

## 火災等に対する道路トンネルへのリスクアセスメントの適用性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：砂金伸治，石村利明，森本智

### 【要旨】

道路トンネルは閉鎖された空間であり、火災が発生した場合には利用者の安全面への影響が大きい。我が国の道路トンネルの安全対策は非常用施設設置基準<sup>1)</sup>に基づき行われているが、近年、欧州において大規模な道路トンネル火災が連続して発生するなど、国内においてもトンネルの安全性確保に関する社会的要請は極めて高い。本研究は、道路トンネル内の火災時等における安全度向上に資する施設設置等の優先度や代替策の効果、および通行規制の影響や効果等に対して、それらの判断が可能となるリスクアセスメントによる道路トンネルの安全度評価手法について検討を行うものである。その結果、海外の道路トンネルの安全対策におけるリスクアセスメントの実態調査を通じて、国内における道路トンネルのリスクアセスメントを行うための試算モデルの提案を行うとともに、火災発生時のリスクシナリオの設定に用いる利用者の避難開始時間や避難速度の把握、路線の条件を加味した場合の安全度評価手法の適用性について考察した。

キーワード：道路トンネル，リスクアセスメント，火災，避難開始時間，避難速度

### 1. はじめに

道路トンネルは閉鎖された空間であり、トンネル内で火災が発生した場合には利用者の安全面への影響が大きい。我が国の道路トンネルの安全対策は非常用施設設置基準<sup>1)</sup>に基づき行われているが、欧州において大規模な道路トンネル火災が 2000 年前後に連続して発生するなど、国内においてもトンネルの安全性確保に関する社会的要請は極めて高い。加えて、我が国では交通量の多い都市内長大トンネルの建設が相次いでいるところであり、これらのトンネルにおいては危険物輸送車両に対して通行が禁止されているなど、トンネルの通行を規制している条件が存在しており、その影響や効果を判断できるツールの必要性に関する要請も高い。

本研究は、財政的制約の中で、火災時等の非常時の事象を考慮したトンネルの安全度向上に資する施設設置等の優先度や代替策の効果、および通行規制の影響や効果等に対して、それらの判断が可能となるリスクアセスメントによる道路トンネルの安全度評価手法の提案を行うことを目的としている。具体には、海外の道路トンネルの安全対策におけるリスクアセスメントの実態調査を通じて、国内における道路トンネルのリスクアセスメントを行うための試算モデルの提案を行うとともに、火災発生時のリスクシナリオの設定に用いる利用者の避難開始時間や避難速度の把握、路線の条件を加味した場合の安

全度評価手法の適用性について考察した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 海外における道路トンネルのリスクアセスメントの実態調査

欧州では近年の大規模な火災事故を受けて、2004 年に欧州指令<sup>2)</sup>が発出された。それによれば、既設トンネルの安全対策について非常用施設等の有効性を検証するため、トンネルの安全度をリスクアナリシスによって実証されるべきとしている。海外においては既にリスクアセスメントによる安全度の評価の実施事例もあることから、今後の国内の道路トンネルでのリスクアセスメント手法の構築に必要な諸情報に関して、資料収集・分析を行い、国内の道路トンネルへの適用の際の特徴と課題をまとめ、道路トンネルの安全に関するリスクアセスメントの評価モデル構築の際の留意点を明らかにした。

#### 2.2 リスクアセスメントにおける評価基準やしきい値の設定に関する検討

他分野および海外の道路トンネルで設定されている評価基準やしきい値との比較を行うとともに、発生確率と発生件数の関連性を検討した。また、道路トンネルのリスクアセスメントを行うための算定モデルを作成し、非常用施設の設置状況によるリスクの変動について算定を行い、試算モデルの妥当性を検証した。

### 2.3 シナリオ設定に用いる利用者の避難開始時間や避難速度の把握

火災発生時のリスクシナリオ等の検討にあたって、近年の道路トンネル火災事故事例調査とともに、火災発生時の利用者の避難行動等についての実大規模による実験的検討を行い、火災時における利用者の避難開始時間、避難速度等の基本的な特性の把握を行った。

### 2.4 路線の条件を加味した場合の安全度評価手法の適用性

路線の条件を加味したトンネルの安全度評価手法の試算モデルを作成し、ケーススタディを通じてリスクアセスメント手法による安全度評価手法の適用性について検討し、道路トンネルの安全度評価手法とその適用範囲の提案を行った。

## 3. 研究結果

### 3.1 海外における道路トンネルのリスクアセスメント等の実態調査

表-1 に文献等の調査により海外における道路トンネルのリスクアセスメントの事例について示す。表より、解析手法としてはシナリオベースによる解析とシステムベースによる解析が利用されている。前者は検討可能なシナリオ数に限界があるのに対し、後者は諸条件を変化させた数多くの条件での解析が可能となる。また、解析結果は、主に意思決定の補助や検討すべき観点の抽出、代替案の比較を行うことなどに利用されている。また、算定されたリスク値は FN（発生頻度（F）と被害者数（N））カーブ等で評価されていることがわかった。

評価モデルの構築にあたっては、利用者の安全を第一に考えることが重要であり、考慮すべき事項としては許容値の設定方法、利用者の避難行動（避難開始時間、避難速度など）のモデル化、トンネル内の状況シミュレ-

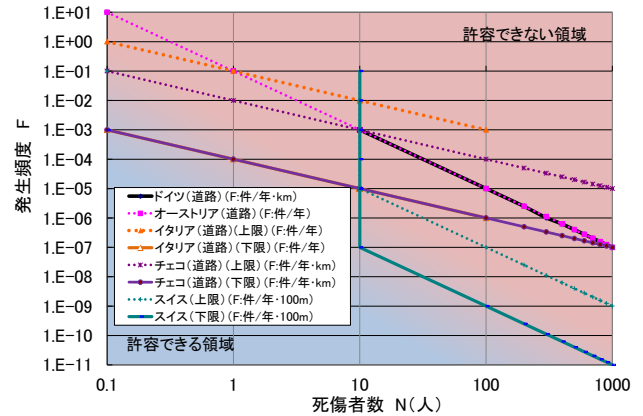


図-1 リスクカーブにおけるしきい値設定例

ションのモデル化などが考えられた。

これらの結果から、日本のようにトンネル本数が多い道路に画一的に適用する場合のリスクアセスメントの評価モデルとしては、多くの想定する条件に対する検討が可能なシステムベースによる定量的評価手法を用いて、リスクカーブによる評価を行うのが適していると考えられる。また、図-1 に海外においてリスクカーブを用いて評価を行う際の基準やしきい値設定例を整理した。これより各国によって発生頻度として考慮する単位、しきい値がそれぞれ異なっていることがわかる。国内での評価基準については、他分野におけるリスク評価の考え方等を参考に慎重に設定する必要があると考えられる。

### 3.2 リスクアセスメントの算定モデルと評価基準・しきい値の設定に関する検討

本節では道路トンネルの安全度を行う際の算定モデルの概要<sup>3)</sup>および検討結果を示す。トンネルの安全度の算定モデルの大きな流れを図-2、図-3 に示す。すなわち、第1段階で当該トンネルの事故の発生確率から煙挙動までの5つの条件を設定し、その後、第2段階としてそれ

表-1 海外における道路トンネルのリスクアセスメントの例

	フランス	スイス	イタリア	オーストリア	アメリカ
手法	シナリオベースのリスク解析(特定の危険についてシナリオを作成し、危険な状態を流れて投入、弱点がどこにあるかを抽出)	シナリオベースのリスク解析(特定の危険についてシナリオを作成し、危険な状態を流れて投入、弱点がどこにあるかを抽出)	システムベースのリスク解析(特定の危険について火災規模、風速、照明、人の行動、車両構成の組み合わせにより解析を行いFNカーブで評価)	システムベースのリスク解析(特定の危険について火災規模、風速、照明、人の行動、車両構成の組み合わせにより解析を行いFNカーブで評価)	システムベースのリスク解析(トンネルにおける発生率と被害と施設の重要度によりリスクを算出し、リスク低減とコストとの費用対効果で評価)
特徴	・危険物輸送に関するリスク分析を実施 ・基準は最低限 ・リスク分析は意思決定の補助 ・リスク分析により代替案の比較を実施	・利用者の保護を第一としている ・既存のトンネルについて状況診断を実施	・避難者の安全を第一目的 ・対象は火災 ・多くの解析を行うことで全体を網羅していると判断 ・低い確率の事象はベイズアンアプローチで発生確率曲線で組み込んでいる	・主として交通規制や速度規制により発生確率を抑制することにおいてエイトがとられている ・最小安全基準を設定してリスク値の比較を実施	・テロ行為を対象
適用範囲	300m以上のすべてのトンネル	300m以上のすべてのトンネル	高速道路のトンネル	高速道路のトンネル	高速道路トンネルおよびその他のトンネルに適用
評価に必要なパラメータ	・シナリオの選択(10未満) ・トンネル条件 ・交通条件 ・ハザードモデル ・評価モデル	・シナリオの選択 ・トンネル条件 ・交通条件 ・ハザードモデル ・評価モデル	・ET(event tree)によるシナリオ分岐(5000ケース) ・火災による熱と煙のシミュレーション(1次元) ・避難シミュレーション(毒性ガスで評価)	・ET(event tree)によるシナリオ分岐(約6000ケース) ・火災による熱と煙のシミュレーション(1次元) ・避難シミュレーション(毒性ガスで評価)	・各要素(避難、輸送、軍事等)における重要度の設定 ・被害はエンジニアリングによる解析により検討
備考	・リスク値の評価が難しい ・シナリオの数をこなすことができない ・解決策がトンネル毎に異なることがある	・リスク/コスト評価を導入 ・リスク評価の基準が規定されているので判断しやすい	・事故発生確率の設定にポアソン分布で表現 ・避難開始行動の根拠がない ・火災シミュレーションが1次元で評価されるため過小評価になる可能性がある	・EU指令によるリスク値を標準として、リスク値を低下させるための設備の検討を実施 ・設備運用よりも交通運用にエイトが高い	・リスク低減率とコストによる費用対効果による対策順序の選択判断が容易 ・解析方法が不明瞭であり、リスク低減効果の妥当性の検証が必要

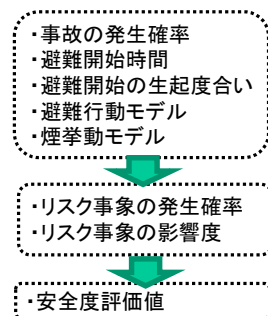


図-2 リスクアセスメント手法の流れ

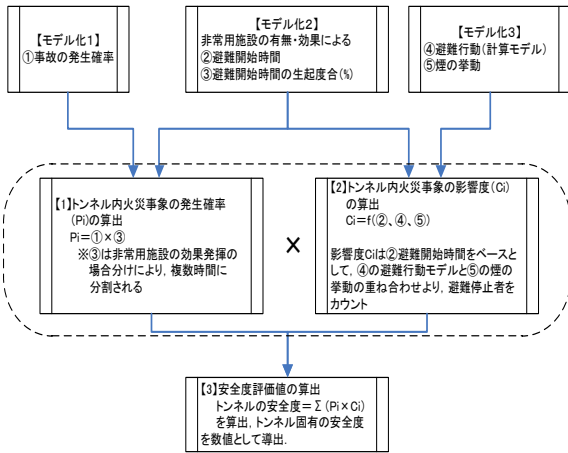


図-3 リスクアセスメント手法の流れ

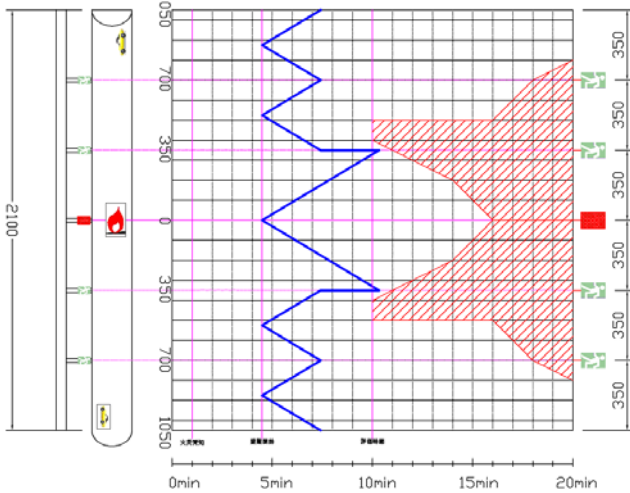


図-4 影響度 Ci の算出の考え方<sup>3)</sup>

らの設定値を用いてトンネル内火災事象に対する発生確率、影響度を算定する。第3段階でトンネル固有の安全度を算出するものである。

本研究においては、図中に示す【モデル化1】～【モデル化3】を表-2に示すように設定するとともに、第2段階の各事象の発生確率  $P_i$ 、影響度  $C_i$ 、第3段階の避難者に対するトンネルの安全度評価値の算出については下記に示すように考えた。

まず、各事象の発生確率  $P_i$  は下記により算定する。

$\Sigma$  (各事象の発生確率  $P_i$ )

= 交通事故発生確率 × 火災規模確率

×  $\Sigma$  (非常用施設効果発揮有無) …(1)

また、影響度  $C_i$  は「②避難開始時間の算定」を背景に、「④避難行動」と「⑤煙の挙動」を重ね合わせ、④と⑤が重なる部分が避難環境を確保できない範囲とし、この範囲に存在した避難者を避難困難者と考え、図-4に示すように最終避難者の行動ラインとトンネル内の煙の降下範囲との関係から避難困難者の人数として式(2)により算定する。

表-2 モデル化1~3の設定

①事故の発生確率	・ 起因事象である火災事故の発生確率は、交通事故の発生確率を参考にトンネル延長、および日交通量の影響を加味して算出する。 ・ 実際にトンネル内で交通事故が発生した場合、それに起因して火災が発生するかどうか、また、発生する場合はその規模を想定する必要がある、これも確率的な要因として算定することを想定する。 ・ 規模を含めた火災の発生確率は、トンネル内で火災が発生し、その際に焼損した車両の台数のデータを基にして設定する。
②避難開始時間	避難開始時間は、非常用施設が設置されていないトンネルで、避難が火災発生後にどのくらいから開始されるかを基本とし、種々の影響を加味して設定する。
③避難開始時間の生起度合(%)	・ 避難開始時間の生起度合いとは、各非常用設備が避難開始行動を促進する、すなわち、「非常用施設の存在が避難開始時間を短縮させることに寄与」することを想定する。 例えば、(a) 通報設備の効果発揮までの時間 = 機器の設置間隔 ÷ 歩行速度、(b) 検知設備の効果発揮までの時間 = 火災検知器による検知時間など ・ 非常用施設によって、その施設が効果を発揮したか否かについては、イベントツリーによってその非常用施設の効果が発揮、すなわち「成功」、または不発、すなわち「失敗」したかによって算定する。この場合は施設の効果の発揮は岐事象として取り扱い、「成功/Yes」「失敗/No」の2岐とする。
④避難行動	避難行動モデルとして避難速度を設定する。 本研究においては、以下に示すような考え方で単純化することを想定する。 (a) 当初の避難速度は一定 (b) 避難方向として直近の非常口または坑口を指向 (c) 煙濃度がある値になった場合に避難速度が0m/s
⑤煙の挙動	トンネル火災時の煙の挙動は、火災規模、火災進展状況、トンネル内風速、トンネル縦断勾配、トンネル断面形状、停止車両の有無等により異なるが、本研究では過去の火災実験のデータを基に設定する。

影響度  $C_i$  (人)

$$= \text{交通密度(台/km)} \times \text{平均乗車率(人/台)} \times \text{影響範囲(km)} \dots(2)$$

避難者に対するトンネルの安全度評価値の算出は、イベントツリー解析においては、起因事象から帰結にいたる各々のシークエンス  $i$  に対して事象の発生確率  $P_i$  と影響度  $C_i$  が求まる。これらの計算を繰り返すことにより、ある  $i$  という母数で検討した影響度  $C$  とその確率  $P$  の関係性を表す離散的な確率密度関数を得ることになり、これがリスクカーブとなる。ある条件に対する安全度評価値としては、すべての場合の影響度  $C$  とその確率  $P$  を乗じたものを足し合わせた数値を指し、式(3)で表現されると考えられる。

$$R = \sum_{i=1}^n f(P_i, C_i) \dots(3)$$

本算定モデルを用いて、代表的な条件による非常用施設の設置によるリスクの低減効果の把握とともに、トンネル延長と交通量の関係から定まるトンネル等級(AA,A,B,C,D)を参考にして代表的な条件を想定して、非常用施設の設置の有無によるリスク評価値を算定した。

図-5に延長5km、交通量4000台/日の場合の非常用施設の設置の有無による各事象のリスクの試算結果の例を示す。図は各事象ごとの発生確率と影響度の関係を表している。また、図中には試算結果の違いを分かりやすくするため、仮に2本のしきい値を参考として表示した。これより、非常用施設が設置されていない場合は、各事象はしきい値の境界の上部に位置(許容できない領域)するが、非常用施設の設置の規模によりリスクが低減し、

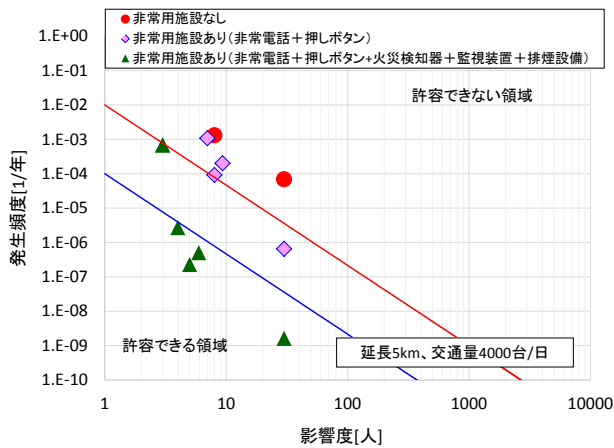


図-5 非常用施設の有無によるリスク結果例

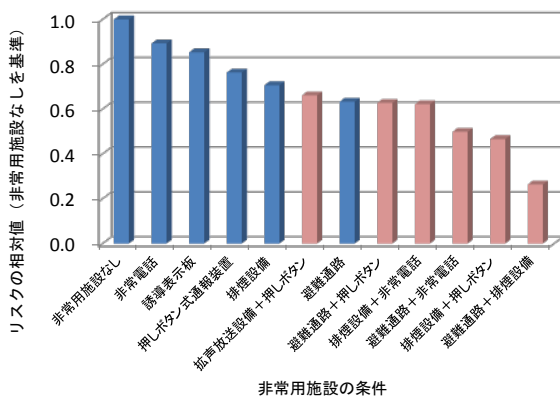


図-6 非常用施設の有無によるリスク値 (延長5km, 交通量4000台/日)

許容できる領域へと移動していることがわかる。また、図-6 にトンネル延長 5km, 交通量 4000 台/日の場合の個別の非常用施設を設置することによるリスク低減効果の例を示す。これより、非常用施設の種類に応じてリスクが低減することがわかる。今回の試算条件ではリスクが低下する施設として避難通路、水噴霧設備、排煙設備が挙げられる。また、非常電話や押しボタン式通報装置などは、他の非常用施設と組み合わせて設置することによりさらにリスクが低下する傾向があることがわかる。

以上より、非常用施設が設置されることにより影響度が低下していることがわかり、各非常用施設の設置によりリスクの低減が定量的に把握できる可能性があり、個別の非常用施設の設置効果とともに、非常用施設を設置する場合の優先度を検討する際に利用できる可能性があることがわかった。ただし、本試算にあたっては、算定時に想定したパラメータを使用しており、実際のトンネルへの適用にあたっては、これらのパラメータを設定するためのデータの蓄積を図り、妥当性を検証していく必要がある。

### 3.3 シナリオ設定に用いる利用者の避難開始時間や避難速度の把握

トンネルの安全度を定量的な評価手法に基づいて検討していくうえでは利用者の避難行動に関する諸数値等が必要となる。本節では道路トンネルを対象に、写真-1に示す実大トンネル実験施設(2車線道路トンネル規模(延長700m, 断面積57m<sup>2</sup>))の約400m区間を用いて、火災時における避難開始時間、避難速度に関する2つの実験を実施した。なお、避難速度については煙により視界が悪い状況下においても利用者の避難を支援策の一つとして考えられる足下灯の効果について把握した。

#### 3.3.1 避難開始時間

避難開始時間に関する実験は、図-7に示すようにトンネル内に火皿を用いた模擬火災を発生させ、トンネル内の停止車両内にいる利用者が避難を開始し始める時間を計測した。火災は、ガソリンと同程度の発熱量を有するノルマルヘプタンを燃焼させるとともに、煙は発煙筒で模擬した(写真-2)。なお、実験時の条件は、火災が発生した後、火点位置の後続車が停止した状態と仮定し、停止車両内の利用者が避難を開始する時間をビデオカメラ等で計測した。車両の配置は、図中に示す乗用車3台(A～C車両)とした。また、トンネル内は無風状態で基本照明を全点灯とする条件とした。被験者は、37名(男性35名、女性2名、年齢24歳～66歳(平均年齢41歳))として、各車両に1ケースあたり被験者約9名(3名/1台)で実施した。実験ケースは、火皿面積、避難物の有無(各車両の概ね4m前方に貨物自動車が停車して火災を直接視認できない状態を模擬:遮蔽物が有る場合は煙を覚知して避難となり、遮蔽物がない場合は火災を覚知して避難が開始されると仮定する)、避難



写真-1 実大トンネル実験施設

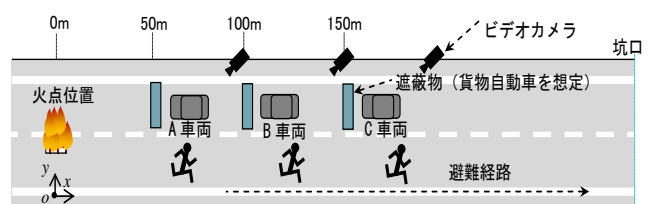


図-7 避難開始時間の実験概要図

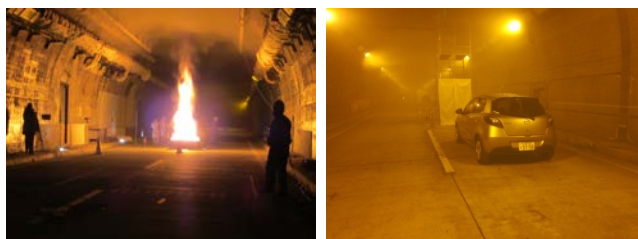


写真-2 火皿による模擬火災の状況

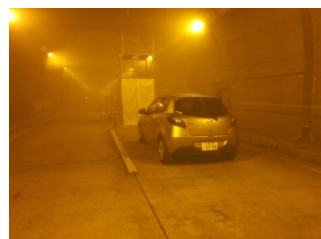


写真-3 避難開始実験時の状況

表-3 避難開始時間の実験ケース

ケースNO.	火皿面積 (m <sup>2</sup> )	燃焼時間 (分)	発熱量 (MW)	遮蔽物の有無	避難促進の有無	備考
1	1	10	2	有り	なし	煙を覚知
2	0.5	10	1	有り	なし	煙を覚知
3	1	10	2	有り	有り	煙を覚知、発災1分後に1人の被験者が避難促進
4	1	10	2	有り	有り	煙を覚知、発災1分後に拡声放送による避難促進
5	1	5	2	なし	なし	火災を覚知

促進の有無（1人の被験者、もしくは拡声放送によって早期避難を促す）等を変化させた表-3に示す5条件とした。火皿面積の大きさについては、本実験目的が火災発生時に利用者が煙や火災を覚知してから避難開始までの時間や、何をきっかけとして避難するかを把握することを目的としていることから、一般的な検討に用いられているトンネル火災規模に比較すると小さい火災規模の条件とした。なお、被験者には実験の主旨は伝えていないが着火のタイミング等を知らせずに車両内にとどまる状態で実験を開始した。実験時の状況を写真-3に示す。

図-8に各ケースにおける各車両位置までの煙の到達時間を示す。煙の到達時間は、火災によりトンネル上部

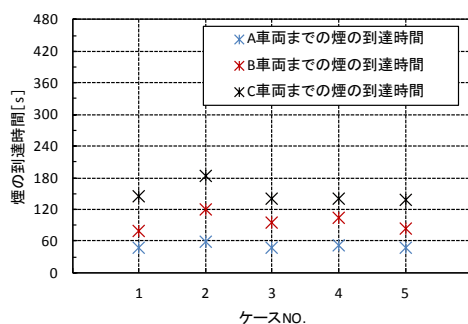


図-8 煙の到達時間

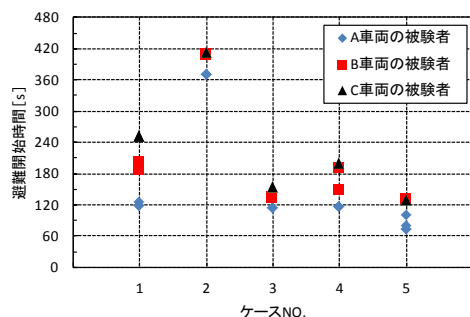


図-9 避難開始時間

空間に発生する熱気流で煙が流される先端の位置を観測員による目視確認で行った。これより、煙の到達時間は、各車両までの距離に応じて長くなっている。火災規模が他と比べて小さいケース2で煙の到達時間が若干長いものの、本実験で対象とした火災規模による煙の移動の顕著な差は見られない。

図-9に各ケースの避難開始時間を示す。車両毎の被験者の違いを見ると、各ケースともに火点に近いA車両が最も早く避難を開始し、B車両、C車両の被験者が続く傾向を示した。実験時の観察によれば、B車両、C車両の被験者は、それぞれ火点に近い車両の被験者が避難する行動を確認してから避難し始めていた。これより、避難開始時間は火点に近い利用者の避難行動が最も重要であると考えられる。火点に近いA車両の被験者について見れば、煙覚知の場合の避難開始時間はケース2を除き概ね約120秒以内に避難を開始している。火災規模の異なるケース1と2を比較すると、避難開始時間が120秒から360秒程度と長い。これは火災規模が小さい場合は、煙は上部空間に存在するものの、下部空間まで降下するまでに時間を要し、車両内から煙の存在が確認しづらかったために避難開始時間が遅くなったと考えられる。一方、火災を直視できる火災覚知のケース5は、煙覚知のケースに比べて各車両の被験者の避難開始時間が早くなっている。これはトンネル内での車両停止の原因が火災であることを即座に認識できたことによると考えられる。また、避難促進を行ったケース3と4は、両ケースともにB車両、C車両の被験者に対して避難促進の効果が現れている。これは、トンネル内の状況、避難の必要性の情報等を早期かつ適確に伝達することで避難開始時間が早まる可能性があるものと考えられる。特に、ケース3の避難者による避難促進は、車外に出てから避難開始するまでの時間が各車両ともに最も短く、火災の覚知から避難を開始するまでの判断に要する時間が短い結果であった。

### 3.3.2 煙の状態と避難速度の関係

火災時における避難速度に関する実験は、写真-1に示した実大トンネル実験施設（2車線規模（延長700m、断面積57m<sup>2</sup>）の約400mの区間を用いて実施した。

実験は、図-10に示すようにトンネル内を閉鎖した状態で、火災時の発煙状態を模擬するためにスモークマシンを使用してトンネル内に煙を充満させた状態で、被験者にスタート地点からゴール地点までの予め設定した経路に従って避難してもらい、その際の歩行速度を計測した。被験者の年齢は23～62歳、各煙濃度における被験者の

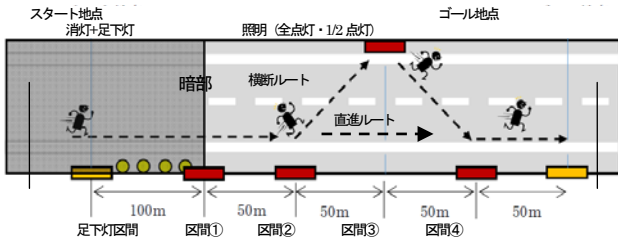


図-10 避難速度の実験概要図



写真-4 トンネル内状況 写真-5 足下灯の状況

平均年齢は35～45歳、女性比率は9%～30%である。また、トンネル内の煙の状態は、50～100m程度の間隔で設置した煙濃度計によりCs濃度として評価した。実験時の状況の例を写真-4に示す。

実験条件は、トンネル内の煙の状態としてCs濃度を概ね0.3, 0.6, 1.0程度の3条件を目標値として定め、それぞれの条件下でトンネル内の明るさ(照明条件)を3条件(全点灯, 1/2点灯, 消灯)設定した。なお、照明条件の全点灯は平均路面輝度4.5cd/m<sup>2</sup>相当である。また、足下灯の実験については、市販のLEDライトチューブ(緑または赤)を用いて、設置位置を路肩部の足下、側壁の高さ0.75mの2条件、点灯パターンを点灯, 点滅の2条件として避難速度を計測した。写真-5に色が緑の足下灯を足下に設置した状況を示す。また、実験終了後に被験者に対してアンケート調査を実施した。表-1に実験条件一覧を示す。なお、実験条件の設定は、避難実験に使用した400mの区間内を分割して、1条件での被験者の避難距離が50m～100m程度となるようにした。

図-11に照明条件毎のトンネル内の煙の状態(Cs濃度)と避難速度の関係を示す。これより、全点灯・1/2点灯の場合は、ばらつきはあるものの煙の濃度が濃くなる(Cs濃度が大きい)と避難速度が低下している傾向にある。Cs濃度が小さい(比較的煙が薄い)状態では最大で3m/sから最小で1m/sを下回る結果もあり、被験者によるばらつきが大きい結果が得られた。一方、Cs濃度が大きい(煙が濃い)状態では概ね1.5m/s～1m/s程度の範囲となった。一方、消灯時の場合は、煙の状態に関係なく極端に速度が低下し避難速度が1m/s以下がほとんどであり、避難不能(0m/s)な被験者も存在する。これより、トンネル

表-4 実験条件一覧表

NO.	トンネル内の照明	足下灯の条件			被験者数(延べ人数)	
		有無	色	設置位置		
1	全点灯	無	-	-	246	
2	1/2点灯	無	-	-	103	
3	消灯	無	-	-	33	
4	全点灯	○	赤	路肩(足下)	点灯	46
5			緑			11
6			赤	壁面(高さ0.75m)	点灯	22
7			緑			11
8	消灯	○	赤	路肩(足下)	点灯	31
9			緑			41
10			緑	壁面(高さ0.75m)	点滅	10
11			赤			11
12			緑			21
13			緑			10

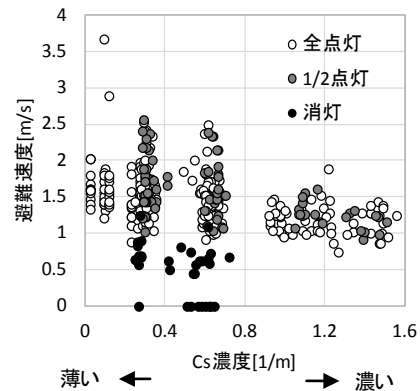


図-11 Cs濃度と避難速度の関係

内で避難するためにはある程度の明るさを確保することが必要であることが再確認された。既往の文献<sup>4</sup>等により従来からCs濃度が0.4程度になると避難が困難になると考えられてきたが、今回の実験では、トンネルの明るさが確保されている場合は、Cs濃度が0.4を超えた状態でも約1m/sの速度でも避難することができた。しかし、本実験ではスモークを使用した。実際には火災によって発生するガスやトンネル内の温度の影響やトンネルの線形・勾配等も関連すると考えられ、さらなる検討が必要である。

### 3.3.3 足下灯を設置した場合の避難速度と足下灯による避難誘導効果

図-12に足下灯を設置した各実験条件下でのトンネル内の煙の状態(Cs濃度)と避難速度の関係を示す。これらの図より、ほぼ全ての条件で概ね1m/s程度以上の避難速度が確保されている結果となった。足下灯を設置することにより消灯時の場合でも避難不能となる被験者もなく、照明がある状態と同程度の避難速度で避難が継続できたことより、足下灯による避難誘導効果があることが分かった。なお、足下灯がある条件下での、足下灯の色、設置位置、点灯パターンによる避難速度の顕著な差は認められない。

図-13に足下灯の各条件等による効果について、トンネル内の煙が最も濃いCs濃度が1.0でのアンケート結果を示

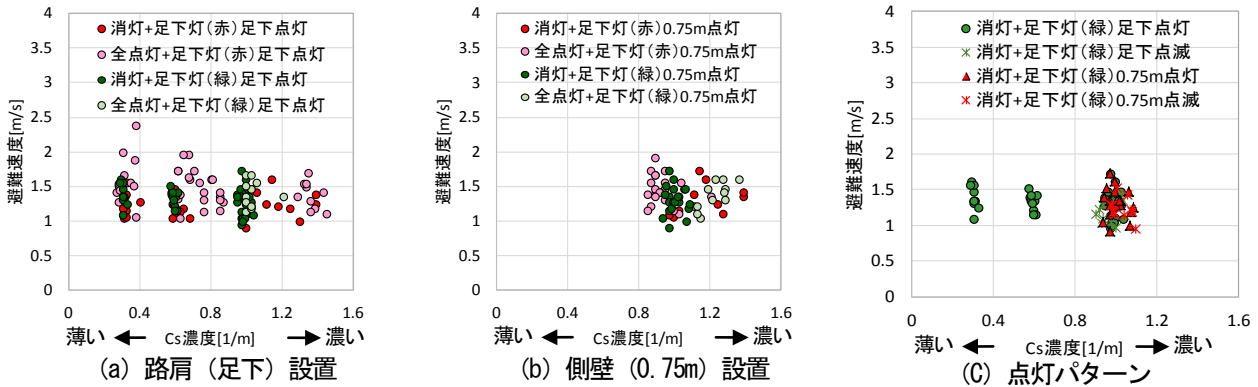


図-12 足下灯を設置した場合のCs濃度と避難速度の関係

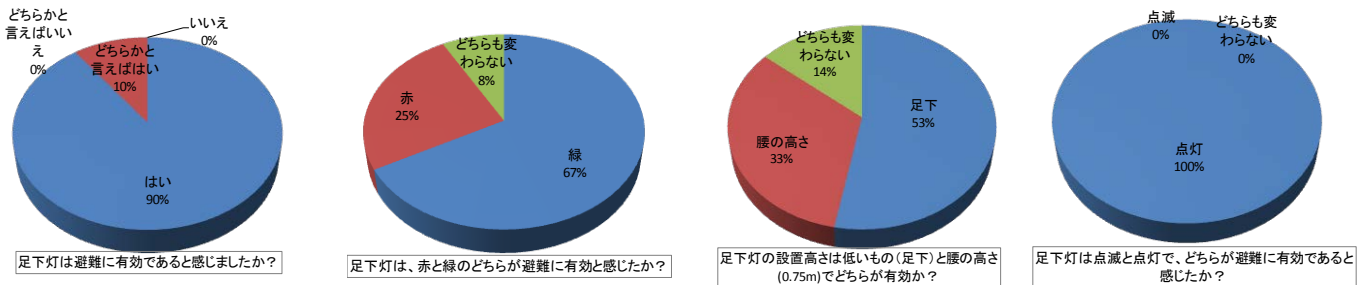


図-13 足下灯に関するアンケート結果 (Cs濃度 1.0)

す。これより、足下灯の効果は90%で「はい」と回答しており、「どちらかと言えばはい」を含めると100%で効果があるとしている。足下灯の色による効果は、「赤」25%に対して「緑」67%であり「緑」のほうが高い。足下灯の設置高さによる効果は、「腰の高さ」33%に対して「足下」53%であり「足下」のほうが高い。点灯パターンによる効果は、「点灯」が100%となった。足下灯の色、設置位置、点灯パターンによる避難速度には顕著な差は見られなかったが、被験者が避難時に感じた足下灯の効果は異なることが分かった。今回の被験者によるアンケートでは、被験者からは、色:「緑」、設置位置:「足下」、点灯パターン:「点灯」の条件が最も避難時に有効である結果となった。

本実験より限られた条件下であるが、以下のことが明らかとなった。避難開始時間については、煙覚知の場合の避難開始時間は概ね約120秒程度であり、トンネル内の状況、避難の必要性の情報等を早期かつ適確に伝達することで避難開始時間が早まる可能性があるものと考えられた。また、避難速度について、道路トンネル内の避難速度は、比較的煙が濃い状態でも明るさの度合いによっては避難できる可能性があることがわかった。また、足下灯は避難誘導に非常に有効であり、消灯時においても照明がある条件と同程度の避難速度まで向上させる効果があることがわかった。

3.4 路線の条件を加味した場合の安全度評価手法の適

用性

路線の条件を加味した場合の安全度評価手法は、出発地点から到着地点へ移動する際のトンネルを含む複数のルートを対象とした安全度を評価することを目的としている。本検討では図-14に示す流れでリスクを算定する方法とした。具体的には、当該トンネルでの交通量や走行速度、大型車混入率等の設定とともに、事故発生率や危険物車両の混入率、トンネル以外のルート上の明かり部

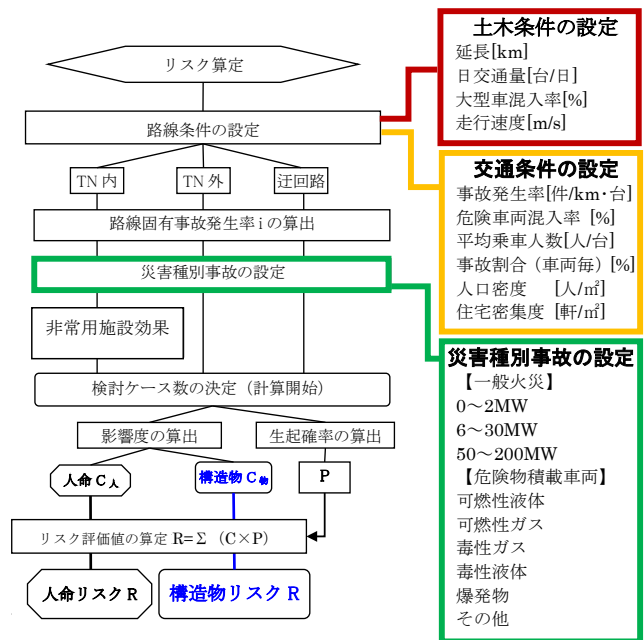


図-14 路線条件を加味したリスク計算フロー

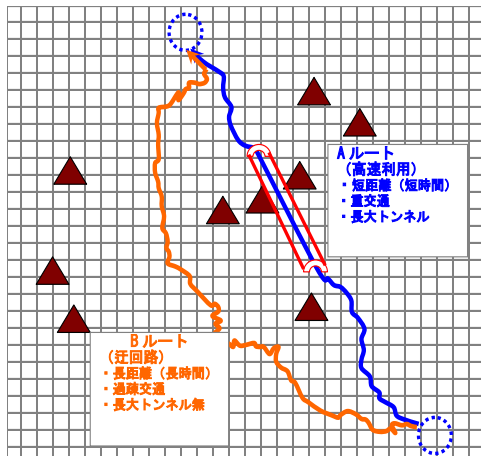


図-15 試算に用いた路線条件の概念図

表-5 試算条件

	Aルート	Bルート
延長	短い	長い
走行速度	速い	遅い
交通量	少ない	少ない
事故被害 (人命)	甚大	小さい
事故被害 (構造物)	甚大	小さい
沿道の人口密度	多い	少ない

における人口密度、住宅密集度等の設定といった路線条件を設定し、各路線ごとに想定する火災規模(一般火災、危険物積載車両に関連する火災)毎での影響度、生起確率を算出し、リスク評価値を算定した。なお、本検討においては人命リスクのほか、構造物に対するリスクを考慮することとした。

本解析モデルの適用性を確認するため、代表的なルートを仮定しリスク値の比較を行った。試算に用いた路線条件の概念図、試算条件の設定は図-15、表-5に示すとおりである。試算結果を図-16に示す。これより、本試算条件では、トンネルを含むAルートの方がリスクが高い結果となった。各ルート上における沿道人口密度、トンネル延長、交通量がリスク値に与える影響を見るため、それぞれの条件を変化させた結果を図-17に示す。これより、人命・構造物に対するリスクはそれぞれ影響しているものの、Aルート、Bルートともに大きく影響を与えているのは交通量であるがわかる。そのほか、トンネルが路線上に存在するAルートにおいてはトンネル延長が、路線が明かり部で構成されるBルートにおいては沿道人口密度も影響を与えることがわかる。これらの条件に応じたリスク値の変化は一般的に考えられるリスクの傾向と概ね妥当な変化を示していると考えられる。

以上より、路線の条件を考慮した安全度を評価するうえで本評価モデルを適用することで定量的な評価が可能となることと考えられる。本試算にあたっては、算定時

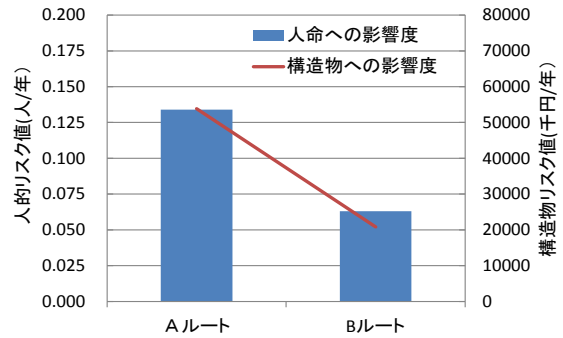


図-16 人命・構造物へのリスク値試算結果

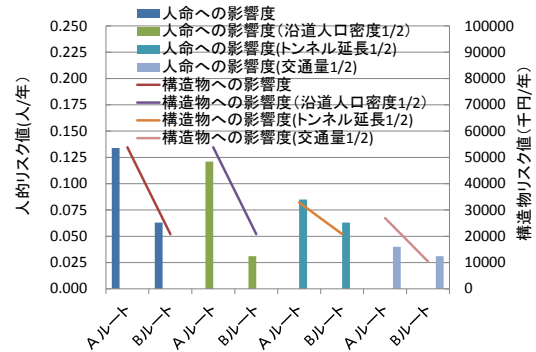


図-17 条件の違いによるリスク試算結果

に想定したパラメータを使用しており、実際のトンネルへの適用にあたっては、パラメータを設定するためのデータの蓄積を図る必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

道路トンネル内の火災時等における安全度向上に資する施設設置等の優先度や代替策の効果、および通行規制の影響や効果等に対して、それらの判断が可能となるリスクアセスメントによる道路トンネルの安全度評価手法について、海外の道路トンネルの安全対策におけるリスクアセスメントの実態調査を通じて、国内における道路トンネルのリスクアセスメントを行うための試算モデルの提案を行うとともに、火災発生時のリスクシナリオの設定に用いる利用者の避難開始時間や避難速度の把握、路線の条件を加味した場合の安全度評価手法の適用性について検討を行った。検討した結果をまとめると以下に示すとおりである。

- 1) 提案した算定モデルによる試算結果から、各非常用施設の設置によりリスクの低減が定量的に把握できる可能性があり、個別の非常用施設の設置効果とともに、非常用施設を設置する場合の優先度を検討する際に利用できる可能性があることがわかった。
- 2) 避難実験により、道路トンネル内の避難速度は、比較的煙が濃い状態でも明るさの度合いによっては避



難が継続できる可能性があることがわかった。また、足下灯は避難誘導に非常に有効であり、消灯時においても照明がある条件と同程度の避難速度を維持する効果が認められる場合があることがわかった。

- 3) 避難開始時間については、トンネル内の状況、避難の必要性の情報等を早期かつ適確に伝達することで避難開始時間が早まる可能性があることがわかった。
- 4) 路線の条件を考慮した安全度を評価するうえで本評価モデルを適用することで定量的な評価が可能となることがわかった。

## 5. 今後の課題

本研究により道路トンネルの安全度評価手法とその適用範囲の提案を行うとともに、シナリオ設定のための避難開始時間、避難速度の把握を行った。

提案した評価モデルについては、本試算にあたっては、算定時に想定したパラメータを使用しており、実際のトンネルへの適用にあたっては、これらのパラメータを設定するためのデータの蓄積を図り、妥当性を検証していく必要があるとともに、検討した安全度評価の試行と、

本研究で明らかになった足下灯の効果等の具体のモデル化など、必要に応じて新たな知見等も含めて評価モデルの改良等を図っていく必要があると考えられる。

また、避難開始時間、避難速度については、今後、火災による発生ガスや温度、トンネルの線形・勾配による影響や、さらに実験の対象延長等による影響についての検討が必要であると考えられる。

### 【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説、平成13年11月
- 2) DIRECTIVE 2004/54/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network
- 3) 砂金伸治、角湯克典、真下英人：トンネル安全度評価のためのリスクアセスメントに関する一考察、土木学会地下空間研究委員会、地下空間シンポジウム論文・報告集第17巻、2012。
- 4) 神忠久：煙の中での歩行速度について、火災 第25巻2号、1975。

# RESEARCH ON THE APPLICABILITY OF RISK ASSESSMENT FOR FIRE IN ROAD TUNNEL

**Budget:** Grants for operating expenses  
General account

**Research Period:** FY2011-2015

**Research Team:** Road Technology Research  
Group(Tunnel)

**Author:** Nobuharu ISAGO  
Toshiaki ISHIMURA  
Satoshi MORIMOTO

**Abstract:** The priority to ensure the tunnel safety is crucially high because many fatal fire accidents in road tunnel occurred in the past in Japan and in EU countries repeatedly. Long tunnels with high traffic volume are constructed in urban areas in Japan, and there are some regulations to restrict the traffic of vehicles with dangerous goods for that kind of tunnels. The methodology to judge the effect of priority of facilities installment, alternative of facilities to boost the safety of tunnel and regulation concerning the transportation with dangerous goods should be examined.

As a result, the model for risk assesment for road tunnel in Japan was proposed through the prospect of safety measures in foreign countries. The start-up time and the speed for evacuation of tunnel users was grasped for evaluation of risk scenario during tunnel fire. In addition, the applicability of methodology of safety evaluation of tunnel considering the characteristics of road conditions and so on was shown.

**Keywords:** road tunnel, risk assesment, tunnel fire, evacuation start-up time, evacuation speed