

地震被害に基づく山岳トンネルの耐震性評価

亀村勝美

正会員 深田地質研究所 (〒113-0021 東京都文京区本駒込 2-13-12)

E-mail: kame@fgi.or.jp

これまで岩盤内に建設される山岳トンネルは地震に対して安全であるとされ、その構造的安定性の検討は、岩盤掘削時の解放応力や緩んだ地山の自重などの静的荷重に対して行われ、地震に対する検討は、明らかに地震の影響を受けることが想定される特殊条件のトンネルや、地下発電所などの大規模地下空洞においてのみ行われてきた。しかし近年の被害地震では、岩盤中のトンネルにも地震動や地震時断層変位による顕著な被害が報告されている。ここでは既往の地震被害調査結果に基づいて山岳トンネルの耐震性を地震動との関係で評価し、地震動予測地図と合わせて個々のトンネルの地震時リスクを求める。得られたリスクの大小は既存山岳トンネルの耐震補強の優先度評価に有効な指標となる。

Key Words: mountain tunnel, seismic damages, aseismicity, fragility, seismic risk

1. はじめに

一般に、岩盤中に建設される山岳トンネルは地震に対し、

- ・岩盤中の地震動は、表層の軟弱地盤での増幅がないため小さい
- ・岩盤内の構造物は、地表構造物のように固有の振動をするのではなく、周辺岩盤と同一の動きをする

などの理由から強いとされてきた。したがって一般的な山岳トンネルでは、掘削時の地山変位や掘削により生じた地山のゆるみ領域に起因する静的荷重に対する検討は行われるものの、非常に浅い土被り、大断面などの特別な条件を持つトンネル以外で耐震性の検討が行われることはなかった。しかし、近年の大きな被害地震では地表の様々な構造物とともに山岳トンネルにおいても地震被害が生じている。トンネルは、それ自身の直接被害もさることながら、社会基盤構造物としての機能損失に伴う社会的損失の影響が大きいことから、岩盤中のトンネルについてもどのような地震に対しどこまでその構造的安定性を保つことが出来るのか、あるいは被害を受けるとしてどの程度の被害なのか、など具体的な耐震性の評価について明確にすることの重要性が認識され始めた。

ここでは山岳トンネルの耐震性評価の現状を概括した上で地震被害例を示し、山岳トンネルの耐震性に関するこれまでの検討状況を概括する。そして既往の山岳トンネル地震被害調査結果に基づき耐震性を評価し、地震動予測を用いてリスクの概念に基づく耐震性評価を行った。

2. 耐震性評価の変遷と現状

表-1に我が国における主な被害地震と関連する建築物とトンネルの耐震性評価の変遷を示す。構造物に対する耐震性の検討は、1923年の関東地震による甚大な被害を契機に始められている。

関東地震は1923年9月1日、神奈川県相模湾北西沖80km（北緯35.1度、東経139.5度）を震源とするマグニチュード7.9の地震で、神奈川県・東京府を中心とした千葉県・茨城県から静岡県東部にわたる内陸と沿岸の広い範囲において甚大な被害を生じた。これは東日本大震災以前において、我が国最大の自然災害であった。そして、この地震による知見に基づいて、1924年市街地建築物法に世界初の耐震規定（震度0.1）が盛り込まれることになった。

この後、鳥取地震（1943年9月10日、M7.4）、東南海地震（1944年12月7日、M8.0）、三河地震（1945年1月13日、M7.1）、南海地震（1946年12月21日、M8.1）など多くの人的被害を伴う地震を経験するが、戦争中のため被害の実態が公表されることもなく耐震性評価に生かされることもなかった。

終戦後、1948年6月28日の福井地震（M7.1）の被害（死者41名、負傷者453名、家屋全壊802棟）を受けて震度法に対する反省と動的解析の必要性が議論され、1950年には建築基準法（震度0.2、長期と短期の区別）が制定された。その後1964年6月16日新潟地震（M7.5）、1968年7月9日十勝沖地震（M7.9）、1978年6月12日宮城

表-1 主な被害地震と建築分野・トンネル分野における耐震性評価

地震		M	建築分野とトンネル分野における対応
1923.9.1	関東	7.9	【建築】 1924年 市街地建築物法施行規則が改正され都市建築物基準で世界初となる水平震度＝0.1を定める。 【トンネル】 関東地震では多くのトンネルに被害が生じたものの、特段の対応はなされなかった。
1930.11.26	北伊豆	7.3	第2次世界大戦のため地震被害は公表されず耐震評価法も変化なし。
1943.9.10	鳥取	7.2	
1944.12.7	東南海	7.9	
1945.1.13	三河	6.8	
1946.12.21	南海	8.0	
1948.6.28	福井	7.1	【建築】 震度法が見直されるとともに動的解析の必要性が検討された。そして1950年、建築基準法（水平震度＝0.2、長期短期の区別）が施行された。
1964.6.16	新潟	7.5	
1968.7.9	十勝沖	7.9	
1978.6.12	宮城県沖	7.4	
			1979年、大規模地震対策特別措置法において東海地震に係る地震防災対策強化地域が指定される。 【建築】 1981年、建築基準法改定。動的設計法を反映した新しい耐震設計法により建築物の振動特性に対応した地震力を設定し、耐震計算を行う。 【トンネル】 東海道新幹線のトンネルにおいて耐震補強工事が実施される。
1983.5.26	日本海中部	7.7	
			【トンネル】 1985年、高速道路トンネル設計要領において偏圧地形下のトンネルについては水平震度0.2、鉛直震度0.1で設計するとされた。 1986年、トンネル標準示方書において坑口付近は地震の影響も考慮し、RC、インバート閉合とするとの記載。
1993.7.12	北海道南西沖	7.8	
1995.1.17	兵庫県南部	7.3	【トンネル】 1996年、トンネル標準示方書に「兵庫県南部地震によるトンネル構造物の被害による耐震設計の重要性を明らかにした上で、更なる研究が必要」と記載。 1998年、開削トンネルの耐震設計を刊行 1999年、高速道路トンネル設計指針(案)において偏圧地形、地層境界、眼鏡トンネル等で地震の影響を考慮すると記載。
			【建築】 2000年、建築基準法改定。性能設計法を導入。
2004.10.23	新潟県中越	6.8	【トンネル】 多くのトンネルに於て地震被害が生じ、耐震性にかかわる検討が本格的に行われるようになる。 2006年、トンネル標準示方書で開削トンネルと同様のシールドトンネル耐震設計法が規定され、耐震設計が実務となる。
2011.3.11	東北地方太平洋沖	9.0	日本周辺における最大の地震
2016.4.14 4.16	熊本	6.5 7.3	【トンネル】 2016年に刊行された山岳トンネル標準示方書では、耐震性に関する基本的考えが述べられているだけで詳細な記述はない。

県沖地震（M7.4）を経験し、1981年には建築基準法の改正が行われた。そこでは動的設計法の考え方を反映し、建築物の振動特性に応じた地震力を設定し耐震計算を行う新耐震設計法が示された。

さらに1983年5月26日日本海中部地震(M7.7)、1993年7月12日北海道南西沖地震(M7.8)、1995年1月17日兵庫県南部地震（M7.2）などを経験し、2000年に建築基準法が再度改訂され、性能設計法が導入された。

一方、この間トンネルにおける耐震性については、ほとんど論じられることはなかった。トンネル分野における耐震技術への対応状況を土木学会トンネル標準示方書から見てみると、初めて耐震性について記載されたのは平成8（1996）年版の山岳トンネル、シールドトンネル、開削トンネルの各示方書においてで、1995年兵庫県南部地震のトンネル構造物の被害を受けて耐震設計の重要性

を明らかにした上でさらなる検討を行うとしている。

その後、開削トンネルについては1998年にトンネルライブラリー第9号として「開削トンネルの耐震設計」が出版され、具体的な考え方、検討方法が示された。そして2006年制定のトンネル標準示方書においては、開削トンネルとともにシールドトンネルについても耐震設計の具体的な記述がなされ、実務における耐震検討が一般的なものとなった。2007年にはトンネルライブラリー第19号として「シールドトンネルの耐震検討」が出版され、耐震検討の詳細が明らかにされている。

このように開削トンネル、シールドトンネル、都市部山岳工法トンネル（都市部において沖積層などの軟弱地盤中に山岳工法によって掘削される土被りの浅いトンネル）については、耐震設計法として応答変位法、応答震度法、動的応答解析などを用いて定量的に評価する方法

が示されているが、山岳トンネルについては、最新の2016年トンネル標準示方書・山岳工法編においても耐震性に触れている部分はわずかであり、地震被害を受けやすいとされている、

- ①土被りの小さい坑口付近
- ②断層破碎帯や地質の急変部
- ③土砂地山中に施工される場合

について、基本的な知見は述べられているものの具体的にどう条件を設定し、どう設計すればいいのかについては示されていない。これは、山岳トンネルの耐震性を具体的に検討するために必要な知見がまだ十分ではないためと考えられる。

ただし関係機関では、それぞれが実施してきた検討結果に基づき必要な耐震対策を講じている。例えば鉄道トンネルについては、鉄道総合技術研究所による「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル（案）」¹⁾が、道路トンネルについては、土木研究所による「山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書」²⁾が耐震性の評価と補強法を示している。

3 山岳トンネルの地震被害例

(1) 関東地震

関東地震によるトンネル被害については、鉄道省による「大正12年鉄道震害調査書」³⁾に詳細な調査結果がまとめられている。関東一円の鉄道トンネルのうち、特に激しい被害を受けたのは、熱海線（現在の東海道線）小田原―真鶴間で、11トンネルのうち8トンネルにおいて地滑りや斜面崩落による坑口付近の崩落や埋没、トンネル本体部における崩落などの深刻な被害を生じた。

以下に土木学会のデジタルアーカイブ⁴⁾から関東地震によるトンネル被害例を示す。

図-1は、熱海線寒ノ目山トンネルの被災した坑口の状況を示している。坑口部斜面の崩壊により列車の機関車が埋没している。しかし、石積みで作られた坑門はしっかりその形状を保っており、構造的被害を受けていないように見える。すなわちこのトンネル被害は、坑口部の構造的被害ではなく、坑口部の斜面が地震により崩壊し、坑口部を埋めたものである。

これに対し深刻な被害とされる熱海線根ノ上山トンネル、北條線（現在の内房線）南無谷トンネルでは図-2,3に見るように坑内で大規模な崩落が生じている。

一方、同様に深刻な被害とされる中央線与瀬トンネルに関しては、崩壊したトンネルの復旧工事として開削工事が行われている写真が掲載されている（図-4）。土被りの浅いトンネルのかかなりの区間にわたって大規模な崩落が生じたと思われる。



図-1 熱海線真鶴―根府川間寒ノ目山トンネル坑門斜面崩壊⁴⁾



図-2 熱海線早川―根府川間の根ノ上山トンネル坑内の崩落⁴⁾



図-3 北條線（現在の内房線）岩井―富浦間南無谷トンネル坑内崩落⁴⁾



図-4 中央本線与瀬―上野原間の与瀬トンネル陥落部掘削工事⁴⁾

鉄道省の報告書³⁾においてこのような地震被害に対する具体的な耐震性にかかわる記述は「隧道の被害は最も多いものから挙げるとアーチのき裂、側壁のき裂、アーチの切断、坑門の切断であり被害は概して坑門付近で著しく、中央に行くに従い減少する。しかし中央部において地質が軟弱であったり、浅い土被りあるいは地層の断層部もしくは硬軟の変化部では、亀裂崩壊等大被害のものもある。(中略)なお坑門付近に著しい被害があるものは、必ず上部切り取りの崩壊を生じ、また接合部において喰い違い、間隙を生じるものが多い。」に留まり、具体的な耐震性の評価や耐震補強につながるような検討はなされていない。

この調査結果について吉川⁹⁾はトンネルの耐震性の観点から評価を行った。その結果を特殊条件の有無に分類して表-2に示す。ここに特殊条件とは、①不安定地形、地質、②工事中の事故、災害、③震災前の変状、④施工中である。また被害程度の大は改築、応急復旧後運行、中は防護工、応急処置で運行可能、小は当面無対策でも運行可能を示している。このように何らかの特殊条件を有するトンネルの被害率は非常に大きくなっていることが判る。

(2) 2004年新潟県中越地震

2004年10月23日、新潟県小千谷市川口町付近を震源とするマグニチュード6.8の新潟県中越地震が発生し、震度7を記録した川口町や全村避難となった旧山古志村(長岡市と合併)をはじめ、各地の様々な構造物、施設に甚大な被害を生じた。

この地震の震源域付近は山岳地域であり、様々な用途をもった多くの山岳トンネルが建設されている。このためそれまでの地震では顕著ではなかった山岳トンネルの地震被害が数多く生じた。以下に、いくつかのトンネルの被害状況を示す。

土木学会⁹⁾や長岡技術科学大学による地震被害調査⁷⁾によれば、JR東日本の上越新幹線のトンネルでは、浦佐一長岡間にある堀の内トンネル(全長3.3km)、魚沼トンネル(全長8.624km)、妙見トンネル(全長1.459km)、滝谷トンネル(l=2.673km)の4トンネル全てで被害を受けた。この内、堀の内トンネルと滝谷トンネルは一部のコンクリート落下のみであった。これに対し妙見トンネルでは、コンクリート落下の他中央通路に亀裂が入るなどの被害が生じた。また魚沼トンネルではアーチ・側壁コンクリートの崩落、路盤コンクリート・軌道スラブの浮き上がり、中央通路の損傷などの大きな被害が生じた。

一方道路トンネルでは、国道17号の和南津トンネルが、図-5に示すような覆工コンクリートの一部崩落という大きな被災を受けたが、詳細な調査の結果大規模な補修は必要なく、供用しながらの復旧が可能と判断され、

表-2 関東地震によるトンネル被害状況

被害程度	トンネル数			割合		
	全体	特殊条件なし	特殊条件あり	全体	特殊条件なし	特殊条件あり
大	25	5	20	16.3%	4.1%	62.5%
中	11	5	6	7.2%	4.1%	18.8%
小	57	51	6	37.3%	42.1%	18.8%
無	60	60	0	39.2%	49.6%	0.0%
計	153	121	32			



図-5 国道17号川口町和南津トンネルコンクリートの剥落⁹⁾

支保工の設置と吹付コンクリートにより補修が行われた。

これらの被害を見る限り覆工は崩落しているものの、その個所の覆工背面地山は安定しており、崩壊は生じていない。すなわち、このようなトンネル被害は地震時の大きな地山変位に対して覆工コンクリートが耐えられなかったことによって生じたと考えられる。

新潟県中越地震による数多くのトンネル被害のうち特徴的なものに和南津トンネル、木沢トンネルと蕨神発電所水路トンネルがある。

和南津トンネルには、先に示した道路トンネルの他に鉄道トンネルがあり、上下に至近距離で交差している。2本のトンネルとも大規模な補強・補修を必要とする大きな被害を生じている。しかし、その被害は先に示したような天端コンクリートの剥落、アーチと側壁接合部のはらみ出し・圧壊などであり、至近距離での交差トンネルであることが影響していると思われる被害は生じていない。

一方、これに対し次に示す木沢トンネルでは、南北方向を向いた全長305mのトンネルの北側坑口から35mの区間を除いた全線にわたって大小様々なひび割れが生じている^{9,10)}。特に被害の大きいところでは側壁が大きく崩落している。このような被害形態は珍しく、しかもトンネルがNATMによって施工されていることから、その被害のメカニズムについて詳細な検討が行われている。

木沢トンネルは、トンネル軸線の測定の結果、北側ではトンネル軸線直角(東南東)方向に、反対の南側ではトンネル軸(南南東)方向に大きく変位している。すな

わちこのトンネルは北側坑口から80mの地点から南側は南南東方向からの大きな側圧を受けるとともに、同時に南側坑口からトンネル軸線方向に引っ張られている。その相対的な引張り量は約1mにも達している。木沢トンネルの図-6に示すよう被害について、森ら¹¹⁾は「地すべり性の地塊移動」が、小長井ら¹²⁾は「地盤のすべり」が原因と推定している。木沢トンネルの土被りは最大でも22m程度であり、地すべりなどの影響を受けやすい条件にあったと考えられる。

一方蕨神発電所水路トンネルでは、地山の崩壊を伴う被害が報告されている。そのトンネル被害は、トンネル全長4.91kmの内、水路開始地点から862m付近で生じており、この地点での特有の覆工条件（背面空洞）や地山条件（緩み領域の発生）によるものと考えられている。

土木学会トンネル工学委員会は、数多くの山岳トンネルが被災したこの地震について「新潟県中越地震特別小委員会」を設け、地震被害の全容をまとめた⁹⁾。そこには道路トンネル、鉄道トンネル、導水路トンネルなど138本のトンネルについて被害状況が示されている。

138本のトンネルの被害程度をトンネル工法で分類すると表-3のようになる。ここに被害程度大は、大規模な補強・補修を必要とした被害。被害程度中は、補修・補強を必要とした被害。被害程度小は、補修・補強を必要としなかった軽微な被害。被害程度無は、被害報告なしである。全体の18%、25本のトンネルに補修・補強を必要とする被害が生じている。トンネルの工法別で見ると被害程度大と中を合わせた割合は、矢板工法では22%もの割合になっているのに対し、NATMではわずか



図-6 木沢トンネル被害状況⁹⁾

表-3 新潟県中越地震による山岳トンネル被害状況

被害程度	トンネル数				割合		
	全体	矢板	NATM	開削	全体	矢板	NATM
大	11	10	1	0	8.0%	9.6%	3.0%
中	14	13	1	0	10.1%	12.5%	3.0%
小	24	17	6	1	17.4%	16.3%	18.2%
無	89	64	25	0	64.5%	61.5%	75.8%
計	138	104	33	1			

6%であり工法による被害率の差は明らかである。これはトンネルの建設年代による経年劣化の影響もあるが、何よりも工法の違いによりNATMでは覆工の本来持っている耐荷力が発揮されるようになったためと考えられる。

4. 地震動と山岳トンネル被害の関係

3.で示したような山岳トンネルの地震被害と地震との関係は、これまでトンネルと地震断層や震央からの距離で整理され議論されてきた。例えば 橋ら¹³⁾は山岳トンネルに顕著な被害を生じたこれまでの地震について被害の程度と地震のマグニチュード、震源断層からの距離との関係についてまとめ図-7を示している。その上で断層面からの距離が10km以下あるいは小土被り、地山不良、断層などの条件を持つトンネルでは大規模被害を生じやすいとしている。ここに示された関東地震によるトンネル被害は、吉川による関東地震におけるトンネル被害の分布図⁵⁾(図-8)に基づいたものである。

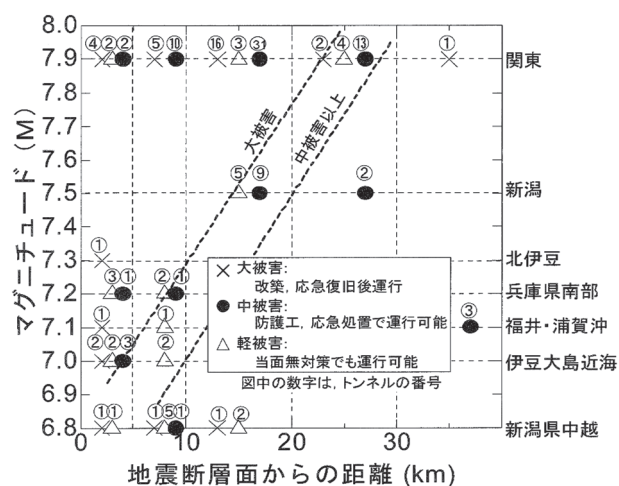


図-7 山岳トンネルの地震被害とマグニチュード・地震断層からの距離の関係¹³⁾

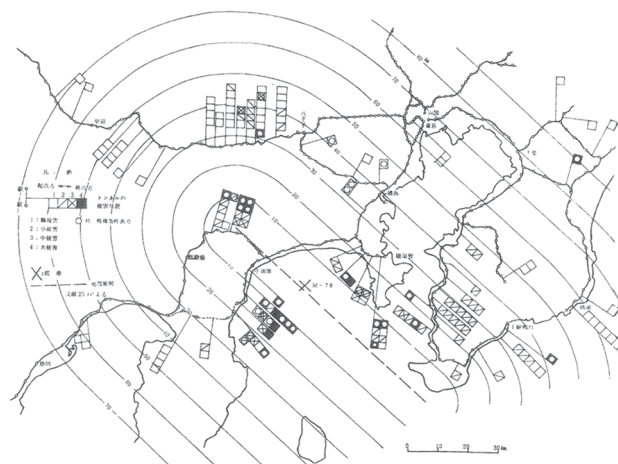


図-8 関東地震におけるトンネル被害と震源断層との関係⁹⁾

しかし図を見ると断層から 10km 以内であっても無被害や小被害トンネルがあり、20km 以上離れていても大被害のものが判る。すなわち断層からの距離だけでは被害の程度を推定することは難しい。そこで具体的な地震動の大きさを示す震度との関係でトンネル被害を評価する。

関東地震の地震動については現在用いられている震度階での評価は行われていないため、ここでは諸井らが住宅被害データに基づき推定した震度分布図¹⁴⁾を用いる。図-9 は、関東地震における膨大な数の住宅被害に基づいて被害率を算定し、その被害率から震度を推定したものである。この図に図-8 を重ね合わせ、震度と被害率の関係性をまとめた結果を表-4 に示す。

震度 6 弱(6-)以下では被害程度小または無であり、震度が大きくなるに従い被害程度中、大が増加していることから震度との関係は明確である。ただし特殊条件ありのトンネルでは、特殊条件なしのトンネルでは被害程度大、中は生じていない震度 6 弱(6-)、5 強(5+)でも大、中の被害が生じていることから、特殊条件の有無はトンネルの耐震性に大きな影響を与えることが判る。

次に、多くのトンネル被害が生じた中越地震の調査結果についても同様の評価を行う。図-10 に示す中越地震における被害トンネルの分布図⁶⁾と、図-11 に示す気象庁発表の震度分布図を重ね合わせ、震度ごとの被害状況をまとめると表-5 のようになる。

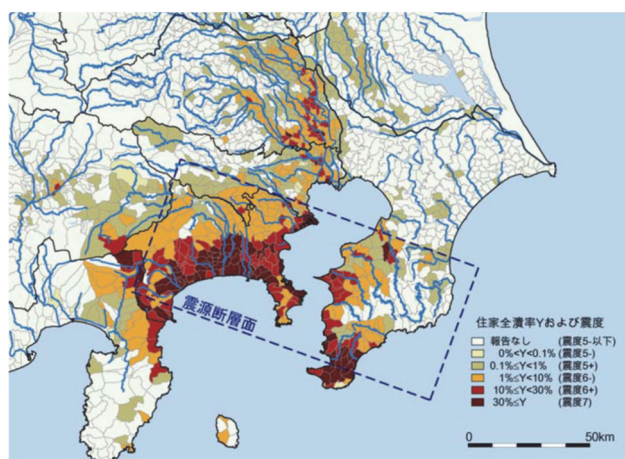


図-9 関東地震における推定震度¹⁴⁾

表-4 関東地震における震度と地震被害程度

震度	特殊条件なしトンネル				特殊条件ありトンネル			
	大	中	小	無	大	中	小	無
7	3	3	13	4	14	3	4	0
6+	1	2	15	2	4	0	1	0
6-	0	0	9	10	1	1	0	0
5+	1	0	14	18	0	2	1	0
5-	0	0	0	26	1	0	0	0

関東地震の場合と同様に明確な震度依存性がみられる。NATM トンネルでは震度 5 弱(5-)までは被害は生じないが、5 強(5+)になると軽微な被害(被害程度小)が生じ始め、6 強(6+)で初めて被害程度大、中が生じている。

一方、矢板トンネルでは6 弱(6-)で被害程度中の被害が生じ始めている。そして震度 6 強(6+)では、およそ 75%のトンネルで何らかの被害が生じ、大規模な補強・補修を必要とする被害程度大も 30%生じている。被害程度大の割合は矢板トンネルでは NATM トンネルのおよそ倍になっており、耐震性の差は歴然としている。

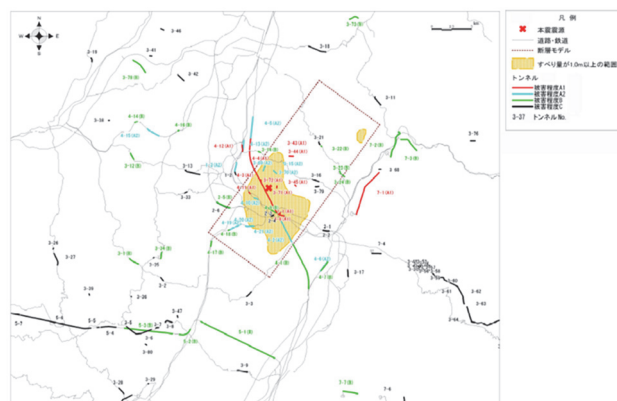


図-10 新潟県中越地震におけるトンネル被害と震源断層との関係⁶⁾

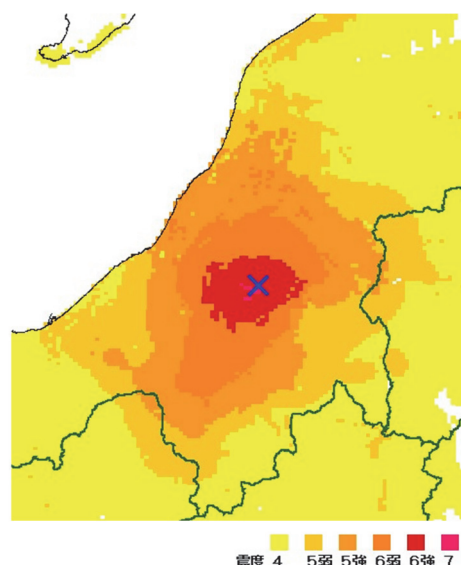


図-11 新潟県中越地震震度分布（気象庁HP防災情報推計震度分布より）

表-5 中越地震における震度と地震被害程度

震度	NATMトンネル				矢板トンネル			
	大	中	小	無	大	中	小	無
6+	1	1	2	2	10	10	5	8
6-	0	0	2	5	0	3	10	11
5+	0	0	2	13	0	0	0	16
5-	0	0	0	4	0	0	2	25
4	0	0	0	1	0	0	0	4

トンネルの耐震性には土被り厚や地質など個々のトンネルの条件が影響すると考えられるが、以下では覆工構造の違いに着目して耐震性について議論する。

表-4, 5の結果を被害割合で示すと図-12, 13のようになる。

6強(6+)での被害率を比べると被害程度大と中を合わせた割合は、関東地震：特殊条件なし:15%<中越地震：NATM:33%<中越地震：矢板:61%<関東地震：特殊条件あり:80%となっており、関東地震での特殊条件なしのトンネルの耐震性が高いことが判る。一方5強(5+)での被害程度小の割合は、中越地震：矢板:0%<中越地震：NATM:13%<関東地震：特殊条件あり:33%<関東地震：特殊条件なし:42%となっており、関東地震でのトンネルには補修を必要としないまでもひび割れ等の損傷が多く発生していたことが伺える。

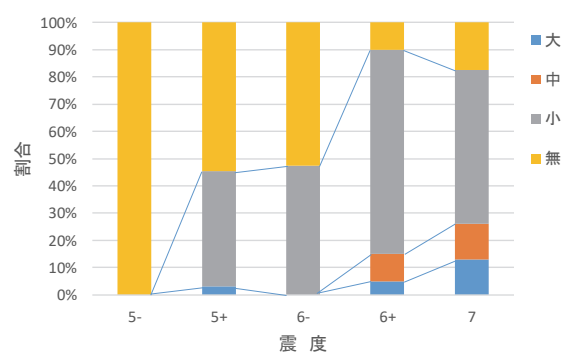
関東地震当時のトンネルの多くは覆工材料として石材やレンガを用いており、無筋コンクリートを主体とする中越地震におけるトンネルとは地震時挙動が異なると考えられる。すなわち石材やレンガで構築された覆工には目地があるため変形性に富んでおり、トンネル周辺地山の地震時の小さい変形に対しては多数の目地で亀裂を生じるものの安定性を失うことはなく、大震度でのより大きな地山変形に対してもある程度まで追従できていると考えられる。

一方、無筋コンクリートの覆工では初期の強度はあるため震度の小さいうちはひび割れ等もあまり生じることではないが、震度が大きくなると変形能は乏しいため局所的にひび割れを生じ、地山変形が大きくなると追従できず補修を必要とするような大きな被害を生じると考えられる。すなわちトンネルの耐震性においては、覆工の変形能(=地山変形追従性)が重要であることが判る。

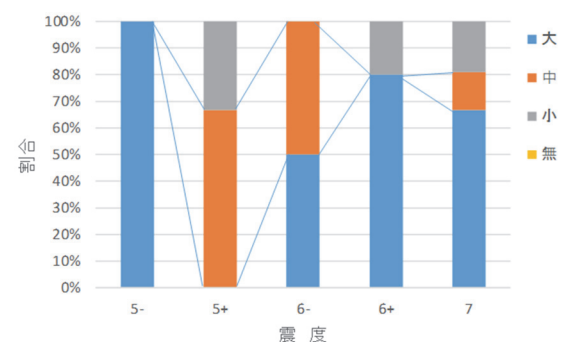
これに対し図-12 b)に示した関東地震：特殊条件ありのトンネルでは、被害程度大と中の割合が非常に大きくなっている。ただしこの特殊条件ありのトンネルの件数は表-4に示すように震度7の21件以外は件数が少なく、震度6弱以下の結果に対する評価に当たっては注意を要する。

いずれにせよ不安定地形、地質、工事中の事故、災害、震災前の変状などの特殊条件を持つトンネルでは、トンネル覆工が本来の耐荷性能(安全性)を発揮することができないため地震時に被害が大きくなる可能性がある。

山岳トンネル施工の基本は地山を極力緩めないことであり、施工開始後に設計時に想定した地山条件と異なる地山に遭遇し、特殊条件の項目に相当する状態になった場合には地山の特性を適切に判断し、十分な対策(支保のランクアップ、増し支保、補強など)を施すことが重要である。しかしながら静的なトンネル安定性を保つための対策工についてはある程度の知見が重ねられている

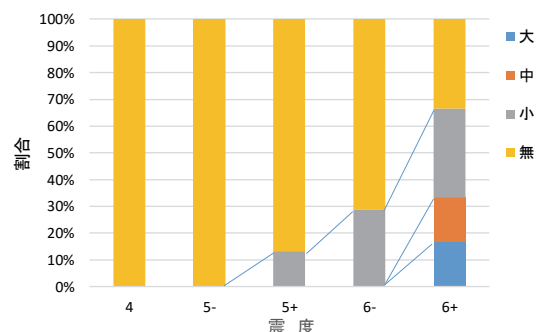


a) 特殊条件なし

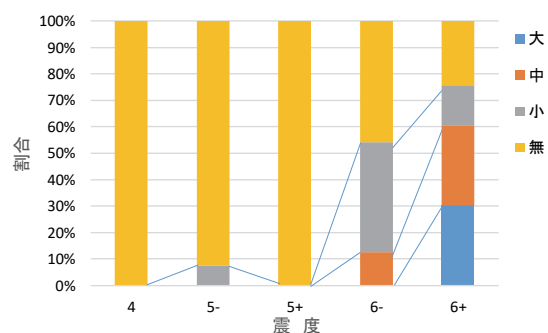


b) 特殊条件あり

図-12 関東地震におけるトンネル被害と震度の関係



a) NATM



b) 矢板トンネル

図-13 中越地震におけるトンネル被害と震度の関係

ものの、地震動に対してはどのような地山条件の場合にその影響が増加し、どのようなメカニズムで大きな被害を生じるのかについてはまだ十分な検討は行われていず、適切な対策をとることは難しい。

一方、図-13のa), b)に示す中越地震におけるNATMと矢板トンネルの被害程度大には有意な差があるが、これは工法の違いに起因する覆工と地山の間の空隙の有無によると考えられる。トンネル覆工がその機能を発揮するためには地山と覆工が密着している必要がある。

5. 山岳トンネルの耐震性評価

鉄道総合技術研究所による「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル（案）」¹⁾では、以下のような鉄道トンネルに対する耐震補強法が示されている。

- ・新潟県中越地震の被害状況から、大規模地震被害を生じる可能性のあるトンネルは確実度I、活動度B以上の活断層から水平距離で5km以内と推定。
- ・地山条件が不良、施工時トラブル有、既往変状有のいずれかに該当するものについて、裏込注入工、ロックボルト工、内面補強工のそれぞれについて背面空洞調査・覆工厚調査、インバート調査を実施した上で要否を判定。
- ・実施に当たっては、現地調査により変状状態を確認し、補強内容を決定する。

しかしながら、これまでの地震でも明らかなように地震断層を事前に特定することは困難であり、また仮に地震断層が特定できたとしても断層からの距離だけで被害の大きさを推定することは難しい。

一方、このマニュアルの総則の解説では「事前対策工の計画においては、まず、地震被害のリスクを考慮したうえで検討対象線区の決定を行う」としている。以下では地震リスクの評価を試みる。

一般に地震リスクの評価は次の3つの関数の評価して、図-14に示すフローに従って行う。

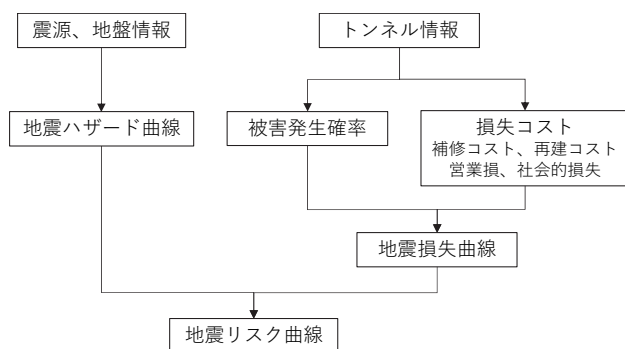


図-14 地震リスクの評価フロー

ここに、

- ・地震ハザード曲線：あるサイトで発生する地震動の大きさとその年間超過発生確率の関係
- ・地震損失曲線：発生した地震動とそれによる損失の期待値の関係
- ・地震リスク曲線：損失期待値とその年間リスク超過発生確率の関係

である。

まず、震源やトンネル位置の地盤情報に基づいて地震ハザード曲線を求めるとともに、トンネル情報からそのトンネルの被害発生確率と被害が発生した場合の損失コストを評価し、地震損失曲線を求める。そしてこの両曲線から共通する地震動の大きさを消去することで地震リスク曲線を描き、さまざまなリスク対応策の効果を評価し、具体的な方策を決定する。

図-14で用いる地震ハザードについては例えば政府の地震調査研究推進本部によって活断層など日本近傍の地震活動の評価がなされており、任意の地点の地震ハザードがネット上のJ-SHIS¹⁵⁾で見ることが出来る。ただしハザードの評価は、地震の活動間隔（最大値とするのか平均値とするのか）や連動、地震動強さの指標（最大速度とするのか最大加速度とするのか）、距離減衰式のばらつきの設定などが評価者によって異なり、結果も異なっていることに留意する必要がある。

地震損失曲線設定に用いる被害発生確率については、被害統計に基づく簡易なものから動的応答解析に基づく詳細なものまで評価方法は様々である。ここでは4.で示した被害調査結果に基づく被害発生確率を用いて評価する。また、損失コストについては対象とするトンネルが地震被害を受けた時の直接被害（復旧費用）と間接コスト（社会的損失、運行停止に伴う営業損など）の和で評価され、事業者および関係組織で検討されるべきものである。

ここでは損失額についての具体的な議論はできないので、狭義のリスク指標として地震リスク＝（トンネルの構造ごとの被害発生確率）×（そのサイトの地震動発生確率）を求め、トンネルごとのリスクの大きさを比較するにとどめる。

具体的な地震リスクの評価の前に、4.で示した山岳トンネルの被害率の妥当性を検討する。図-15は内閣府が作成した資料「東海地震及び東南海・南海地震に係る被害想定手法について」¹⁶⁾に示された木造住宅の全壊率テーブルの震度と全壊率の関係図に山岳トンネル被害程度大のデータを重ねたものである。この図は、阪神・淡路大震災における西宮市、鳥取県西部地震における鳥取市、芸予地震における呉市のプロットデータをもとに、建物が全壊するときの震度が正規分布に従うと仮定して求められたものである。

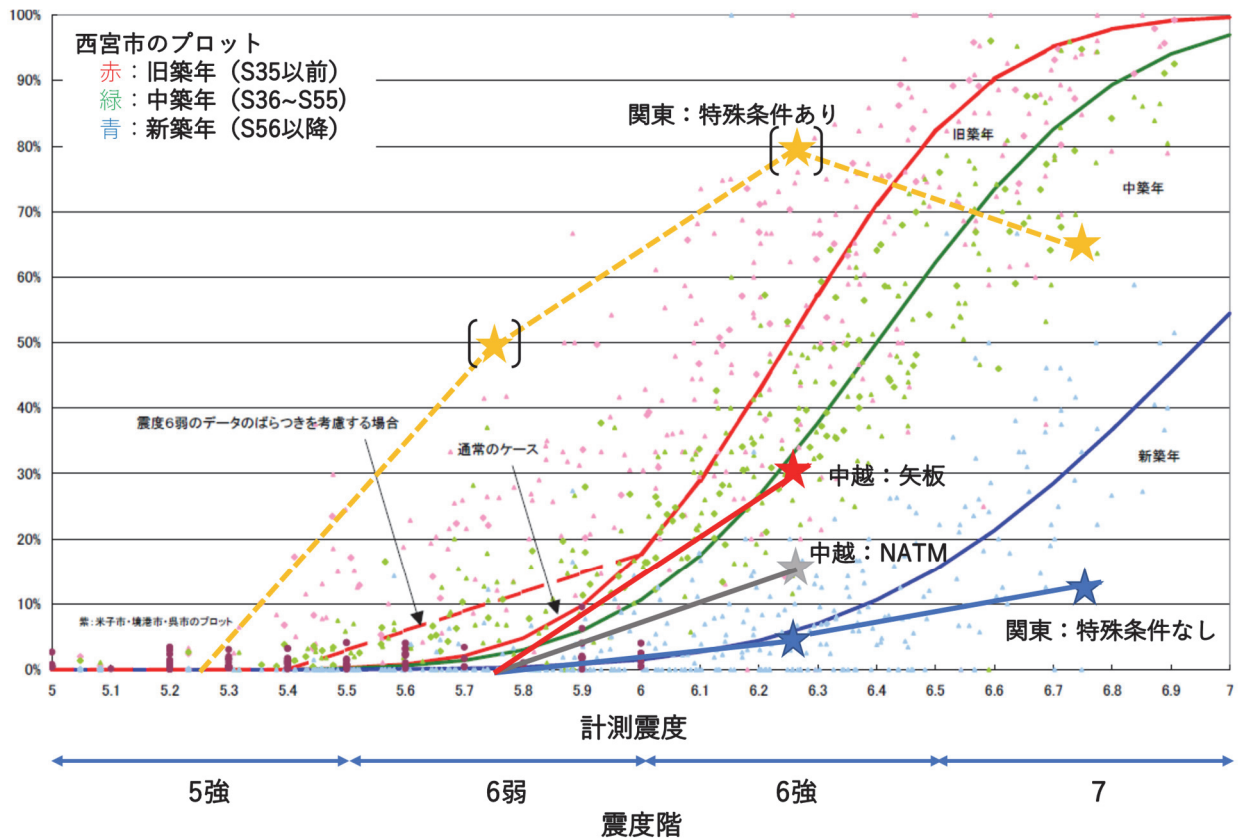


図-15 トンネルの被害率と震度の関係

(文献 16 に示された住宅の被害率に基づく震度と全壊率の関係図に加筆)

住宅の全壊率は築年によって大きく変化しており、S56(1981)年に建築基準法が改正され新耐震基準となつて以降の住宅の耐震性が高くなっていることが判る。関東地震：特殊条件ありの震度6強以下のデータはサンプル数が少ないため信頼性に欠けるので無視して考えると、関東地震：特殊条件ありと中越地震：矢板は新耐震基準となる前の旧耐震基準による住宅の全壊率に近く、中越地震：NATMは新耐震基準による住宅の耐震性に近い耐震性を示す。これらに対し関東地震：特殊条件なしは、新耐震基準による住宅並みかそれ以上の耐震性を持っていることが判る。

このように4. で求めたトンネルの被害率の傾向は、住宅の被害率データに対応しており、妥当な結果であると考えられる。

地震リスクの試算は以下のようにして行う。まず地震発生確率については、地震調査研究推進本部のJ-SHISハザードステーション¹⁵⁾で示される確率分布図(図-16)により設定する。

この確率分布図の任意点をクリックするとその地点における震度ごとの発生確率情報が示される。例として静岡県内の新幹線トンネルと土木学会のある四ツ谷駅周辺における今後30年における震度6強以上の震度発生確率を調べると表-6が得られる。

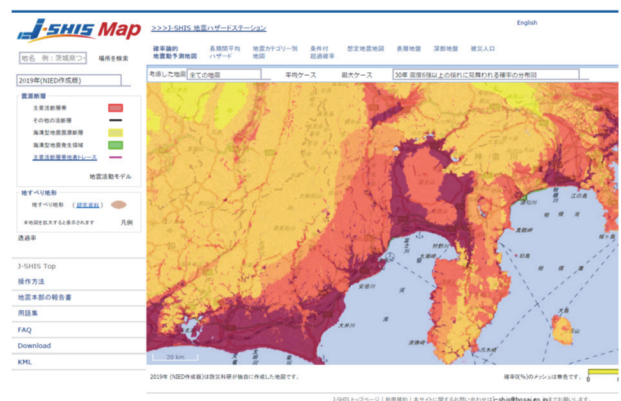


図-16 J-SHISによる地震動予測地図

(<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>)

表-6 J-SHISによる30年地震発生確率(%)

	Aトンネル	Bトンネル	四谷駅付近
5弱以上	82.1	85.5	99.9
5強以上	76.1	77.7	91.8
6弱以上	68.4	72.6	45.6
6強以上	25.9	43.9	7.1

表-7 トンネルの地震リスク試算結果

	6強での 被害程度大の 発生確率	6強以上の発生確率	
		Aトンネル	Bトンネル
		25.9%	43.90%
矢板工法	30.3%	7.8%	13.3%
NATM	16.7%	4.3%	7.3%
耐震補強	5.0%	1.3%	2.2%

このように静岡県では東南海地震等の海溝型巨大地震による大きな揺れの確率が高いのに対し、東京では茨城県沖等のよりマグニチュードは小さいが発生頻度の高い地震による5強程度の揺れの確率が高くなっている。

一方、表-4.5から震度6強での山岳トンネルの被害程度大の発生確率は、矢板工法トンネルで30.3%、NATMでは16.7%、関東地震：特殊条件なしは5.0%となっている。ここで関東地震：特殊条件なしを覆工の変形能がある程度見込める耐震補強後のトンネルと考え、地震リスクの定義に従って被害発生確率と地震発生確率の積を求めると表-7が得られる。

こうして得られた地震リスクを比較評価することによって各トンネルの耐震補強の優先度を検討できる。例えば隣接するAトンネルとBトンネルの工法が同じであるとすると、地震リスクはBトンネルの方がおよそ倍になっており、Aトンネルの被害が小さくてもBトンネルが被害程度大となり路線としての機能は果たせなくなる。この場合、Bトンネルの耐震補強を優先して行うことが望ましい。またAトンネルがNATM、Bトンネルが矢板工法で建設されている場合、Bトンネルは背面空洞への注入などでNATM並みの耐震性とするだけでは不十分であり、覆工の靱性向上のための補強工を行う必要があると判断できる。

このように施工法の違うトンネルごとの耐震性を被害データに基づいて評価した結果と地震動の発生確率を掛け合わせることで地震リスクを評価することが出来、このリスクによって耐震対策の優先度やその内容等の検討を効果的に行うことが出来る。

6. おわりに

巨大地震の発生が予測され様々な施設で強靱化事業が行われている中、山岳トンネルについても耐震補強は急務である。

山岳トンネルの耐震性については、これまでに多くの知見が積み重ねられてきた。しかしそもそも事例が少なく、詳細な検討を行うに足るデータも少ないため、具体的な耐震補強法を策定するには至っていない。とは言えこれまでの多くの研究によって明らかになってきた知見

に基づき何らかの対策を実施すべきであり、ここに耐震対策をどのように進めていくかを判断するための指標の重要性がある。

本論文では関東地震と新潟県中越地震における被害調査結果に基づき地震動とトンネルの被害発生確率の関係を求め、その発生確率とトンネル地点の地震動発生確率の積として狭義の地震リスクを定義し、試算を行った。その結果、この地震リスクはトンネルの耐震対策の推進における判断指標として有用であることを示した。

ただし、本論文で被害確率の評価に用いた被害程度大、中、小の定義は、厳密には関東地震と新潟県中越地震では異なっていること、また新潟県中越地震の震度分布は気象庁による計測震度等のデータに基づいて推定されたものであるのに対し、関東地震での震度分布は住宅の被害率に基づいて推定されたものであり、必ずしも同等ではないことには留意する必要がある。とは言え工法の違いによるトンネルごとの耐震性の違いは明らかであり、リスクの大小を比較することによる判断には問題はないと考えられる。

一方、耐震性の評価に用いた中越地震のデータでは、関東地震のデータで評価していた特殊条件の有無が評価されていない。5.で示したように特殊条件の有無は耐震性に大きな影響を与えるため、これを考慮することによって中越地震でのトンネルの耐震性は変化してくることが考えられる。この点については今後さらに検討を加えていきたい。

地質条件が複雑かつ脆弱な我が国の山岳トンネルでは、設計時に想定した地山条件と実際に施工時に遭遇する地山条件が異なることが多く、支保ランクのアップや補助・補強工の追加を余儀なくされる事例が少なくない。この場合十分な対策が実施されていないと本論文で示されていた特殊条件ありのトンネルに該当する条件となり、耐震性上は非常に脆弱で大きな被害を生じる可能性が高い。地震リスクが高いと判断されたトンネルについては施工時の記録を詳細に調査し、特殊条件に当たる事象が記録されていないかを確認することが重要である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル(案)，2010.11.
- 2) 砂金伸治，小出孝明，日下敦，吉岡知哉，岸田展明：山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書，土木研究所資料，2017.
- 3) 鉄道省：大正12年鉄道震害調査書，1927.
- 4) 土木学会：土木図書館デジタルアーカイブス (<http://www.jsce.or.jp/library/archives/>).
- 5) 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.1123，1979.9.
- 6) 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，2005.

- 7) 長岡技術科学大学：新潟県中越地震被害報告書，2006.3.
- 8) 国土交通省北陸地方整備局：平成 16 年新潟県中越地震への対応，国土交通省北陸地方整備局 HP＞防災情報＞災害対応状況，
(<http://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/index.html>) .
- 9) 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 11 号，2005.
- 10) 土木学会：平成 16 年新潟県中越地震第一次調査団調査速報，2005.
- 11) 森伸一郎，土屋基大：新潟県中越地震における木沢トンネルの被害とそのメカニズム，土木学会地震工学論文集，第 28 巻 182 号，2005.
- 12) 小長井一男，藤田智弘，金井哲男，高津茂樹：2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震による木沢トンネルの被害 活褶曲地帯における地震被害例，土木学会 2004 年新潟県中越地震被害の教訓に基づく今後の課題・対策への提言，2010.
- 13) 橘直毅，野城一栄，小島芳之，朝倉俊弘，野々村政一：兵庫県南部地震(1995 年)，新潟県中越地震(2004 年)におけるトンネルの被害の傾向，第 62 回年次学術講演会，土木学会，2007.
- 14) 諸井孝文，武村雅之：関東地震（1923 年 9 月 1 日）による木造住家被害データの整理と震度分布の推定，日本地震工学会論文集 第 2 巻，第 3 号，2002.
- 15) 防災科学技術研究所：防災ハザードステーション (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>).
- 16) 内閣府：東南海・南海地震に係る被害想定手法について，防災情報のページ＞地震・津波対策＞東南海・南海地震対策＞被害想定手法.

(2020.8.7 受付)

SEISMIC RESISTANCE EVALUATION FOR TUNNELS BASED ON THE DAMAGES INVESTIGATION RESULTS

Katsumi KAMEMURA

Up to now, tunnels constructed in rock are considered to be safe against earthquakes, and their structural stability has been examined against the static loads such as released stress during rock excavation and dead weight of loosened rocks. The seismic investigation has been conducted only in large-scale underground caverns such as underground power plants and in the tunnels under special conditions that are clearly expected to be affected by earthquakes. However, in recent large earthquakes, remarkable tunnel damages due to ground motions and fault displacement during earthquakes have been reported. Here, the seismic resistance of tunnels is evaluated in relation to the seismic motion based on the results of past seismic damage surveys, and the seismic risk of tunnels is evaluated with the earthquake motion prediction map. The magnitude of the obtained risk is an effective index for the priority evaluation of the seismic retrofit of the existing tunnel.