

地下鉄火災対策における現状と性能照査による旅客安全性確保

VERIFICATION ON PASSENGER SAFETY BY PERFORMANCE-BASED APPROACH TOWARD THE FIRE PROTECTION OF UNDERGROUND RAILWAY

田島 佳幸*・園部 直明**
Yoshiyuki TAJIMA and Naoaki SONOBE

Subway construction is increasing in developing countries due to population growth and economic development. Fire prevention is important because underground stations and tunnels are closed spaces. While the United States, Japan, and Europe have their own subway fire prevention standards, developing countries do not have their own standards and often adapt NFPA 130 of U.S. However, this code is mainly prescriptive rules that do not take into account the conditions of the site and are often pointed out to be overdesign. This paper describes the current situation in NFPA130, the methodology and results of the performance verification, and the verification of safety.

Keywords : *underground, fire, smoke, evacuation, prescriptive rule, performance-based approach, NFPA130*

1. はじめに

1863 年にイギリス、ロンドンで、世界で初めての地下鉄が開業して以来、世界各国で地下鉄建設が進められてきている。日本でも、1927 年に銀座線、上野～浅草間(2.2km)の開業を皮切りに、現在まで多くの路線で地下鉄が運行されている。

都市化が進む大都市部においては、人口増加や経済発展に伴う自動車交通の増加により、道路交通の負荷が高くなり、渋滞が発生している。その解決策として、地下空間を活用した地下鉄を始めとした公共交通の導入が進められている。とりわけ、途上国を中心に地下鉄建設が旺盛である。

地下鉄は道路交通との交差が基本的に無いため渋滞なく移動できる利点があるが、閉そく的な空間でもあるため、火災が発生した場合には煙が充満する速度が速く、危険な状況が生じやすい。また、多数の乗客を一度に輸送するため、避難出口とその容量の確保、排煙設備の設置など安全対策が重要である。

設計段階において、日本では「鉄道に関する技術基準、地下駅等の火災対策基準・同解説」¹⁾に基づいて設計が進められている。世界では、NFPA が定める NFPA130(Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System)²⁾が広く認識されており、アメリカ国内のみならず、ドリー metro やシンガポール metro 等、世界各国でも採用されている。

両者ともに旅客の安全確保を前提としているが、設計に対するアプローチ方法は大きく異なっており、日本の基準が性能規定、NFPA130 は仕様規定が中心となっている。

地下鉄の場合、駅やトンネルなどの構造規模を低減することで、プロジェクトコストや建設期間の低減のみならず、掘削土量も削減することができ、環境負荷も考慮した設計とできる。

このような背景から、本稿では、火災対策において、NFPA130 に記載の仕様規定の問題点を指摘した上で、性能規定における照査方法と実例を述べる。また、シミュレーション等の可視化技術についても言及し、今後建設が期待できる途上国等での地下鉄建設における適用性を検討する。

2. 過去の事例とその教訓

「The handbook of tunnel fire safety」³⁾による報告によれば、記録が残る最も古い火災事例として、1980 年に発生したドイツの Altona Metro での放火がある。また、New York Metro では、トンネル内での車両火災や駅電気系統による火災、ケーブル火災、ゴミ箱の出火等、計 14 の火災事例が報告されている。アゼルバイジャンの Baku Metro では、トンネル内での車両電気系統火災により、260 名の死者があったと報告されている。放火のみならず、機械設備等からの発火も当時は多かったことを示唆している。

日本においては、1972 年に発生した、北陸本線の北陸トンネルにおける火災事故が一番大きな被害である⁴⁾。北陸トンネルは全長 13.8km と長い上、当時は食堂車が付随してお

* 鉄道事業本部 鉄道事業部 鉄道計画部

** 鉄道事業本部 鉄道事業部 鉄道技術部

り、その食堂車より発火した。当時、異常事態の運転規則が定まっておらず、異常事態を感知した運転士がトンネル内で列車を停止したことで被害が拡大した。その教訓を受けて、日本におけるトンネル内火災発生時の基本原則として、トンネルを走り抜ける、または次駅まで走り抜けることとした。

近年における最大の火災事例としては、2003 年の韓国の Degue Metro における火災事例が挙げられる^{5), 6), 7)}。本火災事例は、2・40 のガソリンを用いた放火により、197 名の死者を出した大惨事となった。

韓国においては 1998 年頃に車両の不燃化に関する基準が制定されたが、2003 年に放火された車両は、それ以前に製造されたものが変更なく使用されていた(図-1)。シート、床材、天井材料として不燃材ではない材料が使われていたことから、火災は短時間で延焼した。



図-1 不燃材が使用されていなかった Degue Metro の車両

また、対向線路に停車した車両の運転手は、火災の状況を把握し、発車を試みたが停電状態になったことから、発車をすることができなかった。パニック状態となった運転手は、マスターキーを抜いた状態で逃走したことから多くの乗客が列車内に閉じこめられることになった。結果として、全死者数の 70% を超える 142 名が対向車両内で亡くなっている。放火をされた車両の乗客は全て脱出しており、車両内で死者は発見されなかった。

その他、消火設備は、配置はされていたものの、十分に機能していなかった疑いもある。

Degue Metro 以外でも、前述したアゼルバイジャンの Baku Metro 火災においても、不燃化を図っていなかったこと等に起因して多数の死者を出したとされている。



図-2 Degue Metro の被害状況

3. 地下鉄火災における基本対策

(1) 地下鉄の特徴

基本対策を述べる前に、地下鉄の特徴をまとめる。

都市鉄道における地下鉄路線は、以下の特徴を有しており、道路トンネルや貨物列車等とは性格が異なると言える。

- 列車は鉄道事業者により運転および制御されている。乗務員に対して、異常事態に関する教育・訓練を実施している事業者が大多数である。
- 乗客輸送を目的にしており、不燃物が含まれる貨物輸送は線路を走らない。
- ディーゼル機関車ではなく、電気車両のため、車両そのものに引火物はない。
- 短距離の通勤や一般移動に使用されるため、旅客の持ち込む手荷物量は限られる。改札入場前に手荷物検査を行う事業者も多い。
- 駅間距離がおおよそ 1km 程度であり、運転時間は 2-3 分と短時間である。
- 火災と車両故障が同時に発生し、トンネル内で立ち往生する確立はきわめて低い。運転士の判断で列車を止めた事例を除くと、過去の事例でも確認できない。

これらの特徴と、上述の過去の事例とその教訓を受けて、地下鉄火災における基本対策をまとめる。

(2) 不燃材の仕様

地下鉄における火災基本対策の重要事項は、駅、トンネルなどの構造材料、車両の材料に可能な限り不燃材料を用いることである。燃えるものをできるだけ排除することにより火災の可能性を低くするとともに、火災の延焼を防ぐ対策が基本となる。

(3) 火災時の列車運行の原則

前述した 1972 年の北陸トンネルにおける列車火災事故の教訓より、日本におけるトンネル内火災発生時の基本原則は、トンネルを走り抜けるまたは次駅まで走る抜けることとなっている。この原則は地下鉄火災対策における日本基準においても適用されており、以下の運行原則がとられている。

- トンネル内で車両火災が発生した場合は、次駅まで走り抜ける。
- また、対向線路などの他の列車は、火災車両が停車している駅には停車せず、火災列車が停車した駅には近づかない。

欧州においても、トンネル内火災の検討報告書である「Fire in Tunnel, FIT」⁸⁾によれば、トンネル内で火災が発生した場合は次駅まで走り抜けることになっており、駅間距離は非常に短く、列車がトンネル内で停止をすることはきわめて低いことが指摘されている。このことから、欧州の各地下鉄事業

者は日本と同様の対策をとっているものと考えられる。

これらの基本原則を前提にその他の総合対策を考えることが重要である。

2021 年 10 月 30 日に発生した京王線の火災事例においてもこの原則が適用され、トンネル内に乗客が立ち往生することはなかった。

4. 主な地下鉄火災対策基準

前章で述べた基本対策は、世界的な共通事項であり、どの基準にも示されている。他方で、駅部やトンネルにおける設計基準にはバラつきがある。

以下に、NFPA130、日本国内における基準、欧州の基準に分けて特徴を記述する。

なお、地下鉄における火災対策基準が存在していない途上国などの新規鉄道事業者は、新たに策定するか、どこかの基準を参考にする必要がある。

(1) NFPA130

NFPA130 は、アメリカ国内だけでなく、カナダや北米大陸、南米・中南米でも適用されている。また、独自の基準を持たないアジアの途上国においても適用されている。他方アメリカ国内でも、法的根拠とはせずガイドラインの一種として扱っている州、鉄道事業者もある。

1983 年の初稿以来 2020 年まで 3-4 年周期で改訂版が出されている。2010 年以降は 2014 年、2017 年、2020 年に改訂されている。

1) 駅設計の評価方法

NFPA130 の駅における避難照査は、基本的に仕様規定である。具体的には、以下の記述に基づく。

- 5.3.3.1 Platform Evacuation Time. There shall be sufficient egress capacity to evacuate the platform occupant load as defined in 5.3.2.5 from the station platform in 4 minutes or less.
- 5.3.3.2 Evacuation Time to a Point of Safety. The station shall be designed to permit evacuation from the most remote point on the platform to a point of safety in 6 minutes or less.

従来の NFPA130 では、これらの規定に基づき、十分な階段を設置することが求められた。一方で、以下の項目が追加され性能規定によるアプローチも認められている。

- 5.3.3.7 Engineering Analysis. Modification of the evacuation times and travel distance shall be permitted based on an engineering analysis by evaluating material heat release rates, station geometry, and emergency ventilation systems.

すなわち、工学的アプローチにより検証することができれば、必要避難時間はエンジニアの裁量により修正が可能である。

ただ、一方で、具体的にどのような火災シナリオ、計算式を用いて検証するかは記載されておらず、確定的な言及はない。そのため、各エンジニアの裁量により決定される。

2) トンネル設計の評価方法

NFPA130 においては、出口間距離が 762m を越える場合は、その距離を 762m 以下とするためにトンネルに中間立坑などのアクセスを設けなければならないという基準が示されている。この基準の代替基準として単線トンネル併設の場合は、トンネル間を連結する避難連絡坑を 244m 以内の間隔で設置することが求められる。

(2) 日本の「地下駅等火災対策基準」

日本においては、前章にまとめた歴史的な事例を受けて度々規定が改訂されている。とりわけ、1968 年の日比谷線神谷町駅の火災事例をきっかけに初めて見直しが行われ、その後 1972 年の北陸トンネル火災事故、Degue Metro の火災事故を契機に改訂されている。

日本基準は、過去における地下鉄火災事故を教訓として制定されてきており、近年の地下鉄火災事故の状況も分析をして反映されてきているものである。

具体的な避難の照査方法として、大きく分けて①通常火災に関する照査と、②大火源火災に関する照査の二つに分類される。求めた必要避難時間に対して、通常火災では許容煙濃度、大火源火災では床面から 2m の高さまで煙が降下する時間で評価する。詳細は次章にまとめる。

なお、日本基準では、火災が発生しても次駅まで走行することが基本であるため、地下鉄のような駅間が短いトンネルには中間避難口や避難連絡坑等の設置は義務付けられていない。

(3) 欧州

1998 年以降に欧州の道路トンネルにおいて大規模火災が相次いで発生したことから、道路トンネルを中心にトンネル火災に関する議論が欧州において多くなされてきている。これまでに、欧州委員会 (European Commission) の第 5 次フレームワークプログラムを中心として、トンネル火災対策検討プロジェクトが実施されている^{8), 9)}。

これらの中で、Fire in Tunnel (FIT) においては、地下鉄火災対策の比較として欧州各国・各都市の既存の基準および設備に関する比較を行っている。FIT によれば、2005 年時点で国として地下鉄に適用しうる火災対策基準を欧州で持っている国はオーストリア、ドイツ、スペイン、イタリア、フランスの 5 か国となっている。しかし、これら基準の問題として、山

間部の鉄道トンネルに関する基準と混在している(フランス、オーストリア)または、地下部に限らず軌道交通全般の火災対策基準となっている(イタリア)など、地下鉄トンネル火災において安全上重要な役割を果たす駅との関連性が十分に備わっていないことが指摘されている。また、駅に関しては、各国とも通常のビルなどの火災に対する基準が適用されており、地下鉄火災における特性を反映していないことが指摘されている。

鉄道の技術基準としては、Technical Specification for Interoperability (TSI)¹⁰⁾という基準が出されている。その中で、インフラ、車両、エネルギー等の個別分野の基準が制定されており、トンネルにおける避難基準は「Safety in Railway Tunnel (SRT)」¹¹⁾に規定されている。TSI は 2008 年に初版が出されて以降、2011 年に初版の修正版、2015 年に第二版、2019 年に第二版の修正版と、3~4 年置きにアップデートされている。

2019 年版においては、トンネル内の避難のため、少なくとも 1000m ごとに一か所は地上までの緊急避難口を設置しなければならないと規定されている。もしくは、独立した二つ以上のトンネルの場合、少なくとも 500m ごとに一か所避難連絡坑を設置することで代替も可能であるとされている。これらは、NFPA130 よりも緩和された基準であるが、仕様規定となっている。

TSIによると、TSIに準じて設計されていない既設鉄道システムとの技術的互換性確保や、その他 TSI における特例等の場合は、各国個別の規則の適用が可能と定められている。

2005 年の FIT が実施した欧州 17 都市の既存地下鉄火災対策調査結果によれば、各都市鉄道事業者は、独自の火災対策をとっていることがわかっている。

5. NFPA130 適用時の課題

新興国や途上国等の自国で避難基準を持たない国での新規地下鉄建設において、NFPA130 の適用は非常に容易である。その理由は、英語で出版されている上に、NFPA の関連基準(例えば、設備設計等)も全てシリーズとして手に入るためである。ただし、適用時の課題も多いため、本稿では以下に駅部とトンネル部に分けてまとめる。

(1) 駅設計の課題

1) 駅部における要避難者数

多くの都市鉄道は複線路線である。地下駅においては、階段を両方向路線に共有できるなど、サービレベルの向上、駅幅の削減など利点が多いことから、島式ホームとなることが多い。

NFPA130 において、駅部における要避難者数は「Simultaneous entering the station on all tracks」と定

義されている。よって、火災発生場所がどこであろうとも、列車が同時に到着し、一つのホーム(島式ホーム)を利用して多くの乗客が避難する前提である。

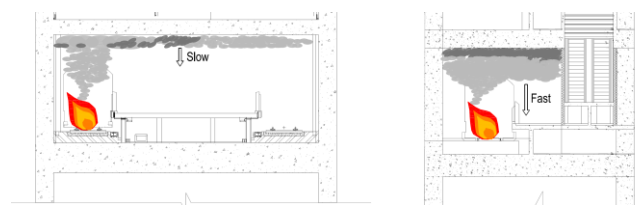
車両火災であれば火災が発生した車両のみ駅で緊急停止させ乗客を避難させる。火災が発生していない列車はこの駅以外で停止させる運用とすれば、両線同時到着は防ぐことができる。

2) 駅部における避難の避難時間の算出方法

Section5.3.3.1 および 5.3.3.2 では、4 分以内にプラットフォームから避難、6 分以内に安全な地点への避難が必要である。しかし、駅構造(煙の拡散容量)や火災シナリオ、排煙設備のスペック等を考慮せずに、一律に定められている。

一般的に、必要な避難時間はこれらの状況により異なる。例えば、広い駅空間と排煙設備が設置されている駅において火災が発生しても、比較的避難に余裕がある。一方で、狭い駅空間で排煙設備も十分設置できていない駅においては 4 分でも間に合わない可能性がある。

この仕様規定の問題を補うため、Section5.3.3.7 においては性能規定による避難時間の変更を認めているが、地下鉄駅における不燃化を前提とした火災シナリオについて十分な情報を与えていない。NFPA130 は地下鉄だけの基準ではなく、可燃物を搭載した都市間鉄道なども対象のため、使用者が明確にわかるように地下鉄火災における性能規定のための情報が整理されていない。



幅が広く煙の降下が遅い駅 幅が狭く煙の降下が早い駅

図-3 駅構造による煙降下時間の相違イメージ

(2) トンネル設計の課題

前述の通り、出口間距離が 762m を越える場合は、その距離を 762m 以下とするためにトンネルに中間立坑や避難連絡坑等の避難路を設けなければならない。

この避難連絡坑の設置間隔は、1977 年に行われたアトラントメトロ(MARTA)の設計検討において、不燃化がなされていない車両の床材火災が発生した際に、輻射熱などで火炎点を通して風上側に避難することができず、風下側に逃げざるを得ない乗客がフラッシュオーバーに至る前に避難を完了できることを目的として設置された基準である^{12), 13)}。現在の NFPA130 基準においては、床材に厳しい不燃化の規定を設けており、現状の車両においてはフラッシュオーバーに至ることはないことを NFPA 関係者は認めている。基準間の整

合性がとられておらず、現在の条件に応じて性能規定により避難連絡坑の設置間隔を検討すべきであるとの論文がいくつも出されているが¹⁴⁾、避難連絡坑に関しては性能規定適用の改訂には至っていないのが現状である。

鉄道の運営上、車両火災が発生した場合は次駅まで走り抜けることが原則である。よって、トンネル内で火災車両が立ち往生する状況は、何らかの機械故障による列車の停止と火災が同時に発生するきわめて確率の低い状況のみとなる。

万が一そのような状況が発生した場合、基本的には風上側に避難を行う。避難連絡坑が使用される状況は風下側に逃げなければならない状況のみであり、風上側に避難できる場合はそのまま落ち着いて駅まで避難することが可能である。

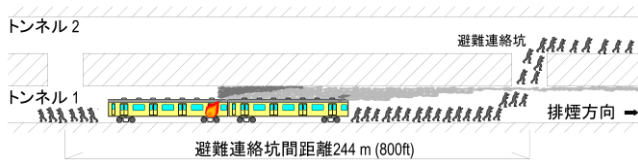


図-4 避難連絡坑の使用イメージ

避難連絡坑を使用するためには、対向側のトンネル内に列車が走行していないことを確認した上で避難連絡坑のドアを列車乗務員等の鉄道事業者が開放する必要があり、その確認をするのに時間を要する可能性がある。また、避難連絡坑の通路幅は 1120mm と非常に狭いことから、非常に大きな滞留を起こす可能性が高く、その間に次駅まで歩いて避難したほうが早く避難が完了して好ましいと考えられる。

一般的な都市鉄道では、駅間は概ね 800m・1km 程度である。その場合、中間避難立坑もしくは避難連絡坑を設置することとなる。建設コストは高く排土問題、地上の土地収用も必要であり、環境負荷も高い。発生頻度・使用頻度および運用上の問題から、コストや環境負荷と比較し、どの程度安全性を向上させるかが議論となっている。

6. 性能規定採用の世界的潮流

(1) 国際的な認識

上述のように古い仕様規定が NFPA には残されており、性能規定による代替について検討がされているものの、十分な採用には至っていない。NFPA をはじめとした各国の鉄道火災対策基準においても仕様規定による問題があることから、国際トンネル協会 (ITA: The International Tunneling and Underground Space Association) は、「An Engineering Methodology for Performance-Based Fire Safety Design of Underground Systems」(地下鉄道の性能規定火災安全設計の工学的方法)¹⁵⁾を発行して、性能規定による設計・検討を推奨している。ITA は、性能規定を行うべき理由として以下の問題を挙げている。

- 最小限の(仕様による)規定は、いかなる特定のプロジェクトにおいて必ずしも十分ではない。
- 最小限の(仕様による)規定は、しばしば過剰な要求であり、不釣り合いな費用によって成し遂げられる。

仕様規定による過不足が発生する問題は国際的に認識されており、妥当な規模のプロジェクトとするため、性能規定による評価が今後の趨勢となってゆくと思われる。

(2) NFPA での公開議論

NFPA では、Public Input という一般からのオープンな協議の場を設けている。この Public Input の 2017 年に投稿された記事によれば¹⁶⁾、車両、信号、電源、信頼性、運用の高度化が図られ、地下鉄で火災が発生する確率、発生した場合の火災規模、駅やその他の所定の緊急避難場所以外に避難する可能性は大幅に低下していると指摘されている。さらには、地下鉄火災に関する最新の歴史的・統計的分析によると、この 10 年間で世界中の地下鉄における火災事故の件数が激減していることが示唆されていると指摘している。

欧州や日本の近代的な地下鉄では、トンネル火災においては駅が安全な場所として機能するため、ほとんどの場合、避難連絡坑は使用されていないこと、日本の設計チームの影響によりエジプトをはじめとしたいくつかの国で NFPA130 の採用に抵抗する動きがあり、その仕様規定によるアプローチで国際規格としての地位を危うくしていることを指摘している。

この投稿者は、これらの背景から、トンネル内出口間の最大距離 762m を延長するためのリスク分析を実施することを提案している。

(3) リスクアナリシスの必要性

前述の ITA-COSUF が出版する「An Engineering Methodology for Performance-Based Fire Safety Design of Underground Systems」では、避難時間算出の前に、起こり得る全てのリスクをスクリーニングし、その発生頻度と重症度を定性的に分析すべきであると指摘している。下図は、横軸に発生頻度、縦軸に事故が発生した場合の重症度を表しており、それぞれ Intolerable (耐えられない)、Undesirable (望ましくない)、Tolerable (我慢できる)、

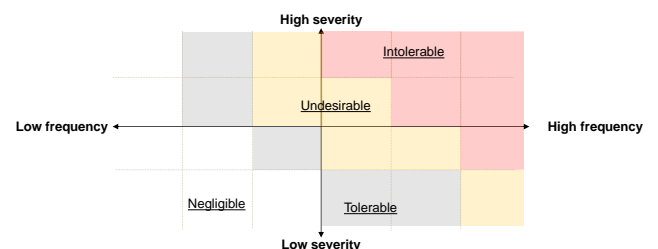


図-5 リスクアナリシス表

Negligible(無視できる)の四つで評価している。

この分析は、各路線の設備や設計条件により分析され、路線の特徴によって異なる。他方、本書では次の12個のリスクを指摘している。とりわけ、火災に関しては緊急性が高いと指摘している。1. Train fire and stop in station(列車火災が発生し駅で停止)、2. Train fire and stop in tunnel(列車火災が発生しトンネル内で停止)、3. Derailment(脱線)、4. Collision with obstacle and/or other trains(障害物もしくは他列車と衝突)、5. Cable fires(ケーブル火災)、6. Fire of elevators(エレベーター火災)、7. Fire in technical rooms(設備室内火災)、8. Fire in station commercial areas(商業施設内火災)、9. Collapse of infrastructure(インフラの崩壊)、10. Overcrowding(超過密状態)、11. Explosions(爆発)、12. Terror(テロ)。

このようなリスク分析を各路線の特徴を踏まえた上で、リスクをスクリーニングした上で対策を行うことが推奨されている。

7. 性能照査方法

性能照査の事例として日本の地下鉄等火災対策基準に記載されている、地下駅における乗客避難の性能照査方法を示す。日本の地下鉄等火災対策基準の特色としては、火災シナリオに応じた煙の評価を比較的容易な代数式にて行えることにある。詳細については文献¹⁾に詳しく述べられているため、ここでは概要のみを示す。

(1) 想定需要と想定火災

地下駅においては、原則として材料の不燃化が求められており、その観点から火災が想定される場所は車両・ホーム上の売店、コンコースの売店の三か所に限られる。火災規模は、ガソリンを伴わない通常火災と、ガソリンを使った大火源火災の二つのシナリオをそれぞれの場所で想定している。また、各シナリオにおける想定乗客を列車内およびホーム待ち乗客に分類している。

表-1 想定火災場所と火災規模およびその想定需要

想定火災		乗車率		
		列車内	待ち客数	
			始発なし	始発あり
車両	通常	200%	0%	0%
	大火源	200%	75% (150%)	125% (200%)
プラットフォーム	通常	200%	75% (150%)	125% (200%)
	大火源	200%	75% (150%)	125% (200%)
コンコース	通常	0%	75% (150%)	125% (200%)
	大火源	0%	75% (150%)	125% (200%)

* () 内の数字は平均乗降客数が10万人/日以上の大規模駅に適用

1) 避難時間の算出

避難時間算定のための滞留時間は次式により算出される。

$$T = Q / (N \times B)$$

T: 滞留時間(秒)

Q: 要避難者数(人)

N: 群集の流出係数(人/m/秒)

B: 階段幅員等(m)

歩行速度と流出係数は以下の値を適用する。

水平部歩行速度: 1.0 m/秒、階段部歩行速度: 0.5 m/秒

流出係数: 1.5 人/m/秒(水平部)、1.3 人/m/秒(階段部)

全避難時間を算出するため、次のプロセスで算出する。

- (1) 車両ドア部の滞留時間、(2) ドアから階段までのホーム上の移動時間、(3) ホーム上の階段部の滞留時間、(4) ホームからコンコースまでの階段の移動時間、(5) コンコースの階段から改札までの移動時間、(6) 改札での滞留時間、(7) 改札からコンコースの階段までの移動時間、(8) コンコースの階段部の滞留時間、(9) コンコースから地上までの階段の移動時間。

(2) 通常火災に対する照査方法

1) 車両火災および売店火災(プラットフォーム階)

火源がフラッシュオーバーに至るまでの煙を想定して、歩行速度を落とすことなく避難が行える視距が確保できることを検証する。避難時間終了時間 t における煙濃度 Cs は、ホーム階における点火ブロック容積を算定し、想定火災、避難終了時間に応じて代数式により Cs を算定して、許容煙濃度 0.1 (1/m) 以下(視距 15-20m 相当)であることを確認する。なお、ホームに売店が無い場合は評価の対象としない。

2) コンコース火災

加えて、コンコース階においては、避難終了時間 t におけるコンコースの必要煙拡散容積 V0 は、避難終了時間に応じて代数式により算定し、別途算出したコンコースの煙拡散容積 V が V0 以上であることを確認する。

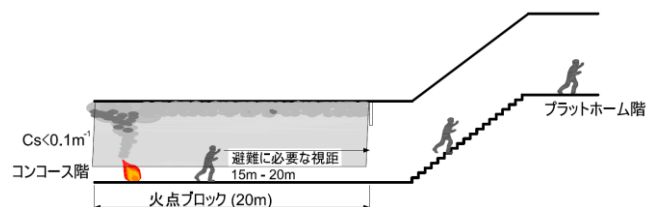


図-6 通常火災における許容煙濃度による視距の評価

(3) 大火源火災に対する照査方法

大火源による煙等が避難上支障のある床面 2m の高さまで降下するのに要する時間 t_0 は以下の各々の場合において代数式より算定し、 t_0 が別途計算した避難終了時間 t 以上であることを確認する。

- 1) ホーム階の車両火災および売店火災の場合
- 2) コンコース階の火災の場合

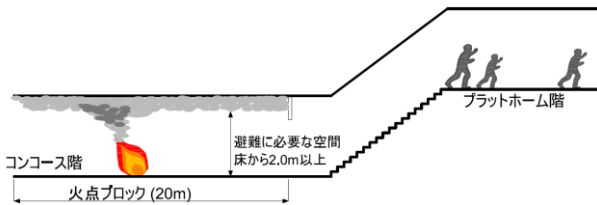


図-7 大火源火災における煙の降下時間による評価

8. 性能規定による安全性照査の実例

バングラデシュ国における初めての地下鉄であるダッカ MRT5 号北線を対象に、地下駅における照査を行う。対象とする駅は、折返し運転や始発運転が無い一般的な島式ホームの Dar-Us-Salaam 駅とする。なお、本稿における検証は車両からの大火源火災とする。

(1) 避難時間の算出

ダッカ MRT5 号北線の車両において、乗車率 100%の状態は 1,296 人と算出されている。要避難者数は表-1 に基づいて計算している。各ボトルネック箇所での滞留時間 (T) および各ボトルネック間の移動時間 (t) を表-2 にまとめている。この結果から、車両内からコンコース階まで全員が避難完了するのに 6.1 分かかることがわかった。

表-2 要避難者数とそのコンコースまでの避難時間

	避難ルート	時間[秒]
要避難者数 = 1,296 * (75%+200%) = 3,564 人		
T1	車両ドアの滞留時間	57.1
t1 (max)	最遠車両ドアから階段までの移動時間	36.5
t1 (min)	最近車両ドアから階段までの移動時間	10.0
T2	階段での滞留時間	408.6
t2	階段の移動時間	34.0
避難時間の比較		
$T1 + t1 (93.6 [s]) < T2 + t2 (355.0 [s])$		
t1(min) + T2 + t2 (コンコース階までの避難時間)		365.0 (6.1 min)

*T はボトルネック箇所での滞留時間、t は各ボトルネック間の移動時間を表す

(2) 車両からの大火源火災(煙降下時間の評価)

以下の代数式により煙の降下時間を算出する。

$$t_0 = V_E / (V_s - V_e')$$

$$V_E = (A_E - A_V') \times L$$

$$V_e' = V_e \times (A_E - A_V') / (A_0 - A_V)$$

ただし、 $(V_s - V_e') \leq 0$ の場合、 $t_0 = \infty$ とする。

表-3 大火源火災の煙降下算定式における係数

V_E : ホーム床面から 2.0m 以上のホーム階全体の有効容積 (m ³)
V_s : 流出煙流出および煙等発生量で、いずれも 300 (m ³ /分) とする。
V_e' : ホーム階全体の有効容積 V_E に対する有効排煙量 (m ³ /分)
A_E : ホーム床面から 2.0m 以上のホーム階の線路直角方向断面積で、階段や柱等の煙の拡散しない部分を除いた面積 (m ²)
A_V' : ホーム床面から 2.0m 以上の車両断面積 (m ²)
V_e : ホーム階全体の排煙設備の換気量 (m ³ /分)
A_0 : 点火ブロック容積計算における線路直角方向断面積 (m ²)
A_V : 車両断面積(床下部分を含む) (m ²)

ホーム階全体の有効排容積 V_E は以下の通りとなる。

$$V_E = (A_E - A_V') \times L$$

$$V_E = (22 - 4.4) \times 170$$

$$= 2993.0 [m^3]$$

V_E に対する有効排煙量 V_e' は以下の通りとなる。

$$V_e' = V_e \times (A_E - A_V') / (A_0 - A_V)$$

$$V_e' = 83 \times (22 - 4.4) / (71.9 - 20.3)$$

$$= 28.4 [m^3/min]$$

床面から 2m の高さまで降下するのに要する時間 t_0 は以下の通りとなる。

$$t_0 = V_E / (V_s - V_e')$$

$$t_0 = 2993 / (300 - 28.4)$$

$$= 11.0 [min]$$

よって、避難時間が 6.1 分のため、煙が降下するまでの時間 11.0 分以内に想定される要避難者全員が避難完了できると検証できた。NFPA 130 における仕様規定を採用した場合、プラットホームからは 4 分以内に避難を完了しなければならないため、同駅の階段・エスカレータの流出容量では不足をしていることとなり、階段幅を広げる、階段数を増やすなどの対策が必要となる。この場合、駅規模は 10% 以上大きくなるのが推定され、建設コスト、運営コスト(おもに電気代)および環境負荷が増大することとなる。

9. シミュレーション技術を活用した検証

上記に示した日本の地下鉄等対策基準に示されている代数式を用いた煙の評価方法は、大規模な数値解析などを行う必要もなく、容易に経済的な性能規定設計を行うことが可

能であるが、適用範囲について理解しておくことが重要である。本基準においては、プラットフォーム階とコンコース階を防火・防煙区画により分離することを前提としており、海外で見られるアトリウムなどのプラットフォーム天井の一部を吹き抜け構造とする駅では適用ができない。また、本基準の代数式を定めるにあたり、床面から天井への高さを4.5m以下として想定していることから、それ以上の大きな空間においても使用することができないため、このような場合は二層・多層ゾーンモデル、あるいは、Fire Dynamics Simulator (FDS) に代表される火災用 Computational Fluid Dynamics (CFD) などの数値解析シミュレーションによって煙の評価を行う必要がある。

途上国における新規都市鉄道整備では、現地施主(鉄道事業者)や消防関係者は必ずしも地下鉄のことに理解が深いとは言えず、むしろ経験がない場合の方が多い。そのような関係者に対して、上述したプロセスを正確に理解してもらい、承認を得るためには、可視化されたシミュレーション技術を活用することも有効であるため、CFDによる性能規定評価は増えてゆくことが想定される。

また、歩行者・避難者評価においても歩行者流動シミュレーションの有効性が挙げられる。歩行者流動シミュレーションでは階段やエスカレーター、その駅施設をモデル化し、その空間上に歩行者を発生させることができる。これにより、避難時間の算出や避難行動の可視化が可能となる。避難時のみならず、通常営業時の歩行者行動も表現することができる。手計算では表現できないボトルネック箇所や Level of Service (LOS) の評価¹⁷⁾等、より駅利用者にとって満足度の高いレイアウトの検討が設計段階で可能である。

旅客流動と FDS のシミュレーションを融合させた技術も進歩しており、これにより、よりリアリティのある表現が可能になってきている。

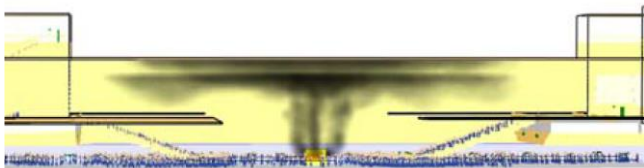


図-8 FDSによる地下駅火災シミュレーションの例

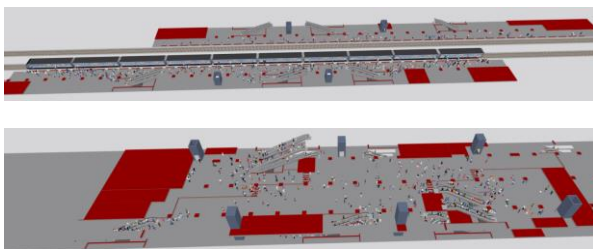


図-9 歩行者流動シミュレーションの例

10. おわりに

火災対策においては、火災の発生を未然に防ぐことが最も重要である。人為的な火災の有効な解決策として、入場前の手荷物検査が有用ではあるが、地下駅における空間の制限やコスト面の制限から、膨大な機器の設置や監視人員の配置は困難であることが多い。そのような駅には、AI技術を活用したCCTVカメラによる不審行動の事前検知等の新技術の活用が期待されている。

また、どれだけ予防を行ったとしても、火災事故・事件が発生するリスクはゼロとはならない。一方で、起きうる事故の確率と被害規模を想定して適切な規模・コストでの対策を行うことが重要であり、設計段階においては、できる限り全てのリスクのスクリーニングと検討を行い、性能規定により対策を行うことが求められる。地下鉄は各国、各都市で特徴が異なるため、同じ事業者が同じ都市内で運行していたとしても、設計思想や技術の進歩、供給される設備、地下空間、土地の条件等によって路線間の鉄道システムは異なる場合が多い。ゆえに、世界統一的な仕様規定による設計基準を設けることは困難であり、個別の事情に応じて、性能規定として分析・対策を講じることが肝要である。

参考文献

- 1) 国土交通省: 地下駅等の火災対策基準・同解説、2014
- 2) National Fire Protection Authority: NFPA130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System, 2020
- 3) Alan Beard and Richard Carvel: The handbook of tunnel fire safety, I. A history of fire incidents in tunnels, 2005
- 4) 久宗周二、中山光成: 「北陸トンネル」の列車火災発生時の避難行動に関する研究、2015
- 5) 消防庁消防研究所: 韓国大邱市地下鉄火災の調査結果概要、2003
- 6) 大塚孝義、高橋聡: 大韓民国 大邱広域市地下鉄中央路駅の火災について(土木学会報告)、2003
- 7) 國島正彦、浅見絵理佳: 大邱の地下鉄火災、失敗知識データベース、2003
- 8) European Thematic Network Fire in Tunnel: Fire in tunnel (FIT), 2005
- 9) Tunnels & Tunnelling International: EU tunnel fire safety action, pp. 20-23, April 2003
- 10) European Union Agency for Railways: Guide for the application of the SRT TSI, 2019
- 11) Commission Regulation (EU): Concerning the Technical Specification for Interoperability of "Safety in Railway Tunnels" of the Rail System of the European Union, 2019
- 12) Justin Edenbaum, Sue Cox, Gary English: Cross-passageways vs. Emergency Exit Stairways in Rail Tunnels, 2015

- 13) 園部 直明: KISS-RAIL 2.0 これからの海外都市鉄道・計画、建設、運営- pp. 259-264、(社)海外鉄道技術協力協会
- 14) William D Kennedy, Justin Edenbaum, Mia Kang, Kirk G Rummel: Subway Tunnel Cross-Passage Spacing: A Performance-Based Approach, 2014
- 15) ITA COSUF: An Engineering Methodology for Performance-Based Fire Safety Design of Underground Rail System, 2014
- 16) Arnold Dix: Public Input No.45-NFPA130-2017(New Section after 3.3.16), 2017
- 17) DESIGNING FOR PEDESTRIANS: A LEVEL-OF-SERVICE CONCEPT, John J. Fruin, 1971