

3.2 山岳トンネルの耐震対策の選定手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：角湯克典，日下敦

【要旨】

山岳トンネルは一般に地震に強い構造物とされているが、新潟県中越地震で、これまで耐震対策が不要とされてきた区間においても比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害が発生した。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを明らかにし、耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策とその選定手法を確立する必要がある。本年度は、山岳トンネルの耐震対策の選定に関する基礎的検討として、まず、山岳トンネルで要求されると考えられる耐震性能に応じた限界状態について検討を行った。続いて、地震時に覆工に発生する応力を低減させることができると考えられる耐震対策について、数値解析により検討した。さらに、実トンネルにおいて計測されたデータを用いて、地震時のトンネルの挙動について検討した。本稿ではこれらの検討結果について述べる。

キーワード：山岳トンネル，耐震対策，限界状態，数値解析，動的計測

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、過去の地震ではトンネル構造に大きな損傷を受ける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、断層破碎帯等の極端に地山の悪い箇所や不安定な斜面内、トンネル自体が既に変状を生じていた箇所、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耐震対策を行っているのが現状である^{例えば1)}。そのような状況のなか、2004年新潟県中越地震では、上述の条件に当てはまらない箇所においても、数は限られるものの比較的規模の大きな覆工の崩落を伴うような被害を受けた山岳トンネルがあった^{2),3)}。これは、地震の規模や地山条件等、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。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを明らかにし、耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその選定手法を確立する必要がある。

本年度は、山岳トンネルの耐震対策の選定に関する基礎的検討として、まず、山岳トンネルで要求されると考えられる耐震性能に応じた限界状態について検討

を行った。続いて、地震時に覆工に発生する応力を低減させることができると考えられる耐震対策について、数値解析により検討した。さらに、実トンネルにおいて計測されたデータを用いて、地震時のトンネルの挙動について検討した。

2. 山岳トンネルの限界状態に関する検討

道路トンネルは道路ネットワークの一部を構成する構造物であり、地震時における要求性能も他の構造物と同等の耐震性能を要求されるものと考えられる。しかしながら、上述のとおり山岳トンネルはこれまでに地震被害をほとんど受けなかったことから、要求される耐震性能や、それに対応した限界状態等に関する検討もほとんどなされておらず、他の構造物との整合も取れていないのが現状である。ここでは、道路橋示方書⁴⁾等の耐震性能に関する記述を参考に、今後山岳トンネルの耐震対策について検討する上で要求されると考えられる耐震性能に応じた限界状態について検討を行った。

山岳トンネルにおいて要求されると考えられる耐震性能に応じた限界状態としては、以下のものが考えられる。

耐震性能1を「地震によってトンネルとしての健全性を損なわない性能」と仮定すると、地震後も変状がないか、あっても地震前とほぼ同等の機能を有し、補修・補強を必要としないか軽微な修復で済むことが要

求されると考えられる。これに対する限界状態の例としては、地震によって発生する覆工コンクリートの応力が弾性挙動範囲内であるか、軽微な引張りひ割れが発生する程度に収まる状態が挙げられると考えられる。

耐震性能2を「地震による損傷が限定的なものにとどまり、トンネルとしての機能の回復が速やかに行い得る性能」と仮定すると、地震により変状が発生し、対策を行わなければ将来、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があるものの、地震後もトンネルとしての機能を速やかに回復することができ、比較的簡易な対策による補修・補強で済むことが要求されると考えられる。これに対する限界状態の例としては、地震によって覆工コンクリートに曲げによる圧縮破壊が生じたとしても一箇所にとどまり、構造全体の耐力としては余裕を残した状態が挙げられると考えられる。

耐震性能3を「地震による損傷がトンネルとして致命的とならず、構造全体が崩壊しない性能」と仮定すると、地震により変状が発生し、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があり、トンネルとしての機能を回復するためには大がかりな補修・補強等、抜本的な対策が必要となるものの、トンネル構造としては崩壊していないことが要求されると考えられる。これに対する限界状態の例としては、地震によって覆工コンクリートに曲げによる圧縮破壊が複数箇所で生じたとしても、構造全体が崩壊せず、トンネル空間は保持されている状態が挙げられると考えられる。

3. 数値解析による耐震対策の効果に関する検討

これまでの地震による覆工の被害^{2), 3), 5)~9)}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、大まかに図-1の3パターンに大別されることが考えられる。すなわち、肩部に圧縮（曲げによる圧縮破壊）や曲げ引張りひ割れが発生するTYPE-I、天端部に圧壊（全圧縮によるせん断破壊）や圧縮が発生するTYPE-II、側壁部、特に矢板工法で施工された側壁～アーチ部継目に圧壊や圧縮が発生するTYPE-IIIである。これらの被害が発生するメカニズムは必ずしも明確にはなっていないが、TYPE-I～IIIは、それぞれ地山のせん断変形、水平方向の圧縮変形、鉛直方向の圧縮変形により再現できる可能性があることが明らかになってきている^{10)~12)}。ここでは、これらの地山の変形モードに対して対策を行った場合の効果について、数値解析により検討した。

3.1 解析の概要

解析は二次元の線形弾性FEMにより行い、図-2に示すように覆工をはり要素、地山を平面ひずみ要素でモデル化した。地震による地山の変形は、せん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形を想定し、せん断ひずみ γ あるいは圧縮ひずみ ε が0.2%となる強制変位を与えるよう、図-3に示す境界条件でモデル化した。

物性値は表-1に示すとおりであり、本検討で採用した地山の弾性係数は、比重2.3の場合で弾性波速度 $V_p = 300$ m/s程度、 $V_s = 160$ m/s程度に相当し、比較的軟質な岩に相当すると考えられる。



図-1 トンネルの地震被害モード

表-1 解析に用いた物性値

	地山	覆工
要素	平面ひずみ	はり
弾性係数 (MPa)	150	22,000 (一部150)
ポアソン比	0.30	0.20

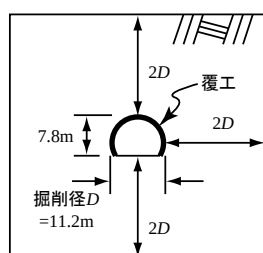


図-2 解析の概要

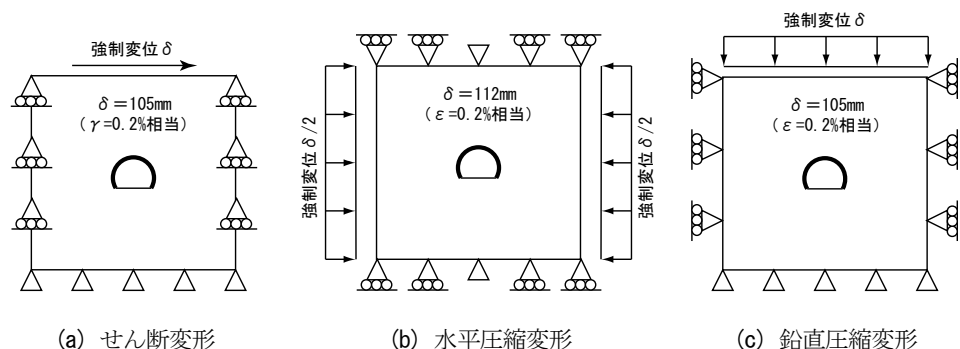


図-3 想定する変形モードと解析における境界条件

表-2 本検討で対象とした覆工構造

ケース	概要	覆工弾性係数(MPa)	背面空洞範囲(deg)	覆工厚(cm)
1	基本ケース	22,000	—	30
2	覆工剛性小	150	—	30
3	背面空洞あり	22,000	60-120	30

※背面空洞は、覆工と地山の節点間における力の伝達を0とすることでモデル化

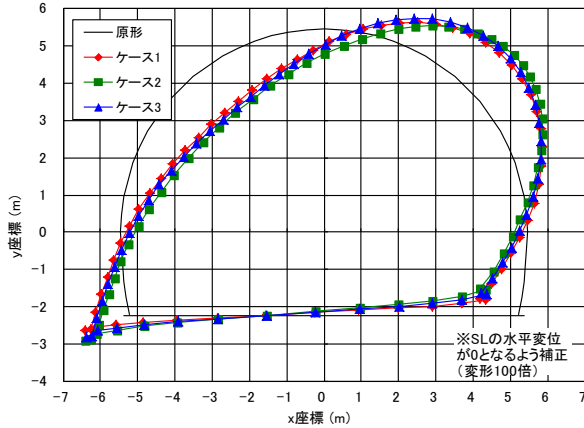


図-4 地山がせん断変形した場合の覆工の変形

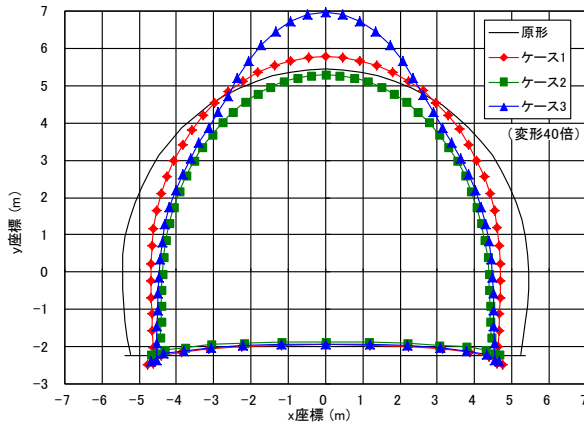


図-5 地山が水平圧縮変形した場合の覆工の変形

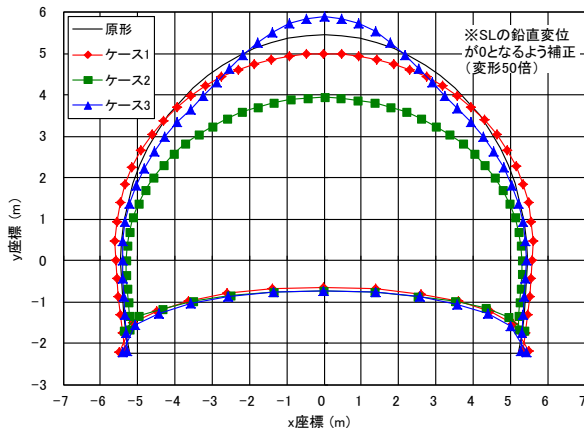


図-6 地山が鉛直圧縮変形した場合の覆工の変形

解析ケースは、表-2 に示すように、通常の覆工をモデル化したケース 1、覆工の剛性を低減させ、弾性係数を地山と同一としたケース 2、覆工の天端部に背面空洞を有するケース 3 の 3 ケースとした。ここでは、

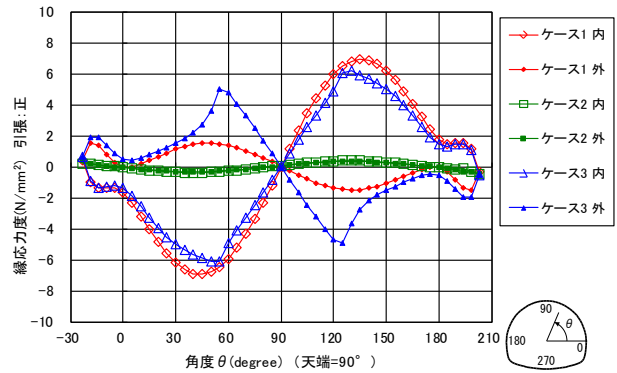


図-7 地山がせん断変形した場合の覆工の縁応力

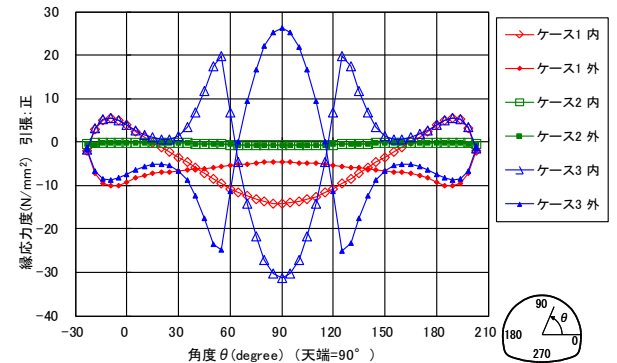


図-8 地山が水平圧縮変形した場合の覆工の縁応力

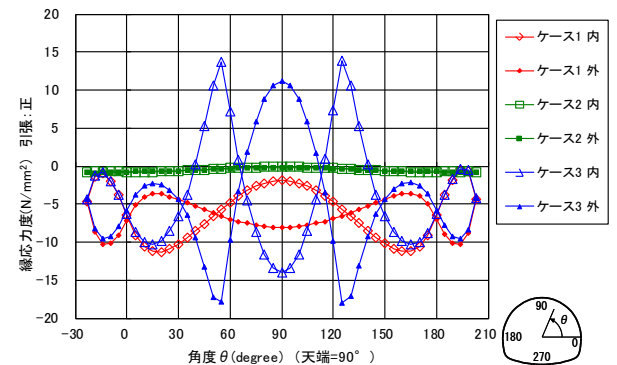


図-9 地山が鉛直圧縮変形した場合の覆工の縁応力

ケース 1 と 2 を比較することで、新設トンネルにおける耐震対策として覆工の剛性を低減させる、いわゆる柔構造の採用の効果を検証する。また、ケース 3 と 1 を比較することで、既設トンネルにおいて覆工背面空洞が存在する場合に、地山と同一の剛性を有する材料で裏込め注入工を行う場合の耐震対策としての効果を検証する。

3.2 解析結果

図-4~6 は、それぞれ地山がせん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形した場合の、覆工の変形を示したものであり、図-7~9 は同様に覆工の縁応力

ものである。

覆工の剛性を小さくしたケース 2 は、いずれの地山の変形モードにおいても、ケース 1 と比較して覆工の変位はやや大きくなっているものの、覆工に応力がほとんど発生しなくなることが分かる。これは、覆工の剛性を低下させることにより、地震時の地山の変形に覆工が追従できるようになり、覆工に発生する応力を低減させることができることを示しているものと考えられる。すなわち、覆工を柔な構造とすることにより、地震により覆工に発生する応力を低減させる効果が期待できる可能性があるものと考えられる。

天端に背面空洞を有するケース 3 は、地山がせん断変形する場合は、覆工肩部の外側の応力が増加することを除けば、ケース 1 と比較して変形量や最大応力といった覆工の挙動に大きな差は見られない。一方、地山が水平圧縮変形および鉛直圧縮変形する場合は、地山からの地盤反力を得ることができず、天端が上方に変形して大きな曲げ応力が覆工に発生していることが分かる。覆工内側の応力に着目すると、天端で圧ぎが、肩部で引張りひび割れが発生しやすい状態になっていると言える。これらのことは、背面空洞が地震時の覆工の応力状態に悪影響を及ぼしていることを示しているものと考えられる。換言すれば、地山と同程度の剛性を有する材料で裏込め注入工を行うことで、地震時に覆工に発生する応力を低減させる効果が期待できると考えられる。

4. 実トンネルにおける地震時の挙動に関する検討

山岳トンネルの地震被害の代表的なものは、前章で示した地山の変形モードにより発生したものと推定できることが徐々に明らかになってきているが、実トンネルにおける地震時の計測事例^{例えば 13)}はごくわずしくなく、大きな地震動がトンネルに作用した場合の動的挙動はほとんど明らかになっていないのが現状である。そこで、既設の実トンネルに動的計測機器を設置したところ、トンネル周辺で震度 6 強～6 弱の強い揺れを観測した地震において、トンネル覆工の動的な挙動に関するデータが得られたので、本章ではその計測結果¹⁴⁾について述べる。

4.1 計測の概要

計測機器を設置したトンネルは、宮城県石巻市所管のサンファントンネルである。本トンネルは NATM により建設された延長 689m の 2 車線道路トンネルで、2011 年現在で竣工から約 15 年が経過している。周辺

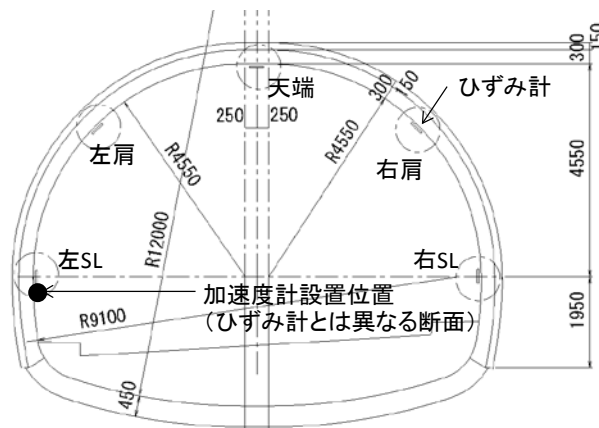


図-10 計測断面図

地山は砂岩および頁岩が主体で、明瞭な断層・破碎帯等の不良地山区間は記録されていない。なお、計測機器設置前の目視点検では覆工に目立った変状は確認されていない。

計測は西側坑口から約 100m、土かぶり約 40m の地点で行い、図-10 に示すように、天端、両肩部、左右 SL の計 5 箇所、覆工内面の円周方向のひずみを、側壁部 1 箇所、3 成分の加速度を計測した。当該区間の地山等級は DI であり、インバートを有する構造となっている。

計測した振動は、2011 年 4 月 7 日 23 時 32 分ごろ宮城県沖で発生したマグニチュード 7.1 の地震¹⁵⁾によるものである。本トンネルは、この地震の震央から西北西約 60km に位置しており、宮城県栗原市、仙台市で震度 6 強、石巻市でも震度 6 弱を観測するなど、トンネル近隣でも強い揺れを観測した。

4.2 計測結果

図-11 は、覆工側壁で計測された加速度の時刻歴波形を示したものである。最大加速度は 200gal 程度と比較的大きな値であったが、3 成分とも大差はなかった。

図-12 は、覆工のひずみの時刻歴波形を示したものである。ひずみは引張が正となるよう示してある。比較的大きなひずみが発生した箇所は天端と右肩であるが、いずれの箇所においても、発生したひずみは圧縮側、引張側ともに高々 20 μ 程度であり、一般的な覆工コンクリートの弾性挙動範囲内と言える小さな値であった。ただし、部位によっては 5 μ 程度の残留ひずみが生じており、地震動が繰り返し作用した場合の影響は今後検討する必要があるものと思われる。

図-13 は、最大圧縮ひずみが発生した、時刻 11～12

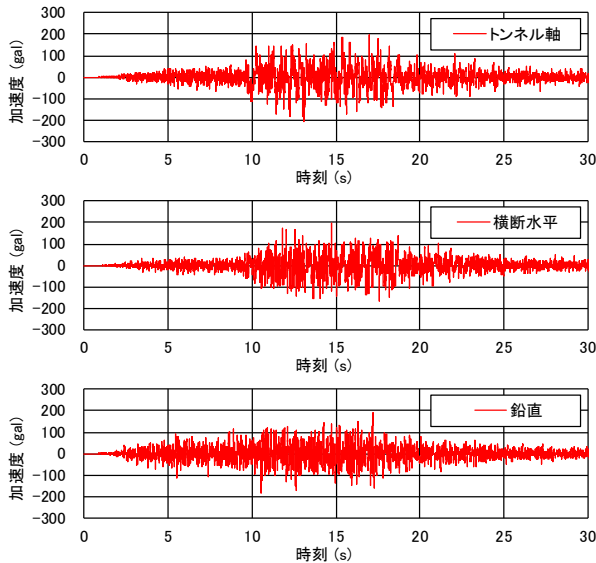


図-11 サンファントンネル側壁の加速度波形

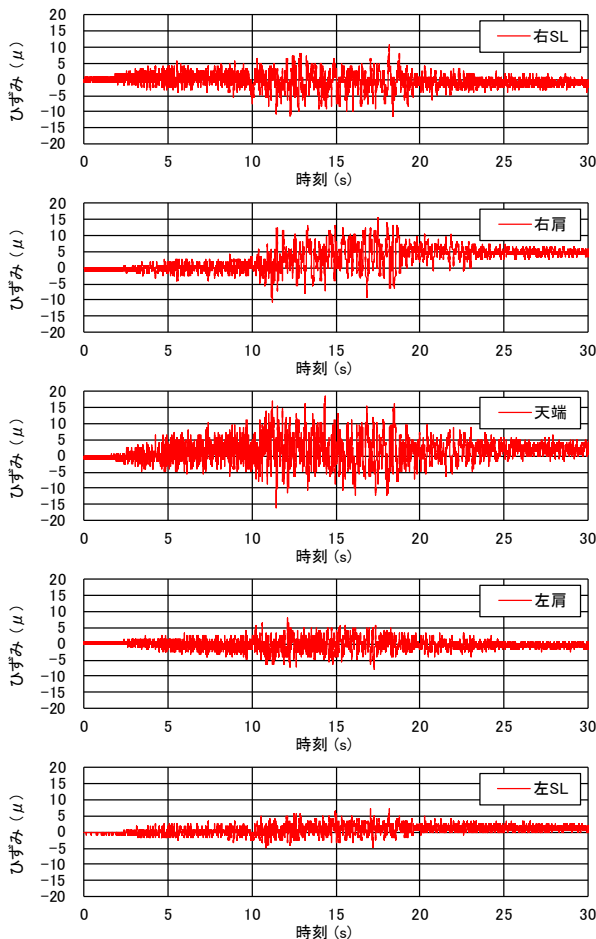


図-12 サンファントンネル覆工ひずみ時刻歴

秒付近のひずみ値を示したものである。この時刻の範囲で圧縮ひずみが極大となった着目時刻①～⑦におけるひずみの分布を示すと図-14 のようになった。この分布を見ると、図-7～9 のケース 1 で示した覆工内面

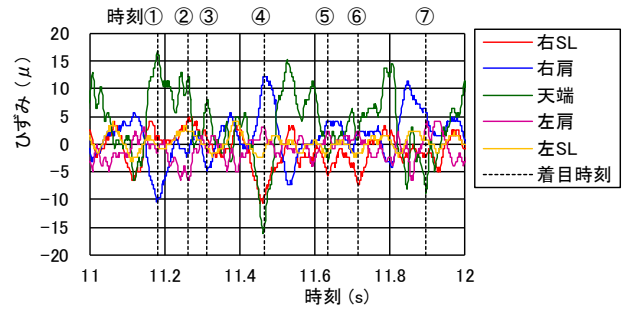


図-13 サンファントンネル覆工内面のひずみ時刻歴 (11～12 秒)

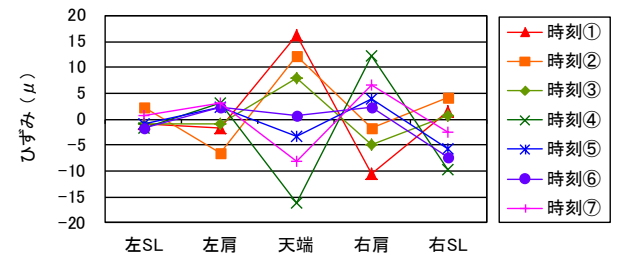


図-14 着目時刻における覆工内面のひずみ分布

のひずみのモードと完全に一致するものではないが、地山がせん断変形したというよりは、むしろ水平圧縮変形あるいは鉛直圧縮変形した場合のモードに近いと思われる。これらのことは、従来最も基本的な地震時の地山の変形モードと考えられている地山のせん断変形だけでは説明しがたい挙動が観測されたことを示しており、今後、山岳トンネルの地震対策を考える上では、せん断変形以外の地山の変形モードも考慮に入れる必要があることを示唆しているものと考えられる。

5. おわりに

本年度は、山岳トンネルの耐震対策の選定に関する基礎的検討として、まず、山岳トンネルで要求されるところと考えられる耐震性能に応じた限界状態について検討を行った。続いて、地震時に覆工に発生する応力を低減させることができると考えられる耐震対策について、数値解析により検討した。さらに、実トンネルにおいて計測されたデータを用いて、地震時のトンネルの挙動について検討した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 山岳トンネルで要求されるところと考えられる耐震性能を仮定した上で、それらに対応すると考えられる山岳トンネルの限界状態について整理した。
- 2) 地震時の覆工の応力を低減させる方法としては、覆工を柔な構造とすることや、覆工背面に空洞がある場合は裏込め注入工を行うことが有効である可能性があ

る。

3) 実トンネルで計測された地震時の覆工のひずみは、地山がせん断変形したというよりは、むしろ水平圧縮変形あるいは鉛直圧縮変形したと類推されるモードを示した。

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.
- 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) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善，2002.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 国田雅人，竹俣隆一，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.
- 9) 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.
- 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，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.
- 12) 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，Vol.20，pp.1-8，2010.
- 13) 朝倉俊弘，小島芳之，野々村政一，宮林秀次，磯谷篤実：小土被りトンネルにおける地震時挙動に関する研究，トンネル工学研究報告集，Vol.17，pp.209-213，2007.
- 14) 日下敦，砂金伸治，真下英人，角湯克典：山岳トンネルの地震時挙動に関する計測，トンネル工学研究報告集，Vol.21，pp.147-151，2011.
- 15) 気象庁：地震・火山月報(防災編)，平成23年4月，pp.58-72，2011.

RESEARCH ON SELECTION METHOD OF COUNTERMEASURES AGAINST EARTHQUAKE FOR MOUNTAIN TUNNEL

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Road Technology Research
Group (Tunnel)

Authors : KADOYU Katsunori
KUSAKA Atsushi

Abstract: Mountain tunnel has been empirically supposed to be a strong structure against earthquake, rather than other structures. However, a few tunnels were damaged with collapse of lining in recent large earthquakes in Japan. In order to minimize such damages under budget constraint, the effective countermeasures and the condition where the countermeasure is required should be established. In this study, numerical analysis and on-site measurement were carried out to clarify the mechanism of the seismic damage and effect of countermeasures.

Keywords: Mountain tunnel, seismic damage, limit state, numerical analysis, countermeasures against earthquake, on-site dynamic measurement