

避難シミュレーションによる構造物の避難信頼性評価

Evaluation of evacuation reliability of building structures using evacuation simulation system

有友春樹*, 磯打千雅子**, 白木渡***, 井面仁志****

Haruki Aritomo, Chikako Isouchi, Wataru Shiraki, Hitoshi Inomo

*博士(工学) 日本ミクニヤ株式会社東京支店 (〒213-0001 神奈川県川崎市高津区溝口 3-25-10)

**香川大学大学院工学研究科, 博士後期課程 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

*** 工博 香川大学教授, 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**** 博士(工学) 香川大学教授, 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

The evacuation reliability is defined as the probability that the necessary time for escape t_{escape} is smaller than the available time for escape $t_{available}$ from a floor in a structure. In evaluation of evacuation reliability, the evacuation dynamics in conjunction with a probabilistic safety concept from an office floor of building is considered in occurrence of a big earthquake. In this study, first the statistical characteristics such as the mean value and the variance of t_{escape} are evaluated by the use of a simulation approach using the Cell Automaton model combined with Monte Carlo model. In simulation the variability of risk factors such as complex internal configuration of floor, operation condition of emergency exit, condition of escape route, number of user in the facility, panic behavior of evacuees, and so on are considered. Second the available time for escape $t_{available}$ from the floor is assumed to be a deterministic value. Finally the evacuation reliability index β is calculated as the probability that t_{escape} is smaller than $t_{available}$. The emergency exit and the number of user in an office floor effect on the evacuation reliability are discussed.

Keywords: evacuation reliability, evacuation simulation system, emergency management, building structures

キーワード: 避難信頼度, 避難シミュレーションシステム, 危機管理, 建築構造物

1. はじめに

近年, 構造物の設計には, 信頼性理論に基づいた限界状態設計の考え方が導入されている。この限界状態設計とは, 構造物の使用限界状態・終局限界状態・疲労限界状態を明確に定義し, 限界状態ごとにもっとも適切な方法で, 安全性を照査する方法である。材料強度や荷重などの不確実性が考慮され, 構造物の安全性を確率論的に保障することが可能になる設計法である。このような設計法の導入により, 構造物が要求性能を満足する度合いを信頼度で評価することが可能となる。

我が国では, 平成 14 年から建築構造物に性能照査設

計導入されたのを契機に, 災害発生時における建物内避難(階避難)を考慮した設計が求められるようになっていく。災害発生時の構造物の安全性・信頼性を検討するに当たり, 構造物自体が要求性能を満足し十分な信頼性(ハード信頼性)を有することはもちろんのこと, 利用者が建物内から安全に避難可能な空間設計がなされ, 十分な避難信頼性(ソフト信頼性)が確保されていることが重要となる。

災害時の安全な避難を検討する場合, 指標として避難時間が用いられる。避難時間の算出には, コンピュータシミュレーションが良く用いられる。地震や火災等の様々な災害状況及び避難状況をコンピュータ上で再現し

て、フロアにいる人々全員が避難するまでの時間を避難時間と定義して、シミュレーションを用いて算出する。しかし、この避難時間は、フロアにいる人々の人数と配置、各自の行動特性の違い、フロアのレイアウト、災害被害（棚が横転、火災発生等）の発生位置の違いを考慮すれば当然バラツキを有する確率量になる。M. Dehne ら²⁾は、避難時間のバラツキを考慮して避難信頼度算出方法を提案している。しかし、我が国における従来の研究³⁾⁻⁹⁾では、避難時間の検討において確率的安全性の概念が導入されておらず、避難信頼度の評価がなされていない。

本研究では、建物内のフロアを対象として、避難信頼度を評価することを考える。まず、その利用状況を考慮して避難完了時間 T_{escape} の分布特性をシミュレーションにより評価する。次に、地震等の災害が発生した場合のフロアの避難限界時間 $T_{available}$ （実際には、震度・火災状況等により構造物のハード信頼性に依存し、時間のバラツキを有しているが、本研究では確定量で示している）を求め、 T_{escape} が $T_{available}$ を超えない確率として避難信頼度を算出する。さらに、フロアのレイアウトを変更した場合の避難信頼度の変化について検討し、フロアの避難安全設計について考察する。

2. 避難信頼性の評価

2.1 構造物の信頼性評価法

いま、構造物の材料強度を R 、荷重作用を S とし、荷重も強度もある確率特性に従う確率変数とする。荷重 S が強度 R を上回った場合に構造物が破壊すると定義すると、構造物の安全余裕 M （限界状態関数）は、次式(1)で表される。

$$M=R-S \quad (1)$$

強度と荷重は統計的に独立であるとすると、 M の平均値 μ_M と分散 σ_M^2 は、それぞれ次式(2),(3)で表される。

$$\mu_M=\mu_R-\mu_S \quad (2)$$

$$\sigma_M^2=\sigma_R^2+\sigma_S^2 \quad (3)$$

また、構造物の信頼度は次式(4)で定義される信頼性指標 β を用いれば、確率計算を実行すること無く簡単な計算で評価できる。

$$\beta=\mu_M/\sigma_M \quad (4)$$

このように、信頼性指標 β は構造物の信頼度を簡単に算出できることから、構造物の信頼性の評価尺度としてよく用いられる¹⁰⁾⁻¹²⁾。

2.2 構造物の避難信頼性評価

M. Dehne ら²⁾は、2.1 節で述べた構造物の信頼性評価法と同様な方法で避難信頼性を評価する方法を提案している。式(1)と同様、避難安全余裕（限界状態関数） Z を次式(5)で定義している。

$$Z=T_{available}-T_{escape} \quad (5)$$

ここに、 $T_{available}$ ：避難限界時間、 T_{escape} ：避難完了時間である。そうすると、この避難に関する安全余裕 Z が $Z>0$ となる確率が避難信頼度、 $Z\leq 0$ となる確率が避難危険度を表すことになる。

また、式(4)で定義される構造物の信頼性指標 β と同様に、避難信頼性指標 β は、次式(6)で定義できる。

$$\beta=\mu_Z/\sigma_Z \quad (6)$$

ここに、 μ_Z は Z の平均値で

$$\mu_Z=\mu_{T_{available}}-\mu_{T_{escape}} \quad (7)$$

で表される。 $\mu_{T_{available}}$ は $T_{available}$ の平均値、 $\mu_{T_{escape}}$ は T_{escape} の平均値である。

また、 σ_Z は Z の標準偏差で

$$\sigma_Z=\sqrt{(\sigma_{T_{available}}^2+\sigma_{T_{escape}}^2)} \quad (8)$$

と表せる。ここに、 $\sigma_{T_{available}}^2$ は、 $T_{available}$ の分散値、 $\sigma_{T_{escape}}^2$ は、 T_{escape} の分散値である。

避難完了時間 T_{escape} の確率特性（平均値及び分散値）を、避難シミュレーションを使用することによって算出する。避難シミュレーションでは、構造物内のフロアのレイアウトの変更、非常口の稼働状況、避難経路の状態、施設利用パターン、避難者のパニックの振舞い等が不確定なパラメータとして考慮できる。本研究では、非常口の稼働状況、施設利用パターン（利用人数のランダム配置）に限定して算出する。一方、避難限界時間 $T_{available}$ については、地震等の災害の規模に従って確定量として算出する。

3. 避難シミュレーションシステム

2.2 節で定義した式(5)の避難安全余裕 Z を構成する避難完了時間 T_{escape} を求めるために、本研究では、著者らが開発した参加型避難シミュレーションシステムを使用する¹³⁾。このシステムでは、セルオートマトン (CA) モデルを用いて緊急時の避難行動を使用して再現している。CA モデルとは、簡単な遷移規則に従ってセル間の局所的な相互作用から複雑な現象を作り出すものである^{14),15)}。避難シミュレーションでは、現実の空間を 1 辺が均等な空間格子 (0.5m×0.5m) をとる 2 次元セルを用いてモデル化を行い、セルが取りうる状態として避難者、障害物、歩行可能空間、ハザードの 4 種類を設定している。このように現実の空間をセルの内部状態としてモデル化することにより、様々な状況を再現することが可能である。

避難シミュレーションにおける基本的な原則を以下に示す。

- ・空間：平面の 2 次元空間を想定し、階段等での上下への移動は考慮しない。
- ・避難者：全ての避難者は局所的な決められた遷移規則に従って行動する。
- ・避難者の目的：全ての避難者は、避難者が存在する空間からの脱出を目的とする。
- ・避難者の移動：避難者は、時間 $t+1$ 時間後において、

時間 t において存在するセルに隣接する 8 個のセルから 1 つのセルを選択して移動する。

さらに、避難者の属性、避難行動、ハザードの遷移規則などそれぞれの特性により簡単なルールを設定することにより、避難状況のシミュレーションを再現可能としている。なお、具体的な避難行動における CA モデルの遷移規則については、参考文献¹⁴⁾を参照していただきたい。

この避難シミュレーションシステムの主な特徴を以下に示す。

- ・シミュレーションの可視化：避難の状態を可視化することにより、避難状況の把握が簡単に行える。また、言語に JAVA を用いることにより、市販の PC で実行可能としている。
- ・CA モデルを用いることにより、シミュレーションの途中で障害物、避難者等を追加し、災害状況をシミュレーションの途中で変化させることが可能であるため、シミュレーションの実行中に参加者の意見を反映することが可能である。
- ・避難者数や避難時間等をモニターの画面上に数値で表示するようにしているため、時々刻々と変化する避難状況を定量的に判断することができる。
- ・操作は、マウス操作のみで行うことが可能である。
- ・使用する地図を変更するだけで、建物から地域に至るまで、様々な災害空間を再現できる。

以上示した特徴を有する避難シミュレーションシステムを用いて、避難信頼性評価に必要な避難完了時間 T_{escape} の確率特性（平均値及び分散値）を算出する。なお、シミュレーションの 1 step は、著者らの先の研究¹³⁾と同様、早足で歩く速度（時速 5km）で避難すると考えて、実時間の 0.36 秒に対応しているものとする。

4. 避難シミュレーションを用いた避難信頼性評価事例

4.1 利用状況別の避難時間算出

図-1 に示すような一般的なオフィスフロアを例に取り、構造物内のフロアからの避難信頼性評価を行う。オフィスフロアには複数の部屋が存在し、共有スペースや

会議室等を有している空間（40m×20m）を想定する。図中には、フロアの出口を○で、大まかな避難路を→で示している。

一般のオフィスフロアは利用時間・利用形態により人々の利用状況が異なる。例えば、会議中であれば大勢の利用者が存在し、昼休憩や退社時間以降であれば利用者は少なくまばらである。このような構造物の利用状況の変化は不確定要素として、避難シミュレーションに反映して避難完了時間 T_{escape} の確率特性（平均値及び分散値）を評価する。

本研究では、オフィスフロアからの避難を考える際の不確定要素として、フロアの人数と各避難者の位置のみを考慮する。その不確定要素を考慮するためにフロアにランダムに人々を配置し、その場所から地震等の災害が発生したと想定して一斉に避難を開始させ、避難時間を評価する。具体的には、対象とするフロアには最大 100 名の利用者が見込めるものとし、利用者の人数及び配置をランダムに決定し、突然災害が発生した場合の避難状況を再現する。図-2 に利用状況の異なるオフィスフロアを一例として示す。図-2(a)は利用者が少ない場合、図-2(b)は利用者が多い場合の例である。

異なる利用状況を再現するために、1 名から 100 名まで 1 名ずつ変化させてフロアにランダムに配置し、100 パターンのシミュレーションを各パターン 100 回ずつ総計 10,000 回の避難シミュレーションを行い、各パター

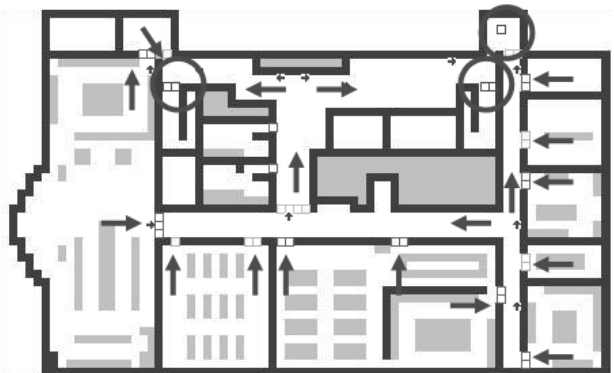


図-1 オフィスフロア例（非常口使用）



(a)利用者が少ない場合

(b)利用者が多い場合

図-2 利用人数の異なるオフィスフロア

ンの避難完了時間 T_{escape} を算出する。

シミュレーションにより得られた避難人数と避難時間 (step 数) の関係を図-3 に示す。図-3 より当然のことながらフロアの利用人数が増加するごとに避難完了時間 (step 数) が増加していることが分かる。また、利用人数毎にかなり避難完了時間がばらついていることも分かる。このばらつきは、利用者の配置が異なることが原因で発生しており、このフロアでは最大で避難時間 50step (50×0.36 秒=18 秒) ほどの違いがみられる。なお、このフロアの避難限界時間 $T_{available}$ を地震により火災等が発生した場合の確定量と仮定して 150 step (54 秒) と設定した、図-3 中に記載している。

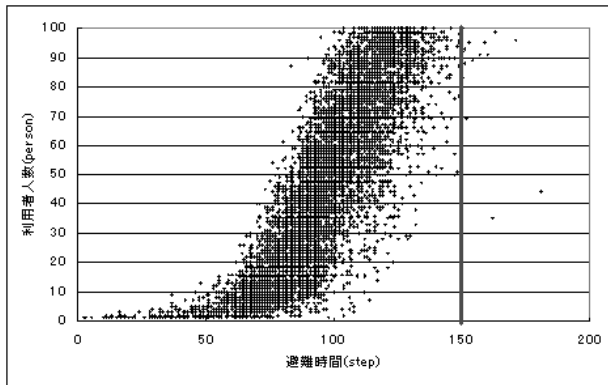


図-3 利用者人数と避難完了時間 T_{escape} の関係 (非常口使用時)

また、表-1 に利用人数 1~10 名, 10~20 名, ..., 90~100 名の 10 パターンの避難完了時間 T_{escape} の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ 及び分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ を示す。この表-1 から明らかかなように、フロアの利用人数が増加するほど避難完了時間の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ は増加しているが、分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ は 1~10 名のパターンが小さいだけで、それ以外のパターンでは 110(step)² 前後の値を示しており、あまり差は見られない。

表-1 避難完了時間 T_{escape} の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ 及び分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ (非常口使用時)

パターン	フロア 利用人数 (人)	$\mu_{T_{escape}}$ (step)	$\delta^2 T_{escape}$ (step) ²
1	1~10	65.93	65.89
2	11~20	80.25	112.78
3	21~30	87.19	93.86
4	31~40	92.24	107.18
5	41~50	96.51	114.52
6	51~60	102.54	109.99
7	61~70	106.91	115.86
8	71~80	111.64	106.69
9	81~90	116.58	124.23
10	91~100	121.67	114.14

4.2 避難信頼性評価

4.1 節で示したオフィスフロアの利用人数の違い (10 パターン) について得られた避難完了時間 T_{escape} の確率特性 (平均値及び分散) (表-1) を用いて、式(6)で定義される避難信頼性指標 β を評価する。なお、本研究では、上述したように避難限界時間 $T_{available}$ を 150step (54 秒) の確定量と仮定する。

表-1 の結果と式(5)~式(7)を用いて 10 パターンの避難信頼性指標 β を計算した結果を表-2 に示す。なお、表には T_{escape} が正規分布に従うと仮定した場合の避難危険度 $P_{risk} = \Phi^{-1}(-\beta)$ (ここに、 $\Phi^{-1}(\cdot)$ は標準正規分布関数の逆関数) も併せて示している。

この表-2 から、フロア利用人数が 1~10 名 (パターン 1) から 91~100 名 (パターン 10) の避難信頼性指標 β の間には、10.35~2.65 まで大きな差があることが分かる。このフロアの避難限界時間 $T_{available}$ を 150step (54 秒) の確定量と仮定した場合という限定条件の下ではあるが、このフロアに設計上想定された最大利用人数 100 名に近いパターン 10 (利用人数 91~100 名) では、避難信頼性指標 β は 2.65 (避難危険度 $P_{risk} = 4.02 \times 10^{-3}$) であるのに対して、最大人数の約半分に近いパターン 5 (利用人数 41~50 名) では、 β は 5.00 ($P_{risk} = 2.87 \times 10^{-7}$) となり避難危険度は約 1 万分の 1 に減少していることが分かる。

また、この分野の研究は緒についたばかりで、目標避難信頼性指標 β や許容避難危険度 P_{risk} を幾らにすべきかの議論は十分なされていない。しかし、構造物自体のハードな信頼性指標の目標値に比べれば直接人命に関わることから、同等以上の高い信頼性が求められるものと思われる。このような観点から、今後は構造物のハード設計に関わる避難限界時間 $T_{available}$ 、目標避難信頼性指標 β 、許容避難危険度 P_{risk} の設定等に関する検討が必要になる。

表-2 避難信頼性指標 β と避難危険度 P_{risk} (非常口使用)

パターン	フロア 利用人数 (人)	避難安全余裕 Z (step)		避難信頼 性指標 (β)	避難 危険度 (P_{risk})
		平均値 (μ_z)	標準偏差 (δ_z)		
1	1~10	84.07	8.12	10.35	2.09×10^{-25}
2	11~20	69.75	10.62	6.57	2.52×10^{-11}
3	21~30	62.81	9.69	6.48	4.59×10^{-11}
4	31~40	57.76	10.35	5.58	1.20×10^{-8}
5	41~50	53.49	10.70	5.00	2.87×10^{-7}
6	51~60	47.46	10.49	4.48	3.73×10^{-6}
7	61~70	43.09	10.76	4.00	3.17×10^{-5}
8	71~80	38.36	10.33	3.71	1.04×10^{-4}
9	81~90	33.42	11.15	2.96	1.54×10^{-3}
10	91~100	28.33	10.68	2.65	4.02×10^{-3}

4.3 異なるレイアウトにおける避難信頼性の比較

この節では、オフィスフロアの異なるレイアウトの例

として、非常口が使用できなかった場合を考える。普段から使用していない非常口が非常時に使用できるとは限らない。非常口が使用できない場合の避難信頼性を評価し非常口が使用できる場合の信頼性と比較する。

非常口が使用できないオフィスフロアの例を図-4に示す。非常口が使用できない場合で、4.1節と同様にフロアの利用人数が異なる10パターンの避難シミュレーションを行い、利用人数と避難時間の関係を非常口が使用できる場合と比較する。

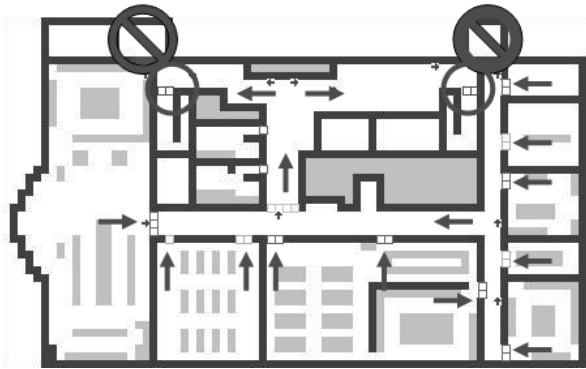


図-4 オフィスフロア例 (非常口不使用時)

まず、非常口が使用可能な場合と非常口が使用できない場合のそれぞれの避難完了時間 T_{escape} (step数) と利用人数 (人) を比較するために、両者のシミュレーション結果を図-5に示す。この場合も避難限界時間 $T_{available}$ を150step (54秒) と仮定して、図中に記載している。この図から、非常口が使用できない場合の避難完了時間の方が、非常口が使用可能な場合に比べてかなり大きな値でばらつきも大きくなっていることが分かる。

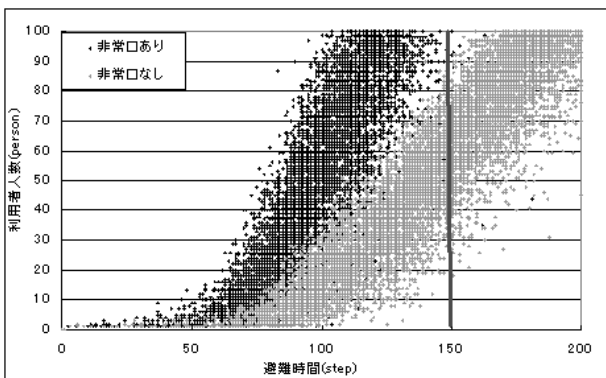


図-5 避難完了時間 T_{escape} と利用人数の関係 (非常口使用有無の場合の比較)

次に、非常口が使用可能な場合の表-1同様に、非常口が使用できない場合の利用人数1~10名、10~20名、・・・、90~100名の10パターンの避難完了時間 T_{escape} の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ 及び分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ を、表-3に示す。この表-3から明らかなように、フロアの利用人数が増加するほど避難完了時間の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ は増加しているが、分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ は1~10名のパターンがか

なり大きい値をしめしているが、それ以外のパターンでは150~180(step)²の値を示しており、あまり差は見られない。

しかし、表-1と表-3の結果を比較すると明らかなように、避難完了時間の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ 及び分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ のいずれの値も、非常口が使用できない場合の方が平均値と分散値ともに1.3~1.5倍程度大きな値になっていることが分かる。この結果から、非常口が使用できない場合の避難の困難さが数値的に明確に示されていることが分かる。特に、パターン1 (利用者数1~10名) の場合の分散値が、非常口が使用可能な場合に比べて約5倍になっており、利用人数が少ない場合には利用者の配置により避難完了時間のばらつきが大きくなる傾向があることが分かる。

表-3 避難完了時間 T_{escape} の平均値 $\mu_{T_{escape}}$ 及び分散値 $\sigma^2_{T_{escape}}$ (非常口不使用時)

パターン	フロア 利用人数 (人)	$\mu_{T_{escape}}$ (step)	$\delta^2 T_{escape}$ (step) ²
1	1~10	85.86	340.22
2	11~20	104.35	163.24
3	21~30	115.63	181.59
4	31~40	126.84	164.27
5	41~50	136.95	153.26
6	51~60	146.04	159.46
7	61~70	155.30	173.29
8	71~80	165.04	159.37
9	81~90	174.23	173.10
10	91~100	184.00	180.48

さらに、表-3に示すオフィスフロアの利用人数の違い (10パターン) について得られた避難完了時間 T_{escape} の確率特性 (平均値及び分散) を用いて、式(6)で定義される避難信頼性指標 β を評価する。なお、ここでも避難限界時間 $T_{available}$ を150step (54秒) の確定量と仮定する。

表-3の結果と式(5)~式(7)を用いて10パターンの避難信頼性指標 β を計算した結果を表-4に示す。なお、表には T_{escape} が正規分布に従うと仮定した場合の避難危険度 P_{risk} を併せて示している。この表から、フロア利用人数が1~10名 (パターン1) から91~100名 (パターン10) の避難信頼性指標 β の間には、10.35~2.65まで大きな差があることが分かる。このフロアの避難限界時間 $T_{available}$ を150step (54秒) の確定量と仮定した場合という限定条件の下ではあるが、非常口が使用できない場合は、フロア利用者が1~10名のパターン1で避難信頼性指標 β が3.48、避難危険度 P_{risk} が 2.51×10^{-4} 、41~50名のパターン5で β が1.05で P_{risk} が0.147と許容できない数値になっている。因みに、フロア利用者が91~100名のパターン10では β が-2.53で P_{risk} が

0.994 となり、人命に関わる被害が必ず出るという異常事態になる。

このように、避難シミュレーションを活用した避難信頼性の評価を行うことにより、例えば使用できることが前提として設置されている非常口等の設備や施設、すなわちハード信頼性が低下した場合、建造物の利用者が多い場合には、災害時に避難クライシスに陥る可能性を定量的に評価できる。

表-4 避難信頼性指標 β と避難危険度 P_{risk}
(非常口不使用)

パターン	フロア 利用人数 (人)	避難安全余裕Z (step)		避難信頼 性指標 (β)	避難 危険度 (P_{risk})
		平均値 (μ_z)	標準偏差 (δ_z)		
1	1~10	64.14	18.44	3.48	2.51×10^{-4}
2	11~20	45.65	12.78	3.57	1.78×10^{-4}
3	21~30	34.37	13.48	2.55	5.39×10^{-3}
4	31~40	23.16	12.82	1.81	3.51×10^{-2}
5	41~50	13.05	12.38	1.05	1.47×10^{-1}
6	51~60	3.96	12.63	0.31	3.73×10^{-1}
7	61~70	-5.30	13.16	-4.00	6.55×10^{-1}
8	71~80	-15.04	12.62	-1.19	8.83×10^{-1}
9	81~90	-24.23	13.16	-1.84	9.67×10^{-1}
10	91~100	-34.00	13.43	-2.53	9.94×10^{-1}

5. おわりに

本研究では、一般的なオフィスフロアを例に挙げて避難シミュレーションを用いた建造物の避難信頼性評価を行った。建造物から避難を開始するに当たっての不確定要素（例えば、利用者の人数、配置、行動特性、オフィスのレイアウト、災害時の被害状況等）を、避難シミュレーションを用いて評価することにより、建造物のフロアからの安全な避難を避難信頼性指標により評価可能になることを示した。

今回は、計算例としてフロアの利用者数の違いによる不確定性並びに非常口の使用可能性の有無に着目し、それらの不確定要素が避難完了時間に及ぼす影響を示し、避難信頼性評価を行った。その結果、使用できることが前提として設置されている非常口等の設備や施設、すなわちハード信頼性が低下した場合、建造物の利用者が災害時に避難クライシスに陥る可能性を定量的に評価することが可能になる。

ただし、本研究で示した例では、不確定要素としてフロアの利用者の人数と配置のみを考慮した簡単な例を示したが、避難の不確定要素は上述した通り利用状況だけでなく、利用者の行動特性・オフィス備品のレイアウト・災害時の被害状況等様々な要因が存在する。今後はこれらの不確定要素も考慮し、避難シミュレーションを実施することにより避難完了時間の算出精度の向上に努める必要がある。

さらに、本研究では避難限界時間を確定量とし仮定値

を用いたが、今後は避難限界時間の定量的な算出方法についても議論を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：火災と建築，共立出版，2005.
- 2) M. Dehne and D. Kruse: Design of Escape Routes by Simulation Evacuation Dynamics in Conjunction with a Probability Safety Concept, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, pp.213-223, 2007.
- 3) 松田泰治，大塚久哲，樗木武也：セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察，地域安全学会論文，No.2, pp.95-100, 2000.
- 4) 藤岡正樹，石橋健一，梶秀樹：マルチエージェント型避難モデルの特性評価，地域安全学会論文集 No.4, pp.57-64, 2002.
- 5) 森下信，中塚直希：セルオートマトンを用いた緊急避難時の群集流解析，第 52 回理論応用力学講演会，pp.121-122, 2003.
- 6) 熊谷兼太郎，小田勝也，土方聡，岡秀行：津波時の避難シミュレーションシステム及びモデル地域における構築，土木計画学研究講演集 Vol.33No.270, 2006.
- 7) 近田康夫，廣岡淳：CA による避難行動シミュレーション，第 9 回設計工学に関するシンポジウム講演論文集，pp.55-62, 2005.
- 8) 桑沢敬行，片田敏考，金井昌信：発災時刻別被災想定を可能にする災害総合シナリオ・シミュレーション，土木情報利用技術論文集 Vol.15, pp.211-222, 2006.
- 9) 堀宗朗，犬飼洋平，小国健二，市村強：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究，社会技術研究論文集 Vol.3, pp.138-145, 2005.
- 10) 室津義定，米澤政昭，邵曉文：システム信頼性工学，共立出版，1996.
- 11) 白木渡，井面仁志，荒川雅生，今井慈郎，石川浩：送電用標準鉄塔に関する LRFD フォーマットの提案，構造工学論文集 46A, pp.395-401, 2000.
- 12) 松保明憲：構造信頼性評価のための事象再現型モンテカルロ法の効率化，材料 Vol54No3, pp.314-319, 2005.
- 13) 有友春樹，白木渡，井面仁志：Live Design による参加型避難シミュレーションシステムの開発，安全問題研究論文集 Vol.1, pp.13-18, 2006.
- 14) 森下信：セルオートマトン複雑系の具象化，養賢堂，2003.
- 15) Andrew Ilachinski：Cellula Automata- A Discrete Universe, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001.

(2009年8月7日受付)