

山岳トンネルの地震被害に基づく 被害発生確率と地震動の関係について

亀村勝美¹

¹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

兵庫県南部地震において発生した地下構造物の大きな被害を契機に，開削トンネル，シールドトンネルについては地震時挙動とそれに伴う破壊のメカニズムが明らかにされ，設計法の基準化とともに耐震補強が広く実施された．しかし山岳トンネルについては，被害事例に基づく実験や数値解析による多くの研究にもかかわらず，まだ耐震性評価手法は確立されていない．とは言え耐震性評価とそれに基づく耐震補強の実施は急務である．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被害程度の関係で被害確率として評価する．この被害確率と地震動予測地図から得られる地震動発生確率の積として個々のトンネルの地震時リスクを定義し，そのリスクの大小により既存山岳トンネルの耐震補強の優先度評価を行うことができる．

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

1. はじめに

兵庫県南部地震においては，建築物，道路構造物などの地表の構造物に甚大な被害が生じるとともに，それまであまり顕著ではなかった地下構造物においても大きな被害が生じた．このため地中構造物の耐震性についてもその評価手法の確立の必要性が叫ばれ，開削トンネル，シールドトンネルについては地震時挙動とそれに伴う崩壊のメカニズムが明らかにされ，設計法の基準化とともに耐震補強が広く実施された．しかし山岳トンネルについては，被害事例に基づく実験や数値解析による多くの研究にもかかわらず，まだ地震時挙動は明らかにされていない．その結果，現時点においても山岳トンネルの耐震性評価については基準化には至っていない．

この原因として山岳トンネルの地震時挙動に関する地震動，地質条件，力学特性，初期条件となる静的条件下での応力（＝トンネル施工時及び供用時の挙動）などに関する情報が少ないことが挙げられる．すなわち実験や数値解析による地震時挙動の検討において考慮すべき条件が多様で広範囲に及ぶため，問題の解決にはまだ多くの時間と労力を要すると考えられる．とは言え山岳トンネルについても耐震対策の必要性を判断する手法の整備は喫緊の課題である．

そこで著者は，これまでに得られている山岳トンネル

の地震被害調査結果を分析し，地震動の大きさとの関係で耐震性を評価することを試みた．これまでに関東地震，新潟県中越地震について検討を行いリスクの概念を適用することで耐震性の評価が有効であることを明らかにした¹⁾．本報告では，兵庫県南部地震における山岳トンネルの地震被害についても同様の検討を行い，これまでの検討結果と合わせて耐震性評価を行う．

2. 耐震性評価の現状

我が国におけるトンネルの耐震性評価の変遷については，既報²⁾において示した．土木学会トンネル標準示方書で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小さいトンネル）については、耐震設計法として応答変位法、応答震度法、動的解析法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、地震被害を受け易いとされている①土被りの小さい坑口付近、②断層破砕帯や地質の急変部、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）」²⁾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」³⁾が耐震性の評価と補強法を示している。

このような現状に対し、地震リスクの概念を用いて耐震対策の優先度を評価する試みがなされている。浦川らは、これまでに多くの山岳トンネルに被害を生じた地震における被害調査結果について分析し、そこで指摘されているトンネルに大きな被害を生じさせる様々な条件について重回帰分析により、その重要度、相関性を評価した⁴⁾。その結果、地震断層面からの距離、トンネル工法、土被り、トンネル延長を説明変数としてトンネルの被害発生確率を求め、これを用いて対策工を優先すべきトンネルの選定を行っている。一方亀村⁵⁾は、トンネルの被害調査結果を断層からの距離ではなく地震動の大きさ（震度）と関連付け被害発生確率を評価し、地震リスク（＝〔被害発生確率〕×〔地震動発生確率〕）によって対策工の優先度を評価する手法を提案した。

こうした確率に基づく地震リスクの評価に当たっては、その基礎となる被害データの質と量が重要であるが、山岳トンネルについては建築構造物に比べるとその数は圧倒的に少なく、信頼度の高い被害確率を求めることは難しい。しかし様々な立地条件で存在する多くの山岳トンネルについて耐震対策の優先度を判断する目的においては、地震リスクは十分有用な指標として用いることが出来る。

3. 山岳トンネルの地震被害調査結果

(1) 関東地震

1923年の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」⁵⁾に詳細な調査結果がまとめられており、この調査結果について吉川⁶⁾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-1に示す。ここに特殊条件とは、①不安定地形、地質、②工事中的事故、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、「軽」は当面無対策でも運行可能を示している。表から何らかの特殊条件を有するトンネルの被害割合が非常に大きくなっていることが判る。

(2) 兵庫県南部地震

1995年の兵庫県南部地震による地盤関連構造物の被害については、地盤工学会の阪神大震災調査委員会により詳細な調査が行われ山岳トンネルについても被害の全容が報告されている⁷⁾。調査結果では被害程度とその状況の他、長さや土被り、工法、覆工種類、地形地質が示されている。調査対象全110トンネルの内88が在来工法、22がNATMで施工されており、被害程度は「A」：補修を要した被害、「B」：軽微な被害、「無」：被害報告なしの3段階で示されている。この内、地形・地質の項目で当該トンネルを横断する著名な断層名が記載されているものについては、表-1の条件と同一とみなし「特殊条件あり」と分類し表-2の結果を得た。

(3) 新潟県中越地震

2004年の新潟県中越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

表-1 関東地震によるトンネル被害調査結果

被害程度	特殊条件なし	特殊条件あり	計
大	5	20	25
中	5	6	11
軽	51	6	57
無	60	0	60
計	121	32	153

表-2 兵庫県南部地震によるトンネル被害調査結果

被害程度	特殊条件なし		特殊条件あり		計
	NATM	在来工法	NATM	在来工法	
A	1	4	2	4	11
B	5	12	0	1	18
無	14	65	0	2	81
計	20	81	2	7	110

ている。このため山岳トンネルに数多くの地震被害が生じた。

土木学会トンネル工学委員会は、この地震被害について「新潟県中越地震特別小委員会」を設け、被害の全容をまとめた⁸⁾。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「A1」は、大規模な補修・補修を必要とした被害、「A2」は補修・補修を必要とした被害、「B」は補修・補修を必要としなかった軽微な被害、「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・補修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「A1」と「A2」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と考えられるが、何よりも工法の違いによりトンネル構造の本来持つべき耐荷性能に差があるためと考えられる。

(4) 被害調査結果の再評価

表-1～3の地震被害調査結果を見るとその評価項目は同一ではなく、このままでは3地震によるトンネル被害を合わせて評価することはできない。そこで、評価項目の統一を図る。

a) 地震被害程度

3地震における地震被害程度の定義を表-4にまとめて示す。このように兵庫県南部地震については3分類となっており、他の地震の場合とは異なる。そこで被害程度「A」の内、被害状況として覆工の剥落等の大きな構造的ダメージの記載があるものを被害程度「大」と再定義し、そのほかを「中」とした。また「B」を「小」とした。その結果、表-5に示す被害程度が得られた。

一方、新潟県中越地震については関東地震とほぼ同一の定義であり「A1」を「大」、「A2」を「中」、「B」を「小」と定義した。

b) 特殊条件を有するトンネル

表-3に示した新潟県中越地震の被害データには、NATMと矢板工法の種別は示されているが、関東地震や兵庫県南部地震において区別されていた「特殊条件あり」の項目がない。新潟県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、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ためには、これを分けて評価する必要がある。そこで以下のようにして特殊条件を有するトンネルの推定を行った。

表-3 新潟県中越地震によるトンネル被害調査結果

被害程度	NATM	矢板工法	開削工法	計
A1	1	10	0	11
A2	1	13	0	14
B	6	17	1	24
無	25	64	0	89
計	33	104	1	138

表-4 3地震における被害程度の定義

地震	調査時の被害程度と定義		再定義
関東地震	大	改築、応急復旧後運行	大
	中	防護工、応急処置で運行可能	中
	軽	当面無対策でも運行可能	小
	無	被害なし	無
兵庫県南部地震	A	補修・補修を要した被害	大、中
	B	補修・補修を必要としない軽微な被害	小
	無	被害報告なし	無
新潟県中越地震	A1	大規模な補修・補修を要した被害	大
	A2	A1以外で補修・補修を要した被害	中
	B	補修・補修を必要としない軽微な被害	小
	無	被害なし	無

表-5 兵庫県南部地震における地震被害

被害程度	特殊条件なし		特殊条件あり		計
	NATM	在来工法	NATM	在来工法	
大	0	0	2	3	5
中	1	4	0	1	6
小	5	12	0	1	18
無	14	65	0	2	81
計	20	81	2	7	110

3. (1)で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などは、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新潟県中越地震の年代にあっても同様と思われる。

土木学会トンネル工学委員会は、トンネル・ライブラリー18 (2007) ⁹⁾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、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示している。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、施工時に遭遇する想定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。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。

表を見ると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が判る。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、地山の変形量も大きくなり、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的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。

そこで新潟県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-1 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。この割合が新潟県中越地震でのトンネルでも同じと考えると、表-3 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。

4. 地震動と山岳トンネル被害の関係

(1) 関東地震におけるトンネル被害と地震動

関東地震当時、地震動の科学的な評価は行われておらず、現在の震度階による地震動分布を得ることはできない。そこで建築分野で試みられている建物の耐震性評価のための地震被害データに基づく震度階の評価結果を用いる。例えば、諸井ら¹⁰⁾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、その被害率から推定した震度分布図を示している。その図に吉川らが示した被害トンネルの分布図を重ね合わせ、震度と被害程度との関係をまとめると表-8 が得られる¹⁾。

震度 6 弱 (6-) 以下では特殊条件なしのトンネルの被害程度は「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。一方、特殊条件ありのトンネルでは震度 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ていることが判る。

(2) 兵庫県南部地震におけるトンネル被害と地震動

1995 年の兵庫県南部地震では、1996 年まで運用されていた旧震度階では最初で最後の震度 7 (激震) が記録され、機械計測ではなく現地調査によって震度 7 の範囲が推定されている。(1996 年 4 月以降は観測員の体感での震度決定ではなく、機械計測での震度観測に移行している。)

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, p17)

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

表-7 新潟県中越地震における地震被害調査結果

被害程度	特殊条件なし		特殊条件あり		計
	NATM	在来工法	NATM	在来工法	
大	0	2	1	8	11
中	0	6	1	7	14
小	5	14	2	2	23
無	25	64	0	0	89
計	30	86	5	17	137

表-8 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	

表-9 兵庫県南部地震における震度と地震被害程度

震度	在来工法トンネル				NATM トンネル				特殊条件トンネル			
	大	中	小	無	大	中	小	無	大	中	小	無
7				1					1			
6+									1	1		
6-		1	6	4		1	2					
5+以下		3	6	60			3	14	3		1	2

兵庫県南部地震における震度については、気象庁の現地調査に基づく震度 7 の分布は示されているものの、当時十分な数の地震計が設置されていなかったため震度分布ではなく、地点ごとの震度しか示されていない。このため膨大な建築物の被害データや墓石の転倒率データ、電柱の被害分布などから震度分布を推定する試みがなされている。ここでは藤本ら¹¹⁾によって示された震度 6 弱以上、6 強以上の範囲の推定結果に基づき各トンネルにおける震度を設定する。結果を表-9 に示す¹²⁾。

表から数は少ないものの、特殊条件ありのトンネルでは大きな被害が生じていることが判る。また在来工法トンネルと NATM トンネルを比較すると、震度 6 弱 (6-) 以下では被害程度「中」が生じる割合は等しいのに対し、被害程度「小」の発生割合は NATM トンネルの方が大き

くなっている。これは NATM トンネルと在来工法トンネルでは覆工コンクリートと地山の一体性に差があるためと考えられる。

(3) 新潟県中越地震におけるトンネル被害と地震動

次に、多くのトンネル被害が生じた新潟県中越地震の調査結果についても同様の評価を行う。新潟県中越地震における被害トンネルの分布図⁸⁾と、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-10 が得られる。

関東地震の場合と同様に明確な震度依存性がみられる。在来工法トンネルでは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60%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10%生じている。一方NATMトンネルでは震度5強(5+)までは被害は発生せず、5強(5+)になると軽微な被害(被害程度「小」)が生じ始めるものの、「中」、「大」は生じていない。特殊条件なしの場合、在来工法トンネルとNATMトンネルの耐震性の差は明らかである。

特殊条件ありのトンネルでは、5弱(5-)から被害が生じ始め震度が大きくなるに従い被害程度も増し、震度強(6+)では半数以上で被害程度「大」となっている。

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、以下では工法の違いに着目して耐震性について議論する。

(4) 3地震の被害データによる耐震性評価

山岳トンネルに大きな被害を生じた3地震についてトンネル区分、被害程度、震度を統一した結果を表-11に示す。ここに兵庫県南部地震については震度7から6-までの分布図しか得られなかったため、ほかの2地震についても5+以下として評価している。地震被害調査対象となったトンネルは、在来工法トンネルが288、NATMトンネルが50、特殊条件ありトンネルが62、総計400である。

まず在来工法トンネルについて3地震の被害データを合計し、被害割合と地震動との関係を示すと図-1のようになる。228トンネルの内、震度5強以下を経験したものは175あり、その85.1%が被害程度「無」、12.6%が被害程度「小」、何らかの補強補修を必要とした被害程度「中」と「大」は合わせて2.3%であり、在来工法トンネルは震度5強までの地震動に対してはほとんど被害を生じないと言える。震度6弱になると被害程度「小」の割合が増加するものの、被害程度「中」以上の被害が生じる割合はそれほど増えず4%でしかない。被害程度「大」が生じるのは震度6強以上であり、それでも6強で7.7%、7で12.5%とそれほど多いとは言えない。すなわち在来工法トンネルでも特殊条件がなければ大きな地震に対して

もかなりの耐震性を有していることが判る。

図-2には、NATMトンネルにおける被害割合と地震動との関係を示した。NATMトンネルの総数は50と少なく、しかも震度7を経験したものはない。図から震度5強以下および6弱での被害割合は在来工法トンネルの場合とほとんど同じであり、耐震性能はそれほど変わらないと推定される。震度6強でも被害程度「中」以上の被害は生じていないが、対応するデータが4件と極端に少ないこともあり、これをもってNATMトンネルが在来工法トンネル

表-10 新潟県中越地震における震度と地震被害程度

震度	在来工法トンネル				NATMトンネル				特殊条件トンネル			
	大	中	小	無	大	中	小	無	大	中	小	無
6+	2	5	4	8	0	0	2	2	9	6	1	0
6-	0	1	8	11	0	0	2	5	0	2	2	0
5+	0	0	0	16	0	0	1	13	0	0	1	0
5-	0	0	2	25	0	0	0	4	0	0	0	0
4	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0

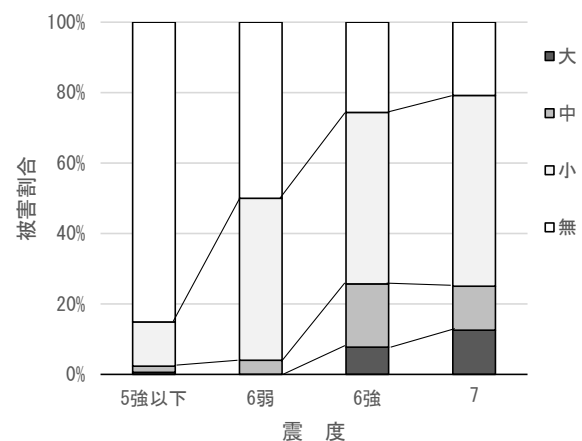


図-1 在来工法トンネルの被害割合と震度の関係

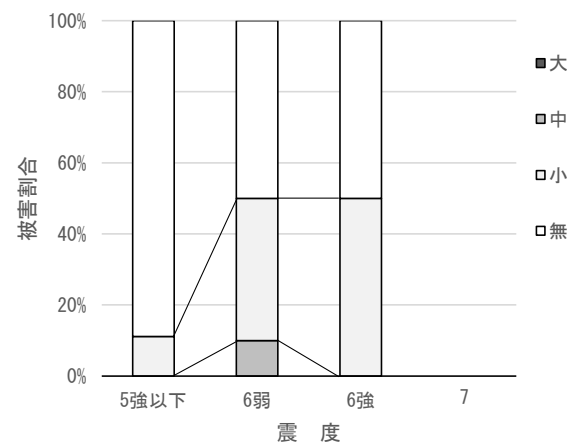


図-2 NATMトンネルトンネルの被害割合と震度の関係

表-11 3地震におけるトンネル被害と地震動の関係

	在来工法トンネル(288)					NATMトンネル(50)					特殊条件トンネル(62)							
	5強以下での被害数																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
関東地震	1	0	14	44	59	—						1	2	1		4		
兵庫県南部地震	0	3	6	60	69	0	0	3	14	17	3	0	1	2	6			
新潟県中越地震	0	0	2	45	47	0	0	1	18	19	0	0	1	0	1			
合計	1	3	22	149	175	0	0	4	32	36	4	2	3	2	11			
	6弱での被害数																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
	関東地震	0	0	9	10	19	—						1	1	0	0	2	
兵庫県南部地震	0	1	6	4	11	0	1	2	0	3	—							
新潟県中越地震	0	1	8	11	20	0	0	2	5	7	0	2	2	0	4			
合計	0	2	23	25	50	0	1	4	5	10	1	3	2	0	6			
	6強での被害数																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
	関東地震	1	2	15	2	20	—						4	0	1	0	5	
兵庫県南部地震	—						—						1	1	0	0	2	
新潟県中越地震	2	5	4	8	19	0	0	2	2	4	9	6	1	0	16			
合計	3	7	19	10	39	0	0	2	2	4	14	7	2	0	23			
	7での被害数																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
	関東地震	3	3	13	4	23	—						14	3	4	0	21	
兵庫県南部地震	0	0	0	1	1	—						1	0	0	0	1		
新潟県中越地震	—						—						—					
合計	3	3	13	5	24	—						15	3	4	0	22		

	在来工法トンネル					NATMトンネル					特殊条件トンネル							
	5強以下での被害割合																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
関東地震	1.7%		23.7%	74.6%	100%	—						25.0%	50.0%	25.0%		100%		
兵庫県南部地震		4.3%	8.7%	87.0%	100%			17.6%	82.4%	100%	50.0%		16.7%	33.3%	100%			
新潟県中越地震			4.3%	95.7%	100%			5.3%	94.7%	100%			100.0%		100%			
合計	0.6%	1.7%	12.6%	85.1%	100%			11.1%	88.9%	100%	36.4%	18.2%	27.3%	18.2%	100%			
	6弱での被害割合																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
関東地震			47.4%	52.6%	100%	—						50.0%	50.0%			100%		
兵庫県南部地震		9.1%	54.5%	36.4%	100%		33.3%	66.7%		100%	—							
新潟県中越地震		5.0%	40.0%	55.0%	100%			28.6%	71.4%	100%		50.0%	50.0%		100%			
合計		4.0%	46.0%	50.0%	100%		10.0%	40.0%	50.0%	100%	16.7%	50.0%	33.3%		100%			
	6強での被害割合																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
関東地震	5.0%	10.0%	75.0%	10.0%	100%	—						80.0%		20.0%		100%		
兵庫県南部地震	—						—						50.0%	50.0%		100%		
新潟県中越地震	10.5%	26.3%	21.1%	42.1%	100%			50.0%	50.0%	100%	56.3%	37.5%			100%			
合計	7.7%	17.9%	48.7%	25.6%	100%			50.0%	50.0%	100%	60.9%	30.4%	8.7%		100%			
	7での被害割合																	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計			
関東地震	13.0%	13.0%	56.5%	17.4%	100%	—						66.7%	14.3%	19.0%		100%		
兵庫県南部地震				100.0%	100%	—						100%				100%		
新潟県中越地震	—						—						—					
合計	12.5%	12.5%	54.2%	20.8%	100%	—						68.2%	13.6%	18.2%		100%		

より高い耐震性を持っているとは言えない。

以上の結果から特殊条件のないトンネルでは、工法の違いによる耐震性の差はそれほどなく、震度6強以上の地震動に対しても大きな被害を生じる可能性は少ないと推定できる。

次に特殊条件ありのトンネルについて被害割合と地震動の関係を示すと図-3のようになる。特殊条件のないトンネルと比較するとその差は歴然としており、震度5強以下でも被害程度「大」が36.4%生じている。震度6弱を経験したトンネルが6件と少ないためこの部分の信頼性は劣るが、震度が6強、7と大きくなるに従い被害程度「大」の発生確率は増大し、60%～70%となる。すなわち特殊条件ありのトンネルは、ひとたび大きな地震動を経験すると大きな被害を生じる可能性は大きいと言える。

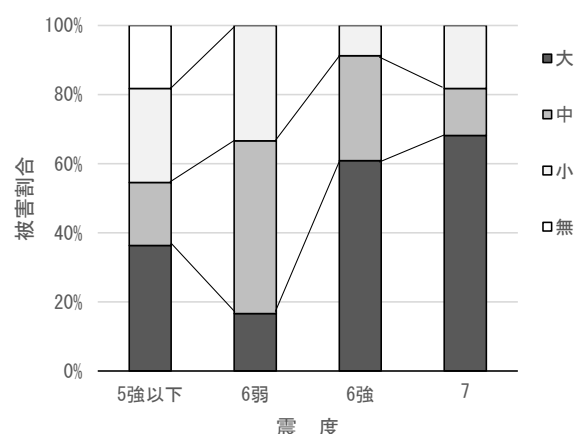


図-3 特殊条件ありトンネルの被害割合と震度の関係

5. 地震リスクによる対策工の優先度評価

山岳トンネルの耐震対策について最新のトンネル標準準方書（山岳工法編）・同解説（2016年改定）において、「トンネルの完成後、地震の影響を受ける可能性がある場合は、条件に応じて構造設計に配慮しなければならない」としている。また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）」²⁾では、地震の影響を受ける可能性について「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」としている。

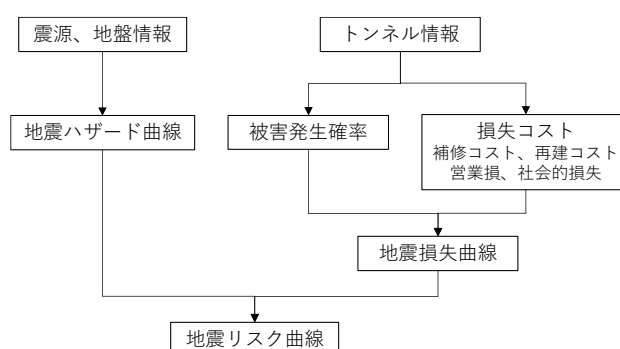
しかしながら、これまでの地震でも明らかにように地震断層を事前に特定することは困難であり、また仮に地震断層を特定したとしても断層からの距離だけで被害の大きさを推定することは難しい。そこで地震の影響を受ける可能性を地震リスクにより評価する。

一般に地震リスクの評価は、図-4に示すフローにより行われる。

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。

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をJ-SHIS¹³⁾で調べることが出来る。

地震損失曲線設定に用いる被害発生確率については、



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

図-4 地震リスクの評価フロー

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が、ここで示した被害調査結果に基づく被害発生確率を用いることが出来る。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）の和で評価されるものであり、事業者および関係組織で検討する必要がある。

損失額についての具体的な議論はできない場合、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）によりトンネルごとのリスクを求め、その大小の比較によって優先度を評価することが出来る。

6. おわりに

本報告では関東地震、兵庫県南部地震、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とし、トンネルの耐震対策の推進における優先度判断指標とすることを提案した。

求められた被害発生確率は、トンネル工法の違いに関わらず特殊条件を有するトンネルにおいて非常に高くなっている。従って今後の耐震対策を進めるにあたっては、何よりもまず対象とするトンネルに特殊条件に該当するものがないかを施工記録等により確認する必要がある。なお施工記録や施工経験者は時間とともに失われていくため、この作業は急務である。

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多い。このような場合トンネルは特殊条件ありに該当し、サイトの地震発生確率が高い場合には地震リスクは大きく早急に対策を講じる必要がある。

このようにして地震の影響を受ける可能性については、地震リスクを用いて検討できるが、もう一つ大きな課題がある。それは特殊条件の各項目に対する耐震補強方法の確立である。山岳トンネルの耐震性については、これまでに様々な研究がなされ多くの知見が積み重ねられてきた。しかしそもそも被災事例が少なく、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。

地震の影響を受ける可能性のあるトンネルの抽出とともに、関係者の協力のもとに系統だった研究を行い、

具体的な対策工法を確立することが望まれる。

参考文献

- 1) 亀村勝美：地震被害に基づく山岳トンネルの耐震性評価，トンネル工学報告集，第30巻，I-30，土木学会，2020.11
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 浦川佳樹，林久資，尹禮分，進士正人：地震リスクを考慮した対策優先トンネルの選定，トンネル工学報告集，第30巻，I-29，土木学会，2020.11
- 5) 鉄道省：大正12年鉄道震害調査書，1927.
- 6) 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.
- 7) 阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書（解説編），第9章地下空間，地盤工学会，1996.3
- 8) 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.
- 9) 土木学会：トンネル・ライブラリー18より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて，2007.
- 10) 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.
- 11) 藤本一雄，翠川三郎：被害分布から推定した1995年兵庫県南部地震の震度分布，日本建築学会構造系論文集 第523号，71-78，1999.9
- 12) 亀村勝美：兵庫県南部地震における山岳トンネル被害に基づく耐震性評価，第76回年次講演会，土木学会，2021.
- 13) 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/>).

(2021.8.6 受付)

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN PROBABILITY OF SEISMIC DAMAGE OF ROCK TUNNEL AND SEISMIC INTENSITY BASED ON THE SEISMIC DAMAGE RECORDS

Katsumi KAMEMURA

After the great damage of underground structures caused by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, the behavior and destruction mechanism of cut and cover tunnels and shield tunnels were clarified, and seismic retrofitting was widely implemented along with standardization of seismic design methods. However, for the mountain tunnels, seismic design methods have not yet been established, despite many laboratory and numerical studies based on the damage cases. So, evaluation of aseismicity and implement seismic retrofitting is an urgent need. In this paper, based on the results of past earthquake damage surveys, the aseismicity of mountain tunnels is evaluated as the damage probability in the relation to the seismic intensity and the damage level. The seismic risk of tunnel is defined as the product of the damage probability and the probability of seismic occurrence. And the magnitude of this risk is an effective index for evaluating the priority of earthquakes for the renovation of an existing mountain tunnel.