岩盤構造物の性能評価における課題 一 地震被害に基づく山岳トンネルの耐震性評価 —

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues on the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern
—Seismic Evaluation of Tunnel Based on Earthquake Damage Data—

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨:岩盤内に建設される山岳トンネルはこれまで地震に対して安全であるとされてきた.しかし 1995 年兵庫県南部地震では多くの家屋や構造物とともに、山岳トンネルにおいても大きな被害が生じた.トンネルは社会基盤構造物の一つであり、そのものの被害もさることながら機能損失に伴う社会的損失の影響が大きく、山岳トンネルについてもどのような地震に対してどのような被害を受けるのか、具体的な耐震性評価が求められるようになった.

筆者は、これまでに関東地震、新潟県中越地震、兵庫県南部地震における山岳トンネルの被害報告に基づいて耐震性の評価を行ってきた。ここではさらに新潟地震、伊豆大島近海地震、新潟県中越沖地震、東北地方太平洋沖地震における被害調査結果を追加し、山岳トンネルの耐震性を震度と被害率の関係で評価した。そして、この震度と被害率の関係と地震発生確率から求められる地震リスクが的確な耐震対策を検討する上で有用な指標となることを示した。

キーワード:山岳トンネル、地震被害、耐震性評価、地震リスク

Abstract: Tunnels constructed in the rock have been considered safe against earthquakes. However, the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake caused large damages to mountain tunnels as well as many houses and other structures. Tunnels are one of the most important infrastructures, and the impact of social loss due to functional damage is significant in addition to the loss of the tunnels themselves.

The author has evaluated the seismic resistance of mountain tunnels based on damage reports of the 1923 Kanto Earthquake, the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake, and the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Here, the author has added the results of damage surveys of the 1964 Niigata Earthquake, the 1978 Izu-Oshima Near Sea Earthquake, the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake, and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, and evaluated the seismic resistance of mountain tunnels in terms of the relationship between the seismic intensity and the damage rate. The results show that the seismic risk can be evaluated by using the relationship between seismic intensity and damage rate and the probability of earthquake occurrence to plan appropriate seismic countermeasures.

Keywords: mountain tunnel, seismic damage, seismic performance evaluation, seismic risk

1. はじめに

地震大国である我が国においては、様々な構造物、施設の耐震性は重要であり、多くの被災事例とそれを踏まえた耐震性に関する研究開発によりその評価手法が整備され、具体的な耐震基準が定められてきた。しかし、岩盤中に建設される山岳トンネルについては地震に対し、深部岩盤中の地震動は小さいこと、トンネルは周辺岩盤と一体となった動きをすることなどの理由から強いとされ、具体的な耐震性の議論はなされてこなかった。

しかし近年の大きな地震では、地表や浅層地下に構築された様々な構造物とともに山岳トンネルにおいても多くの被害が生じている。トンネルは、水供給施設や鉄道、道路などのインフラ施設を構成する構造物で、建築物のように面的に密集して建設されるのではなく、広い地域に点在するものである。したがって巨大な地震でもない限り数多くのトンネルが被災することはなく、その被害の影響は建築物ほど深刻には捉えられてこなかった。

一方、トンネルなどのインフラ施設の地震時被害は、それ自身の被害による損失もさることながら、その機能損失に伴う地震直後の災害対応や地震後の復旧活動への影響は大きく、社会的損失は計り知れない。

したがって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っことができるのか,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を明確にすることは重要である.

ここでは具体的な耐震性の評価を行うために 多くの山岳トンネルに被害を与えた主要な地震に おける調査結果に基づき、地震動の大きさ(震度) と被害発生確率の関係を評価する。そしてこの震 度と被害発生確率とトンネル位置における地震発生確率を用いて求められる地震リスクが,具体的な山岳トンネルの耐震性評価における有用な指標となることを示す.

2. 山岳トンネルの地震被害調査事例

大規模な地震による山岳トンネルの被害については亀村(2016)で紹介した。そして、その中から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ついて各被害トンネルとその地点における震度の関係を調べ、山岳トンネルにおける被害発生確率として示し、この発生確率と地震発生確率とを合わせて地震リスクとして耐震性を評価する方法を示した(亀村、2020)。

その後、こうした耐震性の評価に用いるデータを拡充させることを目的に、関東地震と新潟県中越地震における被害評価と同様の調査結果が示されている兵庫県南部地震について同様の評価を行った(亀村,2021).

ここではさらにデータの拡充を図るべく,これらの被害事例に加え新潟地震,伊豆大島近海地震,新潟県中越沖地震,東北地方太平洋沖地震における被害調査結果について検討する。そしてすべてのデータを用いて山岳トンネルの地震による被害程度と震度の関係を再評価する。以下では関東地震,兵庫県南部地震,新潟県中越地震についても簡単に紹介する。

2.1 1923 年関東地震

1923年9月1日に発生した関東地震(M7.9)では、関東の広い範囲で甚大な被害が生じた。この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」に詳細な調査結果がまとめられており、これに基づいて吉川

(1979) は山岳トンネルにおける地震被害状況について検討した. その結果を図1と表1に示す.

表において特殊条件とは、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施工中であるなどトンネルの構造上の弱点である。また被害程度の「大」は「改築、応急復旧後運行」で復旧までに長期間を要した場合、「中」は「防護工、応急処置で運行可能」で比較的短期間で復旧した場合、「小」は「当面無対策でも運行可能」であった場合を示している。

表1 関東地震におけるトンネル被害状況.

特殊条件	大被害	中被害	小被害	無被害	計
なし	5	5	51	60	121
あり	20	6	6	0	32
計	25	11	57	60	153
なし	4.1%	4.1%	42.1%	49.6%	100.0%
あり	62.5%	18.8%	18.8%	0.0%	100.0%
計	16.3%	7.2%	37.3%	39.2%	100.0%

これ以降に示す地震被害事例は、基本的に吉 川がここで行った分類に準じるものを選択している.

2.2 1964 年新潟地震

1964年6月16日に発生した新潟地震(M7.5)では、石油コンビナートの大規模火災や橋梁の落橋をはじめ多くの被害が生じた。特に液状化現象によるアパートの倒壊や側方流動による建物被害などが初めて確認され、これ以降の研究へと繋

表 2 新潟地震におけるトンネル被害状況.

特殊条件	大被害	中被害	小被害	無被害	計
なし	0	1	10	83	94
あり	0	6	3	0	9
計	0	7	13	83	103
なし	0.0%	1.1%	10.6%	88.3%	100.0%
あり	0.0%	66.7%	33.3%	0.0%	100.0%
計	0.0%	6.8%	12.6%	80.6%	100.0%

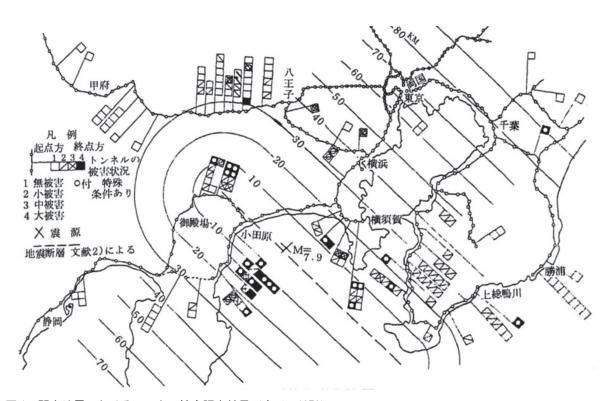


図1 関東地震におけるトンネル被害調査結果 (吉川, 1979).

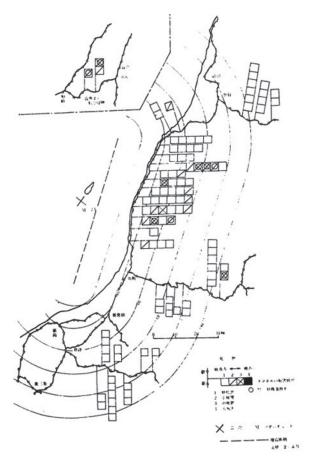


図 2 新潟地震におけるトンネルの被害調査結果 (吉川、1979).

がった. トンネルについても関東地震以来の数の 被害が生じた.

この地震によるトンネル被害についても、吉川 (1979) が図 2 のような調査結果を示している. その被害状況は表 2 に示す通りであり、関東地震の場合と同様、特殊条件を持つトンネルの被害確率が高くなっていることが判る.

2.3 1978 年伊豆大島近海地震

1978年1月14日に発生した伊豆大島近海地震 (M7.0) は、伊豆半島南東部の静岡県加茂郡河津 町から伊豆大島西方沖にかけて概ね東西方向に延 びる稲取断層の活動によるもので、地震調査研究 推進本部の推定では1回の変位量は1-2m程度

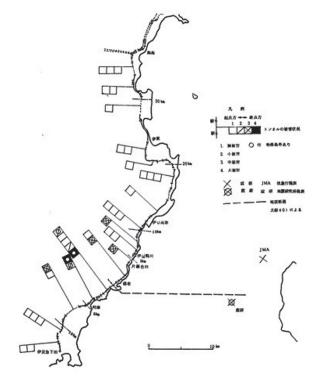


図3 伊豆大島近海地震におけるトンネルの被害調査 結果(吉川, 1979).

表 3 伊豆大島近海地震におけるトンネル被害状況.

特殊条件	大被害	中被害	小被害	無被害	計
なし	0	0	1	27	28
あり	2	4	2	0	8
計	2	4	3	27	36
なし	0.0%	0.0%	3.6%	96.4%	100.0%
あり	25.0%	50.0%	25.0%	0.0%	100.0%
計	5.6%	11.1%	8.3%	75.0%	100.0%

とされている.

震源に近い伊豆半島東海岸に位置する伊豆急 行線は急峻な海岸線を走り、多くのトンネルがあ る. その地震被害についても吉川 (1979) が調 査し、図3を示してしている. その被害状況は表 3のようにまとめられ、やはり関東地震の場合と 同様特殊条件を持つトンネルの被害確率が高いこ とが判る.

2.4 1995 年兵庫県南部地震

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震

(M7.3) は淡路島北部を震源とする直下型地震で、 多くの死者を出すとともに様々な社会インフラに も甚大な被害を及ぼした.

この地震による地盤関連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(地盤工学会、1996). 調査対象 は図4に示す110トンネルであり、うち88が在 来工法、22がNATMで施工されている.

調査結果に示された被害程度は、「A:補修を要した被害」、「B:軽微な被害」、「被害報告なし」の3段階となっているが、ここでは関東地震における被害程度と整合性をとるため、「A」を報告書に示された各トンネルの被害状況の内容によって「大:大規模な補強・補修を必要とした被害」と「中:補修・補強を必要とした被害」に分け、「B」

を「小」とした. また地形・地質の項目で断層名が記載されているものについては, 関東地震の場合と同様「特殊条件あり」とした. その結果, 調査対象の110トンネルの被害内訳は表4に示すようになった.

また表においてトンネル工法として矢板工法 (在来工法とも呼ばれる) と NATM (New Austrian Tunneling Method) がある. これは 1970 年代に

表 4 兵庫県南部地震におけるトンネル被害状況.

工法	特殊条件	大被害	中被害	小被害	無被害	計
矢板	なし	0	4	12	65	81
)\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\	あり	3	1	1	2	7
NATM	なし	0	1	5	14	20
14771111	あり	2	0	0	0	2
計		5	6	18	81	110
矢板	なし	0.0%	4.9%	14.8%	80.2%	100.0%
7,10	あり	42.9%	14.3%	14.3%	28.6%	100.0%
NATM	なし	0.0%	5.0%	25.0%	70.0%	100.0%
II A I III	あり	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
計		4.5%	5.5%	16.4%	73.6%	100.0%

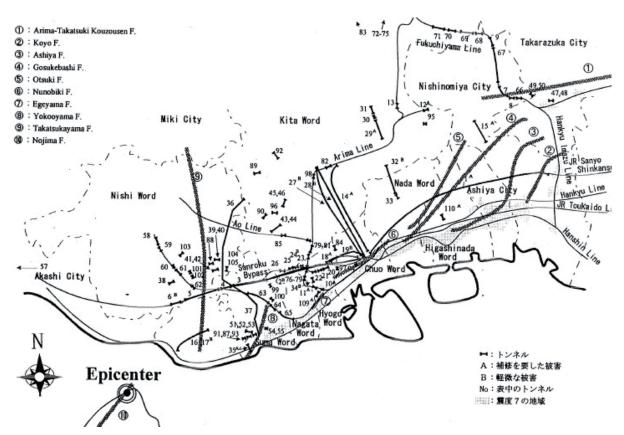


図 4 兵庫県南部地震におけるトンネルの被害調査結果 (地盤工学会, 1996).

なってそれまでの矢板工法(矢板と呼ばれる木製や鋼製の板を掘削面にあてがい鋼製や木製の支保工により支え、これらをコンクリートで巻き立てた覆工で土圧を受ける)から次第にNATM、すなわち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へと移行してきたという背景がある.

このように二つの工法には大きな違いがある が、共に特殊条件を持つトンネルの方が被害確率 は高いことが判る.

2.5 2004 年新潟県中越地震

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震 (M6.8) は、山岳部に震源を持つ直下型地震で多くのトンネルに被害を生じた。この地震については土木学会トンネル工学委員会の新潟県中越

地震特別小委員会が調査を行い、図5に示すような被害トンネル分布を示している(土木学会、2005). これらの被害トンネルの内容については 亀村 (2020) を参照されたい.

図 5 におけるトンネルの被害程度は「A1」,「A2」,「B」,「C」と分類されているがここではそれぞれ「大」,「中」,「小」,「無」と読み替え表5 を得た.

表 5 新潟県中越地震による山岳トンネル被害状況.

工法	大被害	中被害	小被害	無被害	計
矢板	10	13	17	64	104
NATM	1	1	6	25	33
開削	0	0	1	0	1
計	11	14	24	89	138
矢板	9.6%	12.5%	16.3%	61.5%	100.0%
NATM	3.0%	3.0%	18.2%	75.8%	100.0%
開削	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%
計	8.0%	10.1%	17.4%	64.5%	100.0%

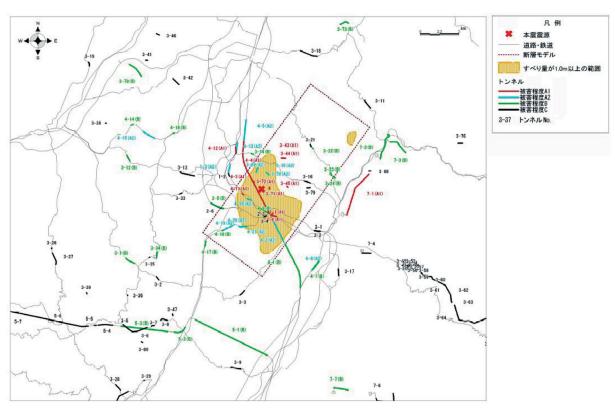


図 5 新潟県中越地震におけるトンネルの被害調査結果 (土木学会, 2005).

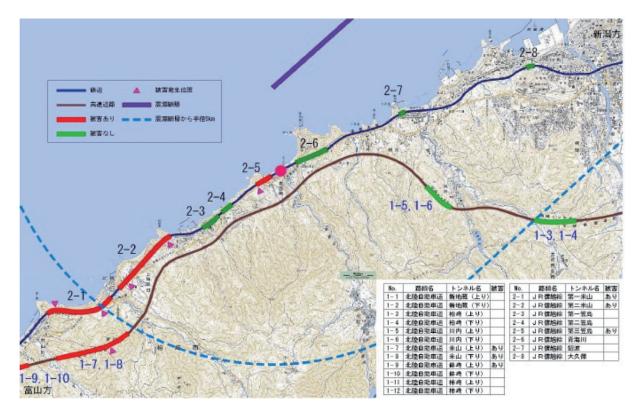


図 6 新潟県中越沖地震におけるトンネルの被害調査結果 (土木学会, 2008).

表 6 新潟県中越沖地震によるトンネルの被害状況).

特殊条件	大被害	中被害	小被害	無被害	計
なし	0	0	0	14	14
あり	4	1	1	0	6
計	4	1	1	14	20
なし	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
あり	66.7%	16.7%	16.7%	0.0%	100.0%
計	20.0%	5.0%	5.0%	70.0%	100.0%

2.6 2007年新潟県中越沖地震

2007年7月16日の新潟県中越沖地震(M6.8)は、2004年の新潟県中越地震以来の被害地震で、柏崎刈羽原子力発電所を含む広い地域で震度6強を観測した.

この地域には海岸沿いに鉄道と高速道路が整備されており、急峻な地形から山岳トンネルが多く建設され地震被害も生じている。これらの被害について土木学会トンネル工学委員会は調査を行

い, 北陸自動車道 12, JR 信越線 8 のトンネルに ついて図 6 のような被害状況を示している (土木 学会, 2008).

報告書において被害ありとされている6トンネル(図中赤線)の被害状況及び補修に関する記載内容から、被害程度を判定した結果は表6のようになった.

例えば図中2-1の第一米山トンネル(鉄道)では二か所で天端コンクリートの剥落,天端の圧ざ,アーチ肩部でのコンクリートのせん断ひび割れなどの大きな被害が生じるとともに地表では大規模な斜面崩壊が発生していたことが報告されており,特殊条件ありと判断した。その他のトンネルについても被害発生位置が性質の異なる地層の境界部であった,既変状部や裏込め未実施部などであったことなどが報告されており,6トンネルすべてについて特殊条件ありと判断した。

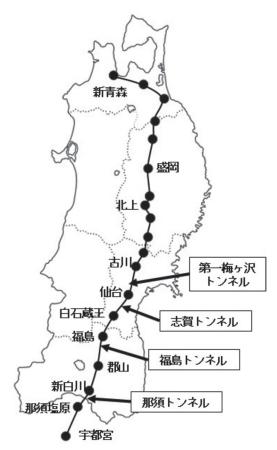


図7 東北地方太平洋沖地震による東北新幹線における被害トンネル.

2.7 2011 年東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震 (M9.0)では関東地震に次ぐ大規模被害が生じた.特に津波による福島第一原子力発電所のメルトダウン発生は衝撃的な被害であった.東北地方から関東地方に至る太平洋側の広い範囲で震度7から震度5弱の震度が観測され,各地で様々な被害が生じた.そのような被害のうち,鉄道の山岳トンネルについてはJR東日本により調査結果が示されている(土木学会,2013).そこに示された東北新幹線(トンネル総数161)における被害トンネルは図7に示す4件である.

那須トンネル(延長7,030m)は関東平野を抜けて最初に現れる長大トンネルで、シルト質層と

関東ローム層の中を浅い土被りで掘り抜いている.被害区間は坑口から続く土被りの浅い開削工法によるボックスカルバートで、トンネル構造としての被害はなくトンネル直上の地表面陥没と報告されている. 山岳工法区間ではないため被害評価の対象外とする.

福島トンネル(延長11,705 m) については石田 (1974) による施工報告によると, 花崗閃緑岩を主体とする丘陵地形中に建設されたが, 土被りは全般的に浅い上に花崗岩は強風化あるいはマサ化されており, 掘削に当たって様々な対策工が採られたと記載されている.

一方、土木学会(2013)によると160mの被害区間は凝灰岩と泥岩の互層からなる褶曲構造を示し、上部半断面先進工法や底設導坑先進上部半断面工法などの比較的悪い地山を対象とした工法で施工されたものの、インバートは設置されなかった。このため構造的には底盤部が弱部となっており被害の主なものは路盤部の隆起による軌道変状であった。インバート部へのセメントミルクの注入や、路盤部や側壁部へのロックボルトの打設などの復旧工事を行ったため、このトンネルの被害程度は「中」と評価する。

志賀トンネル(延長3,502m)については田中(1975)による施工報告があり、北側工区の延長750mで膨張性粘土を含む軟弱地層に遭遇し、難工事を強いられ大幅な工期延長を招いたと記載さ

表 7 東北地方太平洋沖地震による山岳トンネル被害状況.

特殊条件	大被害	中被害	小被害	無被害	計
なし	0	0	0	157	157
あり	0	3	0	0	3
計	0	3	0	160	160
なし	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
あり	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
計	0.0%	1.9%	0.0%	100.0%	100.0%

れている.

土木学会(2013)によると被害区間は泥岩や 頁岩などの堆積岩と安山岩が複雑に分布する地質 で,施工も側壁導坑先進上部半断面工法の他,二 段サイロットやスプリングサイロット工法などが 用いられており,かなりの難工事であったことが 伺われる.被害は福島トンネルと同様,路盤隆起 を主とする変状で,路盤部への充填とロックボル トの打設で復旧工事が行われている.このトンネ ルについても被害程度「中」とした.

第一梅ヶ沢トンネル(延長 260 m) については、 東北新幹線工事誌なども確認したが特殊条件に関 わる記載はなかった. しかしサイロット工法が用 いられ覆工厚が70 cm であることを勘案すると地 山条件が悪かったことが推定される. 被害は福島、 志賀両トンネルに比較すれば被害程度は軽いもの の、覆エコンクリートの一部剥落と報告されてお り被害程度「中」と評価した.

以上から被害程度「中」の3本のトンネルについては特殊条件ありのトンネルとして評価し、 那須トンネルの被害は検討対象から省くこととすると表7が得られる.

3. 地震動と山岳トンネル被害の関係

亀村(2020)で示したように、これまでの山岳トンネルの地震被害と地震動の関係は地震のマグニチュードや震源との距離で議論されることが多かった。しかし具体的な耐震性の評価を個々のトンネルにおいて行うためには、家屋などの構造物と同様、構造物に作用する地震動の大きさと構造物の耐震性能の関係を示す必要がある。

家屋などの地表構造物については,膨大な被 害データと多くの地震動計測結果が得られてお り,どのような力学特性の構造物に対してどのく らいの地震動 (加速や速度) が作用すると被害が 生じるのかを詳細に検討することができる. しか し山岳トンネルにおいては,被害の状況は調査に よって明らかにする事はできても,そのトンネル 位置でどのような地震動が生じていたのかを知る ことはできない.

以下では亀村(2020)で示した関東地震,新 潟県中越地震における検討と同様の手法でそれぞ れの地震におけるトンネル被害と地震動(震度) との関係を示す.

3.1 1923 年関東地震

関東地震については亀村 (2020) に詳しいので, ここでは図8に示す諸井ほか (2002) が住宅被

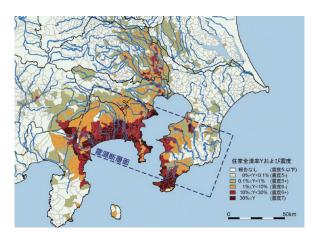


図8 関東地震における推定震度分布 (諸井ほか, 2002).

表 8 関東地震における震度と地震被害程度.

特殊条件	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
	7	3	3	13	4	23
	6強	1	2	15	2	20
なし	6弱	0	0	9	10	19
,,,,	5強	1	0	14	18	33
	5弱	0	0	0	26	26
	計	5	5	51	60	121
	7	14	3	4	0	21
	6強	4	0	1	0	5
あり	6弱	1	1	0	0	2
65 9	5強	0	2	1	0	3
	5弱	1	0	0	0	1
	計	20	6	6	0	32

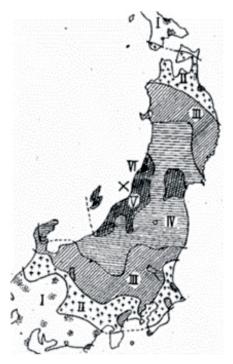


図 9 新潟地震における推定震度分布 (気象庁,1965).

表 9 新潟地震における震度と地震被害程度.

特殊条件	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
なし	5強	0	1	10	66	77
あり	5強	0	6	3	17	26

害データに基づき推定した震度分布図と被害データ(図1)を重ね合わせて得られた震度と被害率の関係を表8に示す.

この結果から震度 6 強以上になると被害程度「中」、「大」が増加していること、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.

3.2 1964 年新潟地震

図9は気象庁が地震観測結果から推定した震度分布である(気象庁,1965).ここに示された震度は旧震度階であり、山形県鶴岡市付近で震度VIの他、広い地域で震度Vとなっている.この図に吉川(1979)による調査結果(図2)を重ね

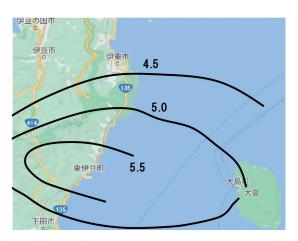


図 10 伊豆大島近海地震の推定震度分布 (Google Map に村井ほか (1978) による推定範囲を加筆).

表 10 伊豆大島近海地震における震度と地震被害程度.

特殊条件	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
	6弱	0	0	1	3	4
	5強	0	0	0	10	10
なし	5弱	0	0	0	6	6
	4	0	0	0	8	8
	計	0	0	1	27	28
	6弱	2	2	2	0	6
	5強	0	2	0	0	2
あり	5弱	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0
	計	2	4	2	0	8

合わせ特殊条件の有無ごとに被害程度をまとめると表9のようになる. なお,この調査対象のトンネルの震度はすべて震度Vであり、現在の震度では5弱~5強に対応するが被害率の評価では5強として扱うこととする.

このように同じ震度 5 強に対しても特殊条件 の有無により被害発生割合に大きな差があること が判る.

3.3 1978 年伊豆大島近海地震

この地震による震度分布については、村井ほか(1978)が現地調査を行うとともにアンケート調査を行い、家屋被害、墓石の転倒率などの情報も合わせて評価を試み、図10のような震度分

布を示している.

この推定震度分布と吉川(1979)による被害トンネル分布図(図3)を重ね合せ、被害トンネルと震度との関係を求めると表10が得られる.

調査対象となったトンネルの多くは海岸沿いの斜面に構築されており、偏圧を受けていると推定される.しかし震度6弱でも特殊条件なしのトンネルでは大きな被害は生じておらず、偏圧以外の特殊条件、例えば脆弱な地質、工事中の変状などの影響が大きいと考えられる.

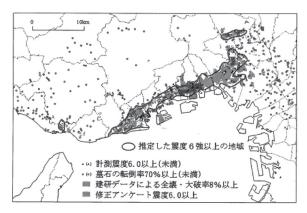


図11 兵庫県南部地震における震度6強以上の範囲の推定結果(藤本ほか,1999).

表 11 兵庫県南部地震における震度と地震被害程

	特殊条件	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
		7	0	0	0	1	1
		6強	0	0	0	0	0
	なし	6弱	0	1	6	4	11
在		5強以下	0	3	6	60	69
来		計	0	4	12	65	81
工		7	1	0	0	0	1
法		6強	1	1	0	0	2
	あり	6弱	0	0	0	0	0
		5強以下	1	0	1	2	4
		計	3	1	1	2	7
		7	0	0	0	0	0
		6強	0	0	0	0	0
	なし	6弱	0	1	2	0	3
N		5強以下	0	0	3	14	17
Α		計	0	1	5	14	20
T		7	0	0	0	0	0
М		6強	0	0	0	0	0
	あり	6弱	0	0	0	0	0
		5強以下	2	0	0	0	2
		計	2	0	0	0	2

3.4 1995 年兵庫県南部地震

この地震による震度7(激震)は,1996年まで用いられていた旧震度階級では最初で最後の記録となった.

この頃までの地震計測は限られた地点でしか 行われておらず、この震度7も機械計測ではなく 現地調査によってその範囲が推定されている.ち なみに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.

この地震における震度については、気象庁による現地調査に基づく震度7の分布は公表されているものの、その他の震度については地点ごとの震度で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。例えば藤本ほか(1999)は、震度6弱以上、6強以上の範囲の推定を行い図11のような結果を示している。これらの結果を図4に重ね合わせ、各トンネルにおける震度を設定すると表11に示すような震度と被害程度の関係が得られる。

藤本ほか(1999)の震度評価が震度6弱以上 までに留まっているため、この表においては6弱 以外の地域を5強以下として被害トンネルの分類 を行っている.

表でサンプル数の多い特殊条件なしのトンネルの在来工法とNATMを比較すると、6弱以下で被害程度「中」を生じているトンネルの割合はともに5%で、在来工法とNATMの耐震性にそれほど大きな差はないと考えられる。一方、特殊条件ありのトンネルについては在来工法、NATMともに5強以下の震度でも被害程度「大」を生じている例が見られ、特殊条件の影響がいかに大きいかが判る。

3.5 2004 年新潟県中越地震

この地震における震度分布については気象庁 (2022a) により図 12 が示されている. これに図 5 に示す被害トンネルの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 12 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 見られるとともに、トンネル工法による違いも見 て取れる. NATMトンネルでは震度5弱までは 被害は生じないが、5強になると軽微な被害程度 「小」が生じ始め、6強で初めて被害程度「大」、「中」

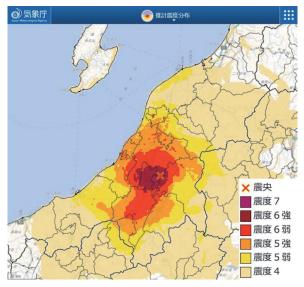


図 12 新潟県中越地震における震度分布(気象庁, 2022a).

表 12 新潟県中越地震における震度と地震被害程度.

工法	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
矢板	6強	10	10	5	8	33
	6弱	0	3	10	11	24
	5強	0	0	0	16	16
	5弱	0	0	2	25	27
	4	0	0	0	4	4
	計	10	13	17	64	104
	6強	1	1	2	2	6
	6弱	0	0	2	5	7
NATM	5強	0	0	2	13	15
II AT III	5弱	0	0	0	4	4
	4	0	0	0	1	1
	計	1	1	6	25	33

が生じている.

一方、矢板工法トンネルでは6弱で被害程度「中」の被害が生じ始めている. そして震度6強では、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.

このように被害程度「大」のトンネルの割合は、 矢板工法トンネルではNATMトンネルのおよそ 倍になっており、耐震性に差があるように見える。 この原因としては、矢板工法トンネルではその工 法上、覆工と地山との間に空洞が生じやすいこと が考えられる。

ここで留意しなければならないのは,この地震におけるトンネル被害調査では、吉川 (1979) が行ったような特殊条件の有無が示されていないことである.これまで述べてきたように特殊条件の有無は耐震性に大きく影響し、その有無の差は工法による差よりも大きい.したがって表12に示された工法による被害率の差は、調査対象トンネルの特殊条件の有無を明確にしない限り判断できない.

3.6 2007年新潟県中越沖地震

この地震における震度分布についても気象庁 (2022b) により図 13 が示されている. これに図 6 のトンネル被害状況を重ね合わせ、被害程度と 震度との関係をまとめると表 13 のようになる. なお、これらのトンネルはいずれも矢板工法により施工されている.

調査対象トンネル数が少ないため確実なことは言えないが、特殊条件なしのトンネルでは震度 6強でも被害が生じていないのに対し、特殊条件 ありのトンネルではすべてのトンネルで被害が生 じており、耐震性の差は明らかである。

この地震における被害トンネルは、伊豆大島

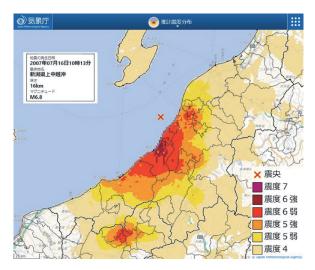


図 13 新潟県中越沖地震の震度分布 (気象庁, 2022b).

表13 新潟県中越沖地震における震度と地震被害程度.

特殊条件	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
	6強	0	0	0	8	8
なし	6 弱	0	0	0	6	6
	計	0	0	0	14	14
あり	6強	0	0	0	0	0
	6 弱	4	1	1	0	6
	計	4	1	1	0	6

近海地震の場合と同じく急峻な海岸線に位置して おり、偏圧の他、施工時の変状、直上斜面の崩壊 などの影響を受けていると考えられる.

3.7 2011 年東北地方太平洋沖地震

図7に示した被害トンネルを含む東北新幹線内のすべてのトンネルにおける震度を調べるために図14に示す震度分布(気象庁,2022c)に鉄道路線図を重ね合わせ、震度ごとのトンネル数をカウントした。東北新幹線には東京駅を出てすぐの第1,第2上野トンネルから始まり、新青森駅の次の奥津軽いまべつ駅までに震度4以上を経験したトンネルが160本あり、それらの震度との関係をまとめると表14のようになる.

表において被害を受けたトンネルについては 各々の施工記録などを確認し、在来工法であるこ

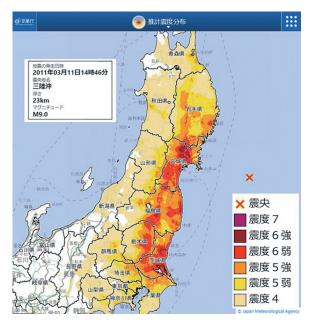


図 14 東北地方太平洋沖地震の震度分布(気象庁, 2022c).

表 14 東北地方太平洋沖地震における震度と地震 被害程度.

	震度	大被害	中被害	小被害	無被害	計
	6強	0	0	0	11	11
在	6弱	0	2*	0	61	63
来	5強	0	1*	0	34	35
工	5弱	0	0	0	5	5
法	4	0	0	0	0	0
	計	0	3*	0	111	114
	6強	0	0	0	0	0
N	6弱	0	0	0	0	0
Α	5強	0	0	0	5	5
T	5弱	0	0	0	27	27
M	4	0	0	0	14	14
	計	0	0	0	46	46

*は特殊条件あり

とを確認したが、その他のトンネルについては以 下のようにして工法を設定した.

東北新幹線は1971年に着工された東京-盛岡間と1991年以降順次着工された盛岡-新青森間からなり、大宮-盛岡間は1985年に、盛岡-八戸間は2002年にそして八戸-新青森間は2010年にそれぞれ開業している。この経緯から大宮-

盛岡間のトンネルの多くは在来工法により施工されたと考えられる.一方,盛岡以北のトンネルについては1980年頃にNATMが標準工法とされたことから基本的にはNATMによる施工と考えるのが妥当である.

表を見ると在来工法によるトンネルで震度6強や6弱を経験したものは74本あるが、被害は被害程度「中」が2本だけと非常に少ない.これに対し表12に示した新潟県中越地震では、同様の震度を経験した57本のうち被害程度「大」と「中」となったものは23本とおよそ4割が大きな被害を生じており、この二つの地震間の差は大きい.

この理由としては、同じ在来工法であっても 建設年代に大きな差があることも考えられるが、 何よりもこの二つの地震のタイプの差によるもの が大きいと考えられる。すなわち新潟県中越地震 は逆断層型の内陸地設内地震であるのに対し、東 北地方太平洋沖地震はプレート境界における海溝 型地震であり、卓越周波数、継続時間など地震動 の特性に大きな違いがあり、それが影響したと考 えられる。

4. 被害発生確率の評価

3. で示した各地震におけるトンネル被害程度と震度の関係を統合して山岳トンネルの被害発生

確率と震度の関係を評価する.

統合に当たって留意点が二つある。一つは各地震における震度分布である。2004年の新潟県中越地震以降の震度分布は、気象庁が多数の震度計測結果に基づき最新の評価手法により推定したものであり、データとして用いることに問題はない。しかし、それ以外の地震については十分な数の地震計測が行われていないため、建築物などの被害調査結果に基づき推定されたものであり、気象庁による推定震度分布と同等の精度を持っているとは必ずしも言えない。

もう一つの留意点はトンネルにおける特殊条件の有無である.特殊条件はトンネルの耐震性に大きな影響を与えることは被害調査結果から明らかであり、被害発生確率の評価に当たっては、この条件を明確にしておく必要がある.3.で示した各地震における被害トンネルの特殊条件の有無の評価は表15に示すようになっている.

吉川 (1979) の調査結果 (関東地震, 伊豆大島近海地震, 新潟地震) では被害トンネルについて特殊条件の有無が評価されているものの, 無被害トンネルについては特殊条件の有無が評価されていない. また兵庫県南部地震では被害調査結果に記載された地質条件に基づいて評価したが, 断層以外の既変状などの項目については考慮されていない.

表 15 各地震における特殊条件の評価.

地震	特殊条件の評価
関東, 伊豆大島, 新潟	被害トンネルについてのみ
兵庫県南部	全てのトンネルについて. ただし
大學不用即	特殊条件としては断層のみ.
新潟県中越	なし
新潟県中越沖	被害トンネルについてのみ
東北地方太平洋沖	

表 16 事前調査時と施工時の地山等級. 岩種ごとの変更の割合(%)(土木学会, 2007).

	上位側	一致	下位側
片岩	9	26	66
粘板岩	14	53	34
花崗岩	6	54	40
凝灰角礫岩	20	42	39
砂岩頁岩互層	7	36	57
泥岩	5	42	53

岩盤構造物の性能評価における課題 一地震被害に基づく山岳トンネルの耐震性評価―

新潟県中越地震では関東地震に次ぐ多数のトンネルで被害が生じたが、土木学会による被害調査においては特殊条件の有無は評価されていない。また新潟県中越沖地震と東北地方太平洋沖地震における被害トンネルについては、文献などにより特殊条件の有無を判断したものの無被害トンネルについては評価していない。

データの統合を行うためには、特殊条件の有無を評価していないトンネルの中にどれくらいの特殊条件を有するトンネルが含まれているかを推定する必要がある.

我が国の複雑で脆弱な地質条件下でのトンネル施工実績を考慮すると、かなり高い頻度で特殊 条件に相当する難工事を強いられていると考え られる. 例えば土木学会トンネル工学委員会では、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(土木学会、2007). そこでは、事前設計と施工時の地山等級について日本道路公団が建設した37本、総延長41.6kmのトンネルについて分析した結果として表16が示されている.

これは様々な岩種におけるトンネルの施工に おいて、事前調査結果に基づいて当初設定した地 山等級(これにより基本的な施工法や支保工が決 定される)が施工時にどう変化したかを示してい る.

これを見ると岩種によるものの, 設計時に想

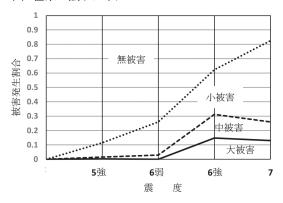
					特殊条	:件なし				
震度	度 在来工法トンネル(472)				NATMトンネル(85)					
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計
5 強以下	1	4	32	247	284	0	0	5	65	70
6弱	0	3	24	77	104	0	1	4	4	9
6強	9	10	19	23	61	1	1	2	2	6
7	3	3	13	4	23			_		
合計	13	20	88	351	472	1	2	11	71	85
					被害割合	(%)				
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計
5強以下	0.4	1.4	11.3	87.0	100.0	0.0	0.0	7.1	92.9	100.0
6弱	0.0	2.9	23.1	74.0	100.0	0.0	11.1	44.4	44.4	100.0
6強	14.8	16.4	31.1	37.7	100.0	16.7	16.7	33.3	33.3	100.0
7	13.0	13.0	56.5	17.4	100.0			_		•

表 17 7 地震におけるトンネル被害と震度の関係.

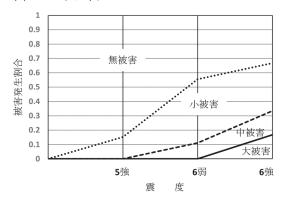
					特殊条	件あり				
震度	震度 在来工法トンネル(レ(146)	146) NATMトンネル(16)				(16)	
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計
5 強以下	2	11	5	50	68	2	0	0	13	15
6弱	7	7	5	18	37	0	0	0	1	1
6 強	7	3	2	6	18	0	0	0	0	0
7	15	3	4	1	23			_		
合計	31	24	16	75	146	2	0	0	14	16
					被害割合	(%)				
	大	中	小	無	計	大	中	小	無	計
5強以下	2.9	16.2	7.4	73.5	100.0	13.3	0.0	0.0	86.7	100.0
6弱	18.9	18.9	13.5	48.6	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0
6強	38.9	16.7	11.1	33.3	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	65.2	13.0	17.4	4.3	100.0			_		

定した地山等級と実際の地山等級が一致するのは 4割程度しかなく、地山等級の上位への変更の1 割程度に対し、下位への変更すなわちより重い支 保へ変更された割合は実に5割にもなっているこ とが判る。こうした施工中のトンネルにおける大

(a) 在来工法トンネル



(b) NATM トンネル



(c) 特殊条件を有する在来工法トンネル

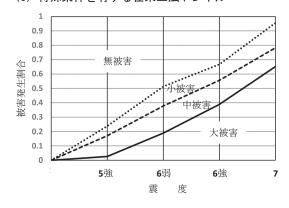


図 15 震度と被害発生割合の関係.

幅な工法変更は、切羽進行の遅れを生じ、地山変位を増大させることになる。そして多くの場合、トンネル周辺地山にゆるみ領域(力学特性の低下した領域)を生じさせ、吉川(1979)が示すところの特殊条件に相当する状態となると考えることができる。

具体的に特殊条件を有するトンネルの割合を 想定することは難しいので、ここでは関東地震に おける被害トンネルに占める特殊条件を有するト ンネルの割合がおよそ 20%であることから、特 殊条件の有無が示されていないトンネルについて も一律に 20%の特殊条件を有するトンネルが含 まれているものと仮定する. そして、すべての地 震における調査対象トンネルの分類を統一した上 で全データの統合を行い、工法の違い、特殊条件 の有無ごとの震度に対する被害発生確率を算定し た. 結果を表 17 および図 15 に示す.

ここに特殊条件を有する NATM トンネルについては被害事例が少なく信頼性に欠けるため、震度と被害の関係図を示していない.

図15 (a) は在来工法トンネル472本における様々な被害の発生割合と震度の関係を示したもので、震度5強位からひび割れなどの軽微な被害が生じ始め、震度6強になると補修や補強を必要とする被害程度「中」や「大」が生じている。その割合は15%程度であり、震度7となっても増えていない。図15 (b) に示すNATMトンネルでも同様の傾向となっており、特殊条件の無いトンネルでの被害発生の傾向には工法による差は少ないと考えられる。

一方,図15(c)に示す特殊条件を有する在来 工法トンネルでは震度5強で被害程度「中」が生 じ始め,震度6弱では被害程度「大」と合わせて 顕著な被害がおよそ4割のトンネルで生じてい る.そして被害程度「大」は震度が増すごとにそ の割合を増加させ、震度7ではおよそ6割のトンネルで生じている.

このように特殊条件の有無は山岳トンネルの 耐震性に大きく影響することは明確であり、今後 のトンネルの耐震性を考える上ではこの特殊条件 に対しどう対処するかが重要となる.

5. 地震リスクを用いた耐震性評価

これまで地震に対し強いとされていた山岳トンネルにおいても、大地震時には多くの被害が生じることを被害調査結果に基づいて示した。社会基盤施設として重要な役割を果たしている山岳トンネルに万が一大きな被害が生じ、機能損失が長期間にわたる場合、その社会的損失は構造的損害を大きく上回るものになる。したがって地震被害を低減させるための耐震補強などの対策が必要であるが、一方で、まれにしか発生しない大地震に対してどこまでの対策を講ずるかを的確に判断することは難しい。ここに不確実性の大きい地震被害について定量的な判断指標を得ることで、有効な対策を計画することの重要性がある。

ここでは様々な地震被害の評価に用いられている確率論的手法を用いて山岳トンネルの地震被害を狭義のリスク, すなわち被害の発生確率 P

と発生した時の損害 C の積として定量化し、水 谷ほか (1996) が示すような地震リスクマネー ジメント手法により対策工の優先度評価を行う. 地震リスク評価は、東北地方太平洋沖地震以降ビ ル、住宅、学校などの建物や生産施設、物流施設 などの設備に対して広く適用され、様々な地震リ スク低減策の策定に用いられている.

5.1 地震リスク評価手法

地震リスクの評価は図 16 に示すフローに従って行われる。まず、想定する地震の震源特性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。一方、検討対象とするトンネルについては、その建設工法や特殊条件の有無に基づく地震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、この二つから地震損失曲線を求める。そしてハザード曲線と損失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得る。これによって様々なリスク対応策の効果が評価され、具体的な方策を決定することができる。以下にこの3つの特性曲線について説明する。

・地震ハザード曲線:ある地点で発生する地震動の大きさとその発生確率の関係

地震の危険性に関する情報には,検討対象と

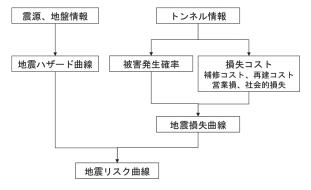


図 16 地震リスクの評価フロー.

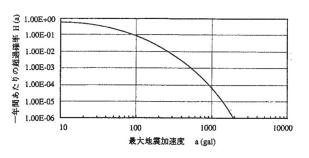


図 17 地震ハザード曲線のイメージ(水谷ほか, 1996).

するトンネル周辺地域の過去の地震データ,活断層や地質構造に関する資料,地球物理学による知見などがあるが,いつどこでどのような大きさの地震が発生するかは判らない.そこで,確率論的手法を用いモデル化し,図17に示すような特性曲線で評価する.

例えば政府の地震調査研究推進本部による確率論的地震動予測地図は,「日本及びその周辺で起こりうる全ての地震に対して,その発生場所,発生可能性,規模を確率論的手法によって評価し,さらにそれら地震が発生したときに生じる地震動の強さをバラツキも含めて評価することにより,一定の期間内に,ある地点が,ある大きさ以上の揺れに見舞われる確率を計算することにより作成されています.地点ごとに地震ハザード評

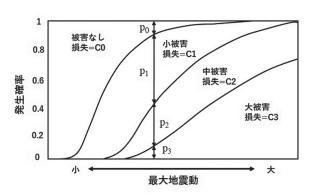


図 18 各被害程度の発生確率と地震動の関係のイメージ.

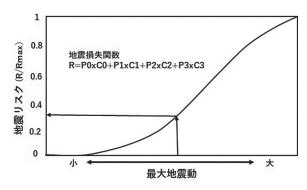


図 19 地震損失曲線のイメージ.

価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち 2 つを固定して残る 1 つの値を求めた上で、それらの値の分布を示したもの」(https://www.j-shis.bosai.go.jp/shm#more-614)で、防災科学技術研究所(2022)の提供する J-SHIS で任意の地点の地震ハザードを得ることができる.

ただしハザードの評価には様々な手法が提案 されており、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、地震動の強さの指標 (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機関によっ 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:発生した地震動とそれによる損失の期待値の関係

地震損失曲線を得るには地震による様々な被害形態の発生確率とその被害に関わる損失を設定する必要がある。図 18 に示すような地震動とそれによる被害発生確率の評価方法には、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様々である。ここでは 4. で示した被害調査結果に基づき設定した被害発生確率を用いる。

一方,損失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損失(復旧費用)と間

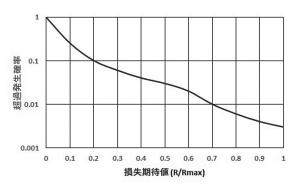


図20 地震リスク曲線のイメージ.

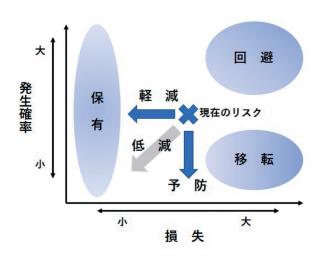


図21 リスク対策の考え方.

接損失(社会的損失,運行停止に伴う営業損など)を事業者や関係組織が評価して設定する必要がある.

地震被害の程度として定義した「被害なし:i = 0」、「小被害:i = i = i 」、「小被害:i = i 」、「大被害:i = i 」のそれぞれが発生した時の地震被害損失 i で設定されれば、図 19 中に示した式のように 各被害形態i の発生確率i と掛け合わせ、総和を取ることにより図 19 に示す地震損失曲線が求められる.

・地震リスク曲線:損失期待値とそのリスク超過 発生確率の関係

上述の地震ハザード曲線と地震損失曲線から 共通の地震動の大きさを消去すると図 20 のよう な地震リスク曲線が得られる. この地震リスク曲 線を用いて事業者は、どこまでのリスクを許容で きるのか、またそのリスクを低減するためにどこ まで費用をかけることができるのかなどを検討す ることができる.

このように定量化された地震リスクが事業者 にとって許容範囲内であれば問題はないが、そう ではなく事業継続や社会活動に問題が生じるよう な場合には何らかの対策を講じる必要がある. リ スク対策には、その基本的な考え方は図 21 に示すような回避、移転、保有、低減の四つがある.

リスク回避とは、リスク発生時の損失が大きくまた発生頻度が高い場合にリスクの要因を排除することである。例えば計画中の重要路線中のトンネルにおける大地震発生確率が高い場合、より発生確率の低い地点への路線変更を行うが、その変更によってもリスクが回避領域を出ない場合には、その路線の計画そのものを断念することになる。

リスク移転とは、発生する頻度は低いものの 発生時の損失が大きい場合に、発生するおそれが あるリスクを第三者に移転することであり、保険 に加入するなどの対応が一般的である.

リスク保有とは、発生する損失がそれほど大きくなく許容できる場合やリスク対策のコストが 損失よりも大きい場合に選択される。全てのリスクに対して対策を実施することはできないし、またそうすることは大きな無駄を生むことになり、 どのような企業もある程度のリスク保有を行っている。

リスク低減とは、リスクの発生確率を小さくする(予防)と同時に、発生した場合の損失を小さく(軽減)するために事前に対策を講じることである. 地震の場合その発生は予防できないので、トンネルを耐震補強することで地震発生時の被害程度を小さくする(軽減)とともに被害発生確率を小さく(予防)する.

例えば、図20のリスク曲線が得られている場合、最大損失の20%の損失が発生するのは0.1の確率であることが判る.この確率での損失発生が事業者にとって許容できない場合、様々な被害低減対策を講じてリスク曲線を左方に移動させ、許容できる損失期待値に下げる必要がある.その最適な対策の決定は、それぞれの対策工に必要な

被害程度	定義	損傷イメージ	復旧	復旧費	供用中止期間	営業損	損失Ci
無	損傷なし			0	2日	0.1	0.1
小	当面無対策で も運行可能	部分的なクラックの発生、 既存クラックの開口・進展	通常の維持管 理で対応	0	2日	0.1	0.1
中	防護工, 応急 処置で運行可 能	覆工の崩落、大規模なク ラックの発生(覆工のアー チ機能を損なわない程 度)、路盤の隆起	クラックや崩 壊箇所、路盤 の補修	0.1	2 週間	0.8	0.9
*	改築,応急復 旧後運行	覆工や底盤の力学的機能が 損なわれている	損傷個所の撤 去、再構築 地山補強工	1	半年	10	11

表 18 被害程度に対する損失の設定.

表 19 トンネルの種類ごとの震度と地震損失値.

種類	5弱	5強	6弱	6強	7
特殊	0.10	0.50	2.31	4.47	7.31
在来	0.10	0.14	0.12	1.84	1.62
NATM	0.10	0.10	0.19	2.05	

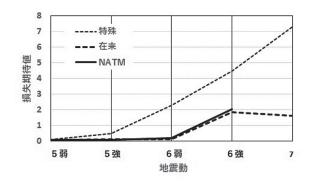


図 22 トンネルの種類ごとの地震損失曲線.

投資額とそのリスク軽減効果を検討し地震リスク 曲線を比較することにより可能となる.

5.2 地震リスクの試算

ここでは損失額についての具体的な議論のために表 18 に示すような各種被害程度に対するトンネルの復旧費,復旧までの供用中止期間とその間の営業損失を仮定する.

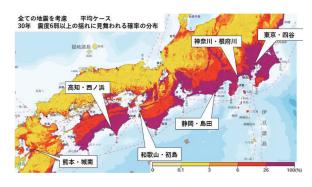


図 23 検討対象トンネルとその位置における地震動 予測 (防災科学技術研究所, 2022 に加筆).

表 20 J-SHIS 確率論的地震予測による今後 30 年間にある震度以上の揺れに見舞われる確率 (%).

地点	東京四谷	神奈川根府川	静岡島田	和歌山 初島	高知 西ノ浜	熊本 城南
深度5弱以上	99. 9	97. 2	84. 8	86. 5	82. 7	90. 1
深度5強以上	91.5	75. 5	77	74. 4	75. 5	52. 1
深度6弱以上	45. 1	33	68. 3	41. 7	65. 9	14. 6
深度6強以上	7. 9	4. 5	25. 8	5. 2	20. 8	2. 8

表において被害程度「無」と「小」の供用中 止期間2日は、地震直後の被害確認作業に要す る期間として想定した. 損失に関しては、具体的 な数値を設定することはできないので、被害程度 「大」の場合の復旧費を1とし、被害程度「中」 はその1/10と仮定した. また営業損については 供用中止期間2日に対する営業損を0.1とし、中 止期間に応じ「中」、「大」の営業損失額を設定した.

岩盤構造物の性能評価における課題 一地震被害に基づく山岳トンネルの耐震性評価―

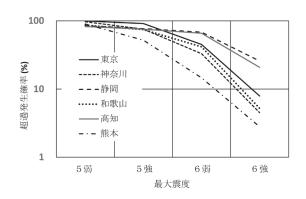


図 24 J-SHIS による各地点の地震ハザード.

設定された各被害程度に対する損失と 4. で求められた地震動に対する被害発生確率から図 19 に示した計算式によって期待損失値が表 19 と図 20 のように求められる. このように特殊条件を有するトンネルでは非常に大きな損失が発生する可能性があり、特殊条件の有無については何よりもまず確認する必要がある.

次に具体的に地震リスクを求めトンネルごとの条件の違いによりどのようなことが検討できるかを示すために、地震被害の検討対象とする仮想のトンネルを、地震予測地図で大地震発生確率が高くなっている太平洋側から図23に示すような地点に設定した。これらの地点における今後30年間における地震発生確率をJ-SHISにより抽出すると表20のようになり、図24の地震ハザードが得られる。

表に示した地震ハザードを見ると今後30年間に震度5強以上の地震が発生する確率は、熊本を除く5地点で70%を上回っており、太平洋側の地点の東南海、南海地震による危険度が高いことが判る.これに対して熊本のハザードは直下型の活断層による地震の影響が主であり、確率は小さくなっている.さらに太平洋側の5地点の中でも静岡、高知の2地点では震度6弱以上の地震発

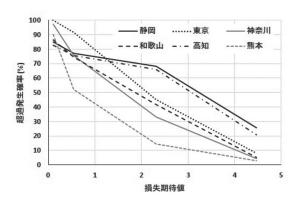


図 25 6 地点における特殊条件ありトンネルのリスク 曲線.

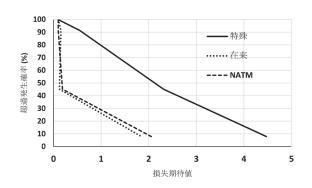


図26 東京におけるトンネルの種類別地震リスク曲線.

生確率が大きく、震度6強以上でも20%を超える値となっており地震リスクを考える上で留意する必要がある。

このように地震動予測によって各事業者が維持管理しているトンネル位置でどのような地震動が予測されているかを確認することは、地震リスクを考える上での第一歩であり重要である. 橋梁などの地上構造物や開削トンネルなど、すでに耐震設計法が確立しているものについては地震ハザードは認識されているが、山岳トンネルについては耐震性の検討が一般的ではないため、地震ハザードはそれほど認識されていないのが現状と思われる. 特殊条件の有無とともに地震ハザードについても維持管理における基本情報として確認し

ておくことは重要である.

地点を設定して地震ハザードを得ることができれば図22の地震損失曲線から地震リスク曲線が得られる.特殊条件を有するトンネルの場合,図25のようになる.

このように被害発生確率の高い静岡や高知にある特殊条件を有するトンネルでは、最大損失額(表 18 に示す被害程度大に対する損失 11)のおよそ 20%の損失を生じる確率が 70%程度に、また損失期待値の最大値 4.5 における発生確率は東京のおよそ 8%に対し、静岡では 26%と 3 倍以上の発生確率となっている。この 2 地点のトンネルは他地点のトンネルに比較して格段に大きなリスクを持っており、同じ特殊条件を有するトンネルであっても地震発生確率の高い地域では特に注意する必要がある。

一方、同じ地点であってもトンネルの種類によって地震リスク曲線は大きく異なる。図 26 は東京におけるトンネルの種類ごとの地震リスク曲線を示している。このように特殊条件を有するトンネルとそうではないトンネルとでは、同じ発生確率であっても損失期待値は 2~12 倍の差があり、事業継続への影響には大きな差があることが判る。

6. おわりに

兵庫県南部地震以降,様々な構造物の耐震性が社会的課題となり多くの研究を経て耐震性評価手法が整備されてきた.岩盤中に構築される山岳トンネルについても,被害事例に基づく実験や数値解析による研究がなされ,これまであまり議論されることのなかった動的荷重に対する挙動が次第に明らかにされてきた.しかし被害に関するデータは少なく,解析手法は未だ確立されていな

いため耐震性評価手法の指針化,基準化には至っていない.

こうした現状を踏まえ山岳トンネルの地震被害について文献調査を行い、被害の実態とそのメカニズム解明のための研究の現状を調査した(亀村、2016). そして関東地震と新潟県中越地震における詳細な山岳トンネルの地震被害調査結果に対し耐震性評価の観点から地震動(震度)との関係で再評価し、地震動と被害確率に関する明確な関係を得るとともに地震リスクの考え方を用いて耐震性を評価できることを示した(亀村、2020). ただし山岳トンネルの地震時被害の事例は、他の建築物などに比較すると極端に少なく、評価結果の信頼性を高めるためには、より多くの地震被害調査結果を評価対象とする必要があった

そこで本報告では関東地震,新潟県中越地震に加え新潟地震,伊豆大島近海地震,兵庫県南部地震,新潟県中越沖地震,東北地方太平洋沖地震の計7地震におけるトンネル被害について各データの属性をできる限り揃えたうえで震度と被害発生確率の関係を評価した。さらに地震リスクの評価についても具体的な事例を示し,ここに示した手法により山岳トンネルの耐震性を評価できることを示した.

残された課題は、特殊条件を有し耐震性に問題ありと評価されたトンネルに対する耐震補強法の確立である。現時点でも鉄道トンネルや道路トンネルにおける補強マニュアルは出されているが、より定量的な評価により具体的な対策工が施工されるようになることが望まれる。

文献

- 防災科学技術研究所 (2022): J-SHIS 地震ハザードステーション, https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/, (2022 年 8 月 14 日参照).
- 土木学会(2005): 新潟県中越地震特別小委員会報告書,トンネル工学委員会.
- 土木学会(2007):より良い山岳トンネルの事前 調査・事前設計に向けて、トンネル工学委員 会技術小委員会事前調査・設計検討部会編、 トンネルライブラリー18.
- 土木学会(2008): 新潟県中越沖地震調査特別小 委員会報告書、トンネル工学委員会.
- 土木学会(2013): 東北地方太平洋沖地震調査特別小委員会報告書、トンネル工学委員会.
- 藤本一雄・翠川三郎(1999): 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,**523**,71-78.
- 石田 勲 (1974): 沈下 6 mm で在来線の下を抜く, トンネルと地下, 48, 第5巻, 第8号, 12-19.
- 地盤工学会(1996):第9章 地下空間. 阪神・淡路大震災調査報告書(解説編),地盤工学会阪神大震災調査委員会編,275-282.
- 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.
- 亀村勝美 (2020): 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,**30**, I-30.
- 亀村勝美(2021): 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, トンネル工学報告集, 31, I-17.
- 気象庁(1965): 気象庁技術報告, 43.
- 気象庁 (2022a): 地震の活動状況 推計震度分布, https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#9/37.

- 446/138.841/&contents=estimated_intensity_map, (2022 年 8 月 14 日参照).
- 気象庁 (2022b): 地震の活動状況 推計震度分布, https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#9/37. 413/138.582/&contents=estimated_intensity_ map, (2022 年 8 月 14 日参照).
- 気象庁 (2022c): 地震の活動状況 推計震度分布, https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#7/38. 206/140.324/&contents=estimated_intensity_ map, (2022 年 8 月 14 日参照).
- 日本国有鉄道(1983): 東北新幹線工事誌 大宮· 盛岡間.
- 水谷 守・中村孝明・下野正人・亀村勝美(1996): 確率論的アプローチによる地震リスクマネー ジメント(SRM)手法の提案,土木学会第51 回年次学術講演会,IB,738-739.
- 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(3), 35-71.
- 村井 勇,角田信子,辻村芳子(1978): 1978 年伊 豆大島近海地震の被害・震度と地震断層 東京 大学地震研究所彙報,**53**(3),1025-1068.
- 田中庸雄(1975): 軟弱地質の下半掘削,トンネルと地下,**64**,第6巻,第12号,7-19.
- 吉川恵也(1979): 鉄道トンネルの震災事例調査, 鉄道技術研究所報告, 1123.