典型的なオフィスビルにおける階避難安全水準

建物火災に対する目標避難安全水準の分析 その3

TARGET SAFETY LEVEL OF EGRESS FROM FIRE FLOOR
IN TYPICAL OFFICE BUILDINGS

An analysis of target safety level for egress during building fires Part 3

水野 雅之^{*1}, 島村 誠^{*2}, 徳永 英^{*3}, 原田和典^{*4}, 若松孝旺^{*5}Masayuki MIZUNO, Makoto SHIMAMURA, Takeshi TOKUNAGA,
Kazunori HARADA and Takao WAKAMATSU

In this study, the target safety level of egress from fire floor was discussed. The calculation method defined in Ministry of Construction's Notification 1441 (2000) was analyzed by using the method of reliability engineering. The limit state function was selected by the difference between nominal margin of egress safety and actual, stochastic margin of egress safety. By examining the safety level of limit state function, the target safety index implied in the verification method is clarified for typical office building layout with single-side corridor. The results show that (1) the implied safety index is in the range of 2 to 3 fairly independent on the method of smoke control and floor area. (2) Possible combination of partial safety factors are proposed by 0.7, 4.8, 2.6 and 0.9 for fuel load density, escape start time, fire growth rate and smoke filling time.

Keywords : reliability engineering, egress safety, target safety index, acceptable probability of failure, partial safety factor, Monte-Carlo method

信頼性工学, 避難安全, 目標安全性指標, 許容失敗確率, 部分安全率, モンテカルロ法

1 はじめに

前報その1¹⁾, その2²⁾においては, 階避難安全検証法³⁾(以下, 検証法)における出火室からの避難安全水準についての考察を行った。その結果, 目標安全性指標は, 排煙方式と床面積に多少依存するが, おおむね1~3程度であり, 対応する許容失敗確率が5~10%となることを示した。本報においては, 階避難安全の目標水準をその2で示した居室避難の安全水準の分析と同じ方法により推定する。すなわち, 典型的な片コア式のオフィスビルについて, 階避難安全検証法をちょうど満たす設計案が有する階避難余裕時間のばらつきを近似的に求め, それを分析することにより, 検証法が目標とする安全水準(目標安全性指標, 許容失敗確率)を推定し, 適切な部分安全率の組合せを提案する。

2 安全水準の表現方法

居室避難の場合と同様に, 階避難においても, 検証法は2つのタイプA変数(在館者密度 p [人/㎡], 収納可燃物の発熱量密度 q_l [MJ/㎡])と6つのタイプB変数(歩行速度 v , 流動係数 N , 階避難開始時間 t_{start} , 収納可燃物の火災成長率 α_f , 内装用建築材料の火災成長率 α_m , 階煙降下時間 t_s)を有する。

ある設計案が検証法に適合するためには, オフィスビル規定の設計点 $(p_D, q_{lD}) = (0.125, 560)$ における避難余裕時間(以下, これを避難余裕時間の公称値と記す)が零以上となることが要求される[注1]。

$$t_{margin}(p_D, q_{lD}) = t_s - (t_{start} + t_{travel} + t_{queue}) \geq 0 \quad (1)$$

従って, 避難余裕時間の公称値が零となる設計案を集め, それらが有する安全水準を調べれば, それが即ち検証法が要求する安全水準となる。しかし, 避難余裕時間の公称値がちょうど零となるような設計案は稀であり, 分析対象として十分な数の標本を集められない。そこで, 図1に示すようにある特定の設計案に対する避難余裕時間 $t_{margin}(p, q_l)$ から, 避難余裕時間の公称値を差し引いたものを考え, 限界状態関数を次式で定義する。

$$G(x) = t_{margin}(x) - t_{margin}(x_D) \quad (2)$$

$$x = \{p, q_l; v, N, t_{start}, \alpha_f, \alpha_m, t_{s1}, t_{s2}\} \quad (3)$$

$$x_D = \{p_D, q_{lD}; v_D, N_D, t_{startD}, \alpha_{fD}, \alpha_{mD}, t_{s1D}, t_{s2D}\} \quad (4)$$

図1 限界状態関数 G の分布と検証法が要求する安全水準

^{*1} 東京理科大学 助手・博士(工学)
^{*2} 関東天然瓦斯開発(株)
(研究当時 東京理科大学 大学院生)
^{*3} 名古屋大学 大学院生
(研究当時 東京理科大学 学部生)
^{*4} 京都大学 助教授・博士(工学)
^{*5} 東京理科大学 教授・工博

Assistant, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Kanto Natural Gas Development Co., Ltd., M. Eng.
Graduate Student, Nagoya University
Assoc. Prof., Kyoto University, Dr. Eng.
Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

上記で定義した関数 $G(x)$ の分布を調べることで、検証法が求める安全水準を許容失敗確率 p_f と目標安全性指標 (G の平均値 μ_G を標準偏差 σ_G で割った値) $\beta_{target} = \mu_G / \sigma_G$ として定量化する⁴⁾[注 2]。

3 既存のオフィスビルプランの類型化

居室や階の床面積、居室の出入口や階段室の数等の建築設計パラメータの組合せは原理的には無数に存在する。しかし、用途と基本的プランを限定すれば、ある程度類型化することができる。オフィスビルの平面計画では、コア配置がいくつかのタイプに類型化されている⁵⁾。本研究では既存のオフィスビルから片コア式の基準階プランを持つ典型的な 26 事例 28 基準階⁶⁻¹¹⁾を対象に建築設計パラメータを調査し類型化する[注 3]。

居室避難安全に関するパラメータはその 2 ですすでに報告しているので、ここでは階避難安全にかかわる建築設計パラメータを調査した結果を示す。

図 2 に片コア式のプランを示す。階避難安全に関与する建築設計パラメータは、居室床面積の合計 A_{load} [m²]、階の居室数 N_{rooms} 、最大および最小の居室の床面積 $A_{room,max}$ 、 $A_{room,min}$ [m²]、階段までの最大歩行距離 l_i [m]、廊下の床面積 A_{co} [m²]、避難階段の数 N_{st} 、避難階段の床面積の合計 A_{st} [m²]、居室と廊下間の扉幅の合計 B_{load} [m]、階段への出口幅の合計 B_{st} [m]、天井高さ H_{room} [m] である。

これらの類型化にあたっては、居室床面積の合計 A_{load} を規模を表す基本的な設計変数と考え、 A_{load} と他の変数との相関関係を求めた。

図 2 片コア式の平面計画のモデル (階避難安全に関わる部分)

3.1 居室の数と床面積比

調査した全 28 事例について、居室数と居室床面積の合計との相関を図 3 に示す。防火区画の上限値である 1500m² を境に居室分割数の傾向が変化しており、居室床面積の合計が 1500m² 以下の事例では、大部屋使用の頻度が高い。一方、1500m² 以上の事例では複数の居室に分割する事例が多い。分割数の出現頻度は、1,500m² を境に 2 つのグループに分け、出現確率を求めると、図 3 中に記した値となる[注 4]。

分割を行った場合には、等分割されることはむしろ少ない。分割数が 2～4 の各々の場合について、居室の床面積の比率を示したのが図 4 である。これより、最大の居室床面積 $A_{room,max}$ 、最小の居室床面積 $A_{room,min}$ と居室床面積の合計との相関関係を次式で近似する。

(2 室使用の場合)

$$A_{room,max}/A_{load} = 1 - A_{room,min}/A_{load} \quad (5)$$

$$A_{room,min}/A_{load} = 9.68 \times 10^{-5} A_{load} + 0.019 \quad (6)$$

(3 室使用の場合)

$$A_{room,max}/A_{load} = 0.859 - 2.10 \times 10^{-4} A_{load} \quad (7)$$

$$A_{room,min}/A_{load} = 1.17 \times 10^{-4} A_{load} - 0.0189 \quad (8)$$

(4 室使用の場合)

$$A_{room,max}/A_{load} = 0.32 \quad (9)$$

$$A_{room,min}/A_{load} = 0.21 \quad (10)$$

3 室使用の場合には、残りの 1 室の居室床面積の比率 $A_{room,mid}/A_{load}$ は、式 (7)、(8) の算定値の和を 1 から差し引いた値として計算される。4 室使用の場合には、残りの 2 室の居室床面積の比率が等しいと想定し、式 (9)、(10) から $A_{room,mid}/A_{load} = 0.235$ と計算される。

図 3 居室数 N_{rooms} と居室床面積の合計 A_{load} [m²] との関係

図 4 居室床面積の分割比率

3.2 廊下の床面積

廊下の床面積の調査結果を図 5 に示す。居室床面積の合計が小さいときには、廊下床面積はきわめて小さくなり、200m² 以下ではほとんど廊下を設けない事例もある。また、居室床面積の合計が増加するに従って廊下床面積は増加するが、その傾向は大きく 2 つのグループに分かれ、十分な広さの廊下を設置した事例と、廊下床面積を切り詰めた事例との差は少なくない。ここでは、両者の平均を採り、次式で居室床面積の合計との相関関係を表す。

$$A_{co} = \begin{cases} 0 & (A_{load} < 200) \\ 0.2A_{load} - 40 & (200 \leq A_{load} < 500) \\ 0.085A_{load} - 17.25 & (500 \leq A_{load}) \end{cases} \quad (11)$$

図5 廊下の床面積

3.3 最大歩行距離

居室の最遠部から避難階段への出口までの歩行距離(図2に示す l_l)の調査結果を図6に示す。歩行距離は、居室床面積の合計に対して増加する傾向が見られ、おおむね次式で近似できる。

図6 最大歩行距離

3.4 避難階段の数、階段室の床面積

避難階段の数とその床面積の合計に関する調査結果を図7、図8に示す。ごく規模が小さいものを除けば、避難階段を2つ設置する例が多いが、3～4箇所の階段を設ける事例も見られる。図7、図8の元である調査図面から、個々の階段への出口幅を正確に読み取ることができなかったが、避難階段の床面積が大きいものはその階段への出口幅も大きい傾向がある。従って、各事例における避難階段の床面積の合計を求め、避難階段一箇所当たりの床面積を14.7m²として、階段への出口幅の合計が一致するように階段数を次式で与える[注5]。

$$N_{st} = 0.147 A_{load}^{0.402} \quad (13)$$

従って、式(13)から小数点以下を切り上げて N_{st} を整数値で求め、

$$A_{st} = 14.7 N_{st} \quad (14)$$

とした。また、階段への出口幅は一箇所当たり0.9mとした。

図7 避難階段の数

図8 避難階段の床面積の合計

3.5 排煙に関する設計パラメータ

排煙関係の設計パラメータは、公表された図面からは読み取ることができないが、排煙設備技術指針に従う機械排煙もしくは自然排煙が設置されている場合¹²⁾と、蓄煙の場合の3種類を想定した。設定値を表1に示す。ただし、排煙時の給気口として避難時に少なくとも開放が期待される出入口1つを設定し、その開口面積を1.8m²とした。

表1 排煙に関する設計値

設計値	居室床面積 A_{room} との関係式
(自然排煙) 排煙口の有効面積[m²]	$A_{room}/50$
排煙口の開口高さ	0.5m
給気口の有効面積	$(0.9 \times 2.0) \text{ m}^2$
(機械排煙) 排煙風量[m³/min]	$1.0 A_{room}$

3.6 居室避難に関する設計パラメータ

階避難の検討を行うにあたっては、出火室からの避難が前段で必要となる。これに関するパラメータはその2で示した下記の値とする。

表2 片コア式オフィスビルにおける典型的な居室の設計値¹⁾

設計値	居室床面積 A_{room} との相関式
奥行き幅比	$(Y/X)=6.32 A_{room}^{-0.428} [-]$
出口数	$N_{doors}=(A_{room}/200)+1.62 [-]$ (小数1位四捨五入)
出口幅	$B_{room}=0.9 N_{doors} [-]$
居室天井高さ	$H_{room}=2.66 [\text{m}]$

4 分析方法

分析対象は、図2に示す片コア式のオフィスビルの基準階とし、居室床面積の合計 A_{load} を200～3000m²の範囲で変化させて分析を行う。その際に下記の前提条件をおいた。

- 廊下は見通しが利き、かつ覚醒状態で使用される用途なので、出火室からの避難が行われた情報が非出火室にも伝達される。
- 居室と廊下間の扉は、遮煙性の要求されない防火扉[注6]とする。すなわち、避難時間中に廊下へ延焼拡大することは考えず、扉から漏れた煙が充満して廊下に煙が降下する時点をもって避難限界時間とする。

以上の前提の下、表3に示す手順によりモンテカルロシミュレーションを行った。まず始めに、居室床面積の合計 A_{load} を計算条件として設定する。次に、居室の分割数を図3中に示す出現確率に従って確率現象として設定し、そして各居室の床面積、廊下の床面積、階段数といった建築設計パラメータを3節で導いた相関式により設定する。以上で、建築設計案が確定する。次に、(1)～(9)の手順に従って、モンテカルロシミュレーションを行う。(1)ある試行における

出火室を、分割した居室の床面積の比に応じて確率的に選択する。

(2) タイプAおよびタイプB変数をその1で示した確率密度関数(表4参照)に応じてランダムサンプリングしておく。(3) 選択した出火室からの居室避難開始時間は、その1で示したように、検証法に規定の避難開始時間の計算式に補正係数 f_{tstart} を掛けた値

$$t_{start} = f_{tstart} \sqrt{A_{room}} / 30 \quad (15)$$

$$f_{tstart} = \text{LogNormal}(2.0, 2.61) \quad (16)$$

とした。(4) 出火室からの避難完了時間は、検証法に規定の計算式と同じく、居室出口までの歩行時間と居室出口の通過時間を加えたものとした。ただし、歩行速度 v と流動係数 N はランダムサンプリングした値を用いた。(5) 非出火室からの避難開始時間は、前提条件として片コア式で見通しがよいことから、出火室からの避難行動の騒ぎが非出火室にも速やかに伝わると考えた。従って、出火室からの避難者が廊下に十分滞留すると考えられる時刻として、出火室の避難開始時間と完了時間の中央値を採用し、これを非出火室の避難開始時間とした。(6) 階避難完了時間は、非出火室からの避難者全員が避難階段に収容されるまでの時間として、階段までの歩行時間と階段への出口の通過時間の和とした。ただし、ここでも歩行速度 v と流動係数 N は検証法の規定値ではなくランダムサンプリングした値を用いた。

煙降下時間(7)、(8)に関しては、検証法に規定の計算式を用いたが、 q_l および α_m にはランダムサンプリングした値を用い、 α_f 、 t_s の計算式にその1で求めた補正係数 $f_{\alpha f}$ 、 f_{t_s} をランダムサンプリングした値を掛けた。

以上の計算により、各試行に対して階避難余裕時間を得る。これを3000回繰り返すことにより、階避難余裕時間の確率密度分布が得られる。一方、上記の計算とは独立に、設定された建築設計案に対して階避難余裕時間の公称値を計算しておき、(9)で求めた階避難余裕時間から差し引くことにより、限界状態関数 G の確率密度分布を得る。

5 分析対象ならびに結果

5.1 シミュレーション例

例として、居室床面積の合計を500 m^2 、3分割使用の場合のモンテカルロシミュレーション結果を図9に示す。検証法の規定値を用いた場合の階避難余裕時間は5.88分である。モンテカルロシミュレーションによる階避難余裕時間は、平均値が45.9分、標準偏差が10.5分である。限界状態関数 G の目標安全性指標を求めると、

$$\beta_{target} = (45.9 - 5.88) / 10.5 = 3.24 \quad (17)$$

許容失敗確率は、3000回の試行で2回のみ G が負値となったので

$$p_f = 2/3000 (= 0.067\%) \quad (18)$$

となり、非常に小さい。

図9 モンテカルロシミュレーションの例 ($A_{load}=500$ 、居室・廊下とも蓄煙、 $A_{room,max}=377\text{m}^2$ 、 $A_{room,min}=19.9\text{m}^2$ 、 $A_{co}=60\text{m}^2$ 、 $n_{st}=2$)

表3 計算手順

項目		算定式等
居室床面積の合計 (A_{load}) の設定		(条件として設定)
居室の分割、廊下床面積、階段数、最大歩行距離などの建築設計パラメータの設定		居室分割数の出現確率、 A_{load} との相関式(3節)
(1) 出火室の設定		図3に示す比率に応じて出火室を選択
(2) 確率変数のサンプリング		表4を参照
(3) 居室避難開始時間		式(15)、(16)
(4) 居室避難完了時間		検証法と同じ(変数はランダムサンプリング)
(5) 非出火室の避難開始時間		出火室の避難開始時間と完了時間の平均
(6) 階避難完了時間 t_e		検証法と同様(変数はランダムサンプリング)
(7) 居室の煙降下時間 t_{s1} (廊下に煙が漏れ始める時間)		検証法と同様(変数はランダムサンプリング)
(8) 廊下の煙降下時間 t_{s2}		検証法と同様(変数はランダムサンプリング)
(9) 階避難余裕時間 $t_{margin} = t_s - t_e$		
指標値	階避難余裕時間の公称値 $t_{margin,D} = t_{s,D} - t_{e,D}$	

表4 タイプA・B変数の確率密度関数(対象: オフィスビル)¹⁾ [注7]

タイプ	確率変数	確率密度関数	規定値	
A	在館者密度： p [persons/m ²]	LogNormal(0.122, 0.070)	0.125	
	収納可燃物の発熱量密度： q_l [MJ/m ²]	LogNormal(235, 65.4)	560	
B	歩行速度： v [m/min]	Normal(73.1, 9.51)	72	
	流動係数： N [persons/m/min]	Normal(111, 18.4)	90	
	出火室の避難開始時間の補正係数： f_{tstart} [-]	LogNormal(2.00, 2.61)	1	
	収納可燃物の火災成長率の補正係数： $f_{\alpha f}$ [kW/s ²]	LogNormal(0.442, 0.521)	1	
	内装用建築材料（準不燃）の火災成長率： α_m [kW/m ²]	LogNormal(0.034, 0.044)	0.014	
	煙降下時間の補正係数： f_{ts} [-]	蓄煙	$5.64A_{room}^{-0.144} + \text{Normal}(0, 0.586)$	1
		自然排煙	LogNormal(2.350, 0.470)	1
		機械排煙	LogNormal(2.202, 0.875)	1

5.2 居室規模と排煙方式毎の安全性の分析

居室および廊下での排煙方式として、蓄煙、自然排煙、機械排煙の組合せ（計9通り）毎に、居室床面積の合計 A_{load} を 200～3000 m^2 の範囲で変化させて目標安全性指標と許容失敗確率の変化を調べた。結果は、居室の分割数毎に計算した結果を、居室の分割数の出現率で重み付け平均して求めた。以下に結果を示すが、居室を自然排煙または機械排煙とする場合には、廊下での排煙方式に関わらず、結果がほぼ同じとなったので、居室を排煙する場合は廊下を蓄煙とした場合のみを示す [注8]。すなわち、居室と廊下での排煙方式の組合せとして、表5において「-」が付された組合せについても検討は行ったが本論文では記述を省略する。また、これらの場合には、居室の分割数毎の結果の違いが、結果の変動に大きく影響するため、居室分割数毎の結果も併記する。

表5 居室と廊下での排煙方式の組合せ

居室		廊下		
		蓄煙	自然排煙	機械排煙
居室	蓄煙	5.2.1 節	5.2.1 節	5.2.1 節
	自然排煙	5.2.2 節	-	-
	機械排煙	5.2.3 節	-	-

5.2.1 居室を蓄煙とした場合

居室を蓄煙とし、廊下を蓄煙、自然排煙、機械排煙のいずれかとした場合の分析結果を図10に示す。各グラフにおいて、横軸は居室床面積の合計 A_{load} であり、左側縦軸が目標安全性指標、右側縦軸が許容失敗確率である。

廊下を蓄煙とした場合、居室床面積の合計がごく小さいものを除けば、目標安全性指標はおおよそ2～3の間にある。居室床面積の合計が1900 m^2 付近で、目標安全性指標の値に不連続な変化が見られるが、床面積が1900 m^2 で居室の出口数が増える結果、廊下への煙流出量が不連続に変化するためである。許容失敗確率は0.3%程度である。

廊下を自然排煙または機械排煙とした場合には、図10(2)(3)に示すように、ごく小規模なものを除いては目標安全性指標はほぼ3程度となる。許容失敗確率は自然排煙の場合はほとんど零、機械排煙の場合でも0.5%以下である。本論で扱った条件では、防火扉の隙間から少量の煙が廊下に漏れる条件なので、廊下での排煙量が常に上回っている。すなわち、居室と廊下の間の開口部に防火扉を設け、廊下に排煙設備を設けると、避難開始時間等の他の設計変数にあまり依存せずに安全性が決まる。

図10 居室を蓄煙とした場合の目標安全性指標と許容失敗確率（左から廊下の排煙方式を、蓄煙、自然排煙、機械排煙とした場合）

5.2.2 居室を自然排煙、廊下を蓄煙とした場合

居室を自然排煙とし、廊下を蓄煙とした場合の目標安全性指標と許容失敗確率を図11に示す。目標安全性指標は概ね1.5～3、許容失敗確率はほぼ0%である。居室床面積の合計が1500 m^2 を境として、目標安全性指標に不連続が生じている。これは、1500 m^2 までは大部屋使用の頻度（77%）が高いが、1500 m^2 を超えると少なくとも2以上に居室を分割して使用することを反映している。図12は、敢えて居室の分割数を1～4のそれぞれに固定したまま計算を行った結果であるが、大部屋使用の場合が最も目標安全性指標が大きくなるが、分割すると目標安全性指標は小さくなることと整合する。すなわち、検証法では事務室を大部屋使用するプランに対して高い安全水準を要求している。

図11 居室を自然排煙、廊下を無排煙とした場合の目標安全性指標と許容失敗確率

図12 居室分割数 $N_{rooms}=1\sim4$ 毎の目標安全性指標と許容失敗確率

5.2.3 居室を機械排煙とした場合

居室を機械排煙、廊下を蓄煙とした場合の目標安全性指標と許容失敗確率を図13に示す。自然排煙と同様に、目標安全性指標は2～3の間にある。機械排煙の場合には、居室床面積の合計が1100 m^2 の部分で不連続が生じている。図14は、居室の分割数を敢えて1～4のそれぞれに固定したまま計算を行った結果である。大部屋使用の場合に床面積が1100 m^2 で不連続が生じている。不連続の原因は、床面積1100 m^2 で居室の排煙量が煙発生量を上回るためである。

図13 居室を機械排煙、廊下を蓄煙とした場合の目標安全性指標と許容失敗確率

図14 居室分割数 $N_{rooms}=1\sim4$ 毎の目標安全性指標と許容失敗確率

6 変数の感度と最尤限界点に関する考察

居室と廊下の排煙方式（9通り）と居室分割数（ $N_{rooms}=1\sim4$ ）の組合せ計 36 通りについて、確率変数の階避難余裕時間に対する感度の変化をその 2 と同じ方法により調べた。以下、その特徴的な傾向を示す。また、本節においても、居室分割数毎にシミュレーションを行った。ただし、最終的に最尤限界点に対応する部分安全率を決定する時には、設計上の利便を考慮して、居室分割数 1~4 に対する結果を平均した値を提案する。

6.1 居室を蓄煙とした場合

居室、廊下ともに蓄煙とした場合の感度の変化を図 15 に示す（居室分割数 2 の場合）。全体的な傾向として、相対感度は居室の煙降下時間の補正係数 f_{ts1} 、廊下の煙降下時間の補正係数 f_{ts2} 、収納可燃物の火災成長率の補正係数 $f_{\alpha f}$ 、避難開始時間の補正係数 f_{tstart} 、収納可燃物の発熱量密度 q_l の順である。ただし、規模が小さいものは避難開始時間の補正係数 f_{tstart} の感度が高くなる。また、図は省略するが、居室分割数が多くなると f_{ts2} の感度が増し、廊下の煙制御の重要度が增加する。

図 15 入力変数の相対感度の比較（居室、廊下ともに蓄煙、居室分割数 2）

廊下を自然排煙とし、居室分割数を 2 とした場合は図 16 に示すように、 f_{ts2} が支配的である。廊下を機械排煙とする場合も傾向は同じである。

図 16 入力変数の相対感度の比較（居室は蓄煙、廊下は自然排煙、居室分割数 2）

6.2 居室を排煙した場合

居室を自然排煙、廊下を蓄煙とした場合の感度を図 17 に示す（居室分割数 2 の場合）。感度は、階床面積の規模が小さい場合には $f_{\alpha f}$ 、 q_l 、 f_{ts1} の順番であるが、規模が大きくなると f_{ts1} の感度が支配的となる。廊下を排煙した場合にもほぼ同様であるが、階床面積の規模が小さいかまたは居室分割数が 4 の場合に限り f_{ts2} の感度が支配的となる傾向がある。また、居室を機械排煙とした場合には、感度は若干異なるが、 $f_{\alpha f}$ 、 q_l 、 f_{ts1} の 3 変数の感度が支配的となる。

図 17 入力変数の相対感度の比較（居室は自然排煙、廊下は蓄煙、居室分割数 2）

以上の分析に基づき感度が高い変数について、最尤限界点に対応する部分安全率をその 2 と同じ方法で求める。例として、図 15 に示した居室、廊下ともに蓄煙、居室分割数 2 の場合に感度が高い f_{ts1} の最尤限界点に対応する部分安全率を分析した結果を図 18 に示す。最尤限界点に対応する部分安全率は、階床面積の規模が小さい場合に小さい値となるが、規模が大きくなると 2 に漸近し、平均値は 1.54 である。居室分割数を 1, 3, 4 とした場合には、最尤限界点に対応する部分安全率の平均値は順に 1.71, 0.40, -0.06 であり、平均すると 0.90 となる。従って、部分安全率として 0.90 を採用すれば検証法と同等の安全水準を確保できる[注 9]。

図 18 最尤限界点に対応する部分安全率（居室、廊下ともに蓄煙、居室分割数 2、居室の煙降下時間の補正係数 f_{ts1} ）

居室、廊下での排煙方式、居室分割数による全ての組合せについて同様の分析を行った結果を表 6 に示す。排煙方式による差は、居室避難ほど顕著でなく、 q_l に対して 0.7 程度、 $f_{\alpha f}$ に対して 2.6 程度、 f_{tstart} に対して 4.8、 f_{ts} （居室、廊下とも）に対して 0.9 程度を採れば、検証法と同等の安全水準を確保できる[注 10]。

表 6 最尤限界点に対応する部分安全率

q_l		廊下		
4.97		蓄	自	機
居室	蓄	0.657	—	—
	自	0.530	0.027	-0.047
	機	0.626	0.019	0.013

f_{af}		廊下		
1.07		蓄	自	機
居室	蓄	0.223	—	—
	自	0.933	0.014	0.060
	機	2.631	0.010	0.016

f_{ts1}		廊下		
*		蓄	自	機
居室	蓄	0.897	—	—
	自	0.260	0.024	0.516
	機	0.386	0.003	0.004

f_{ts2}		廊下		
**		蓄	自	機
居室	蓄	0.910	-0.006	3.230
	自	—	0.003	1.609
	機	—	—	—

* f_{ts1} の検証法の規定値の部分安全率は、蓄煙：2.23 ($A_{room}=500\text{m}^2$ とした時)、自然排煙：2.87、機械排煙：1.37。* f_{ts2} の検証法の規定値の部分安全率は、蓄煙：3.25 ($A_{co}=100\text{m}^2$ とした時)、自然排煙、機械排煙は各々 f_{ts1} と同値。

7 結論

階避難安全検証法のうち、出火階からの避難安全の部分について要求される目標安全性指標と許容失敗確率を典型的な片コア式のオフィスビルについて分析した。その結果、以下の結論を得た[注 11]。

(1) 目標安全性指標は、排煙方式と床面積に多少依存するが、おおむね2～3程度である。対応する許容失敗確率は0.5%以下である。

(2) 階避難に関しては、収納可燃物の発熱量密度に0.7 σ 、避難開始時間に4.8 σ 、火災成長率の補正係数に2.6 σ 、煙降下時間に0.9 σ 程度の部分安全率を採ると最尤限界点と設計点がほぼ一致し、パランスのよい計算体系となり得る。

また、上記(1)について、その2で報告した出火室からの避難安全の部分について要求される安全水準(目標安全性指標おおむね1～3、対応する許容失敗確率5～10%)と比較すると、出火室からの避難安全の部分の方が、やや高い安全水準が要求されている。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京理科大学若松研究室に所属した川畑仁生君および鎌崎晃君には、既存オフィスプランの分析およびモンテカルロシミュレーションにご尽力頂いた。なお、本研究費の一部は、平成13年度文部科学省科学研究費(基盤研究 12555163)の補助を受けた。紙面を借りて感謝申し上げる次第である。

記号

A_{co}	廊下の床面積 [m^2]
A_{load}	居室の合計床面積 [m^2]
A_{room}	居室の床面積 [m^2]
$A_{room,max}$	最大の居室の床面積 [m^2]
$A_{room,mid}$	最大および最小でない居室の床面積 [m^2]
$A_{room,min}$	最小の居室の床面積 [m^2]
A_{st}	避難階段の床面積 [m^2]
B_{load}	居室と廊下の間の扉幅の合計 [m]
B_{room}	居室の出口幅 [m]
B_{st}	階段への出口幅の合計 [m]
f_{t1}	出火室での煙降下時間の補正係数 [-]
f_{t2}	廊下での煙降下時間の補正係数 [-]
f_{tstart}	避難開始時間の補正係数 [-]
f_{cf}	避難開始時間の補正係数 [-]
G	限界状態関数 [min]
H_{room}	居室の天井高さ [m]

l_i	避難出口までの最大歩行距離 [m]
p	在館者密度 [persons/ m^2]
pdf	確率密度関数
P_f	許容失敗確率 [%]
q_l	収納可燃物密度 [MJ/m^2]
x	入力変数ベクトル
N	流動係数 [persons/ $\text{m} \cdot \text{min}$]
N_{doors}	居室の出口数
N_{rooms}	階の居室数
N_{st}	避難階段の数
t_{margin}	避難余裕時間 [min]
t_{queue}	出口の通過時間 [min]
t_s	階煙降下時間 [min]
t_{s1}	出火室での煙降下時間 [min]
t_{s2}	廊下での煙降下時間 [min]
t_{start}	避難開始時間 [min]
t_{travel}	歩行時間 [min]
v	歩行速度 [m/s]
x	確率入力する変数
Y/X	室の奥行き幅比 [-]
ギリシャ文字	
α_f	収納可燃物の火災成長率 [kW/s^2]
α_m	内装用建築材料の火災成長率 [kW/s^2]
β_{target}	目標安全性指標
μ_G	限界状態関数の平均値
σ_G	限界状態関数の標準偏差
添字	
D	公称値(検証法の規定値)
$MPFP$	最尤限界点

注釈

[1] 関数 t_{margin} の具体的な計算方法は、紙面の都合で割愛するので文献3を参照されたし。

[2] 図1の方法は、近似的にしか成立しないが、実用的問題(β が極端に大きくならない場合)では誤差は無視できると考える。

[3] 調査対象としたオフィスプランは、その2で用いた15事例(17基準階)および下記の11事例である。[東京大林ビル、第2丸善ビル、安田生命本社、青山タワービル、長井インターナショナルビル、住友生命大分ビル、西大久保市街地店舗付住宅、新阪急ビル(大阪)、天神ビル(福岡)、第一生命ビル(大阪)、Wビル] (事例名称は引用文献に記載の通りとした。)

[4] 今回の調査事例28件では、充分な標本数とは言いがたいが、面積区画の基準等を鑑みると一般的傾向は正しく表していると考えた。

[5] 階段の数そのものは、調査データとの一致度が悪くなるが、出口幅の合計の一致度を優先させた結果である。ちなみに、避難階段の床面積の合計と居室床面積の合計との相関関係を表す式を直接的に求めると $A_{st}/A_{load}=2.16A_{load}^{-0.60}$ なる関係を得る。

[6] 遮煙性のない防火扉とは、建築基準法施行令112条14項第1号に規定される構造の防火扉を意味する。

[7] 表4に示す確率密度関数は、参考文献1)においてオフィスビルで想定される火災状況や在館者の避難状況を考慮に入れて調査結果を整理した値である。

[8] 居室を自然排煙または機械排煙とすると、シミュレーションを行った条件では、廊下への煙流出量が極めて少なくなることが原因である。

[9] 例えば図3が示すように、建築設計解の実例では基準階床面積の規模や居室分割数に偏りがあると予想されるが、本論では全ての分析条件から得られた結果を等しく取り扱い平均値を求めた。この他にも、例えば分析条件の発現確率に基づいた重み付けを与えて計算する方法、全ての分析条件に対して検証法と同等以上の安全水準を最大限確保するために最大値を採る方法などが考えられる。

[10] 上記の結論は典型的な片コア式のオフィスビルの居室について導いたものであり、より一般化するためには異なるコア配置、室用途についての分析が今後必要である。

[11] 上記の結論は典型的な片コア式のオフィスビルの基準階について導いたものであり、より一般化するためには異なるコア配置、室用途についての分析が

今後必要である。また、検証法導入後に設計される典型的なオフィスビルは、本研究で収集したサンプルと若干異なる可能性もあり、今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 水野雅之, 島村誠, 徳永英, 西田朋子, 南部晶子, 原田和典, 若松孝旺, 「階避難安全検証法に規定される特性値および予測式に含まれる安全率に関する考察ー建物火災に対する目標避難安全水準の分析 その1」, 日本建築学会計画系論文集, 第563号, pp.1-8, 2003.1
- 2) 水野雅之, 島村誠, 徳永英, 原田和典, 若松孝旺, 「典型的なオフィスビルにおける居室避難安全水準ー建物火災に対する目標避難安全水準の分析 その2」, 日本建築学会環境系論文集, 第566号, pp.17-23, 2003.4
- 3) 「階避難安全検証法に関する算出方法を定める件」, 平成12年建設省(現, 国土交通省)告示第1441号、および、国土交通省住宅局建築指導課、国土交通省建築研究所、日本建築主事会議、(財)日本建築センター編集、防火材料等関係団体協議会編集協力、2001年版避難安全検証法の解説および計算例とその解説、井上書院、2001.3
- 4) 市川昌弘: 構造信頼性工学ー強度設計と寿命予測のための信頼性手法ー, 海文堂出版, 1988
- 5) (財)日本建築センター、新・建築防災計画指針, pp.45, 1995
- 6) 日本建築学会: 第2版 コンパクト建築設計資料集成, 丸善, 1994
- 7) 清水建設株式会社: 建築計画・設計シリーズ37 新・事務所ビル, 市ヶ谷出版社, 2000
- 8) 株式会社日建設計: 建築計画・設計シリーズ38 新・超高層事務所ビル, 市ヶ谷出版社, 2000
- 9) 日本建築学会: 建築設計資料集成8 建築ー産業, 丸善, 1981
- 10) 日本建築学会: 建築設計資料集成3, 丸善, 1974
- 11) 新建築11, 株式会社新建築社, 1998
- 12) (財)日本建築センター、新・排煙設備技術指針、1987年度版

(2003年2月10日原稿受理, 2003年8月4日採用決定)