

高速道路トンネルの火災被害額算定手法の提案

山崎 哲也¹・横田 昌弘²・川端 信義³

¹正会員 (株)高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail:t.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

²中日本ハイウェイ・エンジニアリング 東京(株) (〒160-0023 東京都新宿区西新宿1-23-7)

E-mail:m.yokota.aa@c-nexco-het.jp

³金沢大学 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail:kwbt@t.kanazawa-u.ac.jp

道路トンネルは閉鎖された空間であるため、火災が発生すると煙の遡上などにより、大きな被害となる可能性をはらんでいる。そのような道路トンネル火災リスクに対し、どのように取り組んでいくかという課題に対し、これまでの高速道路トンネル火災データを活用し、リスクアナリシス手法の構築を目指している。構築したリスクアナリシス手法を用いて、各々のトンネルの潜在的火災リスクを算定し、状況に応じて計画的に対策を講じておけば、未然に大きな被害を回避することができると思う。本稿では日本の高速道路トンネルの「リスクアナリシス手法」構築に向けた火災事故データ解析を通して策定した、火災被害額の算定手法について提案する。

Key Words : tunnel fire, risk analysis, statistical risk, potential risk, fire simulation, evacuation simulation

1. はじめに

道路トンネルは閉鎖された空間であり、火災が発生すると、人命に係る危険、車両や積荷の焼損、通行止めに伴う社会的な損失、並びにトンネル施設そのものの破損・障害など、大災害につながる可能性がある(表-1)。道路管理者として日々トンネルの安全性向上に取り組んでいるなかで、限られた費用で最善の効果を上げるために、欧州を中心に導入が進んでいる「リスクアナリシス手法」を取り入れ、対象の絞り込みと効率的な対策ができないか検討している。

本稿では日本の高速道路トンネルの「リスクアナリシス手法」構築に向けた火災事故データ解析を通して策定した、火災被害額の算定手法について提案する。

2. トンネル火災リスク

一般的にリスクとは、好ましくないことが発生する確率とその影響の積から求められる(式(1))。

$$Risk = \sum_i f_i \times C_i \quad (1)$$

この関係を「トンネル火災事故リスク」に当てはめると、「トンネル火災事故発生確率」とその火災事故における「被害額(影響)」の積となる。

3. トンネル火災リスク評価と運用イメージ

「高速道路トンネル火災事故リスク」を、火災事故の「発生確率」と火災に伴う「被害額」で定義すると、図-1 に示すリスクマトリクスを生成することが出来る。このマトリクスを用いて個々のトンネル固有リスクを可視化することで、相対的にリスクが高いトンネルを抽出し、優先順位を付けながら、非常口設置等のリスク低減策を選択することが可能となる。本稿では、図-1 のうち「被害額(影響)」の算定方法について報告する。

表-1 大災害となったトンネル火災

分類	日本坂トンネル	モンブラントンネル
発生	1979年7月11日	1999年3月24日
被害	犠牲者7名 焼損車両173台	犠牲者39名 焼損車両33台
事故後の対応	換気設備改修 非常用施設改善など	避難・排煙施設改修 管理組織改編など
基準等	トンネル防災施設設置基準整備	欧州指令発令 各国リスクアナリシス実施の義務化

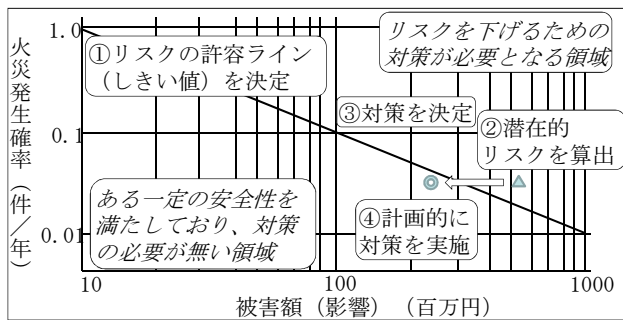


図-1 リスクアナリシスのイメージ

4. 高速道路と火災事故

国土開発幹線自動車道計画全延長 11 520km のうち、H24.3 末時点で約 7 800 km の高速道路が供用しており、トンネル総延長（上下線の合計）は約 1 643 km である。総計 1 748 本のトンネルのうち、90%が延長 2km 未満、70%が延長 1km 未満となっている。高速道路トンネルの火災事故に関しては、平成元年度～23 年度の間に於いて年間 4～21 件程度あり、概ね 1 か月に 1 回発生している計算となり、一歩間違えば大きな被害となったであろう事象も含まれる。

5. トンネル火災事故データ統計処理

NEXCO では高速道路事業開始以来のトンネル火災事故データを保有（全 326 件）しており、これら統計データベースからトンネル火災事故発生確率並びに被害について推計することができる。想定や仮定により発生確率などを決めている欧州のリスクアナリシスに比べ、実際の火災事故データを用いているという点では、より信憑性が高いといえる。

(1) 火災事故データベース

火災事故データベースには①日時・天候、②トンネル名・諸元（延長、設計速度、規制速度、位置、標高、勾配、等級、交通方式、供用年月日）、③路線名・区間・分類（高速・一般有料道路）、④交通量（日平均、年平均、大型車混入率、事故率）、⑤火災概況（出火車、出火原因、燃焼時間、消火時間、事故原因、通行止め時間）、⑥物的被害（路面、壁面、照明器具、ケーブルなど）、⑦犠牲者数、⑧負傷者数等が記録されている。データベースを用いてトンネル内火災事故を発生原因から分類すると図-2 のとおり。交通事故から火災に至る「事故系火災」と整備不良やオーバーヒート等車両出火により発生する「車両系火災」に分類される。これら要

因からも、車両系火災の場合、複数が絡む事故は少ないことが推測できる。

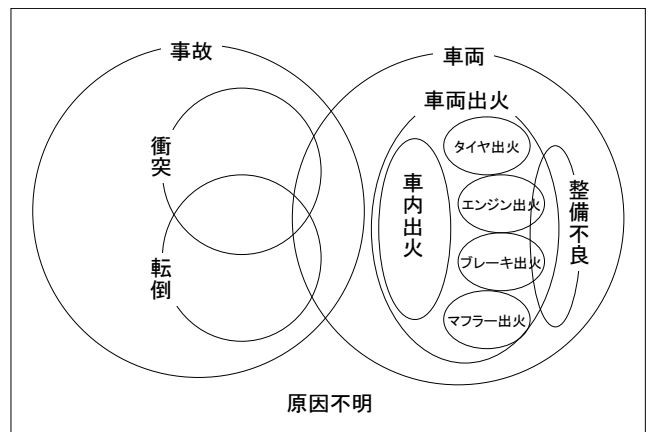


図-2 火災事故原因の集合

(2) 事故形態毎の出火原因の内訳

事故系と車両系に分類した際の、事故形態毎の出火原因の内訳は表-2 に示すとおりである。

表-2 事故形態毎の出火原因の内訳

出火原因	事故形態	火災件数	割合
事故系	単独	43	52%
	複数	40	48%
車両系	単独	182	98%
	複数	4	2%

6. トンネル火災被害額の想定

仮にトンネル内で火災が発生した場合の被害額を式(2)で定義する。

$$\text{被害額} = \text{人的損失} + \text{物的損失} + \text{社会的損失} \quad (2)$$

(1) 人的損失

人的損失は式(3)で定義し、犠牲者と負傷者に分け、トンネル等級毎に算出する。

$$I_H = L_D \times E_D + L_I \times E_I \quad (3)$$

I_H : 火災事故 1 件あたりの人的損失額 (円)

L_D : 1 人あたりの死亡損失額 (円)

E_D : 火災事故 1 件あたりの予測犠牲者数 (人)

L_I : 1 人あたりの重傷損失額 (円)

E_I : 火災事故 1 件あたりの予測負傷者数 (人)

a) 犠牲者発生確率

トンネル火災事故データベースを分析した結果、犠牲者に関しては表-3、表-4 のとおりとなる。

表-3 事故形態毎の死亡事故発生確率

事故形態	犠牲者	火災件数	割合
単独	0	235	94%
	1	15	6%
	2	1	
複数	0	31	60%
	1	12	40%
	2	1	
	3	3	
	5	3	
	7	2	

表-4 死亡火災事故1件あたりの平均犠牲者数

事故形態	トンネル等級	死亡事故1件あたりの平均犠牲者数
単独	AA	1.00
	A	1.00
	B	1.33
	C	1.00
	D	データなし
複数	AA	3.00
	A	2.50
	B	2.57
	C	1.00
	D	データなし

※トンネル等級とは、各トンネルを延長と交通量で5段回到に区分したもの。等級に合わせて非常用施設の設置基準などを決めている。

表-3、表-4 より、犠牲者発生確率のイベントツリーを作成すると図-3 のとおり。

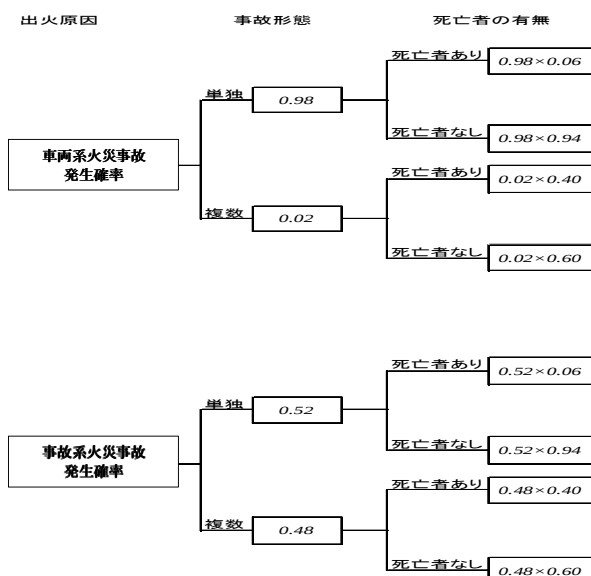


図-3 犠牲者発生確率イベントツリー

火災事故発生に対する各イベントの発生確率と設備等級毎の死亡事故1件あたりの平均犠牲者数(表-4)を用い、出火原因毎、設備等級毎の火災事故1事故あたりの死亡者数の予測値を求めると、表-5、表-6 のとおりとなる。

表-5 車両系火災事故1件あたりの予測犠牲者数

トンネル等級	車両系火災事故1件あたりの平均犠牲者数の予測値
AA	0.08
A	0.08
B	0.1
C	0.07
D	0.07

表-6 事故系火災事故1件あたりの予測犠牲者数

トンネル等級	事故系火災事故1件あたりの平均犠牲者数の予測値
AA	0.61
A	0.51
B	0.53
C	0.22
D	0.22

b) 負傷者発生確率

トンネル事故火災データベースを分析した結果、負傷者に関しては表-7、表-8 のとおりとなる。

表-7 事故形態毎の負傷事故発生確率

事故形態	火災事故件数	負傷火災事故件数	負傷者が 出た割合	負傷者が 出なかった 割合
単独	251	21	8%	92%
複数	44	32	73%	27%

表-8 負傷火災事故1件あたりの平均負傷者数

事故形態	トンネル等級	負傷火災事故件数	負傷火災事故1件あたりの平均負傷者数
単独	AA	6	1.5
	A	9	1.0
	B	5	1.0
	C	1	1.0
	D	0	該当なし
複数	AA	6	1.7
	A	14	4.9
	B	9	2.0
	C	3	1.0
	D	0	該当なし

表-7、表-8 より、負傷者発生確率のイベントツリーを作成すると図-4 のとおり。

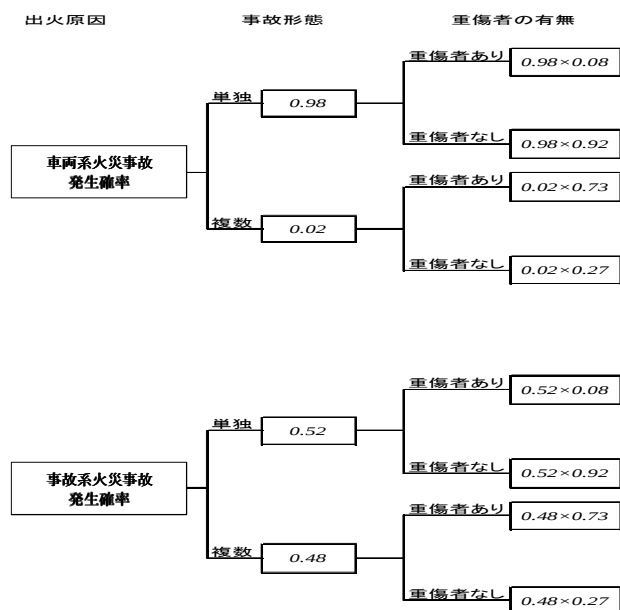


図-4 負傷者発生確率イベントツリー

火災事故発生に対する各イベントの発生確率と設備等級毎の負傷事故1件あたりの平均負傷者数（表-8）を用い、出火原因毎、設備等級毎の火災事故1事故あたりの負傷者数の予測値を求めると、表-9、表-10のとおりとなる。

表-9 車両系火災事故1件あたりの予測負傷者数

トンネル等級	車両系火災事故1件あたりの平均負傷者数の予測値
AA	0.14
A	0.15
B	0.11
C	0.09
D	0.09

表-10 事故系火災事故1件あたりの予測負傷者数

トンネル等級	事故系火災事故1件あたりの平均負傷者数の予測値
AA	0.66
A	1.76
B	0.74
C	0.39
D	0.39

c) 人的損失額の想定

表-5, 表-6, 表-9, 表-10 の値を用い、式(4)によりトンネル等級毎に人的損失額の想定が可能。

人的損失額【A等級】（百万円）＝

$$\left(\frac{0.08 \times P_b + 0.51 \times P_f}{P_b + P_f} \right) \times 226 + \left(\frac{0.15 \times P_b + 1.76 \times P_f}{P_b + P_f} \right) \times 45 \quad (4)$$

P_b ：車両系火災発生確率

P_f ：事故系火災発生確率

1人あたりの死亡損失額：2億2600万円¹⁾

1人あたりの重傷損失額：4500万円¹⁾

(2) 物的損失

物的損失は式(5)で定義し、トンネル等級毎に算出する。トンネル火災事故データベースを分析した結果、トンネルの物的被害は、路面、照明器具、壁面、ケーブルなどの焼損があることが分かった。

$$I_p = \sum_i R_i \times E_i \quad (5)$$

I_p ：火災事故1件あたりの物的損失額（円）

R_i ：各対象物の原単位あたりの復旧費用

E_i ：各対象物の予測被害

i ：各対象物（路面、照明器具、壁面、ケーブル）

各施設のトンネル等級毎の被害発生率と被害、もとめられた火災事故1件あたりの予測被害を表-11～表-14に示す。

表-11 トンネル等級と被害規模（路面）

トンネル等級	路面被害発生率	起こった場合の平均被害（㎡）	火災事故1件あたり予測路面被害（㎡）
AA	2%	97.8	1.96
A	27%		26.41
B	24%		23.47
C	25%		24.45
D	0%		0.00

表-12 トンネル等級と被害規模（照明器具）

トンネル等級	照明器具被害発生率	起こった場合の平均被害（灯）	火災事故1件あたり予測照明器具被害（灯）
AA	9%	74.5	6.71
A	13%		9.69
B	15%		11.18
C	63%		46.94
D	0%		0.00

表-13 トンネル等級と被害規模（壁面）

トンネル等級	壁面被害発生率	起こった場合の平均被害（m）	火災事故1件あたり予測壁面被害（m）
AA	12%	99.6	11.95
A	15%		14.94
B	15%		14.94
C	38%		37.85
D	0%		0.00

表-14 トンネル等級と被害規模（ケーブル）

トンネル等級	ケーブル被害発生率	起こった場合の平均被害（m）	火災事故1件あたり予測ケーブル被害（m）
AA	11%	612.3	67.35
A	21%		128.58
B	24%		146.95
C	50%		306.15
D	0%		0.00

各設備の単位当たりの概算復旧費用を積み上げると表-15のとおり。

表-15 概算復旧費用

被害復旧費用（円）			
路面被害（㎡）	照明器具被害（灯）	壁面被害（m）	ケーブル被害（m）
120,000	7,750	65,000	30,000

表-11～表-15の値を用い、火災事故1件あたりの物的損失額を算出すると式(6)のとおり。

物的損失【等級毎】（円）

＝路面被害×復旧費＋照明器具被害×復旧費＋壁面被害×復旧費＋ケーブル被害×復旧費

(6)

(3) 社会的損失

社会的損失は、トンネル火災事故に伴う通行止めによる損失を考え、式(7)で定義し、トンネル毎に算出する。通行止め時間は、犠牲者の有無、物的損害の有無に左右されることが統計処理の結果分かった。

$$I_s = V \times U_w \times U_{travel} \times \sum_i T_i \times P_i \quad (7)$$

I_s ：火災事故1件あたりの社会的損失額（円）

V ：トンネル内の停止車両台数（台）

U_w ：通行止め1人・1時間あたりの社会的損失額原単位（円/人・時間）

U_{travel} ：1台あたり平均乗車人数（人/台）

T_i ：犠牲者の有無・物的損害の有無毎の平均通行止め時間（時間）

P_i ：犠牲者の有無・物的損害の有無毎の火災事故発生率

i ：各事象（犠牲者の有無、物的被害の有無）

通行止めによる、社会的損失費用推定に用いる原単位は、CVM（仮想評価法）¹⁾²⁾³⁾により、影響がより大きい大型車を取り上げ「大型車で業務目的」「乗用車で目的問わず」に分け設定した（表-16）。

表-16 社会的損失費用推定に用いる原単位（ U_w 、 U_{travel} ）

	受入補償（円）	平均乗車人数
大型車で業務目的	4,471	4.51
乗用車で目的問わず	2,918	2.44

これまでの事故から想定された平均通行止め時間は表-17のとおり。

表-17 平均通行止め時間（ T ）（単位：時間）

		犠牲者	
		有	無
物的損害	有	10.59	3.49
	無	3.41	1.38

犠牲者の発生確率は、図-3より出火原因毎に、火災事故が発生し犠牲者がでる確率を算出し、式(8)により算定する。

$$W = \frac{P_b \times 0.067 + P_f \times 0.223}{P_b + P_f} \quad (8)$$

W ：犠牲者発生確率

P_b ：車両系火災発生確率

P_f ：事故系火災発生確率

物的損害発生確率は、表-11～表-14を用い、設備毎（路面、照明器具、壁面、ケーブル）の被害発生確率より、トンネル等級毎に算出する。

火災事故1件あたりの平均通行止め時間は、犠牲者の有無と物的損害の有無別で、式(9)により、トンネル等級毎に求める。

$T_i \times P_i =$

犠牲者あり、物的損害あり：10.59× W × X

犠牲者あり、物的損害なし：3.41× W ×(1- X)

犠牲者なし、物的損害あり：3.49×(1- W)× X

犠牲者なし、物的損害なし：1.38×(1- W)×(1- X)

(9)

X ：物的損害発生確率

W ：犠牲者発生確率

式(7)にて、表-16、表-17、式(8)、式(9)を用いて社会的損失を求めると、式(10)のとおりとなる。

社会的損失【トンネル毎】（百万円）

＝（大型車停止車両台数×平均乗車人数×受入補償+乗用車停止車両台数×平均乗車人数×受入補償）×合計平均通行止め時間

＝（大型車停止車両台数×4.51×0.0044+乗用車停止車両台数×2.44×0.0029）× $\sum_i T_i \times P_i$ (10)

6. まとめ

式(2)にて、求めた人的損失，物的損失，社会的損失を用いて，被害額を算出する。

この手法を用いれば，実際に火災が発生していないトンネルにおいても，被害の予測が可能である．このトンネル火災被害額の想定手法を使い，高速道路トンネルの火災リスクアナリシス手法を構築中であり，今後はデータベースの更新，並びに精緻化を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 内閣府政策統括官（共生社会政策担当） 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究 2007.3
- 2) 国土交通省 第一回公共事業評価手法に関する検討会について 2007.1.18
- 3) 道路投資の評価に関する指針検討委員会 道路投資に関する指針（案）第2編 2000.1

(2013.9.2 受付)

Proposal of a calculation method for the amount of damages caused by fire in highway tunnels

Tetsuya YAMAZAKI, Masariro YOKOTA and Nobuyoshi KAWABATA

We are considering adopting the Risk Analysis Approach used in Europe to improve safety of expressway tunnels.

The risk of tunnels fires is expressed by the probability of occurrence and damage cost. And the Risk Analysis Approach is used to place an order of priority on the tunnels by selecting tunnels with a high probability of occurrence and then systematically implementing measures to reduce the risk, like constructing emergency exits. In this document, a Risk Analysis Approach using a statistical method to calculate the cost of damage caused by fires is proposed.