

岩盤構造物の性能評価における課題 －山岳トンネルの耐震性評価の試み－

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues on the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern
- Evaluation on the Seismic Performance of Mountain Tunnel -

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：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、その構造の安定性検討は、岩盤掘削時の解放応力や掘削により緩んだ地山の自重などの静的荷重に対して行われてきた。そして供用後に作用する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の断層変位による顕著な被害が報告されており、山岳トンネルにおいても耐震性の評価は重要である。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、地震動予測と合わせて個々のトンネルの地震時リスクを求めることを試みた。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して用いることが出来る。

キーワード：山岳トンネル、地震被害、耐震性、脆弱性、地震リスク

Abstract: It has been believed that the mountain tunnels constructed in the rock are safe against earthquakes so far, and their structural stability has been usually examined against static loads such as released stress due to tunnel excavation and the weight of the loosened rock. And the seismic performance design has been conducted only in tunnels under special conditions that are clearly expected to be affected by earthquakes and in large-scale underground caverns such as underground power plants. However, in recent damage earthquakes, remarkable damages due to ground motion and fault displacement during earthquakes have been reported even in tunnels in rock. So, it is very important to evaluate the seismic performance of mountain tunnels. Here, the seismic performance of mountain tunnels is evaluated in relation to seismic motions based on the investigated results of past seismic damage, and the seismic risk of individual tunnel is evaluated using with the seismic motion prediction. The magnitude of obtained seismic risk might be an effective index for the evaluation of the priority in the seismic retrofit of the existing mountain tunnels.

Keywords: mountain tunnel, seismic damages, seismicity, 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、それ自身の被害による直接損失もさることながら、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、など具体的に耐震性を評価する手法を明確にすることが求められる。

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示す。そして既往の山岳トンネル地震被害調査結果に基づき地震動との関係で被害確率を評価し、様々な機関により公表されている地震動予測データを用いて算定した地震リスクに基づいて耐震性を評価することを試みた。

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。建築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 80 km（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、この地震被害により得られた知見に基づいて、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る。

この後、鳥取地震（1943 年 9 月 10 日，M7.4）、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

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】 多くのトンネルにおいて地震被害が生じ、耐震性に関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。

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、この間トンネル構造物の耐震性については、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を見ると、初めての耐震性に関する記載は、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、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更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た定量的評価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。

山岳トンネルの耐震性の具体的な評価手法については現在も検討が進められているが、その一方で山岳トンネルを抱える関係機関では、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示している。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）」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」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

様々な地震による山岳トンネルの被害については、亀村（2016）で紹介している。ここでは耐震性の評価に用いることが出来る被害数の多い関東地震と新潟県中越地震における地震被害状況を示す。

3.1 1923年関東地震

関東地震によるトンネル被害については、「大正12年鉄道震害調査書」鉄道省（1927）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。

鉄道省の調査書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き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、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(1979)はトンネルの耐震性の観点から評価を行っている。その結果を表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施工中であり、トンネル構造に何らかの弱点を有することを示している。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」は当面无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における被害率は非常に大きくなっていることが判る。

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			

3.2 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。

土木学会トンネル工学委員会(2005)はこの地震について「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。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のトンネルについて被害状況が示されている。

138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。ここでの被害程度「大」～「無」は、先に示した関東地震における被害程度とはその定義の表現は異なっているが、おおよそ対応しているものとみなす。また矢板工法(在来工法とも呼ばれる)は1970年代以前に主に用いられていた工法で、矢板と呼ばれる木製や鋼製の板を掘削面にあてがい支保工により支え、これらをコンクリートで巻き立て、土圧を覆工で受けるものである。

一方NATM(New Austrian Tunneling Method)は、1970年代以降主流となった工法で、掘削後直ちにコンクリートを吹付け、支保工、ロックボルトなどによって地山自身を安定させることでトンネルを保持する工法で、掘削に伴うトンネルの変形が収束した後に覆工を施す。つまり通常覆工は土圧を受けない。このように両工法には大きな違いがある。

表を見ると全体の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

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			

ネルの工法別で見てみると被害程度「大」と「中」を合わせた割合は、矢板工法では 22 % の割合になっているのに対し、NATM ではわずか 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ているためと考えられる

3.3 地震被害のメカニズムに関する研究の現況

新潟県中越地震における鉄道、道路、水路など様々な用途の山岳トンネルにおける数多くの被害は、それまで漠然と信じられてきた「山岳トンネルは耐震性に富む」が必ずしもそうではないという事実をトンネル技術者に突き付けた。そしてこれを機に、山岳トンネルにおける地震被害のメカニズムに関する多くの研究が開始された。

山岳トンネルにおける地震被害に関する研究論文は 1995 年（兵庫県南部地震）を機に発表され始め、2004 年の新潟県中越地震以降一挙にその数を増やしている。その中で地震被害のメカニズムに関連するものを紹介する。

朝倉ら（2000）は、1995 年の兵庫県南部地震における山岳トンネルの被害を受けて、山岳トンネルの地震被害に関する基本的な知見を得る目的で、関東地震（1923 年）から兵庫県南部地震（1995 年）までの山岳トンネルに被害を及ぼした 17 の地震について分析を行い、こうした山岳トンネルの被災は次の 3 パターンに分類できるとしている。

- ①坑門、坑口部の被害
- ②不良地山区間の被害
- ③断層のずれによる被害

その上でこれらのパターンについて被害のメカニズムを解析的手法あるいは模型実験により検討し、それぞれ地震時の水平震度、地盤のせん断変形、強制変位によりある程度再現できるとした。また②の不良地山区間の被害では、地震力だけでなく地山の緩みによる常時荷重や天端背面空洞の存在が影響していることを指摘した。

野城ら（2009）は、2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震による山岳トンネルの被災を受けて山岳トンネルの地震による構造的被害について調査し、被害のメカニズムについて検討している。

これらの地震による被災トンネルのうち大規模な補強・補修を必要とする被害は、先に示した地震による山岳トンネルの 3 つの被害パターンの内②の不良地山区間の被害が過半を占めることから、野城らはそのメカニズムについて静的載荷試験装置を用いて実験的研究を行った。その結果、覆工背面の空洞の存在により変状が生じやすくなること、インバートによりトンネル構造全体としての剛性を向上させ内空変位や盤膨れを抑制することなどを明らかにしている。

また日下ら（2008）は、新潟県中越地震において大きな被害を生じたトンネルについてそのメカニズムを明らかにすべく数値解析による検討を行った。その結果、トンネル断面内で変化する地質と山から谷へ向かう慣性力によりおおよそ説明できる被害事例もある一方、水平方向の慣性力を用いた応答震度法では被害状況を再現できず、さらに実施した地盤の非線形性を考慮した動的解析によっても破壊形態を再現できなかった事例もあったと報告している。

このほかにも多くの研究で地震被害におけるトンネルとトンネル周辺岩盤との相互作用を明らかにするために被害事例をパターン分けし、被災要因を抽出した上で、それぞれについて室内試験や数値解析により被災メカニズムが検討されている。しかしその検討の多くは、静的な荷重（あるいは強制変形）条件のもとでの数値解析や模型実験によるものであり、地山の非線形性や不整形地盤など顕著な動的効果が表れる条件下での検討は限られている。すなわち現状では一般論として動的効果の影響を論じるまでには至っていない。

また、こうした地震被害のメカニズムに関する数値解析的あるいは実験的シミュレーションによる研究の過程で山岳トンネルの耐震対策も検討されているが、条件によっては対策工が逆効果になる可能性も指摘されている。これは地震被害のシミュレーションが静的検討であれ動的検討であれ、限定されたあるいは理想化された外力条件、構造条件（トンネルおよび岩盤を含む）の下で行われているためであり、一般性を持った対策工を確立するためには、地震被害のメカニズムに関する検討を様々な要因での組み合わせの下で網羅的に行う必要がある。また、必ず静的検討と動的検討の両方を行う必要がある。

以上述べてきたように地震による山岳トンネルの被害については、その事例に対する検討の結果、基本的なメカニズムはある程度解明され、それに対応する対策工も提示されているといえよう。しかし、現存しているトンネルに対してどのような耐震性評価を行えばいいのであろうか。

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（2007）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1を示している。その上で断層面からの距離が10 km以下あるいは小土盛り、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。

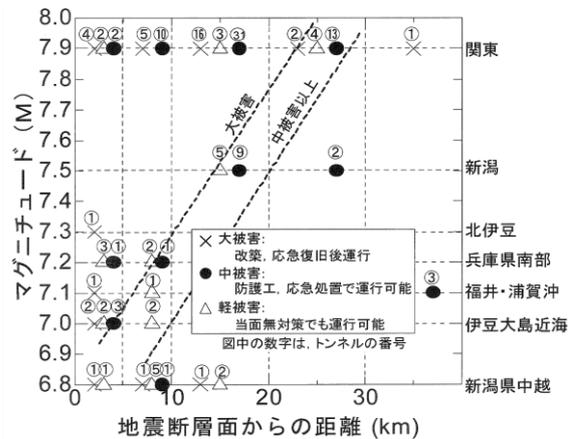


図1 山岳トンネルの地震被害とマグニチュード・地震断層からの距離の関係（橋ら，2007）

図1に示された関東地震によるトンネル被害は、吉川（1979）による関東地震におけるトンネル被害の分布図（図2）に基づいたものである。

図を見ると断層から10 km以内であっても無被害や小被害トンネルがあり、20 km以上離れていても大被害のものがあることが判る。すなわち地震規模と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（2002）が住宅被害データに基づき推定した震度分布図を用いる。図3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 2 の被害分布図を重ね合わせ、震度と被害程度の関係をもとめると表 4 が得られる。

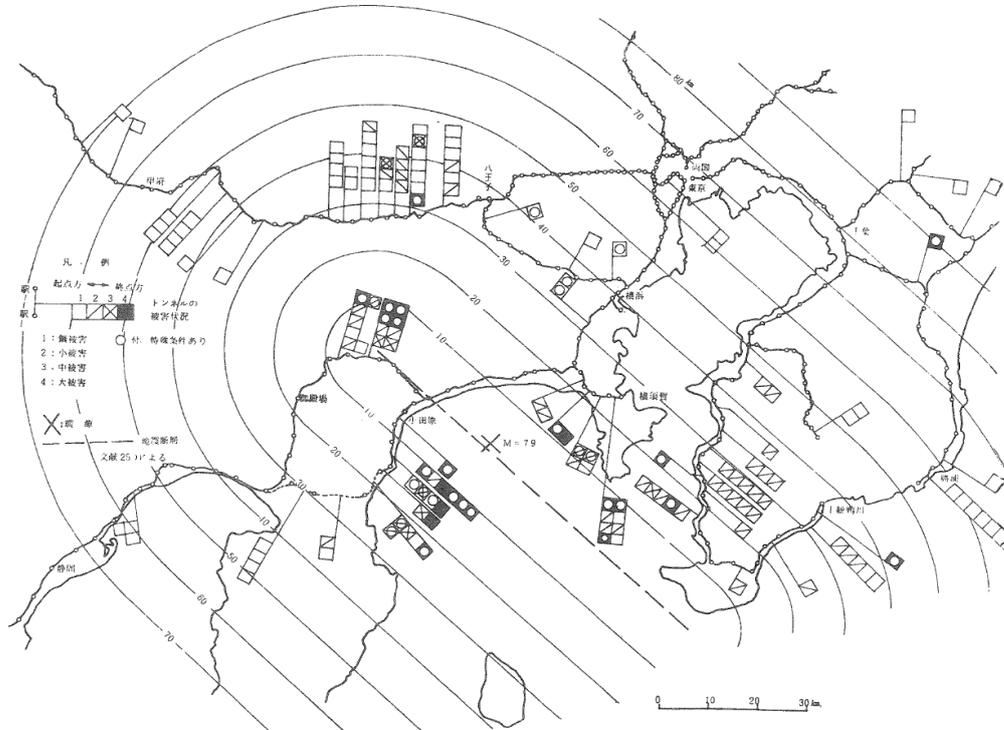


図 2 関東地震におけるトンネル被害と震源断層との関係 (吉川, 1979)

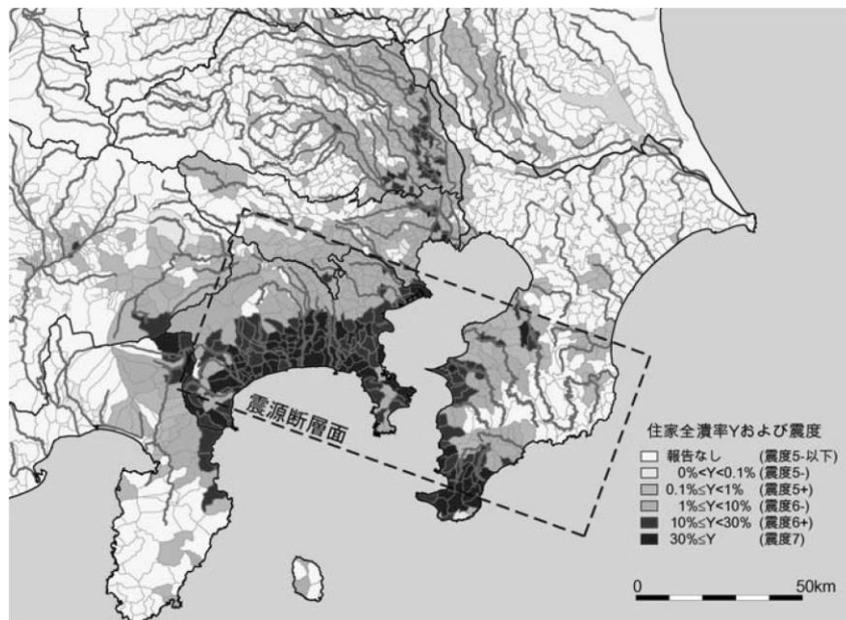


図 3 関東地震における推定震度 (諸井ら, 2002)

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

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、特殊条件ありのトンネルは「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 5 に示す中越地震における被害トンネルの分布図（土木学会トンネル工学委員会、2005）に、図 4 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。

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」は 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。

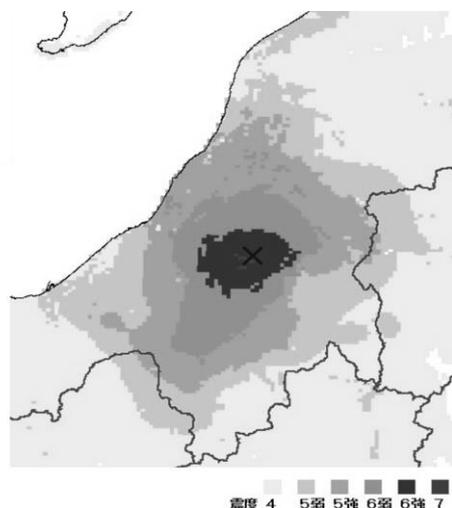


図 4 新潟県中越地震震度分布（気象庁 HP 防災情報推計震度分布より）

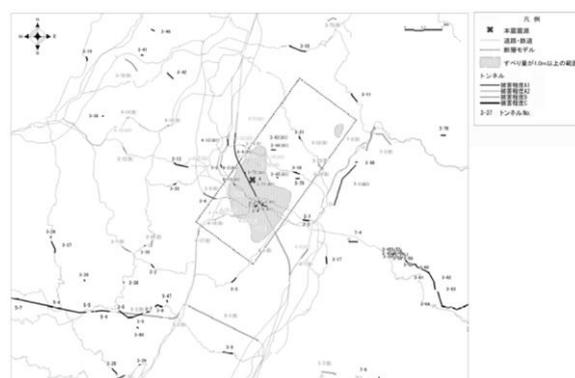


図 5 新潟県中越地震における山岳トンネル震害調査結果（土木学会トンネル工学委員会、2005）

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	3	5	0	3	9	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 6 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、関東地震の特殊条件なし：15%＜中越地震の NATM：33 %＜中越地震の矢板：61 %＜関東地震の特殊条件あり：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、中越地震の矢板：0 %＜中越地震の NATM：13 %＜関東地震の特殊条件あり：33 %＜関東地震の特殊条件なし：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クラック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が用いられており、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力学特性が異なり、地震時挙動も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は不連続体で構成された構造であり、目地があるため変形性に富んでいる。したがって、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これを吸収するため安定性を失うことはなく、より大きな震度での大きな地山変形に対してもある程度まで追従できると考えられる。

一方、無筋コンクリートの覆工は連続体であり、初期の強度はあるため震度の小さいうちはクラック等もあまり生じることはないが、震度が大きくなると変形能は乏しいため局所的にクラックを生じ、さらに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。

これに対し図 6 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、支保や地山の変状を生じた場合には地山の特性を再評価し、適切な対策（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多くの知見が重ねられているものの、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顕在化し、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ないため、適切な対策をとることは難しい。

一方、図 6 の c), d)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一体化している必要がある。

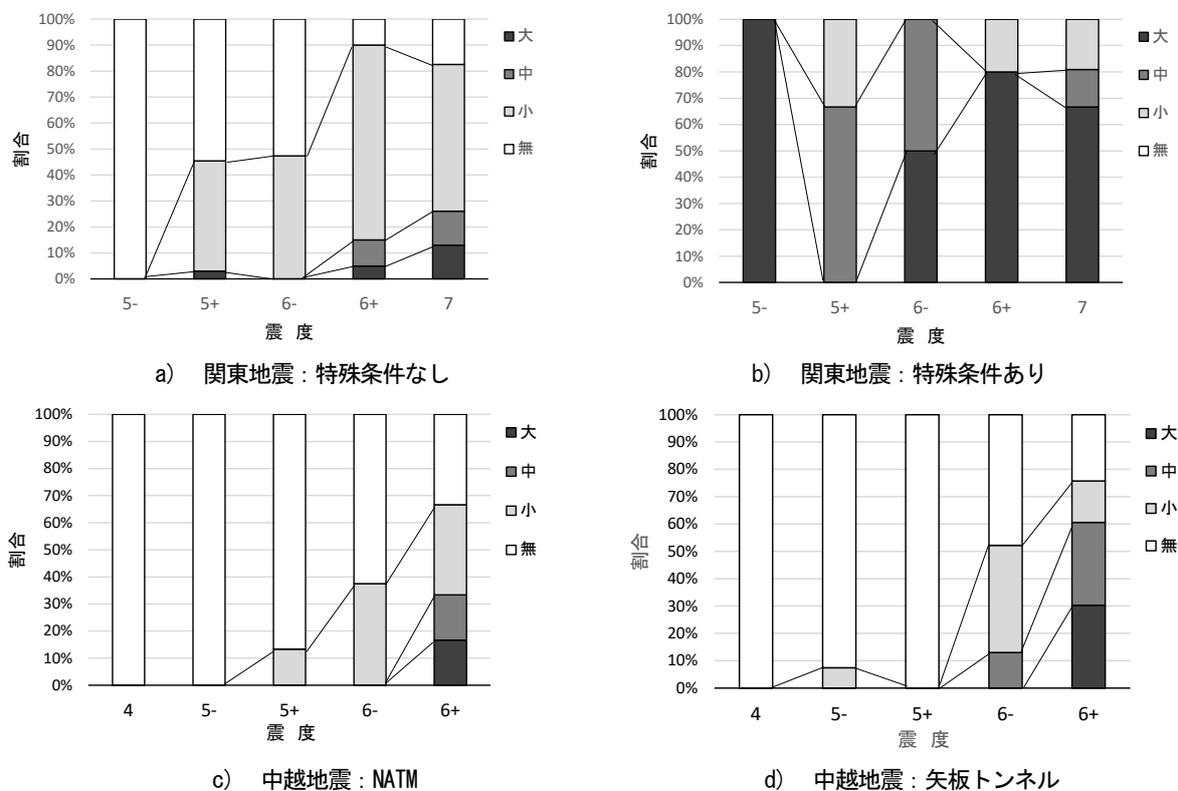


図 6 関東地震、中越地震におけるトンネル被害と震度の関係

5. 山岳トンネルの耐震性評価

鉄道総合技術研究所 (2010)「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル (案)」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 5 km 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の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。そこで、ここでは耐震補強を行うべきトンネルを選定する際の判断指標として地震リスクを用いることを提案し、その具体的評価を試みる。

5.1 山岳トンネルの地震リスク

地震リスクは、地震の発生確率とその地震が発生した時の被害の大きさによって定義される。地震被害を損失額や機能停止期間などの具体的な数値として算出し、地震リスクを評価分析することによって適切な対応策を決めることが出来、すでに多くの分野で活用されている。

山岳トンネルの地震リスクの評価は図 7 に示

すフローによって行われる。ここに、

- ・地震ハザード曲線(地震発生確率)：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(被害の大きさ)：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。

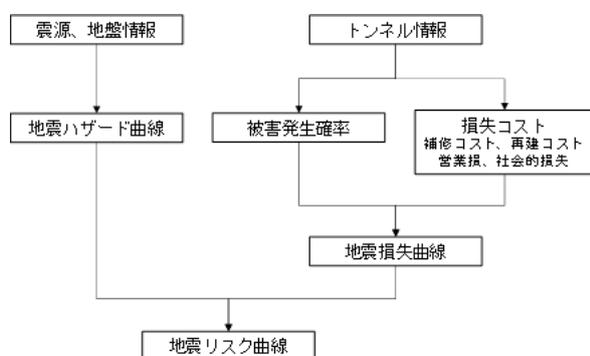


図 7 地震リスクの評価フロー

まず、震源やトンネル位置の地盤情報に基づき地震ハザード曲線を設定するとともに、トンネルに関する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求め、これによってさまざまなリスク対応策の効果を比較検討し、具体的な方策を決定する。

図 7 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-SHIS (防災科学技術研究所 HP) 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・評価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。

5.2 被害発生確率の評価

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についてさらに検討を加える。

関東地震と新潟県中越地震における地震被害調査結果に基づく山岳トンネルの耐震性評価において、トンネルは関東地震では特殊条件なしと特殊条件ありに、中越地震では矢板と NATM に分けて検討された。その結果特殊条件ありのトンネルで、被害発生確率が大きくなることが示された。

この関東地震における被害山岳トンネルの調査結果によれば、調査対象 153 トンネルの内、32 (率にして 21 %) のトンネルにおいて特殊条件があるとされている。この特殊条件は、不安定地形、地質、工事中の事故、災害、震災前の変状、施工中であり、構造上の弱点があることを示して

いる。

一方、中越地震による被害トンネルにもこの特殊条件を有するトンネルが含まれているはずであり、これを分けて評価しないと本来の矢板トンネルと NATM トンネルの耐震性の違いを示すことはできない。そこで中越地震における被害トンネルに占める特殊条件ありのトンネルの推定を試みる。

先に示したような特殊条件の内、不安定地形、地質や震災前の変状は、我が国の複雑かつ脆弱な地質条件下のトンネルにおいては遭遇する可能性は高く、それは関東地震当時のトンネルにおいても中越地震の年代にあっても同様と思われる。ここに施工開始前に想定した地山条件と施工時のそれがいかに乖離しているかを調査した結果がある。

土木学会トンネル工学委員会（2007）は、トンネル工学ライブラリー18 の中で道路トンネルにおける事前調査と事前設計の現状を調査し、問題点を指摘している。それによると事前調査結果に基づく事前設計により設定された支保パターンは、施工時に遭遇する予想外の地質条件により変更を余儀なくされており、例えば表 6 に示すように実に多くのトンネルにおいて設計変更が実施されている。

表 6 2 段階以上の支保ランク変更に関する換算率の総和
(土木学会トンネル工学委員会, 2007)

支保	換算変更率 (%)		
	花崗岩	粘板岩	片岩
A	15.3	82.1	—
B	22.1	48.5	96.3
CI	6.9	36.7	100
CII	5.5	21.1	11.8
DI	0.7	11.5	10.5
DII	0	12.5	0

ここに換算変更率は、事前設計時の支保パタ

ーンの延長距離に占める変更した支保パターンの割合である。

花崗岩ではそれほどではないが、粘板岩と片岩では2段階以上変更される割合が高く、想定した地山条件より悪い地山に遭遇する事例が非常に多いことを示している。特に CI, CII から2段階以上悪い方へということはインバートを必要とする D パターンに変更ということであり、施工の段取り替えなど多くの工期と費用を必要とするばかりでなく、当然、地山の变形量も大きくなっており、地山を必要以上に緩める可能性もある。すなわち支保パターンの大幅な変更は先に示した特殊条件に対応するものと考えることが出来る。こう考えると関東地震で被災したトンネルに占める特殊条件を有するトンネルの割合 21 %は特に大きな数値とは言えない。

そこで中越地震の被災トンネルについても関東地震と同じ割合で特殊条件のトンネルが含まれていると仮定し、特殊条件の無い矢板トンネルと NATM トンネルの耐震性を評価する。表 2 から関東地震における特殊条件ありのトンネルの割合は被害程度「大」で 80 %、「中」で 54 %、「小」で 10 %、「無」で 0 %となっていることが判る。この割合が中越地震でのトンネルでも同じと考えると、表 5 で示した地震被害は特殊条件のあるなしで表 7 のように分けることが出来る。

この結果に基づいて中越地震におけるトンネルの耐震性を評価し山岳トンネルの被害発生確率を求める。

図 8 は、こうして求めた山岳トンネル被害程度「大」の発生確率と震度の関係を示したものである。関東地震の特殊条件ありトンネルの震度 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参考程度として考えると、山岳トンネルは震度 6 弱以下では被害程度「大」を生じる

ことがほとんどないことが判る。震度が6強になると関東地震の特殊条件ありと中越地震の矢板・NATMの特殊条件ありのトンネルは、50%以上の確率で被害程度「大」を生じる。ここにおいてトンネル工法の差はほとんどなく、特殊条件の有

無が支配的になっている。一方、特殊条件なしのトンネルでは震度6強で被害程度「大」を生じるものは10%以下であり、高い耐震性を示している。

表7 中越地震における被害トンネルの分類

	震度	特殊条件なし								特殊条件あり							
		矢板				NATM				矢板				NATM			
		大	中	小	無	大	中	小	無	大	中	小	無	大	中	小	無
件数	6+	2	5	4	8	0	0	2	2	8	5	1	0	1	1	0	0
	6-	0	1	8	11	0	0	2	5	0	2	1	0			1	0
	5+	0	0	0	16	0	0	1	13	0	0	0	0			1	0
	5-	0	0	2	25	0	0	0	4	0	0	0	0			0	0
	4	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0			0	0
	計	2	6	14	64	0	0	5	25	8	7	2	0	1	1	2	0
割合 (%)	6+	11	26	21	42			50	50	57	36	7	0	50	50		
	6-		5	40	55			29	71		67	22				100	
	5+				100			7	93							100	
	5-			7	93				100								
	4				100				100								

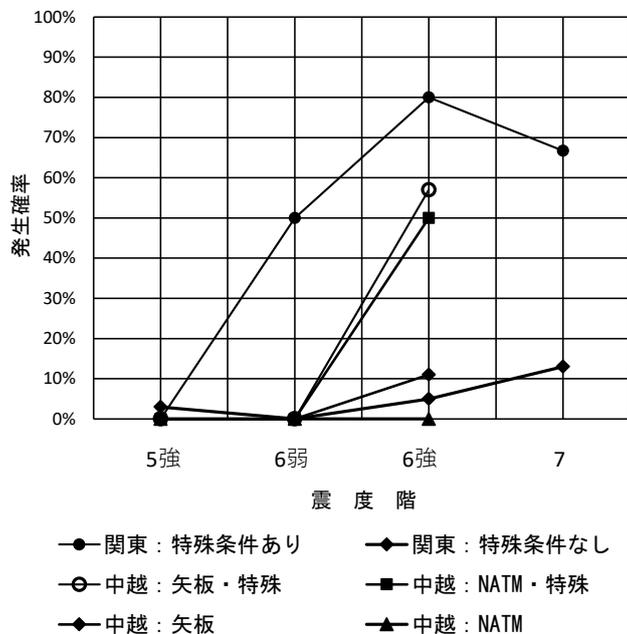


図8 山岳トンネルの被害程度「大」の発生確率と震度との関係

5.3 地震リスクの評価事例

地震リスクの評価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で示される確率分布図（図 9）により設定する。

この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 A、B と土木学会のある四ツ谷駅周辺を対象として各地点における今後 30 年における震度ごとの震度発生確率を調べると表 8 が得られる。

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、7 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 10.5 %、特殊条件なしの NATM では 0 %、関東地震は 5.0 % となっている。また特殊条件ありのトンネルについてはトンネル工法による差は

表 8 J-SHIS による 30 年地震発生率 (%)

	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

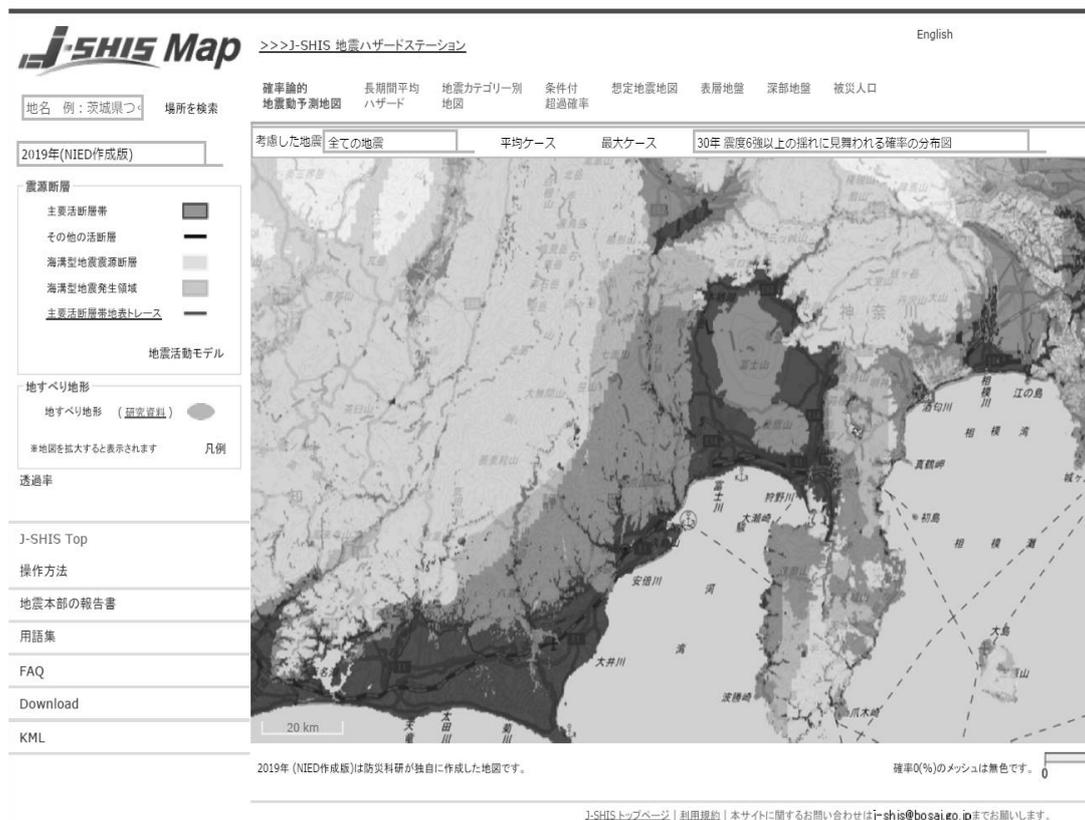


図 9 J-SHIS による地震動予測地図(防災科学技術研究所, 2020)

ないと考え、関東地震、中越地震における被害を合計して評価すると、その被害率は 61.9 %となる。

この被害発生確率に A, B 両トンネル地点の震度 6 強以上の地震発生確率を乗じ、地震リスクを求めると表 9 が得られる。この表において特殊条件の無い NATM によるトンネルの被害可能性 0 となっているが、これは分析対象とした被害トンネルデータの母数が少ないためであり、必ずしも全く被災しないということではない。

表 9 トンネルの地震リスク試算結果

	震度6強での被害程度大の発生確率	震度6強の発生確率	
		Aトンネル 25.9%	Bトンネル 43.9%
中越・NATM	0.0	0.0	0.0
関東地震	5.0	1.3	2.2
中越・矢板	10.5	2.7	4.6
特殊条件あり	61.9	16.0	27.2

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 トンネルが同じ矢板工法であるとすると、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が果たせなくなる可能性がある。この場合、B トンネルの耐震補強を優先して行い A トンネルと同等の地震リスクとすることが望ましい。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には、B トンネルは覆工背面への注入、インバート設置などで地山との一体化を図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し、このリスクを比較すること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

2004 年の新潟県中越地震における多くの山岳トンネルの被災を受けて、その耐震性に関する研究が本格化し、これまでに数々の知見が積み重ねられて来た。そして基準化には至っていないものの鉄道トンネル、道路トンネルにおける耐震性確保のためのマニュアル等は整備され適宜運用されている。

しかし具体的にどのトンネルに対しどのような耐震性確保のための対策を講じるかについて明確な判断を下すのは難しい。それは、山岳トンネルは他の構造物とは異なり、その力学的特性がすべて明確になっている訳ではないことに原因がある。例えば橋梁では、作用する外力と構造物の力学特性を設計段階で明確に設定することが可能であり、それらから求められる安全率に対し関係者が納得できる裕度を設定して構造物の仕様を決定することが出来る。またその仕様に従って施工中の品質管理や完成後の橋梁の性能を確認することもできる。

これに対し山岳トンネルでは、作用する外力はトンネル周辺地山の力学特性に依存し、しかもその大きさなどはトンネル掘削に伴う地山応力解放の過程に大きく左右される。しかし設計時点で地山の力学特性を把握したうえでトンネル掘削の影響を定量的に評価することは困難であり、施工中に想定外の地山条件に遭遇し、事前設計で設定した支保構造の変更を余儀なくされることは少なくない。そして何よりも大きな問題は、トンネル

施工完了時の覆工に作用する応力は計測等によって知ることはできるものの、トンネル周辺地山の安定状態を示す地山応力や力学特性を詳細に把握することは不可能に近いというである。つまりトンネル構造の安全性を具体的な安全率によって示すことはできていないのである。したがってトンネルの供用後に作用する地震による地山や断層の変位・ひずみ、地山のゆるみ領域の拡大に伴う荷重増に対する安全率を具体的に検討することは非常に難しい。

現実的には本報で示したように

①既設トンネルをその施工法、施工時のトラブルの有無などで分類し、

②これまでの被害事例に基づいて評価された被害確率を設定し、

③そのトンネルが将来的に受ける可能性のある地震動の大きさとその発生確率、そしてその時の損害額を評価したうえで地震リスクを算定し、そのリスクの大小に応じた対策を計画的に実施するしかないと思われる。

特にトンネルの施工時のトラブルの有無、その大小は被害確率に大きく影響するため、主要なトンネルについては施工時記録を確認し、特殊条件の有無を確認することが必要である。

文献

朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡茂，大矢敏雄，野城一栄（2000）：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.

亀村勝美（2016）：岩盤構造物の性能評価における課題—山岳トンネルの地震被害と耐震性—，深田地質研究所年報，17，135-152.

日下敦，真下英人，水川雅之，森本智（2008）：地震による山岳トンネルの被害発生メカニズ

ムに関する基礎的研究，トンネル工学報告集 **18**, 15-21.

橘直毅，野城一栄，小島芳之，朝倉俊弘，野々村政一（2007）：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．鉄道省（1927）：大正12年鉄道震害調査書．

鉄道総合技術研究所（2010）：既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル(案)．

土木学会トンネル工学委員会（2005）：新潟県中越地震特別小委員会報告書．

土木学会トンネル工学委員会（2007）：より良い山岳トンネルの事前調査．事前設計に向けて，トンネル工学ライブラリー18，2007．

防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードデータベース (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>)，（2020年9月参照）．

諸井孝文，武村雅之（2002）：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 **2**, 35-71.

野城一栄，小島芳之，深沢成年，朝倉俊弘，竹村次朗（2009）：地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム．土木学会論文集 **C**, **65**, 1045-1061.

吉川恵也（1979）：鉄道トンネルの震災事例調査．鉄道技術研究報告，No.1123.