

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一考察

CONSIDERATION ON THE RISK ASSESSMENT FOR ROAD TUNNEL SAFETY

砂金 伸治^{1*}・角湯 克典²・真下 英人¹

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 : road tunnel, safety degree, fire, emergency facilities, risk assessment

1. はじめに

我が国の道路トンネルにおける安全対策は，過去の火災事故の経験を踏まえて制定された基準¹⁾に基づいて行われてきている．欧州ではトンネル火災に関する知見をもとに防災に関する新しい基準(欧州指令)²⁾等を策定し，定められた規格の道路に存在するトンネルに対して基準が適用され，安全対策が講じられている．その中では，道路トンネルに対してある水準の安全を確保させるために，追加の安全対策および設備の強化等が必要であるかどうかを明らかにすることを目的にリスクアナリシスを実施することを義務づけている．一方，我が国ではリスクアナリシスに関する知見が限られていると考えられ，これまで道路トンネルの安全度の検討に対してリスクアナリシスが採用されていないのが実態である．

本稿では，道路トンネルの安全度を評価する手法としてリスクアセスメントによる考え方に着目し，道路トンネル内で発生する火災をリスク事象として捉え，その事象が発生するシナリオを想定し，その場合におけるリスク値を算出するための検討手法について基礎的な考察を行った．また，トンネル内に設置されている非常用施設の規模によって，そのリスク値がどのように変動するかを算定する際のケーススタディを行う場合の考え方について検討を行った内容について報告する．

2. 研究方法

(1) 安全度評価のための解析手法の概要

ここではリスクアセスメントによる考え方に基づいたトンネルの安全度を評価する手法として，トンネル火災をリスク事象と考えた場合のリスク値を算出するための解析手法の考え方について述べる．

図-1にリスク値を算定するための解析の流れの例を示す．この中で解析手法としては大別して3つのステップから構成されるものとする．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リスク事象の発生確率 P_i とリスク事象の発生に伴う影響度 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というものである．以下に各ステップ毎の考え方を示す．

(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でリスク事象が発現するケースの発生確率と影響度の算定を行う

キーワード：道路トンネル，安全度，火災，非常用施設，リスクアセスメント

¹正会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8616 茨城県つくば市南原 1-6），E-mail:n-isago@pwri.go.jp

²非会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8616 茨城県つくば市南原 1-6）

ための基礎となるモデルを設定するが、リスク事象が発現する場合に影響を及ぼす要因に対するモデル化が必要であり、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たと考えた。すなわち、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の設定」より構成されたと考えた。また、モデル化2については、さらに2つの構成成分があり、非常用施設の有無による効果の算定に対して、②避難開始時間の設定と、非常用施設の有無によって避難開始が誘起されると仮定することに基づく③避難開始の生起度合いの算定によるものから構成されたと考えた。またモデル化3についても2つの構成成分に分け、トンネル内の状況を再現する設定として④避難行動モデルと⑤煙挙動モデルによるものから構成されたと考えた。これらに関する考え方を以下に述べる。

a) モデル化1：①火災事故の発生確率の算定

トンネル内で生じるリスク事象にはさまざまなものがあると考えられるが、本稿ではリスク事象をトンネル内で発生する火災による影響と捉えたことから、起回事象については当然のことながらトンネル火災事故の発生と定義される。この場合の発生確率については、本稿では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。ここで、交通事故の発生確率とは、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することができる。当然のことながら、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。

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1つの方法として考えられる。

b) モデル化2：②避難開始時間の設定

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、それに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を行うことにより設定する必要がある。

c) モデル化2：③避難開始の生起度合いの算定

算定する避難開始の生起度合いとは、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

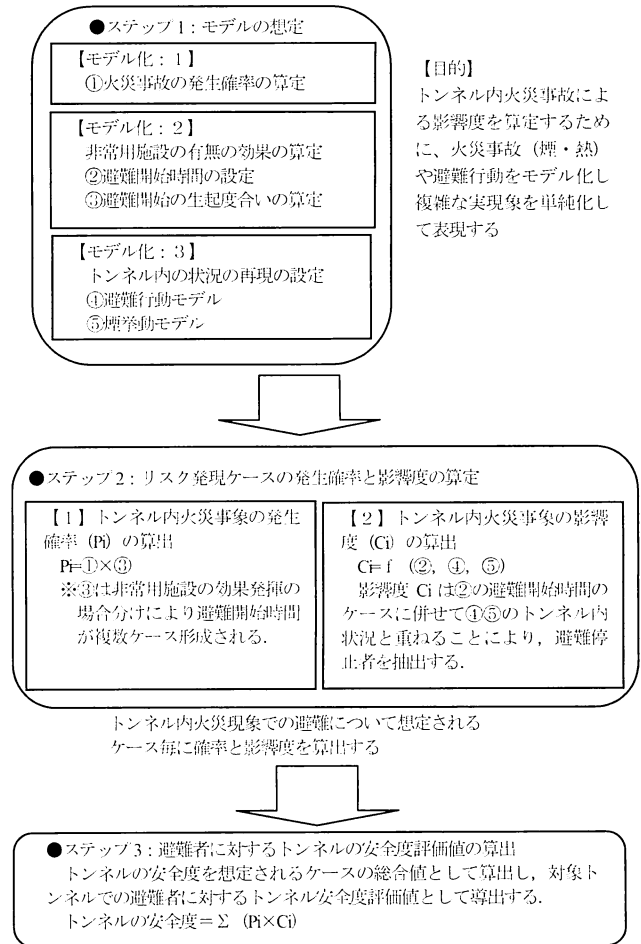


図-1 安全度評価のための解析の流れの例

想定したものであり、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、

1) 通報設備の効果発揮までの時間

$$= \text{機器の設置間隔} \div \text{歩行速度}$$

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、通報設備まで移動し、通報を行うことによって、その他のトンネル滞在者がその通報による情報をもとに火災を覚知し、それにより時間が短縮されるという考えである。機器の設置間隔は火災事故発生地点にいる人からの距離にのみに依存し、それはパラメトリックに設定して検討することを想定したため、実際に効果が発揮される通報設備の種別は問われないことを仮定している。また、図-1にも示すように時間短縮のためのモデル(③)と避難行動(④)は互いに独立したものと仮定した。また、

2) 検知設備の効果発揮までの時間

$$= \text{火災検知器による検知時間}$$

といった考えをとることもできる。

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方法が考えられる。ここで「失敗」には何らかの理由で火災が覚知できなかったという内容も含むことになる。以上の観点から施設の効果の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具体的設備毎に異なることが想定されるが、これまでの知見が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ざるを得ないと考えられる。この点については、データの蓄積や分析等を踏まえて、確率等を適宜変更していくことが将来的に必要なのである。

また、トンネルの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、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、これまでに述べたように非常用施設からの補助があると考ええるということに加え、自らが火災を覚知することもあると考えるのが妥当である。火災を覚知する方法は、直接的には火災や火源、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。本研究ではモデルの性質からなるべく定量的に扱うことが望ましいと考え、後者のみによって覚知するものと考えた。

d) モデル化3：④避難行動モデル

避難行動については、まず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が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、定性的な解を求めることは難しい。言い換えれば、火災シミュレーション等を実施しても、あるトンネルにおけるある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、煙の影響による避難方向の転進等考えられる。このようにパラメータとして考慮すべき事

象は多岐にわたると考えられるが、本研究においては、以下に示すような考え方で避難行動を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)煙濃度がある値に達した場合は避難速度が0m/s

e) 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…煙の挙動に関係

・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) 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、リスク事象の発生確率 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。

a) リスク事象の発生確率 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。なお、本来は①には種々のリスク事象が含まれることになるが、本研究では火災の発生のみを前提としたことから発生確率は火災事故に起因するものと考えている。

リスク事象の発生確率 P_i

= 「①火災事故の発生確率」 × 「③避難開始の生起度合い」

= (交通事故発生確率 × 火災規模確率)

× Σ (非常用施設の効果発揮の有無) …(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、ある P_i に対する最終項は 2^n のケースが想定され、それぞれに確率が存在し、その総和が P_i となる。

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と考えるのが妥当である。ただし、本研究では事象を簡略化して検討す

るためにPiと後述するCiの算定は図-1に示した流れに従って算定しており、それぞれを独立に取り扱っている。これらの指標が従属関係として考えられることに対する検討も今後の課題の1つである。

b) リスク事象の影響度Ci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Ci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、Ciの単位は「人」となる。

ここで、図-2に影響度を算定する際に用いた検討モデルの例を示す。これは延長が2100m、避難連絡坑の間隔が350mのトンネルでその中央部で火災が発生し、火災の覚知が1分後、避難開始が4分30秒後と仮定したものである。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もっと近い避難連絡坑へ向かって避難を開始するという仮定である。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に煙が降下し、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、この斜線部の範囲に避難者が存在する場合には避難困難に該当すると定義した。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で、影響範囲が0となる、すなわち、影響度Ci=0の例を示している。

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、この点は現段階では考慮しておらず、今後の課題の1つである。

上述の仮定のもとであればCiの算出手順は以下に示すとおりになる。

1) 避難行動と煙の挙動のそれぞれのモデルを図上に

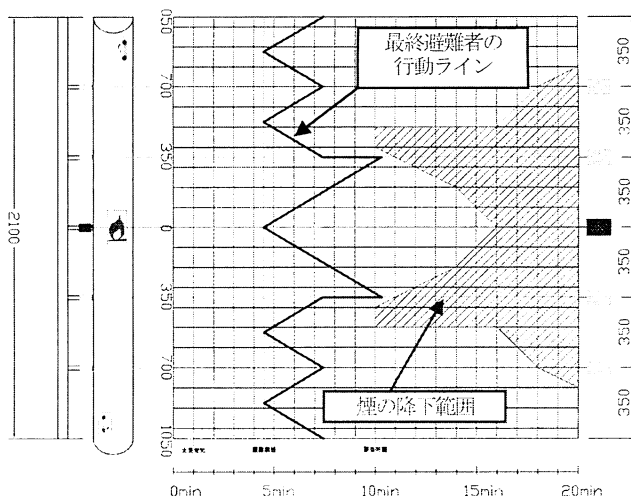


図-2 影響度 Ci の算出の考え方

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、すなわち最終避難者の行動ラインと煙の降下範囲に囲まれる部分に存在した避難者が、当該ケースでの避難困難者になると考え、その部分が影響範囲と認定
- 3) 影響範囲に存在する人数、すなわち影響度Ciを式(2)にて算出

影響度Ci(人)

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

式(2)の意味するところは、利用者がトンネルの特定の箇所に存在することを考慮してモデル化を行うことは煩雑であると考えたものである。すなわち、利用者はトンネル内に均一に存在することを仮定し、最終避難者が影響範囲に存在することになるかどうかを求め、その避難者に関しては式(2)に示す形で避難者数自体を確率的な事象として表現しているとも言い換えられる。

以上の検討より、事象の発生確率Piは火災事故の発生確率と避難開始時間の生起度合いにより決定され、Ci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においては、Piは避難開始時間の生起度合い、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、Ci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Ciが決まり、さらにPiが求まり一対一の関係が得られることになる。なお、上述したがPiとCiは本来は従属する関係にある側面も持つと考えられることから、この点における検討も今後の課題の1つである。

(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およ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考えられる。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。

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

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軸で囲まれる部分を広義のリスク値と捉えられる可能性がある。

3. 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、その効果が発揮される時間や確率などの初期条件を変動させることにより、非常用施設全体が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式通報装置の関係に着

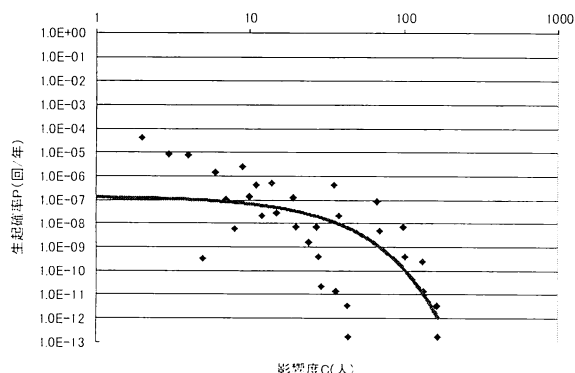


図-3 P_i と C_i の算出例

目し、それぞれの設置間隔や事象の生起確率、事象の発生待ち時間等がどのような効果を発揮するか、パラメトリックに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と考えられる。また、それ以外の火災を検知する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、施設の設置の規模によってトンネルの安全度を示すリスク値を算定できる可能性がある。

4. おわりに

本研究では、トンネル内で発生する火災をリスク事象として捉え、リスク発現のシナリオを想定し、そのシナリオの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基礎的な検討を試みた。具体的には、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、その結果、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の判断を行える考え方を導出できる可能性があることが分かった。

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、非常用施設の機能の発揮に加え、シナリオ内で想定した種々の事象の生起確率等を検討可能な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、すなわち改築の優先度を論じることに対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、それぞれの手段毎の相対的な重みを検討する必要もあり課題も多い。また、リスク値の算定についても、検討の余地が大いに残る。

今後は上述の課題の解決を図り、手法の精度の向上を図るとともに、広範なリスク事象を捉えることを可能とし、安全度の向上に対する判断材料の提供を行うべく研究を進めてまいりたい。

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10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