

山岳トンネルの維持管理段階における リスクの定量化についての研究

Quantification of the Risk during the Maintenance Phase of Tunnel Project

加藤 隆¹・上田孝行²・森地 茂³

Takashi Kato, Takayuki Ueda and Shigeru Morichi

¹正会員 工修 大成建設株式会社 本社土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:t-kato@ce.taisei.co.jp

²正会員 工博 東京大学大学院教授 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³フェロー会員 工博 政策研究大学院大学教授 (〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)

In this study four approaches for the quantification of the risk during the maintenance phase of mountain tunnel project were performed. (i) Case study of deformation or other risk events on tunnels, (ii) interview to the tunnel administrator about the situation of tunnel maintenance, (iii) deterioration prediction of tunnel using inspection data from tunnel projects, and (iv) simple risk quantification of tunnel in case of earthquake.

Key Words : tunnel, maintenance, risk, earthquake, deterioration prediction

1. はじめに

社会資本のライフサイクルコストを適切に把握し、コスト削減を図ることが求められている。そのためには、維持管理コストの定量化が不可欠である。しかし一方で、山岳トンネルは劣化機構が多様で不明確であることから、維持管理コストの定量化が難しいとされており、山岳トンネルの維持管理は、土木学会¹⁾等によって取りまとめられた過去の変状事例等を参考に、事後保全的に行われることが多かった。

社会資本のリスク定量化へのアプローチとしては、土木学会建設マネジメント委員会²⁾によって、リスクワークショップ手法が紹介されている。これは、事業の計画、設計、施工、維持管理、経営等の立場の人々がリスクについて情報交換することにより意識を共有し、定量化を図るものである。このような手法を用いて、リスク定量化、ライフサイクルコスト削減に取り組むことも重要である。

本研究は、山岳トンネルの維持管理段階に生じた既往のリスクイベントを整理し、維持管理担当者へヒアリングを行い、数理検討を行うことで、山岳トンネル維持管理リスクの定量化を図ることを目的としている。

2. 山岳トンネルリスクイベントの整理

山岳トンネルは、土木学会¹⁾の実態調査によれば、鉄道、道路、水路トンネルの25～40%が何らかの変状を示している。山岳トンネルのリスクイベントを、①経年劣化によるリスク、②自然災害によるリスク、③その他のリスクに大別し、図-1のようにまとめた。

変状現象は、特定箇所に集中する傾向があるため、変状現象を分類、整理して類型化して対策を立てることが重要と考えられる。

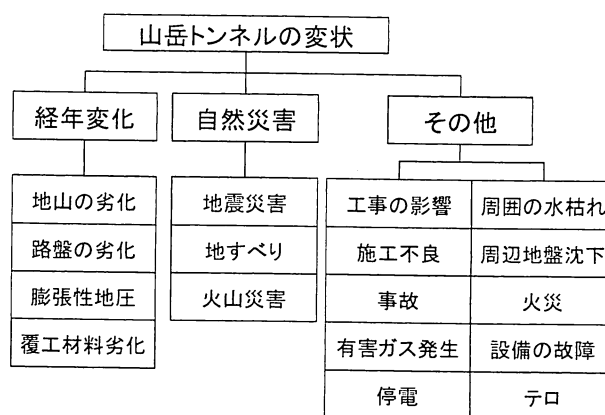


図-1 山岳トンネルで発生するリスク現象の整理

3. 維持管理担当者へのヒアリング

本研究では、山岳トンネル維持管理リスクについて、道路事業者1者、鉄道事業者3者の合計4事業者にヒアリングを実施した。対象事業者を表-1に示す。

ヒアリングの内容は、①トンネルの管理状況、②維持管理予算の現況、③山岳トンネルの点検について、④劣化現象のリスク、⑤自然災害のリスク、⑥その他（環境、事故等）リスクについての6項目である。ヒアリング結果を以下に示す。

(1) 維持管理についての考え方

山岳トンネルの劣化の進行は非常に緩やかであるため、維持管理のウェイトは高くないと回答する事業者が多かった。但し、変状トンネルを多く保有する事業者は、的確に劣化を把握して対策を講じなければならず、ウェイトが高いと回答した。

(2) 維持管理予算について

変状トンネルにおいて、点検データをもとに劣化予測を行い、戦略的に維持補修投資を行っている事業者があった。一方で、自社単独で投資することは難しいため、親会社の支援を得ながら投資していると回答した事業者や、予算が限られることから、劣化が進んだ段階で事後保全的な補修を行っている事業者があった。

(3) 山岳トンネルの点検について

1999年の山陽新幹線覆工崩落事故等を受け、各事業者とも点検データ整備に力を入れている。大規模な事業者は、点検、保守を自社で行う体制が構築されている一方で、小規模な事業者は、人的資源が不足しており、日常点検以外の詳細点検、保守は外部委託しているのが現状である。また、大規模な事業者でも、トンネルの数が少ない事業者は、トンネル維持管理の専門家がいないと回答した。

(4) 山岳トンネルの劣化現象に関して

トンネルの変状は特定の箇所集中しており、その原因は地山条件によるものという回答が多かった。事業者の中には、120年以上供用されているトンネルを有するところがあったが、とくに寿命を意識することなく、適切な保守を行えばさらなる長寿命化が可能であるとの回答であった。

表-1 ヒアリング対象事業者一覧

ヒアリング先	A社 (道路)	B社 (鉄道)	C社 (鉄道)	D社 (鉄道)
供用延長	約2,400km	約30km	約7,500km	約45km
トンネル 箇所数	112箇所	18箇所	1,263箇所	31箇所
トンネル 総延長	29.7km	17.6km	882km	17.8km
事業者の 特性	橋梁分野で アセットマネ ジメントを積 極的に導入・ 実践。	全線の約 60%の区間 を山岳トン ネルが占める地 方山岳路 線。	120年以上現 役のトンネル を抱え、変状 対策等のノ ウハウを持 つ。	地震による 被災経験等 を有し、トン ネル維持管 理への関心 が高い。

(5) 災害リスクについて

地震災害リスクに対する対応策については、新潟県中越地震の経験より、新幹線トンネル等の耐震補強を進めている例があると回答があった。また、過去の地震被害経験から、坑口部覆工について、地震対策を兼ねて補修、補強する方針を取っている事業者もあった。しかし、トンネルの地震対策にはあまり目が向いていない事業者が多かった。

坑口斜面の落石、雪崩等の災害に関しては、各事業者とも比較的高いリスク意識を有している。対策としては、すべり抑止工の実施や、落石、雪崩よけ、自動警報装置の設置、坑口部覆工の補強などがあると回答した。

(6) その他リスク

地下水変動に関する周辺環境への影響リスクは、山岳部では低いようである。しかし、トンネル湧水の影響により、構造物や路盤の劣化、冬季のつららの発生などには各事業者とも留意している。漏水が発生した場合、湧水を止めることは難しいため、導水工が施工されることが多い。導水工を施工した場合、覆工の漏水箇所が見えなくなってしまう、劣化の傾向を見逃すおそれがあることが問題との回答があった。

4. 実測データに基づく数理分析

本章では、実際の山岳トンネル点検データを用いて数理分析を試みた。数理分析は、ある鉄道事業者（1986年開業）の維持管理点検データを対象とした。トンネルは全18箇所であり、大部分が山岳トンネル（NATM工法、矢板工法）である。NATM工法は、比較的地山の良好な区間において採用されており、地山の比較的不良な箇所においては矢板工法が採用されている。トンネルの完成（竣工）時期は1970年～1985年である。表-2にトンネルの諸元を示す。

数理分析は、2000年～2006年に2年ごとに点検された全トンネルの点検データ（概ね10m間隔）を対象とした。各点検時における各地点の健全度の変化を入力値として、一定期間において劣化の進行する確率が一定であると仮定し、マルコフ推移確率を用いて劣化予測を行った。点検は、国土交通省策定の点検マニュアル³⁾に基づいて行われており、マニュアルに記載されたトンネル健全度の指標は表-3に示すとおりである。これに基づき、10mごとの各箇所の健全度を整理した。健全度経時変化を図-2に示す。

マルコフ推移確率算出にあたっては、まず、開業時(1986年)には全トンネルで劣化なし（Sランク）であったと仮定し、全測点でSランクという点検データを作成した。このデータと各年度の点検データを入力値として用い、実際の入力データは、各点検間の健全度の遷移データとした。なお、補修工事等の実施により、健全度が前回点検より向上しているデータは、入力データから除外した。マルコフ推移確率行列は、公開されているプログラム⁴⁾を用いて、1年ごとの推移確率として計算した。上記条件での計算の結果、マルコフ推移確率行列は図-3のように求められた。健全度分布予測結果を図-4に示す。なお、実際の点検結果と比較すると図-5のようになり、予測結果は点検データをうまく反映できた結果となっていることがわかる。

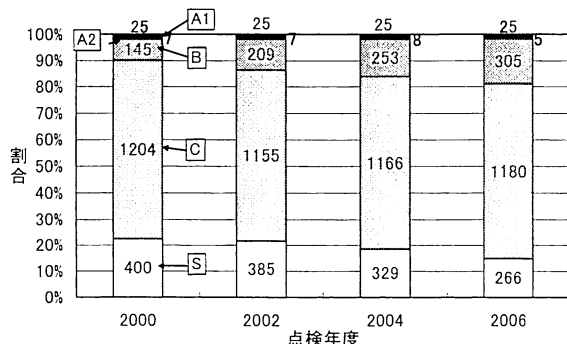


図-2 全トンネルの健全度評価分布の経時変化

表-2 数理分析対象トンネルの諸元

番号	延長 (m)	工法	覆工種類	覆工厚 (cm)	インバート	完成
1	3,441	矢板	無筋	30～60		1970年
2	160	矢板	無筋、RC	45～80	●	1970年
3	1,015	矢板	無筋	30～60		1971年
4	394	矢板	無筋	45		1971年
5	698	矢板	無筋、RC	45～110	●	1978年
6	480	矢板	無筋	45～60		1978年
7	346	NATM	無筋	35～50		1981年
8	226	NATM 開削	無筋、RC	35～60	●	1981年
9	88	矢板	RC	60	●	1981年
10	724	矢板	無筋	30～60		1981年
11	568	NATM	無筋	30～35		1982年
12	1,157	矢板	無筋、RC	30～70	●	1982年
13	4,250	NATM 矢板	無筋 漏水注入	30～60		1982年
14	233	NATM 開削	無筋、RC	35～60	●	1985年
15	2,668	NATM	無筋、RC	30～60	●	1985年
16	224	NATM 開削	無筋、RC	50	●	1985年
17	846	NATM 開削	無筋 開削	35～65	●	1985年
18	108	開削	開削	(開削)		1985年

表-3 鉄道トンネルの健全度指標

判定区分	運転保安に関する影響	変状の程度	措置
AA	危険	重大	直ちに措置
A1	早晚脅かす 異常外力の作用時危険	変状が進行し、 機能低下も進行	早急に措置
A2	将来脅かす	変状が進行し、 機能低下の恐れ	必要な時期に措置
B	進行すればAランクになる	進行すれば Aランクになる	監視 (必要に応じて措置)
C	現状では影響なし	軽微	重点的に検査
S	影響なし	なし	-

健全度	S	C	B	A2	A1
S	0.9047	0.0944	0.0009	0	0
C	0	0.9813	0.0186	0.0001	0
B	0	0	0.9853	0.0131	0.0016
A2	0	0	0	0.7864	0.2136
A1	0	0	0	0	1

図-3 マルコフ推移確率行列算定結果

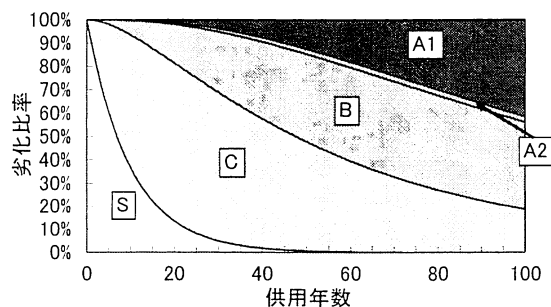


図-4 健全度分布予測結果

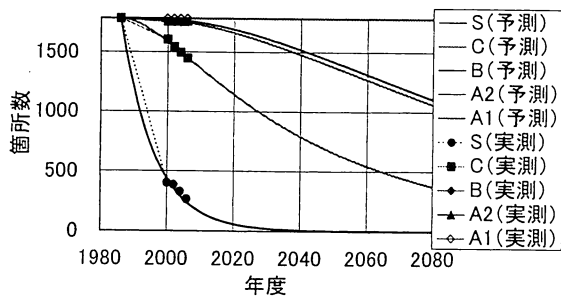


図-5 実際の点検結果と予測結果の比較

次に、各トンネルの属性の違いを考慮した場合の劣化予測を行った。本研究では、地山の良否や健全度の良否によって、表-4のように全18トンネルをAA, A, B, Cの4属性に分類した。図-6に、トンネル属性別の健全度比率を示す。

図-7、図-8に、属性AA、属性Cのトンネルの劣化予測結果を示す。属性AAに関しては、全体的に劣化の進行が早く進む予測となった。一方、属性Cに関しては、劣化はゆっくり進行する予測となった。

図-9に、各属性の劣化予測結果を足し合わせた結果得られる劣化予測曲線を示す。図-4と比較すると、健全度A1, A2における劣化予測結果が多少異なるが、全体的には類似していると考えられる。健全度A1, A2における劣化予測結果が異なるのは、データ数が非常に少ないことに一因があると考えられる。

表-4 トンネルの属性分類結果

番号	延長 (m)	工法	覆工種類	属性		
				地山	変状	総合
1	3,441	矢板	無筋	B	A	A
2	160	矢板	無筋、RC	A	C	B
3	1,015	矢板	無筋	B	B	B
4	394	矢板	無筋	C	C	C
5	698	矢板	無筋、RC	A	C	B
6	480	矢板	無筋	C	B	C
7	346	NATM	無筋	C	A	B
8	226	NATM 開削	無筋、RC	B	C	C
9	88	矢板	RC	A	B	A
10	724	矢板	無筋	C	B	C
11	568	NATM	無筋	C	B	C
12	1,157	矢板	無筋、RC	A	C	B
13	4,250	NATM 矢板	無筋 漏水注入	A	A	AA
14	233	NATM 開削	無筋、RC	B	C	C
15	2,668	NATM	無筋、RC	B	A	A
16	224	NATM 開削	無筋、RC	B	C	C
17	846	NATM 開削	無筋 開削	B	B	B
18	108	開削	開削	C	C	C

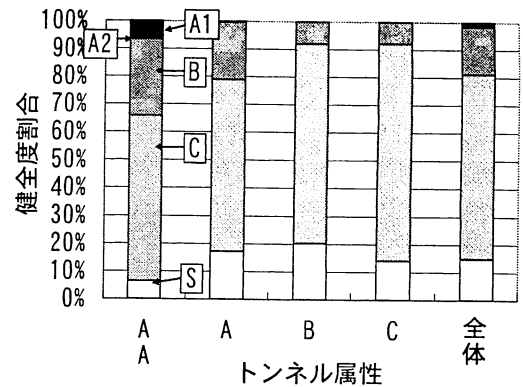


図-6 トンネル属性ごとの健全度一覧

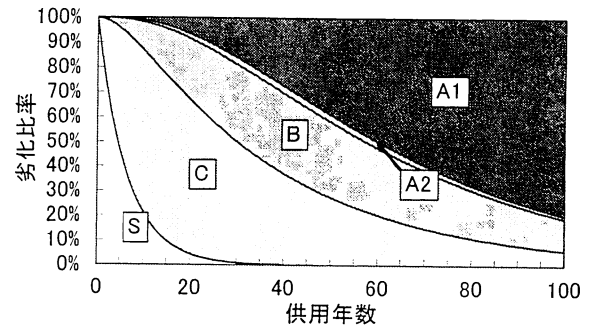


図-7 劣化予測結果 (トンネル属性AA)

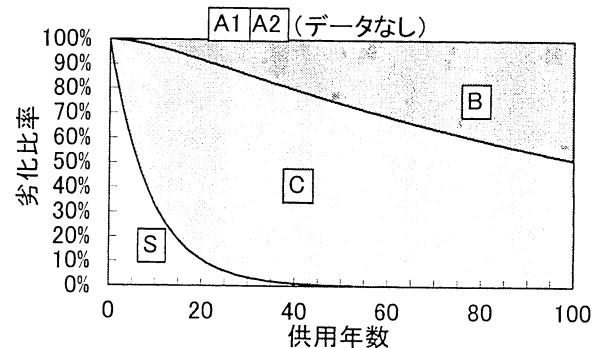


図-8 劣化予測結果 (トンネル属性C)

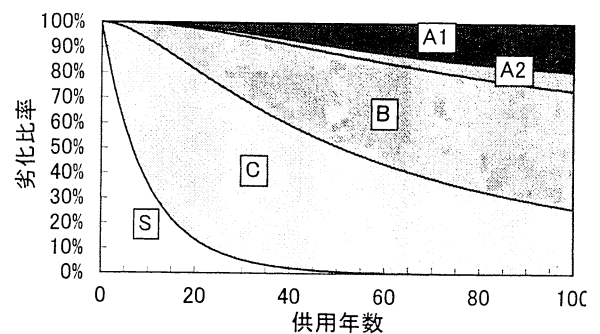


図-9 属性ごとの結果の総和に基づく劣化予測結果

本章における検討結果を以下に列挙する。

①健全度がAA以下に低下したデータが存在しないため、本研究では、実際にリスクが生起する確率までは推定できない。劣化リスクを定量化するためには、リスク生起事例を収集し、リスク生起確率を計算することが必要である。

②トンネル属性の違いにより、劣化の進行が異なることを再現できた。また、属性ごとの劣化予測結果の総和が全体の劣化予測結果に近づくことも示した。全体的な視点で劣化進行を予測することにより、今後の維持管理投資予測が可能になると考えられる。

③健全度がA2、A1である箇所は非常に少なく、予測精度に問題があると考えられる。従って、他事業者のデータを加えてデータ数を増やし、劣化予測精度を上げる必要があると考えられる。

④同一事業者の点検は、同一の点検者が行うことが多く、点検データには点検者の主観によるバイアスがかかっている可能性が高い。これを除去するためにも他の事業者とのデータ共有、交換が必要と考えられる。

⑤トンネルはゆっくり劣化進行するので、少ない年月の点検データでは長期にわたる劣化予測の精度は高くはないと考えられる。また、目視による点検で必ずしも劣化が的確に発見できるとは限らないため、予測精度向上には長期にわたるデータ蓄積が重要であると考えられる。

5. 山岳トンネルの地震リスク分析

(1) 山岳トンネルの被災確率の算定

本章では、地震によるトンネルの被災確率を既往のトンネルの被災記録^{5), 6), 7), 8), 9)}より求め、これを用いて、自動車や列車の被災リスクを算定した。

過去の地震災害におけるトンネルの被災率の算定結果を表-5に示す。震源断層付近トンネル延長に占めるトンネル被災延長を被災率とすると、被災率は1.0%前後であることがわかる。

なお、被災記録において、被災トンネルの施工年代や工法（矢板工法、NATM工法）の詳細の諸元が明らかになっている。阪神淡路大震災および新潟県中越地震について、属性ごとの被災率を表-6のとおり求めた。これによれば、矢板工法のトンネルおよび、1960～1980年に施工されたトンネルの被災率が比較的高いことがわかる。

表-5 過去の地震災害におけるトンネル被災率

地震名	関東大震災	伊豆大島近海地震	阪神淡路大震災	新潟県中越地震
発生日	1923	1978	1995	2004
マグニチュード	7.9	7.0	7.2	6.8
死者	105,000	23	6,434	68
震源断層周辺トンネル延長(m)	15,515	21,367	104,994	138,951
顕著な被害トンネル延長(m)	113	236	371	1,037
被災率	0.73%	1.10%	0.35%	0.75%

表-6 工法、施工年代別のトンネル地震被災率

地震名		断層周辺トンネル延長(m)	顕著な被災トンネル延長(m)	被災率
阪神淡路大震災	全体	104,994	371	0.35%
	工法別			
	矢板	67,842	311	0.46%
	NATM	37,152	60	0.16%
新潟県中越地震	全体	138,951	1,037	0.75%
	工法別			
	矢板	95,821	780	0.81%
	NATM	42,035	247	0.59%
	施工年代別	～1944	5,031	0.00%
		～1959	18,476	0.00%
		～1969	10,665	2.53%
		～1979	48,935	1.00%
		～1989	19,958	0.10%
		～1999	26,629	0.97%
		2000～	9,258	0.00%

(2) トンネル被災リスクの検討条件

a) 基本条件

本節では、上記被災リスクを考慮したリスクシミュレーションの条件を示す。検討対象は、鉄道（新幹線、在来線）トンネルと、道路（高速道路）トンネルとした。被災区間は、新潟県中越地震の大被害トンネルは震源断層の5km以内であったと報告されている¹⁰⁾ことから、震源断層を中心とした10kmの区間と仮定した。被災区間内には、同一条件のトンネルが連続しているものと仮定した。なお、本研究で算定するリスクは、トンネル崩壊等に伴う列車、自動車の直接被災リスクのみとし、構造物被害や、火災、脱線等の二次災害リスク、不通等に伴うリスクは考慮しないものとした。

b) 地震によるトンネル被災状況のモデル化

地震時にトンネルは一定の被災確率で、覆工崩落等の大被害を受けると仮定した。被災は50m区間で起きると仮定し、隣接区間の被災の有無に関わらず独立であると仮定した。被災確率は1%を標準とするが、被災率低下の影響等を見るために、感度分析を行った。

c) 列車，自動車について

列車，自動車は，表-7の速度で走行し，地震発生後，以下の制動距離を走行して停止すると仮定した。

列車については，運行時間帯，本数を表-8のとおり仮定する。列車は等間隔，等速で上下線とも走行しているものと仮定した。

自動車に関しては，交通量を表-9のとおり仮定し，被災区間内を走行している台数を求め，被災区間内を走行している各車の被災確率が独立であると仮定した。

d) 被災リスクについて

被災リスクは，列車，自動車の被災箇所への進入状況に応じて，①トンネル塊が列車，自動車を直撃する，②トンネル塊に列車，自動車が激突する，③トンネル塊に列車，自動車が接触する，の3段階を仮定した。トンネルは，地震発生後3秒間で崩壊，落下するものと仮定し，この間にトンネル直下を通過する車両はトンネル塊に直撃するものと仮定した。制動距離の1/2以内に崩壊塊に到達した場合は激突，それ以後に崩壊塊に到達した場合は接触と仮定した。新幹線，在来線，自動車における，上記の3種類のリスク発生時の被災金額は，表-10のとおり仮定した。

表-7 地震シミュレーションの車両に関する想定

	新幹線	在来線	自動車
車両延長	400m	200m	10m
走行速度	240km/h (67m/秒)	120km/h (33m/秒)	90km/h (25m/秒)
制動距離	2,000m	600m	340m

表-8 列車の運行時間帯，運行本数に関する仮定

	新幹線		在来線	
検討ケース	ケース1A	ケース1B	ケース2A	ケース2B
列車運行時間帯	6:00～24:00 (18時間)		6:00～24:00 (18時間)	
運転間隔	6本/時	2本/時	6本/時	2本/時
列車間隔	40km	120km	20km	60km

表-9 自動車の交通量に関する仮定

検討ケース	ケース3A	ケース3B	ケース3C
交通量	20,000台/日 (0.231台/秒)	10,000台/日 (0.116台/秒)	5,000台/日 (0.058台/秒)
走行速度	90km/h (1.5km/分)		
平均間隔	108m	216m	432m
被災区間(10km) 走行台数	93台	46台	23台

表-10 1編成，1台あたりの被災時被害金額の仮定

被災状況	新幹線	在来線	自動車
崩壊塊が直撃	50億円	30億円	1億円
崩壊塊に高速で激突	20億円	10億円	3000万円
崩壊塊に低速で接触	5億円	3億円	500万円

(3) 被災リスクの算定プロセス

以下に，新幹線（ケース1A）における計算結果を示す。検討手順は，まず列車が被災区間を走行している場合の崩壊塊の直撃，激突，接触確率を求め，その後列車が被災区間を走行している確率をイベントツリーにより求め，最終的に期待損失を計算した。

a) 崩壊塊が直撃する確率

新幹線がトンネル崩壊(3秒間)に移動する距離は，67m/秒×3秒＝200mである。すなわち，車両延長400m+200mの合計600m区間でトンネルが崩壊すれば，崩壊塊が直撃することになる。この中には，50mの区間が12区間ある。それぞれの区間の被災確率は1%であるので，少なくとも1箇所が被災する確率 p_1 は，式(1)で表わされる。

$$p_1 = 1 - \text{poisson}(0.01 \times 12, 0) = 0.1131 \quad (1)$$

b) 崩壊塊が激突する確率

直撃災害が発生しない条件のもとで，新幹線の制動距離の半分すなわち，1000m走行するまでに崩壊塊に到達する（激突災害となる）確率 p_2 は，式(2)で表わされる。

$$p_2 = (1 - p_1) \times \{1 - \text{poisson}(0.01 \times 16, 0)\} = 0.1311 \quad (2)$$

c) 崩壊塊が接触する確率

直撃，激突災害が生じない条件で，制動距離までの残り1000mの間にトンネルが被災する（崩壊塊が接触する）確率 p_3 は，式(3)で表わされる。

$$p_3 = (1 - p_1 - p_2) \times \{1 - \text{poisson}(0.01 \times 20, 0)\} = 0.1370 \quad (3)$$

d) 崩壊塊にあたらない確率

崩壊塊にあたらない確率 p_4 は，式(4)で表わされる。

$$p_4 = 1 - p_1 - p_2 - p_3 = 0.6188 \quad (4)$$

(4) 被災リスクの算定結果

列車が被災区間を走行している確率を、リスクイベントツリーを用いて整理し、それぞれの事象発生時の損失額を乗じることにより、期待損失を図-10のように求めた。

各ケースの期待損失算定結果を表-11に示す。新幹線において、直撃、激突、接触のリスクが高いことがわかった。高速道路では、一台あたりのリスクは大きくないが、交通量が多い場合、被災区間内を通過している自動車の台数が多いため、被災するリスクは高い結果となった。交通量や列車密度と期待損失との関係は、ほぼ線形関係にあり、交通量、列車密度増加に従って期待損失も増加することがわかった。

(5) 被災リスクの感度分析

a) 被災確率を変化させた場合の感度分析

被災確率の感度分析結果を図-11に示す。期待損失の増加は被災確率が上昇すれば若干減るものの、既往の地震災害の被災確率（0～1%前後）の範囲内では、線形関係とみなしても差し支えない結果となった。

b) 制動距離を減少させた場合の感度分析

列車の制動距離を減少させることで、被災リスクがどのように下がるか、新幹線（ケース1A）において検証した。検証結果を表-12に示す。トンネル崩壊直撃のリスクは軽減できないが、制動距離20%の短縮で、約8%のリスク低減が可能と考えられる。以上より、脱線等の二次的なリスクも低減可能であることや、早期地震動検知システムの改良や、ブレーキの性能改良により、制動距離を短くするアプローチが有効であると考えられる。

		事象 発生確率	損失額 (万円)	期待損失額 (万円)
営業時間外 0.2500	列車被害なし	0.2500	× ¥0	= ¥0
	列車走行なし 0.5625	0.4219	× ¥0	= ¥0
営業時間内 0.7500	1列車走行 0.3750	崩落塊が直撃 0.1131	0.0318 × ¥500,000	= ¥15,902
		高速で崩落塊に激突 0.1311	0.0369 × ¥200,000	= ¥7,376
		低速で崩落塊に接触 0.1370	0.0385 × ¥50,000	= ¥1,927
		崩落塊に当たらない 0.6188	0.1740 × ¥0	= ¥0
	2列車走行 0.0625	2列車直撃 0.0128	0.0006 × ¥1,000,000	= ¥599
		1列車直撃+1列車激突 0.0297	0.0014 × ¥700,000	= ¥973
		1列車直撃+1列車接触 0.0310	0.0015 × ¥550,000	= ¥799
		1列車直撃のみ 0.1399	0.0066 × ¥500,000	= ¥3,280
		2列車激突 0.0172	0.0008 × ¥400,000	= ¥322
		1列車激突+1列車接触 0.0359	0.0017 × ¥250,000	= ¥421
		1列車激突のみ 0.1623	0.0076 × ¥200,000	= ¥1,521
		2列車接触 0.0188	0.0009 × ¥100,000	= ¥88
		1列車接触のみ 0.1695	0.0079 × ¥50,000	= ¥397
		2列車とも無被害 0.3829	0.0179 × ¥0	= ¥0
期待損失額 (万円)				¥33,606

図-10 イベントツリーによる地震時期待損失算定結果

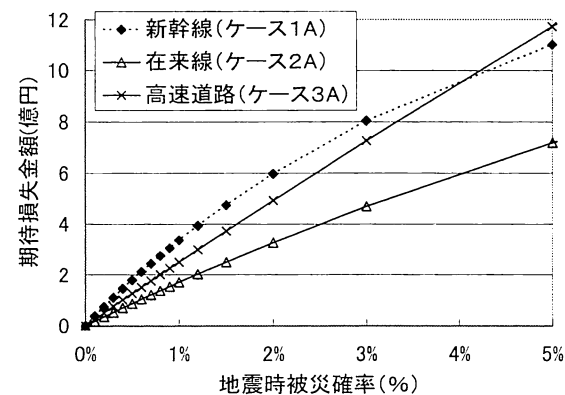


図-11 トンネル被災確率による期待損失額の感度分析

表-11 各ケースにおける地震発生リスクのまとめ

	新幹線		在来線		高速道路		
	ケース1A	ケース1B	ケース2A	ケース2B	ケース3A	ケース3B	ケース3C
列車本数 交通量	6本/時	2本/時	6本/時	2本/時	2万台/日	1万台/日	5千台/日
期待損失 (億円)	3.36	1.12	1.71	0.57	2.50	1.25	0.63

表-12 制動距離による新幹線被災リスクの感度分析

	ベースケース (ケース1A)	比較ケース1	比較ケース2
制動距離	2,000m	1,600m	1,200m
直撃確率 p1	0.1131	0.1131	0.1131
激突確率 p2	0.1311	0.1003	0.0682
接触確率 p3	0.1370	0.1163	0.0926
期待損失	3.36億円	3.09億円	2.81億円
ベースケース との比率	1.000	0.920	0.836

(6) まとめ

地震被害事例から被災確率を計算し、列車や自動車の被災リスクの定量化を試みた。実際に、新幹線においては、新潟県中越地震後に活断層と交差するトンネルの補強¹¹⁾を施している。本研究で実施したヒアリングにおいても、被災リスクが他の箇所と比べて高いと考えられる坑口部、活断層周辺部の補強等を施していると回答した事業者もみられた。また、早期地震動検知システムの改良などにより、リスクの低減が図られている事例もある。一方で、高速道路については、早期地震動検知システムなどの対策が難しく、被災区間を複数台の車が走行していることが想定され、リスク軽減を図ることが難しい。従って、活断層付近におけるトンネル補強対策といったリスク軽減策が今後必要であると考えられる。

6. 結論

本研究では、山岳トンネルの維持管理リスクをヒアリング等によって明確にし、数理モデル等を用いて定量化するアプローチを行った。その結果、山岳トンネルは通常ゆっくり劣化が進行するため、劣化予測精度を高めるためには、長期的にデータの蓄積を図る必要があることがわかった。また、事業者ごとに変状事例等が蓄積されているが、事業者間のデータ共有等は積極的に行われていないのが実情であり、正確な劣化予測を行うために、今後事業者間でデータを共有する必要があると考えられる。

これまでの山岳トンネルにおいては、健全度低下後に対策工を実施する事後保全型の維持管理が大半であったが、小林ら¹²⁾の指摘するように、ライフサイクルコスト低減のためには、将来の劣化傾向をつかみ、最適な補修のタイミングを検討する必要があると考えられる。そのためには、トンネル全体の劣化傾向を把握し、予算管理をすることが必要であると考えられる。また、ライフサイクルコストを考えるにあたっては、個々のトンネルのライフサイクルのみを考慮するにとどまらず、ネットワーク全体としての最適性を考慮する必要があると考えられる。

自然災害リスクは、災害大国といわれるわが国では小さくなく、山岳トンネルにおいても、地震等による様々な被災事例が確認されている。被災リスクがどの程度のものかを知り、対策を検討することが、災害リスク低減へのアプローチとなると考えられる。

本研究においては、限られたデータに基づいて簡単な数理モデルを用いて検討を行ったが、今後デー

タの蓄積を継続的にを行い、トンネルの特性に応じたリスクイベントの定量化を可能にするためのアプローチが必要であると考えられる。

維持管理は、維持管理担当部門のみが考えれば良いという考え方を持ち続けられれば、維持管理段階のリスクは今後も軽減されていかないと考えられる。維持管理部門はもちろん、計画、設計、施工、現業、経営、研究などの部門の知識を吸収して、リスクの所在と低減策を考えることが重要と考える。さらに、事業者の中だけにとらわれず、社会全体でリスク意識を共有していけば、社会資本の維持管理、リスク軽減戦略を立てやすくなると考えられる。

これからの少子高齢化時代、山岳トンネルも年数を経たものがますます増えていくことになるだろう。これらのトンネルを末永く使い続けていけるように、社会全体で知恵を出し合っていければ良いと考える。

参考文献

- 1) 土木学会：「トンネルの変状メカニズム」、2003。
- 2) 土木学会建設マネジメント委員会PFI研究小委員会：「道路関係事業におけるPFI導入に向けたリスクマネジメント検討調査 報告書」、2006。
- 3) 運輸省：「トンネル保守管理マニュアル」、2000。
- 4) <http://psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp/bms/index.html>
- 5) 土木学会編：「大正12年関東大地震震害調査報告書」、第二巻鐵道及び軌道之部、pp.1-85, 1926。
- 6) 小野田、楠山、吉川：「伊豆大島近海地震による被害（1）鉄道トンネルの例」、トンネルと地下、Vol.9, No.6, pp.7-12, 1978。
- 7) 今田：「伊豆大島近海地震による被害（2）道路トンネルの例」、トンネルと地下、Vol.9, No.7, pp.9-16, 1978。
- 8) 小山、朝倉、佐藤：「兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧」、トンネルと地下、Vol.27, No.3, pp.51-61, 1996。
- 9) 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」、土木学会, 2005。
- 10) 清水、齋藤、鈴木、朝倉：「新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果」、トンネルと地下、Vol.38, No.4, pp.49-57, 2007。
- 11) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/08/081207_2_.html。
- 12) 小林、上田：「インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望」、土木学会論文集、No.744, IV-61, pp.15-27, 2003。