震に強い構造物とされてきた。他方、断層・破砕帯等の極端に地山の悪い箇所や不安定な斜面内、トンネル自体に既に変状が発生していた箇所、坑口部等では、比較的地震被害を受けやすいことが知られているものの、その被害発生メカニズムについては不明確な部分が多く、坑口部等において経験的に覆工の補強等の対策を行っているのが現状である¹⁾。そのような中、2004年の新潟県中越地震では、数は限られるものの、これまで耐震対策が必要とされてこなかった箇所においても、覆工の崩落をとまなうような比較規模の大きな被害を受けた山岳トンネルがあった^{2,3)}。これは、地震の大きさ、地山条件、トンネルの構造等によっては、山岳トンネルも地震による被害を受ける可能性があることを示唆している。

本研究では、山岳トンネルの既往の地震被害から推定される地山の変形モードに対して、ロックボルトによる補強、炭素繊維シートによる覆工内面補強、単鉄筋による覆工コンクリートの補強といった対策工の効果およびその効果を発揮するメカニズムや地山条件等について検

討するため、約 1/20 スケールの供試体を用いた二次元載荷実験を実施するとともに、その実験を模擬した数値解析を行った。

2. 検討対象とする地山の変形モードと対策工

(1) 地山の変形モード

これまでの地震による山岳トンネルの被害^{2~8)}は、地質の急変部にトンネルが位置するなどの特殊な条件を除けば、大まかに3種類、すなわち、肩部に曲げ圧縮破壊や曲げ引張りひび割れが発生する場合、天端部に圧縮破壊が発生する場合、側壁部に圧縮破壊が発生する場合に大別されると考えられる。これらの被害が発生するメカニズムは必ずしも解明されていないが、それぞれ地山のせん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形により再現できる可能性があることが指摘されている^{9~11)}。

本研究では、これらの被害の種類のうち、トンネル利用者に直接の被害を及ぼす可能性が比較的高い、天端部の圧縮破壊に着目し、地山の水平圧縮変形を対象とした検討を行った。

(2) 対策工

これまでに外力によるトンネルの変状対策工としては種々のものが適用されてきたが、これらが耐震対策工としてどのような効果を発揮するのかは必ずしも明らかにされていない。本研究では、代表的な変状対策工として以下のものに着目し、検討を行った。

- ・ロックボルトによる補強
- ・炭素繊維シート貼付による覆工内面の補強
- ・単鉄筋による覆工の補強

3. 再現する載荷試験の概要

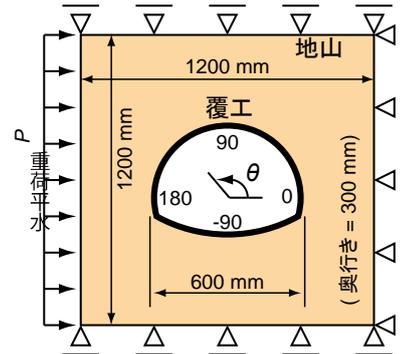
(1) 実験の概要

図-1 に載荷実験¹²⁾の概要を示す。実験装置は直方体の土槽で、トンネル軸方向に見て前面と後面、横断方向に見て上面、右面、下面は反力壁により拘束されており、左面からジャッキ3本により載荷を行った。後述する実験結果および数値解析結果における載荷荷重 P は、このジャッキ3本による荷重の合計値を示す。

地山は、目標強度 0.5 N/mm^2 の貧配合モルタルにより作製した。覆工供試体は、目標強度 18 N/mm^2 のモルタル製で、外径 60 cm 、厚さ 2 cm とした。覆工の形状は、

アーチ部とインバート部は外側の半径がそれぞれ 30 cm と 60 cm の単心円とした。

実験ケースを表-1 および図-2 に示す。ケース 1 は対策工を実施していない基本ケースである。ケース 2 は真ちゅう製のロックボルトにより地山を補強した場合、ケース 3 は炭素繊維シートを覆工内面に貼付して覆工を補強した場合、ケース 4 は単鉄筋を模擬した金網を覆工中心に設置して覆工を補強した場合である。具体的な使用材料および一軸圧縮強さ等は表-1 に示したとおりである。



地山：	使用材料	貧配合モルタル
	目標一軸圧縮強さ	0.5 MPa
覆工：	使用材料	プレーンモルタル
	目標一軸圧縮強さ	18 MPa
	厚さ	20 mm

図-1 実験の概要

表-1 実験ケースと材料物性値

ケース番号	ケース名	対策工		地山材料				
		概要	仕様	一軸圧縮強さ (MPa)	一軸圧縮強さ (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	割裂引張強度 (MPa)
1	基本	-	-	0.43	27	16	0.18	2.5
2	ロックボルト	ロックボルト打設	径3mm x 長さ150mm 22.5° ピッチ 2断面	0.46	22	15	0.19	1.8
3	シート	炭素繊維シート貼付	目付量50 g/m ² 範囲-15° ~ 195° 覆工内面	0.48	24	16	0.19	2.1
4	単鉄筋	単鉄筋補強	金網 径1mm, 10° ピッチ 覆工中心に設置	0.48	18	13	0.19	1.9

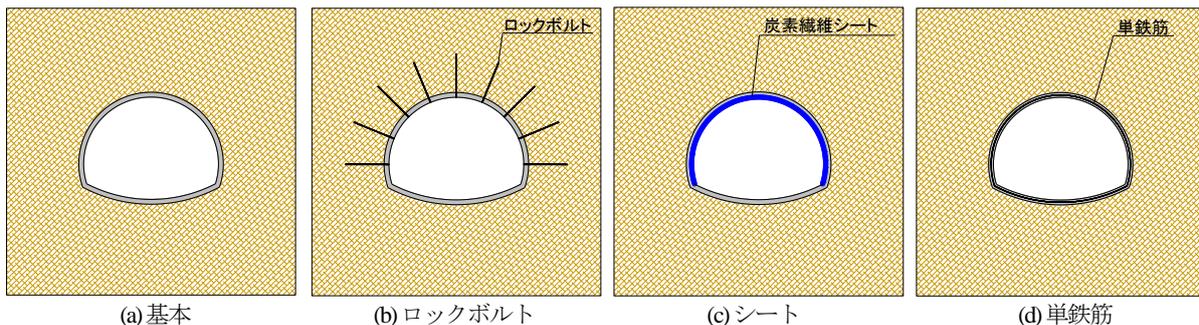


図-2 実験ケースの概要

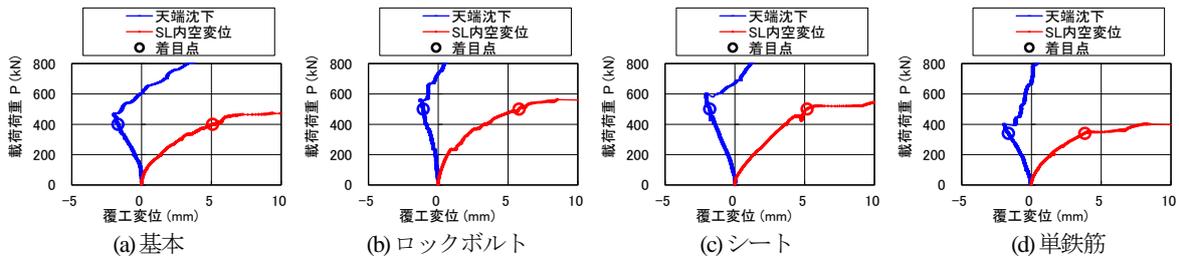


図-3 載荷実験による荷重-変位関係

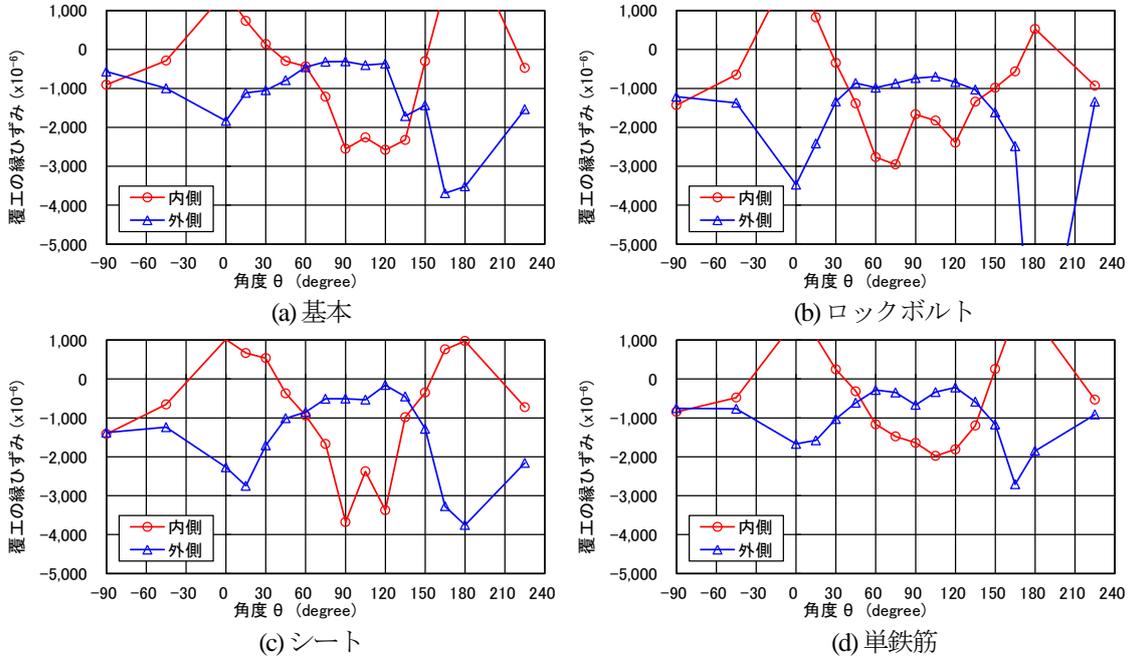


図-4 載荷実験による天端部圧縮破壊直前の覆工のひずみ分布

(2) 覆工の挙動

図-3 は、載荷荷重と、覆工の変位を示したものである。ここで、覆工の変位は、天端沈下と SL 水平内空変位に相当する物であり、いずれも内空断面が縮小する方向を正としている。いずれのケースにおいても、荷重 400 kN 以下の載荷初期段階では天端は隆起する方向に変位している。しかし、図中に丸で示した荷重約 400~600 kN 付近で天端は沈下する方向にモードが変化するとともに、内空変位も急激に増大している。

図-4 は、図-3 に丸で示した着目点における覆工のひずみ分布を示したものである。ひずみは引張側を正、圧縮側を負の値として示している。一部のケースで引張りひ割れの発生等、脚部付近で先行して破壊が発生しているケースがあるものの、全てのケースにおいて、天端部 ($\theta = 90^\circ$ 付近) で 2000 μ を超える圧縮ひずみが発生している。

これらの計測結果から、本研究で用いた実験手法により、地震による山岳トンネルの特徴的な被害事例の一つである天端部の圧縮破壊が概ね再現できていると考えられる。

なお、実験結果からは、地山の水平圧縮変形により覆

工天端部に圧縮破壊が発生したとしても、炭素繊維シーートの貼付や単鉄筋による補強により大規模な覆工のはく落を防止できる可能性があると考えられることも明らかとなっている¹²⁾。

4. 数値解析による対策工の効果に関する検証

(1) 解析の概要

前章で述べた実験においては、対策工として用いた部材自体の応力等の計測が困難であったことや、ケース間で覆工材料の一軸圧縮強さにばらつきがあったこと等により、はく落防止効果以外の対策工の効果について定量的に検討することが困難であった。そこで、前章で述べた実験を再現した数値解析を実施し、対策工の効果について検証した。

図-5 に数値解析モデルの概要を示す。解析は有限差分法プログラム (コード名: FLAC3D) を用い、実験の対称性を考慮して半断面モデルとした。なお、奥行き方向は 1 要素とし、奥行き方向の変位を拘束して平面ひずみ状態とした。

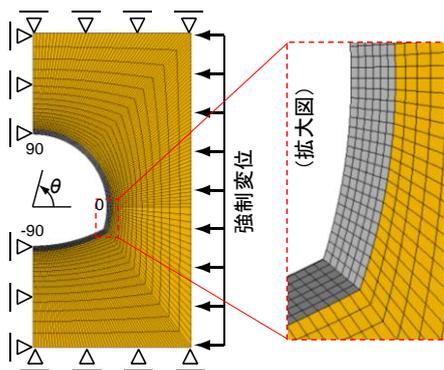


図-5 実験の概要

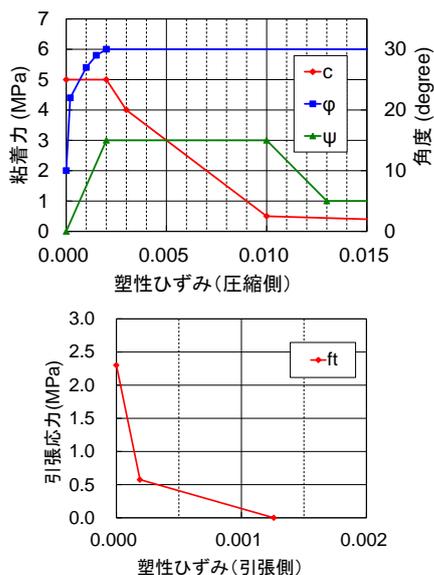


図-6 覆工材料のひずみ軟化硬化特性

表-2 解析で用いた主な物性値

対象	要素タイプ	材料モデル	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	厚さ (mm)
地山	ソリッド	弾性	200	0.25	
覆工	ソリッド	ひずみ軟化/硬化	15,000	0.20	
ロックボルト	ビーム	弾性	100,000	0.35	
炭素繊維シート	シェル	弾性	245,000	0.00	0.0278
鉄筋	ビーム	弾性	193,000	0.30	

地山は弾性体としてソリッド要素でモデル化した。地山の弾性係数は、地山材料のみを用いた同種の実験の結果¹³⁾により算定された値を用いた。

覆工材料は、ひずみ軟化硬化を考慮できる材料を用いてソリッド要素でモデル化した。具体的には、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレーション角 ψ 、引張強度 f_t を図-6 に示すように塑性ひずみの関数と仮定した。このような非線形パラメータを用いることで、一軸圧縮状態におけるプレーンコンクリートの耐荷力およびポストピーク強度において、要素実験レベルの再現が可能であること¹⁴⁾や、軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関して、実大規模の載荷実験の再現が可能

であること¹⁵⁾、上述の実験の基本ケースの破壊形態等が概ね再現できること¹⁶⁾等が示唆されている。

対策工に関しては、ロックボルトはビーム要素、炭素繊維シートは曲げモーメントを伝達しないシェル要素、単鉄筋はビーム要素でそれぞれモデル化した。これらの部材の断面定数は、実験で用いた部材の断面定数をもとに、解析上の奥行き方向の厚さに合わせて算定した。なお、いずれも弾性体としてモデル化し、付着切れやはく離等は考慮していない。

それぞれの弾性係数等は表-2 に示すとおりである。

(2) 覆工の挙動

図-7 は、解析で得られた、載荷荷重と、覆工の変位の関係を示したものである。ここで、変位については、SL の節点の変位を 2 倍して内空変位相当の値に換算するなど、実験結果と比較ができる値に換算している。天端については、荷重約 400 kN 以下の載荷初期段階においては、隆起する方向に変位した。一方、その後は天端は沈下する方向に変位モードが変化するとともに、内空変位も急激に増加した。

図-8 は、図-7 に丸で示した着目点における覆工のひずみ分布を示したものである。全てのケースにおいて、脚部で先行して破壊が発生しているものの、天端部で $2,500 \mu$ を超えるひずみが発生している。この次の解析ステップにおいては、天端部の圧縮ひずみが急激に増大したことから、図-7 に示した変位の変化は、天端部の圧縮破壊により生じたことが分かる。

これらの現象は、前章で述べた実験の結果と類似しており、本研究で用いた解析手法により、実験による天端部の圧縮破壊が概ね再現できていると考えられる。

(3) 対策工の効果

図-9 は、前図と同様の着目点における、対策工の応力を示したものである。ロックボルトによる補強を行ったケースに着目すると、一般にロックボルトには引張部材として地山を補強することを期待するのに対し、解析では圧縮側の応力を示した。この結果は、本研究で模擬した地山の変形モードに対しては、ロックボルトは覆工の応力の低減に資する効果が期待できない可能性があることを示している。

炭素繊維シートを貼付したケースにおいても、天端部では圧縮の応力が発生しており、一般に炭素繊維シートに期待されるような引張部材としての機能を発揮していないと考えられる。このことは、本研究で模擬した地山の変形モードに対しては、炭素繊維シートによる天端部の覆工の補強効果は期待できない可能性があることを示している。

単鉄筋補強したケースにおいても、圧縮応力が単鉄筋

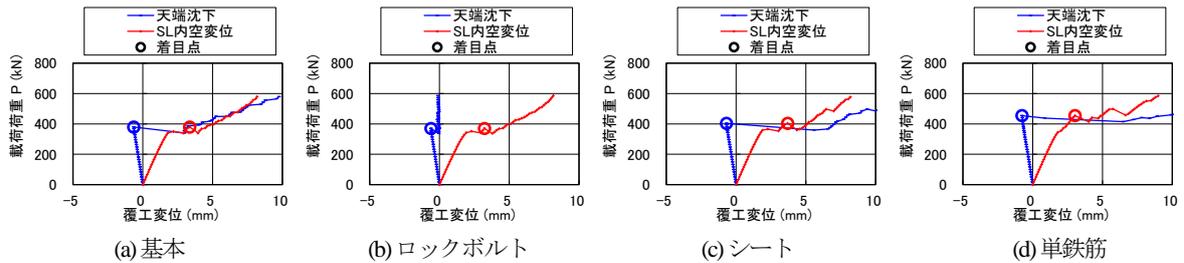


図-7 数値解析による荷重-変位関係

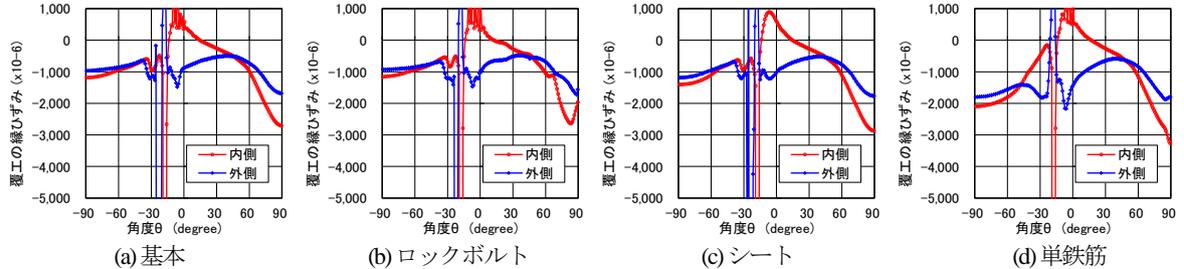


図-8 数値解析による天端部圧縮破壊直前の覆工のひずみ分布

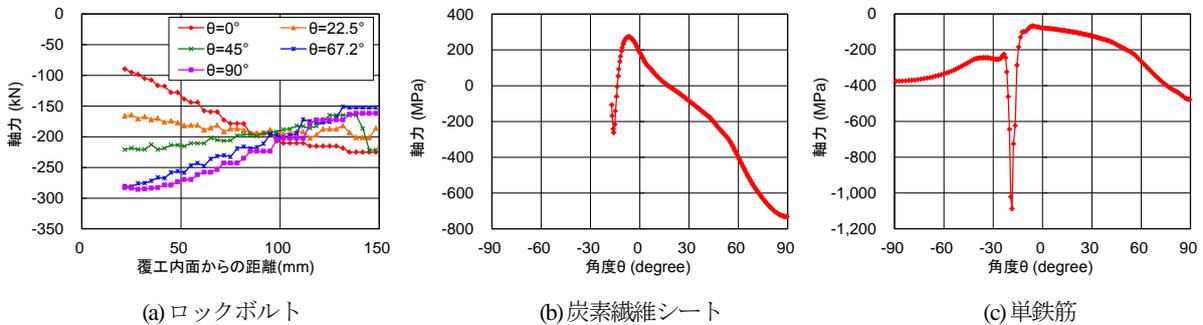


図-9 対策工の部材の発生応力

に発生している。これは覆工天端部の圧縮応力を単鉄筋でも分担していることを示しており、数値解析上は、天端部に圧縮破壊が発生するときの荷重を増加させる効果として現れていると考えられる。しかし、一般に鉄筋は引張部材として期待されていること、今回行った解析ではコンクリートと鉄筋の付着切れを考慮していないこと等から、これらの結果からは、実務上の設計における鉄筋の補強効果として議論することは困難であると考えられる。

図-10は、荷重約300kNにおける、SL ($\theta = 0^\circ$) 近傍の地山要素の水平応力分布を示したものである。ロックボルトを打設した部分（覆工内面からの距離150mm以下）では、地山の応力が低減しているが、これは図-9(a)に示したようにロックボルトが圧縮応力を分担しているためであり、覆工にはロックボルトを介して荷重が作用することになると考えられる。すなわち、本研究で想定したような地山の水平圧縮変形が卓越するような場合においては、地山の圧縮領域にロックボルトを打設することでは覆工に作用する荷重の低減は期待できない可能性があると考えられる。

以上の結果より、本研究で模擬した地山の変形モード

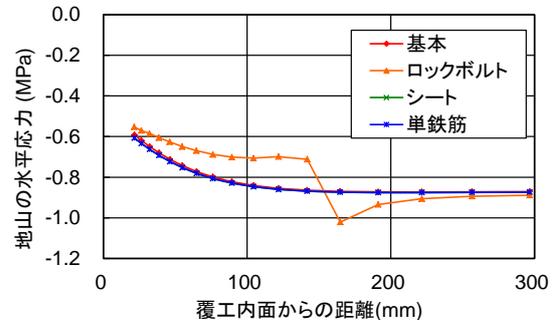


図-10 SL付近の地山の水平応力分布

に対しては、本来引張部材として期待されるロックボルト、炭素繊維シート、鉄筋が圧縮応力を示していることから、これらの対策工には覆工に発生する応力を低減させる効果は期待できない可能性があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地震時により山岳トンネルに発生した被害モードのひとつである覆工天端部の圧縮破壊を対象に、静的な二次元載荷実験および実験を模擬した数値解析を

実施し、ロックボルト打設、炭素繊維シート貼付、単鉄筋補強といった対策工が発揮する効果について検討を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 本研究で実施した実験手法および数値解析手法により、地山の水平圧縮変形により発生する覆工天端部の圧縮破壊を概ね再現できると考えられる。
- 2) 地山の水平圧縮変形が支配的となる変形モードに対しては、本来引張部材として期待されるロックボルト、炭素繊維シート、単鉄筋といった対策工を実施したとしても、これらの部材は天端部では圧縮応力を示すため、覆工天端部の圧縮破壊を抑制する補強材としての効果は期待しにくい可能性があると考えられる。

ただし、これらの結論は、限られた条件を模擬した小規模の模型実験や数値解析により得られたものであり、実構造物における耐震対策としての効果を明確にするには、さらなる検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説、丸善、2003年。
- 2) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害、トンネルと地下、第36巻、第11号、pp.55-63、2005。
- 3) 清水満、齋藤貴、鈴木尊、朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果、トンネルと地下、第38巻、第4号、pp.49-57、2007。
- 4) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査、鉄道技術研究所報告、No.1123、pp.1-43、1979。
- 5) 小野田耕治、楠山豊治、吉川恵也：伊豆大島近海地震による被害(1) 鉄道トンネルの例、トンネルと地下、第9巻、第6号、pp.7-12、1978。

- 6) 今田徹、川島一彦：第7編道路トンネルおよび道路橋の被害 土木研究所報告(1978年伊豆大島近海地震災害調査報告)、pp.106-119、1982。
- 7) 国田雅人、竹保隆一、役田徹：能登半島沖地震による被災トンネルを復旧 大谷狼煙飯田線木の浦トンネル、トンネルと地下、第24巻、第11号、pp.7-13、1993。
- 8) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神淡路大震災調査報告 土木構造物の被害、1998。
- 9) 日下敦、真下英人、水川雅之、森本智：地震による山岳トンネルの被害発生メカニズムに関する基礎的研究、トンネル工学報告集、No.18、pp.15-21、2008。
- 10) 朝倉俊弘、志波由紀夫、松岡茂、大矢敏雄、野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム、土木学会論文集、No.659/III-52、pp.27-38、2000。
- 11) 日下敦、真下英人、砂金伸治、角湯克典：山岳トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察、トンネル工学報告集、No.20、pp.1-8、2010。
- 12) 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、pp.277-284、2013。
- 13) Kosuke Kawata, Nobuharu Isago, Atsushi Kusaka, Hideto Mashimo: Research on the Effect of Risk Mitigation Measures Against Earthquake for Mountain Tunnel Through Static Loading Test, *North American Tunneling 2014 Proceedings*, pp.337-344, 2014.
- 14) 日下敦、砂金伸治、真下英人：内巻き補強された覆工の全体耐力に関する要素実験の再現解析、土木学会第68回年次学術講演会、III-250、pp.499-500、2013。
- 15) 日下敦、砂金伸治、河田皓介、真下英人：軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関する数値解析的検討、土木学会第69回年次学術講演会、III-220、pp.439-440、2014。
- 16) 河田皓介、日下敦、砂金伸治、真下英人：インバートを有する山岳トンネル覆工の数値解析モデルに関する一考察、土木学会第69回年次学術講演会、III-218、pp.435-436、2014。

EFFECTS OF COUNTERMEASURES AGAINST EARTHQUAKE FOR ROCK TUNNELS BY STATIC LOADING TESTS AND NUMERICAL ANALYSIS

Atsushi KUSAKA, Kosuke KAWATA, Nobuharu ISAGO and Hideto MASHIMO

Static loading tests are carried out in this study assuming a ground deformation mode which simulates horizontal compressive deformation of surrounding ground caused by earthquakes, using a 1/20 scale model. Numerical simulations of the tests were also conducted to clarify the effects of the countermeasures. Major conclusions include: the rockbolts, the carbon fiber sheet, and the re-bar are not considered to be effective countermeasures for reducing the lining stress in this deformation mode, because compression stress occurs in these members though tensile stress is expected.