リスク概念に基づく建築物の設計可燃物密度

DESIGN FIRE LOAD DENSITY BASED ON RISK CONCEPT

大宮 喜文*, 田中 哮義**, 野竹 宏彰***

Yoshifumi OHMIYA, Takeyoshi TANAKA and Hiroaki NOTAKE

It is quite common in fire safety codes of buildings that the higher or the larger the building, and the larger the number of occupants, the more strict the provisions applied. This, of course, intends to reduce the probability and the potential size of fire loss. Although the consistency of the principle and the attainable level of the prescriptive provisions of the existing codes is questionable, the favorable interpretation of their intention will be expressed in a scientific term as “to control fire risk under a certain level”, that is, letting R be the fire risk, P_L be the probability of fire loss occurrence, S_L be the potential size of the loss, and R_a be the acceptable fire risk,

$$R = P_L S_L \leq R_a$$

By so considering, many provisions can be interpreted in a rational manner. For example, the fire resistance requirements on principal structural members intends to control the fire risk by lowering P_L ; compartmentation and shaft sealing by limiting S_L as well as to lowering P_L ; provisions for safe escape routes are not imposed, or at least very lightly if any, for small buildings such as family dwellings because the potential size of life is so small. Under above concept, calculation method of design fire load density was developed and case study by proposed method was carried out in this paper.

Keywords: Fire load density, Fire resistance requirement, Fire risk, Failure probability, Probability distribution

可燃物密度, 要求耐火時間, 火災リスク, 崩壊確率, 確率分布

1. はじめに

これまで建築基準法の防火関係規定は、一定規模以上の建築物の構造部材に仕様のなかたちで規模や高さに応じた耐火性能を要求してきた。例えば、主要構造部の柱に対しては、建築物の最上階から4層までは1時間、5層から14層までは2時間、15層以上では3時間の耐火時間が要求されている。一般には大規模な建築物ほど火災により倒壊した場合の影響が大きいため火災損害リスクの観点からみれば、このように層数の増加に従い耐火時間が厳しくなるのは合理的と言える。しかし、要求される耐火時間の与え方は層数に対応して1時間刻みで定められているため、1階層分の違いにより突如1時間の耐火時間のギャップが生じる階があるなど、建築物の設計上、解消が望まれる課題がある。一方、性能の耐火設計では設計火災に基づいて個々の建築物条件下での火災性状を評価し必要に応じた耐火性能を確保する方法がとられる¹⁾²⁾。設計火災を決定する最も重要な要素の一つである可燃物条件は、これまでに行われた可燃物密度の実態調査研究などを基に設定されている³⁾。しかし、可燃物密度の考え方にリスクの概念は存在せず、各用途ごとに一律に与えられることが一般的であった。

そこで本稿では、建築物の許容火災リスクは建築物の規模や階数によらず一定であるべきという前提に立脚し、建築物の許容火災リスクの計算手法を提案し、建築物の諸条件に応じた建築物の火災リ

スクを許容値以下に抑えるための設計可燃物密度の設定方法を検討する。

2. 建築物の許容火災リスクの考え方

2. 1 建築物の設計火災

現在、建築物の性能の耐火設計に用いる設計火災は、図1に示されるような発熱速度の時間的経過を経る火災を想定している。すなわち、火災初期には発熱速度が火災経過時間の2乗に比例して成長し、その後、換気あるいは可燃物の条件により制約される上限値に達して一定になり、可燃物が燃え尽きるまで発熱速度が維持されるという想定である。

図1 設計火災の与え方

* 独立行政法人建築研究所防火研究グループ
主任研究員・工博

** 京都大学防災研究所 教授・工博

*** 清水建設㈱和泉研究室 研究員

Chief Researcher, Building Research Institute, Dr. Eng.

Prof., DPRI, Kyoto University, Dr. Eng.

Researcher, Izumi Research Institute, Shimizu Corp.

建築物内の在館者の避難安全性を評価する場合には、 t^2 火源 ($Q = \alpha t^2$) で示される火災初期の発熱速度が重要である。一方、建築物の耐火時間など構造安定性を評価する場合には、発熱速度の上限値が継続する時間が重要であり、この時間が長いほど、構造部材に要求される耐火性能も高くなる。この火災が継続する時間は火災区画内に持ち込まれる可燃物の潜在的発熱量の総量を発熱速度で除して求められるので、可燃物密度の設定値が直接的に要求耐火時間に影響することになる。

1) 可燃物密度分布

当然のことながら、建築物の室内に持ち込まれる可燃物の密度は、室の使用方法によって、また経年的にも変化し、一般には確率的分布を示すことになる。図2は、事務用途の室の可燃物密度分布の例を示したものである。図2の例のように建築物内に持ち込まれる可燃物密度 $w(\text{kg/m}^2)$ は対数正規分布に従う傾向を持つ³⁾。すなわち $\ln w$ が正規分布に従うことになるので、確率密度関数は、

$$\Psi(\ln w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln w}} \exp\left\{-\frac{(\ln w - \mu_{\ln w})^2}{2\sigma_{\ln w}^2}\right\} \quad (1)$$

と近似できる^{4)~6)}。ただし、 $\mu_{\ln w}$ 、 $\sigma_{\ln w}$ は、それぞれ $\ln w$ の平均値および標準偏差である。これらは、 μ_w 、 σ_w をそれぞれ可燃物密度の平均値および標準偏差とすれば、

$$\mu_{\ln w} = \ln \frac{\mu_w}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w}\right)^2}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\ln w} = \sqrt{\ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w}\right)^2\right\}} \quad (3)$$

となる。

図2 事務所の可燃物密度分布³⁾

2) 火災継続時間分布

耐火設計で問題となる盛期の火災継続時間 t (sec) は、区画内に持ち込まれる可燃物総量と可燃物の燃焼による重量減少速度（燃焼速度）から次のように計算できる。

$$t = \frac{W}{m_b} = \frac{A_{FLR} w}{m_b} \quad (4)$$

ここに、 W 、 m_b 、 A_{FLR} はそれぞれ総可燃物量(kg)、燃焼速度(kg/s)、空間床面積(m^2)である。さらに、

$$S \equiv \frac{A_{FLR}}{m_b} \approx \frac{A_{FLR}}{0.1A\sqrt{H}} \quad (5)$$

とおくと、

$$t = S \cdot w \quad (6)$$

であるから

$$\ln t = \ln(S \cdot w) = \ln S + \ln w \quad (7)$$

となる。よって、火災継続時間は、可燃物と同様の確率分布型を示し、 $\ln w$ が式(1)の正規分布 $[\mu_{\ln w}, \sigma_{\ln w}]$ に従うとき、 $\ln t$ は式(1)の分布を $\ln S$ だけ右に平行移動した正規分布 $[\mu_{\ln t} + \ln S, \sigma_{\ln t}]$ に従うこととなる。従って、火災継続時間の平均および標準偏差をそれぞれ $\mu_{\ln t}$ および $\sigma_{\ln t}$ とすれば確率密度関数は、

$$\Psi(\ln t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln t}} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu_{\ln t})^2}{2\sigma_{\ln t}^2}\right\} \quad (8)$$

となる。ここで $\mu_{\ln t}$ および $\sigma_{\ln t}$ は

$$\mu_{\ln t} = \mu_{\ln w} + \ln S = \ln \frac{\mu_w}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w}\right)^2}} + \ln S = \ln \frac{\mu_w S}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\ln t} = \sigma_{\ln w} = \sqrt{\ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w}\right)^2\right\}} \quad (10)$$

と表せる。更に、

$$\tau \equiv \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \quad (11)$$

において正規化すれば、 τ は $[0, 1]$ の標準正規分布に従い、式(8)は

$$\phi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) \quad (12)$$

と変換できる。

2. 2 建築物の許容火災リスク

日本に限らず、各国の建築法規は建築物の高さや規模が大きいかほど高い耐火性能を要求している。これは極めて経験的な形であるにしろ、建築物が火災で倒壊した場合の潜在的損害が考慮に入れられ、潜在的損害が大きい建築物ほど倒壊のリスクを低減することが意図されるものと考えられる。戸建住宅などで耐火性がそれ程求められていないのは、火災が発生した場合の倒壊リスクが高い場合でも、倒壊による潜在的損害が小さいためと考えられる。ここでは火災リスクを火災によって建物構造が崩壊することによる損害の期待値と定義し、火災リスクは建築物の高さや規模などに依らず一定の許容火災リスク R_a 以下でなくてはならないものと仮定する。すなわち、

$$R = P_L S_L \leq R_a \quad (13)$$

ここで R : 火災リスク、 P_L : 火災発生確率、 S_L : 火災損害の潜在的大きさである。

さて、火災で建物構造が崩壊することによる損害が発生するのは、火災が発生し成長して盛期火災になり、消防による鎮火が失敗し構

造が火熱に耐えられなくて崩壊するという事象が連鎖した場合である。従って火災損害の発生確率 $P_L(-)$ は

$$P_L = \delta P_{Fire} P_{FO} P_{SUP} P_{fail} \quad (14)$$

となる。ここに δ は安全率によるリスク低減係数(-), P_{FO} は出火した火災が火盛り期に成長する確率(-), P_{SUP} は消防が火災鎮圧に失敗する確率(-), p_{fail} は崩壊確率(-)である。火災発生確率 $P_{Fire}(-)$ は、空間規模と使用期間に比例すると考えるのが自然であるから

$$P_{Fire} = P_F A_{FLR} Y_L \quad (15)$$

とおける。ここで、 P_F は単位床面積当たり単位期間当たりの火災発生確率(1/m²年), A_{FLR} は階床面積(m²), Y_L は耐用年数(年)とする。

ここで、図3に示すように、各階毎に同じ床面積 A_{FLR} を持つ多層の建築物を想定し、火災が発生した階で主要な構造部が崩壊した場合、その火災階より上方の階についても使用が不可能となると考えると、潜在的火災損害 S_L は、

$$S_L = N A_{FLR} I \quad (16)$$

である。ただし、 N は火災階より上方の建物階数(階), I は建築物重要度(-)である。

図3 火災リスクの想定条件

任意の2つの建築物について高さや規模に拘わらず火災による崩壊に伴う許容火災リスクが同等であるべきと考え、式(14)~(16)より

$$R_a = \delta \bar{P}_F \bar{A}_{FLR} \bar{P}_{FO} \bar{P}_{SUP} \bar{p}_{fail} \bar{N} \bar{A}_{FLR} \bar{Y}_L \bar{I} \quad (17)$$

$$= \delta \bar{P}_F \bar{A}_{FLR} \bar{P}_{FO} \bar{P}_{SUP} \bar{p}_{fail} \bar{N} \bar{A}_{FLR} \bar{Y}_L \bar{I}$$

と表現できる。ここで R_a は任意の建築物の許容火災リスク(-)である。上式の $\bar{}$ が付いた変数は基準条件に対応するものと考え、このときの崩壊確率 $\bar{p}_{fail}$ も予め知られているものと仮定すると、一般の場合の許容される崩壊確率が条件に応じて次式のように定められる。

$$p_{fail} = \left(\frac{\bar{P}_F}{P_F} \right) \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\bar{P}_{SUP}}{P_{SUP}} \right) \left(\frac{\bar{N}}{N} \right) \left(\frac{\bar{A}_{FLR}}{A_{FLR}} \right)^2 \left(\frac{\bar{Y}_L}{Y_L} \right) \left(\frac{\bar{I}}{I} \right) \bar{p}_{fail} \quad (18)$$

ただし、上式中の各括弧内の確率値については絶対値を知る必要は必ずしもなく、基準条件に対する相対値で良い。

3. 設計可燃物密度の算出

本稿では、崩壊確率 p_{fail} は

- a) 火災継続時間は可燃物密度とともに確率分布する。
 - b) 建築物の各部材の耐火時間は確率分布せず一定とする。
 - c) 火災継続時間が耐火時間を超過するとき崩壊する。
- という仮定に従うものとする。

これら仮定に従えば、任意の用途について可燃物密度の平均値 μ_w , および標準偏差 σ_w が与えられたとき、式(9)および(10)より、火災継続時間の対数正規分布の平均値 $\mu_{ln t}$ および標準偏差 $\sigma_{ln t}$ が確定する。従って、建築物の構造に備わる耐火時間が t_X のとき、

$$\tau_X = \frac{\ln t_X - \mu_{ln t}}{\sigma_{ln t}} \quad (19)$$

とすれば、崩壊確率 $p_{fail}(t_X)$ は、火災継続時間が耐火時間を超過する確率であり、

$$p_{fail}(t_X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\tau_X}^{\infty} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau = \Phi(\tau_X) \quad (20)$$

で計算できる。

逆に崩壊確率に対応する設計可燃物密度は、次のようにして算出する。すなわち上式から基準化火災継続時間 τ_X を

$$\tau_X = \Phi^{-1}(p_{fail}) \quad (21)$$

として求めることが出来れば、実火災継続時間は

$$\ln t_X = \mu_{ln t} + \tau_X \sigma_{ln t} \quad (22)$$

従って、

$$t_X = \frac{\mu_x S}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2}} \exp\left\{ \tau_X \sqrt{\ln\left[1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2\right]} \right\} \quad (23)$$

となる。上式から火災継続時間は S , すなわち空間床面積 A_{FLR} および開口因子 $AH^{1/2}$ に依存する値となるが、この実火災継続時間から設計可燃物密度 w_X は

$$w_X = \frac{t_X}{S} = \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2}} \exp\left\{ \tau_X \sqrt{\ln\left[1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2\right]} \right\} \quad (24)$$

となり、火災空間の条件によらず可燃物密度の平均値および標準偏差からのみ定まる。この可燃物密度の条件の下に火災に耐える性能を持つ建築構造部材は崩壊確率が許容値以下ということになる。

4. 許容火災リスクから求めた崩壊確率

4. 1 設計火災の設定

以上で崩壊確率 p_{fail} から可燃物密度の具体的な設定手法を示した。しかし、式(18)で分かるように許容される崩壊確率 p_{fail} を計算するためには基準となる建築物条件とその時の崩壊確率を予め設定する必要がある。基準となる建築物の選定では、仕様基準で示される1時間、2時間などの耐火時間が明示されている建築物を選ぶのが自然であろう。一方、基準となる建築物の条件が特定されたとしても区画火災性状は、温度因子や周壁熱特性に依存して多様である。そこで、仕様基準の耐火性能を示す基準がどのような火災を想定して

いるか明らかにする必要がある。これに関し建築基準法では JIS1304 で与えられる標準加熱曲線による耐火試験が参照されてきた。そこで法規が規定している火災の生ずる条件を以下に検討する。まず区画火災の温度予測は次式により可能であることが知られている⁷⁾。

$$\frac{\Delta T_F}{T_\infty} = 3.0 \left(\frac{A\sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k\rho c} \right)^{1/6} \quad (25)$$

ここで壁、床などの区画材料として最も一般的な普通コンクリートの区画壁で考えれば

$$\frac{t}{k\rho c} \approx 0.3t \quad (26)$$

程度である。JIS1304 の標準加熱曲線は $1h=3,600\text{sec}$ で 925°C 、すなわち概ね

$$\frac{\Delta T_F}{T_\infty} \approx 3.0 \quad (27)$$

であることを考慮すれば、JIS1304 の加熱条件は

$$\frac{A\sqrt{H}}{A_T} = \left(\frac{\Delta T_F/T_\infty}{3.0} \right)^3 \frac{1}{(0.3t)^{1/2}} \approx \frac{1}{33} \approx 0.03 \quad (28)$$

のような温度因子を持つ区画の火災に於いて発生することになる。因みに式(28)の温度因子の値は実際の建築空間の条件においては非現実的な値ではない。

上記の値を用いると式(5)の S の値は

$$S = \frac{A_{FLR}}{0.14\sqrt{H}} = 10 \left(\frac{A_T}{A\sqrt{H}} \right) \left(\frac{A_{FLR}}{A_T} \right) \approx 330 \left(\frac{A_{FLR}}{A_T} \right) \quad (29)$$

となる。ここで発生するパラメーター A_{FLR}/A_T は区画の総内壁表面積に対する床面積の割合であるが、通常天井高さのオフィス空間について床面積 $100\text{m}^2 \sim 1,500\text{m}^2$ の範囲で概算すると

$$0.3 \leq \frac{A_{FLR}}{A_T} \leq 0.42 \quad (30)$$

程度である。そこで、中間値 0.36 をとり S を求めると

$$S = 330 \times 0.36 = 119 \quad (31)$$

となる。従って、標準条件に対して式(8)の μ_{int} を計算するために必要な S が評価できたことになる。

4. 2 崩壊確率の算定

1) 仕様基準の耐火時間と崩壊確率

既往の可燃物調査によれば、事務用途の居室の可燃物密度の平均値と標準偏差は、事務系で $\mu_w=24.3$, $\sigma_w=6.8$ 、技術系で $\mu_w=46.7$, $\sigma_w=10.5$ であった³⁾。可燃物密度がこの μ_w と σ_w で対数正規分布するとして、仕様基準で1時間から3時間の耐火時間を要求される構造部材が崩壊する確率を計算する。なお、ここでは $S=119$ とし計算を行う。表1は、この条件での崩壊確率の算定結果を示している。

表1 崩壊確率算定結果

	$\mu_w=24.3, \sigma_w=6.8$	$\mu_w=46.7, \sigma_w=10.5$
$p_{fail}(1h=3600\text{sec})$	0.17	0.97
$p_{fail}(2h=7200\text{sec})$	2.7×10^{-4}	0.10
$p_{fail}(3h=10800\text{sec})$	4×10^{-7}	9.6×10^{-4}

表1の結果が示すとおり、全般的に崩壊確率が高い値を示す傾向にあり、特に耐火時間が1時間(1h)の場合には崩壊確率0.17あるいは0.97と非常に高い値を示す結果となった。これは実際の火災で建築物が崩壊することは稀にしか遭遇しないという経験的事実と矛盾する。この理由としては次のようなものが考えられる。

- 防火仕様基準がある程度の安全率をもって定められている。
- 消防による消火作業のため、可燃物がすべて燃え尽きる以前に鎮火するが多い。
- 盛期火災が続いた場合の崩壊確率は高いとしても、実際に崩壊による損失が発生する確率は、式(14)のように出火率や盛期火災になる確率が関係するため小さくなっている。
- 構造設計その他において種々の安全率加わるため、法規の基準より耐火性能が高くなっている。

2) 規定の耐火被覆された実際の柱の崩壊確率

そこで上記の a), d) の理由について、以下に仕様基準により定められた耐火被覆部材の実耐火性能を検証する。図4には試験体として2時間耐火被覆(材種: H型鋼(H=300×300×10×15)、被覆: 繊維混入珪酸カルシウム板、厚さ40mm)の柱で軸力比が異なる場合の崩壊に至るまでの載荷加熱時間⁹⁾、また実際に設計計画されたS造の建築物において、2時間耐火被覆の柱にかかる軸力比の設計値を調査集計した結果を示している¹⁰⁾。

図4 鉄骨中の軸力比と降伏までの載荷加熱時間の関係および軸力比に対する部材数と累積度数

この結果からも、試験体の軸力比が小さいほど崩壊に至るまでの載荷加熱時間の延びる、すなわち同じ2時間耐火被覆の柱であっても、その柱に加わる軸力により崩壊確率は異なることが分かる。また実際のS造建築物の調査からは2時間耐火被覆の柱に対し、軸力比は0.2程度で設計されている頻度が最も高く、軸力比が0.4までの累積度数は95%以上となる。

図4から軸力比に対する崩壊に至るまでの載荷加熱時間を崩壊時間とし読みとり、可燃物密度を $\mu_w=24.3$, $\sigma_w=6.8$ 、および $\mu_w=46.7$, $\sigma_w=10.5$ とした場合の各軸力比に対する崩壊確率 p_{fail} を式(19), (20)を用いて計算した結果を表2に示す。

表2 軸力比と崩壊確率 p_{fail} の関係

軸力比	崩壊時間(min)	p_{fail} $\mu_w=24.3$ $\sigma_w=6.8$	p_{fail} $\mu_w=46.7$ $\sigma_w=10.5$
0.2	320	1.02×10^{-12}	6.23×10^{-9}
0.4	290	1.26×10^{-11}	7.60×10^{-8}
0.6	270	7.17×10^{-11}	4.14×10^{-7}
0.8	250	4.33×10^{-10}	2.30×10^{-6}
1.0	220	7.28×10^{-9}	3.08×10^{-5}

表2より分かるとおり、仕様基準が持つ安全率と実際の設計で加わる余裕のために、実際には建物構造の崩壊確率は大幅に小さくなることが推定される。

4. 3 階数ごとの崩壊確率

次に基準条件での崩壊確率 p_{fail} を仕様基準とほぼ同等になるように定めることを考える。仕様基準では、1, 2, 3 時間の3段階の規定があるが、ここでは基準条件として2時間の耐火性能をとる。この対象となる建築物の階数は、最上階から数え5層から14層までであることを考慮し、 $\bar{N}=5$ 階、10 階、14 階とした場合について計算する。

式(18)から階床面積その他の条件をすべて同一として、建物階数のみを変動数とした場合の許容崩壊確率 $\bar{p}_{fail}$ は単に

$$\bar{p}_{fail} = \frac{\bar{N} - 1}{N} p_{fail} \quad (32)$$

となる。この $\bar{p}_{fail}$ に表1の $\bar{p}_{fail}(2h)$ の値を用いて計算した結果が図5である。それぞれのケースについて太い実線は、仕様基準に基づいた許容崩壊確率、3本の曲線はそれぞれ基準の階数 $\bar{N}$ を5, 10, 14とした場合の許容崩壊確率である。

図5 許容崩壊確率と火災階より上方の階数の相関

図5では、許容崩壊確率は仕様基準に基づいた値と式(32)で算定された値では階数の大のところで小のところで差異が大きくなっている。しかし、これは階数のみを変数として、その他を同一としているためである。一般には階数が大きいくほど、床面積も増大するこ

とが考えられ、また使用年数や重要度も大きくなる可能性がある。これらを反映させれば差は縮むものと考えられる。

5. 崩壊確率の基準式の設定

ここで式(18)を用い建築物の崩壊確率を計算するための基準式を設定する。ただし、仕様基準が2時間耐火性能を想定している条件として表3の値を仮定し、これを建築物の諸条件とする。これに関しては異論もあると考えられるが、論理的に追求することはできず、多分に社会常識に基づいた判断に依存するしかない問題である。

表3 基準条件

階数	10 階
床面積	1500m ²
耐用年数	50 年
可燃物密度 平均値	24.3kg/m ²
偏差	6.8kg/m ²
崩壊確率	2.7×10^{-4}

表3に示した基準条件を用い、式(18)を整理すると

$$p_{fail} = 2.7 \times 10^{-4} \left(\frac{\bar{P}_F}{P_F} \right) \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\bar{P}_{SUP}}{P_{SUP}} \right) \left(\frac{\bar{I}}{I} \right) \left(\frac{10}{N} \right) \left(\frac{1500}{A_{FLR}} \right)^2 \left(\frac{50}{Y} \right) \quad (33)$$

となる。さらに式(33)中の建築物の出火確率、フラッシュオーバーの発生確率、消防による火災鎮圧率、および建築物の重要度の数値の設定を行えば崩壊確率を算定することが可能となる。以下にそれら数値の一例を示す。

まず、建築物の出火確率は、建築物の主用途の中から、事務所、物販、住宅について整理を行った^{10)~14)}。その結果、用途別に出火率を求めると以下の通りとなる。

表4 用途別出火率

用途	出火率(件/m ² 年)
事務所	6.67×10^{-7}
物販	4.12×10^{-6}
住宅	6.43×10^{-6}

表4の値から事務所の出火率を基準値とし、物販および住宅の出火率を相対値で表すと概ね次の値が得られる。

$$\left(\frac{\bar{P}_F}{P_F} \right) = \begin{cases} 1 & \text{事務所} \\ 1/6 & \text{物販} \\ 1/10 & \text{住宅} \end{cases} \quad (34)$$

ついでフラッシュオーバーの発生確率は、スプリンクラーの設置の有無をもとに設定を行う。仕様基準ではスプリンクラーの設置により、面積区画が2倍の広さまで緩和されることを踏まえ以下の通り設定できる。

$$\left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) = \begin{cases} 1 & \text{スプリンクラー 無} \\ 4 & \text{スプリンクラー 有} \end{cases} \quad (35)$$

ちなみに、カナダ、米国の調査ではスプリンクラーが設置された場合、フラッシュオーバーの確率は1/4から1/5となるという研究結果¹⁵⁾もあり、この設定は統計的には概ね妥当と考えられる。

消防活動による火災鎮圧確率については、建築物の構造種ごとに分別し火災一件当たりの焼損面積から求めることとした。表5は建物構造別の火災一件当たりの焼損面積を示している¹⁶⁾。

表5 火元構造別損害状況

建物構造	一件当たりの焼損面積 (m ² /件)
耐火造	10.4
防火造	30.5
木造	66.2

この表5の値に基づき火災鎮圧確率を下記の通り定めた。

$$\left(\frac{\bar{P}_{SUP}}{P_{SUP}} \right) = \begin{cases} 1 & \text{耐火造} \\ 1/3 & \text{防火造} \\ 1/7 & \text{木造} \end{cases} \quad (36)$$

建築物の重要度は、地域性や社会性など様々な状況下で決定される値であるが、ここでは以下の通りとする。

$$\left(\frac{\bar{I}}{I} \right) = 1 \quad (37)$$

6. ケーススタディ

式(33)より求められる崩壊確率 p_{fail} から式(21)、(24)より計算される設計可燃物密度の傾向を把握するため、事務用途を対象としたケーススタディをここで行う。ケーススタディでは、表6に示した通り、事務用途を事務系と技術系に分け、階数と階床面積を変化させる計算条件を設定した。

表6 計算条件

用途	事務所	
	事務系	技術系
火災階から上方の階数(N)	1~50	
階床面積(A _{FLR})	500, 1500, 2500, 3500	
耐用年数	50	
可燃物密度	平均	24.6
	偏差	6.8
スプリンクラー(P _{FO})	有, 無	
構造	耐火造	

まず式(33)を表6の計算条件をもとに、火災階から上方の階数 N、および階床面積 A_{FLR} を変数とし整理すると

$$P_{fail} = \frac{\kappa}{N \times A_{FLR}^2} \quad (38)$$

$$\kappa = \begin{cases} 1.38 \times 10^{-5} & \text{スプリンクラー 無} \\ 5.51 \times 10^{-5} & \text{スプリンクラー 有} \end{cases} \quad (39)$$

となる。式(38)から設計可燃物密度を計算した結果をそれぞれ事務系と技術系に分け図6 a)b)に示す。また図6には、表6で与えられた可燃物密度の平均と偏差から求めた確率密度分布も併記している。

図6 設計可燃物密度

図6より、階床面積が大きい値をとる程、任意の階数における可燃物密度の絶対値は大きくなる。そして、階床面積を同一条件としスプリンクラーの設置の有無による任意の階数における可燃物密度の絶対値を比較すると、スプリンクラーの設置により可燃物密度の絶対値は減少し、さらに各階数ごとにスプリンクラーの設置しない条件から設置する条件での可燃物密度を差し引いた値は、階数にかかわらず概ね等しくなる傾向にある。また、事務系と技術系の可燃物密度の絶対値を比較した場合、事務系に比べ技術系の方が全体的に高い値を示し、さらに階床面積の違いによる可燃物密度の差も大

きくなる傾向にあり、これらは可燃物密度の平均および偏差が技術系の方が大きいことに起因する。

さらに図6の結果をもとに、階数 N が1となる条件での可燃物密度 ($W_{N=1}$) を基準値とし、階数の増加にともなう可燃物密度 (W_N) の変化量の相対比 ($W_N/W_{N=1}$)、および任意の階数ごとにスプリンクラーを設置しない条件での可燃物密度 ($W_{N,SP無}$) を基準値とし、階床面積を同一としたスプリンクラーを設置する条件での可燃物密度 ($W_{N,SP有}$) の相対比 ($W_{N,SP有}/W_{N,SP無}$) を整理した結果を図7に示す。

図7 可燃物密度比

図7より、階数1を基準値とした相対比 $W_N/W_{N=1}$ の値に着目すると、階床面積が小さいほど、階数の増加に対し相対比の値は大きく

なる傾向にある。また、階床面積が同一の条件でスプリンクラーの設置の有無による差に着目すれば、スプリンクラーを設置した条件は、設置しない条件より任意の階数における相対比は大きくなる傾向にある。

つづいて、スプリンクラーの設置の有無による可燃物密度の相対比 ($W_{N,SP有}/W_{N,SP無}$) に着目すると、階数が増加するに従い、相対比は大きくなるが、本計算条件で設定した階数の範囲では、相対比が概ね0.9前後の値をとることが分かる。すなわち、スプリンクラーの設置により、設計可燃物密度は1割程度低減されることになる。

これらケーススタディの結果を踏まえ、注意すべき点は、

- 許容崩壊確率が等しい場合でも、可燃物密度の小さい方が設計可燃物密度の絶対値は小さくなる。
- 可燃物密度分布が等しい場合でも、開口因子、温度因子等空間の条件により火災性状が異なるので要求耐火性能は一律とならない。ということである。これらが建築物の条件に応じた耐火設計の合理性と柔軟性をもたらす因子となる。

7. まとめ

本稿では、リスク概念を用い建築物の許容火災リスクを建築物の高さや規模等によらず同一であることを前提とし構造部材の許容崩壊確率を求め、それに対応する設計可燃物密度の算出方法を提案することを試みた。本稿による成果をまとめると以下の通りとなる。

- 建築物に持ち込まれる可燃物密度の確率分布から、火災継続時間分布を算出する方法を誘導した。
- 建築物の許容崩壊確率について、建築物の火災リスクに基づき算定方法を提示し、崩壊確率を算定するための基準式を示した。
- 仕様基準で要求される耐火性能をもつ構造の崩壊確率を計算した結果、その値は全般的に高い値を示した。そこで仕様基準による2時間耐火被覆部材の実耐火性能を求め、仕様基準の安全率の程度を確認した。
- 建築物の設計可燃物密度についてケーススタディを行い、その計算結果を示すとともにその傾向を把握した。

今後は、許容される崩壊確率の基準式を構成する種々のパラメータ値の充実や、区画構成部材の延焼防止性能などについても本稿の考え方を適用し明らかにしていく。

凡例

A: 開口面積 (m^2)

A_{FLR} : 床面積 (m^2)

A_T : 周壁面積 (m^2)

c: 比熱 (kJ/kgK)

H: 開口高さ (m)

k: 熱伝導率 (kW/mK)

m_b : 重量減少速度 (kg/s)

N: 火災階より上方の階数(階)

P_F : 単位床面積当たり単位期間当たりの火災発生確率 ($1/m^2$ 年)

P_{fail} : 崩壊確率 (-)

P_{Fire} : 火災発生確率 (-)

P_{F0} : 出火した火災が火盛り期に成長する確率 (-)

P_L : 火災損害発生確率(-)

P_{SUP} : 消防が火災鎮圧に失敗する確率(-)

R : 火災リスク(-)

S_L : 火災損害の潜在的大きさ(-)

t : 火災継続時間(sec)

ΔT_F : 上昇温度(K)

T_∞ : 雰囲気温度(K)

w : 可燃物密度(kg/m²)

Y_L : 耐用年数(年)

δ : 安全率によるリスク低減係数(-)

ρ : 密度(kg/m³)

参考文献

- 1) Bukoski, R. W.: Fire Safety Engineering in Pursuit of Performance-based Codes: Collected Papers, NISTIR 5878 (CIB Report: CIB W14/96/5, NIST
- 2) K. Harada, T. Tanaka, T. Morita : Rational Framework for Fire Resistance Requirement Based on Relative Risk Concept, Fire and Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations, Proceedings of the Second International Seminar, pp.365-376, 1997
- 3) 松山賢:「性能的火災安全設計法に用いる火災性状モデルの構築と火災安全性能評価への応用」, 東京理科大学博士論文, 2000.3
- 4) Chou, H.: Reliability-based Design of Structure, Sankaido
- 5) 油野健志, 山仲秀利, 大宮喜文, 高橋清, 田中哮義, 若松孝旺:「実態調査に基づく可燃物量とその表面積の分析」, 日本建築学会計画系論文集, No.483, pp.1-8, 1996.5
- 6) 市川昌弘:「構造信頼性工学—強度設計と寿命予測のための信頼性手法—」海文堂, 1996.3
- 7) McCaffery, B.J., Quintiere, J. G. and Harklerload, M. F.: Estimating Room Temperatures and Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlation, Fire Technology, Vol. 17, No.2, pp98-119, 1981
- 8) 松山賢, 藤田隆史, 金子英樹, 大宮喜文, 田中哮義, 若松孝旺:「区画火災性状の簡易予測法」, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.159-164, 1995.3
- 9) 播磨政弘, 遊佐秀逸, 吉田正友, 岡村義徳:「鋼製柱の耐火性能評価(その2 実験結果および考察)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp155-156, 1997.9
- 10) 斉藤秀人, 大内富夫, 湯谷孝夫, 西垣太郎, 丹羽博則, 宮本圭一, 谷田貝健, 高橋清:「建築構造物の長期設計荷重時応力(その3 柱部材)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp169-170, 1997.9
- 11) 「火災の実態 平成10年版」, 東京消防庁予防部予防課, 1998.6
- 12) 「東京の土地1997(土地関係資料)」, 東京都政策報道室調査部, 1998.5
- 13) 「東京の土地1998(土地関係資料)」, 東京都政策報道室調査部, 1999.5
- 14) 「東京の小売業(平成9年商業統計報告 小売業態別集計編)」, 東京都総務局統計部商工統計課, 1999.9
- 15) Gaskin, J. and Yung, D.: Canadian and U.S.A. Fire Statistics for Use in the Risk-Cost Assessment Model, Internal Report No. 637, pp4-6, 1993.1
- 16) 「火災便覧 第3版」, 日本火災学会編, 共立出版, 1997.5

(2001年7月9日原稿受理, 2001年9月6日採用決定)