

シナリオ別トンネル非常用施設の効果検証

山崎 哲也¹・横田 昌弘²・川端 信義³

¹正会員 榊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ることを考えている。本稿ではリスクアナリシス手法の中の、火災・避難シミュレーションを用いて、非常用施設の効果について、シナリオを設定して説明する。

Key Words : Tunnel fire, Risk analysis, Facilities for tunnel emergency, A fire and evacuation simulation

1. 研究開発の目的

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。

近年では、2011年3月11日に発生した東日本大震災を契機に、「事前に備えることの重要性」が再確認され、2012年12月2日に発生した笹子トンネルの天井板落下事故では、「安全」を何よりも優先しなければならないという教訓を得た。海外に目を向けてみると、欧州では、1999年から2001年にかけて発生した大規模トンネル火災を契機に、EU指令（最低限のトンネル安全要求項目）¹⁾が発令され、EU加盟国各国もトンネルの安全性向上に向けた基準の見直しが行われ、リスクについても議論がなされた。アジア地域では今年3月1日、中国北部の高速道路トンネルでメタノールローリーと石炭積載車両、ガスタンク車両が絡む爆発事故が発生し、31名が犠牲になっている。一方、日本の高速道路においては、1989年頃より、暫定措置として建設された「対面通行トンネル」が増え始め、その中には、暫定期間が長期化しているものがあり、交通量の増加とともに、安全性の低下が懸念される。今一度、トンネル火災に対する安全性の検討が必要となっている。これら高速道路トンネル

では年間大小16件程度の火災事故が発生しており、漸増傾向にある。

このような状況において、道路管理者はより安全安心な高速道路トンネルを目指し、さらなる安全性向上化対策に取り組んでいかなければならないものと考えられる。

しかしながら、全ての高速道路トンネルの安全性を一度に向上させるには、費用面でも期間面でも工夫が必要となる。そこで、本報では既報²⁾で紹介した限られた費用で効率的に安全性を向上させるために、欧州を中心に導入が進んでいる「リスクアナリシス手法」³⁾による安全性向上策について具体的に検討を行ったものである。

2. リスクアナリシス手法の概要

トンネル火災リスクアナリシス手法とは、これまでの火災事故履歴などを分析し、リスクの許容ラインを決め、許容ラインを超えるリスクとなるトンネルに対し、対策を決定し、計画的に対策を実施し、リスクを下げしていく仕組みである。図-1に概要を示す。リスクを火災発生頻度と被害額で表現し、リスクの大小や対策の効果を視覚的に説明できる仕組みとなっている。

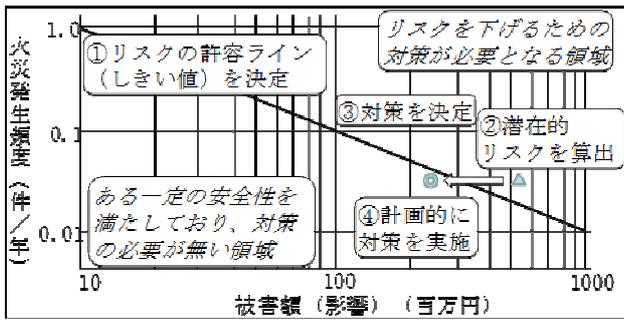


図-1 リスクアナリシスの概要

3. リスクアナリシス手法の導入

トンネル火災リスクアナリシス手法を導入する理由は下記のとおり。

(1) 非常用施設設置効果の説明

トンネル内の非常用施設には、火災検知器、CCTV、画像処理付きCCTV等の情報収集設備や、拡声放送、ラジオ再放送、E型情報板等の情報提供設備がある。非常用施設の増設などを検討する際、それぞれの施設を設置することによって、どのような効果があり、どの程度安全性が向上するのかが明確にならなければ、設備投資判断ができない。そのため施設設置に伴う効果の説明が必要となった。

(2) トンネルごとのリスクレベルの説明

トンネルごとのリスクレベルを判定、相対的に評価し、更なる安全性を向上すべきトンネルの絞り込みとその優先順位付けについて、社会に対する説明責任を果たすための仕組みが必要となった。

4. リスクアナリシスを用いた非常用施設設置効果の説明方法

リスクアナリシスを用いて施設設置の効果を説明するため、当該非常用施設設置の有無によるトンネル火災、並びに火災時の非常用施設と避難行動のシナリオを想定し、避難状況の違いを比較することで非常用施設の効果を定量化する。

(1) 仮定したシナリオ

比較のために仮定したシナリオは下記のとおり。

a) シナリオ①：非常用施設が無い場合

火災が発生し、トンネル内の道路利用者は、煙を見て避難を開始するか、逃げてくる人につられて避難を開始する（以下「成り行き避難」という）。

b) シナリオ②：非常用施設が充実している場合

火災発生と同時に、情報収集設備（火災検知器、CCTV、画像処理付きCCTV等）⁴⁾により火災を早期に感知し、トンネル内の道路利用者に対し、情報提供設備（拡声放送、ラジオ再放送、E型情報板等）⁴⁾を使って避難を促し、早期避難を促す。

(2) シナリオ別火災・避難シミュレーション

本報で紹介するリスクアナリシスは、火災・避難シミュレーション⁵⁾により被害を想定する仕組みである。図-1、図-2は、煙の挙動と避難者の挙動を表しており、x軸はトンネル縦断方向の避難者の位置、y軸は経過時間を示す。図中の色分けされたエリアが煙の位置と濃度を示し、黒の実線が被災者の行動を示す。仮定した条件は、延長1,000m、勾配3%の対面通行トンネルの中央で、30MW規模の火災が発生、交通量は2,500台/h、大型車混入率は25%としている。黒の実線がy方向に直線でのびている状況は避難者が立ち止まっている（行動停止）ことを表している。

a) シナリオ①：非常用施設が無いため成り行きで避難する場合

トンネル内の避難対象者は、CS濃度 0.1m^{-1} の煙が頭上（高さ4.0m）に到達した時点、もしくは避難してくる人につられて避難を開始する。大多数の人が煙を見てから避難を開始しているため、火点近傍の人のみならず、火点から離れた人も行動開始が遅くなり、逃げきれずに煙にまかれ、行動停止する人数が増えており、この場合は（図-2）。

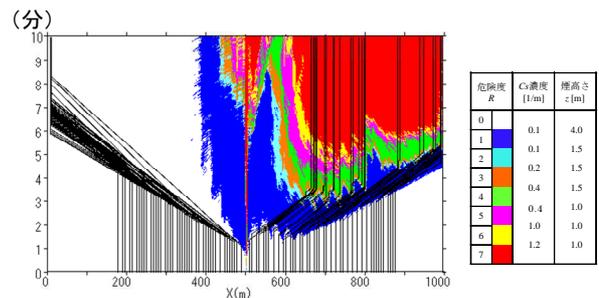


図-2 シミュレーション結果（シナリオ①）

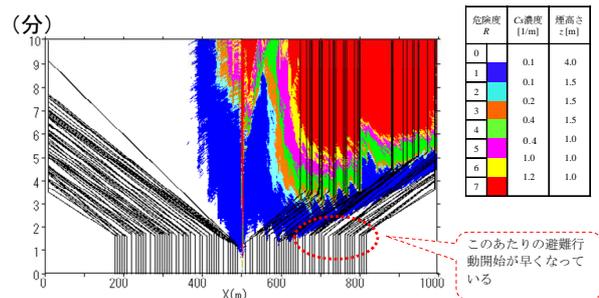


図-3 シミュレーション結果（シナリオ②）

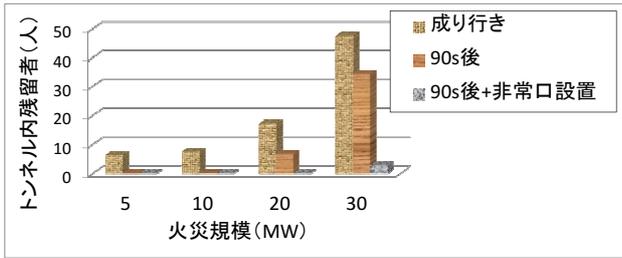


図-4 火災規模別トンネル内残留者数

b) シナリオ②：非常用施設が設置され、避難放送に促されて避難する場合

拡声放送などの情報提供設備が設置されているため、呼びかけに促されて、避難対象者は火災発生後90秒で避難を開始する。火点近傍の人は煙が頭上に到達したときに避難を開始しているが、火点から離れた人は、避難を促す放送を聞いて避難するため、早い段階で一斉に行動開始している。そのため、煙にまかれて行動停止する人数が少ない(図-3)。避難開始までの時間90秒に関しては、火災発生と同時に画像処理機能のついたCCTV設備により、早期に火災を感知し、拡声放送やラジオ再放送設備を使って情報伝達をするまでに要する時間をもとに設定している。

(3) シナリオ別トンネル内残留者数(結果)

シナリオごとの火災・避難シミュレーション結果を図-4に示す。トンネル内残留者とは、煙による視界不良

(CS濃度 0.4m^{-1} の煙が目線の高さ(高さ 1.5m)に降下してきた状況)により正常な行動ができなくなり、行動を停止した人であり、そのまま犠牲者となるわけではなく、多くは負傷、あるいは無事避難できた(救助された)という扱いとなる。図-4には、シナリオ①(成り行き避難)、シナリオ②(90秒後一斉避難)のほか、参考として、シナリオ②に非常口が設置されていた場合も示している。非常口が設置されていれば、短い避難距離で安全な場所へ避難できるので、より安全性が向上することが分かる。トンネル内残留者は、火災規模が10MW(小型貨物、マイクロバス火災程度)まではそれほど多くないが、20MW(普通貨物火災程度)では、シナリオ①

(成り行き避難)では15人程度に増え、シナリオ②(90秒後一斉避難)と比べ、2倍以上の差が生じている。さらに30MWでは、トンネル内残留者は、シナリオ①(成り行き避難)では45人程度となり、シナリオ②(90秒後一斉避難)でも30人を超えている。30MW規模の火災は、大型貨物他複数火災程度⁹⁾であるため、極めて希に発生する規模の火災であり、このような大規模な火災で、さらに縦断勾配3%という、高速道路としては急な勾配を想定しているため、トンネル内残留者が多い結果となっ

ている。

ている。

参考までに、設備が充実(90秒後避難)しているうえに非常口が設置されている場合(火点から150m地点に安全地帯への通路がある)は、どの火災規模においてもトンネル内残留者は概ね0人となっている。厳しい条件を仮定した場合においても、非常用施設を充実させ、非常口を設置すれば、より一層の安全が担保できるということを示す結果となっている。

5. 得られた技術的知見と今後の課題

- ・トンネル火災リスクアナリシスの一連の流れから、火災・避難シミュレーションにより画像処理機能付きCCTVなどの情報収集設備、拡声放送設備などの情報提供設備、非常口などの非常用施設設置効果の定量化が可能であることが分かった。
- ・情報収集設備で早期に火災を感知し、情報提供設備でトンネル内の避難対象者に避難を促せば、トンネル内残留者を削減することができる。
- ・交通量などの条件にもよるが、非常用施設を増設しても、急勾配のトンネルで大規模な火災が起こってしまった場合には、少なからずトンネル内残留者がでしまう状況があることが分かった。
- ・急勾配のトンネルでは、設備の増強だけではトンネル内残留者を解消できない場合があり、非常口設置など、避難距離を短くする対応も併せて検討する必要がある。
- ・今回の検討は、あくまでも避難者が想定通りの避難行動をとることが前提となっている。避難行動の実態を考えた場合、非常時の避難方法の周知や、率先して避難行動をとるプロドライバーの育成など、啓発活動の強化が必要である。

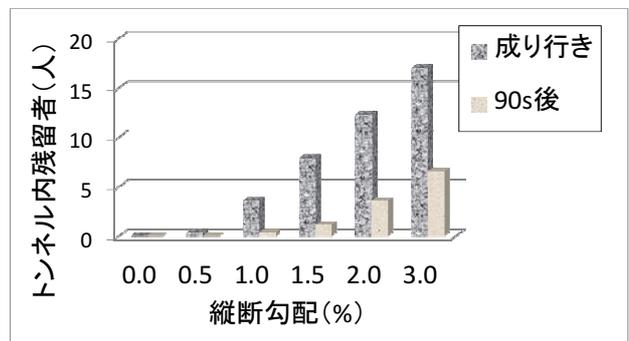


図-5 縦断勾配別トンネル内残留者数

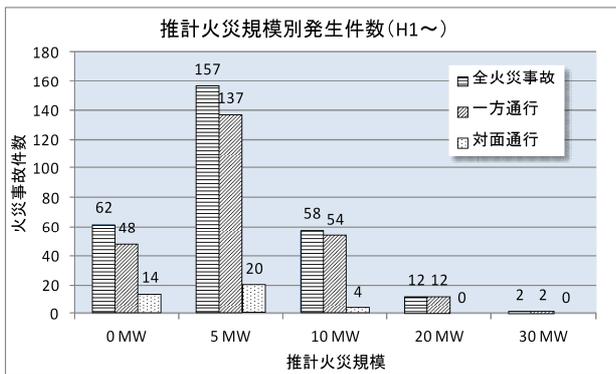


図-6 推計火災規模別トンネル内火災事故件数

謝辞

多くの助言をいただきました、トンネル火災安全研究会の皆さま、高速道路総合技術研究所トンネル研究室の皆さまの協力のもと、本論文をまとめることができました。ここに感謝の意を表します。ありがとうございました。

付録

a) 縦断勾配の影響

論文中に、縦断勾配3%という、高速道路としては急な勾配を想定しているため、トンネル内残留者が多く出る結果となったとの記述がある。図-5に縦断勾配別トンネル内残留者数の推移を示した。図-5は、トンネル延長1,000m、火災規模20MWでの火災・避難シミュレーション結果を棒グラフにしたものである。勾配が急になれば、飛躍的にトンネル内残留者が増えている。これは、勾配が急になるほど煙の遡上が早くなり、避難可能時間が短くなるためであり、避難の初動が遅いシナリオ①（成り

行き避難）では、勾配が急になるほど、初動の遅れが顕著に表れる結果となっている。

b) 大規模火災の発生状況

論文中に、30MWの火災は極めて希に発生する火災との記述がある。図-6に平成元年以降の高速道路における推計火災規模別トンネル内火災事故件数を示した。推計火災規模は火災事故データに記載された燃焼状況と文献⁶⁾等にも示される車両火災規模から推計したものであり、その結果、5MW規模の火災が全体の54%程度を占め、30MW規模の火災は全体の1%に満たないことが把握された。

参考文献

- 1) *Official Journal of European Union L 167 of 30 April 2004*
- 2) 2013 土木学会論文：潜在的トンネル火災リスクへの対応
- 3) *Risk analysis for road tunnels 2008 PIARC Comite technique 3.3 Exploitation des tunnels routiers / Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation*
- 4) 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
- 5) 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, 1-12, 2014
- 6) *Fire and Smoke Control of Tunnels*, PIARC Committee on Road Tunnels, C5, 05.05.B 1999

(2014. 9. 15 受付)

EFFECT VERIFICATION OF FACILITIES FOR TUNNEL EMERGENCY ACCORDING TO SCENARIO

Tetsuya YAMAZAKI, Masariro 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.