

地震による建物被害が火災安全性能に与える影響

村岡 宏 吉野 攝津子
山口 純一

Influences of Building Damages Caused by an Earthquake on Fire Safety Performance

Ko Muraoka Setsuko Yoshino
Junichi Yamaguchi

Abstract

There have been reports that nonstructural elements such as ceilings and walls elements were damaged and fell because of the Great East Japan Earthquake in many buildings that were far from the seismic center. Because of the damage to the nonstructural elements, fire protection facilities such as sprinkler systems and fire doors were also damaged. In this paper, we introduce examples of damage to fire protection facilities as reported by public institutions, due to the Great East Japan Earthquake; we carried out evacuation risk analysis based on the seismic damage ratio of each fire protection facility just after the earthquake. We discuss evaluation methods for safety evacuation and countermeasures against fire after an earthquake.

概要

東日本大震災では天井・壁装材の落下に代表されるような建築物における非構造部材の損傷・脱落について震源から遠く離れた広範囲の地域にわたって数多く報告されている。また、非構造部材の被害に伴い、スプリンクラー設備や防火戸などの防火関連設備の被害も数多く報告されている。本報では学会・公的機関等より報告されている東日本大震災における防火関連設備の被害状況を整理すると共に、防火関連設備毎の被害率に関する調査データ例を参考に地震後の火災を想定した避難リスクについて評価を行った結果を述べる。さらに地震後の避難安全性能の評価技術、火災安全性能維持のための対策技術の現状と課題について述べる。

1. はじめに

東日本大震災では地震の規模に対して建築物の構造被害は比較的軽微であったと言われているが、天井の落下などに代表される非構造部材の損傷・脱落については震源から遠く離れた広範囲の地域にわたって数多く報告されている。また、非構造部材の損傷に追従するように防火戸や消火設備などの防火関連設備の被害も数多く発生している。このような防火関連設備の被害が、地震後に発生した火災被害に直接影響を及ぼした実際の事例は確認されていないが、津波に起因して発生した小学校における火災において、防火戸が閉鎖したことにより階段室が火害から守られた事例は確認されており¹⁾、防火関連設備の機能維持が地震後の火災被害を低減させることは明らかである。

本報では、学会や公共機関が行った東日本大震災における建物被害に関する調査報告を参考に、地震後の火災安全性能に影響を与える防火区画、防火設備、消火設備、排煙設備等の被害状況の概要を紹介する。そして、公的機関より報告されている、東日本大震災における防火関連設備の被害率を基に避難リスクを算出し、地震後の火災を想定した避難リスクの定量化を試みた。さらに、地震後の避難安全性能評価技術、及び地震後の火災安全性能を維持するための対策技術の現状と課題について論じた。

2. 東日本大震災における防火関連設備の被害

2.1 建築物の非構造部材の被害

非構造部材の被害として天井材、外壁、内壁の破損・脱落、ガラスの破損、エキスパンションジョイントの破損等が確認されている。これらの非構造部材の被害は後述する防火関連設備の被害や避難安全性能に大きく影響を及ぼすと考えられるため本節では被害状況の概要を整理して示す。

2.1.1 天井材の被害 天井材の破損・脱落は体育館、劇場・映画館、商業施設、生産工場、事務所、空港・駅舎などの比較的面積が大きい在来工法天井において多くの被害が確認されている。被害要因としては天井支持部材におけるブレースの未設置、ハンガー、クリップの破損、あるいは壁、柱とのクリアランス不足による干渉、設備機器との衝突などが挙げられる。天井材が落下することにより直下の居住者に危害が加わるの他、廊下等の避難通路に天井材が落下して避難経路を遮断するケースも確認されている。栃木県における工場施設の損傷に関するアンケート調査によれば²⁾、回答のあった217件の施設のうち建物に何らかの損傷があったのは177件(81.6%)であった。このうち、天井材に被害があった施設は125件(70.6%)に

及んでおり割合が最も高い(Fig. 1 参照)。

2.1.2 壁の被害 壁については外壁、内壁共に被害が生じている。外壁についてはタイルやALCパネルの崩落、RC壁のひび割れ等が確認されている。内壁については乾式石張りや石膏ボードの損傷等が確認されている。このうち防火区画を構成する壁の被害については後述する。東京消防庁は仙台市における49棟の建物について東日本大震災による建物被害に関するヒアリング調査を行っており³⁾、Fig. 2に示す5分類の構造種類別(旧耐震基準においては耐震補強済・未補強の2分類, 新耐震基準以降では耐震構造・制振構造・免震構造の3分類)の被害状況をまとめている。これによれば内壁の剥離・亀裂に関する被害が全構造で最も多く発生しており、天井の落下を上回っている。前述の栃木県の工場施設のヒアリング結果と異なる傾向を示しており、調査対象の地域や建物用途・規模によって被害の傾向も異なってくることがわかる。

2.1.3 その他の非構造部材の被害 はめ殺しのガラス窓(ガラススクリーン)についても破損する被害が確認されている。但し、超高層ビルのガラスカーテンウォールの被害はほとんど確認されていない。また、エキスパンションジョイントの破損は数多く確認されている。エキスパンションジョイントが層間区画等の防火区画を構成する場合は火災安全性能に影響を及ぼすことが懸念される。

2.2 防火区画の被害

防火区画を構成する壁主として非構造壁についてはRC壁と軽鉄下地の石膏ボード壁の2種類の工法に着目して以下に被害状況を示す。

2.2.1 RC壁の被害 RC壁の場合は非構造壁のせん断破壊によってひび割れが生じている事例が見られる。RC壁が防火区画を構成している事例として集合住宅の廊下-住戸間の壁や戸境壁があげられるが、万一ひび割れが生じている状態において住戸側で火災が発生すると、ひび割れの程度にもよるが、最悪の場合、廊下等の非火災室に煙が漏れて避難に支障をきたす恐れがある。Photo 1に集合住宅の廊下-住戸間のRC壁の被害の例を示す⁴⁾。また、RC外壁が同様のせん断破壊等により被害を受けた事例も確認されている。外壁については開口部以外の例えば、スパンドレル部が被害を受けてひび割れや貫通孔が生じると火災室から噴出する熱気流により上階延焼を助長する可能性があり、延焼防止の観点から好ましくない。

2.2.2 石膏ボード壁の被害 軽鉄下地の石膏ボード壁は安全区画を構成する防火区画や階段室まわりの堅穴区画に多用されている。今回の震災では、これらの非構造壁の石膏ボード壁において、石膏ボードのひび割れ、目地部の損傷、開口部周辺における損傷、区画貫通部における損傷が報告されている。地震時に加わるせん断力等により石膏ボード壁に発生したひび割れや目地部の損傷が当該区画部材の耐火性能を低下させることは既往の実験研究においても確認されている⁵⁾。

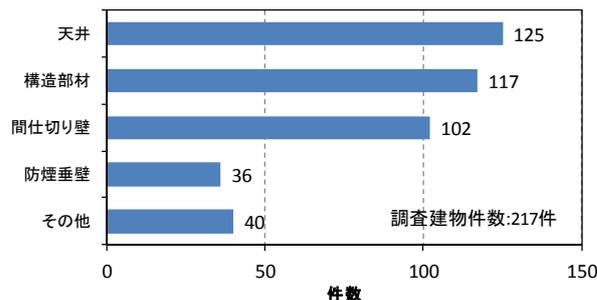


Fig. 1 工場用途における非構造部材の被害の内訳²⁾
Details of Nonstructural Elements Damages in Factories

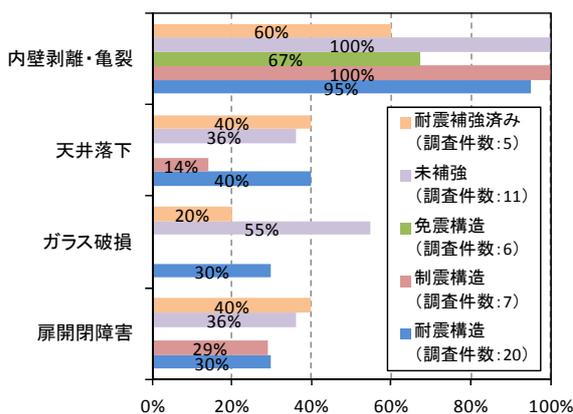


Fig. 2 仙台市における建物被害の構造種別内訳³⁾
Details of Nonstructural Elements Damages in Sendai-City



Photo 1 RC壁の防火区画被害状況⁴⁾
Damage of a RC Fire Wall

また、石膏ボード壁の区画貫通部において、充填材や断熱材が脱落して貫通孔が露出する被害事例も確認されている。このような貫通孔が煙の拡散経路や火災の延焼経路となっており、火災安全性能を低下させる要因となる。

2.3 防火設備の被害

防火設備については常時閉鎖型と常時開放型に大別されるが、常時閉鎖型の防火戸については地震による壁の損傷に伴い扉及び三方枠が変形し、開放不能等の機能不全に至るケースが報告されている。また、常時開放型の防火戸

については天井の脱落に伴う閉鎖不能や防火戸自体がヒンジから脱落した事例が報告されている。

2.3.1 常時閉鎖型防火設備の被害 集合住宅の廊下に面した非構造体壁が損傷し、これにより玄関扉である防火戸が変形した例をPhoto 2に示す⁶⁾。このような事例は阪神・淡路大震災でも数多く報告されており、神戸市長田区内の高層集合住宅における調査結果によれば、閉鎖障害が発生するのは震度7の地域の集合住宅に集中しており、また、建物下層階ほど閉鎖障害の発生被害が大きくなる傾向があることが報告されている⁷⁾。一方、東京消防庁が行った仙台市の東日本大震災による建物被害ヒアリング調査結果によれば³⁾、扉の開閉障害が低層の建物で多く発生していることが報告されている。

2.3.2 常時開放型防火設備の被害 阪神・淡路大震災では常時開放型の防火戸近傍の天井ボードや照明器具が脱落し、これらが障害(天井面と防火戸上端との離隔距離がほとんどない場合に限る)となって閉鎖不能となった事例が確認されている⁷⁾。前述の東京消防庁による仙台市の建物被害ヒアリング調査結果³⁾によれば、免震構造を除く43棟の調査建物のうち約4割で天井の落下が発生しており、49棟の全調査建物のうち約3割において防火戸の開閉障害、例えば防火戸閉鎖後、開閉障害が生じ、扉が動かなくなる被害や防火戸が外れてしまうような被害が発生している(Fig. 2参照)。

また、日本建築学会が中心となって行った新宿駅西口地区の超高層建物を対象とした建物被害のアンケート調査結果によれば⁸⁾、調査対象である8棟の建物で防火戸の開閉障害が2件報告されている(Table 1参照)。但し、この2件の開閉障害がどのようなタイプの不具合であったかは不明である。

一方、同地区の超高層建物において常時開放型の防火戸(EVホールの折りたたみ戸)がヒンジから脱落した例も数件報告されている(Photo 3参照)¹⁾。防火戸がヒンジから脱落するような不具合は、単に防火戸の機能不全のみならず、万一、脱落した防火戸が近傍の避難者に倒れてきた場合は人的被害の可能性もある。

2.3.3 防火シャッターの被害 防火シャッターなどの重量シャッターにおいて地震時の揺れによるシャッターの降下(作動)、構成部材(まぐさ、ケース、スラットなど)の脱落などが確認されている。また、ガイドレールやまぐさ等の部材の変形により、防火シャッターが降下(作動)不能、あるいは降下(作動)しても完全に閉鎖しない閉鎖障害などについても確認されている。これらの防火シャッターの被害は構造体の変位量がRC造と比較して大きくなる鉄骨造において顕著に発生していると考えられるが、同じ地域であっても、被害が生じている建物と全く被害が生じていない建物が混在していることなどから、被害をもたらす要因については建物の向きと揺れの方向との関係、あるいは構造形式や地盤など、複数の要因が影響していると推測される。

2.3.4 防煙垂壁の被害 地震時の揺れによる固定式ガ



Photo 2 地震により変形した防火戸の例⁶⁾
Deformation of a Fire Door caused by Earthquake



Photo 3 ヒンジから脱落した防火戸の例¹⁾
A Fire Door falling down from Pivot Hinges

Table 1 超高層建物における被害の調査結果⁸⁾
Types of Damage in High-rise Buildings

被害内容	建物数(回答数 8)
天井の一部落下	7
外線電話の障害	5
内壁等のはがれ	4
防火戸の開鎖障害	2
電気・ガス・水道の支障	2
パーティションの倒れ	1
スプリンクラー損傷	1
防煙垂壁の損傷	1
外壁の一部落下	1

ラス防煙垂壁の損傷は東日本大震災震災においても数多く確認されている。前述した栃木県の工場施設における地震被害ヒアリング調査によれば、217件の施設のうち、36件(20.3%)の施設で防煙垂壁の被害が確認されている(Fig. 1参照)。損傷の程度は地震の揺れに応じて様々であるが、ガラス防煙垂壁の破損落下、あるいは防煙垂壁と柱との取り付け部分において防煙垂壁の端部が柱の内装ボードを損傷させた事例も多数報告されている⁷⁾。

Table 2 東日本大震災における消火設備の被害件数及び設備毎の被害件数¹⁾
Number of Buildings with Damage of Fire Suppression System due to Great East Japan Earthquake

都道府県	被害件数		設備毎の被害件数										
	合計	比率	水系消火設備							ガス系消火設備	合計	比率	
			屋内消火栓設備	スプリンクラー設備	泡消火設備	水噴霧消火設備	屋外消火栓設備	連結送水管	パッケージ型自動消火設備				
北海道	1	0.5%									1	1	0.5%
青森県	0	0.0%										0	0.0%
岩手県	5	2.7%		3	2		1				1	7	3.3%
宮城県	74	39.6%	4	50	14			5	1		13	87	41.0%
秋田県	0	0.0%										0	0.0%
山形県	1	0.5%			1							1	0.5%
福島県	19	10.2%		10	9		2	3			1	25	11.8%
茨城県	26	13.9%		20	4					2		26	12.3%
栃木県	2	1.1%			2							2	0.9%
群馬県	2	1.1%			2							2	0.9%
埼玉県	8	4.3%	1	4	1						2	8	3.8%
千葉県	14	7.5%		10	4			1			2	17	8.0%
東京都	25	13.4%		20	3						2	25	11.8%
神奈川県	9	4.8%		4	5							9	4.2%
静岡県	1	0.5%		1	1							2	0.9%
合計	187	100%	5	122	48	3	9	1	2	22	212	100%	
比率			2%	58%	23%	1%	4%	0%	1%	10%	100%		

2.4 消火設備の被害

(一社)日本消火設備工業会が調査した、東日本大震災における都道府県別の消火設備の被害状況の内訳¹⁾をTable 2に示す。震源に比較的近い宮城県が最も被害件数が多いが、茨城県、千葉県、東京都などの関東地方においても多くの被害が発生している。消火設備の種類毎の内訳ではスプリンクラー設備の被害が全体の58%を占めている。Table 3は過去の地震と東日本大震災における水系消火設備の被害部位毎の被害件数の内訳を示したものであるが¹⁾、今回の東日本大震災では1978年の宮城県沖地震や1995年の兵庫県南部地震と比較してスプリンクラーヘッドの被害の割合が高くなっている。これは、天井埋め込み型ヘッドの普及により天井ボードと接触する可能性が増したことに加えて、東日本大震災における長時間の揺れや長周期の地震動の影響で天井材が破損・脱落の件数が増大したことが影響していると考えられる。

3. 地震後の火災を想定した避難リスク評価

超高層ビルや複合用途施設など潜在的リスクの大きい建物に対しては、防火戸、排煙設備、スプリンクラー設備などの防火関連設備が設けられるが、これらはいずれも100%の信頼性を有するものではない。このため、複数の設備を備えることにより、これらの組み合わせで生まれる防災システムの冗長性(redundancy)により信頼性を高めることが必要である。一方、防火関連設備は建築基準法や消防法に規定されているが、これらの多くは通常起こりえる火災に対して設けられたものであり、地震後の火災に対してどの程度有効であるかは明らかになっていない。

Table 3 水系消火設備における被害の内訳¹⁾

Types of Damage on Fire Suppression System using Water

被害部位	宮城県沖地震 1978年6月 M7.4		兵庫県南部 地震 1995年1月 M7.2		東北地方 太平洋沖地震 2012年3月 M9.0	
	件数	比率	件数	比率	件数	比率
水源水槽	44	14%	18	9%	2	1%
加圧送水装置	68	22%	3	2%	14	6%
流水検知装置	0	0%	3	2%	2	1%
一斉開放弁	0	0%	1	1%	4	2%
SPヘッド	15	5%	52	27%	102	40%
配管	180	57%	98	51%	119	47%
その他	7	2%	17	9%	10	4%
合計	314	100%	192	100%	253	100%

そこで本検討では、専有面積2400㎡の事務所ビルにおいて、防火関連設備の作動信頼性に着目した避難安全上のリスク評価を実施することによって、地震後の火災を想定した避難リスクの定量化を試みた。

3.1 評価建物の概要

20階建の事務所ビルを想定してケーススタディを行う。天井高さは事務室2.8m、廊下2.6m、扉寸法は全てw1.0m×h2.1mとした。事務室は4区画とし、それぞれの床面積は事務室1から順に200, 400, 600, 1200㎡である(Fig. 3参照)。また、各室は300㎡の廊下に面している。なお、階段以外の堅穴(エレベータ、ダクトスペースなど)やトイレなどは省略している。

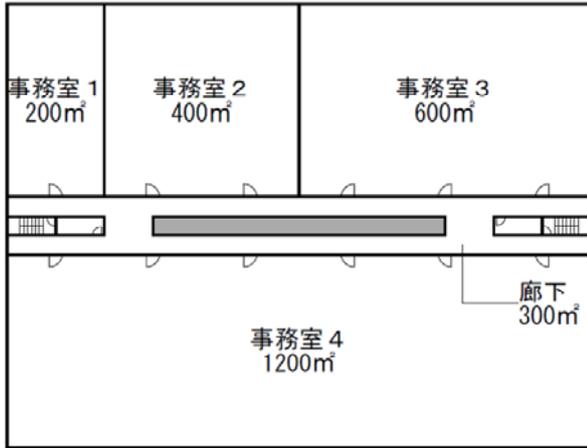


Fig. 3 ケーススタディにおける想定プラン
Model Plan for Case Study

3.2 評価の前提条件

3.2.1 出火率 地震火災の出火率は通常火災より大きくなると予想されるが⁹⁾、本評価においては出火を前提(出火率=1.0[件/年])として評価を行う。

参考までに、Fig. 3に示した事務所(20階建、占有面積2400m²)における通常火災の出火率は3.4×10⁻²[件/年]となる¹⁰⁾。

3.2.2 避難リスクの定義 本評価では出火を前提とした条件付きのリスクを扱う。さらに、当該階の在館者が階段への避難を完了するまでに火災により発生した煙に曝される危険性、すなわち避難不能者数期待値 R_e [人/件] (以後、避難リスクと呼ぶ)を指標として用いる。また、一般に防火関連設備の信頼性は100%ではないので、その作動/不作動により複数のシナリオが発生する。従って、避難リスク R_e は、想定される火災シナリオ i の生起確率 P_i [件/件]と避難不能者数 C_i [人/件]の積和とする。

$$R_e = \sum P_i C_i \quad (1)$$

3.2.3 防火関連設備の作動確率 防災対策は、現行法(建築基準法および消防法)に準拠して、スプリンクラー設備(以後、SP設備と呼ぶ)、排煙設備、居室と廊下との間には防火扉を想定した。それ以外の防火関連設備は評価外とした。防火関連設備の作動率は東日本大震災における仙台市の耐火建築物におけるヒアリング調査より明らかとなった被害率³⁾を参考とした。Fig. 4に防火関連設備毎の被害率を示す。なお、ヒアリング調査建物の構造種別内訳は前章のFig. 2に示した通りであり、調査建物が存在する地域の揺れの強さは震度6弱、及び震度6強であった。本評価においては、通常火災時の作動率は一律0.9とし、地震火災時はFig. 4で示した被害率から算出した健全率(1-被害率)に通常火災時の作動率を乗じて算出した(Table 4参照)。なお、今回参考にした防火扉の被害率は当該建物内の防火扉が一箇所でも被害を受けた場合は被害ありと見なして求めているが、通常の建物には複数の防火扉が設置されているため、それらの全てが被害を受けた訳ではない。

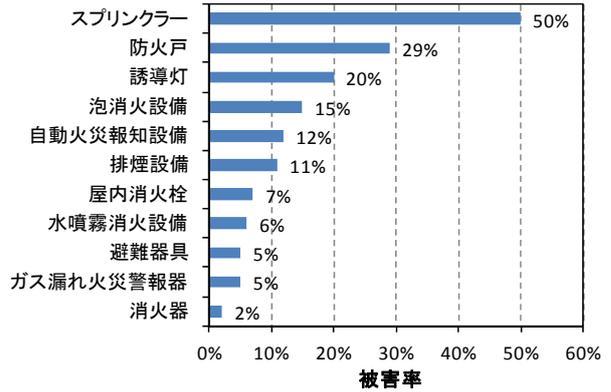


Fig. 4 防火関連設備毎の被害率(調査建物件数：49件)³⁾
Damage Rates of Each Fire Protection Facility

Table 4 各設備の作動率

Operational Reliability of Each Facility

対策	通常火災時	地震火災時
SP設備	0.90	0.45 (=0.5×0.90)
排煙設備	0.90	0.80 (=0.89×0.90)
防火扉(1枚)	0.90	0.85 (=0.94×0.90)

SP設備	防火扉	排煙設備	シナリオNo.
○作動	○作動	○作動	S-01
×不作動	○作動	×不作動	S-02
		○作動	S-03
	×不作動	S-04	
	○作動	S-05	
	×不作動	S-06	
	○作動	S-07	
	×不作動	×不作動	S-08

Fig.5 火災時の火災シナリオの設定例
Example of Fire Scenario Structure

そこで本評価では被害建物の1/5の防火扉が被害を受けたと想定し、防火扉1枚当たりの被害率を6% (=29%÷5)と設定した。

3.2.4 天井等の崩落 前章で述べたように、東日本大震災では天井材及び壁材の崩落により避難通路が通行不能となる事例が確認されている。しかし、今回のリスク評価では地震による天井の崩落や什器の散乱によって避難経路が通行不可能となることや、歩行速度が低減することを考慮しないものとする。

3.3 火災シナリオ

Fig. 5は、SP設備(事務室)、防火扉(事務室と廊下の間)、排煙設備(事務室と廊下)の作動/不作動に基づく火災シナリオを設定した一例である。通常火災、地震火災ともに火災シナリオは共通であるが、地震時に天井が崩落する事象を設定する場合は、崩落の有/無をイベントに追加することになる。

また、各火災シナリオの生起確率は防火関連設備の作動／不作動の確率(Table 5参照)を用いて計算できる。Fig. 5に示す各シナリオの生起確率を算出した結果をTable 5に示す。ただし、表中の○は作動、×は不作動を意味する。なお、事務室4には6枚の防火扉が設置されているため、防火扉が全て閉鎖した状態を作動と定義し、その作動確率は通常火災時0.53(=0.9⁶)、地震火災時0.38(=0.85⁶)とした。

Table 5より、通常火災時は3つの対策のうち2つ以上の対策が同時に不作動となるシナリオ(S-04,06,07,08)の生起確率の合計は10%程度であるが、地震火災時は44%まで上昇する。この主な原因は、SP設備と防火扉の故障である。なお、排煙設備の作動率は比較的高いが、その起動は手動が一般的である(ボタンを押さないと排煙が起動しない)。地震火災時は、シナリオS-07の生起確率が0.27と大きいことから、排煙設備の作動に重点が置かれる。従って、付室近傍に排煙設備の起動ボタンを設置するなど、起動時の信頼性を向上させることが重要である。

3.4 避難不能者数

防火関連設備の作動／不作動は避難安全性に大きな影響を与える。ここでは、以下の手順に従い、Fig. 3の事務室4で火災が発生した場合の各火災シナリオに対応した避難不能者数を算出する。

3.4.1 前提条件

以下に示す前提条件を基に避難不能者数を算出する。

- 1) 火災室は事務室4とする。
- 2) SP設備の作動の有無によらず火災室の在館者は安全に避難できる(非火災室の在館者の避難安全性評価を対象とする)。
- 3) SP設備が作動した場合の非火災室の避難不能者数は0人とした。この場合、避難完了時間及び煙降下時間の計算は省略した。
- 4) 各室の在館者密度 ρ は0.125人/m²、歩行速度 v は1.3m/sとした¹¹⁾。
- 5) 火災室の火災成長率 α は0.1kW/s²とした¹¹⁾。

3.4.2 避難完了時間と煙降下時間

避難完了時間および煙降下時間は、下記に示す予測式に基づき計算した。

(1) 避難開始時間 t_{start} 非火災室の在館者の避難開始時間 t_{start} [s]は、当該居室の火災確認者が火災感知器の作動後(t_{detect})、火災確認地点まで歩行し(t_{check})、火災確認地点で火災室から廊下に漏れ出した煙を目視し(t_{leak})、その後居室に戻り(t_{inform})、火災情報を伝えた時点とした。

$$t_{start} = \max(t_{detect} + t_{check}, t_{leak}) + t_{inform} \quad (2)$$

火災感知器の作動時間 t_{detect} は、火源発熱速度が50kWに達した時点とした。

$$t_{detect} = \sqrt{50/\alpha_f} \quad (3)$$

火災室から煙が漏れ出す時間 t_{leak} は、式(4)に基づき計算した¹²⁾。ここで、 A_f は火災室の床面積[m²]、 C_m は巻き込み係数(=0.076)[kg/kJ^{1/3}・m^{5/3}・s^{2/3}]、 H_D は火災室廊下間の開口

Table 5 各火災シナリオの生起確率 P_i
Occurrence Probability of Each Fire Scenario

シナリオ No.	SP 設備	防火 扉	排煙 設備	生起確率 P_i [件/件]	
				通常火災	地震火災
S-01	○	○	○	0.429	0.137
S-02	○	○	×	0.048	0.034
S-03	○	×	○	0.381	0.223
S-04	○	×	×	0.042	0.056
S-05	×	○	○	0.048	0.167
S-06	×	○	×	0.005	0.042
S-07	×	×	○	0.042	0.273
S-08	×	×	×	0.005	0.068

高さ[m]、 H_f は火災室の天井高さ[m]、 α_f は火災成長率[kW/s²]、 ρ_{∞} は煙層密度(=1.0)[kg/m³]である。

$$t_{leak} = \left\{ \frac{5}{2} \cdot \frac{\rho_{\infty} A_f}{C_m \alpha_f^{1/3}} \left(\frac{1}{H_D^{2/3}} - \frac{1}{H_f^{2/3}} \right) \right\}^{3/5} \quad (4)$$

(2) 避難完了時間 t_{escape} 当該階の避難開始時間 t_{escape} [s]は、避難開始時間、歩行時間および扉通過時間の和とする。なお、在館者が居室内に均等に分布しているため、歩行時間を算出する際の歩行距離は居室出入口から階段出入口までの歩行距離を用いた。

$$t_{escape} = t_{start} + t_{travel} + t_{queue} \quad (5)$$

(3) 煙層降下時間 t_s 廊下の煙層降下時間 t_s [s]は、式(6)に基づき計算した。ここで、 A_c は廊下の床面積[m²]、 H_c は廊下の天井高さ[m]、 α_c は開口噴出気流の熱量増加率[kW/s²]¹²⁾、 ρ_f と ρ_c はそれぞれ避難完了時点の火災室と廊下の煙層密度[kg/m³]である。なお、シナリオS-07では煙発生量が有効排煙量を上回った時点を煙降下時間とみなした¹³⁾。

$$t_s = \left[\frac{5}{2C_m} \cdot \left\{ \frac{\rho_f A_f}{\alpha_f^{1/3}} \left(\frac{1}{1.8^{2/3}} - \frac{1}{H_f^{2/3}} \right) + \frac{\rho_c A_c}{\alpha_c^{1/3}} \left(\frac{1}{1.8^{2/3}} - \frac{1}{H_c^{2/3}} \right) \right\} \right]^{3/5} \quad (6)$$

3.4.3 避難不能者数 避難不能者数 C [人/件]は、式(7)より算出した。ここで、 C_0 は火災室を除く事務室の在館者数[人]である。

$$C = \begin{cases} 0 & (t_{escape} \leq t_s) \\ \left(\frac{t_{escape} - t_s}{t_{escape} - t_{start} - t_{travel}} \right) C_0 & (t_{escape} > t_s) \end{cases} \quad (7)$$

式(2)～式(7)を用いて避難不能者数を予測した結果をTable 6に示す。これより、SP設備、防火扉または排煙設備の何れかが正常に作動すれば安全性は確保できることが分かる。なお、今回の計算では防火扉が不作動のシナリ

オにおいては6つの防火扉全てが不作為(全て開放されている状態)を想定し、この場合の避難不能者数は150人(つまり、全員が避難不能)となったが、SP設備と排煙設備が不作為で扉開放数が1である場合の避難不能者数は10人、同様に開放数が2である場合は98人となった。また、全ての防火関連設備が不作為(シナリオS-08)であっても、廊下の煙降下時間(廊下が避難経路として安全に使用できる限界時間)は252秒であることから、これよりも早く階段への避難が完了すればよい。従って、普段から概ね4分(240秒)以内に階段への避難が完了するよう訓練しておくことも火災安全対策の1つとして有効である。

3.5 避難リスクの算出結果

避難リスクは式(1)で示したように、Table 5に示した各火災シナリオにおける生起確率 P_i とTable 6に示した各火災シナリオにおける避難不能者数 C_i を乗じて、これをすべての火災シナリオについて足し合わせたものである。

Fig. 3の事務室4で火災が発生した場合の避難リスクを算出した結果、通常火災時の避難リスクは0.7人/件、地震火災時は10.2人/件となった。地震火災時のリスクが大きくなった主な原因は、SP設備と防火扉の被害に伴う作動確率の低下によるものである。

4. 地震後の火災安全性能評価と対策技術

4.1 地震後の火災危険度及び避難性状予測技術

4.1.1 地震後の火災危険度 これまでは建物倒壊率と出火率の関係から地震による出火率を考察することが多かったため、建物倒壊率が低い地域、すなわち耐震性の高い建築物が多く存在する地域は出火率が低くなると一般的には考えられていた。東日本大震災では、津波の被害を受けていない内陸地域での地震起因火災(震度6弱地域)に着目すると人口10万人当たりの出火件数は阪神・淡路大震災時の神戸市の約11件に対して0.82件であり、人口当たりの出火率は一桁小さい結果となっている。但し、建物倒壊数に対する火災件数と比較すると、阪神・淡路大震災時の神戸市の値の約0.6倍であることが報告されている¹⁴⁾。また、震源から離れた関東地域(茨城、千葉、埼玉、東京、神奈川)における建物倒壊数と火災件数のデータ¹⁵⁾を基に建物倒壊当りの出火件数を比較すると、阪神・淡路大震災時の神戸市では0.0026件であったのに対して東日本大震災は0.42件と増大している。前述したように東日本大震災では建築物の主要構造体の被害はそれ程大きくなかったものの、長時間、長周期の地震動が什器の散乱や非構造部材の甚大な被害をもたらしており、これが建物倒壊率の割に出火件数が比較的多かった1つの要因となっていることが推測される。

一方、地震時の出火・延焼に関する既往の予測手法は、地域単位での出火件数を予測することを目的としたマクロ的アプローチに基づくものが主体であり、単体建物を対象としたものは多くない。単体建物を対象としたものには、

Table 6 各火災シナリオの避難不能者数 C_i
Casualties of Each Fire Scenario

シナリオ No.	t_{start} [s]	t_{travel} [s]	t_{escape} [s]	t_s [s]	C_0 [人/件]	C_i [人/件]
S-01	SP設備が作動する場合は計算省略				150	0
S-02					150	0
S-03					150	0
S-04					150	0
S-05	252	15	317	484	150	0
S-06	252	15	317	484	150	0
S-07	252	15	317	338	150	0
S-08	252	15	317	252	150	150

Table 7 建物火災危険度評価項目の例

List of Evaluation Items for Building Fire Hazard

評価項目	評価内容
出火防止	建物用途・規模、薬品・危険物保有状況、自動出火遮断装置、消火訓練の有無・頻度
早期対応	自動火災報知設備の耐震対策、防火管理体制、駆けつけ経路(階数、基準階床面積、安全区画)
初期拡大防止	収容可燃物、内装材、屋内消火栓設備、水系自動消火設備(ヘッドの種類、配管の耐震措置、水槽の設置場所)
延焼拡大防止	出火階(面積区画、間仕切り壁、火器使用室)、非出火階(空間構成、階段室区画、EV区画、層間区画、吹抜空間)、設計年代
煙伝搬防止	出火階(排煙設備、面積区画、間仕切り壁)、非出火階(廊下・付室排煙設備、空間構成、階段室区画、EV区画、空調ダクト、吹抜空間)、設計年代
防火設備の機能維持	周辺地域の電源・水の供給、建物内の電源供給、防火設備の維持管理
類焼防止	隣地境界との位置関係、外壁開口部、隣地建物加害危険、他テナント出火危険性、他テナントとの位置関係
水損防止	防水対策、他テナント出火危険性との位置関係

※文献 16) を基に作成

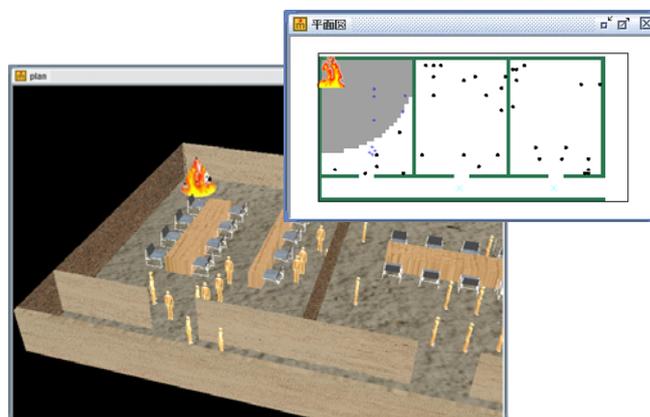


Fig. 6 煙拡散・避難シミュレーションモデルの表示例
Output of Smoke Diffusion and Multi Agent Simulation Model

3章で示したリスクの概念に基づく予測手法の他に、Table 7に示すような建物用途、規模、立地環境、影響要因として抽出された建築的対策、設備的対策、及び人的対策等に係る評価項目に対する診断結果から火災危険度を算出する手法が提案されている¹⁶⁾。

4.1.2 地震後火災時の避難性状予測技術 地震後火災の場合、天井や壁等の非構造部材の損傷・脱落、防火戸や消火設備等の防火関連設備の機能不全、物品の散乱等によ

り、避難通路が遮断される、あるいは煙の侵入により避難通路が危険な状態に陥ることを想定する必要がある。最近では、Fig. 6に示すような避難者ごとに歩行速度や行動特性等の個別のパラメータ値を与えることが可能なマルチエージェントモデルを用いた避難シミュレーションを用いて施設内の被災状況や煙拡散性状を再現した検討¹⁷⁾が進められている。この避難シミュレーションでは防火戸の損傷によって煙が拡散しやすくなることや、避難経路が通行不可能となったり、通行困難な状態になったりすることが再現できるので、地震後の避難安全性を評価するツールとして活用が期待できる。一方、地震後の停電や物品散乱状況を再現した実大規模空間における被験者実験¹⁸⁾によって、歩行速度がどのくらい低減するかといったデータの収集も行われている。

4.2 対策技術の現状と課題

地震後の火災対策は、建物の機能や目的に応じて総合的な判断のもと、バランスの取れた対策をとっていくことが必要である。ここでは、主な火災安全対策について、過去において地震被害の多い消火設備、防火設備を中心に現状の対策技術と課題について述べる。

4.2.1 初期拡大防止 火災時の初期拡大防止対策としてSP設備は比較的信頼性が高く、既往の作動信頼性に関する分析¹⁹⁾では、SP設備が作動すべき火災での作動率は0.87~0.93程度と報告されている。一方、地震後の作動率は前章の試算では0.45程度になるが、この作動率を高めるためには、SP設備の耐震化が重要である。SP設備は多くの部材で構成されているが、特にSPヘッド、及び配管部における破損はSPの不作動のみならず、水損を伴うこととなり、極力防止することが望ましい。天井埋め込み型ヘッドの普及によりSPヘッドの地震被害の割合が近年増加傾向であることは前述したが、東日本大震災ではSPヘッドの被害の内、巻き出し配管にフレキシブル配管(以後、フレキ管と呼ぶ)を用いていた割合が46%であったことが報告されている¹⁾。一般的にフレキ管はSPヘッドの地震被害の軽減に有効とされているが、フレキ管が地震に伴う天井材の変位に追従できる十分な長さに施工されていなかった事例や、フレキ管が配管等に固定されて可動できない条件で設置されていた事例があったことが東日本大震災後の調査で確認されている²⁰⁾。今後は天井材の耐震性強化対策と共に、SPヘッドと天井材が干渉しない設計法や施工方法をさらに検討する必要がある。

4.2.2 延焼拡大防止 初期消火に失敗しても建物全体への延焼を防止するための対策には、固定壁による防火区画、及び防火戸、防火シャッター、及び水幕等による防火設備がある。常時開放されている防火戸、防火シャッターは三方枠やガイドレールの変形等によって閉鎖(降下)不能となることが考えられる。また、水幕による防火設備はSP設備と同様に配管系統が損傷を受けると不作動や水損の恐れがある。一方、固定壁による防火区画については、軽鉄下地による石膏ボード壁が一般的な工法であるが、第

2章で述べたように東日本大震災において、石膏ボードのひび割れ、脱落等の損傷が確認されている。

阪神大震災以降、防火設備や防火壁の損傷を軽減するための様々な工法や対策が検討されているが、今回の震災において確認された新たな損傷事例も踏まえて、今後も継続的に地震後の延焼防止機能を維持するための工法や対策を検討する必要がある。

4.2.3 煙制御 排煙設備は、自然排煙方式と機械排煙方式の2種類に大別される。自然排煙方式は地震後においても排煙口さえ開放可能であれば、機能維持が期待できるが、機械排煙方式は排煙系統毎に排煙ファン、ダクト、排煙口、及び防火ダンパー等、複数の部材によって構成されており、これらの部材のうち1つでも損傷を受ければ当該排煙系統における機能は維持できないことになる。

一方、固定式ガラス防煙垂壁の損傷は単なる機能維持の問題に留まらず、防煙垂壁が破損し、落下することで直下の在館者に人的被害を及ぼすことや、破損したガラス片によって避難行動を妨げることなどの二次的な災害を引き起こす可能性が大きい。このようなガラス防煙垂壁に替わるものとして、近年、不燃材料の認定を取得したガラスクロスを用いた軽量で柔軟性のある固定式防煙垂壁が開発されており、今後の普及が期待される。

4.2.4 超高層建築物への対応 阪神淡路大震災におけるSP設備の損傷を例にとってみると、神戸市内のSP設備が設置されている544件の調査対象建物のうち、SP設備が損傷した建物は222件で損傷率は40.8%であったが、21階以上の建物に着目すると全16棟のうち14棟でSP設備が損傷しており、損傷率は87.5%に及んでいる²¹⁾。このように、過去の震災においては高層建築ほど地震動によって消火設備が機能不全となる割合が高くなる傾向が認められている。今回の震災においても長時間、長周期の地震動により震源地から遠く離れた超高層建築物において消火設備や防火設備の損傷が確認されており、超高層建築物における防火関連設備の地震後の機能維持に関して新たな対応策を検討する必要がある。

4.3 避難計画上の留意点

4.3.1 避難計画の原則 火災を対象とした避難計画は以下の三段階に分けて考えられている。

- 1) 2方向避難の確保：居室から階段に至る避難経路の保護と容量及び階段の配置の設定
- 2) 階段室の保護：階段室への煙の侵入や延焼防止
- 3) 避難階における階段から屋外までの避難経路の保護

地震後火災を想定した場合、天井や壁等の非構造部材の損傷・脱落、防火戸や消火設備等の防火関連設備の機能不全、物品の散乱等により、避難経路が遮断される、あるいは煙の侵入により避難経路が危険な状態になる等、避難経路の保護が保証されない状態が想定される。

地震後における避難経路の機能維持を確保するためには、避難経路と計画されている場所の耐震性を確認し、必

Table 8 避難経路を保護するための対策例
List of Countermeasures to Keep Evacuation Routes Clear

居室内の対策	<ul style="list-style-type: none"> ・避難経路となる部分に障害物を置かない。 ・避難経路は1.2m以上の幅を確保する。 ・窓側に背の高い什器等を配置しない。 ・ガラス窓には飛散防止フィルムを貼る。 ・キャスター付きのワゴン・ラックはキャスターをロックしておく。または配置する位置を注意する。 ・引き出し式の保管庫はラッチ機能付きの物を選ぶ。 ・2段の保管庫は必ず上下を連結させる。また、金具等で壁や床への固定を行う。 ・保管庫の上に物を置かない。 ・ガラスの保管庫には飛散防止フィルムを貼る。 ・ローパーティションについては直線のレイアウトは避け、L、T、コ、H、+型のレイアウトを採用する。
居室出口付近の対策	<ul style="list-style-type: none"> ・出口付近に背の高い什器を配置しない。やむを得ず配置する場合は転倒防止対策を施す。 ・出口付近に重量物を置かない。 ・出口付近に危険物(薬品等)を置かない。
廊下(階段室)部分の対策	<ul style="list-style-type: none"> ・廊下にロッカーや戸棚を置かない。 ・廊下・階段室に面したガラス開口部には飛散防止フィルムを貼る。

要な耐震対策を講ずるだけでなく、日常の建物運用での安全点検と是正措置を徹底することにより被害低減を図ることが重要である。Table 8に事務所等を想定した建物運用における避難経路の保護に関する具体的対策を示す。

4.3.2 最終避難場所の考え方 建築基準法では、火災時に廊下、階段を経由して避難階(通常は1階)まで降り、避難階から屋外の安全な公道等を最終避難場所に設定して避難させることを原則としている。しかし、地震後の火災では、同時多発火災等の影響により、公設消防による消火及び救助活動が十分に期待できないため、特に大規模建築物、及び超高層建築物、あるいは自力避難困難者が多数いる施設等においては、屋外の安全な避難場所まで在館者全員を避難・誘導させることが困難な場合が考えられる。また、地震直後においては外装材、ガラスの落下等の恐れもあり、屋外の避難場所が安全であるとは言い難い。従って、地震後火災では最終避難場所に至るまでの避難経路の途上に一時待機場所や中間避難階を設けることや、病院の手術室などのろう城区画のように避難しなくても一定時間は火災からの煙・熱の影響を受けない空間を確保するなど、火災時の避難場所を段階的に想定する手法が有効であると考えられる²²⁾。

5. まとめ

本報では東日本大震災における防火関連設備の被害事例を紹介する共に、地震後に発生する火災を想定した避難リスク評価、ならびに地震後の火災安全性能確保のための現状の対策や課題について論じた。今回の震災では津波による被害が大きくクローズアップされたが、長時間にわたる揺れや長周期地震動の影響により震災から遠く離れた地域においても建築物の非構造部材の被害が甚大となり、これに伴って、防火関連設備の被害が少なからず発生した

ことも今回の震災被害における特徴の1つと言える。

このような防火関連設備の被害が地震後の火災安全性能に与える影響を評価する手法として、本論文で紹介した避難リスク評価は有効であると考えられる。但し、本論文で用いた防火関連設備の被害率は限られた地域の、しかも少ない調査標本数から求められているため、算出された火災リスクの値は参考値として留めておくべきである。むしろ本評価手法は、地震後も人的被害を生じさせない火災安全設計を行う上で、どの対策に重点をおくべきかといった火災安全対策の相対的評価や、地震後の対応マニュアルをどのように策定するかといった検討場面において役立てられることが期待される。

今後は今回の震災で得られた被害状況をさらに分析し、近い将来発生が予想されている、連動型の地震や首都直下型の地震において、過去の大地震、及び今回の震災と同様の被害が発生しないようなソフト・ハードの対策技術や設計手法の検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 日本火災学会東日本大震災調査委員会編:東日本大震災火災等調査報告書(速報版), (2012)
- 2) 栃木県産業労働観光部産業政策課:東日本大震災における工場等修復時の地震対策に関するアンケート結果, (2012)
<http://www.pref.tochigi.lg.jp/f01/work/shoukougyou/kigyouricchi/documents/120321.pdf>
- 3) 東京消防庁:平成23年度長周期地震動等に対する高層階の室内安全対策専門委員会報告書, (2012)
<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-bousaika/report/2012/02/>
- 4) 国土交通省国土技術政策研究所, 独立行政法人建築研究所:平成23年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査 白河市, 須賀川市, 仙台市におけるRC造, S造, 非構造部材を中心とした建築物被害調査(速報), (2011)
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110324kentuku3.pdf>
- 5) 市原嵩紘, 他: 損傷を被った間仕切壁の耐火性能に関する実験 その3 加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 149-150, (2010)
- 6) 国土交通省国土技術政策研究所, 独立行政法人建築研究所:平成23年東北地方太平洋沖地震による建築物被害 第一次調査速報 二本松市, 郡山市, 福島市におけるRC造, 鉄骨造及び非構造部材を中心とした被害, (2011)
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110314kentuku.pdf>
- 7) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会:阪神・淡路大震災調査報告 建築編-6 火災, 情報システム, (1998)

- 8) 日本建築学会:2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, (2011)
- 9) 南部世紀夫, 他:兵庫県南部地震による東京消防庁地震出火件数予測手法の検証, 日本建築学会計画系論文集No. 520, pp. 239-246, (1999)
- 10) 池島由華, 他:統計データに基づく用途別の避難リスクの算出-火災安全設計における設計基準避難リスクに関する研究-, 日本火災学会論文集Vol. 61 No. 3, pp. 1-10, (2011)
- 11) 平成12年建告第1441号, 同第1442号
- 12) 山口純一, 他:新しい避難安全検証手法の開発-その1 避難開始時間の設定方法避難開始時間の設定方法に関する研究-, 日本建築学会学術講演梗概集(A-2), pp. 287-290, (2010)
- 13) 間瀬亮平, 他:煙層下端高さに基づく避難安全検証法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集No. 652号, pp. 481-490, (2010)
- 14) 関沢愛, 他:東日本大震災による火災の発生状況について -消防本部へのアンケート調査結果に基づく分析-, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 112-115, (2012)
- 15) 田中哮義:東日本大震災により明らかになった地震火災の特徴と火災対策上の課題, 安全工学シンポジウム2011講演予稿集, pp. 25-28, (2011)
- 16) 損害保険料算出機構:建物の地震火災危険度に関する研究, 地震保険調査研究 No. 48, p. 183, (2001)
- 17) 山口純一, 他:煙拡散・避難シミュレーションモデルの開発(その1)~(その3), 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 156-161, (2012)
- 18) 北後明彦, 他:地震直後の停電と物品散乱を想定した通路歩行実験(その1)~(その3), 日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 230-235, (2011)
- 19) 池島由華, 他:統計データに基づくスプリンクラー設備の作動率の分析:日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 164-165, (2012)
- 20) 防火設備等の地震時信頼性研究会:防火設備等の地震時被害の実態と機能維持に関する調査研究報告書, p. 36, (2012)
- 21) 神戸市消防局予防部査察課:兵庫県南部地震によるスプリンクラー設備の損傷に関する実態調査結果, 火災46(3), 日本火災学会, pp. 5-8, (1996)
- 22) 国土交通省:平成23年度建築基準整備促進事業「15. 防火・避難対策等に関する実験的検討」報告書, (2012)