

# 山岳トンネルの地震による変状発生メカニズム

日下 敦\* 真下英人\*\* 砂金伸治\*\*\* 角湯克典\*\*\*\*

## 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対策を行っているのが現状である。そのような状況のなか、2004年10月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。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。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設計法を確立する必要がある。

ここでは、地震時のトンネルの被害として顕著な3タイプの被害モードを対象に、それぞれの被害が発生するメカニズムを数値解析により検討した。また、我が国の道路トンネルの多くを占める矢板工法により建設されたトンネルは、施工方法の特性上、天端部に背面空洞が存在する 경우가多く、トンネルの維持管理上も問題視されていることから、背面空洞が地震時挙動に及ぼす影響についても検討した。本報文ではそれらの結果について報告する。

## 2. 解析の概要

### 2.1 対象とするトンネルの被害モード

これまでの地震による覆工の被害は、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タイプに大別されることが考えられる。すなわち、肩部に圧縮（ここでは、曲げによる圧縮破壊の意）や曲げ引張りひび割れが発生するTYPE-I、天端部に圧壊（ここでは、全圧縮によるせん断破壊の意）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。ここでは、これらの3タイプの被害に着目して検討を行った。

### 2.2 解析モデルの概要

解析は二次元の静的な線形弾性FEMとし、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。地山の変形モードは、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 $\gamma$ あるいは圧縮ひずみ $\epsilon = 0.2\%$ に相当す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、地山の弾性係数は比較的軟質な地山等級

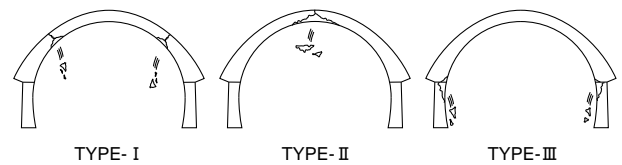


図-1 トンネルの被害モード

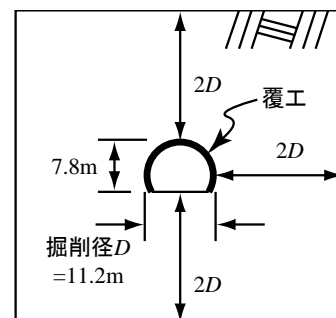


図-2 解析モデルの概要

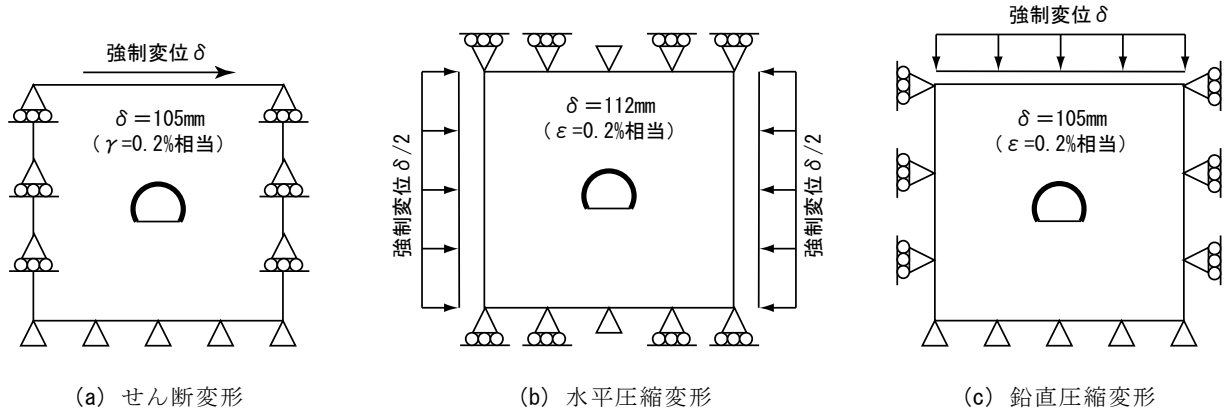


図-3 想定する変形モードと解析における境界条件

表-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
ポアソン比	0.30	0.20

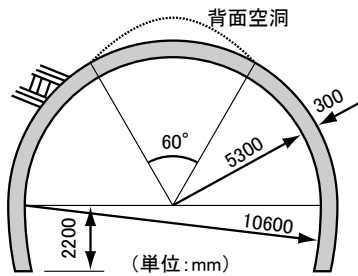


図-4 覆工の形状寸法

DIIに相当するものである。また、覆工の形状は図-4に示すとおりであり、背面空洞が存在するケースは天端部60°の範囲において覆工と地山の節点間の力の伝達を無効にすることでモデル化した<sup>2)</sup>。

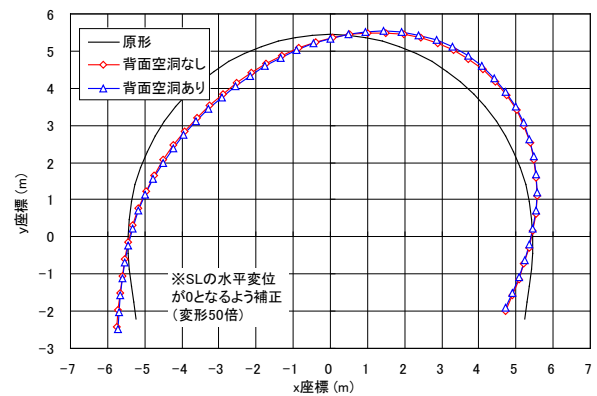
### 3. 解析結果

#### 3.1 覆工の変形

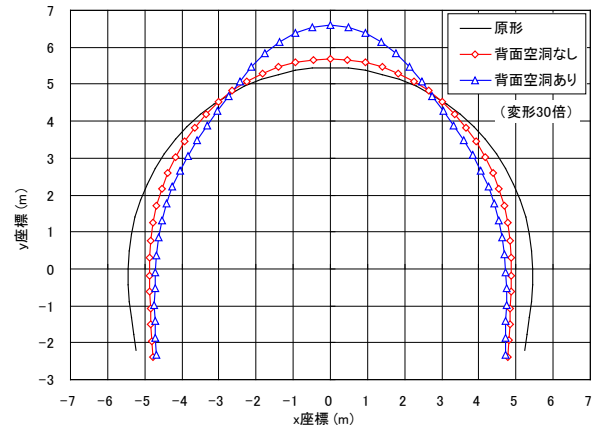
地山にせん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形を与えた場合の覆工の変形モードを、それぞれ図-5(a)、(b)、(c)に示す。地山がせん断変形した場合は、背面空洞が覆工の変形モードに及ぼす影響はほとんど無い。一方、地山が水平圧縮変形した場合と鉛直圧縮変形した場合には、背面空洞が存在すると、天端付近の地盤反力が確保できなくなることによって、天端付近が上に凸となる変形モードが卓越していることが分かる。

#### 3.2 覆工の応力状態

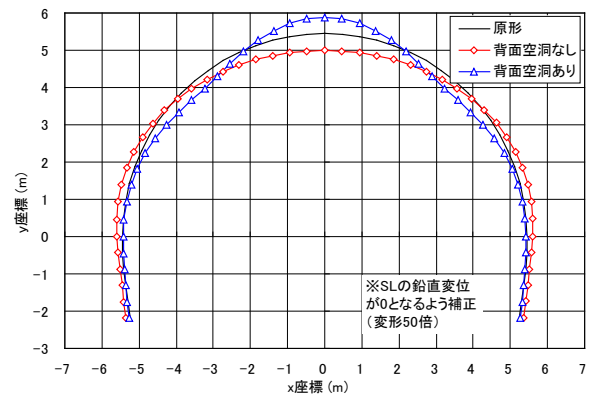
覆工の応力状態を図-6に示す。なお、図中には、軸力と曲げによる覆工の縁応力を示している。ま



(a) 地山がせん断変形した場合

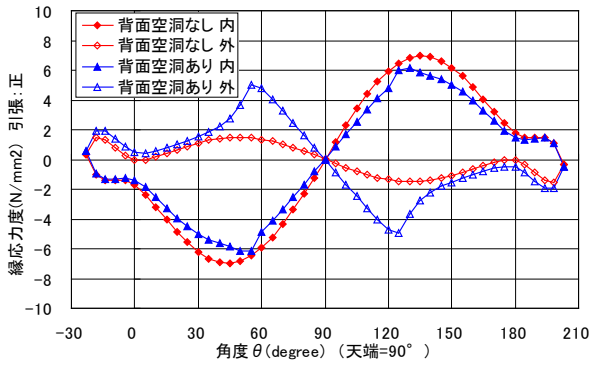


(b) 地山が水平圧縮変形した場合

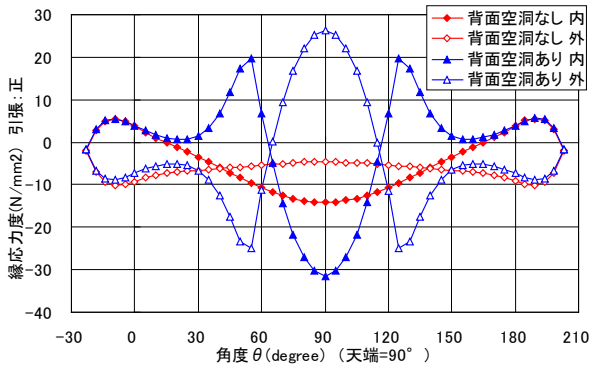


(c) 地山が鉛直圧縮変形した場合

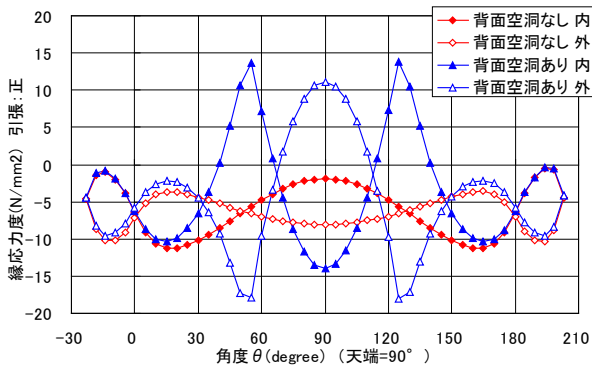
図-5 トンネルの変形モード



(a) 地山がせん断変形した場合



(b) 地山が水平圧縮変形した場合



(c) 地山が鉛直圧縮変形した場合

図-6 覆工の縁応力

た、ここでは、トンネル利用者への被害に直結すると思われる覆工内面の圧さあるいは圧壊に重点を置き、主として覆工内側の縁応力(図中の塗りつぶしシンボル)の圧縮側最大値に着目した。

地山がせん断変形した場合(図-6(a))は、覆工肩部に曲げ応力が集中し、TYPE-Iの被害モードを示すものと思われる。このような地山の变形モードが地震により左右に繰り返し発生すれば、両肩部に圧さあるいは曲げ引張ひび割れが発生するものと考えられる。覆工の縁応力の圧縮側最大値は、背面空洞の有無による影響をあまり受けないことが分かる。

地山が水平圧縮変形した場合(図-6(b))は、

覆工内側の縁応力は天端で最大となっている。ただし、背面空洞がない場合は天端が全圧縮になっているのに対し、背面空洞がある場合は天端が曲げ圧縮となっている。このことは、地山が水平圧縮変形した場合はTYPE-IIの被害モードとなり、背面空洞がない場合は天端に圧壊が、ある場合は天端に圧さが発生することを示唆していると考えられる。また、背面空洞がある場合は、縁応力の圧縮側最大値が大幅に増加しており、より変状が発生しやすい状態にあると言える。

地山が鉛直圧縮変形した場合(図-6(c))は、背面空洞がなければ、側部で覆工内側の縁応力の圧縮側最大値を示すとともに、覆工外側の縁応力も圧縮となっており、側壁~アーチ部継目に圧壊が発生するTYPE-IIIの被害モードを呈すると考えられる。一方、背面空洞が存在する場合は、覆工内側の縁応力は天端で圧縮側最大値を示しており、天端部で圧さが発生するTYPE-IIの被害モードを呈する可能性が高いと考えられる。また、背面空洞がない場合と比較して圧縮側最大値が増加していることから、背面空洞の存在によって変状が発生しやすい状態になっていると言える。

### 3.3 覆工が破壊する地山のひずみ量

本報文では、覆工内側の縁応力が、一般的な覆工コンクリートの圧縮基準強度である18 N/mm<sup>2</sup>に達するときを、覆工の破壊と定義した。解析により算定した覆工の応力と、与えた地山のひずみが比例関係にあると仮定すると、覆工の縁応力が18 N/mm<sup>2</sup>に達するときの地山のひずみ量を外挿あるいは内挿により算定することができる。なお、図-6に示した応力状態からも明らかなように、圧さあるいは圧壊の発生より前に覆工には曲げ引張ひび割れ等の非線形挙動が発現し、構造系や応力モードが変化することが想定されるため、より精緻な解を得るためには非線形挙動も考慮した検討が必要となるが、ここでは簡単のため上述の仮定により検討した。

このようにして算定した覆工破壊時の地山のひずみ量、すなわち、せん断変形においては解析領域上面の水平変位量を解析領域高さで除したせん断ひずみ量、水平圧縮変形においては解析領域左右の水平変位量を解析領域幅で除した圧縮ひずみ量、鉛直圧縮変形においては解析領域上面の鉛直変位量を解析領域高さで除したひずみ量を、図-7

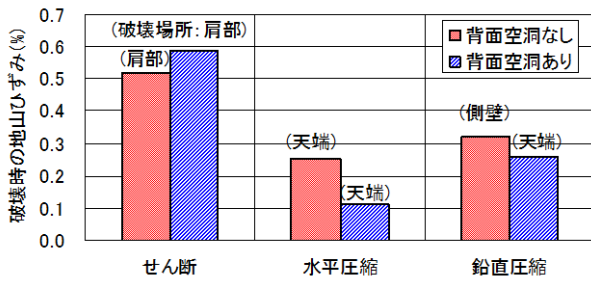


図-7 覆工破壊時の地山ひずみ

に示す。地山がせん断変形した場合は、破壊時の地山のひずみ量は背面空洞の影響をあまり受けないことが分かる。一方で、地山が水平圧縮変形した場合および鉛直圧縮変形した場合は、破壊時の地山のひずみ量が小さくなっていることが分かる。このことは、背面空洞が存在すれば、より小さな地山の変形で覆工が破壊することを示唆しており、背面空洞の存在が地震時の応力状態に悪影響を及ぼしていると言える。

#### 4. まとめ

本報文は、地震時における山岳トンネルの変状発生メカニズムについて、簡易な静的線形FEM解析を用いて議論したものであり、得られた主な結論は以下の2点である。

- 地震時に発生するトンネル覆工の肩部、天端部、側部の圧縮破壊は、それぞれ地山がせん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形することで説明できる可能性が高い。ただし、地山に鉛直圧縮変形が発生する場合でも、背面空洞の存在により天端に圧縮破壊が発生する可能性がある。

- 天端付近に覆工背面空洞が存在すると、地震により地山に水平圧縮変形あるいは鉛直圧縮変形が発生した場合は、天端部で著しく曲げ応力が増加し、より小さな地山の変形で覆工に圧縮破壊が発生する可能性が高い。

ただし、地震により覆工に圧縮破壊が発生するほどの地山の変形が地震により発生するメカニズム、特に水平圧縮変形と鉛直圧縮変形については、必ずしも明らかになっておらず、今後の研究課題として残されている。

通常、山岳トンネルの維持管理においては、地山が比較的良くない区間で背面空洞が発見された場合は裏込め注入工を施工することが基本的な考え方となっているが、それは地震時の覆工の応力を低減する効果も期待できるものと考えられる。換言すれば、日常の維持管理を抜かりなく行い、背面空洞が見つければ裏込め注入工を行うことが、地震時における被害の低減にも寄与するものと考えられる。

#### 参考文献

- 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。
- 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。

日下 敦\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術  
研究グループトンネル  
チーム 研究員  
Atsushi KUSAKA

真下英人\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術  
研究グループ長、博  
(工)  
Dr. Hideto MASHIMO

砂金伸治\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術  
研究グループトンネル  
チーム 主任研究員、博  
(工)  
Dr. Nobuharu ISAGO

角湯克典\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術  
研究グループトンネル  
チーム 上席研究員  
Katsunori KADOYU