山岳トンネル覆工の破壊時荷重における 覆工形状の影響に関する数値解析的検討

岸田 展明¹·日下 敦²·砂金 伸治³

- ¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:n-kishida44@pwri.go.jp
- ²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:kusaka@pwri.go.jp
- ³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:n-isago@pwri.go.jp

山岳トンネルは,特殊な条件下を除き一般に地震に強い構造物とされてきたが,近年の地震ではトンネル ル坑口部以外の一般部においても覆工の崩落を伴うような被害を受けたトンネルが存在する.これらの被 害は,地山の変形による荷重をトンネル覆工に作用させることで再現できる可能性が確認されており,数 値解析等で地震に伴う地山の変形による覆工の破壊時荷重の想定がされている.

山岳トンネルの施工方法には,大別すると矢板工法とNATMの2種類に分けられるが,トンネル覆工の 形状は異なる.地震による被害はどちらの方法で施工されたトンネルにおいても確認されている. 本研究では,山岳トンネルの覆工形状の違いに着目し,地震時の地山変形によるトンネル覆工の破壊時 荷重への影響について検討を行った.

Key Words: rock tunnel, tunnel lining shapes, numerical analysis, strain-softening, seismic damage

1. はじめに

山岳トンネルは,特殊な条件下を除き,一般に地震に 強い構造物とされてきた.しかしながら,近年の地震で, トンネル坑口部以外の一般部においても覆工の崩落を伴 うような被害を受けたトンネルが存在する¹⁾²⁾.これらの 被害は,大まかに図-1に示す3種類に大別されると考え られており,図-2に示すように,それぞれ地山のせん断 変形,水平圧縮変形,鉛直圧縮変形を覆工に作用させる ことで再現できる可能性が確認されているとともに,数 値解析等により地震に伴う地山変形による覆工の破壊時 荷重の想定がされている³⁾⁴⁾⁵⁾.

山岳トンネルの施工方法には,大別すると矢板工法と NATMの2種類に分けられる.矢板工法は,覆工アーチ 部と側壁部との間に打ち継ぎ目が存在する場合がある, 覆工天端部に巻厚不足が発生しやすい等の特徴を有し, NATMとはトンネル覆工の形状が異なる.上記のような 地震による被害は,どちらの方法で施工されたトンネル においても確認されているが,既往の研究においては, これらのトンネル覆工形状の違いについては実大規模で はあまり検討されてこなかった. 本研究は,山岳トンネルの覆工形状の違いに着目し, 実大規模の2車線道路トンネルをモデル化した数値解析 で,地震に伴う地山変形によるトンネル覆工の破壊時荷 重への影響について検討を行った.



図-2 地山の変形とトンネルの被害形態



2. 数値解析の概要

数値解析は,非線形解析における解の収束において比較的有利な有限差分法によるものとし,本研究では FLAC3Dを使用した.

(1) トンネル覆工形状

本研究で検討を行うトンネル覆工形状を図-3に示す. この図のように,本研究では3つの覆工形状ケースにつ いて検討を行った.覆工形状 については,矢板工法 (逆巻工法)で施工されたトンネルの覆工を模擬した形 状とし,トンネルの直径(覆工の外径)Dは10mで,上 半は半径R=5.0mの単心円,下半半径は2Rとし,覆工厚 は=60cmとした.逆巻きで打設された覆工を想定するた め,覆工のアーチ部と側壁部の間の水平打ち継ぎ目及び 側壁部を掘削する際のアーチ部の支持を得るために設け られる覆工の増厚部を考慮した形状とした.また,解析 モデルはすべてソリッド要素とした.覆工におけるメッ シュサイズは5cm程度を基本とし,厚さ方向は6分割, 周方向は1°ピッチ,奥行き方向は1分割とした.覆工ア ーチ部と側壁部の間の水平打ち継ぎ目は,図4に示すよ うに,インターフェース要素⁰を用いてモデル化し,法 線方向の圧縮力のみに抵抗し引張力には抵抗しない構造 とした、インターフェース要素の法線方向剛性kn及びせ ん断方向剛性ksは式(1)により算出した⁶(表-1).

$$k_n = k_s = \frac{\left(K + \frac{4}{3}G\right)}{\Delta Z_{\min}} \tag{1}$$

ここで,K:体積弾性係数

G: せん断弾性係数

ΔZ_{min}: インターフェース要素に隣接する要素の
 法線方向の最小幅

覆工形状 については,覆工形状 と同様に矢板工法 (逆巻工法)によるトンネルを模擬し,なおかつ施工時 に生じた覆工天端部の巻厚不足等により覆工厚が薄く, 背面空洞が生じている場合を想定した形状とした.天端



図-4 インターフェース要素の概要

表-1 インターフェース要素の解析物性値

法線方向剛性	せん断方向剛性
kn (MPa/m)	ks (MPa/m)
2.8×10^5	2.8×10^5

表-2 覆工形状ケースと概要

-	
ケース名	概要
覆工形状	矢板工法(逆巻)を模擬
覆工形状 -1	矢板工法 (逆巻) を模擬し , 天端部の覆工巻厚 t2=40cm , 背面空洞範囲 α=27°
覆工形状 -2	矢板工法 (逆巻) を模擬し , 天端部の覆工巻厚 t2=30cm 背面空洞範囲 α=38°
覆工形状 -3	矢板工法 (逆巻) を模擬し , 天端部の覆工巻厚 t2=20cm , 背面空洞範囲 α=46°
覆工形状	NATM を模擬

表-3 覆工の入力物性値

	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比
覆工	22 000	0.20

表-4 地山の入力物性値

	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比
С	1 000	0.30
D	150	0.35
Е	50	0.40

部の覆工巻厚は, ⊨40cm, 30cm, 20cmの3ケースについ て検討を行った.また,本研究では劣化等による有効巻 厚の不足については対象外とした.覆工形状 について は,NATMで施工されたトンネルの覆工を模擬した形状 とした.上半及び下半半径は覆工形状 と同様とし,覆 工厚を⊨30cmとした.本研究における覆工形状の検討ケ ースを整理すると,表-2のようになる.覆工モデルには ひずみ軟化特性を考慮できる非線形モデル³³を適用した.3.数値解析結果 また,入力物性値を表-3に示す.ヤング係数は,一軸圧 縮強度18MPaのプレーンコンクリート相当とした.なお, 覆工の物性値は,覆工形状の違いに着目するため,矢板 工法, NATMの違いによらず, すべて同一とした.

(2) 地山条件

地山モデルは弾性体と仮定し,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ケースとした.地山モデルの物性値を表-4に示す.

(3) 荷重および境界条件

本研究では地震に伴う地山変形により覆工が受ける荷 重を対象とし,既往の研究を踏まえて,検討を行う地山 変形は,図-2に示すせん断変形,水平圧縮変形,鉛直変 形の3タイプとした.本研究では,覆工背面に空洞があ る場合には,背面の地山が岩塊となって落下するといっ た突発性崩壊"については,本研究では考慮しないこと とした.解析モデルの概要を図-5に示す.解析領域はト ンネル上部,下部,側部とも2Dとした.せん断変形の 場合は,下端を拘束,左右端は水平ローラーとし,上端 にせん断荷重Psを作用させることで,地山のせん断変形 をモデル化した、鉛直および水平圧縮変形の場合には鉛 直荷重Pvと水平荷重Ph (=kPv.kは側圧係数で,鉛直圧 縮変形の場合は0.5,水平圧縮変形の場合は2.0)を作用 させることで,地山の鉛直および水平圧縮変形をモデル 化した.なお,いずれも奥行き方向の変位を拘束し,平 面ひずみ状態とした.

2,000

-2.000

-4.000

-6,000

-8.000

2,000

-2,000

-4,000

-6,000

-8.000

-30

解析結果の一例として,地山モデルを軟質な地山を想 定したD のケースについて解析結果を示すとともに, 覆工の破壊時荷重について整理した結果を次に示す.







90

90



(1) 地山がせん断変形する場合

地山への載荷荷重と覆工の変位との関係を図-6に示す. 覆工形状 では0.8MPa付近, -1, -2, -3では 0.9MPa付近, では0.6MPa付近で覆工天端部及び側壁部 またはそのどちらかにおいて,変位の傾向が変化するこ とがわかる.

変位傾向に急激な変化が生じる直前の覆工表面の周方 向ひずみ分布を図-7 に示す.なお,これ以上の載荷を 行うと,ひずみの急激な増大が生じることからこの時点 の荷重を覆工の破壊時荷重とした.この図から,覆工形 状I, -1, では覆工の肩部(45°付近),覆工形状 -2, -3 では覆工の天端部(90°付近)において局所 的な圧縮ひずみの増大が確認できる.なお,いずれのケ ースもこの直後の載荷ステップにおいて,圧縮ひずみの 増大が確認されたのと同様の箇所で-5000µを超える圧 縮ひずみが確認された.また,変位傾向の変化時におけ る覆工の最大せん断ひずみ分布を図-8 に示す.この図 から,図-7 で圧縮ひずみが確認されたのと同様の箇所 で卓越したひずみが確認できる.

以上のことから,地山モデル C, E についても同様 に整理すると,図-9 のようになる.この図から,覆工 形状, -1, -2, -3 については,同程度の荷重 まで耐えられることが確認でき,覆工厚の影響はほとん どないと考えられる.このことは,過年度の研究[®]にお いて実施された線形弾性 FEM においても同様の結果が 確認されている.

また,図-9には換算土被りを併記した.これは,地山 モデルEで覆工形状のケースについて考えると,仮に 地山の単位体積重量を23kN/m³した場合,本研究ではト ンネル径Dは10mであるから,トンネル上方に1Gの加速



度で約2.2D以上の土被りに相当する荷重が地山の水平方向に作用することで覆工の破壊が生じると換言できる.

(2) 地山が水平圧縮変形する場合

地山への載荷荷重と覆工の変位との関係を図-10に示

す.覆工形状 では1.4MPa付近, -1では0.8MPa付近, -2では0.6MPa付近, -3では0.5MPa付近, では 1.0MPa付近で,覆工天端部及び側壁部において,変位の 傾向が変化することがわかる.変位傾向に変化が生じる



直前の覆工表面の周方向ひずみ分布を図-11に示す.こ の図から,いずれの覆工形状においても覆工の天端部 (90°付近)において圧縮ひずみの増大が確認できる. なお,いずれもこの直後の載荷ステップにおいて,圧縮 ひずみの増大が確認されたのと同様の箇所で-5000μを 超える圧縮ひずみが確認された.また,変位傾向の変化 時における覆工の最大せん断ひずみ分布を図-12に示す. この図から,図-11で圧縮ひずみが確認されたのと同様 の箇所で卓越したひずみが確認できる.

以上のことから,覆工の破壊時荷重を整理すると図-13のようになる.この図から,天端部の覆工厚を変え た覆工形状 -1,2,3については,覆工形状 と比較す ると覆工の破壊時荷重は1/2程度以下となり,覆工形状 よりも小さくなることが確認できる.また,図-13に



せん断変形時と同様に,換算土被りを併記した.これは, 地山モデルEで覆工形状のケースについて考えると, 仮に地山の単位体積重量を23kN/m³とした場合,本研究 ではトンネル径Dは10mであるから,約4.3D以上の土被 りに相当する荷重が作用することで覆工の破壊が生じる と換言できる.

(3) 地山が鉛直圧縮変形する場合

2,000

-2.000

-4,000

-6,000

-8,000

2,000

-2.000

-4,000

-6,000

-8.000

-30

30

(d)覆工形状 -3

0

-30

30

0

Ĥ

ひずみ (×10⁻⁶) (引張:

Ĥ

ひずみ (×10⁻⁶) (引張:

地山への載荷荷重と覆工の変位との関係を図-14に示 す.覆工形状, -1, -2では1.4MPa付近, -3, では1.1MPa付近で,覆工天端部及び側壁部において,変 位の傾向が変化することがわかる.変位傾向に変化が生 じる直前の覆工表面の周方向ひずみ分布を図-15に示す. この図から,覆工形状I, -1, では覆工脚部, -2, -3では覆工の天端部(90°付近)において局所的な圧



(e)覆工形状 図-16 最大せん断ひずみ分布 縮ひずみの増大が確認できる.この直後の載荷ステップ において,覆工形状 -3, では圧縮ひずみの増大が確 認されたのと同様の箇所で-5000µを超える圧縮ひずみ が確認されたが,覆工形状 , -1, -2については覆 エアーチ部と側壁部との境界部で卓越した圧縮ひずみが 確認された.また,変位傾向の変化時における覆工の最 大せん断ひずみ分布を図-16に示す.この図から,図-15 で卓越した圧縮ひずみが確認されたのと同様の箇所で卓 越したひずみが確認できる.また,水平打ち継ぎ目を考 慮しないケース(インターフェース要素を設置しない) についても別途検討を行い,水平打ち継ぎ目部の付近の 覆工の破壊を再現できないことを確認した.これにより, 覆工形状に水平打ち継ぎ目部を考慮することで,アーチ 部と側壁部の境界付近での覆工の破壊¹¹を再現できるこ とが確認された.

以上のことから,覆工の破壊時荷重を整理すると図-17のようになる.この図から,天端部の覆工厚が30cm 以上では,覆工形状 と同程度の覆工の破壊時荷重とな るが,30cm未満では,若干破壊時荷重が小さくなるこ とがわかる.また,図-17にこれまでと同様に,換算土 被りを併記した.これは,地山モデルEで覆工形状 の ケースについて考えると,仮に地山の単位体積重量を 23kN/m³とした場合,本研究ではトンネル径Dは10mであ るから,約4.8D以上の土被りに相当する荷重が作用する ことで覆工の破壊が生じると換言できる.

4. まとめ

本研究ではトンネル覆工の形状の違いに着目し,地震 時の地山変形によるトンネル覆工の破壊時荷重への影響 について,数値解析により検討を行った.その結果,得 られた知見を以下に示す.

- ・覆工アーチ部と側壁部境界の水平打ち継ぎ目を考慮 することにより、覆工アーチ部と側壁部の境界付近 の覆工の破壊を再現できる可能性が確認できた。
- ・地山の水平圧縮変形時において,天端部の覆工巻厚 不足が存在し,それに伴う背面空洞がある場合には, 覆工の破壊時荷重は大きく低下する可能性があるこ とが確認できた.なお,地山にせん断変形のみある いは鉛直圧縮変形のみが生じる場合には,天端部の 巻厚不足による覆工の破壊時荷重の低下はほとんど みられなかった.ここで,本研究では突発性崩壊の 発生については考慮していないことに留意する必要 がある.



矢板工法によるトンネル覆工を模擬した形状と NATMによるトンネル覆工を模擬した形状とを比較 すると,矢板工法による覆工形状の方が地山変形に よる破壊時荷重は大きくなることが確認できた.そ のため,矢板工法による覆工に欠陥がない場合には NATMによる覆工と同等以上の地山変形に対する耐 力が期待できると考えられる.ただし,矢板工法に おける覆工は,地山の荷重を受け持つ役割を担う構 造のため,地山の荷重による応力が覆工に生じてい ると考えられるが,本研究では覆工の形状に着目し ており,地山の荷重により覆工に発生する応力およ び覆工の劣化状況は考慮していない.そのため,覆 工の劣化状況も考慮する必要があり,実際には本研 究で検討した破壊時荷重よりも小さくなるものと考 えられる.

今後の課題としては, 矢板工法に関して覆工の破壊時 荷重を想定するに当たり, 地山の荷重により覆工に発生 する応力および劣化状況を考慮した検討がある.また, 実際には地震時に図-2 に示す地山変形がそれぞれ独立 して覆工に働くことは考えにくいため, これを複合的に 組み合わせることによる影響を考慮することも今後の課 題である.

参考文献

- 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.
- 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.
- 3) 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, vol.24, pp.1-8, 2014.
- 4) 日下敦,河田皓介,砂金信治:山岳トンネルにおける地震時の変形モードと作用荷重に関する一考察, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.301-306,2016.

- 5) 岸田展明,日下敦,砂金伸治:地山のせん断変形を 想定した山岳トンネルの覆工破壊時の荷重に関する 検討,土木学会第71回年次学術講演会,pp.799-800, 2016.
- Itasca Consulting Group, Inc : Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Theory and Background , p.2-11 , 2012 .
- 7) 日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧【本体工 編】, p.211, 2015.
- 8) 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.

(2016.8.5受付)

THE EFFECTS OF THE DIFFERENT TUNNEL LINING SHAPES ON THE LOAD AT THE LINING DESTRUCTION

Noriaki KISHIDA, Atsushi KUSAKA and Nobuharu ISAGO

Mountain tunnel generally has been said that strong structures to earthquakes. However, in recent years of the earthquake, there is a tunnel, which was also damaged by the general portion of the tunnel. Earthquake damage may be able to reproduce a load due to deformation of the ground is caused to act on the tunnel lining. Using numerical analysis, at fracture load of the lining due to the deformation of the ground during an earthquake is assumed.

Construction method of the mountain tunnel, there are two types of timbering support method and NATM. Tunnel lining shape is different. Damage caused by the earthquake has occurred in the tunnel that has been applied by either method.

In this study, we focused on the difference of lining the shape of the mountain tunnel, we examined the effects of the destruction during the load of the tunnel lining due to ground deformation at the time of the earthquake.