

地震被害リスクを考慮した 対策優先トンネルの選定

浦川 佳樹¹・林 久資²・尹 禮分³・進士 正人⁴

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: b007ve@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: yeboon@kansai-u.ac.jp

⁴フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

わが国で管理されている道路トンネルのうち、建設後50年を超えたトンネルの割合は、現在は2割程度であるが20年後には半分以上へと増大する。また、日本は地震も多く発生し、地震によりトンネルの健全度が急激に低下し、坑内に大規模な変状を生じた事例も報告されている。筆者らは、トンネルの健全性が急激に低下させる要因の一つに地震被害を想定し、トンネル地震被害報告が一定数みられた新潟中越地震におけるトンネル被害を分析し、新たに地震が発生した際の被害程度を予測するための予測式を算出した。本研究では、既往研究で構築された予測式の抱える問題点について再検討した。さらに、別の既往地震におけるトンネルの地震被害事例に対し予測式の検証を行った。そのうえで山口県の対策優先トンネルの再選定を行った。

Key Words : *Damage risk by earthquake, Large scale rehabilitation, Maintenance, Victimization Testing*

1. はじめに

わが国には約1万本の道路トンネルがすでに建設されている。このうち、建設後50年を経過したトンネルの割合は約2割であるが、20年後には約半分に増加する。それに対し山口県は、トンネルの健全性が大きく低下してから補修・補強対策を行う従来の事後保全型から早期に補修・補強対策を行う予防保全型に維持管理の方針を切り替え、維持管理にかかる総合的なコストを削減しつつ長期利用を目的としたトンネル補修・補強対策を適宜行うトンネル長寿命化計画を立てている¹⁾。この中で、対策実施の優先順位は緊急輸送道路、交通量、延長をはじめとするトンネルの役割、機能、利用状況、重要性を考慮して設定されている。

また、わが国は地震国といわれており、地震発生リスクも高い。これまで、トンネルは一般的に地震に強い構造物であるといわれているものの地震により急激に健全性が低下し、大規模な変状を生じた事例も報告されてい

る。例えば、2016年の熊本地震時に俵山トンネルにおいて覆工コンクリートが崩落する大規模な変状が発生した²⁾。このような地震によるトンネルの大規模な変状は人的被害発生可能性があるため、大変危険であると考えられる。地震発生時に大規模な変状を抑制する対策の例として新設トンネルであれば鉄筋を配置した覆工を設計する、既設トンネルであればなんらかの補強対策を検討するべきである。しかしながら、トンネルの地震被害を想定した対策工を行う選定手法は現在確立されていない。

トンネルの地震被害に関する既往研究として、1923年に発生した関東大地震をはじめとする7地震について鉄道トンネルの被害事例を取りまとめ分析した吉川の研究事例³⁾や、山岳トンネル全般の地震被害を分析した野城⁴⁾、朝倉⁵⁾の研究事例がある。筆者らは、この吉川³⁾と朝倉⁵⁾の調査結果と2004年の新潟中越地震⁶⁾、2007年の新潟中越沖地震⁷⁾、2016年の熊本地震⁸⁾の被害報告書を参考にトンネルの被害を調査した。その結果を表-1に示す。この表から、関東大震災では、100本以上のトンネ

ルの被害報告がされているものの、それ以降、北海道南西沖地震までは甚大な被害が発生したトンネルの数は少なかった。しかし、近年発生した兵庫南部地震と新潟中越地震では、甚大な被害のトンネルが数多く存在している。

トンネルが地震によって甚大な被害を受ける条件は吉川らによると以下のとおりである。

- ・建設からの経年が長いほど、被害が大きくなる傾向がある。
- ・断層からの距離が近いほど大きな被害を受ける。
- ・震度が大きいほど、被害が大きくなる傾向がある。
- ・特殊条件（不安定地形、地質等）の介在によって、被害規模が拡大する。
- ・土被りが50m以上ある場合は特殊条件がある場合のみ被害が発生する。

トンネル地震によって大きな被害を受ける条件は上記のようにいくつか分かっているが、それぞれの条件の重要度や相関性について複合的に分析した事例はない。そこで筆者らは、健全性の低下したトンネルが急激に増加し、大規模な補修・補強等の対策が必要な多くのトンネルに対し適切な維持管理を行っていくために、トンネルの健全性を急激に低下させる要因の一つとして地震被害リスクに着目した。そして、トンネル地震被害報告が一定数みられた新潟中越地震におけるトンネル被害を調査し、複数の条件を用いてトンネルの地震被害を分析した。さらに、新たに地震が発生した際の被害程度を予測するための予測式を既往研究で構築された予測式⁹⁾を再検討し算出した。また、その予測式を既往地震で地震被害を受けたトンネルに適用し検証を行った。そのうえで、山口県のトンネルに適用し、トンネル地震被害予測結果から、山口県の対策優先トンネルの再選定を行った。

2. 山岳トンネルの地震被害の分析

(1) 新潟中越地震の概要

本研究では既往研究と同様に近年発生した地震の中で被害を受けたトンネルの数が特に多いと報告されている新潟中越地震に着目した。新潟中越地震は2004年に新潟県中越地方で発生した震源深さ13kmでM6.8の地震であり、六日町断層帯北部の活動によると考えられている¹⁰⁾。六日町断層帯は、新潟県魚沼市から南魚沼市を経て南魚沼郡湯沢町に至る断層帯である。長さは約52kmで、概ね北北東－南南西方向に延びている。本断層帯は断層の西側が東側に対して相対的に隆起する逆断層である。六日町断層帯北部の断層面モデルは我が国の活断層データベースであるJ-SHIS地震ハザードステーションのサイトに記載されている断層面モデル¹¹⁾を参考とし、地理院地

表-1 日本におけるトンネルの地震被害³⁾⁵⁾⁹⁾⁷⁾

地震名	マグニチュード	最大震度	トンネルの被害状況
1923年 関東	7.9	6	南関東の広範囲で100本以上のトンネルに被害、甚大な被害も多数
1927年 北丹後	7.3	6	震央域で2本の鉄道トンネルに極軽微な被害
1930年 北伊豆	7.3	6	地震断層の横切りにより1本の鉄道トンネルに激甚な被害
1948年 福井	7.1	6	地震断層から8km以内の2本の鉄道トンネルに大きな被害
1952年 十勝沖	8.2	6	北海道内の広範囲にわたり鉄道トンネル10本に軽微な被害
1961年 北美濃	7.0	4	震央域周辺の数本の水力発電所導水路トンネルに大きな被害
1964年 新潟	7.5	6	日本海沿岸を中心に鉄道トンネル約20本と道路トンネル1本に被害
1968年 十勝沖	7.9	5	北海道内の広範囲にわたり鉄道トンネル23本に軽微な被害
1978年 伊豆大島近海	7.0	5	被災中心地で鉄道トンネル9本と道路トンネル1本に被害
1978年 宮城県沖	7.4	5	宮城県を中心に鉄道トンネル6本に軽微な被害
1982年 浦河沖	7.1	6	浦河周辺で6本の鉄道トンネルに軽微な被害
1983年 日本海中部	7.7	5	秋田県を中心に鉄道トンネル8本に軽微な被害
1984年 長野県西部	6.8	4	震央域の導水路トンネル1本に地震断層横断によると思われる被害
1987年 千葉県東方沖	6.7	5	中央本線相模湖駅付近で1本の鉄道トンネルの側壁に軽微な被害
1993年 能登半島沖	6.6	5	珠洲市内の道路トンネル1本に甚大な被害
1993年 北海道南西沖	7.8	5	島牧村で落石の直撃により道路トンネル1本に甚大な被害
1995年 兵庫南部	7.2	7	20余本のトンネルに被害、うち補強・補修を要するもの10本前後
2004年 新潟中越	6.8	7	合計43本の道路・鉄道トンネルに被害（甚大な被害も多数）
2007 新潟中越沖	6.8	6強	合計6本の道路・鉄道トンネルに被害
2016年 熊本	7.3	7	道路トンネル2本と鉄道トンネル2本に甚大な被害
注：最大震度は、気象庁発表の各地の震度のうちの最大値（震度7は1948年福井地震の後に新設）			

図¹²⁾に加筆した（図-1）。

図-1に示すプロットのうち被害大は、大規模な補強・補修を必要とした被害、被害中は、被害大以外で補強・補修を必要とした被害、被害小は、補強・補修を必要としなかった軽微な被害、被害無は、被害報告無しのトンネルである。図-1より、断層面近傍に被害の大きいトンネルが集中していることがわかる。しかしながら、断層面近傍であっても被害を受けていないトンネルも存在していることもわかる。したがって、被害の大きかったトンネルは距離以外の要因が複合的に作用し、被害が大きく

なったと考えられる。

(2) ロジスティック回帰分析の適用

本研究の目的である地震被害を想定した対策優先トンネル選定のため、統計ソフトウェアJMP14.3.0 for windowsを利用し、多変量解析手法の一種であるロジスティック回帰分析を適用し、予測式の算出を試みる。

a) ロジスティック回帰分析とは¹³⁾

ロジスティック回帰モデルとはある現象が発生する確率 P を目的変数としてその現象の発生を説明する変数群 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ との関係が数式(1)のようなロジスティック関数によって表せるモデルである。

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n)\}} \quad (1)$$

ただし、 b は係数であり $b = (b_0, b_1, \dots, b_n)$ である。 $P = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ は0と1の間の値(0%~100%)をとる。

b) 説明変数の抽出

予測式の算出のために説明変数の抽出を行った。まず、吉川の研究³⁾を参考に、経年が長いほど被害が大きくなるため供用年数、断層面からの距離が近いトンネルほど被害が大きくなる傾向にあるため断層面からの距離、震度が大きい地域ほど被害が大きくなる傾向があるため震度、土被りが大きいトンネルほど被害を受けにくくなるため土被りの説明変数を採用した。また、不安定地形やトンネル周辺に粘性土等の軟弱な地質を有するトンネル、工事中に事故・災害が発生したトンネルのような特殊条件が存在するトンネルは地震発生時に大きな被害を受ける傾向があるが、既存の文献から特殊条件の有無を得ることは難しいため、延長が長いほど、地質の脆弱な箇所がある可能性が高いと想定し、トンネル延長を説明変数とした。また、図-2からわかるように矢板工法はNATMに比べ被害が大きくなる傾向が考えられるため、トンネル施工方法も説明変数として考えた。さらに、トンネル周辺の地質の違いによりトンネルの被害が変化する傾向があると報告されているため¹⁴⁾地質項目も分類し¹⁵⁾説明変数として考えた。

c) 予測式の算出

今回は「被害大」、「被害中」、「被害小」の発生を予測するためのそれぞれの予測式を3種類算出する。前項で抽出した供用年数、断層面からの距離、震度、延長、土被り、工法、地質を説明変数とし予測式の算出を試みた。数値で表すことの出来ない項目については、あり：1、なし：0となるようなダミー変換を行った。しかしながら、震度の項目は被害大を例にすると、6強を受けたトンネルのみでしか被害大が発生していないため、このデータを用いて回帰分析を行うと、震度6強の重みが強くなりすぎ、様々な要因を複合して分析するという本来の目的から離れてしまう。被害中、被害小の場合におい

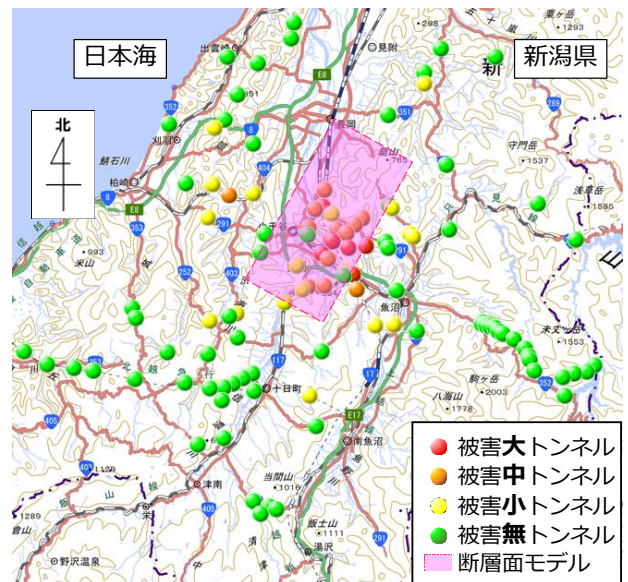


図-1 新潟中越地震の被害トンネルと断層面の位置

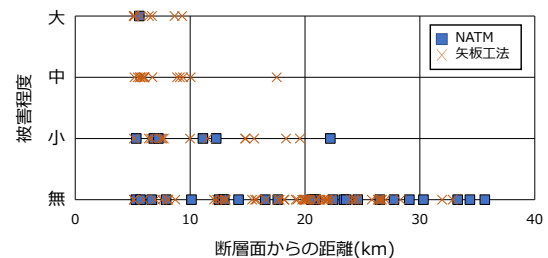


図-2 工法による被害の違い

表-2 得られた係数

	被害大	被害中	被害小
b_0	4.75662797	2.7301043	2.4019313
b_1	-0.4978933	-0.3340641	-0.1976274
b_2		0.0312039	0.00582688
b_3	-1.2513599		
b_4	-0.0065086	-0.0038957	
b_5	0.00019071	0.00023285	0.00021813

ても同様の現象であったため、震度の項目を説明変数から外すことにした。また、地質の項目についても、新潟中越地震のあった地域はほとんどが同じ地質(新生代第四紀)であり、地質による被害の大きな違いがみられない。そのため、説明変数の項目から外すことにした。以上の条件から予測式は(2)のようになる。

$$P = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5)\}} \quad (2)$$

P : 被害の発生確率 x_1 : 断層面からの距離(km)

x_2 : 供用年数(年) x_3 : 工法(NATM)

x_4 : 土被り(m) x_5 : 延長(m)

回帰分析によって得られた係数を表-2に示す。係数が算出されていない部分については、不適切な値が算出されたため、途中で説明変数の項目から外したためである。

供用年数を例とすると経年が経過したトンネルほど被害が発生する確率は高くなるため、正の値が算出されるべきであるが、実際には負の値が算出された。この場合、経年が経過するほど被害が発生しにくくなることを示しているので不適切であると考え、説明変数から除いた。

d) 予測式の検証

検証では、新潟中越地震のトンネルデータを被害の発生確率 P がある値以上になったとき、トンネルに被害が発生すると判別する。そして、表-3に示すような方法で実測値と予測値の一致率を算出し、一致率の値によって予測式の適用性を検討した。最適な判別結果を与える P の値はこれまで文献を参考とした0.5であったが、今回はROC曲線を用いて判別した事例¹⁰⁾を参考に、被害の発生を評価するために最適な被害発生確率 P を求める。ここで、地震被害が発生したトンネルを正しく被害が発生したと判別する率を「感度」、被害が発生していないトンネルを正しく被害が発生していないと判別する率を「特異度」と定義する。感度と特異度の定義を表-4に示す。被害大でのROC曲線を図-3に示す。ROC曲線は縦軸が感度、横軸が1-特異度となっている。つまり、最適な判別結果を与える P の値はROC曲線上の点でグラフの左上隅に最も近い点（感度が1、1-特異度が0）に対応する。図-3より被害大の最適な判別する被害発生確率 P は0.4496であった。同様の手順を被害中、被害小でも適用し、それぞれ0.6168、0.5658の値を得た。ROC曲線によって得られた P を被害大、被害中、被害小の予測式に適用し一致率を算出した結果を表-5に示す。一致率は75%を超えると有効であると考えられているため¹³⁾、今回算出した3種類の予測式は有効であると判断した。

(3) 予測式の既往地震への適用

前節で算出した予測式を、兵庫南部地震と熊本地震で被災したトンネルを対象に適用し、実測値との比較を行った。

a) 兵庫南部地震¹⁷⁾への適用

兵庫南部地震は1995年に発生したM7.2の大地震である。兵庫南部地震時、被害が発生したと報告されているトンネル26本（被害中以上が8本、被害小が18本）の位置と原因断層の位置を地理院地図¹²⁾に加筆し図-4に示す。兵庫南部地震の被害程度の分類は、新潟中越地震と違い表-6のような表現であった。表-6からわかるように被害大

表-3 一致率の算出方法

実測値	予測値		
	発生		発生しない
	発生	真発生トンネル	偽発生しないトンネル
	発生しない	偽発生トンネル	真発生しないトンネル
一致率 = $\frac{\text{真発生トンネル数} + \text{真発生しないトンネル数}}{\text{全トンネル数}}$			

表-4 感度と特異度の定義

実測値	予測値		
	発生		発生しない
	発生	真発生トンネル	偽発生しないトンネル
	発生しない	偽発生トンネル	真発生しないトンネル
感度 = $\frac{\text{真発生トンネル数}}{\text{真発生トンネル数} + \text{偽発生しないトンネル数}}$			
特異度 = $\frac{\text{真発生しないトンネル数}}{\text{偽発生トンネル数} + \text{真発生しないトンネル数}}$			

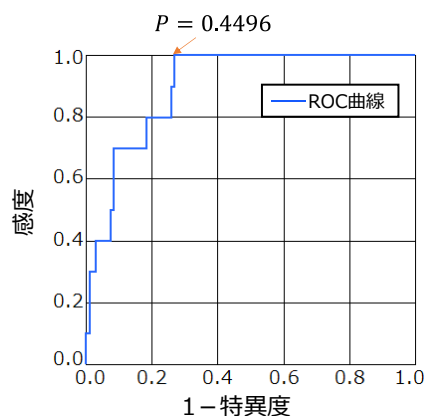


図-3 ROC曲線（被害大）

表-5 一致率の算出結果

			予測値		一致率
			発生	発生しない	
被害大	実値	発生	10	0	75.6%
		発生しない	28	81	
被害中		発生	13	1	80.7%
		発生しない	20	75	
被害小		発生	13	6	76.8%
		発生しない	16	60	



図-4 兵庫南部地震の被害トンネルと断層面の位置

表-6 地震の違いによる被害程度基準

新潟中越地震		兵庫南部地震	
被害程度		被害程度	
被害大	大規模な補修・補強を必要とした被害	被害中以上	補修・補強を必要とした被害
被害中	被害大以外で補修・補強を必要とした被害	被害小	補修・補強を必要としなかった被害
被害小	補修・補強を必要としなかった軽微な被害		

断層面に近いトンネルほど、被害が大きくなると予測される傾向にある。この結果では、県東部に建設されているトンネルは地震により被害大の発生可能性が高く特に優先的に対策を行う必要がある。

4. まとめ

本論文では、トンネルの健全性を急激に低下させる要因の一つと考えられる地震被害リスクに着目し、新潟中越地震における地震被害を、既往研究で用いた断層面からの距離、工法、供用年数の3項目に新たに延長、土被りの2項目を加えた5項目で分析を行い、道路トンネルの被害程度を予測するための予測式の算出を行った。さらに今回新たな試みとして、得られた予測式を兵庫南部地震と熊本地震で被災したトンネルに適用し、予測式の有効性を改めて検証した。そのうえで、山口県の管理する道路トンネルに対して、「被害大」、「被害中」、「被害小」の3種類の予測式を適用し、地震被害リスクを想定した補修・補強の優先順位選定を試行した。それにより、得られた知見は以下の通りである。

- 1) 新潟中越地震における地震被害を、断層面からの距離、工法、供用年数、延長、土被りと分析する項目を増やしたことにより、既往研究より精度の高い予測式を算出できたと考えられる。
 - 2) 新潟中越地震における地震被害から得られた予測式を兵庫南部地震と熊本地震の既往地震で被災したトンネルに対して適用することにより、予測式が地震被害リスクを考慮した対策優先トンネルの選定に有効であるか判断することができた。
 - 3) 得られた予測式を用いて、山口県の管理するトンネルの中で地震被害リスクの高いトンネルを選定することができた。
- 今後は、トンネル周辺の地質や震度も考慮しより詳細な選定が行えるようデータ整理を行っていく。

- 5) 朝倉俊弘・志波由紀夫・松岡茂・大矢敏夫・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，pp27-38,2000.
- 6) 土木学会トンネル工学委員会：新潟中越地震特別小委員会報告書，2005.
- 7) 土木学会トンネル工学委員会：新潟中越沖地震調査特別小委員会報告書，2008.
- 8) 土木学会トンネル工学委員会：熊本地震調査特別小委員会報告書，2018.
- 9) 浦川佳樹・林久資・川端康夫・小原勝巳・真下英人・横澤圭一郎・中村明彦・進士正人：地震被害およびトンネル劣化リスクを考慮したトンネル覆工の対策優先度判定，トンネル工学報告集，Vol.29，I-13，2019.
- 10) 政府地震調査研究推進本部：六日町断層帯，https://www.wjshin.go.jp/regional_seismicity/ts_katsudanso/f103_muikamachi/ 2020年7月21日アクセス
- 11) J-SHIS 地震ハザードステーション：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/> 2020年7月21日アクセス
- 12) 国土地理院ウェブサイト：<https://maps.gsi.go.jp> 2020年7月21日アクセス
- 13) 内田治，平野綾子：JMPによるデータ分析 第2版，pp.216-231，2015.
- 14) 橋直毅，小島芳之，野城一栄，朝倉俊弘，野々村政一：兵庫県南部地震(1995)，新潟県中越地震(2004)におけるトンネルの被害の傾向，トンネル工学報告集，Vol.17，I-31，pp.215-219，2007.
- 15) (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.119，2014.
- 16) 上原康平，丸山喜久：既往地震データに基づく高速道路の復旧予測に関する統計分析，土木学会論文集，Vol.72，No.4，I_110-I_116，2016.
- 17) 小山幸則，朝倉俊弘，佐藤豊：兵庫南部地震による山岳トンネルの被害と復旧，トンネルと地下，Vol.27，No.3，pp.51-61，1996.

(2020. 8.7 受付)

参考文献

- 1) 山口県土木建築部道路整備課：山口県トンネル長寿命化修繕計画，2016.
- 2) 土木学会トンネル工学委員会：平成28年熊本地震に係る道路トンネルの被災状況緊急調査報告，2016.
- 3) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究報告，No.1123，1984.
- 4) 野城一栄・西藤潤・井浦智実：最近の山岳トンネルの地震被害の傾向，日本鉄道施設協会誌，Vol.47，No.4，pp.307-309，2009.

A STUDY ON SELECTION OF PRIORITY TUNNELS FOR EARTHQUAKE DAMAGE RISK

Keiki URAKAWA, Hisashi HAYASHI, Yeboon YUN and Masato SHINJI

Among road tunnels managed in Japan, the percentage of tunnels that have exceeded 50 years after construction is currently about 20%, but will increase to over 50% 20 years later. In addition, Japan is also prone to earthquakes, and there have been cases reported in which earthquakes have drastically reduced the integrity of tunnels and caused large-scale deformations in the tunnels. The authors assumed earthquake damage as one of the factors that drastically deteriorate the soundness of the tunnel, analyzed the tunnel damage in the Niigata Chuetsu earthquake, where a certain number of tunnel earthquake damage reports were found, and newly generated an earthquake. We calculated a prediction formula for predicting the degree of damage in the event. In this study, we re-examined the problems of the prediction equations that have been developed in previous studies. In addition, a prediction equation for earthquake damage in tunnels caused by previous earthquakes is examined. In addition, the priority tunnels for countermeasures in Yamaguchi Prefecture were selected again. Then, we selected the priority tunnel for countermeasures in Yamaguchi Prefecture.