

山岳トンネルの要求性能としての 耐震性能に関する一考察

A study on earthquake-proof of required performance of mountain tunnel

山田 浩幸¹・岡田 正之²・藤原 康政³・野城 一栄⁴
 Hiroyuki Yamada, Masayuki Okada, Yasumasa Fujiwara, Kazuhide Yashiro

It is generally said that mountain tunnels are little damaged by earthquakes. However, recently, some mountain tunnels were damaged by earthquake and can not be used for a while, when the scale of earthquake is large and near the epicenter, tunnels are under special conditions (such as tunnel portals, faults, water inflow into tunnel, etc.), or tunnels have defects of structure.

In the meantime, the number of tunnels constructed in mid-1950's to mid-1960's, 50 years or more passed after these construction, are increasing rapidly in our country.

Therefore, it will be important to do well-planned and efficient maintenance or repair in the future.

In this paper, we analyzed the tunnels damaged by earthquake and studied the damage mechanism of mountain tunnel. In addition, we introduce the earthquake-proof on required performance of mountain tunnels.

Key Words : mountain tunnel, earthquake-proof, required performance, maintenance and repair

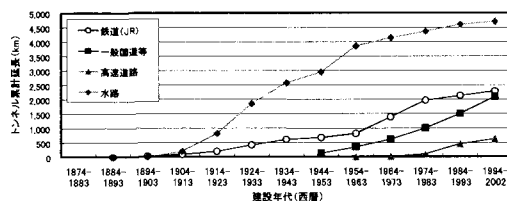
1. はじめに

山岳トンネルは，地中の線状構造物であり，一般的には，耐震性に富む構造物であると言われているが，近年の地震被害事例によれば，地震規模の大きい震源に近い場合，特殊な地形・地質条件（坑口部，破碎帯等）の場合，構造的な欠陥を有する場合には，使用不可能となるような被害を受けている。

一方，社会ストックとしての既存トンネルは，昭和30年代に建設され，今後，供用後50年以上経過するトンネルが急増することが想定されている。

トンネル構造物は種々の制約条件の下で重要な役割を担っており，容易に取り替えることができないため，計画的な維持管理による延命化が急務である。

本論文では，実際に地震によって被害を受けた事例（鉄道・道路）を整理することで，関連の深い変状要因をピックアップし，被害のメカニズムを分析するとともに，山岳トンネルが必要とする耐震性能について考察した。さらに，既存トンネルの維持管理の重要性，今後新設されるトンネルにおける対策に関しての留意点について述べている。



掘削	切石掘削(日本式)	新築式	底切掘削	底切掘削生産	NATM
支保方式	木製支柱式を廃止				吹付けコンクリート+FRP
材料	レンガ・石積み				コンクリートブロック
掘削方法	人力				掘削機(ポンプ・ブレイサー) (ポンプ) (ブレイサー) 吹付け

図-1 山岳トンネル建設の歴史と資産推移¹⁾

キーワード：山岳トンネル，耐震性能，要求性能，維持管理

¹正会員 ㈱鴻池組 大阪本店 土木技術部

²正会員 ㈱ドーコン 交通部

³正会員 清水建設㈱ 土木技術本部技術第二部

⁴正会員 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部

2. 地震によるトンネルの被害事例

これまでに報告された文献をもとに、地震により被害を受けた山岳トンネル（道路トンネル・鉄道トンネル）の被害状況および復旧方法に関して以下にまとめる。

(1) 木沢トンネル²⁾

a) トンネル概要

- ・トンネル用途：2車線道路トンネル
- ・建設年月：1991年（平成3年）
- ・トンネル延長：305m(36m区間は明かり巻き施工)
- ・トンネル形状：馬蹄形（内空幅9.0m）
- ・掘削工法：NATM（上半先進ベンチカット工法）
- ・覆工構造：アーチ部30cm，側壁部45cm，インバート部50cm

b) 被害状況

- ・側壁からアーチ部に斜め方向の大規模亀裂が山側と谷側に発生
- ・亀裂上部の半断面が谷側に変位し，山側側壁部では大きな剥離が生じ，トンネルが破壊した状態。
- ・アーチ部や側壁部に縦断・横断方向に多くのひび割れが発生
- ・舗装目地が開口し，最大150mmに及ぶものもある。
- ・道路センターが谷側に変位し，約200～400mmの変位量がほぼ平行に発生
- ・トンネルの縦断方向には坑口部から70m付近から坑口にかけて引き延ばされているような形で累計1,000mm程度変位



山側側壁部のひび割れ



舗装面のひび割れ

写真-1 地震による被害状況（木沢トンネル）

c) 復旧方法

大規模な亀裂区間については覆工の損傷が激しいことから，縫返しによって覆工背面の状態を確認したうえで，トンネル改築工による復旧が計画されている。

(2) 魚沼トンネル（上越新幹線）²⁾

a) トンネル概要

- ・トンネル用途：鉄道トンネル（新幹線，複線）
- ・建設年月：1972～79年頃
- ・トンネル延長：8,625m
- ・トンネル形状：馬蹄形
- ・掘削工法：矢板工法（底設導坑先進工法および側壁導坑先進工法）
- ・覆工構造：50cm，70cmを標準（地質・地山条件によっては90cm以上の場合有り）
インバートは地山状況に応じて35cmまたは50cm

b) 被害状況

- ・トンネル中間部の3箇所被害が発生
- ・覆工コンクリートアーチ部の崩落（延長5m）
- ・覆工コンクリートのひび割れ
- ・側壁の押し出し
- ・インバートコンクリートのひび割れ
- ・路盤コンクリートの隆起（約250mm）
- ・中央通路側側壁傾斜



図-2 魚沼トンネル全体被害状況

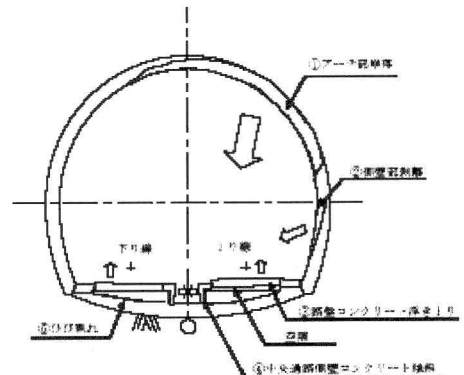


図-3 魚沼トンネル被害状況（195k080 付近）

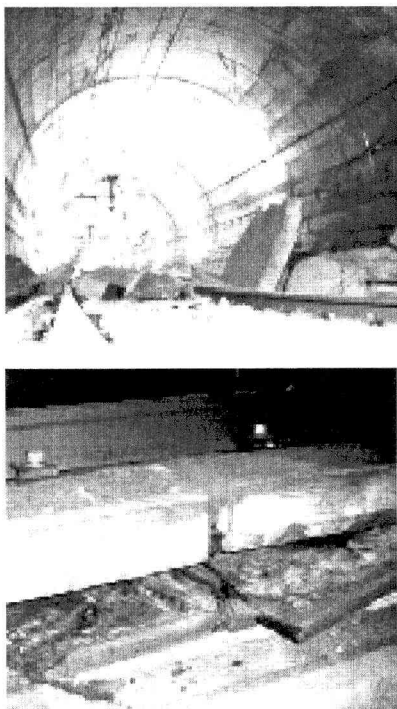


写真-2 地震による被害状況（魚沼トンネル）

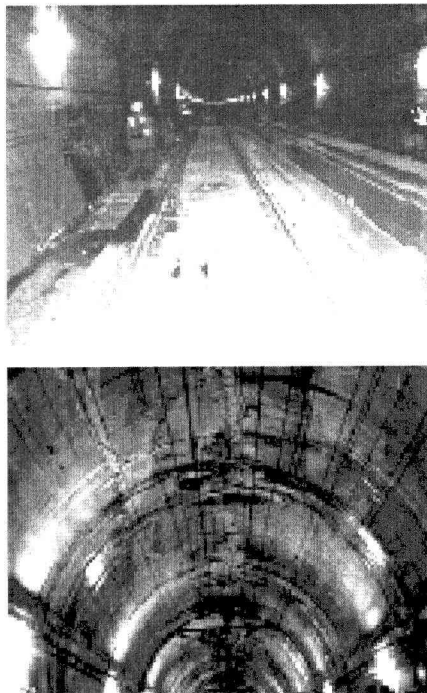


写真-3 地震による被害状況（妙見トンネル）

(3) 妙見トンネル²⁾

a) トンネル概要

- ・トンネル延長：1,459m

その他のトンネル概要に関しては、上記魚沼トンネルと同様であるので省略

b) 被害状況

- ・トンネル中間部の2箇所において顕著な被害が発生した。
- ・クラウン部の大規模な圧さ（延長50m）
- ・覆工コンクリートの剥落
- ・圧さ発生区間の覆工コンクリートにはトンネル軸方向および斜め方向の多数のひび割れが発生
- ・路盤コンクリートが隆起（約40mm）
- ・インバートコンクリートにひび割れが発生

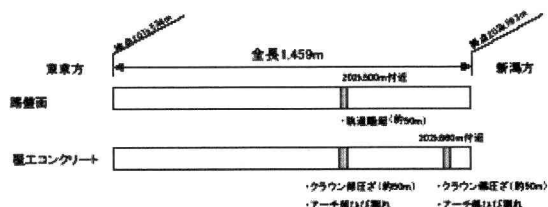


図-4 魚沼トンネル全体被害状況

c) 復旧方法

大規模被災箇所に関しては、まずインバート損傷部の補修（モルタル、セメントミルク注入、およびロックボルト補強）と路盤コンクリートの打ち替えが実施され、覆工コンクリート崩落箇所はロックボルト打設（ $L=3.0m$, D32, 自穿孔ボルト, etc. 1.0m）, 吹付けコンクリート, ひび割れ注入, 繊維補強板（ $t=6mm$, ビニロン繊維混入セメント板, $1.8m \times 0.9m$ ）による内面補強等を行った後、クラウン部の裏込注入が実施された。

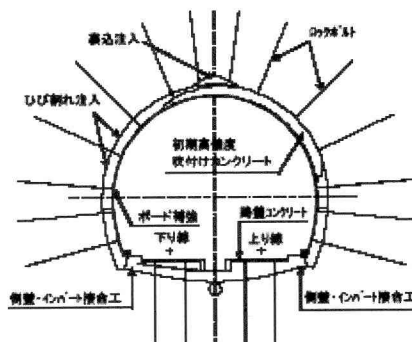
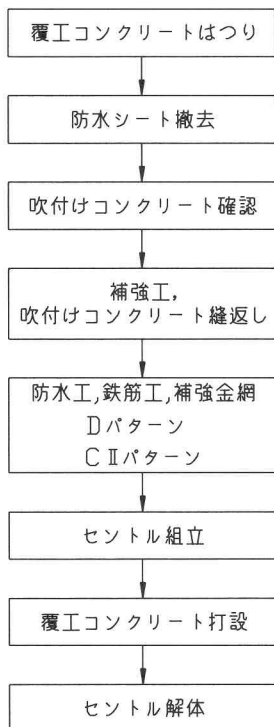


図-5 魚沼トンネル復旧概要

c) 復旧方法

被災したアーチ部分はいずれも断層破碎帯部分であり、建設時にウレタン注入による補助工法を実施した箇所であった。復旧方法は縫返しによる改築を実施したが、復旧にあたっては、吹付けコンクリート撤去および縫返し時の地山の緩みを極力抑えるため、被災区間の地山をウレタン注入により地盤改良した。なお、覆工コンクリートは鉄筋構造とし、施工はバラセントルにより実施した。

図－9 にアーチ部分の施工フローを示す。



図－9 アーチ部施工フロー

インバート部分に関しては、主たるひび割れは円周方向であり、インバート自体は機能するものと考えられたため、長期的な安定性を確保する目的でインバートコンクリートと地山をロックボルトで縫う補強工を実施した。さらに、路盤に関しては、当該トンネルが数少ない南北の連絡道路の要所にあたり震災復興の資材、物資を輸送するためにも、早期復旧が望まれたことから早強コンクリートによる置き換えを行い、舗装に関しては一部ジェットコンクリートを使用し工期短縮が図られた。

なお、覆工のひび割れに関しては樹脂注入による補修を実施して一体化することで耐力増強を図った。



写真－5 縫返し補強工施工状況



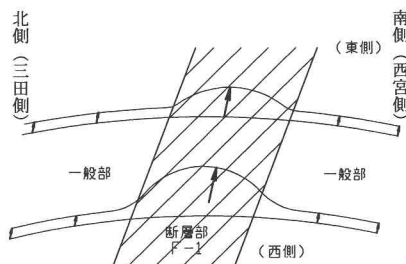
写真－6 インバート補強工施工状況

3. 被害事例に基づく変状要因の分析^{2), 5)}

被害を受けた山岳トンネル（道路・鉄道）の事例に共通した変状要因としては、以下の事項が挙げられる。

- ①地震の規模が大きく、震源から近いこと
- ②特殊地山条件(坑口部、断層破碎帯、湧水箇所等)
- ③構造的な欠陥(背面空洞、巻厚不足、迫めの施工、変状箇所（対策箇所）等)

盤滝トンネルの事例をもとに、トンネル中間部における被害のメカニズムに関して考察すると、地震により地質的に弱層である断層破碎帯部分での変位は、図－10に示すように、健全な地山部分に比べて大きくなり、変位量に差異を生じた。



図－10 断層部縦断方向変位分布

土被りの大きな部分におけるトンネルの変形は地盤の変形モードに支配されると考えられ、図-11に示すように上下方向の地震力が作用し、トンネル側壁部分の地盤に大きなせん断ひずみを生じた結果、覆工コンクリートの崩壊や圧壊を引き起こしたものと考えられる。

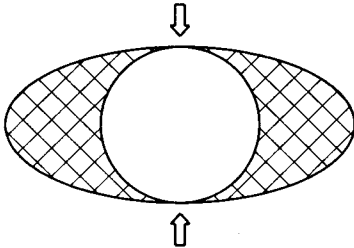


図-11 鉛直方向地震動とせん断ひずみ領域

また、図-12に示すように、地盤に生じたせん断変形に加えて、地震特有の圧縮と引張りの繰り返しによる影響も肩部からアーチにかけて覆工が崩壊した一因と考えられる。

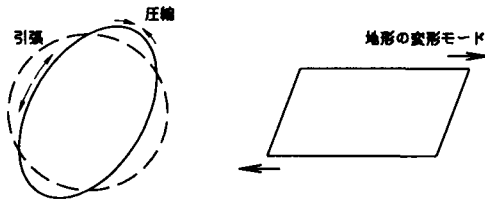


図-12 地盤のせん断変形とトンネル変形

さらに、覆工コンクリートに発生したせん断ひび割れや舗装版、路盤コンクリートの浮き上がり現象から、地震の初期の段階では、図-13に示すように天端アーチ部及びインパート部は内空側に変位し、側壁から肩部は地山側に変形したと考えられる。しかしながら、側壁部は地山により拘束され、自由な変形が阻害されるため、瞬間的に大きな荷重が覆工に作用し、せん断ひび割れや崩壊、圧壊につながったものと推察される。

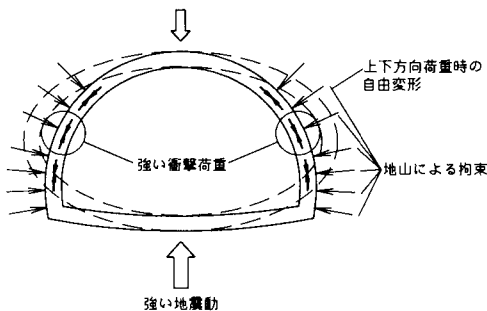


図-13 地震動によるトンネル変形と破壊

4. 山岳トンネルにおける耐震性能

山岳トンネルの用途としては、大きく分類すると、鉄道、道路、水路、送電・通信が挙げられる。ここでは、前述の地震による被害事例として取り上げた鉄道（複線断面）および道路（2車線断面）の2種類に関して、耐震性能に関する考察を述べる。

トンネルの用途によって必要となる耐震性能は若干異なると考えられる。

たとえば、鉄道であれば、トンネル構造自体が大規模に崩壊しなければ、覆工コンクリートの剥落や落下があっても、車両自体が破損しない程度であれば、乗客の安全は確保されるものと考えられるため、原則的に大規模な地震の場合、緊急停止をして地震動の収束を待つこととなる。

一方、道路であれば、覆工コンクリートの剥落や落下に伴い、運転不能となったり、追突等の二次的な事故により、運転者の安全を脅かすこととなる。

以下に鉄道と道路の場合に分けて、地震時の耐震性能に関する事項をまとめた。

(1) 鉄道トンネルにおける耐震性能

鉄道トンネルにおいては、乗客の安全は車両の安定に左右される。大規模な地震発生時には原則的に、車両を緊急停止して地震動の収束を待つこととなる。

したがって、トンネルに要求される耐震性能としては以下の事項が考えられる。

- ① トンネル自体の崩壊、大規模な覆工落下がない。
(車両・乗客の安全確保)
- ② 路盤の浮き、段差、レールの変形が許容内
(車両が脱線しない程度)

(2) 道路トンネルにおける耐震性能

道路トンネルにおいては、大規模地震の発生により運転不能となったり、たとえ覆工コンクリートの落下が比較的小規模であっても、直接被害を受ける可能性が高い。さらに、急停車等に伴い、後続車両の追突等の二次的な事故の発生が考えられる。したがって、道路トンネルの場合は、大規模な地震の場合、まずは、トンネル内で車両を安全に停止し、原則的には避難坑等を利用して坑外に出ることが重要となる。

トンネルに要求される耐震性能としては、

- ① トンネル自体の崩壊、中・小規模な覆工落下がない(運転者・同乗者の安全確保)
- ② 舗装面の浮き、段差、変形が許容内
(車両の走行を阻害しない程度)

- ③ 火災が発生しない、消火が可能
(避難時、運転者・同乗者の安全確保)

以上述べたとおり、山岳トンネルの要求性能としての耐震性能に関して、その他の要求性能とともに、要求性能を照査する項目をそれぞれ抽出し、一覧表に整理したものを表－１に示す。照査項目としては、防災設備や避難路の規模、線形・視距、照度のように、主として走行車両に関連し、道路トンネルにおいて特に重要とされるものが幾つかあるものの、概ね鉄道と道路で共通する項目の多いことが分かった。

さらに、経済性のように、トンネルの機能には直接関連性はないものの、要求性能としては重要と考えられる項目については、ここでは検討項目として抽出した。

5. 山岳トンネルの機能と耐震性能の確保

山岳トンネルの機能としては、一般的に以下のとおり考えられる。

- ①トンネル構造が安定している（安全性）
②トンネルを安全・快適に使用できる（使用性）
③第三者に悪影響を及ぼさない（第三者影響度）

- ④景観・美観に配慮されている（景観・美観）
⑤上記①～④の性能の耐久性を維持する（耐久性）
⑥トンネルの維持管理が容易である（作業性）

表－１を見て分かるように、トンネルの機能を確保するための耐震性能としては、トンネルの安定性能とほぼ同様の照査項目が挙げられる。これまで述べてきたとおり、山岳トンネルの耐震性を確保するためには、これまでの地震による被害事例に学んだ変状要因に対して、既存のトンネルにおいては、

- ①変状部分（ひび割れ等）の剥落対策
②構造的欠陥の改善（背面空洞の裏込注入、変状対策、矢板工法における迫めの剥落対策）
③適切な路盤（舗装版）浮き上がり防止対策が考えられる。さらに、適切な維持管理を継続することによる延命化が重要であると考えられる。

一方、今後新設されるトンネルに関しては、

- ①既存資料による地震被害の影響検討
②特殊条件部分（坑口部、破碎帯等）での覆工補強
③構造的欠陥を残さない施工管理
④初期点検と施工・維持管理記録の整備と保存といった事項について、設計、施工時から必要な対策を計画する予防保全的な対応が必要であると考えられる。

表－１ 山岳トンネルにおける要求性能を評価するための照査項目⁶⁾

要求性能	必要指標	内 空 形状・寸法	内空変位 天端沈下	地形 地質	線形・視距	覆工残余 耐力	覆工の ひび割れ	覆工強度	防災設備 規模	避難路の 規模	照度	騒音・振動 レベル	湧水量・ 水圧・水質	覆工・内装 の耐火性	線形 視距	坑口工の デザイン
耐久性	内空変位が無い	○	○	○	○	○	○									
	荷重に対し覆工安定		○	○	○	○	○	○					○			
	周辺地山が安定		○	○	○	○	○									
	排水性が良い												○			
	耐久性がある	○		○	○	○	○	○					○			
安全性	覆工が剥落しない		○	○	○	○	○	○					○			
	非常時避難路の確保								○ (道路)	○ (道路)						
	耐火性がある					○ (道路)	○ (道路)							○		
	消火活動が可能								○ (道路)	○ (道路)	○ (道路)					
耐震性能	覆工が剥落・落下しない		○	○	○	○	○	○					○			
	非常時避難路の確保								○ (道路)	○ (道路)						
	走行の安定確保			○	○	○	○	○							○ (道路)	○ (道路)
	耐火性がある					○ (道路)	○ (道路)							○		
	消火活動が可能								○ (道路)	○ (道路)	○ (道路)					
利便・快適性能	走行性が良い	○	○												○	
	閉塞感が無い	○ (道路)	○ (道路)													
	必要な照度がある	○ (道路)									○					
	換気が良好			○ (道路)											○ (道路)	
周辺環境への 影響性能	周囲の景観と調和			○ (道路)											○ (道路)	○ (道路)
	騒音・振動が無い											○				
	地下水への影響無い												○			
維持管理性能	点検が容易								○	○						
	補修・補強し易い	○		○	○	○	○	○					○			
経済性	建設費が安価	○		○					○	○ (道路)				○		
	LCCが安価	○							○	○			○			

(道路)や(鉄道)とあるのは、道路もしくは鉄道に関連した項目評価

6. まとめ

これまで、山岳トンネルに関しては、一般的には、耐震性に富んだ構造物であると評価されてきたが、近年、多発する大規模地震により、山岳トンネルの機能を阻害するような被害が報告されている。今回、地震による山岳トンネルの被害事例を整理し、その変状要因の分析により、いくつかの要因が深く関連することが分かった。

地震による主たる変状要因としては、

- ①地震の規模が大きく、トンネルが震源に近いこと
- ②特殊条件（坑口部、断層破砕帯、湧水箇所等）
- ③構造的欠陥（背面空洞、巻厚不足、変状（ひび割れ）、迫めの施工等）

が挙げられるが、これらの各要因に関しては、既存の山岳トンネルに対しても、いずれかの項目が当てはまるものと考えられる。既存のトンネルは、施工技術の進歩に伴い、施工法（矢板工法からNATMへ）、掘削方式（機械、発破工法）、掘削工法（加背割り）といった違いがあり、覆工構造（煉瓦、石積み、コンクリートブロック、現場打ちコンクリート）も異なる。検討にあたっては、これらの違いについても、十分留意する必要がある。

また、今後新設されるトンネルにおいては、設計、施工段階から、トンネル施工において必ず遭遇する坑口部の対策や断層破砕帯における対策についても十分な検討がなされ、適切な対策（覆工補強、インバート設置）を施すことが重要である。

これまで蓄積されてきた社会ストックとしての各種トンネルは我々の社会生活の基盤となるものであるが、1960年代から1980年代始めにかけて建設が急激に増加し、今後、建設から50年を経て、当初の耐用年数を超えるものが急増することが予測されている。一方、トンネル構造物は種々の制約条件の下で重要な役割を担っており、容易に取り替えることができない。これまでのトンネルの維持管理は、定期的な点検、調査結果に基づき、対処療法的に補修、補強対策を繰り返し実施してきた。今後、老朽化したトンネルが増加し、維持管理費が急増することが想定される中で、アセットマネジメントの考え方を導入し、設計、施工、維持管理を一連のものと考え、限られた予算の中で最も有効な時期に最適な対策を行い、これらのトンネルを合理的に維持管理し、延命化、長寿命化を図っていくということが大きな課題となる。

本論文では、山岳トンネルの要求性能としての耐震性能に関して、実際の被害事例に基づき、変状メ

カニズムの分析を行うとともに、関連の深い変状要因について、既存トンネルの維持管理と新設トンネルの予防保全といった観点から、トンネルの要求性能と照査項目としてまとめた。

なお、本研究は土木学会地下空間研究委員会維持管理小委員会の活動成果をまとめたものの一部であり、今後、さらに研究を進め、トンネルの要求性能と合理的な維持管理について検討を進める所存である。本論文が今後トンネルの計画的な維持管理や長寿命化を進める上で参考となれば幸いである。



写真-7 既存トンネル本体工の現況⁷⁾

参考文献

- 1) (社) 土木学会 岩盤力学委員会 トンネルの変状メカニズム p20,2003.
- 2) (社) 土木学会 トンネル工学委員会 新潟県中越地震特別小委員会 報告書 pp.7-10,2005.
- 3) (社) 土木学会 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害、第2章 トンネル・地下構造物、p.84,1995.
- 4) (社) 土木学会 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の応急復旧、補修、補強、第2章 トンネル・地下構造物、pp589,591,675-680,1995.
- 5) 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. 20-38, 2000.
- 6) 岡田正之、藤原康政、山田浩幸、：山岳トンネルの要求性能と照査項目に関する一考察、第10回地下空間シンポジウム、pp.213-220,2005.
- 7) (財) 道路保全技術センター、道路トンネル点検・補修の手引き、近畿地方整備局版、p.3,2001.