

招待論文（和訳）**トンネルの設計および供用におけるリスクベースのアプローチ**

RISK BASED METHODS IN TUNNEL DESIGN AND OPERATION

ポール スコット*Paul SCOTT*BSc, MIFireE, MinstMan, Ove Arup & Partners, Risk & Fire Engineering
13 Fitzroy Street, London, W1P 6BQ, UK**Key Words:** *tunnel design and operation, accidents, fire, safety provisions, risk assessment*

多数の人命が奪われた近年の悲惨な事故によって、道路および鉄道トンネルを利用した旅行の安全に人々の注目が集まっている。多くの人がトンネルの安全性の基本は防災システムによる対策だと考えているが、トンネル内走行に関する事実や問題点を調査した結果、問題点および解決法は基本的な土木工学設計に関係していることが明らかになっている。トンネル利用者に十分な水準の安全性を提供するためには、トンネルの設計および運営の簡易化への要件と、設計に非常に重大な影響を及ぼす可能性がある避難通路や換気設備といった安全システムの規定に対する要件とのバランスを図ることが必要である。これらのシステムは費用がかさむため、トンネル延長や交通機関の種類、および事故原因の種類によっては、常に適切に利用できるとは限らない。トンネルの安全設計を合理的なものにするために、リスク評価手法が使用されることが増えている。本論文では、リスク評価型の設計手法に関する問題点を記述し、トンネル本体およびトンネル全体の土木・機械設備設計に影響を与える主要因のいくつかについて述べる。特に、最近の事業を例に取り、鉄道トンネルにおける単設トンネルと双設トンネルの選択、避難方法、設計火災 (design fire)、および換気に注目した。

1. はじめに**(1) トンネルにおける死亡リスク**

人口密集地域における新たな鉄道への需要の高まりは、環境的な制約とも相まって、道路および鉄道を地下へと追いやる結果となっている。一般に、交通機関の経路に含まれるトンネルの割合が増加するほど、トンネル利用者の危険は増大する。これは、下記の事項の困難さが原因で、事故の影響が大きくなるためである。

● トンネル利用者

- 近辺で発生した事故によって自らが危険にさらされているという危機感を持つこと

- 避難のために自動車を放棄することへの心理的抵抗

● トンネル管理者

- 遠隔地で発生した事故の評価および制御

- 情報の不足する中でのアクティブな安全システムの正確な設定

● 緊急活動

- 事故の発生したトンネルへの進入路の確保

- 限定された時間内に効果的な緊急活動を段取りすること

さらに、トンネルの長大化に伴って車両がトンネル内を走行する時間が長くなつたことと関連して、事故の発生頻度が増大する結果となっている。このような

トンネル環境のために、一つの事故によって複数の犠牲者が発生するばかりでなく、トンネル自体の構造も深刻な損傷を受ける可能性が高くなっている。すなわち、トンネル走行を伴う交通経路の多くが、社会的リスクの増大と直接結びついている。個々の死亡事故のリスクは許容範囲内に収まるものの、社会的・経済的风险は、受け入れがたいものと判断されると考えられる。トンネルではこのようにリスクが増加するため、通常の道路や固定軌道よりも高い水準で環境が管理されており、対向車線は分離され、天候不良による影響も受けず、より高い次元の監視、通信、および安全システムが使用されている。

しかしながら、トンネルのリスクに対する認識が深まり、事故の影響の制御および軽減のための技術が適用されているにもかかわらず、過去10年間に数件の重大なトンネル事故が発生している（表-1参照）。これらの事故は主に、大規模建造物や土木構造物に対しては厳格な基準が広く施行されている欧州で発生している。しかも、すべてのトンネルは、事故が発生した国の安全衛生に関する法律の下で、正式に供用されていた。

近年の事故から得られたもっとも明らかな教訓は、トンネル利用者の危機感の欠如および複雑な安全システムの運用の混乱によって、被害を最小限に抑えることができる事故だったにもかかわらず、多数の死者を

表-1 近年のトンネル事故

事故名	結 果	概 要
バクー (地下鉄火災)	289 人死亡 (列車内で 249 人、トンネル内で 40 人)	運転士は列車に火災が発生したままトンネルに進入し、点検のために停車した後、立ち去った。乗客がトンネル内を避難しているときに換気設備が逆転し、多くの乗客が煙に巻かれた。
ユーロトンネル (LGV シャトル)	死者・重傷者なし。 煙を吸入した人あり。 トンネルは 3 か月間閉鎖され、 資本費用および収入の損失は 2,000 万ポンド以上	30 分の間、換気設備が正常に作動しなかった。システムの正常な作動には、管理者による 28 種類の異なるキーの入力が必要とされていた。
スイスメトロ	乗客の一部が煙を吸入	高い位置にある避難経路が煙の層に包まれたため、乗客はトラックベッドに降りて避難した。
モンブラン (大型貨物自動車事故)	43 人死亡 トンネルは 1 年間閉鎖。 周辺地域に甚大な経済的損失	管理者によるシステム設定の誤り。33 人が自動車内で、6 人がトンネル内で、2 人が避難所で死亡。フランス消防隊は煙の中、6km の前進を試みた。火災の推定規模は 75-100MW
タウエルン (大型貨物自動車事故)	12 人死亡 トンネルは数か月間閉鎖	トンネル内仮設信号の故障。はじめ、深刻な火災には見えなかつたため人々は避難を開始せず、また、管理者も避難を促す行動をとらなかつた。最終的には、火災は道路のアスファルトにまで広がつた。
カプラン	189 人死亡	不良品のファンによって油圧用の油が発火し、ヒーターから火災発生。これによって急こう配のトンネル内で列車が停止。乗客は上方に避難しようとして非常に毒性の強い煙に巻かれた。

出すことになってしまったことである^{(6),(7),(8)}。

“十分かつ簡易な”緊急対応を可能にするトンネル設計は、“最先端の複雑な”システムや手順を必要とする設計よりも優れているのではないかという意見はもっと議論されてよい。

(2) 一般的な認識

近年のトンネル事故および、安全への支出に関する政治的判断を受けて、リスクならびに安全に関する課題が広く一般に認識されるようになり、リスクの許容度および安全基準に関する政治的・社会的な性質が注目を浴びることとなった。多くの大規模システム（長大トンネル、空港施設、鉄道基盤施設など）に対して、概して信頼性の欠如がみられる。すなわち、人々は従来の構造物よりも危険度の高い環境であると認識している。この状況は、回避し得た事故が大きく取り上げられたことに起因していると考えられる。

大規模な工場および交通施設が人々にもたらすリスクは実際のところきわめて低く、一般的には、すでに存在して社会に受け入れられているバックグラウンド値よりも低い水準である。たとえば、鉄道トンネルの安全設計は主に火災事故を想定して立案されることが多いが、実際のところ火災による個人に対するリスクは、ほかの種類の事故の場合よりもはるかに低いと考

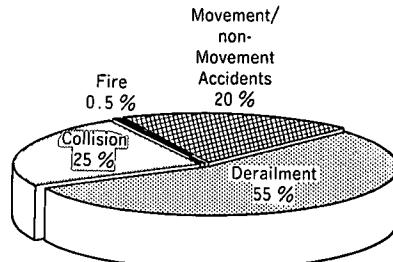


図-1 高速鉄道コミューターにおける個別リスク

えられる（図-1 参照）。

現在、一般的な認識をリスクの客観的な予測と一致させることは、技術者および発注者の間で、非常に重要な問題としてとらえられている。しかしながら、個人的なリスクと社会的なリスクの境界ならびにその許容範囲は、社会もしくは政治が判断する問題であり、また、個々のシステムや場所によって異なるものである。

近年の鉄道事故を受けて、英国では鉄道システムの供用および、巨額（以前は高価すぎるとされていた）の費用を必要とする先端信号システムの利点に関する、公開討論が多数行われている。一方、発展途上国では、基盤施設の利用者が経済的利益を得る可能性

が、人々が軽微なリスクを負うことよりもはるかに優先されるため、リスクに対する取組みは非常に多様である。

(3) 法的機関による対応

政府はこれまで、トンネル設計を規制する施行基準を増加させるという対応をとってきた。多くの場合、トンネルをグループに分類し、各分類ごとに安全システムを規定している^{2),3),4)}。施行基準の策定を通じて、トンネル設計者は正しい安全設計の実施指針を規定し、その社会で受け入れられると考えられる安全性の水準を明らかにすることができるため、はかり知れないとほど貴重な経験を得ることができる。

しかしながら、設計の目的は結局のところ、トンネルの耐用年数（安全に関する法律を含めた法的な耐用年数）にわたってシステムが正常に作動し続けることにある。日本では、道路トンネルは走行台キロの総計予測および事故のリスクにもとづいて、AA, A, B, C, D の 5 段階⁵⁾に分類されている。各分類において、安全設備に関する要求事項の基準が定められている（表-3 参照）。

欧州では、交通機関の種類に関わらず、1 km の閾値がよく使われている⁶⁾。トンネル延長が 1 km を超えると明らかにリスクが増加するという証拠はないため、この閾値の利用は完全に恣意的なものと考えられる。すなわち、各国で便利な長さの単位だから採用されているということである。この基準を慣習的に使用していると、安全性の判断基準が明らかに不十分なものになるか、もしくは対象となるトンネルとは著しくかけ離れたものになる恐れがある。

(4) 基準に基づく設計手法の欠点

静的で慣例的な基準に基づく設計解決法を作成することと、耐用年数を通してトンネルシステムを安全に供用することとの間には、深刻なずれが生じる可能性がある。これは、下記の理由によって交通量およびトンネルの利用形態が変化するためである。

- a) トンネルを利用する交通機関の種類を区別していない。
- b) 安全上の問題に関する理解（および包括的な分析）の欠如
- c) 安全設計の閾値が、危険要因と具体的なトンネル幾何構造との関係についての理解よりも恣意的な長さの単位を基準としている。
- d) トンネル運用者が、トンネルのリスクの性質は変化するものだということを理解することに寄与しない慣例的な基準の使用
- e) 規定された安全対策を達成するための費用が膨大

なため、社会に対して明らかな便益をもたらす事業を推進できない。

近年の大規模トンネル事故から得られた教訓に戻ると、ここで認識された問題点は、革新的な構造物に対しては総じて慣例的な基準が適用されなかつたという問題を反映している。このため、大規模トンネルの設計および供用に際しては、正式なリスク評価技術の適用が重要であるという認識が次第に広まってきている^{4),7)}。

2. トンネル設計に適用されるリスク評価

(1) 安全基準および受容基準

“安全の絶対水準”は実在しないことは広く同意されている。システムの供用に際しての安全性は“容認できないリスクから免れること”と定義されることが多い。このため、システムの供用の基本原則の一つとして、ある程度のリスクを受け入れることが必要となる。交通トンネルには、この原則が適用されている。一般的な原則として、“リスクを伴う習慣および活動については、社会に実質的な便益をもたらさない限り採用しない”と規定することができる。この原則に従うことで、異なる場所においても、経済・社会的影響という観点から実質的な便益という概念を判断することができる¹⁾。

交通トンネルの場合、安全に関する実質的な目標を“トンネル内は、その交通機関のほかの区間よりも危険であってはならない”と規定することができる。トンネル管理者は、交通において根柢的に付随する危険性を低下させることはできず、トンネルの利用に伴う危険の増加を低減させることだけができる⁹⁾。

システムの供用に伴うリスクは、主に下記の基準に従って評価する。

- a) 想定されるリスクがあまりにも大きいか、または結果が容認できないものであるため、完全に否定しなければならない。
- b) 想定されるリスクおよび現在までの実績が非常に小さいため、これ以上の対策は必要ないと考えられる。
- c) リスクの程度が上記 a) と b) の間の場合、今までにそのリスクが実行可能な最低水準「合理的で実行可能な限りの低さ：ALARP (As Low As Reasonably Practicable)」と定義されることが多い] にまで低減されているか。このとき、そのリスクを受け入れる結果として得られる便益を考慮に入れ、さらにリスクを低減させるための費用を計算に入れておく。

表-2 5か国の交通事故統計の比較（1999年OECD）

合 計	人口10万人あたりの死者者数				事故傷害者数		10億台キロあたりの死者者数			
	年 齡				人口10万人あたり	100万台キロあたり	全ての道路	都市圏外の道路	高速道路	
	0-14才	15-24才	25-64才	65才以上						
ドイツ	9.5	2.4	23.0	8.5	10.6	482	0.62	12.2	-	4.5
アイルランド	11.0	2.8	17.8	10.2	17.1	209	0.25 ^c	13.1 ^c	10.8 ^c	7.4 ^d
日本	8.2	1.5	11.0	6.4	17.7	671	1.11	13.6	-	3.9
英 国	6.0	1.9	11.3	5.6	8.2	407	0.53 ^b	8.1 ^b	8.4 ^b	2.5 ^b
米 国	15.3	4.2	27.2	15.3	20.5	767	0.48	9.6	11.8	5.4

b) 1997, c) 1996, d) 1995

したがって、国際プロジェクトにおいて異なるシステムに使用された場合には、特定の安全設計理念よりも費用対効果を優先して、設計解決法が立案される。

例として、表-2に示した5か国の事故統計を比較検討する。“とうてい受け入れがたいリスク”の領域を定義するために、道路上での死亡者のデータを収集し、道路トンネル火災による死亡のリスクと比較するためのデータとして読み取った。これは、火災による死者数のある年にトンネル内を走行する自動車の台キロ数に対する、道路上での死亡者の発生可能性と比較するために行われた。

表-2に示したように、日本では1996年に、10億台キロあたり13.6人の死者が発生している。このデータは、国際道路交通事故データベース（International Road Traffic and Accident Database）から取得した。

米国道路交通安全委員会（the United States National Highway Transportation Safety Board）の独自の情報にもとづくデータでは、1999年の1億台マイル当たりの致死率は1.5であった。この値を日本のデータと同じ基準に直すと、10億台キロあたりの致死率は9.6となる。

あるプロジェクトにおけるリスクの指標がどこに置かれたかを示す要因がさまざまであることは明らかである。リスク指標の限界を提示するために、図-2はALARP領域を定義するリスク境界線が設定される範囲の幅を示している。日本の路上死亡率を基準として用いた場合、リスク境界線はほぼ“潜在的に望ましくないリスク”に引かれると考えられる。

近年実施されたある大規模トンネル事業では、1年間に一つのトンネル内を走行する交通量が2,600万台キロを少し上回る程度と予測されているが、これを日

本の同規模の道路トンネルにあてはめると、自動車事故による死者は1年当たり0.35人と推定できる。

表-2からは、日本の事故発生率はアイルランド、英國、および米国と同程度であることも読み取れる。道路トンネルの環境が高速道路と同等であると仮定した場合、この推定死傷率を年間事故死者数0.1人にまで低減できる。

日本人が許容する範囲はリスクがすでに年間ベースで許容している程度のリスクであるのは、妥当な出発点である。しかしながら、一般には複数死亡事故は嫌われる。このため、等価リスク線（isorisk line）を設定したり、たとえば複数死亡事故と単独死亡事故に対する一般的許容度が等価であると仮定することは、不適切である。したがって、限界許容線（possibly intolerable line）は、等価リスク線よりも急な傾きを持つことになる。

無視できる程度のリスクを示す基準線（fixed lines）は、英國のキャンベイ島工業団地（Canvey Island industrial complex）の、危険物輸送に関する報告書¹⁰⁾に示された見解に従って作成され、限界許容基準線よりも、およそ2桁低い重要度とされた。これらの線を図-2に示した。

道路交通のリスクに関する国内の経験を生かし、これを国際的な統計値と比較することによって、個人および社会に対するリスクの妥当な閾値を定めることができる。この閾値は、効果的で適切なリスク低減システムに関する意思決定に際して利用できる。

（2）リスク評価手法

リスク技術者がリスク分析を行う際には、表計算ソフトから特別なリスク評価ソフトまでさまざまなツールを利用できる。しかし、有効かつ完全な分析および

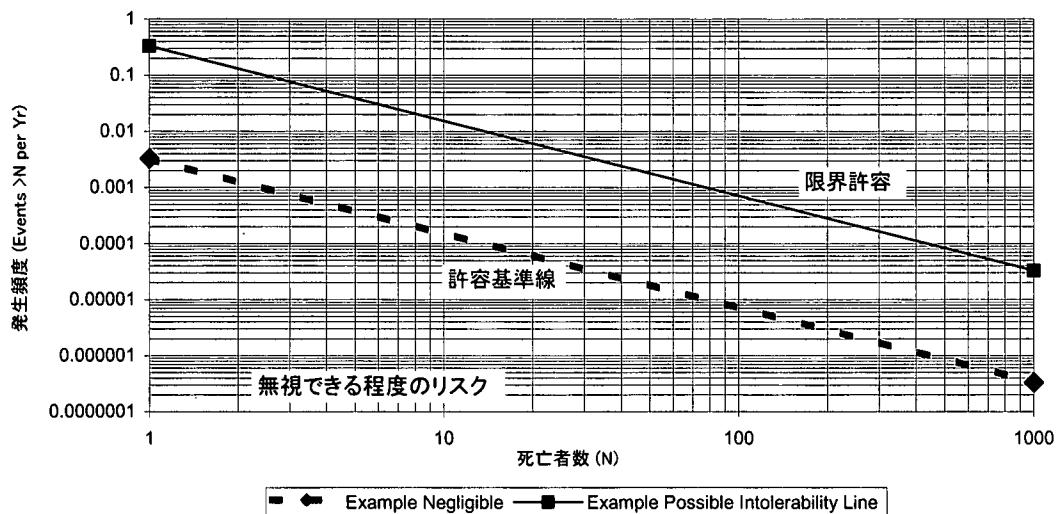


図-2 現在の道路システムにおける許容リスク

評価を行うためには、ふつう2段階の作業が必要となる。

● 定性的安全性評価

- 危険分析

- 事故シナリオの特定

- 設計概念の評価に際しての操作性の検討 (Operability studies)

- リスクの等級化

- 予防、制御、および低減の手法の明確化

● 定量的リスク評価

- 国内および過去のデータにもとづく、事故シナリオの頻度および影響の統計分析

- 計画されている安全対策およびその故障頻度を考慮に入れたフォルトツリー解析。これによって、トンネル内走行の台キロ当たりの事故発生率を計算する。

- 事故の発生頻度および年間レベルの個人的・社会的风险を総合的に考慮し、意思決定に寄与するためのイベントツリー解析

- 安全性の達成度を実証するための許容度基準との比較によるリスク予測の作成

上記に加えて、リスク評価を管理者ならびに利用者の需要および能力と関連づけるために、操作性の研究 (Operability Studies) が推奨された。トンネル利用者および管理者の安全はアクティブシステムに大きく依存しているため、システムの確実性に関する研究によって、信頼性、有効性、および維持管理能力が実証されなければならない。

(3) ディスアドバンテージ

しかしながら、これらの手法の適用には問題点もあ

る。ある特定の条件下においては統計データが得られ、計画されている設計との関連性も明確であるが、新しい技術およびシステムを使用している多くの大規模トンネルでは、実績がわずかであるか、あるいはまったくないため、故障の実績もない。したがって、新しい構造におけるリスクの定量分析における重要な部分（大抵はもっとも重要な部分）は、下記の手法に大きく依存している。

● 関連性を高めるように調整した一般的なデータの利用

● 専門家による判断

これは、リスク評価の予想に対する、強い不信感と信頼性の欠如を招く原因となりうる。そのうえ、多くの国の機関は、特に安全設計の費用効果分析、事故発生確率に関連する技術、死亡事故の観点からの費用（回避した死亡事故に関する値を入力）、および防災設備の選択といった確率論的分析を設計に適用することを否定的なあるいは疑いの目で見ている。

(4) リスク情報にもとづく設計の利点

多くの大規模トンネルにおいて、事業の実施可能性は財源確保、設計、施工、およびシステム供用に使用されている新たな手法あるいは概念に依存している⁸⁾。既存の慣例的な基準は、このような事業に対する適用可能性が限られていることが多い。特に、設計目的の達成を考慮すると慣例的な基準の受容是不可能となるか、もしくは新機軸の採用が困難になるほど制限的なものになる可能性がある⁹⁾。このような環境下では、リスク評価型の（もしくはリスク情報にもとづく）設計手法を用いることが不可欠である。

同時に、特に安全設計分野における土木設計の運用

表-3 日本の道路トンネルにおける緊急設備の基準

トンネルの分類・緊急設備		AA	A	B	C	D
通信・警報システム	緊急電話	○	○	○	○	
	緊急ボタン	○	○	○	○	
	火災検知器	○	・	▲		
	緊急警報システム	○	○	○	○	
	交通信号	・	・	・		
消火設備	消火器	○	○	○	・	
	泡消火器	○	○	・		
避難および安全設備	非常口	○	○			
	避難案内標識	○	○			
	排煙設備	・	・			
そのほかの設備	給水設備	○	○	・		
	スプリンクラー	○	▲			
	放熱ケーブル	○	○	・		
	放送設備	○	・	▲		
	スピーカーシステム	▲				
	ビデオモニターシステム	○	○	・		
	無停電電源装置(UPS)	○	○			
	電力システム(EPS)	○	○	・		
	救急車両進入口	・	・			

上の意味をより深く理解することが必要となる。多くのプロジェクトは国際的な事業であり、複数国の専門家や組織が従事するため、大規模トンネルプロジェクトにおけるリスク評価の利用が全体的に首尾一貫していれば、管理者および利用者に大きな便益がもたらされると考えられる²⁾。このような場合に、トンネル安全に対する社会・政治的姿勢をトンネル設計に反映できる手段として、リスクの定量的評価手法が有益かつ順応性のある手法であることが示してきた。

(5) リスク評価型設計手法の効果的な導入

リスク評価型設計手法の成功には、参加組織（法的機関を含む）の全面的な参加が必要であると説明してきた。トンネル管理者は法人として、安全方針および供用安全計画（Operational Safety Program）の策定に携わらなくてはならない。法的機関は定期的な協議過程の設立、使用される手法の明確化、および受容基準の決定に従事しなければならない。さらに、リスク評価型設計手法は可能な限り早期から、できればプロジェクト発足時から適用されなければならない。このような方針がないと、設計過程は事務手続き上で効果の少ない作業となり、最終的なトンネル利用者に対する貢献度は非常に低くなる。この手法を導入することによって、真に世界的な水準の安全性を提供するための効果的かつ綿密な手法が規定されること、ならびにこの安全技術および安全管理のための手法は、世

界中の多くの大規模施設管理者に受け入れられることが示されている。

3. トンネルの安全設計基準

通常、トンネルの安全性は下記の事項を組み合わせた対策が用いられる。

- 事故発生現場への車両の接近を阻止し、警報が発生時のトンネル内への進入を防ぐための交通制御設備
- 避難および消火活動のために煙のない経路を作るための排煙システム
- 明確な避難経路を設けるための避難設備
- 機能保全（business protection）および、消火活動中のトンネル構造物への損傷を防ぐための耐火基準
- 制御および通信の確保を可能にし、消火用機材を供給するための緊急活動用設備

上述したことは、大規模交通トンネルの基本的な構成要素として一般に受け入れられている。特定の安全上の問題を軽減するために、追加的な備え、もしくは上述したことの強化（たとえば、火災発見の基準や放水システム）が行われることもある。設備の水準およびシステムの信頼性の決定を支援するには、リスク評価法の使用が不可欠である。

日本で用いられている代表的なトンネル等級区分を表-3³⁾に示す。日本のシステムでは、特定機能につい

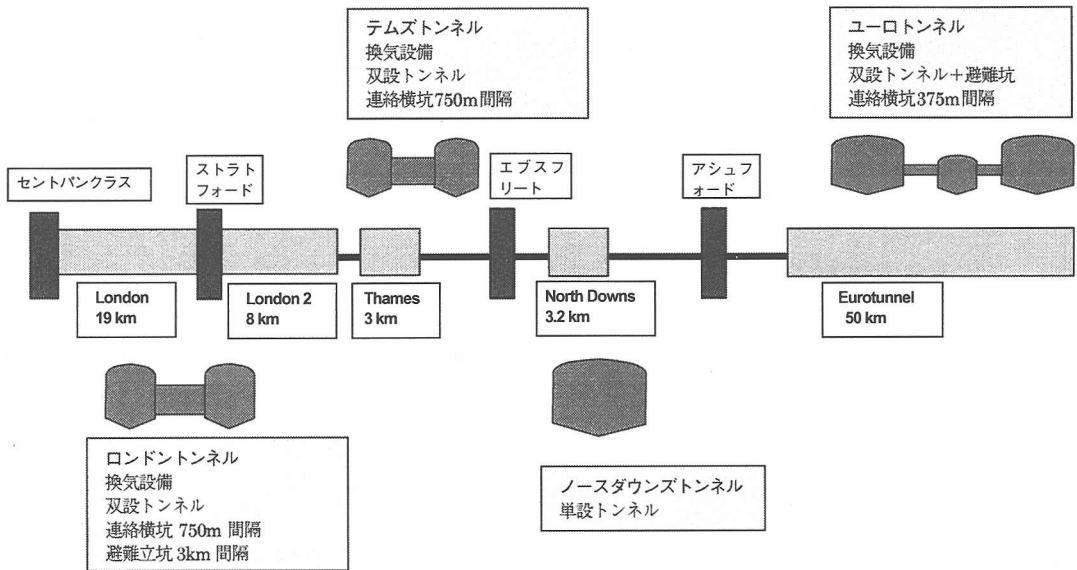


図-3 チャンネルトンネル・レイルリンク：トンネル設計

ての考慮が要求または推奨される。使用するシステムおよびその仕様の選択に際しては、定量的リスク分析および費用効果分析を役立てることができる。

これらの基準の選択および指定に関して設計者および管理者が関与する主要な問題点には、下記のようなものがある。

- 鉄道トンネルにおける単設トンネルと双設トンネルの選択
- 避難方法の規定
- 火災の規模
- 排煙

これらの問題点について、現在進行中のプロジェクトを例として下記で説明する。

4. 単設トンネルと双設トンネル

(1) 設計基準の策定

現在、大規模な道路・鉄道事業の設計基準では、必ず双設トンネルを使用することが求められるようになってきている³⁾。これは、事故の発生していない方のトンネル（換気設備が作動している）を利用した避難を可能にするためである。双設トンネルにはほかにも、整備性や供用の柔軟性などにおいて多くの利点がある。しかしながら、ある特定条件下においては、環境および予算の関係から、単設トンネルが妥当とされることもある。たとえば、単設トンネルで複線の鉄道トンネルは妥当とされるであろうか。

(2) 大規模プロジェクトの例

火災の危険性の面からは、単設トンネルでは径が大きくなるため煙の層がより高く位置し¹¹⁾、換気設備がない場合でさえも避難可能な状況がより長く続くと考えられるため、火災発生時の乗客の安全に関しては有益である。また、火災拡大は径の小さい双設トンネルよりもゆっくりになる傾向がある^{12),13),14)}。

チャンネルトンネル・レイルリンク (CTRL) プロジェクトでは、原生林を保護するために、ノースダウンズから 3 km のトンネルが計画された。双設トンネルは環境に対して取返しのつかない影響を与えると考えられたため、環境を保全するトンネル設計がおこなわれた。そのうえ、トンネルの換気施設あるいは避難立坑設備を、環境保護地域内の地表に設置することは受け入れられなかった。こうして単設トンネルの構想が計画され、法的機関との協議がおこなわれた¹⁰⁾。

詳細なリスク分析の結果、この場合は換気設備のない単設トンネルが安全上最適な解決法であるということが示され、法的機関もこの設計に対して異議を唱えなかつた。この場合、単設トンネルという代替案が受け入れられなかつたならば、プロジェクト全体が危うくなる恐れがあつたため、危険評価は不可欠であった。CTRL のほかのトンネルに対して同じリスク評価手法を用いた結果、避難通路と換気設備を持った双設トンネルの設計が採用された（図-3 を参照）。

この例は、リスク評価型手法によって、論理的で首尾一貫性があり、意思決定の根拠として使用しできる枠組みの範囲内で設計上の重要な代替案を明確にし、

相互に関連性のないリスク問題（乗客の安全と環境影響）の比較を可能にする作業が、いかに容易になるのかを示している。

5. 避難手段

(1) 認識

近年のトンネル事故は、効果的な避難手段の設計を試みる際に非常に深刻な問題があることをあらためて認識させた。どのような設備が用意されていても、火災発生時に人々に利用されないことが多い。自動車内で死亡するケースが目立つが、これは緊急事態に対する反応が遅れたためか、あるいは自動車から離れることの困難さのためである^{15),16),17)}。

日本ではこのことが認識されており、利用可能な設備の存在および発見方法を人々に伝えるために、多大な努力が払われてきた¹⁸⁾。この方策は、さらに推進されると考えられる。欧州では、多くの運転者が一つの旅行の行程で異なる国のトンネルを通過するが、非常口を示す標識は各國のトンネルでそれぞれ異なっており、認識の容易さにも差がある。作業坑などと連結した避難通路もしくは専用非常口（direct exit）、あるいはその両方を設置する費用を考えれば、標識の外見を統一し、緊急時に識別しやすくするための労力を払う価値は明らかにあると考えられる。トンネルの非常口の多くには、標準的な建築基準法の仕様に従った標識が設置されているが、これを読み取るのはもっともよく見える条件下ですら困難である。標識を改善し、運転免許試験に標識の認識を含め、公共事業放送で広報することも、必然的な対策であると考えられる。

(2) 非常口の間隔

主要な懸案の第2は、非常口あるいは避難通路の設置およびその間隔である。これについての規定は、国ごとに大きく異なっている。たとえば日本では、分類B（商用車が走行）の自動車トンネルで、交通量によるが延長が3km未満の場合には、非常口および排煙設備を設置しなくてもよく、また、避難経路案内図を設置しなくともよいとされている⁵⁾。交通量の時間的変化によっては、この規定は一定条件下では認できると考えられる。しかしながら、近年の鉄道トンネルでは、火災や事故のリスクは著しく低いにもかかわらず、避難通路および高性能の換気設備が設置されている⁴⁾。

リスク評価型手法の使用によって、必ずしもこれらの判断が変更されるわけではないが、提案された設計解決法に対して、安全および費用の面から十分な根拠

が求められることになる。

非常口がすぐには使用できないという事実についても考査しなければならない。避難通路の場合、隣接トンネル内の交通流が停止する前に制御されない人々の進入を許すことは、特に鉄道トンネルの場合にはきわめて危険である⁹⁾。このため、非常口を密に配置することの利点について、注意深く考査を行わなければならない。

6. 設計火災

(1) トンネル延長および火災の規模

設計火災（あるいは想定火災）ならびにそのトンネル延長との関係は、緊急時におけるトンネル内環境の予測に大きく影響する。信頼できる現実的な設計火災は、あるトンネルの設計に対して選択された防災安全設備の種類および最大能力を考慮する際に、必要不可欠なパラメーターである。

設計火災の情報によって、特に下記のことが可能になる。

- トンネル内の許容基準もしくは火災リスクの算出
- 危険物積載車の規制もしくは制御に関するあらゆる規定の決定
- トンネル防災システムの適切な選択
- システムの設計および規模の指定
- 操作手順および緊急計画の策定

したがって、設計火災は、包括的な火災危険分析にもとづき、火災パラメーター（熱発生率、時間当たり煙生成率など）および発生確率を計算に入れたものでなければならない。

設計火災規模とトンネル延長の関係は、「下記の項目にもとづいている。

- トンネル交通量の増加に伴う火災発生確率の増大
- 効果的な制御が行われず火災が拡大する可能性
- 避難経路を確保するために、トンネル内の空気流を増加させることの必要性および、これに対する共通認識

(2) 火災の拡大段階

避難シナリオおよび安全な場所への避難に要する時間に対して、火災の拡大のさまざまな段階および拡大時間を計算に入れなければならない。建築物の設計で避難方法を考える際には、火災の各段階、特に発達時間およびこれに伴う煙生成を考慮に入れる。トンネルの避難方法の設計では一般的に、発達時間が無視され、火災の最大規模が重視されている。

しかしながら、「最大発生熱量（peak fire output）」

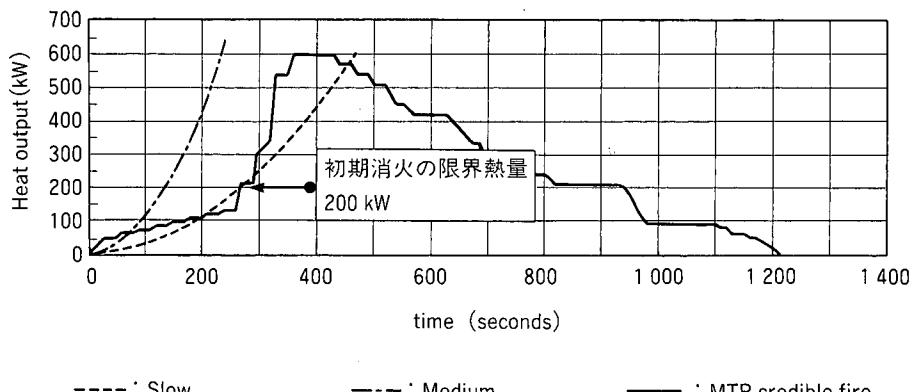


図-4 火災の発達とトンネル走行時間

を考慮することは、過剰設計につながり、現実的、簡素、かつ有効な火災安全戦略の立案がほとんど不可能になりかねない。たとえば、国の研究所の助言に従い、複数台車列車による全面的な火災の「可能性は排除できない」という前提にもとづいて、鉄道トンネルのリスク分析が開始された。その結果、この分析では、避難開始時に鉄道トンネル内で瞬間に 40 MW の火災が発生すると仮定した場合、トンネル管理者および消防隊は緊急活動手順を正しく実施することができないという結果が示された。

(3) 地下鉄システムの事例研究

近年行われた事例研究では、火災の発達段階の潜在的な重要性が、鉄道トンネルの延長との関連から示された（図-4 参照）。消防に関する助言に従って検討された火災シナリオの一つに、地下鉄車両内における手荷物火災がある。一般人による初期消火の標準的な限界は、非常に悲観的にみて 200 kW と考えられた。試験およびモデル化によって、手荷物火災は約 5 分以内に 200 kW に達すると算出された。この場合、駅間の所要時間は平均 2 分、最長で 2.5 分であった。

したがって、駅間の所要時間内に避難経路が脅かされる程度にまで火勢が発達することはないため、火災そのものによって次の駅での乗客の避難が妨げられることはないと考えられる。この後、防災戦略では、制御不可能な状態で列車が停止してしまうような火災を防ぐ手段および、列車からの効率的な避難を確実に行う方法が注目された。これは、鉄道トンネルの設計や供用戦略に対して、トンネル交通の危険性に対する考慮がいかに影響したのかを示す例である。しかしながら、選択された設計火災は、下記の例のようにさまざまである。

a) 商用車の進入が制限されていない道路トンネルの場合、想定される火災は 40 MW (HGV による

非常に深刻な火災) から 100 MW 以上である。また、可燃性の液体による火災は、きわめて短時間の間に拡大する可能性がある（たとえば、事故発生現場に石油タンクローリーが突っ込んだ場合など）。

b) 対照的に、現在の電化された旅客鉄道システムの場合、想定される火災は 2 から 8 MW である。また、大火災の場合、その拡大はゆっくりとしており、火勢が最大に達するのは乗客の大部分がトンネル外に避難した後である。

したがって、制御水準、交通特性、トンネル横断面、およびトンネル内人数の見込みが考慮された場合、トンネルリスクの推定は、受け入れられている指針もしくは経験的な判断によってきわめて大きく変化する。

トンネル内における連絡横坑ならびに避難立坑の配置および間隔は、都市環境下における新規の地下鉄システムにおける大きな設計課題となりうる。

上記の手法を使用して発生し得る火災を見極め、さまざまなトンネル延長に対して火災による個人および社会へのリスクを推定すると、該当するさまざまな安全対策に関連する興味深い結論が得られる。

火災発生時に“列車両端 (train-end)” 避難を必要とし、避難は一つの方向にのみ行われるような地下鉄の場合、安全システムに関する閾値を推定することができる。図-5 は、地下鉄システム内の火災による乗客へのリスクを、駅間のトンネル延長との比較で示している。駅間距離がおよそ 1.5 km 以内の場合には、容易な設計解決法はトラック上を歩いて次の駅まで避難することであり、この場合、避難通路を付け加えてもリスクを低減させることにはならない。

駅間距離が 1.5 km を超える場合は、避難に要する時間が長くなり緊急活動による支援の重要性が高くなるため、その進入方法が重要となるが、この場合でも

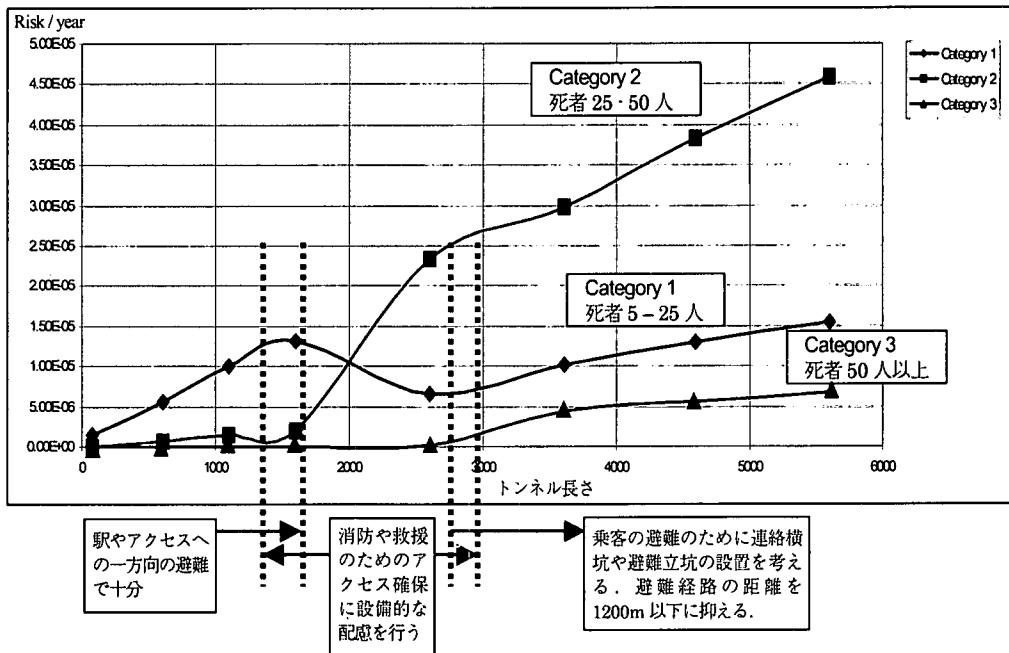


図-5 地下鉄のトンネル長さとリスク軽減システムの関係

リスクはまだ許容範囲内である。駅間距離が3kmを超える場合には、移動距離を短縮し、避難時間短縮のための救援列車の使用を可能にするために、連絡横坑の設置が正当化される。

7. 排 煙

火災発生時には、大抵の場合排煙を行うことが有益であるということは、一般的に認められている^{2),3),4),7)}。しかしながら、その便益がトンネル利用者のためになるか緊急活動のためになるのかは、採用されている作業手順によって異なる。火災に対して換気を行うと、モンブランの事故および海峡トンネル火災の例が示すように、送り込まれた酸素によって火勢が発達し拡大することにつながり、危険になることもある¹⁸⁾。

消防の指示の下でのみ換気設備を使用するように規定している手順もある。消防隊の到着時刻にもよるが、これには火災発生後かなりの時間を要する可能性がある。鉄道トンネルの場合はこれに加えて、特に縦断方向の換気をおこなう換気ファンを使用した場合、かなりの数の乗客の避難状況が少なからず悪化すると考えられるため、換気設備をどのように使用するかという問題がある¹¹⁾。

この危険性は、ほとんどすべての大規模事故、ある

いは事故が起こりかけた場合に見られる事象である。緊張を強いられる条件下で管理者がおかず誤りに対し、十分な耐性を持たない安全設備の選択を含めた、火災安全戦略全体に問題があると仮定するのが妥当である。

操作性の研究 (Operability studies) を含めたリスク評価手法の使用を通じて、システム、インターフェース、および運用手順は簡素で論理的でなければならぬということが認識される。

近年の事故の教訓^{15),16),17)}からは、“十分かつ簡易”な緊急計画は、“最先端の複雑な”手順よりもすぐれていることが示されている。たとえば、交通制御システムと連携した単純な縦断方向の換気設備は、リスク評価の結果、道路トンネル用のもっとも費用効果の高いシステムであると評価されることが多い。

8. 結 論

交通トンネルの利用の増加および、トンネル利用の安全に対する一般的な認識を受けて、法的機関および設計者の両方による対応が求められている。既存の基準からは、要求された安全基準を満たすトンネル供用を可能にする手法についての有用な指針が得られる。しかしながら、世界水準の安全基準を満たし、プロジェクトの継続年数にわたって改善される可能性を持った

事前対策型の安全管理を可能にするためには、リスク評価型の設計手法の適用が求められる。この手法を成功裏に実施するためには、責任、文化的受容、および実施のタイミングが重要である。

トンネル設計に関連した主要な安全問題の一部は、リスク評価の使用によって単純化できる。これによつて、既存の手法では不可能と思われたプロジェクトを完成させることができる。しかしながら、この手法は安全設計の統一性を保つために、設計上のライフサイクルにわたって首尾一貫した方法で使用されなければならない。

参考文献

- 1) Health & Safety Executive : Quantified Risk Assessment- Its Input into Decision Making. HMSO, 1989. ISBN 0 11 885499 2.
- 2) World Road Association, Fire & Smoke in Road and Rail Tunnels. PIARC (Permanent International Association of Road Congress) Committee on Road Tunnels.
- 3) BD 78/99 Design Manual for Roads and Bridges ; Design of Road Tunnels, HM Stationary Office 1999.
- 4) NFPA 130. Standard for Fixed Guideway Transit Systems. 083.74 NAT.
- 5) Design Guide for Emergency Facilities (Japan Read Association).
- 6) Federal Railway Office, EBA. Regulation, Fire and Disaster Protection Requirements for the Construction and Operation of Railway Tunnels. 01. 01. 1997.
- 7) HMRI Railway Safety Principles and Guidance, part 2 section Guidance on the Infrastructure, HSE HM Railway Inspectorate.
- 8) Project Delivery Models, Risk Assessment and Allocation for full Life Cycle Tunnel Management Covil, Grose and Plumbridge Ove Arup & Partners Tunnel Management 2000 m Sydney, Australia.
- 9) Scott, P., Stokes, R. : The Design of a High Speed Rail Tunnel in an Urban Environment, Safety in Road and Rail Tunnels, 3 rd International Conference, Nice, 9-11 March 1998.
- 10) Munro, J. and Scott, P. : Tunnel Design Fire Assessment, Tunnel Fires and Escape from Tunnels, 1 st International Conference, Lyon, May 1999.
- 11) To Blow or not to Blow, Charters Salisbury, Scott & Formaniak Ove Arup & Partners, Safety in Road and Rail Tunnels, 4 th International Conference Madrid, April 2001.
- 12) How Much Do Tunnel Increase the Heat Release Rate of Fire Carvel, Beard+Jowitt, Herriot Watt University, Safety in Read and Rail Tunnels, 4 th International Conference Madrid, April 2001.
- 13) A Study on Thermal Analysis for Tunnel Structures in the Event of Fire, Ota, Horiuchi,, 4 th International Conference Madrid, April 2001.
- 14) Major Fire Spread in a Tunnel ; A non-Linear Model A. Beard, Herriot-Watt University, Safety in Road and Rail Tunnels, 4 th International Conference Madrial, April 2001.
- 15) Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Tunnel ; Preliminary Report of April 13, 1999.
- 16) Channel Tunnel Safety Authority, Enquiry into the Fire on Heavy Goods Vehicle Shuttle 7539 on 18 November 1996.
- 17) Hedenfalk, J. and Rohleh, P. : Lessons from the Baku Subway Fire, 3 rd International Conference on Safety in Road & Rail Tunnels, 1998, Nice World Road Association, Fire & Smoke in Road and Rail Tunnels. PIARC (Permanent International Association of Road Congress) Committee on Road Tunnels.
- 18) Analysis of Fire and Smoke Behaviour in the Channel Tunnel Fire and Mont Blanc Tunnel Fire, Bradbury, 4 th International Conference Madrid, April 2001.
- 19) Trans Tokyo Bay Highway Corporation, Trans Tokyo Bay Highway Brochure ; 1997.

(2001.10.20 受付)

[文責：論文集編集委員会 松崎]