高速道路トンネルの潜在的火災リスク 評価手法の提案

山崎 哲也¹・横田 昌弘²・川端 信義³

¹正会員 中日本高速道路(株) (〒510-0832 三重県四日市市伊倉1-2-14)

E-mail: t.yamazaki.ac@c-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金沢大学大学院教授 自然科学研究科システム創成科学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

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

道路トンネルは閉鎖された空間であり、火災が発生すると煙の遡上などにより、明り部よりも被害が拡大する可能性がある。近年の安心安全が求められる社会情勢から、トンネル内の非常用施設を増強すべきと考えるが、費用や期間の面から、全てのトンネルの非常用施設の充実を図ることは難しい。このような課題に対し、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評価し、それに見合う対策を選定し、対策が必要なトンネルに対し、計画的に対応すれば、効率的に、未然に大きな被害を回避することができる。本稿では高速道路トンネル火災に関する「リスクアナリシス手法」を用いた、対策トンネルの絞り込みと対策の選定方法や、計画的、効率的に日本の高速道路トンネルの火災リスクを低減するしくみを提案する。

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

1. 緒言

道路トンネルは閉鎖された空間のため、内部で火災が発生した場合、発生する煙や熱気流により、環境が悪化し、当事者に危険が及ぶばかりでなく、後続車両への二次災害、交通流が遮断されることによる社会的な影響、火災に伴うトンネル本体や施設への損害が生じる恐れがある。過去の国内事例では、1979年に発生した東名高速の日本坂トンネル火災事故があり、渋滞後尾で発生した追突事故により発生した火災は次々に近傍の車両に燃え移り、173台もの車両が焼損、犠牲者7名もの被害が生じ、東名高速の静岡ICから焼津ICの間は復旧までに2ヶ月間を要している¹⁾。この火災事故の重大性に鑑み、1981年に道路トンネル防災施設設置基準が改訂され、トンネル等級と必要な防災設備の関係やそれらの仕様が明確化された。

海外に目を転じると、日本坂トンネル火災事故から20年目の1999年、フランスとイタリアの国境に位置するモンブラントンネルにおいて、小麦粉を積んだトラックから出火、その後の非常事対応の不味さなどから、焼

失車両33台、犠牲者39名という大惨事が発生した。同年にはオーストリアのタウエルントネル(犠牲者12名)、2001年にはスイスのゴットハルドトンネル(犠牲者11名)と、大規模なトンネル火災事故が対面通行のトンネルでたて続けに発生した²⁾。これらの火災事故を重要視した欧州共同体では、国境を越えた産官学に連携による検討を重ね、2004年に道路トンネル非常用施設に関する欧州指令2004/54/EC(以降、「欧州指令³⁾」という)を発令した。この欧州指令は必要最小限の基本的な基準であるが、加盟国に対して拘束力があり、各国では各々、安全性向上に伴う基準が制定された。特徴的なのは、単に基準を順守するだけのものではなく、対象トンネルの安全性について、交通量や延長などのほか、配備される非常用施設種別や規模、運用体制などに対してリスクアナリシスを行い、比較検討のうえ安全対策の選定を行うよう各国に義務付けた点である。

一方、日本の高速道路では1989年頃より「対面通行トンネル」が増加傾向にある(図-2)。また、トンネル火災事故は東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)が管理する高速道路トンネル(以下、

高速道路トンネルとし、論文内の「トンネル」は特に断らない限り基本的に高速道路トンネルを示す) において年間 16 件程度発生しており、図-4 に示すとおり漸増傾向にあることが分かっている。また、表-6 に後述するが、対面通行のトンネル火災事故の発生確率(件/億台・km)は、一方通行トンネルに比べ低いものの、犠牲者や負傷者が生じる確率が高いことが分かっている。このような状況を改善するためには安全性向上のための対応が必要である。しかし、全ての高速道路トンネルの安全性を短期間で向上させることは困難であり、どこから先に手を付けたいのか、事業の優先度などを相対的に勘案する必要がある。このため、本研究では火災時の安全性を向上すべきトンネルの抽出、並びに効果的な改善対策方法の選定のため、欧州でトンネル安全性の評価に用いられているリスクアナリシスに注目したものである。本論文では、日本の高速道路トンネルで蓄積された独自のトンネル火災事故統計データを用いた統計的、潜在的リスク評価を行い、リスク改善措置と代替案評価・選定手法について提案することを目的としている。図-1 に本研究のフレームを示す。

(用語の説明)

統計的火災リスク：トンネル火災事故実績から求めた特定パラメータから推計式を作成して全てのトンネルに対してリスクを算定、現段階のリスクを相対比較するもの。推計式は火災事故発生確率と影響(人的、物的、社会的)である。但し、リスク改善策に対する効果の確認は経過観察となり、一定の観測期間を要する。

潜在的火災リスク：統計的火災リスクの影響のうち、人的影響に着目し、火災シミュレーションで求めた坑内環境の時刻歴データに対して、非常用施設と避難シナリオを組み合わせた避難シミュレーションを連成して影響(人的被害)の変化を確認・評価してリスク改善策を選定する。このため個々のトンネルの施設に応じた現実的なリスクと改善効果の把握を可能とする。

図-1 本研究のフレーム

2. トンネル火災事故と被害状況

(1) 高速道路トンネルの現況

高速道路トンネルの延長推移を図-2 示す。全トンネル累計延長は 2012 年度で 1,645km に達している。これらのうち対面通行トンネルの延長は 1989 年(平成元年)頃より徐々に増加してきており、2012 年度には 340.5km と全延長の 20.7%に達している。また、全トンネル累計本数は 1748 本、このうち対面通行は 330 本と全体の 18.9%である。また、付図-1 に示す等級別には図-3 に示す通り、B等級が最も多く、AA等級が最も少ない

(2) トンネル火災事故データベース(以後データベースという)

高速道路トンネルの火災事故データは昭和 38 年の名神高速道路開通以来記録されている。本研究ではデータ収集項目の統一性を考慮し、平成元年以降の火災事故データ全 283 件を使用する。データベースには表-1 に示す項目が収集されている。データベースには発生日時、通行止め時間等の「時間データ」、トンネル名、交通形態、延長、交通量、トンネル等級等の「アセットデータ」、火災事故発生確率、火災形態、車種、燃焼時間、犠牲者、負傷者等の「火災データ」に大別される。

図-2 日本の高速道路トンネル数と延長の推移

図-3 等級別トンネル本数

これらのうちトンネル火災事故発生確率は、当該トンネルの供用から火災が発生するまでの間を対象として式(1)で算定している。

$$\text{火災事故発生確率} = \frac{\text{これまでの火災件数（件/年）}}{\text{供用開始からの経過年数（年）}} \quad (1)$$

(3) トンネル火災事故

平成元年からの高速道路トンネル火災事故発生数の推移を図-4に示す。火災事故は毎年4～21件発生、平均で12.3件/年、概ね月1回発生している。

等級別の傾向を表-2に示す。一方通行、対面通行共に本数が最も少ないAA等級の火災事故が最も多く、D

表-1 火災事故データベース収集項目

分類	項目	単位	記事
時間データ	年月日	年月日	火災発生
	時刻	時分	火災発生
	火災覚知までの時間	分間	管制室が確認
	消防隊出動要請までの時間	分間	火災覚知から
	消防隊到着までの時間	分間	要請から
	水噴霧放水までの時間	分間	覚知から
	水噴霧放水時間	分間	放水開始から
	燃焼時間	分間	火災覚知から
	通行止め時間	分間	火災覚知から
アセットデータ	トンネル名	—	発災トンネル
	路線名	—	道路
	区間	—	IC間
	交通形態	—	一方/対面
	上下別	—	上下(右左)
	延長	m	当該トンネル
	設備等級	—	AA, A, B, C, D
	日交通量	台/日	当該トンネル
	年間交通量	台/年	当該トンネル
火災データ	火災事故発生確率	件/年	式(1)
	火災形態	—	単独, 複数
	出火原因	—	事故, 車両
	出火原因車両	—	小型, 大型等
	事故形態	—	単独, 複数
	消火栓の使用	—	使用, 未使用
	消火器の使用	—	使用本数
	犠牲者	人	原因特定せず
	負傷者	人	原因特定せず
	トンネル本体被害	規模	路面, 壁面, 施設

図-4 トンネル火災事故発生件数

等級では発生していないことが分かる。

トンネル火災事故原因車両を分類すると、図-5に示す通り、乗用車系と貨物系がほぼ同じ割合である。

トンネル火災事故の出火原因に関して図-6に示す通り、7割が車両故障に起因し、3割が交通事故によるものであり、単独事故と複数事故の割合はほぼ同一である。

(4) トンネル火災規模の推計

トンネル火災事故データベースには表-1に示す通り出火原因車両、事故形態(台数)、燃焼時間が記録されており、本研究ではPIARC資料⁴⁾などを参考に表-3に示す車両燃焼速度から、相対比較のため推計火災規模HRR_eを算出することを試みた。

トンネル火災事故データベースから式(2)を用いて火災規模を推計し、規模毎の生起率を表-4に取りまとめた。全体では推計規模5MWクラスの火災が最も多く発生しており、30MWクラスの火災は僅か0.7%であることが分かる。

表-2 トンネル等級別火災発生件数

設備等級	全体(件)	一方(件)	対面(件)
AA	132	117	15
A	102	84	18
B	34	33	1
C	15	11	4
総計	283	245	38

図-5 トンネル火災事故原因車両

図-6 トンネル火災事故車両出火原因

表-3 主な車種と燃焼速度: Hrr

車種	燃焼速度(MW)
軽乗用車	2.5
普通乗用車	5
マイクロバス	10
普通貨物車	20
大型貨物車	30
大型バス	30
タンクローリー	100

表-4 推計火災規模の生起率

規模クラス	全体(%)	一方通行(%)	対面通行(%)
0MW	21.3	19.0	36.8
5MW	54.0	54.2	52.6
10MW	19.9	21.3	10.5
20MW	4.1	4.7	0.0
30MW	0.7	0.8	0.0

表-5 平成元年度以降のトンネル火災事故犠牲者, 負傷者

種別	交通形態	犠牲者(人)	負傷者(人)
故障火災	一方	2	10
	対面	1	1
事故火災	一方	26	64
	対面	9	14
総計		38	89

表-6 交通形態別被害等平均データ

項目	単位	全体	一方通行	対面通行
トンネル長さ	m	3,298	3,372	2,799
交通量	台/日	21,658	23,191	11,588
火災事故発生確率	件/億台・km	30.7	32.3	20.1
消防隊到着	分間	23.5	23.1	27.2
通行止め時間	分間	131.6	132.6	124.8
犠牲者	人	0.131	0.111	0.263
負傷者	人	0.306	0.292	0.395
火災規模	MW	3.6	3.8	1.9

$$HRR_e = \sum Hrr \times C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (2)$$

ここに,

Hrr : 表-3に示す車両燃焼速度

C_1 : 燃焼時間係数(仮に 120 分に対する実燃焼時間)

C_2 : 複合火災係数(単独 1.0, 複数 2.0, 不明 1.5)

C_3 : 被害規模係数(0.2, ~2.0, 通常 1.0 施設被害に応じ加減)

(5) 被害状況

高速道路トンネル火災事故に伴う犠牲者, 負傷者を表-5に示す。出火原因は前出図-6に示した通り, 故障火災が多いが, 犠牲者, 負傷者は共に事故火災の方が多い。しかしながら, データベースには犠牲・負傷の原因(事故, または火災)は明確に記載されていないため, 本論文では火災由来として取り扱っている。次に表-6に交通形態別に被害等平均データを取りまとめた。平均値で比較すると, 延長, 交通量, 火災事故発生確率, 通

↑ 恒 被 害 の 発 生 頻 度 (確 率) ↓	改善	改善	使用停止	使用停止
	要注意	要注意	改善	使用停止
	問題なし	要注意	要注意	改善
	問題なし	問題なし	要注意	改善
小 ← 被害の程度(影響) → 大				

図-7 リスクマトリクスの例

行止め時間, 火災規模は一方通行の方が大きい, 犠牲者や負傷者に関しては対面通行の方が大きい。対面通行は, 一方通行に対して火災事故は発生しづらいが, 発生すると被害は大きくなる傾向があることが判明した。

3. トンネル火災リスクと評価手法

(1) トンネル火災評価の考え方

高速道路トンネル火災事故データ分析による被害状況等から, 相対的な安全性比較・評価手法としてリスク評価手法について検討を行う。一般的にリスクとは, 被害の発生頻度(確率)とその被害の程度(影響)の組み合わせであり式(3)で求められる⁹⁾。

$$R = P \times I = f(P, I) \quad (3)$$

ここに,

R : リスク

P : 被害の発生頻度(確率)

I : 被害の程度(影響)

ここで算出されたリスクは図-7に示すようなリスクマトリクスの形式で可視化することで, リスク管理対象施設のリスク状況が可能となる。

本研究では前出のトンネル火災事故データベースに記載されているデータの分析を行い“統計的リスク”を算出して現状のトンネルリスクを評価する。

(2) 火災発生頻度の推計

高速道路トンネル火災は図-8に示す通り車両系と事故系のものに大別され, 事故系火災の場合, 交通事故の発生から出火することが分かっている。これらの火災事故発生頻度を目的変数, 表-7に示す出火原因と考えられるパラメータを説明変数として, 考察により支配要因を絞り込み, 重回帰分析を行い, 火災発生頻度予測のためのモデル式生成を試みた。なお, 重回帰分析により導

かれる説明変数の係数や定数項の信頼性を確認するために t 値, 目的変数の精度を示す決定係数 R^2 を比較確認する. 他にも統計分析手法はあるが, 本論文ではこの手法を用いた. 現時点では定性的評価なので, 定量的評価には至っていないため, 検討の余地がある. 精度の向上は今後議論していきたい.

a) 車両系火災発生頻度

車両系火災のパラメータと t 値, R^2 の関係は以下の通りとなった.

トンネル等級の基本であるトンネル延長と交通量による分析結果は表-8 に示すとおり, 決定係数が 0.3368 であったが, t 値はトンネル延長に対して 7.668 であったが, 交通量に対しては 0.743 と低い値であった. このため, 車両系の火災事故 (未記入を除く 180 件を対象) の出火原因を確認したところ, エンジン由来の出火が 41% と最も多ことから, 出火原因をオーバーヒートと推計し, 道路構造による原因をトンネル勾配, トンネル入口までの登り坂延長, 坑口の標高, 並びに日交通量に関しても大型車に着目し, 予備的に検討した結果, 表-9 に示すとおり, 説明変数として標高, 交通量に関しても大型車交

表-7 出火原因と考えられるパラメータ

項目
トンネル延長
トンネル交通量
大型車混入率 (大型交通量)
交通形態 (一方/対面)
最大勾配
坑口標高
走行速度
発火率 (トンネル内交通事故件数から火災事故件数へ移行する割合)

図-8 トンネル火災事故発生頻度の構成

表-8 車両系火災評価(1)

決定係数 R^2 : 0.3368	係数	t 値
トンネル延長(m)	2.60×10^5	7.668
交通量(台/日)	5.44×10^7	0.743

表-9 車両系火災評価(2)

決定係数 R^2 : 0.4510	係数	t 値
トンネル延長(m)	1.86×10^5	5.357
大型車交通量(台/日)	2.68×10^6	1.979
標高(m)	1.62×10^4	4.624

通量の適合性が高いことが分かった. 決定係数は 0.451 に向上し, t 値に関しても目安と言われている値($t \geq 2$)をほぼクリアしていることが分かる. この結果から車両系火災発生頻度は式(4)で示される.

$$P_b = 1.86 \times 10^{-5} \times L + 2.68 \times 10^{-6} \times HV + 1.62 \times 10^{-4} \times H - 0.00103 \quad (4)$$

ここに,

P_b : 車両系火災発生頻度 (件/年)

L : トンネル延長 (m)

HV : 大型車交通量 (台/日)

H : 標高 (m)

選定したパラメータは, この場合, 延長, 標高, 大型車交通量の順で影響が大きい. なお, 延長の分布は付図-2, 標高の分布は付図-3 に示す.

ただし, 決定係数は向上したものの, まだ十分とは言えない状況であるため, 今後の検討で改善していく余地がある.

b) 事故系火災発生頻度

事故系火災はトンネル内で発生する交通事故に由来するもので, 高速道路トンネルで発生した交通事故データ (集計期間 1995 年~2011 年, 全 50 万件) からトンネル毎の交通事故発生頻度を算出し, 交通事故から火災に移行する割合を発火率と定義して求めることとした. トンネル内交通事故に影響を及ぼすパラメータと t 値, R^2 の関係は以下の通りとなった.

車両系火災同様にトンネル等級の基本であるトンネル延長と交通量による分析結果は表-10 に示すとおり, 決定係数が 0.5251, t 値はトンネル延長に対して 32.691, 交通量に対して 19.187 であった. 交通事故に関しては, 走行速度や交通形態をパラメータに加え, 分析を行った結果を表-11 に示す.

表-11 に示す通り, 決定係数は 0.5609 に向上, t 値に関しても十分な信頼性が確認できた. なお, 走行速度差とは, 全国平均トンネル内走行速度(実績平均 77 km/h)と当該トンネル内実走行速度との差分とした. また, 交通形態係数は一方通行と対面通行の違いを表す. 次に各年 (1995 年から 2011 年の高速道路トンネル火災を対象と

表-10 交通事故の評価(1)

決定係数 R^2 : 0.5251	係数	t 値
トンネル延長(m)	9.810×10^4	32.691
交通量(台/日)	6.588×10^5	19.182

表-11 交通事故の評価(2)

決定係数 R^2 : 0.5609	係数	t 値
トンネル延長(m)	1.000×10^3	34.550
交通量(台/日)	6.189×10^5	18.511
走行速度差	2.05×10^2	3.855
交通形態係数	-0.7898	-7.525

図-10 負傷者発生ツリー

火災は同様に 100%である。このときの負傷者は一方通行で 5%，対面通行で 3%と少ない。次に，負傷者が生じる割合は，一方通行の単独事故で 21%，複数事故で 54%に対して，対面通行では単独事故で 33%，複数事故で 63%と高いことが分かる。平均負傷者数に関しても犠牲者同様に，一方通行，対面通行共に複数事故の方が多いことが確認できる。

車両系火災の人的損失を式(7)，事故系火災の人的損失を式(8)で表す。

$$I_{H,u} = L_D \times E_{D,u,T,R} + L_I \times E_{I,u,T,R} \quad (7)$$

ここに，

$I_{H,u}$ ：車両系火災の人的損失（円/件）

L_D ：1人あたりの死亡損失額（円/人）

$E_{D,u,T,R}$ ：1 車両系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想犠牲者数（人/件）

L_I ：1人あたりの負傷損失額（円/人）

$E_{I,u,T,R}$ ：1 車両系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想負傷者数（人/件）

$$I_{H,f} = L_D \times E_{D,f,T,R} + L_I \times E_{I,f,T,R} \quad (8)$$

ここに，

$I_{H,f}$ ：事故系火災の人的損失（円/件）

L_D ：1人あたりの死亡損失額（円/人）

$E_{D,f,T,R}$ ：1 事故系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想犠牲者数（人/件）

L_I ：1人あたりの負傷損失額（円/人）

$E_{I,f,T,R}$ ：1 事故系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想負傷者数（人/件）

式(7)，(8)の一人あたりの死亡損失額，負傷損失額に関しては，内閣府資料⁹⁾に示された損失額(死亡の場合 2 億 4,450 万円，後遺障害の場合 1,830 万円)を代入して算出する。人的損失の総額： I_H は式(9)で算出する。

$$I_H = I_{H,u} + I_{H,f} \quad (9)$$

これまでに提示した車両系火災発生頻度と事故系火災発生頻度の算定式と，これら火災事故発生に伴う人的損失（犠牲者，負傷者）算定式より，人的被害試算結果を以下に示す。（試算例：対面通行 A 等級トンネル）

1) 犠牲者発生に伴う損失

トンネル火災発生要因は車両系と事故系に分類され，式(4)，(5)で求められる。また，火災に伴う犠牲者は図-9の(b)対面通行に示すイベントツリーの分岐確率（図中赤枠表示）と式(7)，(8)で算出が可能である。これらを連立することで以下の通り算出することが可能となる。

犠牲者数

$$I_{H,u} = \frac{1 \times 0.03 \times 0 \times P_b + (0.27 \times 0.67 \times 1 + 0.73 \times 0.63 \times 1) \times P_f}{P_t}$$

$$I_{H,u} = \frac{0.64 \times P_f}{P_t} \times 244,500,000$$

2) 負傷者発生に伴う損失

上記同様に負傷者発生に伴う損失は図-10の(b)対面通行に示すイベントツリーの分岐確率（図中赤枠表示）と式(7)，式(8)で算出することが可能である。

負傷者数

$$I_{H,f} = \frac{1 \times 0.03 \times 1 \times P_b + (0.27 \times 0.33 \times 1 + 0.73 \times 0.63 \times 2) \times P_f}{P_t}$$

$$I_{H,f} = \frac{0.03 \times P_b + 1.01 \times P_f}{P_t} \times 18,340,000$$

b) 物的損失

物的損失とは、火災事故が発生した際のトンネル施設の損傷をいう。データベースには「路面被害」、「壁面被害」、「照明器具被害」、「ケーブル全般被害」が記録されており、これらを分析して物的損失を算出する。表-13～16 はトンネル内施設の物的損失状況である。これらはトンネル火災事故データベースより抽出したものであるが、被害要因の因果関係を分析するためにはデータが不足していることから、本検討では4つの被害はそれぞれ独立した事象として取り扱うこととした。

分析の結果、交通方式よりも設備等級の方が損害発生確率に影響があること、設備等級がAAからCに低下するに従い、被害規模が拡大していることが分かる。これは、トンネル等級が低下するに従い、非常用施設グレードが低下することが影響するものと推測される。なお、実績上、D等級トンネルでは物的被害が発生していないことから、計算上はC等級の結果を用いることとする。

表-17 は補修実績単価からトンネル等級別に物的被害の期待値を計算したものである。前述のとおりD等級

表-13 火災事故あたりの路面被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	路面平均被害面積(m ²)	期待被害面積(m ²)
AA	4	52	195
A	9		455
B	15		758
C	20		1030

表-14 火災事故あたりの壁面被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	壁面平均被害面積(m)	期待被害長(m)
AA	8	34	2.85
A	16		5.37
B	15		5.04
C	27		9.13

表-15 火災事故あたりの灯具被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	灯具平均被害数(灯)	期待被害数(灯)
AA	4	12	0.47
A	11		1.34
B	15		1.87
C	60		7.48

表-16 火災事故あたりのケーブル被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	ケーブル平均被害延長(m)	期待被害延長(m)
AA	6	293	17.78
A	17		48.90
B	21		60.41
C	53		156.48

表-17 火災事故あたり物的損失 (期待値)

設備等級	物的被害の期待値(円)
AA	956,803
A	2,372,100
B	3,062,897
C	6,582,455
D	6,582,455

トンネルの物的被害額の期待値はC等級と同一としている。これら物的損失は、式(10)で算出することが可能となる。

$$I_p = \sum_i \sum_C R_i \times E_{i,C} \quad (10)$$

ここに、

I_p : 1火災事故当たりの物的損失 (円)

R_i : 各被害原単位当たりの復旧費用
(円/m, 円/m², etc.)

$E_{i,C}$: 各被害・設備等級毎の期待被害量
(m, m², etc.)

c) 社会的損失

社会的損失は火災事故によりトンネルが通行止めとなることで社会に及ぼされる損失のことである。通行止め時間の交通方式毎の平均およびヒストグラムは図-11の通りである。平均値を比較すると、表-18に示す通り、一方通行トンネルの方がわずかに高い値となっており、ヒストグラムを見ても交通方式ごとに特別有意な差が生じているわけではないことがわかる。

このため通行止め時間を被説明変数として、交通方式(一方通行=1, 対面通行=0), 延長, 日交通量, 犠牲者の有無(有=1, 無=0), 物的損害の有無(有=1, 無=0)で回帰分析を行った。

図-11 交通形式ごとの平均通行止め時間および通行止め時間

表-18 交通方式別火災事故件数と平均通行止め時間

	火災事故件数(件)	1火災事故当たり 平均通行止め時間(分)
一方	253	133
対面	38	125

表-19 通行止め時間の評価

決定係数 R^2 : 0.22	係数	t値
切片	91.410	3.70
交通方式	37.477	1.58
トンネル延長	-0.004	-1.39
日交通量	-0.001	-1.80
犠牲者の有無	130.538	4.90
物的損失の有無	116.853	5.64

表-20 犠牲者・物的損害と平均通行止め時間

(単位: 時間)			
		犠牲者	
		有り	無し
物的損害	有り	360	216
	無し	212	96

結果は表-19のとおりであり、 t 値の大きさから犠牲者と物的損害の有無が通行止め時間に大きく影響していることがわかる。このため、推計においては犠牲者の有無と物的損失の有無ごとに通行止め時間を設定して計算を行う。設定した値は表-20 に示す通り、過去の火災事故の犠牲者の有無・物的損失の有無ごとの平均通行止め時間とした。

社会的損失を数式で表すと以下ようになる。通行止め時間に、足止めされている人数（交通量×平均乗車人数）と 1 人・1 時間あたりの社会的損失原単位を乗じている。社会的損失原単位および 1 台当り平均乗車人数は CVM(仮想評価法)手法⁷⁾によるアンケート調査により把握した(表-21 参照)。なお、データベースに保存されている交通量は断面交通量であることから、一方通行トンネルの社会的影響額を算出する際、データベースから引用した交通量を 2 分の 1 にして式(11)に代入することで計算が可能である。

$$I_s = \sum_i T_i \times P_i \times V \times U_w \times U_{travel} \quad (11)$$

ここに、

I_s : 1 火災事故当たりの社会的損失 (円)

T_i : 犠牲者・物的損害の有無毎の平均通行止め時間 (hr)

P_i : 犠牲者・物的損害の有無毎の 1 火災事故当たりの発生率

V : 1 時間当たりの交通量 (台)

U_w : 通行止め 1 人・1 時間当たりの社会的損失原単位 (支払意思額: 円/人・時間)

U_{travel} : 1 台当たりの平均乗車人数 (人/台)

(4) リスクマトリクスの作成

これまでに示したトンネル火災事故発生頻度と損失(人的+物的+社会的)について、高速道路トンネル全体で試算し、相対比較のため図-12 に示す散布図(リスクマトリクス)を作成し、トンネル区分毎に平均値を表-22 に取りまとめた。ここで求めるリスクは“統計的火災リスク”であり、式(12)で算出している。

$$R_s = P_i \times I_i \quad (12)$$

ここに、

R_s : 統計的火災リスク (円/年)

P_i : トンネル火災事故の発生頻度 (確率) (件/年)

表-21 社会的損失推定に用いる原単位

分類	U_w (支払意思)	U_w (受入補償)	U_{travel} (平均乗車人数)
大型車・業務目的	1,382 円/人・時間	4,471 円	4.51 人
上記以外	797 円/人・時間	2,918 円	2.44 人

図-12 高速道路トンネルの火災事故リスクマトリクス

表-22 トンネル区分別試算結果の平均値

区分	トンネル数	発生頻度 P (件/年)	損失(影響) I (円/件)	リスク R (円/年)
AA 一方	63	1.44×10^1	12,891,637	1,853,310
A 一方	367	6.50×10^2	17,566,033	1,141,037
B 一方	556	4.71×10^2	15,912,747	749,896
C 一方	163	4.01×10^2	16,027,201	642,472
D 一方	143	4.06×10^2	13,581,370	551,441
AA 対面	8	1.41×10^1	25,696,812	3,634,536
A 対面	62	6.51×10^2	19,224,308	1,251,921
B 対面	131	4.03×10^2	14,904,028	600,139
C 対面	52	3.15×10^2	17,203,914	542,010
D 対面	39	2.68×10^2	17,303,313	463,536

I_i : トンネル火災の被害(影響) (円/件)

$$I_i = I_H + I_p + I_s \quad (13)$$

リスクは表-22 に示す通り、一方通行では AA 等級の火災事故発生頻度が高いが 1 件あたりの損失額は大きくはない。逆に発生頻度の低い A, B 等級の方が損失額が大きく発生頻度は低い多い傾向である。対面通行では AA, A 等級は相対的に影響額も発生頻度も高い傾向にあり、同ランクの一方通行トンネルよりもリスクが高い傾向にあることが分かる。

4. 潜在的火災リスク評価とリスク削減効果

(1) 潜在的火災リスク評価手法

前節まで、トンネル火災事故データベースを分析し、一連の手順でリスク算定を進めることで、個々のトンネルの有する火災事故発生頻度や損失が推計でき、火災事故リスクの相対比較を可能とした。しかしながら、統計デ

ータによるリスクは、評価時点の比較は可能であっても、リスク改善策方法とその効果の評価には、ある程度の観測期間を要することとなる。このため、前節で取りまとめた損失（影響）のうち、「人的損失」算定に際して、火災シミュレーションと被災者の避難行動シミュレーションを連成させた個別トンネルの評価を試みた。なお、評価時間に関しては、トンネル火災発生から避難完了までとして10分間と設定している。

(2) シミュレーションによる評価

a) 火災の再現

火災評価のためのシミュレーターに関しては、模型トンネルや実大道路トンネル火災実験データとの定量的な比較から、十分な再現能力が確認され、日本国内の道路トンネル防災システムの設計段階における標準的な評価ツールとして使用されている三次元 LES スマゴリンスキーマモデル“Fireles”（著者の一人が開発）⁹⁾を用い、時々刻々と変化するトンネル内の避難環境データを取得する。なお、本評価では、避難時に熱的影響が大きい火源近傍ではなく、火源から離隔した空間の避難を評価するため、使用する環境データは視距に影響を与える煙濃度としている。火災リスクの被評価トンネルにおいて設定する火災規模に関しては、前出式(6)に示す火災発生頻度と表4の火災規模・生起率を用いたイベントツリーを図-13に示すとおり構築した。評価方法は被評価トンネルにおける火災発生頻度に対して、推計火災規模と規模別生起率を用いて平均化を行い、最終的な影響（人的損失）を算出するものである。このため、火災シミュレーションは各火災規模毎に実施し、規模毎のトンネル内煙濃度時刻歴データを取得する。煙濃度に関しては、減光係数：Cs濃度(m^{-1})として取り扱うこととする⁹⁾。

火災シミュレーションで用いる発熱速度(HRR)変化に関しては、これまでに実施された実験で取得されたものが示されているが、基本的にバス火災がベースとなっ

おり、本研究では図-14に示す通り、火災の発展モデルなどで使用されている二次曲線(t^2 モデル)を用い、総発熱速度の60%を対流発熱速度として与えることとした⁹⁾。

火災シミュレーション実施に際して、設定するトンネル条件は以下の通り。

(トンネル条件)

- ・幾何構造：トンネル延長、勾配、形状・断面積（馬蹄形）
- ・坑内車両配置：時間交通量、大型車混入率より算定
- ・火災発生個所
- ・格子分割： $dx=0.5m, dy=0.335m, dz=0.318m$
- ・境界条件：両坑口圧力境界（圧力差0Pa）

なお、格子分割数に関しては、可能な限り細かく設定することが望ましいが、多大な計算資源を要してしまうこととなることから、本研究では過去の研究結果⁹⁾を踏まえ、高さ方向が21分割以上となる格子分割数を採用している。

b) 煙の移動と評価基準

トンネル内の煙濃度分布に関して、シミュレーション結果から、時間経過とともに火源から坑内に広がっていく状況を危険度マップとして図-15に示す。

延長1000m、勾配3%（図の右上がり）、初期風速0m/s、坑口から500m地点（トンネル中央）において30MWクラスの火災が発生した状況を表しており、横軸は火点からの距離（m）、縦軸は火災発生からの経過時間を示している。また、右表に危険度として、CS濃度と煙高さの関係を設定している。この時の坑内被災者の避難条件としては、CS濃度 $0.1m^{-1}$ の煙が路面から4.0m、つまりトンネル内の照明器具の高さに到達した段階（図中の青：危険度1）で避難を開始し、避難が困難となり、行動を停止する条件は高さ1.5mの位置でCS濃度が $0.4m^{-1}$ に達した場合（図中の緑：危険度4）と設定している¹⁰⁾。また、図-16に火災規模5MW、10MW、20MWの場合の危険度マップを示す。火災規模の拡大に伴い、煙の濃度が高くなり、坑内の被災者に対して影響が発生する時間、すなわち煙の拡散時間が早くなっていることが確認できる。

図-13 トンネル火災の規模別イベントツリー

図-14 発熱速度曲線

図-15 火災発生後の煙の広がり (危険度マップ 30MW)

図-16 火災発生後の煙の広がり (危険度マップ)

c) 避難評価方法

避難評価のためのシミュレーターは、トンネル内の被災者に対して行動開始条件、歩行速度、最終避難箇所を与条件として設定し、火災シミュレーションにより取得した煙濃度データとの連成により、歩行/停止条件を設定して評価時間内に避難できなかった被災者数(残留者)を算出するものである。まず、被災者の行動開始条件に関しては、「頭上を通過する煙を確認して避難開始」、「避難する人を見て避難する」という基本的行動条件のほか、情報提供による避難開始として、非常時の情報収集・提供設備(ラジオ再放送、情報板、拡声放送、CCT

表-23 シミュレーション検討ケース

	避難誘導放送				非常口	
	無	有			無	有
避難開始トリガー	煙を見て	180秒後	120秒後	90秒後		
火災ケース1	○				○	○
火災ケース2		○			○	○
火災ケース3			○		○	○
火災ケース4				○	○	○

図-17 行動開始条件別火災イベント推移

表-24 避難時の歩行速度

項目	早い	普通	遅い
速度	1.6m/s	1.3m/s	1.0m/s
割合	30%	60%	10%

V (画像処理) の組み合わせとして行動開始時間(情報提供開始時間)を仮に設定した。これら行動開始時間と火災イベント推移を図-17に示す。検討ケースは表-23のとおり。

次に、火災空間における歩行速度に関しては、CS濃度に応じた歩行速度が実験で確認されている。本研究では、清家らの研究¹⁰⁾を参考として表-24に示す歩行速度を設定した。70歳以上の割合を人口割合より10%と仮定し、「遅い」とした。平均歩行速度が1.33m/s¹¹⁾となるように、「普通」と「早い」を割り振った。なお、避難時の歩行速度に関しては±0.1 m/sの分散を考慮し、残留者人数は避難シミュレーションを1000回実施した結果の平均値を用いることとしている。

最終避難箇所に関してはトンネルの坑口と非常口が考えられるため、非常口が無い場合、坑内に等間隔で設置される場合について避難評価を行うこととする。

d) 連成評価の例

火災に伴う煙濃度と坑内移動状況、避難行動との連成評価事例を以下に示す。検討条件として、対面通行延長1000m、勾配3% (図の右上がり)、交通量は断面で2500台/時間、大型車混入率25%、坑口から500m地点(トンネル中央部)において30MWクラスの火災が発生した状況を想定している。以降の図では、火災シミュレー

図-18 連成評価事例 1(煙を見て避難)

図-20 連成評価事例 3(情報提供有り, 非常口有り)

図-19 連成評価事例 2(情報提供有り, 非常口無し)

シヨンにより取得した坑内の煙の濃度分布に対して、被災者の避難行動を連成させたものである。トンネル内の縦断方向(横軸)から伸びている黒実線は被災者を示し、時間経過とともに移動していない場合は時間経過方向(図の上方向)に伸びていくが、避難のために歩行開始した場合、図の斜め上方向に移動していくことが分かる。

(3) リスク改善策組み合わせと効果

1)火災ケース 1：煙を見て避難（非常口無し）

図-18 は頭上を流れる煙を確認して避難開始、避難する人を見て避難開始を前提としているため、火源から離れるに従い、避難行動開始が遅延してしまうこととなる。火源右側の煙が多く流れる方向では、避難を開始しても危険度 4 の煙に包まれてしまい、行動を止めてしまう被災者：残留者が多数生じていることが確認できる。

2)火災ケース 4：90 秒後避難開始（非常口無し）

図-19 は情報収集設備や情報提供設備を充実させた事例（火災ケース 4）を示している。前述のケースより残留者は減少しているものの、数多く生じていることが確認できる。

3)火災ケース 4：90 秒後避難開始（非常口有り）

図-20 は 2)火災ケース 4 に対して、火源から 150m 地点に非常口があった事例を示している。非常口の設置に伴い坑内の被災者が全員避難することが確認できる。

これら限定的な条件の元、火災-避難シミュレーション連成評価の結果を表-25 に取りまとめた。避難行動を被災者に委ねる場合(ケース 1)、5 MW クラス火災でも残留者が生じ、火災規模に比例して残留者が増加していることが分かる。次に情報収集・提供設備を追加したケース 4 では残留者が減少しているものの、20MW、30MW ク

表-25 火災-避難連成評価の結果(残留者の比較)

対応	火災規模			
	5MW	10MW	20MW	30MW
煙を見て避難 火災ケース1	6.44	6.97	16.15	47.45
情報収集・提供 火災ケース4	0.00	0.17	6.58	34.57
上記+非常口 火災ケース4	0.00	0.00	0.00	1.41

図-21 リスク改善策とリスクの変化 (例)

ラスの火災では多くの残留者が生じている。このため、ケース 4 に対して非常口を設置した場合、30MW クラスを除き残留者は生じないことが確認できた。

(4) リスクマトリクスの作成

第 3 章で示した統計的リスクのマトリクス同様に火災-避難シミュレーションの連成評価により求めた人的損失を元に潜在的リスクのマトリクスを図-21 に示す通り作成した。対象トンネルは対面通行、A 等級、延長 1705m、勾配 1.9%、日交通量 16500 台、大型車混入率 11% として試算している。その結果、実績から推計する統計的リスクの被害額は約 2 千万円/年に対して、潜在的リスクでは、煙を見て避難するケース 1 では 3 億 6 千万円である。次に、情報提供・収集設備を充実し、避難行動開始を早めたケース 4 では被害額は約 1 億 5 千万円に減少、設備は追加せず、非常口を追加した場合は約 2 千万円に減少し、更に非常口、情報収集・提供設備を設置した事例では統計リスクとほぼ同額の 2 千万円程度まで減少することが確認できる。

5. リスク管理手法

(1) リスク管理の流れ

一般的なリスク管理は、1)リスクの特定と算定、2)リスク評価、3)リスク改善の手順をたどる。本研究では、数多くの供用トンネルに対して、前出の統計的リスク評価を行うことで各トンネルが有するリスクの相対比較が可能となった。しかし、リスク改善のための対策実施に対しては無尽蔵に投資出来るわけではなく、必要なものに対して妥当な投資をすることが求められる。今回作成したリスクマトリクスは、火災事故の発生頻度と被害で構成されていることから、リスクマトリクス上に一定の基準値、すなわち閾値を設定して管理することが合理的であるといえる。このとき、リスクの軽減策としては火災事故発生頻度の低減が考えられるが、対策と具体的軽減効果が現時点では想定できないことから、当面は被害

額（避難行動のトリガーとなる情報収集・提供設備の設置、並びに非常口の設置に伴う効果）について検討することとした。

(2) リスク管理基準（閾値）の設定

リスクの管理基準値に関しては、我が国では鉄道分野において検討が先行しており、最近、欧州各国で議論されているリスクの許容水準の考え方について、秋田の論文¹²⁾と、道路トンネルのリスク評価に対する現行の方程式⁹⁾を参考に、表-26をまとめた。

一方、道路トンネル火災事故に関しては、国内では現在のところ先例が無いが、海外ではオーストリア、チェコ、オランダ、ドイツ、イタリア等で利用可能なリスク許容基準が設定されている⁹⁾。このため表-26に示すフランスの水準の考え方の、既存システム（高速道路トンネル火災リスクの現在の管理基準）を維持することを目標とし、リスク評価を行った。なお、参考として、イタリアは多くのトンネルを有しているので、イタリアの基準との比較を試みた。

(3) 閾値によるリスク評価

高速道路トンネル火災に関しては、前述の表-6や図-9、

表-26 各国で議論されているリスク管理水準例

国	許容水準例	解 説
イギリス	ALARP (As Low As Reasonably Practicable principle)	【一般的リスク全般】 リスクが実際面で妥当なレベル以下に低減できればよしとする。逆にリスク低減が実際上不可能または安全性向上/コスト比がつかないあわめ膨大なリスクがリスクが予想される場合、そのシステムは受容されない
フランス	GAME (Globalement Au Moins Equivalent principle)	【一般的リスク全般】 システム全体として既存システムの安全性と同等ならば許容する
ドイツ	MEM (Minimum Endogenous Mortality principle)	【一般的リスク全般】 5～15歳の子供の内在的死亡率の5%以下に相当するリスク水準以下であれば許容する。許容水準は 10^{-5} 人/年
オーストリア	モデルトンネル RVSの分類	【道路トンネルリスク】 トンネルリスクモデル (TuRisMo) を使い、2つの方法が用いられる。 ・モデルトンネル (理想のトンネル) との比較 ・調査トンネルの期待値の絶対量をガイドライン RVSにしたがって分類
チェコ	避難可能時間	【道路トンネルリスク】 CAPITA 法を使い、トンネル利用者が避難できる大まかな時間を算出し、システムの貢献度を判定する。
オランダ	決められたトンネル利用者に対するリスクの受け入れ基準	【道路トンネルリスク】 RWS-QRA モデルを使い、リスクを評価し、受け入れ基準 (個々のリスクは人・キロ毎に $1.0 \cdot 10^{-7}$, 社会的リスクは年及びキロ毎に $1.0 \cdot 10^{-5}$) と比較
フランス	評価の相対比較	【道路トンネルリスク】 事象の頻度に対する定量的な事前評価を行い、標準化された頻度-影響度マトリクスを用いてランク付けする。さまざまなトンネルに対して事前評価を行い比較する。
ドイツ	損傷頻度線図の許容性の範囲	【道路トンネルリスク】 2つのシナリオ (衝突事故と危険物を巻き込まない火災) のイベントツリー解析によりリスクを測定
イタリア	ARARP (合理的で実行可能な最低水準) ¹³⁾	【道路トンネルリスク】 リスク分析法 (IRAM) により F-N 曲線を算定し、ARARP 領域 (許容可能なレベルと受容不可能なレベルの範囲) と比較する

図-22 統計的リスクと閾値の例

図-23 潜在的リスクと閾値の例

10, 12 示す通り, 一方通行よりも対面通行の方がリスクが高いことが示唆されたことから, 管理水準 (閾値) については一方通行の最大リスク, 並びに統計リスク全体の平均リスクについて算出し, 参考までイタリアの ALARP 基準の範囲 (上限: 10^1 (人/年), 下限: 10^4 (人/年)) に関しても, 前出の図-12 に追記したものを図-22 に示す. なお, 図の一方最大の線は, 統計的手法で算定された一方通行トンネルのリスクのうちの最大値を通過する線を示している.

図-22 を見ると, 統計的リスクの平均値を上回るトンネルは全体の 1/3 程度 (549 本) あるが, 一方通行最大リスクを上回るトンネルはわずか 2 本に絞られることが確認できる. これらは参考まで記載したイタリア ALARP の範囲内であることがわかる. また, 図-23 は, 特定のトンネルに対する潜在的リスクの評価結果に対して, 閾値を記載したものである. 統計的リスクとあわせて表示することで, 潜在的リスクの具体的な削減策と定量的な削減効果の可視化が可能となり, 施策決定のための資料として活用が期待できることが分かった. 参考ではあるが, 当該トンネルの潜在的リスクに関しては, 我国同様に数多くのトンネルを有するイタリア ALARP 基準の範囲内であることが確認できた.

6. 結論

本研究を通して高速道路トンネルの火災事故データを分析することで以下の知見を得た.

- 1) トンネル火災出火車両の割合は乗用車と貨物系車両がほぼ同じ割合であるが, 出火原因は車両故障が 7 割, 交通事故に伴うものが 3 割であり, 交通事故は単独と複数が各々 1/2 であった
- 2) 火災事故データより火災規模推計を試みたところ, 30MW クラスの火災は殆ど発生していないことが分かった
- 3) 近年, 供用延長が増加傾向にある対面通行トンネルは火災発生頻度は低いものの, ひとたび発生すると被害 (影響) は大きい傾向である

次に, 統計的リスク評価手法について検討を行い以下の成果を得た.

- 1) トンネル火災事故データベースの分析を行い, 火災事故発生確率の推計モデル式を提案し, 火災事故要因となるパラメータを限定的な条件のもと明らかにした
- 2) トンネル火災事故データベースに記録された被害状況から, トンネル火災発生に伴う被害額を人的, 物的, 社会的に分類し, 各々算定する手法を提案した

- 3) 上記 1), 2) からトンネル火災事故リスクの定量的な比較 (相対比較) が可能となった

統計的リスクでは評価できないリスク改善対策について, 火災シミュレーション, 避難シミュレーションを連成させた潜在的リスク評価から以下の成果を得た.

- 1) 具体的なリスク改善効果の可視化を可能とし, 非常用施設設置によるリスク改善効果を定量的に把握することが可能
- 2) 最もトンネル火災事故リスク改善に効果的な対策は非常口の設置である
- 3) 閾値の設定により, 計画的なリスク改善施策の裏付け資料として活用が期待できる
- 4) 日本の高速道路トンネルのリスク値について, 参考までにイタリアの ALARP 基準と比較し, 現況リスクを比較した

今後はデータベースの解像度向上化, リスクに影響のあるパラメータの抽出を図り, 評価手法の精緻化を進め, 効果的なリスク改善策の検討や導入化等を図りたいと考えている

謝辞: 本論文執筆にあたり, トンネル火災安全研究会の皆様には数多くの助言, ご支援をいただきました. 心より御礼申し上げます.

付録: 高速道路トンネルの現状

国土開発幹線自動車道計画全延長 11 520km のうち, 2012 年度末時点で約 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 1 645 km である. 総計 1 748 本のトンネルのうち, 対面通行のトンネル延長は, 1989 年頃より増え始め, 2012 年には 340.5km, 全延長の 20.7% に達している. これらのほとんどは暫定措置として建設されたものであるが, 中には暫定期間が長期化しているものもある. 等級別のトンネル本数の割合は付表-1 のとおりである. 設備の充実している AA 級は全体の 4.9% にとどまっている. なお, トンネル等級は, 過去の事故実績より, 交通量とトンネル延長で決められており, 5 段階に区分しており, 等級に合わせて非常用施設の設置基準などが決められている¹⁴⁾. トンネル内火災での避難行動を考えた場合, 特に重要となる施設は, 情報収集設備と情報提供設備である. 情報収集設備とは, 非常電話, 火災検知器, 監視装置(CCTV)などの, 異常車両や火災を早期に発見するための設備で, 情報提供設備とは, 情報板やラジオ再放送設備, 拡声放送設備などの, トンネル内の人に火災や避難の情報や指示を伝える設備である.

付表-1 等級別トンネル本数割合

	一方通行	対面通行	全数
AA	4.4%	0.5%	4.9%
A	24.0%	4.1%	28.1%
B	34.6%	8.1%	42.6%
C	10.0%	3.6%	13.6%
D	8.4%	2.3%	10.7%
total	81.4%	18.6%	100%

付図-1 トンネルの等級区分¹⁴⁾

付図-2 延長別トンネル数の分布

付図-3 標高別トンネル数の分布

参考文献

- 1) 鯨島利隆, 赤井公昭, 山田憲夫: 日本坂トンネル火災事故の復旧工事, 土木学会誌, Vol.65, No.4, pp.7-17, 1980.4.
- 2) 小坂寛: モンブラントンネル火災の教訓, 高速道路と自動車, Vol.42, No.9, pp.36-40, 1999.
- 3) Directive 2004/54/EC of European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network, Official Journal of the European Union, L167 of 30 April 2004.
- 4) Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 05.05.B, PIARC Committee on Road Tunnels (C5), 1999.
- 5) Current Practice for Risk Evaluation for Road Tunnels 2012 PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation.
- 6) 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, pp.18-64, 2012.3.
- 7) 道路投資の評価に関する指針検討委員会, 道路投資の評価に関する指針(案)第2編, 2000.1.
- 8) 川端信義, 王謙, 佐々木啓彰, 内藤祐輔: トンネル内火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, 第 65 巻, 第 634 号, pp.1870-1877.
- 9) 菊本智樹, 川端信義, 丸山大輔, 山田眞久: 乗用車用小型道路トンネル内における火災時の熱気流挙動特性, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.4, pp.448-459, 2007.
- 10) 清家美帆, 川端信義, 長谷川雅人: 煙流動 CFD を用いた避難行動シミュレーションによる道路トンネル火災安全性の評価方法, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.70, No.1, pp.1-12, 2014.
- 11) (社)日本建築学会: 安全計画 I 安全計画の視点, pp.26, 1981.10.10.
- 12) 秋田雄志: 鉄道の安全性・信頼性を新たな視点で考える, 第 16 回鉄道総研講演会, pp.9-14, 2003.
- 13) Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali, ANAS S.p.A. Direzione Centrale Progettazione, pp. 53, Novembre 2006.
- 14) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): 設計要領第三集トンネル編 (4) トンネル非常用施設, 2013.7.

(2015. 1. 27 受付)

STUDY ON THE POTENTIAL RISKS ANALYSIS APPROACH FOR TUNNEL FIRES IN EXPRESSWAY TUNNELS

Tetsuya YAMAZAKI, Masahiro YOKOTA and Nobuyoshi KAWABATA

The devastation caused by the Great East Japan Earthquake of 2011 has taught us, once again, the importance of taking measures in advance to prevent foreseeable disasters. In Europe, an EU directive was issued after a major tunnel fire, and member states have enacted and are implementing stricter tunnel safety standards. And the accident at Sasago tunnel in 2012, has reasserted the importance of putting “safety first.” With progress in simulation technology to reproduce tunnel fires accurately, it is now possible to identify potentially high-risk tunnels before fires occur. Our study on the current issues and their countermeasures are reported in this paper.