

## 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。本年度は、地震時の山岳トンネルの被害で覆工構造全体の耐力に影響を及ぼすと考えられる、覆工の天端部や側壁部の圧縮破壊を再現する手法、および覆工の破壊が発生する場合の外力の大きさについて数値解析により検討を行った。また、覆工背面の空洞への対策として裏込め注入を行う場合の注入材の剛性がトンネル構造の耐力に及ぼす影響について数値解析により検討した。その結果、地震等により覆工の天端部や側壁部の圧縮破壊が再現でき、破壊が生じる場合には3D程度以上の土被りに相当する荷重が生じている可能性があることがわかった。また、地盤反力を確保するために裏込め注入を行う場合には十分な剛性を有する材料を用いる必要があることがわかった。

キーワード：山岳トンネル、地震被害、耐震対策、模型実験、数値解析

### 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<sup>例えば1)</sup>。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<sup>2) 3)</sup>。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。

本年度は、地震時の山岳トンネルの被害として、覆工構造全体の耐荷力になんらかの影響を及ぼすと考

えられる覆工の天端部や側壁部の圧縮破壊に着目し、このような被害を再現する解析手法の検討を行うとともに、これらの破壊が発生する場合の外力を静的荷重に換算した場合の荷重の大きさについて検討を行った<sup>4)</sup>。また、覆工背面に空洞が存在する場合に対策として行う裏込め注入の剛性が覆工構造全体の耐力に及ぼす影響について数値解析により検討した<sup>5)</sup>。

### 2. 研究の方法

#### 2.1 実トンネルへの地山の変形を想定した数値解析

##### 2.1.1 数値解析の概要

本研究では地山の変形モードを再現した数値解析<sup>6)</sup>を基に非線形性を考慮した覆工モデル<sup>7)</sup>を用いて、静的な数値解析を行うことで、外力による覆工の破壊を再現し、その際の荷重を想定するものとした。

##### 2.1.2 対象とする地震被害モード

これまでの地震による山岳トンネルの被害は、特殊

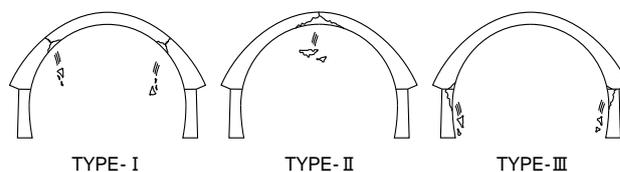


図-1 トンネルの地震被害モード

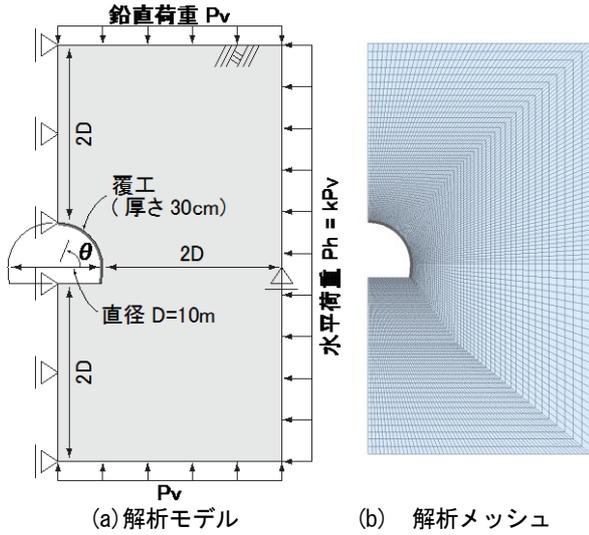


図-2 解析モデルの概要

な条件を除けば、大まかに図-1の3種類に大別されるところと考えられる<sup>2)</sup> <sup>3)</sup>。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TYPE-I、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されている<sup>4)</sup>。

本研究では、覆工構造全体の耐荷力に少なからず影響を及ぼすと考えられる覆工の天端部や側壁部の圧縮破壊に着目し、TYPE-IIおよびTYPE-IIIを対象に、検討を行った。

2.1.3 数値解析モデルと条件

本研究における数値解析は、非線形解析の解の収束において比較的良好な有限差分法によるものとし、解析ソフトはFLAC3Dを使用した。

図-2に解析モデルの概要を示す。トンネルの直径(覆工の外径)は $D=10\text{ m}$ とし、上半半径は $R=5\text{ m}$ 、下半半径は $2R=10\text{ m}$ の三心円とした。覆工の厚さは $30\text{ cm}$ とした。インバートを有する場合のインバートの半径は $2R$ とし、厚さは $50\text{ cm}$ とした。

解析領域は、トンネル上部、下部、側部も $2D$ とし、対称性を考慮して半断面モデルとした。また、奥行き方向の変位を拘束し、平面ひずみ状態とした。

荷重は、鉛直荷重 $P_v$ と水平荷重 $P_h$ として解析領域端部に作用させた。また、側圧係数 $k$ は、地山の水平圧縮変形が卓越する場合は $k=2$ 、鉛直圧縮変形が卓越する場合は $k=0.5$ の2通りとした。

表-1に地山および覆工の弾性係数を示す。地山はソリッド要素で弾性体と仮定し、比較的良好な地山とし

表-1 地山および覆工の材料物性値

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

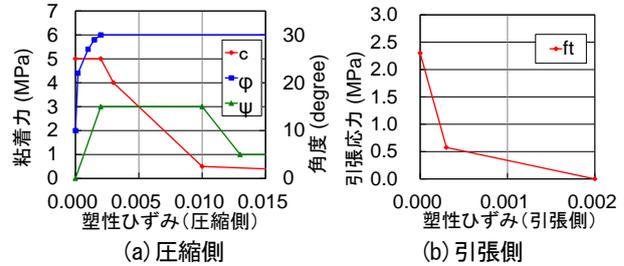


図-3 解析で用いた覆工材料のひずみ軟化硬化特性

てCII等級、軟質な地山としてDII等級、さらに軟質な地山としてE等級の3種類を設定した。覆工はソリッド要素で、次項に示すモデルとした。

2.1.4 覆工材料のモデル化

覆工材料はMohr-Coulombの破壊規準にしたがうものとし、破壊後はひずみ軟化/硬化モデルを適用した。弾性係数は、一軸圧縮強度 $18\text{ MPa}$ のプレーンコンクリートに相当するものを適用した。

粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\phi$ 、ダイレーション角 $\psi$ は、図-3(a)に示すとおり、塑性圧縮ひずみの関数と仮定した。引張強度 $f_t$ については、コンクリート標準示方書の引張軟化曲線を参考に、図-3(b)に示すように塑性引張ひずみの関数と仮定した。

このような考え方に基づいた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<sup>8)</sup>、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<sup>9)</sup>が示されている。

2.2 背面空洞への裏込め注入に関する数値解析

2.2.1 数値解析の概要

本研究では背面空洞が存在する覆工に外力が作用した場合に対策工として実施した、裏込め注入の剛性が覆工に発生する応力におよぼす影響を検討するため、裏込め注入の剛性をパラメータとした二次元弾性解析を実施した。

2.2.2 数値解析モデルと条件

本研究における数値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-4 に数値解析モデルの概要を示す。覆工は SL 幅  $D = 11.2 \text{ m}$  の馬蹄形で、天端部  $60^\circ$  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。

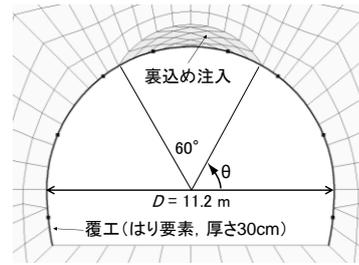


図-4 数値解析モデル

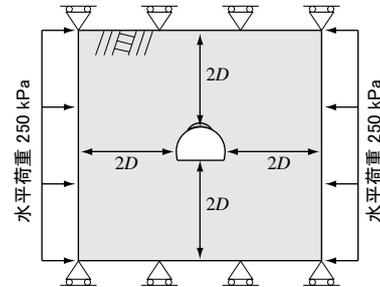


図-5 解析モデルの境界条件

図-5 に解析モデルの境界条件を示す。解析領域は、トンネル上部、下部、側部それぞれ  $2D$  とした。荷重は水平方向の荷重が卓越する場合を想定し、土被り  $1D$  分に相当する  $0.25 \text{ MPa}$  を水平方向から作用させた。

表-2 に地山および覆工、裏込め注入に適用した物性値を示す。地山および裏込め注入工は平面ひずみ要素、覆工ははり要素で弾性体としてモデル化した。地山は硬質な地山として B 等級、軟質な地山として DII 等級の 2 種類を想定した物性値を設定した。覆工材料は厚さ  $30 \text{ cm}$  のプレーンコンクリート相当を仮定した。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と想定した場合についても解析を行った。

表-2 地山および覆工、裏込め注入の材料物性値

対象	要素	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比
地山	B	5,000	0.30
	DII	150	0.35
覆工	はり	22,000	0.20
裏込め注入	平面ひずみ	0~1,000	0.20

3. 研究の結果

3.1 実トンネルへの地山の变形を想定した数値解析

3.1.1 水平荷重が卓越する場合

図-6 に地山に作用する水平荷重  $P_h$  と覆工の変位の関係を示す。変位については、天端は  $\theta = 90^\circ$ 、側壁は  $\theta = 0^\circ$  の覆工内面の節点における変位であり、いずれも内空側への変位を正としている。

図-6 (a) より、載荷初期段階の天端の変位はほぼ 0 であるが、インバート無しの場合は荷重  $1.7 \text{ MPa}$ 、インバート有りの場合は荷重  $1.9 \text{ MPa}$  を超えたところで天端に大きな変位が発生するとともに、側壁の変位も増加している。図-7 に、図-6 に示した変位の増加が発生する直前の覆工表面における周方向のひずみ分布を示す。CII をみると、いずれも天端付近において  $3,000 \mu$  に近い圧縮ひずみが発生している。この次の解析ステップでは、天端の圧縮ひずみが急激に増大しており、変位の急変は天端の圧縮破壊により生じたことが分かる。また、図-8 に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を示す。図より、顕著な破壊は天端周辺で発生していることが分かる。

図-6 (b) より、DII の変位の発生傾向は CII の場合とほぼ同様で、荷重  $1 \text{ MPa}$  付近で変位の増加が発生している。また、このとき図-7 の DII の覆工のひずみ分

布より、インバート無しの場合は側壁部 ( $\theta = 0^\circ$  付近) の覆工内側に引張破壊が、インバート有りの場合はそれに加えてインバートと側壁の接続部 ( $\theta = -18^\circ$ ) 付近で  $3,000 \mu$  を超える圧縮ひずみが発生しているものの、天端部においても  $3,000 \mu$  に近い圧縮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、天端の圧縮ひずみが急激に増大しており、変位の増加は天端の圧縮破壊により生じたことが分かる。図-8 (b) より、破壊は主として天端周辺で発生している。なお、インバートとの接続部付近でも大きなせん断ひずみが発生しているが、これは解析においてすりつけ部を設けなかったことによる影響も含まれると考えられる。

図-6 (c) より、E の変位の発生傾向もほぼ同様で、荷重  $0.8 \text{ MPa}$  付近で変位の増大が発生している。また、図-7 の E の覆工のひずみ分布をみると、DII の場合と同様に、インバート無しの場合は側壁部の覆工内側に引張破壊が、インバート有りの場合はそれに加えて接続部付近で  $3,000 \mu$  を超える圧縮ひずみが発生しているものの、天端部において  $3,000 \mu$  程度の圧縮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、CII と同様に、天端の圧縮ひずみが急激に増大しており、変位の増大は天端の圧縮破壊により生じたことが分かる。図-8 (c) より、破壊は主として天端周辺で発生

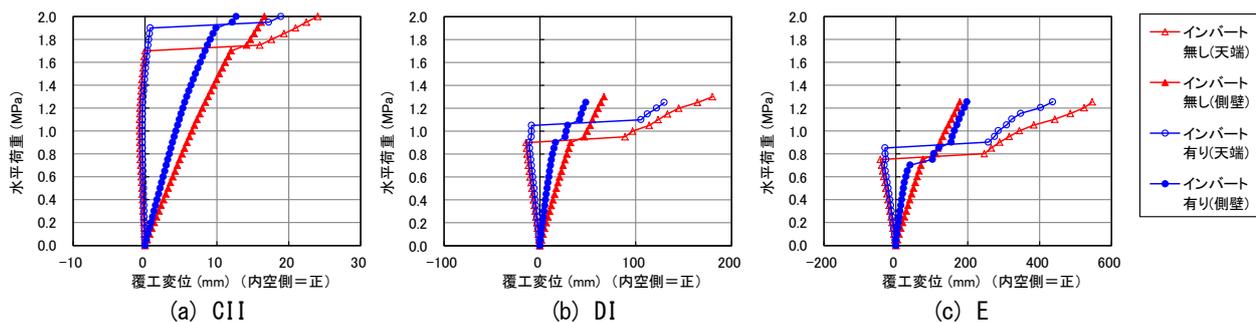


図-6 水平荷重  $P_h$  と覆工の変位の関係

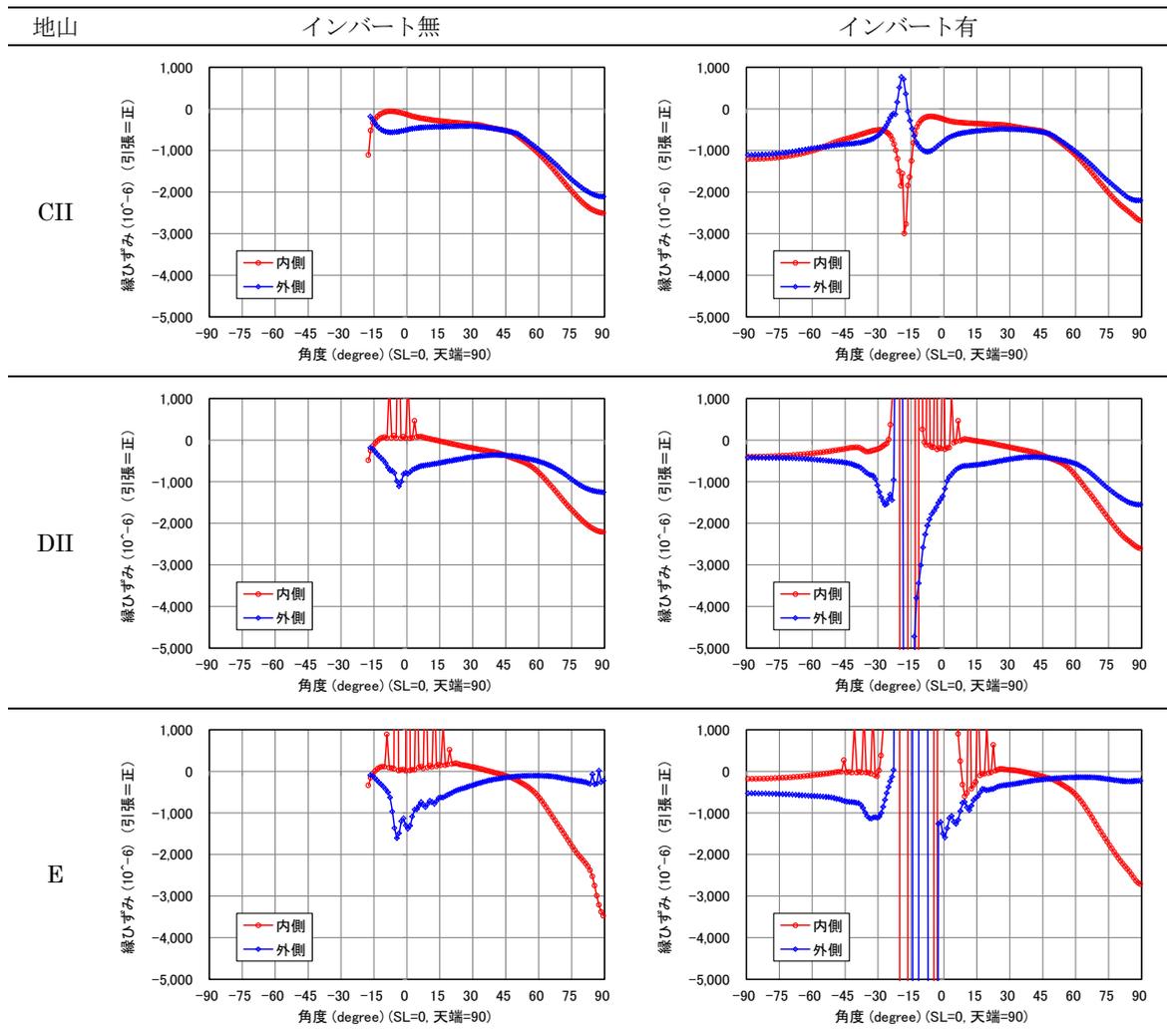


図-7 覆工表面における周方向のひずみ分布 (水平荷重  $P_h$  が卓越する場合)

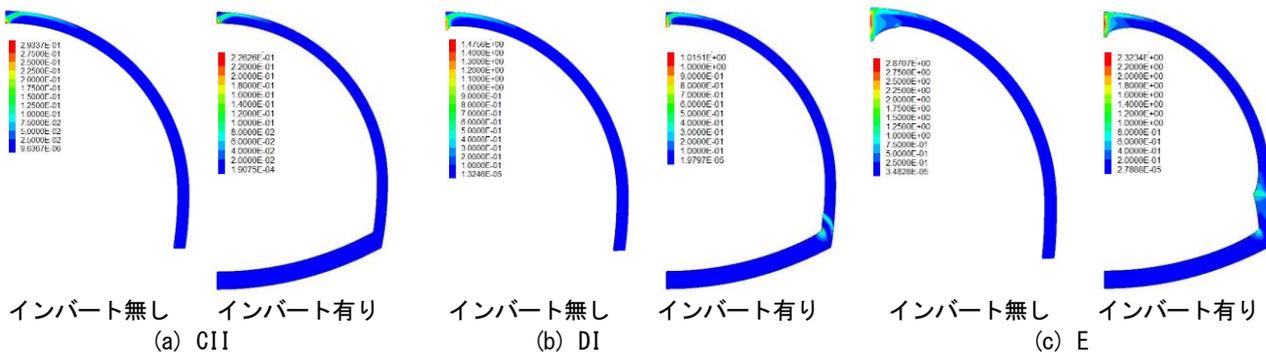


図-8 解析の最終ステップにおける覆工の最大せん断ひずみ分布 (水平荷重  $P_h$  が卓越する場合)

している。なお、インバート有りの場合は、荷重 0.7 MPa 付近で側壁部の覆工外側で  $3,000 \mu$  を超える圧縮ひずみが発生するとともに、覆工の変位の増大が見られたが、天端部の圧縮破壊にともなう変位の増大と比較すると軽微なものであった。

### 3.1.2 鉛直荷重が卓越する場合

図-9 は、 $k = 0.5$  の場合の、地山に作用する鉛直荷重  $P_v$  と覆工の変位の関係を示したものである。CII 地山においては、載荷初期段階での側壁の変位はほぼ 0 であるが、荷重 1.6~1.9 MPa 付近で側壁の変位モードが地山側から内空側に変化するするとともに、天端の変位も増加している。図-10 に変位の急変が発生する直前における、覆工表面の周方向のひずみ分布を示す。CII を見ると、いずれも側壁付近において  $3,000 \mu$  に近い圧縮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、側壁の圧縮ひずみが急激に増大しており、変位の急変は側壁の圧縮破壊により生じたことが分かる。また、図-11 に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を示す。顕著な破壊は側壁から脚部にかけて発生していることが分かる。

図-9 (b) より、DII においては、インバートが無い場合は荷重 1 MPa 付近で、インバートがある場合は荷重 0.7 MPa 付近で変位の急変が発生している。図-10 の DII をみると、側壁部から脚部にかけて  $3,000 \mu$  を超える圧縮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、CII 地山と同様に、側壁部の圧縮ひずみが急激に増大しており、変位の急変は側壁部の圧縮破壊により生じたことが分かる。図-11 (b) に示す、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においても、破壊は主として側壁部から脚部周辺で発生していることが分かる。

図-9 (c) より、E の変位の傾向もほぼ同様に、荷重 0.7~0.9 MPa 付近で変位の急変が発生している。図-10 の E をみると、覆工のひずみ分布は、側壁部から脚部において  $2,000 \mu$  程度かそれ以上の圧縮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、DII 地山と同様に、側壁部の圧縮ひずみが急激に増大しており、変位の急変は側壁部の圧縮破壊により生じたことが分かる。図-11 (c) より、破壊は主として側壁部周辺で発生していることが分かる。なお、E では、側壁部の圧縮破壊が生じる前に、天端部内側に引張破壊が発生しているが、天端部外側は圧縮状態であり、軽微な引張ひび割れに相当するものと考えられる。

### 3.1.3 覆工破壊時の作用荷重

図-12 に、覆工の破壊時の荷重、すなわち天端部に

圧縮破壊が発生するときの水平荷重あるいは側壁部に圧縮破壊が発生するときの鉛直荷重の値を示す。

水平荷重が卓越する場合のインバート有りの場合は、インバート無しの場合と比較して、覆工破壊時の荷重が 1 割程度増加している。ただし、覆工とインバートの接続部の破壊に着目すると、この値は若干小さいものとなる。一方、鉛直荷重が卓越する場合のインバート有りの場合の方が覆工破壊時の荷重は小さくなっている。これらのケースにおいては、覆工とインバートの接続部に近い部分にも破壊が発生していることから、接続部の構造の影響を受けていることも考えられるため、覆工構造の耐力として評価するにはさらなる検討が必要であると考えられる。

いずれの荷重モードにおいても、CII においては比較的大きな荷重まで天端や側壁部の圧縮破壊は発生していないが、DII や E においては、約 0.7~1 MPa の荷重でそれらの破壊が発生している。換言すれば、覆工の天端や側壁部において圧縮破壊が発生した場合は、0.7 MPa 相当以上の荷重、すなわち、地山の単位体積重量  $23 \text{ kN/m}^3$  で、トンネル直径  $D = 10 \text{ m}$  とした場合に、 $3D$  程度以上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。

### 3.1.4 地山の変形を想定した数値解析のまとめ

以上の結果から、本研究で用いた解析モデルにより、覆工構造全体の耐荷力に影響を及ぼすと考えられる覆工の天端部や側壁部の圧縮破壊が生じる場合の現象をおおむね再現できると考えられる。また、覆工を線形弾性モデルとした同様の解析では、覆工とインバートの接続部で応力が集中する場合や、側壁部に引張強度を超える応力が発生する場合があり、天端部や側壁部の圧縮破壊が再現できたと結論づけるににくい場合があった。しかし、本研究で示した非線形材料を用いた数値解析を行うことにより、比較的容易にこのような現象を取り扱うことができると考えられる。

これらの解析結果において、急激な変位の増加は覆工の一部分の断面破壊によるものであり、必ずしもトンネル構造全体の安定性の喪失に直結することを示すものではないと考えられるが、覆工コンクリートのはく落等により利用者被害につながる可能性があるため、詳細な検討が必要である。

なお、既往の研究<sup>10)</sup>においては、これらの荷重を、覆工の設計で一般的に用いられる骨組構造解析において、覆工に作用する鉛直または水平荷重を適用する場合で、真円形の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

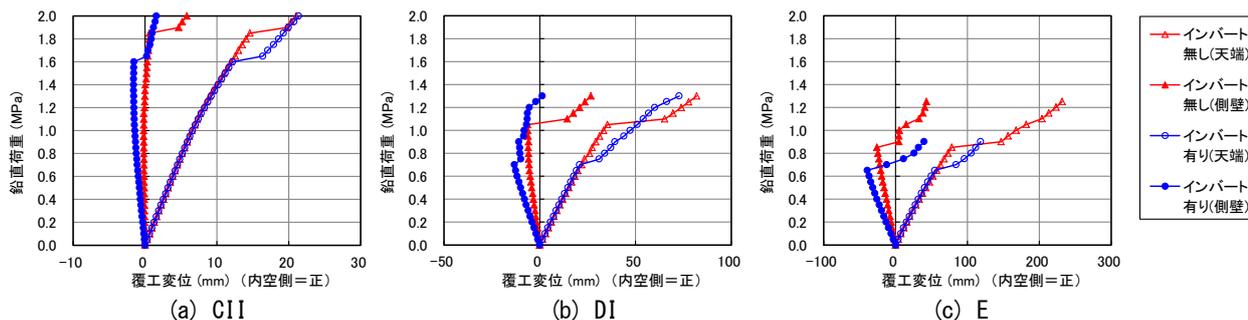


図-9 鉛直荷重  $P_v$  と覆工の変位の関係

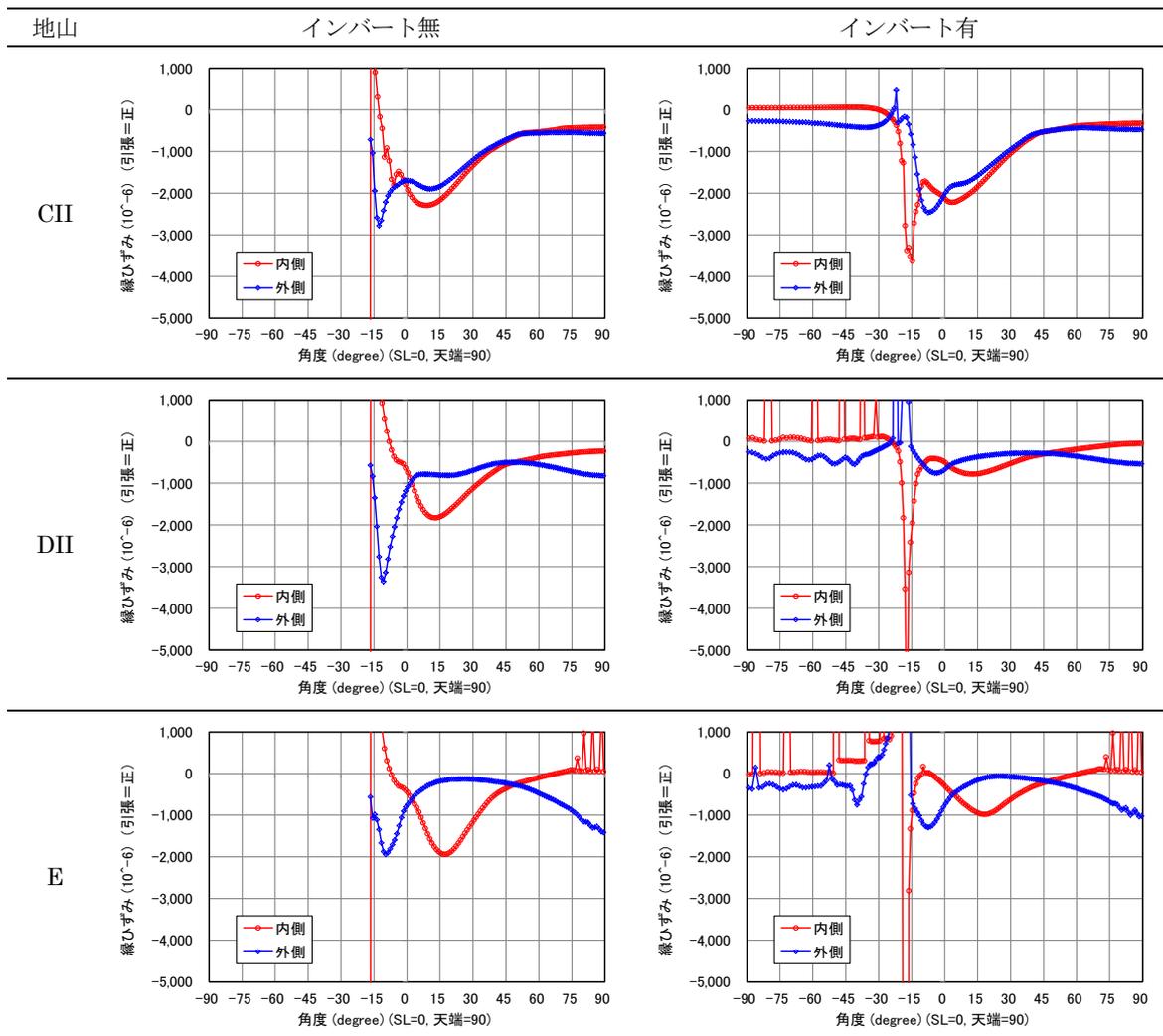


図-10 覆工表面における周方向のひずみ分布 (鉛直荷重  $P_v$  が卓越する場合)

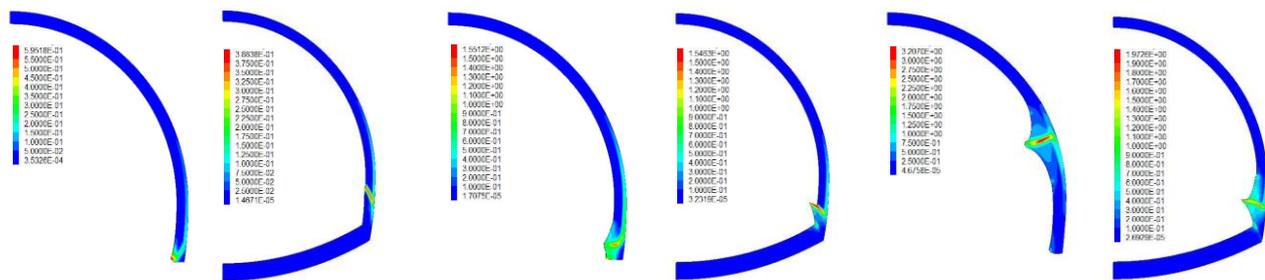
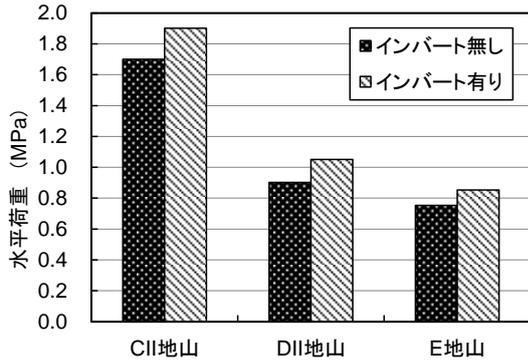
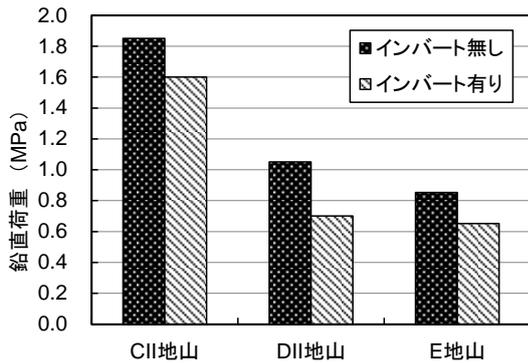


図-11 解析の最終ステップにおける覆工の最大せん断ひずみ分布 (鉛直荷重  $P_v$  が卓越する場合)



(a) 水平荷重が卓越する場合 (k=2)



(b) 鉛直荷重が卓越する場合 (k=0.5)

図-12 覆工破壊時の荷重

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明らかになっている。

### 3.2 背面空洞への裏込め注入に関する数値解析

#### 3.2.1 軟質な地山の場合

図-13に、DII相当の軟質な地山における覆工の内側および外側の縁応力の分布を示す。図中の黒塗りは背面空洞が存在している場合であり、白塗りは地山と同程度の剛性を有すると仮定した  $E_g = 150 \text{ MPa}$  の裏込め注入を施工し剛性を確保した場合の結果である。

裏込め注入なしの場合は、天端付近において曲げモーメントが卓越し、引張・圧縮ともに大きな応力が発生している。一方、裏込め注入を実施した場合は、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ている。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おいて、裏込め注入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。

図-14に、裏込め注入の変形係数  $E_g$  を変化させた場合の、覆工天端の縁応力の変化を示す。

裏込め注入を行わない場合は、引張・圧縮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において、 $E_g = 1 \text{ MPa}$  程度の軟質な材料では縁応力の低

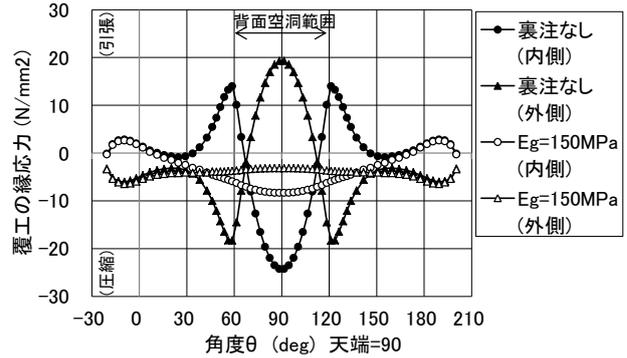


図-13 覆工縁応力における裏込め注入の有無の影響 (軟質地山)

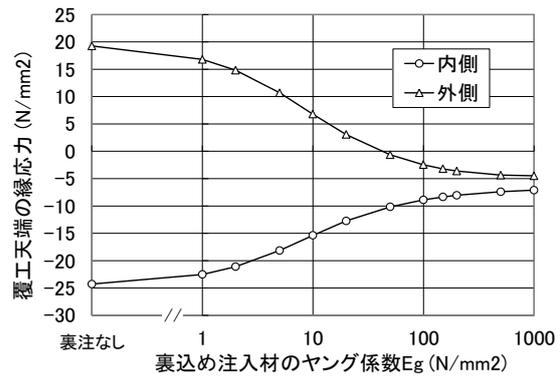


図-14 覆工天端の縁応力におよぼす裏込め注入材のヤング係数の影響 (軟質地山)

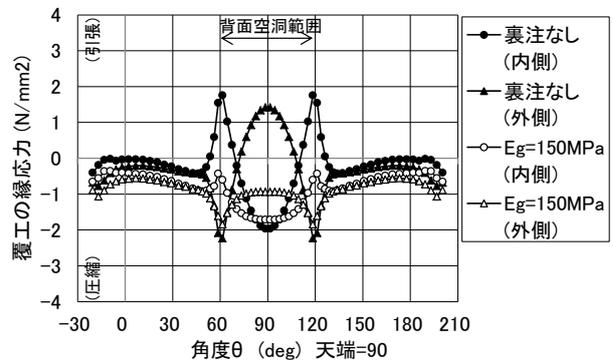


図-15 覆工縁応力における裏込め注入の有無の影響 (硬質地山)

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、 $E_g$  の大きな材料を用いることで、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では、 $E_g$  が  $100 \text{ MPa}$  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いことが分かった。

#### 3.2.2 硬質な地山の場合

図-15に、B相当の硬質な地山における覆工の縁応

力の分布を示す。図中の黒塗りと白抜きは図-13 と同様の条件である。

裏込め注入なしの場合は曲げモーメントの影響により引張の縁応力が発生しているが、裏込め注入を施工することにより覆工が全圧縮状態となっている。すなわち、硬質な地山においては、地山よりも大幅に剛性の小さい裏込め注入材を用いても、覆工における引張縁応力の発生を解消できる場合がある。

ただし、本検討における荷重条件においては、背面空洞が存在したとしても、覆工に発生する応力の値はそもそも小さく、背面空洞が構造全体の耐力に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。また、硬質な地山においては、亀裂による背面地山の岩塊の崩落を防止する目的で裏込め注入を施工することが多いため、それぞれの目的に応じた裏込め注入材を選定する必要があると考えられる。

### 3.2.3 裏込め注入に関する数値解析のまとめ

以上の結果から、覆工背面に空洞が存在し、覆工に地震等の外力が作用する場合に、裏込め注入により地盤反力を確保し、覆工に発生する応力の低減を期待する場合には、十分な剛性を有する材料を用いる必要があると考えられる。ただし、極端に剛性の大きな材料を用いても大幅な応力の低減は認められず、力学的な挙動に対する効果の向上は期待できない可能性があることが分かった。

なお、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あり、荷重の載荷モードや覆工巻厚、背面空洞の規模、地山の剛性等によって変化すると考えられるため、実務において設計を行う場合には、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である。

## 4. おわりに

本研究では、山岳トンネルの耐震対策の選定に関する検討として、覆工構造全体の耐力に影響をおよぼすと考えられる天端部や側壁部に覆工の圧縮破壊が生じる場合の現象を再現する解析手法ならびに、破壊が生じた時点の外力の大きさに関して数値解析により検討した。また、対策工の一つである背面空洞への裏込め注入の剛性が覆工の挙動におよぼす影響を数値解析により検討した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 本研究で用いた解析モデルにより、天端部や側壁部の覆工の圧縮破壊が概ね再現できると考えられる。
- 2) 覆工の天端部や側壁部に圧縮破壊が発生した場合

は、静的荷重に換算すると 3D（トンネル直径  $D = 10 \text{ m}$  と仮定）程度以上の土被りに相当する荷重が作用した可能性がある。

- 3) 地盤反力の確保を目的として裏込め注入を適用する場合は、十分な剛性を有する材料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た場合でも力学的な挙動に対する効果の向上は期待できない可能性がある。

## 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) 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、トンネル工学報告集、No.24、I-14、pp1-8、2014.
- 5) 日下敦、砂金伸治、真下英人、外力が作用する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の影響に関する一考察、第 49 回地盤工学研究発表会、pp.1303-1304、2014.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Kusaka, A., Kawata, K., Isago, N., Mashimo, H.: Static Loading Tests and Numerical Analysis of the Effects of Risk Mitigation Measures for Rock Tunnels against Earthquakes, *8th Asian Rock Mechanics Symposium*, 2014.
- 10) 真下英人、左近嘉正、石村利明、岡田範彦：良質地盤におけるセグメント設計に用いる地盤反力係数に関する一考察、トンネル工学報告集、No.16、pp.295-302、2006.

## 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 year, the compressive failure at crown or sidewall of tunnel lining caused by earthquake was mentioned. The analysis model to simulate such failures was examined applying a non-linear material model for the lining. Using the model, a series of static analysis was conducted to calculate the magnitude of equivalent static load to cause the failure, which can be used for frame structural analysis. In addition, influence of stiffness of backfill grout was examined as a countermeasure against void behind tunnel lining. As a result of these, the numerical model used in this study can be applied to simulate compressive failure of the actual tunnel lining. More than the overburden pressure of 3D (tunnel diameter  $D = 10$  m) is required to simulate the compressive failure at crown or sidewall of the lining caused by earthquake. In addition, sufficient stiffness of the grout material is required to ensure the effect of obtaining ground reaction force as a countermeasure against void behind tunnel lining.

**Keywords:** Mountain tunnel, Countermeasures against earthquake, model experiment, Numerical analysis