

トンネルの安全度評価のためのリスクアセスメントに関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：道路技術研究グループ(トンネル)

研究担当者：角湯克典，砂金伸治

【要旨】

我が国のトンネルの安全対策は非常用施設設置基準に基づき行われてきているが、近年発生した火災事故に関する知見等を踏まえた場合、非常用施設の増強が必要な場合があることが明らかになりつつある。しかし、我が国のトンネル数は膨大であることから、トンネルの安全度を向上させるための改築の優先度や増強すべき設備を工学的に判断する手法の確立が望まれている。本研究は、トンネルの安全度を定量的に評価するための手法としてリスクアセスメントによる手法に着目し、リスクアセスメントに関する国内外の事例の調査を行うとともに、リスクアセスメントに使用するシナリオやリスクの算出方法の検討を行った。その結果、提案したリスク事象の生起確率や影響度の算定の考え方によりリスク値の算定ができる可能性を示すことができた。

キーワード：トンネル，リスクアセスメント，非常用施設，欧州指令

1. はじめに

我が国のトンネルの安全対策は、過去の火災事故の経験を踏まえた非常用施設設置基準に基づき行われてきているが、現在の我が国のトンネルの安全水準について、トンネル火災に関して蓄積された知見や欧州において近年策定された防災に関する新しい基準（欧州指令）を参考に検討を行った結果、中規模トンネルにおいて避難施設の設置などといった非常用施設の増強が必要な場合があることが明らかとなってきている。

しかし、我が国におけるトンネル数は膨大であり、全てのトンネルに対して一律に設備を増強することには課題も多くあることから、優先的に改築の必要のあるトンネルや増強すべき設備を工学的に判断することが必要であり、その一つの判断基準としてトンネルの安全度を定量的に評価する手法の確立が求められている。

本研究は、トンネルの安全度評価の手法としてリスクアセスメントに着目し、リスクアセスメントに関する国内外および他分野における実態調査を行い、リスクアセスメントの実施に必要な知見や情報を収集するとともに、トンネル内で発生する火災をリスクと捉え、そのリスク事象が発生するシナリオを想定し、その場合のリスク値を算出するための解析手法の検討を行うものである。

2. 研究方法

2.1 リスクアセスメント事例の実態調査

国内外において、リスクアセスメントを活用してい

る分野や、また、道路トンネルにおいて用いられているリスクアセスメントに関する諸情報について資料の収集を行い、リスクカーブやリスクマネジメント等に関する比較を行う。また、道路トンネルのリスクアセスメントの実施に際して、交通条件、トンネルの延長と幾何構造、大型車の混入率、設置される非常用施設など必要な入力情報の分析を行う。

2.2 安全度評価のための解析手法の検討

トンネル内で発生する火災をリスクと捉え、そのリスク事象が発生するシナリオを想定するとともに、そのシナリオに基づいて、事象発生時におけるリスク値を算出するための解析手法の検討を行う。また、既存のトンネルを対象にしたケーススタディを行う際の考え方について検討を行う。

3. 研究結果

3.1 リスクアセスメント事例の実態調査結果

国内外において、主として道路以外の分野でリスクアセスメントを事業に取り入れている分野を調査し、その内容に関して比較を行った。その結果、化学、原子力、労働安全のうち有害物質に関わる分野等でリスクアセスメントが取り入れられており、手法としては、イベントツリー解析、フォルトツリー解析を主体とし、また評価にあたってはリスクマトリクスを用いた評価が使用されているものが多かった。

次に道路トンネルに関するリスクアセスメントの検討状況について PIARC 加盟国の一部を対象に調査を行

った。その結果、道路トンネルに関しては危険物輸送車両の通行可否や火災事故に関してリスクアセスメントによる検討を行っている場合があることが分かった。特に、PIARC では、トンネルにおける危険物輸送の可否を判断することを目的としたリスク分析モデル(以下 DGQRAM)を示しており、その内容は、危険物を輸送する車両に対してトンネルルートを通過を許可することが可能か、明かり部に挙げられる代替ルートを選択すべきかを判断するための指標として社会的リスクを考慮した期待値を用いて比較検討するためのものであった。危険物輸送車両による災害発生頻度(生起確率)が、通常交通事故・火災に対して非常に小さく、トンネルルートと代替ルートで明確な差が生じない場合もある。このことから、DGQRAM では危険物輸送で対象となる危険物に必ずしも起因しない、通常規模の火災発生をシナリオに組み込み算定した優劣についても判断要素として加味していることが分かった。

3.2 安全度評価のための解析手法の検討結果

3.2.1 安全度評価のための解析手法の概要

本節では道路トンネルの安全度評価を行う解析手法の検討を行った。図-1 に安全度評価のための解析手法の概要を示す。

解析手法では大別して3つのステップがあると考えられる。まず、「ステップ1:モデルの想定」ではステップ2でリスク発現ケースの発生確率と影響度の算定を行うための基礎となるモデルを設定する。次に、「ステップ2:リスク発現ケースの発生確率と影響度の算定」では、ステップ1で設定したモデルにより事象の発生確率 P_i と影響度 C_i を算出する。最後に、「ステップ3:避難者に対するトンネルの安全度評価値の算出」では、トンネルの安全度を想定されるケースの総合値として算出し、対象トンネルでの避難者に対するトンネル安全度評価値として導出する。以下に各ステップ毎で必要となる考え方を示す。

3.2.2 モデルの想定(ステップ1)

ステップ1のモデルの想定ではステップ2でリスク発現ケースの発生確率と影響度の算定を行うための基礎となるモデルを設定するが、それは大別して3種類の細分化したモデルより構成されると考えた。モデル化1として「火災事故の発生確率の算定」、モデル化2として「非常用施設の有無の効果の算定」、そしてモデル化3として「トンネル内の状況の再現」である。また、モデル化2と3については、さらに2つの構成成

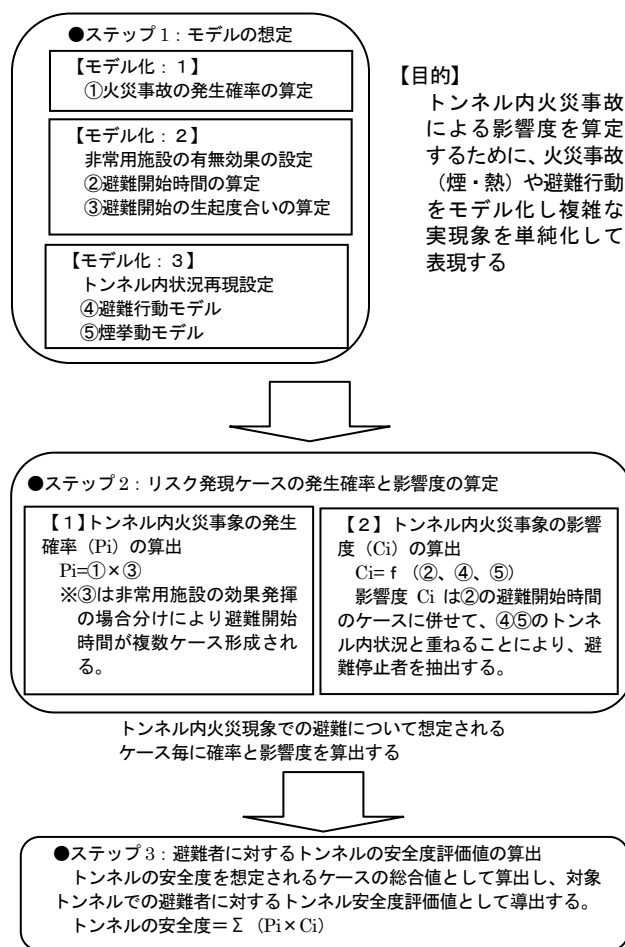


図-1 安全度評価のための解析手法の概要

分に分けて考えた。これらに関する考え方を以下に述べる。

モデル化1: ①火災事故の発生確率の算定

起因事象であるトンネル火災事故の発生確率は、トンネル等級を決定する根拠と関連するが、ここではパラメータの変動要因と捉え、交通事故の発生確率を参考として設定することを想定した。交通事故の発生確率は、基本となる事故発生率にトンネル延長、および日交通量の影響を加味して算出できる。また、これ以外にも種々の影響要因が存在すると考えられ、各種補正係数として加味できることが望ましいと考えられる。

また、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した。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ことができる。

モデル化2: ②避難開始時間の算定

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のが妥当であると考えた。この値を本研究では「標準避難開始時間」と定義する。

標準避難開始時間は火災の規模や、大型車両からの降車時間を加味するなどの必要がある。

モデル化2：③避難開始時間の生起度合いの算定

算定した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ものである。言い換えれば、各非常用施設の設置間隔そのものが避難開始を行うための火災覚知への時間に影響すると考えるものである。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

これは、火災事故発生地点にいる人(すなわち、事故当事者または目撃者)が火災発生とともに、通報設備まで移動することで、その他のトンネル滞在者が火災を覚知する時間を短縮するという考えである。また、

(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

といった考えもできる。

なお、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とが考えられる。この場合は施設の効果が発揮は分岐事象として取り扱うことができ、簡略化すればこれらは「成功/Yes」「失敗/No」の2分岐として捉えられる。

分岐事象の生起確率は設備毎に異なることが想定されるが、これまでは知見も限定されていることから実際に機能を期待できる確率を一律に捉える場合もある。この点についてはデータの蓄積によってパラメータを変更していくことが将来的には必要である。

また、道路管理者がトンネル内の火災を覚知するまでの時間は、非常用施設が設置されるほど、言い換えればトンネル等級が高いほど、一般的には早くなる確率が高くなると考えられる。また、トンネル利用者が避難開始するまでの時間は、自らが火災を覚知することに加え、非常用施設からの補助があると考えるのが妥当である。火災を覚知する方法は、直接的には火炎や火源、煙等を発見することに加え、間接的にはトンネル内の非常電話等に設置されている「赤色灯の点滅」によるものと想定することができるため、定量的に扱

うことを考慮して後者によって覚知するものと考えた。

モデル化3：④避難行動モデル

避難行動については、避難を行う環境を評価する指標を整理することが必要となる。道路トンネルの火災に対しては煙と熱、すなわち煙の濃度や温度分布を環境を評価する指標の対象にすることが考えられる。また、避難行動モデルにおいては避難速度を設定する必要もある。

現在、煙の濃度や温度分布については、火災規模、トンネルの断面積、トンネルの形状、縦断勾配、排煙設備の効果、消火設備の効果等によって状況が異なり、定性的に解を求めることは難しい。すなわち、火災シミュレーション等を実施しても、あるトンネルのある1つの現象の解は求めることが可能ではあるものの、リスクとして評価を行うためには、煙と温度の影響を一般化して扱うことができるモデルの構築が必要となる。また、避難速度に関しても、非常用施設の効果が避難速度に影響を及ぼす要因として、誘導表示板の存在等が考えられ、それらの効果も加味するのが望ましい。加えて、実際の避難行動は速度が低下しても実際には避難が継続出来ると想定され、煙濃度と避難速度の関係についても整理が必要となる。

さらに利用者の避難行動モデルとして煙の濃度による避難速度の加減速や、煙の影響を受けて避難方向の転進等考えられるが、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

モデル化3：⑤煙挙動モデル

トンネル火災時の煙の挙動は、以下に示す要因により影響を受けるとされている。

- ・火災規模…発熱量と発煙量に関係
- ・火災進展状況…発熱速度と発煙速度に関係
- ・トンネル内風速…煙の挙動に関係
- ・トンネル縦断勾配…煙の遡上等に関係
- ・トンネル断面形状…煙溜りや壁面への吸熱に関係
- ・停止車両…断面の阻害により煙の挙動に関係

これらの影響を定量的に把握し、煙の挙動を算定することは困難であることから、例えば過去の火災実験のデータを基にしたモデル化等が考えられる。

3.2.3 リスク発現ケースの発生確率と影響度の算定(ステップ2)

前項で述べたモデルにより、事象の発生確率 P_i と影

響度 C_i を算定する。以下にその算定の考え方を示す。

[1] トンネル内火災事象の発生確率 P_i の算出

各事象における生起確率は、イベントツリー形式によって、トンネル火災事故の事象変化の順を追って、各非常用施設の効果発揮の有無による分岐を行うことにより算出することができる。イベントツリーの分岐確率については、前項で述べた「①火災事故の発生確率」と「③避難開始時間の生起度合い」を用いて式(1)のように示すことができる。

事象の発生確率 P_i

$$= \text{「①火災事故の発生確率」} \times \text{「③避難開始時間の生起度合い」}$$

$$= (\text{交通事故発生確率} \times \text{火災規模確率})$$

$$\times \text{非常用施設の効果発揮の有無} \quad \dots (1)$$

ここで、非常用施設の効果発揮の有無は非常用施設の種類の数に起因することから、設置されている施設の種類数を n とした場合、最終項は 2^n のケースが想定されることになる。

なお、火災の発生地点と人の位置関係（相対的位置関係）によって、この生起確率は変化することから、非常用施設効果発揮の有無と相対的位置関係を組み合わせると、発生確率 P_i は式(2)のように示すことができる。

Σ (各事象の発生確率 P_i)

$$= \text{交通事故発生確率} \times \text{火災規模確率}$$

$$\times \Sigma (\text{非常用施設効果発揮有無}) \quad \dots (2)$$

[2] トンネル内火災事象の影響度 C_i の算出

前項で述べた、「②避難開始時間の算定」を背景に、「④避難行動モデル」と「⑤煙挙動モデル」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、それを影響度 C_i として算出することができる。このような仮定に基づいた場合、 C_i の単位は「人」となる。

ここで、実際のモデルの例を図-2に示す。モデルとした例は延長が2100mのトンネルでその中央部で火災が発生したと仮定し、火災の覚知が1分後、避難開始が4分30秒後と想定している。また、火災の発生地点に避難連絡坑があると仮定しており、この避難連絡坑は使用できないため、その近傍に存在する利用者はそこから坑口に最も近い避難連絡坑へ向かって避難を開

始したという前提である。④で示した避難行動に関しては、当該避難区間で最終避難者の行動ラインを図-2に示す青線のように図上で表し、避難距離と時間を可視化することができる。

また、⑤で示した煙の挙動に関しては、ある火災が発生した場合に避難行動を阻害する高さまで煙が降下した範囲と時間を整理し、図-2の赤斜線部にその部分を示すことができる。図-2より煙は火点から熱エネルギーにより拡散していくが、実際の煙の挙動は特に火災の初期段階では天井部で成層状態を保持し、拡散することが多いと考えられることを考慮している。しかし、火災の発生からある一定の時間経過後は、煙の層厚が増し、熱エネルギーがトンネル壁面に吸熱され温度低下を伴う地点から、壁面から避難を阻害する高さまで煙が降下し、徐々にこの範囲が広がっていくと言われていることから、この赤斜線部の範囲においては避難困難な範囲として定義した。なお、図-2の例では最終避難者は煙の降下範囲には入らず、トンネル利用者全員の避難が完了できるモデルの例を示していることになる。

なお、火災の温度モデルとして既存のデータ等をもとに、トンネルの設備等が影響を受ける範囲をある区間長で設定することもできる。ただし、火災規模（発熱量）と換気状態（縦流風速）により状況が大きく異なることから、当該モデルに対する種々のデータが必要となり、この点は今後の課題である。

上述の仮定のもとで C_i を以下の手順で算出する。

- ① 避難行動と煙の挙動のそれぞれのモデルを図上に表記し、最終避難者に対して、避難完了ができるラインを追記
- ② 避難完了ができるライン、すなわち最終避難

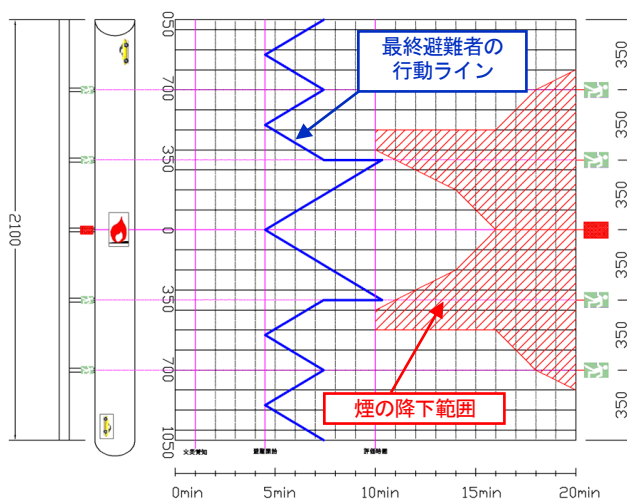


図-2 影響度 C_i の算出の考え方

者の行動ライン外の範囲に存在した避難者が、当該ケースでの避難困難者と認定

- ③ 対象範囲に存在する人数，すなわち影響度 C_i を式(3)にて算出

$$\begin{aligned} \text{影響度 } C_i(\text{人}) \\ = \text{交通密度 (台/km)} \times \text{平均乗車率 (人/台)} \times \\ \text{影響範囲 (km)} \quad \dots(3) \end{aligned}$$

以上の検討より，事象の発生確率 P_i は火災事故の発生確率と避難開始時間の生起度合により決定され， C_i は避難開始時間と避難行動と煙の挙動によって決定される値となる．簡略化のために事故の発生確率を変数として捉えない場合は， P_i は避難開始時間の生起度合，すなわち，非常用施設の効果発揮の場合分けによってのみ事象の発生確率が算出される．また， C_i は避難開始時間をベースとすることから，変数は避難行動モデルと煙挙動モデルによってのみ決定されることになる．このようにして，ある条件に対して C_i が決まり，さらに P_i が求まり一対一の関係が得られることになる．

3.2.4 避難者に対するトンネルの安全度評価値の算出(ステップ3)

安全度評価値を算出するにあたっては，ある条件を与えた場合におけるリスクカーブ及びリスク値の算出方法について定義を行い，その値を算定することになる．ここではその考え方の一例を示す．

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ケンス 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(4)で表現されると考えられる．

$$R = \sum_{i=1}^n f(P_i, C_i) \quad \dots(4)$$

図-3に P_i と C_i の算定例，および確率密度関数を対数曲線で近似した例としたリスクカーブを示す．各事象に対して， P_i と C_i が算定されるが，実際のトンネルの安全度を定義する必要がある．すなわち， P_i と C_i による近似曲線が得ることができれば，この曲線と x 軸と y 軸で囲まれる部分が広義のリスク値，すなわ

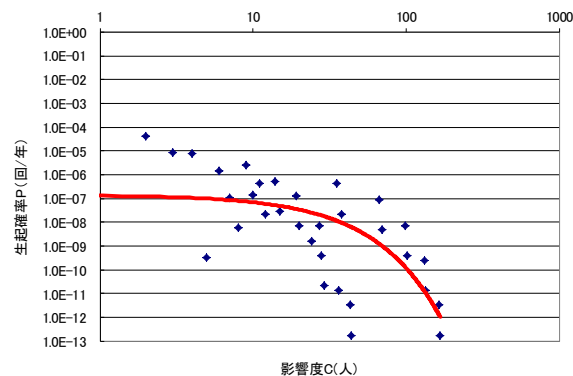


図-3 P_i と C_i の算出例

ち安全度評価値と捉えることが可能となる．

3.2.5 ケーススタディの考え方

前述までのモデル構築において，各非常用施設が発揮する機能・効果について，その効果(時間・確率)の初期条件を変動させることにより，非常用施設全体が発揮する安全度にどの程度影響を及ぼすかを検討するケーススタディを行うことができる．

例えば，非常電話と押しボタンの関係に着目し，各々の設置間隔や生起確率，事象の発生待ち時間等がどのような相乗効果を発揮するか，分解して検討することにより，その施設を設置すること等の優先度を定量的に比較を行うことができる．また，その他の検知を行う設備やトンネル内へ警報を行う設備に対して，「成功/Yes」「失敗/No」の2分岐の確率を変動させた場合に，それら各施設の安全に及ぼす影響度を検証することができる．このような手法によって，トンネル等級によらず，施設設置の程度によってトンネルの安全度を示すリスク値を算定することが可能となる．

4. おわりに

本研究では，トンネルの火災をリスク発現のシナリオと位置づけ，シナリオの事象発生時におけるリスクを算出するための解析手法の検討を行った．

その結果，非常用施設の効果の発現を念頭に置くことによってトンネル固有がもつ安全度の評価を行う手法の考え方を示し，相対的に非常用施設の増強の効果や，現在のあるトンネルがどの程度の安全度を有するかを判断を行える考え方を導出することができた．

しかしながら，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ともに，非常用施設の機能発揮以外に生起確率等を検討できる他の指標があるかどうかについての検討もさらに必要である．また，今回の考え方は特定のトンネル対トンネルの相対評価に向いている，

トンネルの安全度評価のためのリスクアセスメントに関する研究

すなわち改築の優先度を論じることに對しては比較的適していると考えられるが、代替手段の検討や新技術の適用性等への可能性の検討等に使用することには課題も多い。また、リスク値の算定についても、検討の余地が残る。

今後は上述の課題の解決を図り、手法の精度の向上を図り、安全度の向上に對する判断材料の提供を行う必要がある。

RESEARCH ON THE RISK ASSESSMENT FOR ROAD TUNNEL SAFETY

Abstract : In order to ensure the tunnel safety, emergency facilities in tunnel are installed on the basis of the technical standard for emergency facilities in tunnel. Some fire accidents occurred in some countries, the improvement of facilities has been discussed recently. However, the number of tunnels in Japan is huge, so the method to judge the priority of refurbishment or improvement of tunnel should be established. The method to calculate the risk and survey the scenario during emergency were discussed in this paper and certain possibility was found to establish the quantitative method to evaluate the risk for safety in road tunnel.

Key words : tunnel, safety, fire, emergency facilities, risk assessment