

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：砂金伸治、日下敦

【要旨】

山岳トンネルは一般に過去の経験から地震に強い構造物と考えられているが、新潟県中越地震では、これまで耐震対策が不要とされてきた区間においても、覆工の崩落を伴うような比較的規模の大きい被害が発生した。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、地震時の被害発生メカニズムや、対策が必要となるトンネルの条件を明らかにし、対策の選定手法を確立する必要がある。本研究では、現地計測や数値解析、模型実験を行い、山岳トンネルの耐震対策の効果に関するメカニズムや、山岳トンネルにおいて要求される耐震性能に応じた限界状態と耐震対策の選定手法に関する考え方について検討を行った。

キーワード：山岳トンネル、地震被害、耐震対策、現地計測、数値解析、模型実験

1. はじめに

主として岩盤に掘削される山岳トンネルは、過去の地震においてトンネル構造が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、トンネル自体に既に変状が生じていた箇所、坑口部等では、比較的地震の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^{例え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、トンネルの構造等によっては、山岳トンネルにおいて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や対策が必要となるトンネルの条件を明らかにし、効果的な耐震対策の選定手法を確立する必要がある。

本研究では、まず、現地計測により、地震時における山岳トンネルの変形モード等に関する検討を行った。続いて、地震時に想定される荷重条件を数値解析上でモデル化し、覆工に圧縮破壊が生じる場合の荷重の大きさを検討した。また、模型実験や数値解析等の結果を踏まえ、耐震対策工の効果について検討を行った。

最後に、山岳トンネルに要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それらに応じた限界状態の考え方について検討を行った。

2. 地震時に想定されるトンネルの主な変形モード

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、大まかに図-1の3種類に大別されると考えられる⁹⁾。すなわち、覆工肩部に曲げ破壊が発生する Type-I、覆工天端部に圧縮破壊が発生する Type-II、側壁部に圧縮破壊が発生する 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解明されていないが、TYPE-I~IIIの被害は、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)}。実際に、これらの地山の変形をモデル化した簡単な数値解析⁹⁾により覆工の変形モードを検討すると、覆工内側(内空側)のひずみは図-2のようになり、地山のせん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形により、覆工内側の圧縮ひずみが卓越する箇所はそれぞれ肩部、天端部、側壁部になることが分かる。

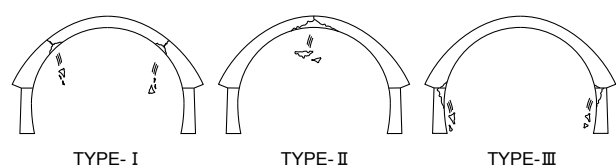


図-1 トンネルの地震被害モード

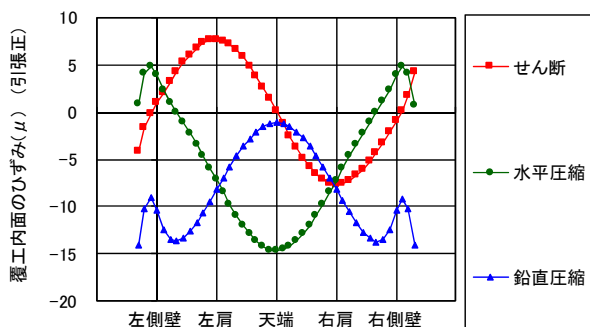


図-2 地山の変形モードに対する覆工内面の縁応力・ひずみモード

地中構造物であるトンネルでは、これまで、地震時には地山にせん断変形が生じるのが最も基本的なモードであり、それにとまって Type-I の被害形態が最も発生しやすいとされてきた一方で、Type-II や Type-III のような被害形態を呈する事例も散見されている。しかし、地震時のトンネルの挙動を実際に計測した事例は稀であり、地震時の変形モードや作用荷重等、基本的な事象も十分にはこれまでに解明されたとは言い難いのが現状である。

3. 既設トンネルにおける動的計測

3.1 計測の概要

山岳トンネルは他の構造物と比べて地震による被害事例が少ないことから、実構造物における地震時の計測事例が比較的少なく、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。そこで、既設の実トンネルに動的計測機器を設置し、地震時の挙動を計測した。

計測機器を設置したトンネルは、宮城県石巻市に位置する、NATM により建設された延長 689m の 2 車線道路トンネルで、1996 年に竣工した。周辺地山の地質は、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。また、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。

本研究においては、坑口から約 100m、土かぶり約 40m の、いわゆる一般部において、図-3 に示すように、天端・両肩部・両側壁部の計 5 点において覆工表面のひずみを、側壁部において 3 成分の加速度¹²⁾を計測した。

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の地震によるもので

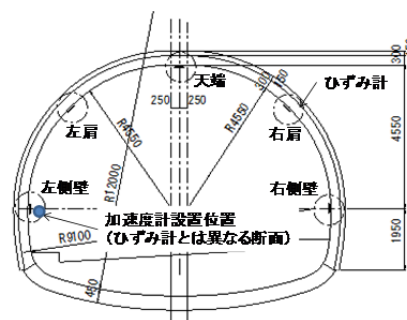


図-3 計測断面図

ある。計測を行ったトンネルは、この地震の震央から西北西約60kmに位置しており、近隣の宮城県栗原市、仙台市宮城野区で震度6強、石巻市でも震度6弱を観測するなど、トンネル周辺でも非常に強い揺れを観測した。

3.2 計測結果

この地震によって石巻市内の K-net 観測点 (MYG010) で観測された地表面の最大加速度は 300gal 程度であった。一方、本研究によりトンネル内で計測された最大加速度は 200gal 程度であった¹²⁾。K-net 観測点とトンネルは約 8km 離れており、地盤条件も異なるため、単純な比較はできないが、トンネル内での加速度は地表部と比べてやや小さいものであった。

図-4 は、計測した覆工のひずみの時刻歴波形を示したものである。比較的大きなひずみが発生した箇所は天端と右肩であったが、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。実際に、地震後に行ったトンネル目視点検では、監査歩廊に非常に軽微な浮き上がり等は見られたものの、覆工には目立った変状が確認されていない。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-5 は、最大圧縮ひずみが発生した時刻 11~12 秒付近のひずみの時刻歴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-6 のようになった。この分布形状と、図-2 のひずみモードを比較すると、完全に一致するものではないが、地山がせん断変形した Type-I 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、Type-II あるいは Type-III のモードに近いと思われる。

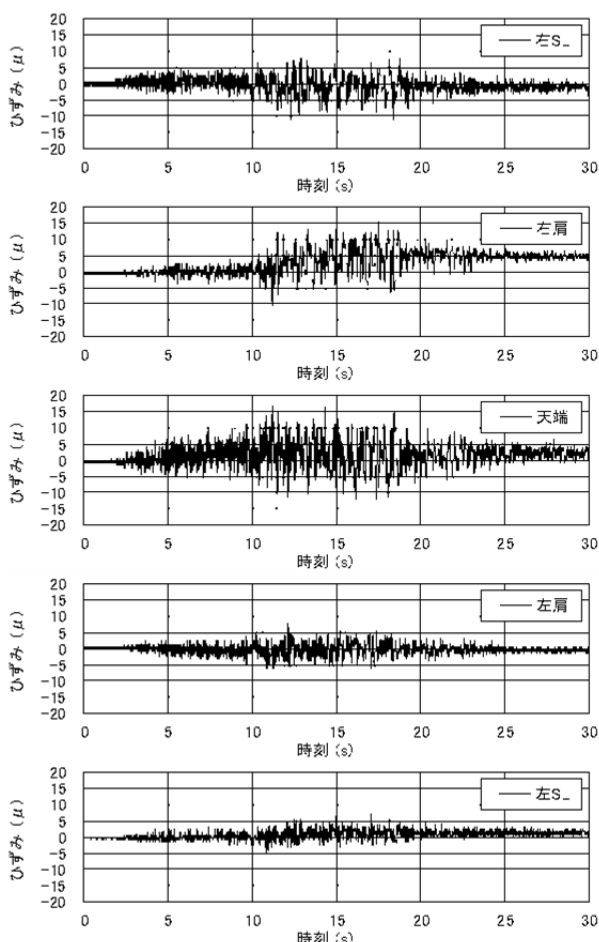


図-4 計測した覆工内面のひずみの時刻歴

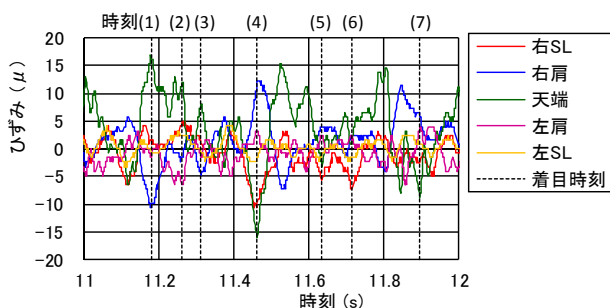


図-5 覆工内面のひずみ時刻歴 (11~12秒拡大)

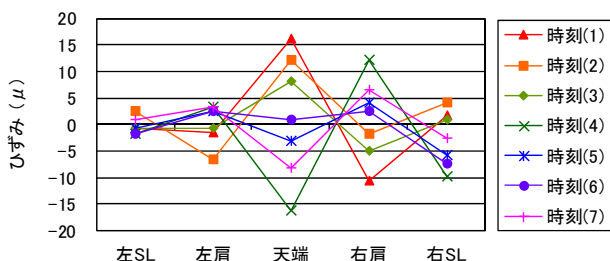


図-6 着目時刻における覆工内面のひずみ分布

これらの計測結果は、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い

る。すなわち、新潟県中越地震²⁾等においても発生したType-IIやType-IIIと推定される被害をもたらした変形モードが地震により発生し得ることが、計測結果からも裏付けられたものと考えられる。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、すなわちType-IIおよびType-IIIも考慮に入れる必要があることを示唆している。

4. 覆工破壊時の作用荷重

4.1 数値解析の概要

上述したように、山岳トンネルの耐震対策を検討する上で、Type-IIやType-IIIの被害モードを考慮することが必要であると考えられる。そこで、このような被害形態を模擬できる数値解析モデルを用いて、山岳トンネルにType-IIやIIIのような被害が生じる場合に想定される作用荷重の大きさについて検討を行った。

図-7は、解析モデルの概要を示したものである。トンネルの直径(覆工の外径) D は10mとし、覆工の厚さは30cmと仮定した。インバート厚さは50cmとした。

荷重は、鉛直荷重 P_v と水平荷重 $P_h (= kP_v)$ 、 k は側圧係数)として地山周辺に徐々に作用させた。水平荷重が卓越する場合として $k=2$ 、鉛直荷重が卓越する場合として $k=0.5$ の2種類の荷重を仮定した。なお、覆工の初期応力や自重による地山の初期地圧は簡便のためゼロと仮定した。

解析¹³⁾においては、覆工コンクリートのひずみ軟化特性を考慮した材料モデルを用いた。本研究で用いた材料モデルを用いて、数値解析上で一軸圧縮応力場の載荷試験を行うと、応力-ひずみ関係は図-8のようになり、約 $3,000\mu$ のひずみにおいて、最大応力18MPaに達し、その後はひずみ軟化特性を示す。このような材料モデルを用いることで、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⁾、地山の水平圧縮変形が卓越する荷重状態を模擬した1/20スケールの模型実験における覆工天端の圧縮破壊等の再現が可能であること¹⁶⁾が示されている。

地山は弾性体と仮定し、比較的良好な地山としてCII、軟質な地山としてDII、さらに軟質な地山としてEの3種類を設定し、それぞれヤング係数を1,000MPa,150MPa,50MPaとした(表-1)。

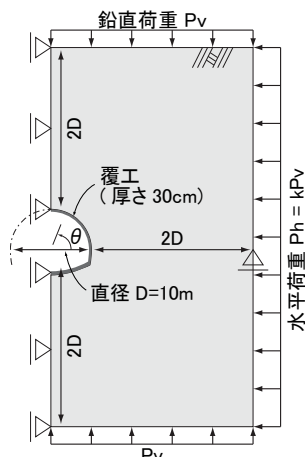


図-7 解析モデルの概要

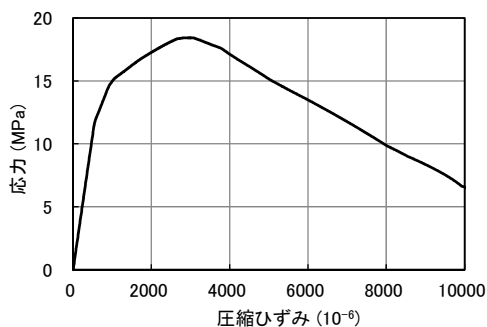


図-8 覆工材料の応力-ひずみ関係

表-1 解析で用いた物性値

対象	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比
CII地山	1,000	0.30
DII地山	150	0.35
E地山	50	0.40
覆工	22,000	0.20

4.2 覆工の破壊の一例

図-9 に、CII 地山において水平荷重が卓越する場合 ($k=2$) の、水平荷重と覆工の変位の関係を示す。荷重 1.9MPa 付近で天端と側壁に大きな変位が発生していることが分かる。図-10 は、この変位の急変が発生する直前の解析ステップにおける覆工のひずみ分布を示したものである。この時点で覆工天端部 ($\theta=90^\circ$ 付近) において $2,500\mu$ を超える圧縮ひずみが発生しており、次のステップにおいては天端部の圧縮ひずみが急激に増大するとともに、変位も急増した。加えて、解析上の最終ステップにおける覆工の最大せん断ひずみ分布 (図-11) を見ても、天端付近の破壊が卓越していることが分かる。これらのことから、荷重 1.9MPa 付近において、覆工天端部に圧縮破壊が発生することで変位

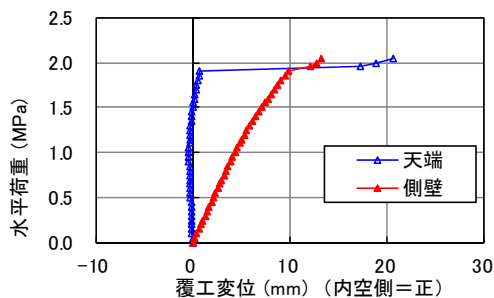


図-9 地山からの荷重と覆工変位の関係 (CII地山, $k=2$)

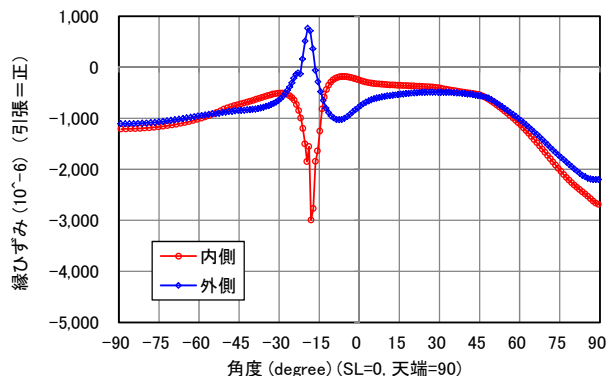


図-10 覆工破壊直前の覆工のひずみ分布 (CII地山, $k=2$)

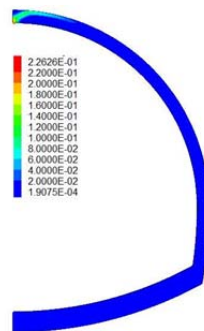


図-11 解析の最終ステップにおける覆工の最大せん断ひずみ分布 (CII 地山, $k=2$)

が急激に増大したことが分かる。なお、図-10 においては脚部内側にも天端と同等の圧縮ひずみが発生しているが、次のステップにおいて天端部では $10,000\mu$ を超える圧縮ひずみが発生したのに対し、脚部では $3,500\mu$ と比較的限定的であったことから、荷重 1.9MPa 付近における覆工の破壊は天端部において卓越していたものと考えられる。

同様に、鉛直荷重が卓越する場合 ($k=0.5$) の、CII 地山における鉛直荷重と覆工の変位の関係を図-12 に示す。荷重 1.6MPa 付近で天端と側壁に大きな変位が発生していることが分かる。図-13 は、この変位の急変が発生する直前の解析ステップにおける覆工のひずみ分布を示したものである。この時点で覆工側壁部 ($\theta=0^\circ$ 付近) において $2,500\mu$ を超える圧縮ひずみが発

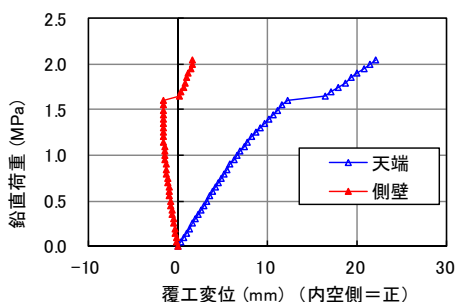


図-12 地山からの荷重と覆工変位の関係 (CII地山, $k=0.5$)

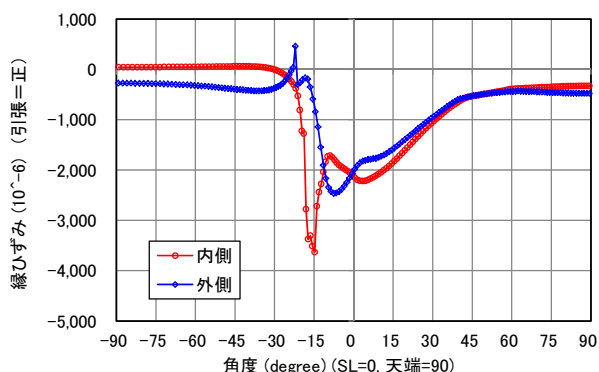


図-13 覆工破壊直前の覆工のひずみ分布 (CII地山, $k=0.5$)

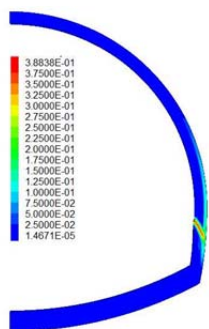


図-14 解析の最終ステップにおける覆工の最大せん断ひずみ分布 (CII地山, $k=0.5$)

生しており、次のステップにおいては天端部の圧縮ひずみが急激に増大するとともに、変位も急増した。加えて、解析上の最終ステップにおける覆工の最大せん断ひずみ分布(図-14)を見ても、側壁付近の破壊が卓越していることが分かる。これらのことから、荷重1.6MPa付近において、覆工側壁部に圧縮破壊が発生することで変位が急激に増大したことが分かる。

本研究では、このような現象を覆工の破壊とし、その時の水平荷重または鉛直荷重を、覆工破壊時の地山からの荷重と呼ぶこととする。

4.3 耐震対策検討時に考慮すべき荷重

図-15は、覆工破壊時の地山からの荷重を、水平荷重が卓越する場合($k=2$)および鉛直荷重が卓越する場合($k=0.5$)について示したものである。いずれの荷

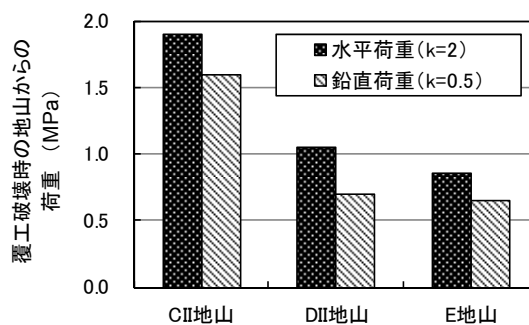


図-15 覆工破壊時の地山からの荷重

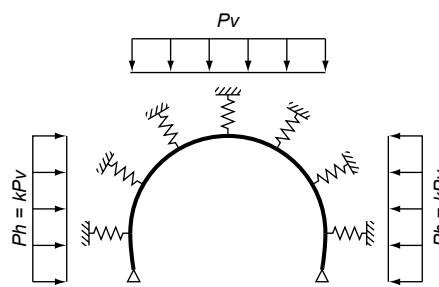


図-16 骨組構造解析のモデルの例

重モードにおいても、CII地山においては比較的大きな荷重まで天端部や側壁部の圧縮破壊は発生していないが、DII地山やE地山においては、約0.7~1MPaの荷重でそれらの破壊が発生している。

換言すれば、Type-IIやType-IIIのように、覆工の天端部や側壁部において圧縮破壊が発生した場合は、0.7MPa相当の荷重、すなわち地山の単位体積重量 23kN/m^3 、トンネル直径 $D=10\text{m}$ とした場合に、3D程度の土被りに相当する荷重が作用したものと想定されることとなる。

4.4 骨組み構造解析における荷重としての評価

一般に、覆工の設計においては、地山を地盤反力ばね、覆工をはり要素でモデル化した、図-16に示すような骨組構造解析が用いられることが多い。前節までに述べた地山からの荷重を、このような骨組構造解析において覆工に作用させる鉛直荷重や水平荷重として適用する場合は、円形トンネルで線形の地盤ばねを用いた弾性解析においては、地盤反力ばね値を適切に設定することにより、骨組構造解析においても同等の変位量や断面力が得られることが既往の研究により明らかになっている¹⁷⁾。すなわち、Type-IIやType-IIIのような地震被害に対する耐震対策を、図-16に示すような骨組構造解析を利用して検討する場合は、作用荷重として、3D程度、あるいは地山条件等によってはそれ以上の土被りに相当する荷重を考慮する必要がある可能性がある。

なお、上記の評価は線形弾性モデルによる骨組み構造解析を行う場合の荷重の評価方法について述べたものであり、地盤や覆工の非線形性を考慮する場合や、真円形でないトンネルにおいて詳細な検討を行う場合は、同等の結果が得られるかの検証等を予め行う必要があると考えられ、今後の課題と言える。

5. 耐震対策工の効果

5.1 既往の変状対策工の耐震対策としての適用性

これらの検討結果を踏まえ、既往の変状対策工を耐震対策として用いる場合の適用性について、図-17 および写真-1 に示すような二次元載荷実験を行った。このような載荷実験を行うことで、TYPE-II や TYPE-III の被害モードを良好に再現することができ¹⁴⁾、耐震対策工を想定した部材を設置することで、対策工の効果に関する傾向を把握することができる。本研究では、図-18 に示す対策工について検討を行った。

このような地山の変形モードを想定する場合、上述の数値解析の結果からも明らかなように、覆工には圧縮破壊が生じる場合が多い。このような条件下では、内巻補強を行うことにより、覆工の破壊時荷重を増加させる可能性があることが分かった¹⁵⁾。一方、引張部材としての効果が期待される対策工、すなわち鉄筋による補強や、繊維シートによる内面補強は、十分な効果を発揮できない可能性が高いことが二次元載荷実験の結果^{16),17)}からも明らかとなった。ただし、これらの対策工を設置することにより、覆工に破壊が生じた場合の覆工片のはく落防止については、一定の効果が期待できる可能性があることが明らかとなった。

これらの模型実験の結果を踏まえると、既往の変状対策工の耐震対策としての適用性は、以下のようにになると考えられる。

単鉄筋による補強は、鉄筋が引張部材として期待されるという性質上、覆工の圧縮破壊を抑制する効果は限定的であると考えられる。しかしながら、地震により覆工に変状が発生した場合に、一定程度のブロック化した覆工の崩落を防止する効果は期待できる可能性がある。ただし、鉄筋の被りコンクリートが小片化して落下することは防止できない。小片の落下も防止する場合は、さらに覆工コンクリートを繊維補強するなどの対策が必要と考えられる。なお、既設トンネルへ適用する場合は、大規模な覆工の打ち替えが必要となる。

インバートの設置による補強は、地震によりトンネル下方からの変形が卓越する場合に、盤ぶくれの影響

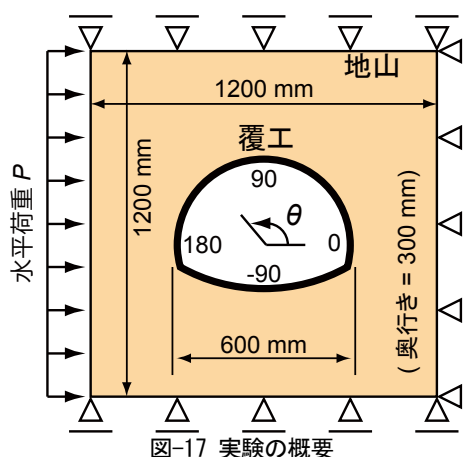


図-17 実験の概要

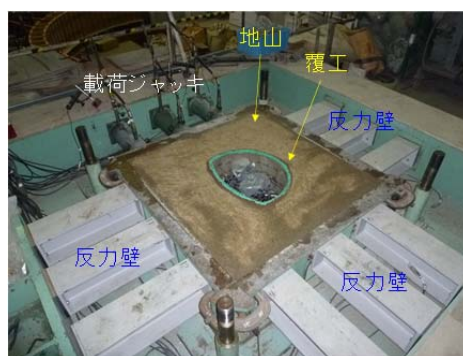


写真-1 載荷実験装置および供試体の概要

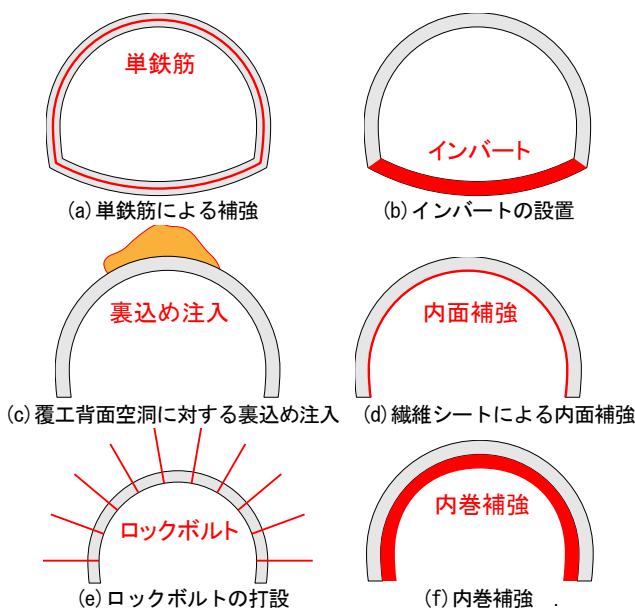


図-18 検討対象とした変状対策工

を低減できる可能性が高いと考えられる。ただし、既設トンネルに活線で適用する場合は、施工に困難をともなうことが想定される。

覆工背面空洞に対する裏込め注入は、地震時に想定される変形に対し、覆工が適切に地盤反力を確保することで、トンネル構造全体としての耐荷力を向上させ

る効果が期待できる可能性が高いと考えられる。背面空洞は矢板工法で建設されたトンネルに存在する場合が多く、特に地山条件の悪いトンネルにおいて、裏込め注入は有効な耐震対策工となる可能性がある。なお、裏込め注入を行う場合は、裏込め注入材の剛性が、対策工の効果に影響を及ぼす場合があるので注意を要する。裏込め注入材の剛性の影響については後述する。

繊維シートによる内面補強は、繊維シートが引張部材として期待されるという性質上、覆工の圧縮破壊を抑制する効果は限定的であると考えられる。ただし、地震により覆工に変状が発生した場合に、比較的小規模なブロック化した覆工のはく落は抑制できる可能性が高いと考えられる。

ロックボルトの打設による補強は、ブロック化した覆工を地山に縫い付け、地山から支持力を確保することにより落下を防ぐ効果は期待できる可能性があると考えられる。ただし、ロックボルトの打設はある程度の間隔を有しており、ロックボルトとロックボルトの間でブロック化した覆工のはく落は抑制できないため、ネット工等との併用が必要となる可能性があると考えられる。

内巻補強は、覆工が老朽化により相応に劣化している場合等において、トンネル構造の耐荷力向上およびはく落防止に効果が期待できる可能性が高いと考えられる。ただし、既設の覆工の内側にコンクリートを打設するため、建築限界に余裕の無いトンネルにおいては適用が困難となる場合がある。

5.2 覆工背面空洞の影響と裏込め注入による効果

山岳トンネルにおける覆工背面の裏込め注入の目的は、主として

- トンネルに外力が作用し、覆工が変形する場合に、地山からの均等な反力を確保し、トンネル構造全体としての耐荷力の向上を図る
- 空洞上方の地山の亀裂による岩塊崩落に起因する突発性の崩壊や、地山の緩み拡大等を防止する

というものが挙げられ、耐震対策としての考え方も同様であると言える。(b)においては、空洞が充填されることが重要であり、裏込め注入材の剛性が議論されることは少ない。一方、(a)においては、適切な反力が得られるよう、裏込め注入材としてある程度の剛性を有するものが選定されるべきであると考えられる。しかしながら、実務上は、マニュアル類において品質管理上の理由から規定された設計基準強度を満足するように裏込め注入材の配合を決定する場合が多く、トンネ

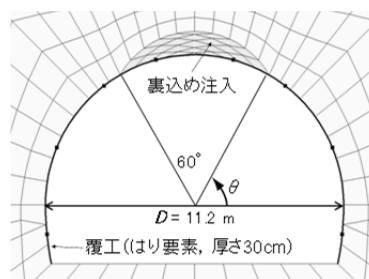


図-19 覆工形状と背面空洞の範囲

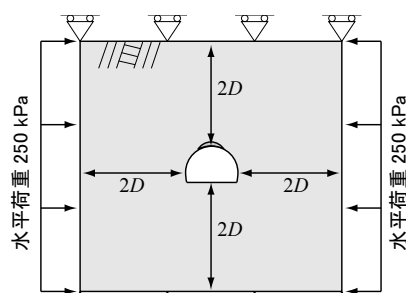


図-20 解析における境界条件

表-2 用いた要素と材料物性値

	地山	覆工	裏込め注入
要素	平面ひずみ	はり	平面ひずみ
ヤング係数(MPa)	150	22,000	0~1,000
ポアソン比	0.35	0.20	0.20

ルの耐荷力に直結すると考えられる覆工の応力状態と、裏込め注入材の剛性の関係について議論された事例は少ないのが現状である。

本研究では、上述(a)を対象とし、トンネル覆工に外力が作用する場合において、天端部の背面空洞に充填する裏込め注入材の弾性係数が、覆工の応力状態に及ぼす影響について数値解析により検討した。

5.2.1 数値解析の概要

解析は線形弾性材料を用いた二次元有限要素法によるものとした。図-19は、覆工形状と背面空洞の範囲およびメッシュを示したものである。覆工はSL幅 $D=11.2$ mの馬蹄形で、天端部 60° の背面に空洞が存在し、この背面空洞に裏込め注入材を充填するものとした。図-20は境界条件を示したものである。荷重条件としては、裏込め注入材の剛性の影響が比較的大きいと考えられる水平方向の荷重が卓越する場合 (TYPE-II 相当) を想定し、単位荷重として土被り $1D$ 分に相当する 250 kPaの水平荷重を作用させた。

表-2に、地山、覆工、裏込め注入工に適用した物性値を示す。地山は軟質な地山を想定したDII等級相当のものとした。覆工は、本検討では厚さ 30 cmのプレ

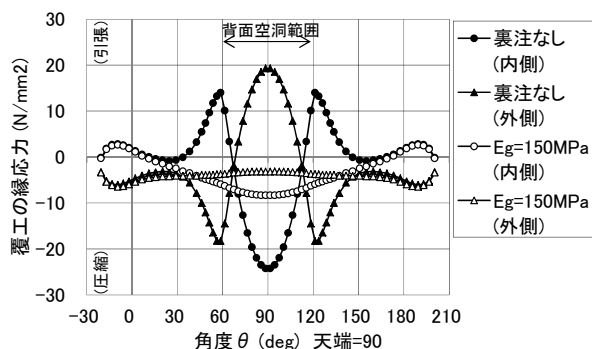


図-21 覆工縁応力における裏込め注入の有無の影響

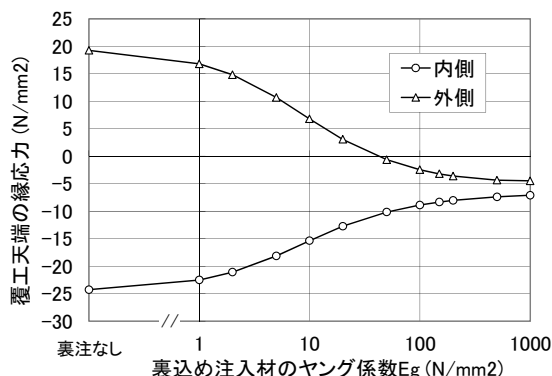


図-22 覆工天端の縁応力に及ぼす裏込め注入材のヤング係数の影響

ーンコンクリート相当と仮定した。裏込め注入材は、ヤング係数 E_g をパラメータとして変化させた。また、裏込め注入を実施せず、背面空洞が存在する場合についても解析を行った。

なお、地山のせん断変形が卓越する場合（TYPE-I 相当）の背面空洞の影響や、鉛直方向の荷重が卓越する場合（TYPE-III 相当）の裏込め注入材の剛性の影響については、別の文献^{18),19)}を参照されたい。

5.2.2 解析結果

まず、裏込め注入の有無による覆工の応力状態を比較した。図-21 は、DII 等級相当の軟質な地山において、背面空洞が存置されている場合（黒塗り）および地山と同程度の剛性を有する $E_g = 150 \text{ MPa}$ の裏込め注入を施工した場合（白塗り）について、覆工の内側および外側の縁応力の分布を示したものである。

裏込め注入を実施しない場合は、特に天端付近において曲げモーメントが卓越し、引張側・圧縮側とも大きな応力が発生した。一方、 $E_g = 150 \text{ MPa}$ の裏込め注入材で充填した場合は、曲げモーメントの発生が比較的抑制され、天端付近の応力も全圧縮状態となった。このことから、比較的軟質な地山において水平方向からの荷重がトンネルに作用する場合に、裏込め注入工

により背面空洞部からも地盤反力を得ることができれば、覆工に発生する応力が、特に天端部周辺で低減できることが分かる。

続いて、裏込め注入材のヤング係数 E_g が、覆工の縁応力に及ぼす影響について検討を行った。図-22 は、 E_g を変化させた場合の、覆工天端の縁応力の変化を示したものである。

裏込め注入工を行わない場合は、先述の通り、圧縮側、引張側ともに大きな縁応力が発生した。裏込め注入を施工した場合は、 $E_g = 1 \text{ MPa}$ 程度の軟質な材料では縁応力の低減がほとんど見られないが、 E_g が大きくなるにつれて覆工外側の引張応力が減少し、圧縮側に転じるとともに、覆工内側の圧縮応力も減少している。すなわち、 E_g の大きな裏込め注入材を用いることで、曲げモーメントが減少して全圧縮状態となるとともに、縁応力も小さなものとなった。一方で、本検討における条件においては、 E_g が 100 MPa を超えた付近から縁応力の減少も緩やかとなり、以降 E_g を大きくしても縁応力の大幅な減少は見られなかった。

これらのことから、背面空洞が存在し、かつ覆工に外力が作用する条件下において、裏込め注入工により覆工応力の低減を期待する場合は、十分な剛性を有する裏込め注入材を用いる必要があるとともに、極端に剛性の大きな注入材を用いても大幅な応力低減を見込めない可能性があることが分かった。

以上の結果から、軟質な地山において地震時に外力が作用する場合は、十分な剛性を有する裏込め注入材を用いる必要があるとともに、極端に剛性の大きな注入材を用いても大幅な応力低減を見込めない可能性があると考えられる。換言すれば、これまでは、施工性や品質管理上の理由から規定された設計基準強度を満足するように裏込め注入材の配合を決定する場合が多かったが、それらに加え、裏込め注入材の剛性による影響についても検討する必要があると考えられる。

ただし、ここで示したデータは、限られた条件における検討結果でしかない。上述の現象は、荷重のモードや覆工巻厚、背面空洞幅、背面空洞高さ、地山の剛性等にもよると考えられるため、実務上の設計を行う際には、個別の条件を反映した検討を行い、その効果を確認することが必要になると考えられる。

6. 要求される耐震性能に応じた限界状態の案

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様の耐震性能を要求されるものと考えられる。し

表-3 想定する耐震性能と対応する限界状態の例

	想定する耐震性能		限界状態
	耐震性能	概要	
耐震性能 1	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	地震後も変状がないか、あっても地震前とほぼ同じ機能を有し、補修・補強を必要としないか軽微な修復で済むこと	地震によって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とどまる
耐震性能 2	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い行い得る性能	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、比較的容易な対策による補修・補強ですむこと	地震によって覆工コンクリートが圧縮限界に達して破壊に至るのが局所的なものであり、構造全体の耐力としては余裕を残した状態
耐震性能 3	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	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規模な補修・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	地震によって覆工コンクリートに圧縮破壊が複数箇所生じたとしても、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

かしながら、山岳トンネルはこれまでに受けた地震被害に関する事例が乏しく、具体的な検討が行われた事例もほとんど無いのが現状である。そこで、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として、道路橋示方書²⁰⁾等に記載されている耐震性能に関する記述を参考に、山岳トンネルの耐震対策を検討する上で要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それに応じた限界状態を整理した。

表-3に、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を仮定し、それに応じた限界状態の考え方を示す。なお、トンネルにおける構造物としての機能は、利用者が安全にトンネル内を通行できることであり、大別すると、トンネルの構造安定性の確保と、利用者の安全性の確保の2項目が求められると考えられる²¹⁾。今後、具体的な耐震性能を検討するにあたっては、このような観点を含め、供用性、短期修復性、長期修復性に加え、トンネルの重要性も考慮する必要があると考えられる。

7. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 既設トンネルにおいて地震時の動的計測を行った結果から、地震時における山岳トンネルの挙動を検討する際には、最も基本的な変形モードとされている地山のせん断変形だけではなく、地山の水平圧縮変形や鉛直圧縮変形も考慮する必要があると考えられる。
- 2) 静的な数値解析の結果、地震により覆工天端や側壁に圧縮破壊が生じる場合は、3D程度以上(Dはトンネル掘削幅)の荷重に相当する外力が作用し

ている可能性があることが分かった。

- 3) 既往の変状対策工を耐震対策として適用する場合の考え方を整理した。
- 4) 耐震対策として覆工の背面空洞の裏込め注入を実施する場合は、十分な剛性を有する注入材を選定する必要があることが分かった。
- 5) 山岳トンネルに要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それらに応じた限界状態の考え方を整理した。

ただし、上記の結論は、数少ない現地計測結果や、限られた数値解析や模型実験により得られたものである。とくに、模型実験や数値解析は、主としてトンネル横断方向の地山の変形を静的なものに換算できると仮定した、限定的な条件における検討でしかない。また、どのような条件においてどのような地山の変形モードが卓越するのかなど、未だ解明されていない部分も多い。地山条件や地震の特性等によっては、トンネル縦断方向の変形が卓越する場合も起こり得ると考えられる。今後、具体的な耐震対策を検討するにあたっては、トンネルの個別の条件等を踏まえ、総合的に判断する必要があると考えられる。

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。
- 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.
- 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，砂金伸治：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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 日下敦，河田皓介，砂金伸治，真下英人：地震による地山の変形を想定した山岳トンネル覆工の耐荷力評価に関する数値解析的考察，トンネル工学研究報告集，Vol.24，I-14，pp.1-8，2014.
- 14) 河田皓介，砂金伸治，日下敦，真下英人：外力対策を考慮したトンネル覆工の挙動に関する実験的考察，土木学会年次学術講演会概要集，第68回，第3部門，pp.511-512，2013.
- 15) 日下敦，河田皓介，砂金伸治：内巻き補強した山岳トンネル覆工の耐荷力に関する二次元載荷実験，トンネル工学報告集，第25巻，No.I-6，pp.1-6，2015.
- 16) 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.
- 17) 河田皓介，日下敦，砂金伸治：鉛直方向からの外力が作用する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25巻，No.I-7，pp.1-7，2015.
- 18) 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，第20巻，pp.1-8，2010.
- 19) 日下敦・砂金伸治・真下英人：山岳トンネルにおける覆工背面空洞裏込め注入材の剛性が外力作用時の覆工応力に及ぼす影響，土木技術資料，Vol.57，No.11，pp.14-17，2015.
- 20) (公社)日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，丸善出版(株)，2012.
- 21) (公社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，丸善出版(株)，2015.

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 : ISAGO Nobuharu
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 strong 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, mechanisms of countermeasures against earthquake in demonstrating their effects are studied through an on-site measurement, numerical analysis and laboratory loading tests. Also, a selection method for the countermeasures are examined assuming anti-seismic performance and its critical state.

Keywords: Mountain tunnel, Countermeasures against earthquake, model experiment, Numerical analysis, on-site measurement