

建築研究報告

REPORT OF THE BUILDING RESEARCH INSTITUTE

No. 154

March 2023

リスク基盤の避難安全検証法に関する研究

A Study on Risk-based Evacuation Safety Design Method

田中哮義、出口嘉一、仁井大策、久次米真美子

Takeyoshi TANAKA, Yoshikazu DEGUCHI, Daisaku NII, Mamiko KUJIME

国立研究開発法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

National Research and Development Agency, Japan

国立研究開発法人建築研究所、関係機関及び著者は、読者の皆様が本資料の内容を利用することで生じたいかなる損害に対しても、一切の責任を負うものではありません。

はしがき

我が国は古来火災の多い国でしたが、昭和 7 年の白木屋の火災以前に建物火災の避難が大きな話題となった記録は今まで見ていません。避難の問題はむしろ都市大火に際して発生しています。

江戸時代は大火が頻発したことで有名ですが、明暦の大火(1667)では当時の江戸の人口 50 万人のうち 3~10 万人が焼死したと言われていました(諸説あり)。当時、江戸市内には物資の運搬のための水路が張り巡らされており、その上に陸上交通のための橋が多く架けられていましたが、それらの橋が焼け落ちてしまったため避難経路が断たれてしまったことが大きな原因の 1 つです。江戸では、この後も何千人、時には 1 万人を超す死者を出す大火が発生しています。

一方で、江戸では歌舞伎座や芝居小屋など多くの観客を収容する施設などもあったのですが、それらの施設で多数の犠牲者を出した火災は知られていません。当時の建物一般が低層でかつ開放的であったために避難上の問題が比較的起きにくかったのかも知れません。

欧米では古くから多層階の建物が建てられて来たので、火災時の避難対策が重要だったと思うのですが、避難階段などを設けると言うことは近代まで一般的ではなく、道路側の窓から消防隊が救助するというような方法であったようで、建築物の高さ制限が、消防隊が持ち運べる梯子の長さや梯子車が届く高さに基づいていることや、米国の古い建物で外壁に取り付けられた鉄製の外階段が見受けられるのも、その名残かと思えます。

建物が更に高層化して梯子車も届かなくなると、米国で **Smoke proof tower** が考え出されます。日本の特別避難階段はこれに倣ったものですが、その名称から考えると元々は建物部分とは別に煙や火熱から遮断された塔状の構造物を付設して、そこに避難者を逃げ込ませるという発想の施設のように考えられます。

高層建築の火災経験の乏しかった我が国では、米国を初めとする諸外国の法規を勉強して種々の用途の建築物の避難基準を検討していましたが、避難施設の重要性についてはあまり実感が湧かず、不燃構造であれば火災の問題は全く起きないと思っていたようで、特殊建築物耐火構造規則(1923)では劇場、映画館、その他の用途についても耐火性の基準以外何も述べていません。

避難施設の重要性が認識されたのは、戦災復興が軌道に乗るに従い不燃建築が増加し、伴って多くの犠牲者を生じるビル火災が頻発するようになってからのことです。この状況に対応して建築研究所では戸川喜久二等による火災時の避難行動、若松孝旺等による煙流動・制御の研究など、建築物の避難安全に関する多くの研究が行われ、数々の知見を明らかにして来ましたが、火災時に多く見られる防火設備不作動の問題など、未だ解決すべき多くの課題が残されています。

平成 12 年(2000)年の建築基準法改正に伴う避難安全検証法は、建築物の避難安全設計における自由度を大きく広げました。しかし、現在の建築物の高層化・大規模化の勢いは止まるところがありません。2011 年の東日本大震災の時、東京の超高層ビルでは避難に 2~3 時間を要したものも多かったです。更に大規模化が進行した現在では、それ以上の時間を要するビルも少なからずあると考えられます。建築研究所としましては、建物火災時の避難安全はどうあるべきか、根本的に問い直してみる必要があるように感じている次第です。

令和 5 年 3 月 22 日

国立研究開発法人 建築研究所
理事長 澤地 孝男

リスク基盤の避難安全検証法に関する研究

田中哮義*1、出口嘉一*2、仁井大策*3、久次米真美子*4

概要

建築物は人々を種々の危険から安全に保護する上で不可欠のものであるが、火災によって逆に深刻な危険をもたらしてきたことも否定できない事実である。建築火災からの安全確保のために昔から様々な努力が積み重ねられてきたが、次第に建築法規に防火基準を導入することで火災安全を確保するための主要な手段になって現在に至っている。しかし、建築に関する種々の技術や諸環境が急速に変化してゆく中で、火災安全対策を法規の仕様書の基準のみで合理的に処理し続けることは無理なことが次第に明らかとなり、そのため性能的方法による建築物の火災安全設計への期待と導入への動きが世界的な潮流となってきた。しかし、それはなお発展途上の方法であり、検討・改善すべき点を多く残している。

建築基準法の避難安全に関する規定は多くあるが、それらの目的や、意義は明白に述べられていないので、防火関係者の間ですらそれらの意義や有効性に関する認識が必ずしも一致しない。一方で平成12年(2000)に導入された避難安全検証法では避難安全設計が避難時間と煙の降下時間の問題に単純化され、その計算のための避難者人数と設計火源を規定したが、設計火源の妥当性についての根拠は曖昧であり、また各種防火設備の信頼性の問題についても殆ど考慮がなされていない。

耐震設計であれば観測される地震の震度の大きさや頻度を基にして設計地震荷重を定めるであろう。火災の場合にも火災統計は存在するのであるから、それを活用することが現実離れした設計火源の設定を行う危険を避けるための賢明な方法であろう。また、国内外を問わず、多くの犠牲者を出した建築火災の事例の殆どで、防火設備が正常に機能しなかったことが原因として挙げられている。通常時は起動されない防火設備が、いざ火災と言う時に作動しない可能性があるのは言わば防火設備の宿命とも言えるので、避難安全設計ではその可能性を十分考慮に入れる必要がある。

リスク基盤の避難安全性能検証法は、建築火災時に避難確保が困難になるリスクを許容レベル以下に抑制するために、避難安全検証で設定すべき設計火源と設計火災シナリオを決定するための方法論である。ここで対象とするのは、この設計火源と設計火災シナリオの合理化であり、現在の避難安全検証法で採られている決定論的検証システムと避難および煙性状計算法は踏襲する。

本報告におけるリスク基盤の避難安全性能検証法の概要は以下の通りである。

1. 避難リスクと死傷確率

(1) 避難リスク R と死傷確率 p_{cas}

任意の空間の‘避難リスク’ R を火災の発生確率 P と死傷者数の期待値 C の積、火災により発生する死傷者数の期待値 $R = PC$ として定義する。また C は、当該空間の在館者数 C_0 と火災（小火を除く）が発生した場合の死傷確率 p_{cas} の積 $C = p_{cas}C_0$ とする。

(2) 許容避難リスクと標準建物空間 (Benchmark building space)

建築空間はその規模、用途などに関わらず、何れも火災による避難リスク R は等しく一定の許容リスク R_a 以下でなくてはならない。すなわち $R \leq R_a$ 。

R_a は、火災による避難リスクが許容可能なレベルにあるとして一般が認める建物空間を標準建物空間として選び、その空間での火災発生確率と火災が発生した場合の避難リスクの値として定める。なお、ここでは標準空間(H)は平均的な戸建住宅とする。

(3) 設計ベースの許容避難リスク R_a^D 、許容死傷確率 p_{cas}^a

避難リスク R は火災発生確率 P を含むが、避難安全設計は火災が発生したことを前提に作業が始まる。その場合の避難リスクを設計ベースの避難リスク $R^D(=R/P)$ と定義する。すると、設計ベースの許容避難リスク R_a^D は、 $R_a^D = R_a/P$ 、許容死傷確率 p_{cas}^a は、 $p_{cas}^a = R_a^D/C_0(=R_a/PC_0)$ で与えられる。

2. 許容死傷確率と設計火源

設計火源は避難安全検証法と同様に t^2 火源、すなわち $Q = \alpha_D t^2$ とする。ただし、火災区画の発熱速度の最大値 Q_{max} は換気支配の発熱速度やスプリンクラー設備（SP）で頭打ちになることを考慮に入れるものとする。

避難人数や避難出口などの条件が同じでも、設計火源の成長係数 α_D の値の取り方で避難安全計画の適切性についての評価が別れるため α_D の設定根拠は明確でなくてはならない。本報告での α_D は火災統計データに基づいた火災成長係数 α の確率密度分布において $\alpha > \alpha_D$ となる確率が許容死傷確率 p_{cas}^a と等しくなる時の α_D を設計火源の火災成長係数としている。

3. 防火システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ

建築空間はスプリンクラー、排煙設備、防火戸などの防火設備が設けられているが、実際の火災発生時にはそれらの全てが正常に機能するとは限らない。それら各種防火システムが正常に作動するか否かによって生ずるシナリオ毎に火災の条件や避難環境が劇的に異なる。

建築空間の避難リスクはこれらのシナリオにおける避難リスクの集合であるが、それらのシナリオはイベントツリーを作成することで特定できる。また関連する防火システムの作動確率 p を用いれば、各シナリオ i の生起確率 P_i が算出できる。

シナリオ i の設計ベースの避難リスクは $R^D(i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(i)C_0$ 、従って死傷確率は $\bar{p}_{cas}(i) = R^D(i)/P_iC_0$ となる。

4. 建物空間の許容避難リスク R_a^D の各シナリオへの分配

シナリオが一般に N 個あるとき、建物空間の設計ベースの避難リスク R^D は、 N 個のシナリオにおける避難リスク $R^D(i)$ の総和となる。 R^D が当該空間の許容避難リスク R_a^D を超えることは許されないので、 $R^D = \sum_1^N R^D(i) \leq R_a^D$ の制約が課される。 $R^D(i)$ に課される制約はこれだけであるから、これを満たす $R^D(i)$ の組み合わせには大きな自由度がある。そこで、その制約の下で R_a^D を各シナリオに分配し、それぞれのシナリオ毎に避難安全検証すれば良い。

これは、避難リスクの代わりに死傷確率を用いても同じであるから、 $\sum_1^N \bar{p}_{cas}(i) \leq p_{cas}^a$ の制約の下で空間の許容死傷確率 p_{cas}^a をシナリオ毎に分配して各シナリオの許容確率とし避難安全を検証することが出来る。

上記の検証には、2.の方法で各シナリオの許容死傷確率に対応する設計火源を算出し、その下で火災性状と避難行動の予測を行い、死傷者が0となることを示せば良い。

5. ケーススタディー

本報告の目標は避難安全検証法における設計火源を適切に定める手法および防火設備システムの作動と不作動のシナリオを避難安全性の評価に導入する手法を開発することである。それらの手法は実際的な建物条件に適用したときの実務的妥当性が支持されるものでなくてはならない。その確認のため今回の手法を居室避難および階避難の検証に適用したケーススタディーを行った。その結果、今回の方法によって導かれる設計火源、設計火災シナリオ、火災安全設計解は現状の安全レベルを損なうものでも、また技術的・コスト的に過度に厳しい要求を強いるものでもないことが確認されたと考える。

なお全館避難についてもケーススタディーを載せるべきであったが、検証すべきシナリオが多くて現状では少し複雑であることから、本報告では割愛した。

6. Annex

上記1.～4. の記述の煩雑さを避けるため、リスク基盤の避難安全性能検証法に関して行った技術的検討は内容の一部を Annex として纏めている。

7. 付録

火災階避難検証のケーススタディーの実施のために必要となった火災室・火災階の煙層降下予測のためのエクセルプログラムおよび火災階避難時間予測の簡易計算法について記述している。

*1 京都大学 名誉教授

*2 国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準研究室 主任研究官

*3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教

*4 株式会社日建設計 設計監理部門 セーフティデザインラボ（防災計画） ディレクター

A Study on Risk-based Evacuation Safety Design Method

Takeyoshi TANAKA*¹, Yoshikazu DEGUCHI*², Daisaku NII*³, Mamiko KUJIME*⁴

ABSTRACT

While buildings are indispensable to protect people from various dangers, it is undeniable that the buildings have adversely induced dangers by fire. Since ancient times, people have made various efforts to prevent the dangers of building fire. Currently, the dominant means for ensuring fire safety is to control building features by imposing prescriptive regulations. On the other hand, due to the rapid change of various environment surrounding buildings, e.g., building technologies, economic activities, people's lifestyle, it has come to be gradually recognized that the prescriptive regulations are not always efficient means to safeguard building and application of performance-based fire safety design method (P-B FSD) has come increasingly the worldwide trend. Nevertheless, P-B FSD is not a completed but developing method, so there remains a lot to do before its completion.

It is not always easy even for fire experts to exactly understand the purposes, significance, effectiveness for safety, etc. of the prescriptive provisions for evacuation safety since those are not explicitly stated. On the other hand, the verification method of evacuation safety performance, 2000, reduced the evacuation safety design to simply the issue of evacuation time and smoke filling time and prescribed occupant load density and design fire according to type of occupancy, while the basis of the design fire is ambiguous and the reliability issue of fire safety systems is untouched.

The design seismic load for seismic design of a building will be determined based on the observed seismic intensities and frequency, with additional consideration on the importance of the building. Since fire data are available from fire investigation, the design fires for evacuation safety design should be determined based on such fire data for avoiding unrealistic setting of design fires.

As often reported, non-operation or malfunction of fire safety systems tend to be involved in the event of serious fire incidents. Since fire safety systems do not operate in normal time, it may be inevitable that some of them may not operate in the event of fire. Such inconvenient possibility should be well taken into consideration in evacuation safety design.

The risk-based verification method of evacuation safety performance is the methodology to determine the design fire and fire scenarios to be selected. The subjects are to rationalize the design fire and fire scenarios.

Risk-based Verification Method of Evacuation Safety Performance in this report is outlined as follows:

1. Evacuation risk and Casualty probability

(1) Evacuation Risk R

In this method, 'Evacuation risk' of a building space, R , is defined as the product of fire occurrence probability, P , and expected casualty, C , where the fire is limited to hazardous fire for evacuation excluding small fires, and C is the product of the number of occupants in the space, C_0 , and the casualty probability when a fire occurred in the space, p_{cas} .

(2) Acceptable evacuation risk, R_a , and Benchmark building space

Evacuation risk of any building space, R , must be smaller than a unique acceptable value, R_a , regardless size and occupancy type.

It is necessary to select a benchmark building space to determine the value of the acceptable evacuation risk, R_a . The benchmark building space is selected from the building spaces of which the evacuation risk is generally agreed to be at acceptable level. Then, R_a is obtained from the fire occurrence probability, P , occupants' number, C_0 , and casualty probability, p_{cas} , of the space. Here, detached house with ordinary size is selected as the benchmark building space.

(3) Design base acceptable evacuation risk, R_a^D , and acceptable casualty probability, p_{cas}^a .

Although the evacuation risk, R , include fire occurrence probability, P , evacuation safety design of a building space starts taking occurrence of fire as a given. Let the evacuation risk in this case be the design base evacuation risk, $R^D \equiv R/P$. Then the design base acceptable evacuation risk, $R_a^D = R_a/P$, and the design base acceptable casualty probability $p_{cas}^a = R_a^D/C_0$.

2. Acceptable casualty probability and design fire

A usual t-square type fire, $Q = \alpha_D t^2$, is used as the design fire, except that the heat release rate, Q , reaches plateau restricted by the condition of ventilation or sprinkler.

If the conditions of occupant load and exits of a space are the same, the evaluation of the adequacy of the evacuation plan can differ depending upon the design fire. So it is important to determine the fire growth factor, α_D , based on sound basis, particularly for the early stage of fire. In this risk-based method, α_D which makes the probability of $\alpha \geq \alpha_D$ equal to the acceptable casualty probability, p_{cas}^a , is selected.

3. Design fire scenarios according to success and failure of fire safety systems

Several kinds of fire safety systems, e.g., sprinkler, smoke vent, fire door, are installed in building spaces. However, it is not always certain that all of those systems normally operate in the event of actual fire. Depending on whether they work normally or not, fire behavior and evacuation environment can differ greatly.

The evacuation risk of a building space is a set of evacuation risk of each scenario caused by such fire safety systems. Using event tree is a convenient way to identify the scenarios and the occurrence probability of each scenario, P_i can be calculated if the actuation probabilities of the fire safety systems are known.

The design base evacuation risk, $R^D(i)$, and casualty probability, $\bar{p}_{cas}(i)$, of a scenario i is given by $R^D(i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(i)C_0$ and $\bar{p}_{cas}(i) = R^D(i)/P_iC_0$, respectively.

4. Allocation of design base acceptable risk, R_a^D , to each scenario

If the number of scenarios involved in the fire in a building space is N , the evacuation risk of the space, R^D is the summation of evacuation risk of the N scenarios. Since R^D cannot be greater than acceptable evacuation risk, R_a^D , restriction of $R^D = \sum_1^N R^D(i) \leq R_a^D$ is imposed. On the other hand, since this is the only restriction for $R^D(i)$, a lot of freedom exists in the combination of $R^D(i)$ to satisfy the restriction. Therefore, it is possible to allocate R_a^D to each scenario and verify the safety by each scenario.

It is possible and more straight forward to allocate the acceptable casualty probability of building space, p_{cas}^a , to each scenario under the restriction of $\sum_1^N \bar{p}_{cas}(i) \leq p_{cas}^a$.

Once $\bar{p}_{cas}(i)$ is determined, the design fire for scenario i can be obtained following the procedure described in 2. above, which follows the verification to confirm that no casualty arises in any scenario.

5. Case studies

The objectives of this study on evacuation safety assessment is two folds; one to develop a method to rationally determine the design fire; and the other to develop a method to take the effects of operational reliability of fire systems into account.

The methods are not enough unless they are usable in actual evacuation safety planning of buildings. Hence, case studies are carried out applying the methods to fire room evacuation and fire floor evacuation to examine if the methods are practicable in actual evacuation safety design practices.

By the way, case studies should have been done for total building evacuation too, but it was given up in this report due to the lack of time for the work

6. Annex

A part of the technical studies and data concerning the development of the risk-based verification method of evacuation safety performance are added as Annexes to avoid the complication of the main text.

*1 Professor Emeritus, Kyoto University, Dr. Eng.

*2 Senior Researcher, Fire Standards Division, Building Department, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

*3 Assistant Professor, Department of Architecture & Architectural Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

*4 Director, Safety Design Lab, Architectural Design Department, Nikken Sekkei Ltd, Dr. Eng.

目次

1. リスク基盤の避難安全検証法に関する研究の背景と目的	1
1.1. 建物火災による死亡率	1
1.2. 建築物の大規模化と火災リスクの増大	1
1.3. 防火設備システムの効果的設計	1
1.4. 避難リスクの許容	2
2. 性能的避難安全設計法の基本構成	3
2.1. 性能的避難安全設計法の基本手順	3
2.2. 設計火災条件と安全判定基準の特徴	4
3. リスク基盤の避難安全検証法の手続き	5
4. リスク基盤の避難安全設計における設計火源	6
4.1. 性能的火災安全設計における設計火源	6
4.2. 最大発熱速度 Q_{max}	6
4.3. 火災成長係数 α の確率密度分布	6
5. 許容避難リスクと設計火源	8
5.1. 設計火源の意味とは	8
5.2. 火災時の避難リスク	8
5.3. 許容避難リスク	9
6. 許容避難リスクと設計火源の決定	12
6.1. 火災成長係数 α が設計値 α_D を超える確率	12
6.2. 設計火源の火災成長係数	12
6.3. 設計火災成長係数 α_D の最大値	13
7. 設計火災シナリオへの許容避難リスクの配分	14
7.1. 防火設備システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ	14
7.2. 各シナリオへの部分許容リスクの配分	15
7.3. 設計火源の設定方法	17
7.4. リスク基盤の避難安全検証法の手続きのまとめ	18
8. リスク基盤の避難安全検証のケーススタディー	19
8.1. ケーススタディー：居室避難	19
8.2. ケーススタディー：事務所ビルの階避難	23
9. 全館避難の安全検証に関する検討	42
9.1. 全館避難設計の許容避難リスク	42
9.2. 避難階段の安全に関わるシナリオ	43
謝辞	45
Annex A 火災成長係数 α の確率密度分布	46
Annex B 出火率と空間面積	51
Annex C 空間用途別出火率比	52
Annex D 対数正規分布の確率密度関数	53
付録. 出火階の煙性状と避難時間の簡易計算法	58

[用語]

避難対象者	: ある空間で出火した時、避難が必要なエリアにいる在館者
避難安全基準	: 避難者が安全に避難できることを判定するための閾値
危険な火災	: 避難することが必要となる規模の火災（小火などを除く）
死傷者	: 火災による死亡者、傷患者（重傷だけでなく軽傷も含む）
避難リスク	: 火災発生による死傷者の期待値（= ‘危険な火災’ の発生確率×死傷者数）
許容避難リスク	: 避難リスクの許容値
許容死傷確率	: 火災により死傷者が発生する確率の許容値（=許容避難リスク／避難者数）
設計ベースの〇〇	: 出火が生じたことを前提としたときの〇〇
標準空間	: 許容避難リスクを定める上での基準（Benchmark）となる空間
シナリオイベントツリー	: 防火設備の作動／不作動により生ずるイベントツリー
設計火災シナリオ	: 避難安全検証のために想定される防火設備の作動／不作動のシナリオ
シナリオ生起確率	: あるシナリオが生起する設計ベースの確率
シナリオ許容避難リスク	: あるシナリオに割り当てられる許容避難リスクの値
シナリオ許容死傷確率	: あるシナリオに割り当てられる許容死傷確率の値
設計火源	: 避難安全検証のために設定される火源
火災成長係数	: 火源の発熱速度が時間の2乗に比例するとしたときの係数
最大発熱速度	: 火源の発熱速度が換気やスプリンクラーの効果で頭打ちになる値
SP 制御設計火源	: スプリンクラー（SP）が作動するまでもない火源の最大発熱速度
用途別出火率	: 空間用途による単位面積当たり ‘危険な火災’ の出火確率
出火率比	: 戸建住宅の出火率／任意の用途の出火率
SP	: スプリンクラー

[数式記号]

R	: 出火確率も含めた実際の避難リスク
R^D	: 設計ベースの（危険な火災の出火を前提とした）避難リスク
R_a	: 実際の許容避難リスク
$R_a^D(K)$: 避難対象空間における設計ベースの許容避難リスク
$R_a^D(K, i)$: 対象空間 K シナリオ i における設計ベースの許容避難リスク
P	: ‘危険な火災 (hazardous fire)’ の発生確率
P_i	: あるシナリオ (i) の生起確率
p_j	: 防火設備 j の作動確率
C	: 危険な火災が発生した場合の死傷者数の期待値
$C_0(K)$: 避難対象空間の在館者人数
p_{hf}	: ‘危険な火災’ の単位床面積当たりの発生確率（小火は除く）
p_{cas}	: 避難対象人数の死傷確率 (C/C_0)
$p_{cas}^a(K)$: 避難対象空間 K における許容死傷確率
$\bar{p}_{cas}(K, i)$: 対象空間 K のシナリオ i における死傷確率
$p_{cas}^a(K, i)$: 対象空間 K のシナリオ i における部分許容避難確率
A_f	: 出火室面積
Q	: 火源の発熱速度
α	: 初期火源成長因子
α_D	: 設計火源の初期火災成長因子
$f(\alpha)$: 初期火源成長因子の確率密度分布
$F(\alpha_D)$: 火災成長因子が α_D より小となる確率 ($\equiv \int_0^{\alpha_D} f(\alpha) d\alpha$)
t	: 時間
Q_{max}	: 設計火源の発熱速度の最大値
ρ	: 在館者密度
A	: 居室床面積
K	: 任意の避難対象空間
H	: 標準空間（ベンチマーク空間）