

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

浦川 佳樹¹・林 久資²・川端 康夫³・小原 勝巳⁴・真下 英人⁵・
横澤 圭一郎⁶・中村 明彦⁷・進士 正人⁸

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二丁目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二丁目16-1)
E-mail:hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³フェロー会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 (〒108-0075 東京都港区港南1-8-15 Wビル4F)
E-mail: yasuo_kawabata@tobishima.co.jp

⁴正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 (〒108-0075 東京都港区港南1-8-15 Wビル4F)
E-mail: katsumi_obara@tobishima.co.jp

⁵正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)
E-mail: mashimo@cmi.or.jp

⁶正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)
E-mail: yokozawa@cmi.or.jp

⁷正会員 株式会社 テムロ (〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町1丁目5-6 第3大東ビル4階)
E-mail: akh-nakamura@tmr-eco.co.jp

⁸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二丁目16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

国内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20%程度であるが20年後には50%以上へと増大する。また、わが国は地震国であり、地震発生リスクも高く、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。しかし、トンネルの対策優先順位に地震被害リスクは現在考慮されていない。そこで本研究では、山口県が管理する道路トンネルに対して、県内に存在する活断層で大地震が発生した際のトンネル被害想定を行う。そして、現状のトンネル覆工コンクリートの健全性や工法、山口県内の緊急輸送道路等も含め、山口県の対策優先トンネルの選定を試みた。その結果、地震被害を想定した被害予測および対策優先トンネルの選定が試行できた。

Key Words : tunnel lining concrete, damage risk by earthquake, large scale rehabilitation,
Tunnel-lining Crack Index

1. はじめに

わが国で管理されている道路トンネル数は約1万本である。このうち、建設後50年を超えたトンネルの割合は、現在は20%程度であるが、20年後には50%程度へと増加する。山口県においても同様にトンネル老朽化が進行し、特にトンネル覆工コンクリートの健全性に懸念を有するトンネルの増大が懸念される。それに対し山口県は、従

来の事後保全型から予防保全型に補修・補強対策方針を切り替えた長寿命化計画を策定し、長期利用を目的としたトンネル補修対策を適宜行っている。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。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、トンネルの地震被害を調査した研究としては、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らの事例¹⁾や、さらにその調査結果に1978年に発生した伊豆大島近海地震以降のトンネル被害事例を加えて表-1に示すように取りまとめた事例²⁾などがある。吉川らによれば、大規模な地震被害を示す可能性が高い条件は以下のとおりである¹⁾。

- ・長期間にわたり利用されている。
- ・震源断層近傍に存在している（マグニチュード7級では10km以内）。
- ・不安定地形等の特殊条件がある。

また、近年では2004年に発生した新潟中越地震³⁾や2016年に発生した熊本地震⁴⁾においてもトンネルが覆工コンクリートの崩落等の大規模な変状を生じたと報告されている。

地震リスクに対する覆工コンクリートの補強事例としては鉄道トンネルでは活断層から水平距離で5km以内に入る新幹線トンネルに対して、地質条件等を考慮し、ロックボルト工や裏込め注工を行っている例⁵⁾がある一方、道路トンネルにおいては格別な配慮はみられない。

本研究では、地震をトンネル覆工コンクリートの健全性を急激に低下させる要因の一つと考え、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、山口県に存在する活断層で大規模地震が発生した場合の県内道路トンネル被害想定を行う。そのうえで、現状のトンネル覆工コンクリートの健全性や山口県が設定している緊急輸送道路、交通量、延長を考慮することで、山口県の補修・補強対策優先トンネルの選定を試みる。

2. トンネルの地震被害分析

対策優先トンネルを選定する上で、断層面からの距離、震度、トンネルの工法、供用年数の違いが被害程度に与える影響を調査する必要があるため、地震被害の分析を行う。本章では、過去に地上部を含め地震による大規模な被害が見られた内陸地震（プレート内地震）のうち、新潟中越地震に着目し、断層近傍トンネルの被害状況を取りまとめる。

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⁶⁾。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

表-1 日本におけるトンネルの地震被害²⁾

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 関東大震災	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 北丹後地震	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 北伊豆地震	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 福井地震	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 十勝沖地震	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 北美濃地震	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 新潟地震	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 十勝沖地震	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 伊豆大島近海沖地震	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 宮城県沖地震	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 浦河沖地震	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 日本海中部地震	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 長野県西部地震	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 千葉県東方沖地震	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 能登半島沖地震	6.6	5	珠洲市内の道路トンネル1本に甚大な被害
1993年 北海道南西沖地震	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 兵庫南部地震	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

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)

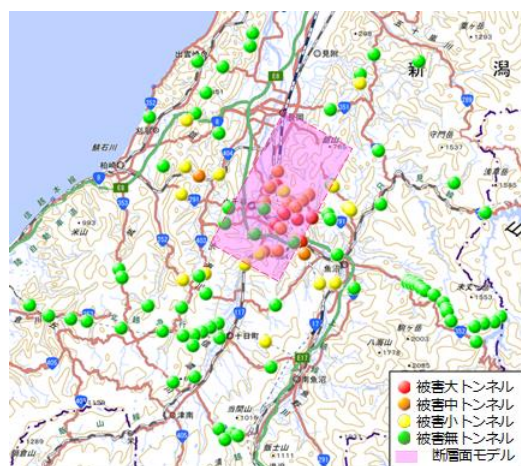


図-1 中越地震の被害トンネルと断層面の位置⁸⁾

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を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⁷⁾を参考に作成した(図-1)。そして、六日町断層帯北部の断層面からトンネルまでの距離と実際に生じた被害程度別のトンネルの関係を調査した。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。

次に、図-2に断層面からの距離と被害程度別のトンネルの関係を示す。図-2から、被害程度が大、中のトンネルは、断層面からの距離が概ね10km以内にプロットが集中していること、そのプロットの内訳としてはNATMよりも矢板工法の方が多いことから、地震発生時に断層面からの距離が10km以内で矢板工法によって施工されたトンネルは大きな被害を受ける可能性の高い傾向であると判断できる。矢板工法で施工されたトンネルは建設後経年しているため、覆工コンクリートの経年劣化がみられたり、矢板工法は覆工コンクリート背面に空洞が生じやすい施工方法であることから、これらが原因となっている可能性がある。

さらに、図-3に各トンネルにおいての想定震度別でとりまとめたグラフに着目すると、被害程度が大のトンネルは、震度6強以上のプロットがみられる。同様に、被害程度が中のトンネルは、震度6弱以上、被害小のトンネルは5強以上のプロットが確認できた。この結果より、トンネルに震度5強以上の地震が生じた場合、トンネル覆工コンクリートになんらかの被害が生じる可能性がある」と示唆される。

次に、山口県内における地震時被害リスクを想定した対策優先トンネルを選定するために、重回帰分析の適用を検討した。ここでは新潟中越地震について取りまとめられた過去文献より、道路トンネルの断層面からの距離、工法、震度、供用年数と覆工コンクリートの被害程度を取得し、これらのデータを用いてトンネルの地震被害程度を予測するための重回帰分析を行い回帰式を算出し、表-2に示すような係数が得られた。回帰式の基礎式を(1)に示す。

$$p = \frac{1}{(1 + e^{-z})} \quad (1)$$

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_8x_8 + b_9x_9$$

p : 被害が起こる確率

x_1 : 断層面からの距離(km)

x_2 : 供用年数

x_3 : 工法 (NATM)

x_4 : 工法 (矢板)

x_5 : 震度 (6強以上)

x_6 : 震度 (6弱)

x_7 : 震度 (5強)

x_8 : 震度 (5弱)

x_9 : 震度 (4)

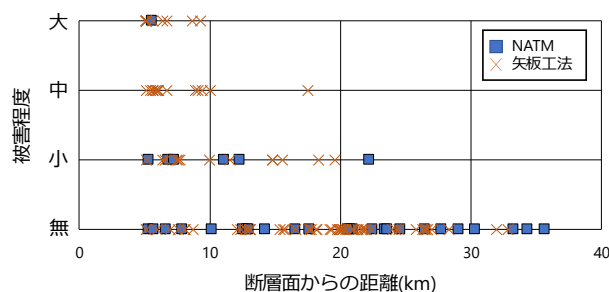


図-2 断層面からの距離と被害程度の関係 (工法別)

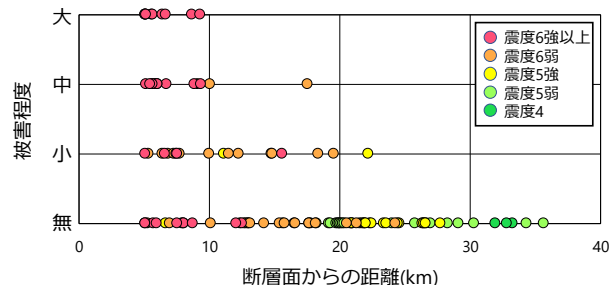


図-3 断層面からの距離と被害の関係 (震度別)

表-2 重回帰分析によって得られた係数

	被害大orなし	被害中orなし	被害小orなし
b_0	-10.356216	-14.793618	-19.27561
b_1	-0.3973398	-0.2691951	-0.1483454
b_2	0.00753983	0.02230177	0.02635525
b_3	-0.1923722	-19.612701	0.14637189
b_4	0	0	0
b_5	12.9219751	16.1943534	18.7861471
b_6	-6.4838719	16.3211517	20.130573
b_7	-6.4709566	-1.9534198	19.0790839
b_8	-4.7218069	-3.3205208	-1.5753348
b_9	0	0	0

表-3 予測値と実値

		予測値			
		被害大	被害中	被害小	被害なし
実値	被害大	8	0	0	2
	被害中	9	1	2	2
	被害小	3	2	4	10
	被害なし	4	2	2	68

(本)

- 予測値と実値が一致したトンネル
- 予測値が実値より大きな値を示したトンネル
- 予測値が実値より小さな値を示したトンネル

その後、得られた回帰式を用いて、再び上述したデータと同様の、新潟県中越地方を中心とした道路トンネルの断層面からの距離、工法、震度、供用年数を入力した。新潟県中越地区の計119本のトンネルを実際の被害程度と、回帰式より予測した被害程度との関係を取りまとめる

と表-3のような結果が得られた。予測被害程度と実被害程度が一致したトンネルは81本、実被害程度より大きな被害程度を予測したトンネルは22本、予測被害程度が実被害程度より小ささを示したトンネルは16本であった。このうち予測被害程度が実被害程度より小さく予測されるケースは、好ましくないと考えるが、そのようなトンネルの割合は全体の13.4%と低い割合を示したため、今回はこの式を用いて山口県の活断層で大規模な地震が発生した際の補修・補強対策優先トンネルの選定を行った。

3. 対策優先トンネルの選定

前章では、新潟中越地震から得られたトンネル地震被害データより、対策優先トンネルを選定するための情報の精査を行った。その結果を用い、本章では山口県の管理するトンネルを対象に地震被害リスクを想定した対策優先トンネルの選定を試みるのが可能か否かについて検討した。ここでは、対策優先トンネルの選定を行うために図-4に示すように2段階での選定を試みた。1段階目は新潟中越地震を分析することによって得られた重回帰式を用いて被害大の生じる可能性のあるトンネルを抽出した。2段階目は1段階目で抽出したトンネルの中で優先順位をつけるために、緊急輸送道路、交通量、延長、トンネル覆工劣化度（トンネルひび割れ量）を考慮して選定を行った。

(1) 分析データを用いた選定

まず、J-SHIS地震ハザードステーションのサイト⁷⁾を参考に山口県に存在する活断層が原因により新潟中越地震とマグニチュードが同程度、もしくは若干低いマグニチュードであるM6.4~7の地震が発生する可能性のある活断層を11本抽出し、それぞれの断層面から山口県の管理している107本のトンネルまでの距離を算出した。次に、予測震度をJ-SHIS地震ハザードステーションのサイト⁷⁾の長期間平均ハザードマップを参考に予測震度を算出した。さらにトンネルの工法・供用年数を調査した。

そして、得られたパラメータを2章で導出した回帰式に導入して、得られた被害程度を地図にプロットした。選定結果を図-5に示す。図-5からわかるように断層面の近くのトンネルほど大きな被害を受けやすいと判断できる。また、予測被害程度別のトンネル本数をまとめたものを表-4に示す。

(2) トンネルの役割・劣化の進行性を用いた選定

表-4からわかるように、地震時被害リスクを考慮した分析を行うことにより、山口県内のトンネルにおいて地震発生時に被害大を受ける可能性のあるトンネルを31本

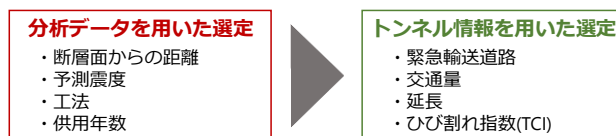


図-4 対策優先トンネルの選定手順



図-5 分析データを用いた選定結果⁸⁾

表-4 分析データを用いた選定結果の詳細

被害大	被害中	被害小	被害なし
31	5	6	65

(本)

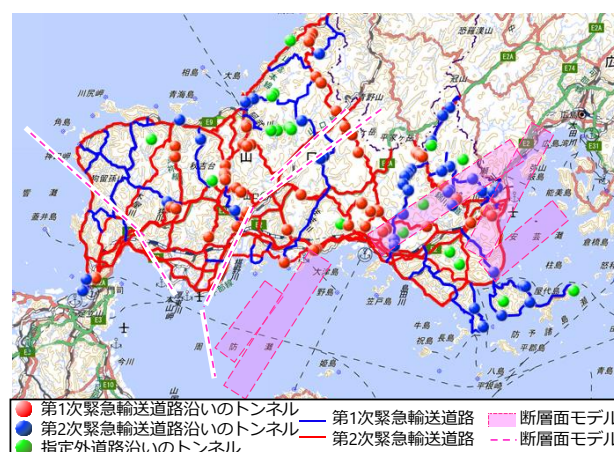


図-6 緊急輸送道路およびトンネルと断層面の位置⁸⁾

抽出することができた。しかしながら、山口県では対策を実施する優先順位を決める際に、トンネルの役割、機能、利用状況、重要性を考慮している。山口県トンネル長寿命化修繕計画を参考にすると具体的には緊急輸送道路や交通量といった道路の重要度を重視しており⁹⁾、地震被害リスクを考慮した対策を行うトンネルの選定にもこれらの情報を取り入れる必要があると考え、この31本の中で優先順位をつけるために、トンネル情報を用いた。

まずは、緊急輸送道路沿いのトンネルを調査した。山

山口県内の緊急輸送道路およびトンネルと断層面の位置を図-6に示す。緊急輸送道路とは、地震発生直後からの物資輸送を円滑かつ確実に実施するために必要な道路である¹⁰⁾。第1次緊急輸送道路は、重要施設間を連絡する道路であり、第2次緊急輸送道路は第1次緊急輸送道路と市区町村役場、主要防災拠点を連絡する道路である。

次に、地震発生時にトンネル覆工コンクリートが健全なトンネルとトンネル覆工コンクリートが極端に劣化したトンネルでは、後者の方が被害が生じる可能性や、被害が大きく生じる可能性が高いと考え、トンネル覆工コンクリートの劣化度も考慮することにした。トンネル覆工コンクリートの劣化度の低いトンネルを調査するためにそれぞれのひび割れ指数(TCI)を算出した。ひび割れ指数TCI¹¹⁾とは、岩盤工学の分野において岩盤中のひび割れの密度や方向、幅が岩盤物性(変形係数・透水係数)に大きく影響することから、これらの影響を総括的に定量化できる指標としてクラックテンソルの考えに基づいて提案されている。TCIの基礎式を式(2)に示す。このTCIはひび割れの幅、長さ、方向から評価尺度を数値化するため、点検技術者の主観に依存することなく、定量的な評価ができる特徴を有している。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(t^{(k)} \right)^{\alpha} \left(l^{(k)} \right)^{\beta} \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (2)$$

A: 覆工コンクリートのスパン面積 (A=Ls×La)

Ls: 覆工コンクリートのスパン縦断延長

La: 覆工コンクリートのスパン横断延長

n: ひび割れの本数

l(k): ひび割れkの長さ

t(k): ひび割れkの幅

θ_i(k): ひび割れkの法線ベクトルがx_i軸となす角度

θ_j(k): ひび割れkの法線ベクトルがx_j軸となす角度

α: ひび割れ幅の重み付けに関する係数

β: ひび割れ長さの重み付けに関する係数

式(2)により算出されるTCIには横断方向成分F11と縦断方向成分F22があり、覆工コンクリートの劣化の指標F0はテンソルの一次不変量として縦断・横断方向成分の和(F0=F11+F22)として表され、本研究ではこのF0をTCIの評価値として用いた。この数値が大きいほどひび割れ量が多く、覆工の健全度は相対的に低いことを意味する。ここで、式(2)のα、βは便宜上1.0と仮定した。現時点で整理を終えた5トンネルのデータを表-5に示す。平均TCIとはトンネルのTCIを算出した後に総スパン数で除した値であり、最大TCIとはトンネルの1スパン毎にTCIを算出し、TCIの値が最大だったスパンのTCI値である。

対象とした5トンネルのうち第1次緊急輸送道路沿いであり、交通量(台/日)、直近点検時の平均TCI・最大TCI

表-5 対象トンネルの概要

トンネル	緊急輸送道路	交通量 (台/日)	延長 (m)	直近点検時	
				平均TCI	最大TCI
A	2次	2,046	162	19.75	55.95
B	1次	23,435	273	6.56	62.92
C	1次	23,435	358	2.09	5.87
D	1次	13,679	178	2.62	13.70
E	1次	13,679	318	1.96	7.42

Iの最も高いBトンネルは優先的に、補修・補強対策を実施する必要があると考えられる。しかしながら、優先順位を決定する際、緊急輸送道路交通量、延長、ひび割れ指数(TCI)のどの項目を重視するかの重み付けが必須だが考慮できていない。そのため、今後重み付けを考える必要がある。

4. まとめ

本論文では、トンネル覆工コンクリート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、断層面からの距離、震度、工法、供用年数の4項目で分析を行い、道路トンネルの覆工コンクリート被害程度を予測するための回帰式の導出を行った。さらに得られた回帰式を用い、山口県における地震被害リスクを想定した補修・補強の優先トンネルの選定を行った。その後、山口県トンネル長寿命化修繕計画を参考にトンネルの役割・重要性を重視するため、緊急輸送道路、交通量、延長といったトンネル情報、また、現状のトンネル覆工劣化度(ひび割れ量)を考慮して選定を行った。それにより、得られた知見は以下の通りである。

- ・新潟中越地震における地震被害を、断層面からの距離、震度、工法、供用年数より分析を行い、道路トンネル覆工コンクリートの被害程度予測が可能となる予測式の提案を行った。
- ・新潟中越地震における地震被害から得られた回帰式を用いることで、山口県の道路トンネルにおける地震時被害リスクを想定した覆工コンクリート被害予測が可能となった。
- ・地震被害リスクにおける分析だけではなく、緊急輸送道路、交通量、トンネル延長、トンネル覆工劣化度(ひび割れ量)を考慮することにより、さらに高度な補修・補強対策トンネルの選定が可能であると考えられる。

今後は、新潟中越地震以外の地震被害トンネルの分析

を行っていくとともに、トンネル周辺の地質や土被りにも着目し、分析する上での項目を増やし、より詳細な選定が行えるようデータ整理を行っていく。また、トンネルの役割・劣化の進行性を考慮する選定の際の重み付けを考える必要がある。

参考文献

- 1) 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，pp.34-36，1984.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 野澤伸一郎，小林將志，今井勉，友利方彦：鉄道の地震への備え，J-STAGE50巻1号，pp.104-108，2012.
- 6) 政府地震調査研究推進本部：六日町断層帯，https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/ts_katsudanso/f103_muikamachi/ 2019年1月21日アクセス
- 7) J-SHIS 地震ハザードステーション：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>2019年1月21日アクセス
- 8) 国土地理院ウェブサイト：<https://maps.gsi.go.jp> 2019年7月31日アクセス
- 9) 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，pp.21-24，2016.
- 10) 山口県土木建築部：道路整備課山口県緊急輸送道路マップ <http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a18200/kinkyuyusou-douro/kinnkyu.html> 2018年11月30日アクセス
- 11) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武勇，中川浩二：ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全性評価法，土木学会論文集F，Vol.62，No.4，pp.628-632，2006.

(2019. 8.9 受付)

THE STUDY ON PRIORITY JUDGMENT OF TUNNEL LINING CONSTRUCTION CONSIDERING THE RISK ON DAMAGES BY BIG EARTHQUAKE AND TUNNEL DETERIORATION RISK

Keiki URAKAWA, Hisashi HAYASHI, Yasuo KAWABATA, Katsumi OBARA, Hideto MASHIMO, Keiitirou YOKOZAWA, Akihiko NAKAMURA and Masato SHINJI

Among road tunnels managed domestically, the proportion of tunnels over 50 years after construction is currently 20%, but will increase to over 50% after 20 years. In Yamaguchi Prefecture, tunnel deterioration also progresses, and in particular, tunnels with concern about the integrity of tunnel lining concrete increase. In addition, Japan is an earthquake-prone country, and the risk of earthquake occurrence is high, and the soundness of the tunnel suddenly decreases due to the earthquake, and there have been reports of cases of large-scale deformation in Inside the tunnel. However, the earthquake damage risk is not currently considered in the countermeasure priority of the tunnel. Therefore, in this study, we will assume tunnel damage in the case of a large earthquake on the active fault in Yamaguchi prefecture. Moreover, we tried to select priority measures tunnel in Yamaguchi Prefecture, including the soundness and construction method of the current tunnel lining concrete and the emergency transportation roads in Yamaguchi Prefecture.