大規模地下空間における浸水時の 避難成功率向上に関する検討

川中 龍児¹・吉川 雅志²・石垣 泰輔³

¹正会員 関西大学 先端科学技術推進機構 客員研究員 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: kawanaka.ryuji@gmail.com

²学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

E-mail: k346032@kansai-u.ac.jp

³正会員 関西大学教授 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

近年、都市部において50mm/h以上の集中豪雨の発生回数が増加しており、地下空間に雨水が流れ込む被害が発生している。過去の被害においては、人命が失われたという事例もある。本研究では、大規模地下空間を対象に、浸水時の避難行動解析を行うことで、混雑度が避難成功率に与える影響について検討した。また、地下の接続ビルを避難経路とし、避難誘導した際の避難成功率の向上についても検討を行った。解析結果から、混雑度が大きくなると出口付近で人が滞留を起し、避難成功率が急激に低下することが確認できた。また、接続ビルを避難経路とすることで、滞留が解消され、避難成功率が向上する事や、避難の際には、地上への避難のみでなく、接続ビルへの避難を併用することが有効であることが確認できた。

Key Words : *underground space, evacuation, congestion factor, connecting building*

1. はじめに

近年、都市化の進展や地球規模の気象変動の影響と考えられる集中豪雨の発生回数が増加傾向にある。昨今の集中豪雨の特徴として、10から20分間など短時間かつ局地的に発生することから予測が困難であるにも関わらず深刻な被害を与える。さらに、都市部では一般的に時間雨量40から50mm程度の雨水が排水できるように設計されているが、短時間に雨水排水の許容量を超える豪雨が発生した場合には内水氾濫を生じるおそれがある。2013年8月25日午前11頃に大阪で発生した集中豪雨では10分間雨量で約23.5mmの降雨が観測された。これは約20分間で計画降雨量を上回るような猛烈な豪雨であった。このため、大阪有数の繁華街である梅田では内水氾濫が発生し、駅や商店が浸水の被害を受けた。このような都市部で発生するいわゆる都市型水害では地上の浸水のみでなく、地下街や地下空間への浸水が危惧されている。1999年6月に発生した福岡水害では地下街や地下鉄に浸水し都市機能が麻痺したことに加え、地下室に閉じ込められて人命が失われている。

このような問題を解決するため、地下空間の浸水解析

や避難に関する検討が多く行われている。戸田ら¹⁾は京都市御池地下街を対象とし、実物大の1/30の模型を用いて実験を行っている。また、タンクモデルによる数値解析を行い、地下街からの避難を考える際に通路部と階段部の避難の危険性をともに検討することが重要であることを指摘している。井上ら²⁾は、内水氾濫時における大規模地下空間の浸水過程と避難の安全性に関して検討を行い、地下街管理者が施設の脆弱箇所を熟知しておく必要があることを指摘している。

一方、避難に関して、石垣ら³⁾は実物大の階段模型を用いて、避難に関する実験を行っている。実物大階段模型を用いた実験では、上流端水深を変化させ、被験者の昇降時間を計測している。上流端での水深の上昇に伴い避難が困難になることが分かり、成人女性では0.2m、成人男性は0.3m以上になると避難の所要時間は大幅に増加することがわかっている。また、避難困難度指標として単位幅運動量(u^2h)のみを用いていたが、大西ら^{4,5)}の研究では運動量と水深の大きさを表現できる単位幅比力($u^2h/g+h^2/2$)を新たな指標として提案している。また、関根⁶⁾は新宿駅周辺を対象に浸水時の避難行動解析を行い、利用者が本能に任せて単純に避難した場合と、標識を設

けるとともに管理者を要所に配置する避難誘導を行った場合とで解析結果を比較し、二次災害の危険性の高い最も混雑する階段への利用者の集中が誘導により回避できることを示している。また、著者ら⁷⁾による既往の研究では、混雑度(人/m²)を変化させた大規模地下空間を対象に、浸水時の避難行動解析を行い、混雑度が0.500人/m²を超えると、出口となる階段の前で人が滞留を起こす箇所が増加し、地下空間からの避難が困難となることがわかっている。しかし、従来の研究は、避難成功率を向上させるための方法についての検討は行われていない。現在、地下街の管理会社では、災害時に、地下の接続ビルを避難経路とし避難誘導を行う計画⁸⁾が策定されている。これらのことから本研究では、地下空間に存在する接続ビルを避難経路とすることの有効性、混雑度が安全避難に与える影響について避難行動解析を行うことで検討した。さらに、この結果より、安全な避難計画の策定において考慮すべき事項を明らかにすることを目的とした。

2. 解析方法の概要

(1) 地下空間浸水解析の概要

対象としたのは実在する大規模地下空間である。この大規模地下空間は約1km四方に広がる日本で有数の地下街で、接続する駅が7つあり、百貨店、ビルなどが存在する。公共の出入口として129ヶ所を考慮し、その内2m

図-1 地下街の出入口

幅の出入口は49ヶ所、4m幅の出入口は80ヶ所である。地下街の出入口を図-1に示す。大規模地下街における浸水計算の流入量条件として、実降雨(2008年岡崎豪雨、最大1時間雨量146.5mm、総雨量447.5mm)を用いたInfoWorks CSによる解析を行い、出入口地点の流入量を求め、それを大規模地下空間の流入条件とした。InfoWorks CSとWallingford Software社より開発された下水道ネットワークを考慮した地上部の氾濫解析が可能な解析ソフトである。InfoWorks CSを用いて解析を行った結果、雨水が流入する出入口は45ヶ所であった。大規模地下街における浸水解析を行う計算モデルとして、2次元浅水流方程式を基礎式とする構造格子モデルを用いた。浸水解析の対象は大規模地下街の通路部分と地下鉄・改札口・店舗を対象とした。またメッシュのサイズは2mの正方格子である。出入口の幅は流入の際に重要であり、2m、4mの幅で考慮している。

(2) 浸水を考慮した避難行動シミュレーションの概要

戸田ら¹⁾石垣ら³⁾の研究では、地下空間浸水時の避難行動は、それぞれの利用者の性別、年齢、歩行密集度などが大きく関わると指摘している。このことから、地下空間浸水時の避難の安全性を考える際、これらのことを考慮した。本研究では避難者の性別や年齢などの属性を個々に取り扱うことが可能なマルチエージェントモデルを用いた。基本的なモデルの考え方については、関根⁹⁾の研究を参考に以下に示すようないくつかの修正を加えたものを適用した。

a) 移動目標の設定

人が移動を行う際には、何らかの目標に向かって移動する。特に浸水時の避難においては、避難誘導灯、地上へ向かう階段、通路の曲がり角が目標となることが考えられる。移動目標の設定において浸水計算の格子を階段、通路、店舗、交差点のような属性を持った幾つかの領域に分割し、人はその領域と領域の境界を目指して避難を行うように設定した。また、この境界にさまざまな選択の条件を設けることで細かな移動先の選択が行えるようにした。一つ目の条件として、領域の属性ごとに優先度を設け、優先度の高い領域と接続する境界を移動目標とした。これは、地上に避難することを優先することから、出口が最も優先度が高く、次に上に向かう階段、通路、店舗とした。次の条件として、同じ優先度の境界が複数存在する場合には最も近い境界を移動目標にするようにした。実物大の階段実験の際に行ったアンケート調査⁴⁾によると、階段の上部の水深が約0.1~0.2m程度で恐怖を感じることが分かった。そこで、階段上部の水深が0.1m以上の場合にはその階段を選択しないように設定した。

b) 避難困難度指標

浸水を伴う避難計算を行う際に、浸水による避難困難

図-2 避難行動解析対象区域

図-3 出口の位置関係

度を定義する必要がある。そこで、大西らは実物大模型実験を行うことによって、どのような流況で人が避難行動できなくなるかについて検討を行っている。この研究において提案されている指標が「単位幅比力」である。

「単位幅比力」は運動量と水圧の和で表されることから、水深が深い状況や水深が浅くても流速が早い状況など、様々な流況を幅広く評価することができるため、本シミュレーションの避難状況の指標として用いた。

c) 避難時の歩行速度

浸水時の避難行動における歩行速度は水深、流速、年齢、性別が影響を与えることが指摘されているため、これらの影響を石垣ら³⁾によって行われた浸水時を想定した実物大模型を用いた避難体験実験の結果を定式化することで再現した。浸水時の歩行速度は、最大歩行速度に流れや水深による影響と歩行者の密集度による影響を乗

表-1 解析条件

Case	避難場所	避難者数 (人)	混雑度 (人/m ²)
A-1	地上への出入り口のみ	1020	0.13
A-2	地上への出入り口のみ	2040	0.25
A-3	地上への出入り口のみ	4080	0.50
A-4	地上への出入り口のみ	6145	0.75
A-5	地上への出入り口のみ	8100	1.00
B-1	接続ビルのみ	1020	0.13
B-2	接続ビルのみ	2040	0.25
B-3	接続ビルのみ	4080	0.50
B-4	接続ビルのみ	6145	0.75
B-5	接続ビルのみ	8100	1.00
C-1	地上への出入り口 +接続ビル	1020	0.13
C-2	地上への出入り口 +接続ビル	2040	0.25
C-3	地上への出入り口 +接続ビル	4080	0.50
C-4	地上への出入り口 +接続ビル	6145	0.75
C-5	地上への出入り口 +接続ビル	8100	1.00

表-2 避難困難度指標

	避難困難状態	避難限界状態
成人男性	0.125	0.250
高齢男性	0.100	0.200
成人女性	0.100	0.200
高齢女性	0.080	0.160

じることで求められると仮定すると次式⁹⁾で表される。

$$v = S_p D_e v_{nmd} \quad (1)$$

ここで、 v は歩行速度、 S_p は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 D_e は歩行密集度による歩行速度の減少率、 v_{nmd} は最大歩行速度を示している。

水流の影響による歩行速度の減少率については、水深と流速を自分の存在する計算格子から取得し、単位幅比力を用いて評価した。

$$S_p = 0.22 \exp(-125.3 M_0) - 0.71 M_0 + 0.78 \quad (2)$$

ここで、 M_0 は単位幅比力($u^2 h / g + h^2 / 2$)を示している。

次に、歩行密集度による歩行速度の減少率については最も近い人の影響を大きく受けることが考えられることから、実験より得られた次式を用いて評価した。

$$D_e = \exp(L^{4.37} / 2.55) - 0.48 \quad (3)$$

ここで、 L は視野内で最も近くに存在する人との距離を示している。

以上の式を用いることで、様々な影響を考慮した歩行速度が計算される。

(3) 解析条件

浸水解析については、各々の階段からの流入量や流入開始時間が地下空間全体の浸水に大きな影響を与えると考えられることから、地下空間全体について解析を行った。一方で、人の避難については遠くの出口に向かって避難することは考えにくいことから、ある程度限定された空間からの避難についてのみ考えた。そこで、本シミュレーションでは、接続ビルと地上への階段がある程度存在し、且つ地下空間管理者が避難計画を考えるという観点から、対象とした地下空間の管理区分の1つであるブロックに着目しシミュレーションを行った。接続ビルは止水対策が万全であると仮定し、接続ビルからの浸水は無いものとしている。また、図-3の青い円で囲んだ部分が地上部への階段、緑の円で囲んだ部分が接続ビルへの連絡通路となっている。解析条件を表-1に示す。Aシリーズは、出口を地上への階段のみとし、地上に達することで避難完了とした。Bシリーズは、出口を接続ビルとの接続部のみとし、ビル内に達することで避難完了とした。Cシリーズは、地上部への階段と、接続ビルへの接続部の両方を出口とした。それぞれのシリーズで設定する避難者数は、1のケースでは混雑度が約 $0.125\text{人}/\text{m}^2$ となるように配置した1020人、2のケースでは混雑度が約 $0.250\text{人}/\text{m}^2$ となるように配置した2040人、3のケースでは混雑度が約 $0.500\text{人}/\text{m}^2$ となるように配置した4080人、4のケースでは混雑度が約 $0.750\text{人}/\text{m}^2$ となるように配置した6145人、5のケースでは混雑度が約 $1.000\text{人}/\text{m}^2$ となるように配置した8295人となっている。安全避難を考えた場合に、全ての人が安全に避難できることが前提であるから、避難者は全員、自力での避難が困難となるのが最も早い高齢女性のみとした。高齢女性の通常歩行速度（非浸水時の歩行速度）を $v=0.8\text{m/s}$ とし、先に述べたように存在する格子内の浸水状況や近傍の人との距離によって変化させた。ただし、階段部の歩行速度について体験実験の結果³⁾より、通路部の約半分となることが確認されていることから、階段部における歩行速度は、浸水の影響や避難時の密集度によって歩行速度を変化させた後に1/2を乗じて歩行速度とした。避難開始の条件については、大西ら⁴⁾のアンケート調査の結果から、過半数の人はわずかに水が流入した程度では、浸水に気づいてもすぐに避難を始めないということが指摘されているため、自身の存在する格子水深が 0.02m 以上となった場合に避難行動を開始するようにした。避難者は浸水状況により安全避難状態、自力避難困難状態、自力避難限界状態のいずれかの状態となり、それぞれの状態は自身が存在する浸水解析の格子内の単位幅比力によって決定されるとした⁹⁾。それぞれの単位幅比力を表-2に示す。なお、避難困難状態では手すりや他人の補助がないと歩行できない状態であるため歩行速度を $v=0.0\text{m/s}$ としてその場に滞

図-4 浸水と避難の様子 (左: A-5, 右: C-5)

図-5 混雑度の違いによる避難成功率の時間変化

留するようにした。

3. 解析結果

図-4に、AおよびCシリーズで、避難者数を最も多く配置した、A-5とC-5の避難の様子を示す。図より、A-5では、人が多いため、出口の階段付近、特に北西の階段と南西の通路で重度の滞留が発生し、避難が思うように進んでいない様子が見て取れる。それに対して、C-5では、配置人数は同じだが、A-5で重度の滞留が見られた、北西の階段付近と、南西の通路付近に接続ビルがあり、接続ビルへ避難誘導することにより、複数の出口に避難者が分散し、A-5に比べて滞留が小さくなっている様子が見られた。このことより、地下空間浸水時に、接続ビルへ避難誘導することは、出口付近の滞留を解消するのに効果的であると言える。次に、各シリーズの混雑度による避難成功率の変化を図-5に示す。Aシリーズでは、既往の研究結果⁷⁾と同様に、混雑度 $0.500\text{人}/\text{m}^2$ までは80%程度の避難成功率となっているが、混雑度 $0.500\text{人}/\text{m}^2$ を超えると、避難成功率が急激に低下し、混雑度が $1.0\text{人}/\text{m}^2$ になると、約30%の人が避難できないという結果が見られた。Bシリーズは、混雑度が $0.250\text{人}/\text{m}^2$ までは全員避難完了しており、Aに比べて高い避難成功率を示しているが、混雑度 $0.500\text{人}/\text{m}^2$ 以上になるとAのシリーズと同様に、急激に減少する傾向となっている。Cのシリーズでは、他の2つのシリーズとは違い、混雑度が $0.500\text{人}/\text{m}^2$ を超えても、混雑度は急激には下らず、高い数値を示している。しかし、依然3%程度の人が避難成功には至っていないため、人の多い地下空間からの脱出には、迅速な対応が必要であると考えられる。図-6, 7, 8に各シリーズの避難成功率の時間変化を示す。避難成功率が65%に到達するまでの時間を図-9に示す。各ケースで比較すると、A-5では浸水開始から69分、B-5では浸水開始から47分、C-5では浸水開始から39分となっている。接続ビルへの避難経路に設定していないA-5のケースと、接続ビルへの避難経路に設定しているB-5, C-5のケースを比較すると20分以上の時間差があることがわかった。このことから、接続ビルへの避難を促すことによって、要する時間が格段に短縮されることがわかった。しかしながら、このままではどこがどのくらい危険であるか、または混雑度の違いによる変化がどこにどれくらい表れているのかという定量的な評価が困難である。そこで、次にこれらの結果を用いて避難困難度を定量的に評価することを試みた。

4. 単位幅比力を用いた避難経路の安全性の評価

地下空間浸水時には、浸水による影響、避難開始の遅

図-6 避難成功率の時間変化 (Aシリーズ)

図-7 避難成功率の時間変化 (Bシリーズ)

図-8 避難成功率の時間変化(Cシリーズ)

図-9 避難成功率が65%に達する時間

れによる影響、人の密集度による影響などによって、避難経路の安全性に大きな影響を与えることが考えられる。これらの影響を適切に評価し、危険な場所を事前に把握することが避難計画を策定する上で重要になる。ここでは浸水解析の結果と避難行動解析の結果を用いて避難経路の安全性の評価を行った。提案する手法として、ある格子の避難困難度評価を行う場合に、その格子から避難を開始すると避難行動中にどのような状態になるのかについて単位幅比力を用いて評価することにした。図-10に、各シリーズで、混雑度が $0.500\text{人}/\text{m}^2$ 以上である4と5のケースの、解析対象区域内の全ての人が避難限界状態となった時点の様子を示す。赤くなっている箇所が、人が避難限界状態となっている場所である。A-4、A-5のケースでは北西の階段付近と、南側の通路付近で重度の滞留が発生している様子が見て取れる。これは、出口となる階段から雨水が流入してきているため脱出することが出来ず、他の出口に向かおうとしたところで浸水深が高くなり、避難限界状態になったと考えられる。B-4、B-5

のケースでは南側の通路で滞留が発生している。これは、東側の近くに接続ビルが存在しない区域から避難を開始した人が、接続ビルへと向かうために長い距離を移動しようとした結果、避難が間に合わず、避難限界状態になってしまったと考えられる。C-4、C-5では中央の階段付近で小さな滞留が発生しているが、接続ビルのみを避難経路としているB-4、C-5のケースでは、中央の階段付近で滞留は発生していない。本研究では、接続ビルからの浸水は無いものと仮定しているため、雨水が流入してくる中央の階段よりも、接続ビルへの避難を優先させた方が良い結果となったと考えられる。

以上のことから、地下空間からの避難を考える際に、接続ビルを避難経路として設定することは、滞留の解消に効果的であるが、接続ビルのみを避難経路とするのではなく、臨機応変に地上部への避難と併用することで、避難成功率は格段に上がることがわかる。

5. おわりに

本研究では、従来の問題点を改善するために、接続ビルを避難経路として設定した避難行動解析を行い、その結果を用いて浸水状況と避難行動を考慮した避難困難度評価を行った。本研究で得られた成果を以下に簡潔に示す。

- 1) 接続ビルを避難経路として設定することで、地上への階段のみを出口としていた場合では、1つの出口に避難者が集中することで発生していた滞留が、避難者が複数の出口に分散し、解消された。
- 2) 接続ビルへと避難を促すことで、避難に要する時間が格段に短縮される
- 3) 接続ビルから離れた場所にも人がいる可能性があるため、地上部への避難も並行して行う事が、避難成功率を向上させるために必要である。

ここでは地下空間浸水時における安全な避難計画に着眼点を置いて検討を行った。その結果、接続ビルを地下空間浸水時の避難経路として設定することは避難成功率を上昇させるのに有効であり、その際には、地上部への避難と併用することが望ましいということが明らかになった。こうした成果を用いて、避難誘導に携わる側（地下街管理会社など）が避難計画を作成することが可能である。本研究では、避難者は浸水深が 0.02m となるまで避難を開始しないという設定で解析を行ったが、より早い段階から避難を開始していれば、全員が避難を完了させることが出来る可能性がある。以上より、ここで示した結果を用いることにより、地下空間浸水時には、管理者が迅速に対応し、早急に避難を開始することが出来る避難計画の作成が可能となる。

図-10 避難困難度評価

参考文献

- 1) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 中井勉, 竹村典久: 複雑な地下空間の浸水実験, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.583-588, 2004.
- 2) 井上知美, 川中龍児, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.973-978, 2011.
- 3) 石垣泰輔, 戸田圭一, 馬場康之, 井上和也, 中川一: 実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.583-588, 2006.
- 4) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時の避難困難度と利用者の水防意識について, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.559-564, 2007.
- 5) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.841-846, 2008.
- 6) 関根正人: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.907-912, 2010.
- 7) 吉川雅志, 石垣泰輔, 川中龍児: 大規模地下空間における浸水時の避難行動の検討, 地下空間シンポジウム, 第 18 巻, pp.51-56, 2013.
- 8) 大阪駅前ダイヤモンド地区(大阪市街地開発株式会社): 梅田地下空間避難確保計画, 2012.
- 9) 川中龍児, 石垣泰輔: 地下空間浸水時のアナウンスが安全避難成功率に及ぼす影響について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.163-168, 2012.
- 10) 関根正人, 本山量啓, 中村淳: 浸水時の地下空間からの避難行動に関する数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.547-552, 2007.

(2013. 11. 18 受付)

FACTORS FOR IMPROVING EVACUATION RATE IN SAFETY FROM UNDERGROUND SPACE

Ryuji KAWANAKA, Masashi YOSHIKAWA and Taisuke ISHIGAKI

Underground spaces, such as underground mall, subway stations and basements, are prone to inundations caused by pluvial and fluvial flood, storm surge and tsunami. Many Japanese cities are located in low-lying area and have these underground spaces. As devastating inundation damages are anticipated if these spaces would be inundated, safe evacuation planning should be made as soon as possible. In this paper, factors for improving evacuation rate in safety from these spaces are discussed on the basis of simulating behavior of persons in evacuation from a large scale underground shopping mall. From the results, it is found that the safe evacuation rate depends on the rate of congestion and that evacuation into a connecting building is very important to improve the rate of safe evacuation. These results are useful to make an evacuation plan.