

地下街を対象とした避難シミュレーション モデルに関する基礎的研究

武田 誠¹・松井 柁輝²・尾花 まき子³

¹正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)
E-mail: mtakeda@isc.chubu.ac.jp

²非会員 昭和土木 (〒460-0003 名古屋市中区錦 1 丁目 8 番 6 号)

³正会員 中部大学准教授 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

大規模な浸水が都市域で生じれば、その氾濫水は地盤の低いところへ流れ広がる。都市には、地下鉄や地下街などの地下空間が存在し、そこへの流入は甚大な人的・経済的な被害を生じさせる。本研究では、地下街の浸水時の避難行動を検討するため、避難シミュレーションの構築を目的とする。まず、モデル領域において、避難シミュレーションの基本構造を構築した。その後、名古屋駅前の地下街を対象に、人の移動に関わるシミュレーションを実施し、その様子を示した。本研究において、通路を伝う人の避難行動をモデル化することができ、混雑に伴う進行方向の変化や速度の低下を表現することができた。さらに、狭い通路後の人の移動に関わる検討、避難箇所の認知に関するモデル化、解析モデルの妥当性評価等、避難解析に関する課題を明確にすることができた。

Key Words: *underground shopping mall, evacuation, inundation, numerical simulation, Nagoya*

1. はじめに

2019年千曲川、2020年球磨川など、近年、甚大な浸水災害が多発しており、都市域における大規模な氾濫災害の発生も懸念される。仮に大規模な浸水が都市域で生じれば、その氾濫水は低いところへ流れ広がる。都市には、地下鉄や地下街などの地下空間が存在し、そこへの流入は甚大な人的・経済的な被害を生じさせる。武田ら¹⁾は、名古屋駅前地下街を対象に庄内川の洪水による想定破堤氾濫の数値計算を行い、名古屋駅前地下街への流入と地下街の浸水の様子を検討した。そこでは、単位幅比力による避難困難度指標を用いて避難の様子を考察した。本研究では、地下街の浸水時の避難行動を詳細に検討するために、避難シミュレーションの構築を目的とする。

地下街・地下鉄駅などの地下空間を考慮した避難シミュレーションについて多くの研究者が検討を行っている。関根ら^{2),3),4)}は、地下の浸水時を対象に人の移動を表現するモデルを開発し、東京都の実際の地下街や地下鉄駅への適用を行い、人的被害を対象とした都市浸水の研究を行っている。川中・石垣⁵⁾、中阪・石垣⁶⁾も同様の研

究を進めており、大阪を対象として、豪雨に伴う内水氾濫時の避難対策を検討している。また、吉野・村岡⁷⁾は詳細な地下街の避難シミュレーションを構築し、浸水時の避難特性を明らかにしている。

これまで、著者らは、名古屋を対象に、庄内川の洪水破堤に伴う地下空間を含めた都市浸水の特性を検討してきた。ハザードマップの浸水情報と地下空間の入口情報の比較から、洪水氾濫が生じた場合の地下浸水の危険性を示した⁸⁾。また、多くの破堤箇所を用いた想定氾濫解析の結果から、地下浸水が大きくなる破堤箇所と地上・地下空間(地下鉄・地下街)の浸水の様子を示した⁹⁾。さらに、名古屋駅前の地下街を対象に、地下浸水とその人的被害の様子を、単位幅比力を用いた避難困難度指標を用いて考察した¹⁾。本研究は、人の避難行動を考慮した詳細な研究へと発展するための基礎研究と位置付け、前述した避難シミュレーションに関わる研究^{2)~7)}を参考に、基礎となる避難に関わるモデル開発を行い、名古屋の地下街へ適用した。

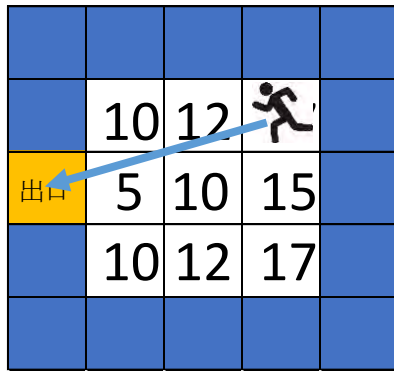


図-1 出口を目標とする移動方向
(Aの方法, 移動可能な格子には出口からの距離(m)を記載)

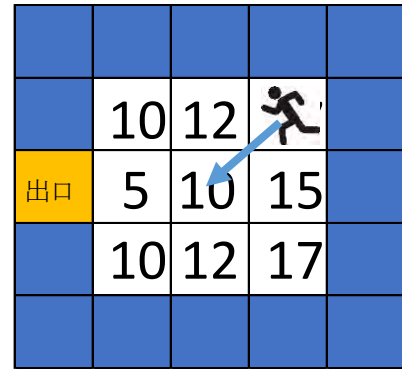


図-2 出口までの距離が最短となる隣接格子への移動方向
(Bの方法, 移動可能な格子には出口からの距離(m)を記載)

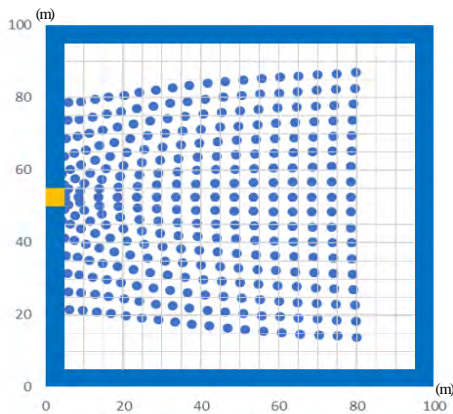


図-3 出口へ向かう人の分布 (Aの方法, 10秒後)

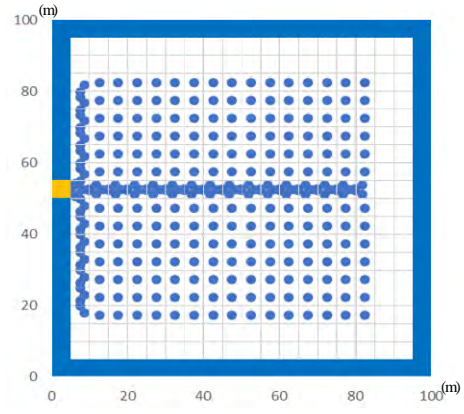


図-4 出口へ向かう人の分布 (Bの方法, 10秒後)

2. モデル領域を用いた避難シミュレーション モデルの検討

(1) エリアにおける出口への移動

ここでは、地下街における避難を対象とし、モデル領域において、個人は現在地から出口まで移動するとし、ある速度(既往論文²⁾を参考に、本研究の場合 1.4m/s)を設定し、計算時間ステップ毎に人の移動地点を求めた。なお、本研究では高低差を考慮せずに検討を進めている。避難シミュレーションにおける高低差の考慮は次の研究課題として位置づける。

まず、計算領域を 5m 格子で表現し、その中央に人を配置した。個人の移動する方向は、A 出口などの目標の方向と、B 出口毎に計算格子中央の出口からの距離を求め、人の現在地から出口への最短となる隣接格子の中心方向の2つを考えた。10秒後の結果を図-3と図-4に示す。Bの場合、ある経路に人が集中しているが、人の誘導も無い状況であるので、出口への移動として不自然と判断した。そこで、出口への移動はAの方法を採用する。

(2) 通路を伝う移動

つぎに、通路を伝う人の移動を考える。5m 格子による対象領域を図-5に示す。この場合も格子の中心に人を配置し、通路を伝って最短距離の出口へ移動する様子

を検討する。まず、Aのモデルで出口方向へ移動すると、図-6のように、壁の中へ移動してしまうことから、通路を意識した人の移動を検討する必要がある。そこで、図-7のようにエリア毎に番号を付けて、出口のあるエリアに人が来たらAの方法で出口に向かい、別のエリアから出口へ向かう場合に、次に進むエリア情報、次のエリアへの目標となる格子位置情報(複数の目標格子)を与えて、現在地から最短となる目標格子へ移動するとした。計算結果を見ると、通路を通じて出口への人の移動が示されていたが、壁に入った人が次の目標となるエリア情報(格子位置情報)が得られずに誤った動きをしていた。そこで、Aの方法で目的地へ向かう人が壁の中に入ってしまった場合、Bの方法で再度移動することで、壁の中へ移動しないよう工夫した。その結果が図-8である。本図から、通路を伝って出口に移動する人の様子が確認でき、人の避難行動として適切な結果と考える。

(3) 人の重なりの修正

図-8の人の移動の結果には、人の重なり(人と人が同じ場所に位置すること)の修正が考慮されていない。人の重なりを修正する方法として、図-9のように、①進行方向を変更すること、②進行方向に人がいる場合には速度を落とすことを考慮した。まず、人の平面範囲を直径 0.5mの円と仮定した。北から時計回りに進行方向

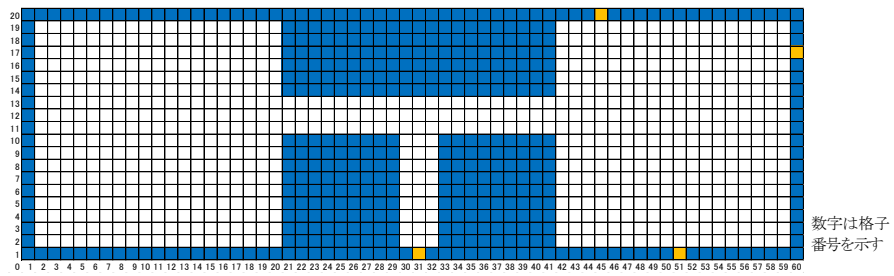


図-5 通路が有る場合のモデル領域

黄：出口 青：壁

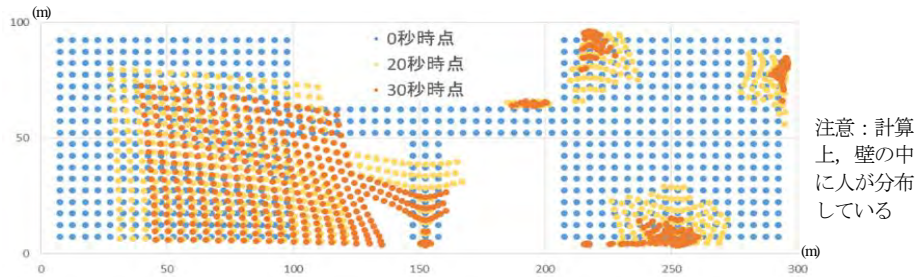


図-6 避難する人の分布の解析結果



図-7 領域の区分

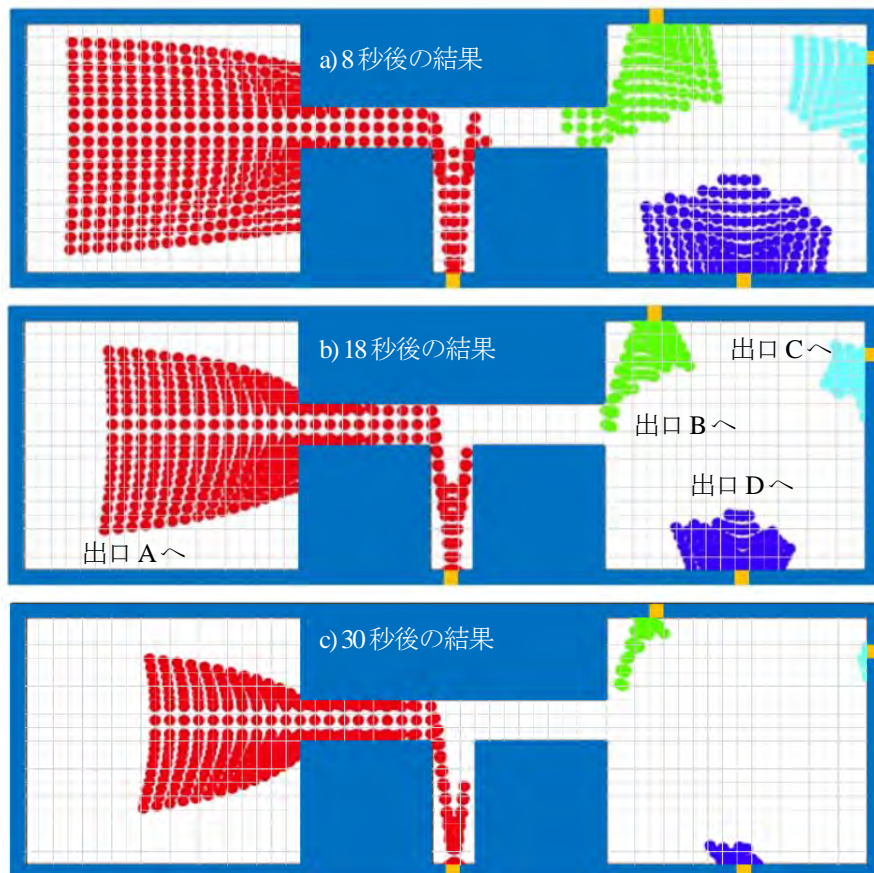
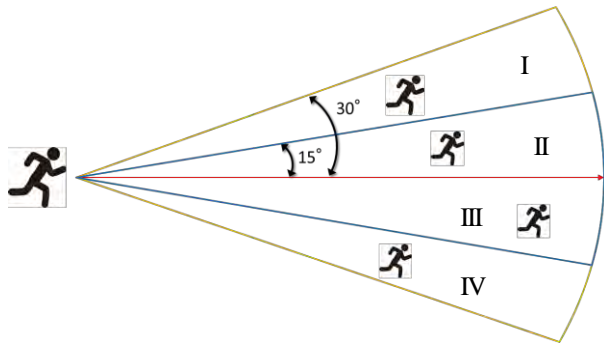


図-8 避難する人の分布の解析結果（通路考慮）



進行方向 $-30^{\circ} \sim -15^{\circ}$ を I、 $-15^{\circ} \sim 0^{\circ}$ を II、 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ を III、 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ を IV とする。

第1：II,IIIに誰もいない場合は進行方向へ移動する。

第2：II,IIIのどちらかに人がいれば、人がいないエリアの中央へ移動する。

第3：II,IIIの両方に人がいれば、I,IVへ移動する。両方ともに人がいない場合は、人に乱数(0~1)を与え、0.5以下はIV, 0.5より大きいとIに移動し、片方に人がいれば、人がいないエリアの中央へ移動する。

図-9 人の重なる回避に関わるモデル化

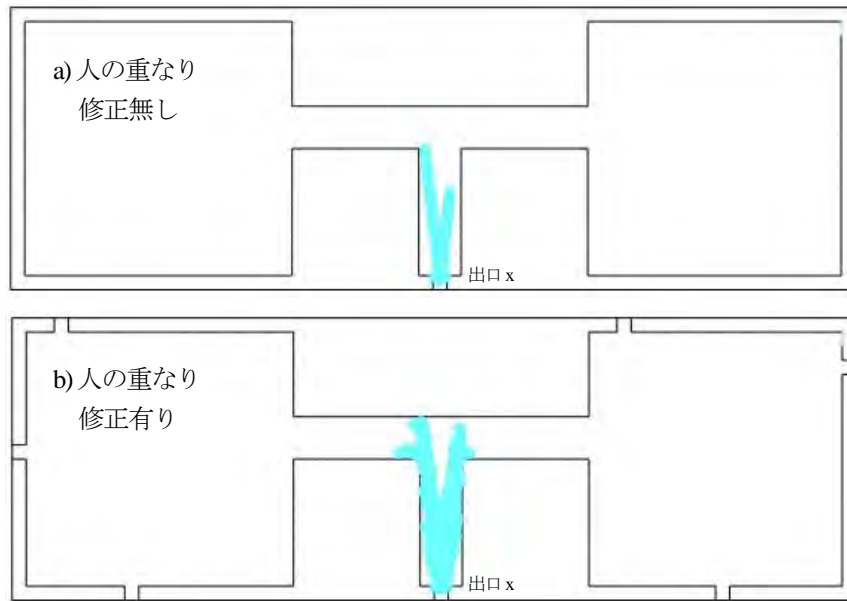


図-10 避難する人の分布の解析結果 (70 秒後)

を取り、その角度を基準に $-15^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim +15^{\circ}$ の範囲の人の有無を確認し、両区間に人がいない場合は進行方向へ進み、片方の領域に人がいる場合は、人がいない領域の中心方向へ進行するとした。また、両方に人がいる場合は、進行方向の時計回りの角度 $-30^{\circ} \sim -15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の領域の人の有無を確認し、両方に人がいない場合は、個人に設定された乱数を用いて進行する領域を決め、片方に人がいる場合は人がいない領域を進行する領域として、該当領域の中心方向へ移動するとした。なお、すべての領域に人がいる場合は、全領域の最短距離にいる人の中で最も遠い人の方向とし、その人に接しない距離まで進むように、移動速度を減少させた。

図-5のすべての格子の中央に人を配置し、出口xへの人の移動を計算した。人の重なる修正が無いものと、人の重なる修正があるもの人の移動の様子を図-10に示す。本図から、人の重なる修正を、移動速度も低下させたものは、同じ時間の計算結果において、人の位置が広く分布しており、避難時間も長くなっていることが分かる。図-11に避難完了した人の時間変化を示す。本

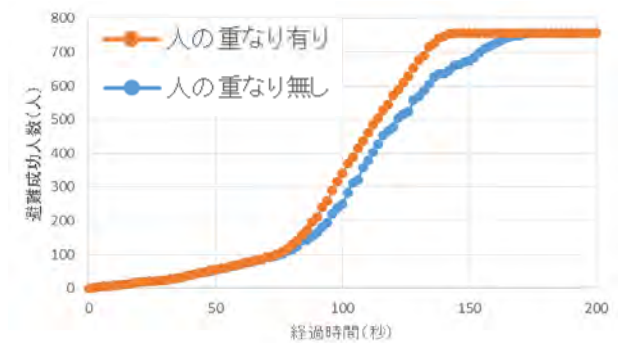


図-11 避難成功者の時間変化

図からも、人の重なる修正したモデルにおいて、避難成功の遅れが示された。これは、避難に関わる移動時間が長くなることに関係しており、定性的には適切な結果と考える。

本研究では、避難者は初めから出口の位置を知っているととして、避難シミュレーションが行われている。実際には、出口が分からない場合もあり、安全なエリアに向かって逃げ、そのエリアで初めて出口を認知して避難す

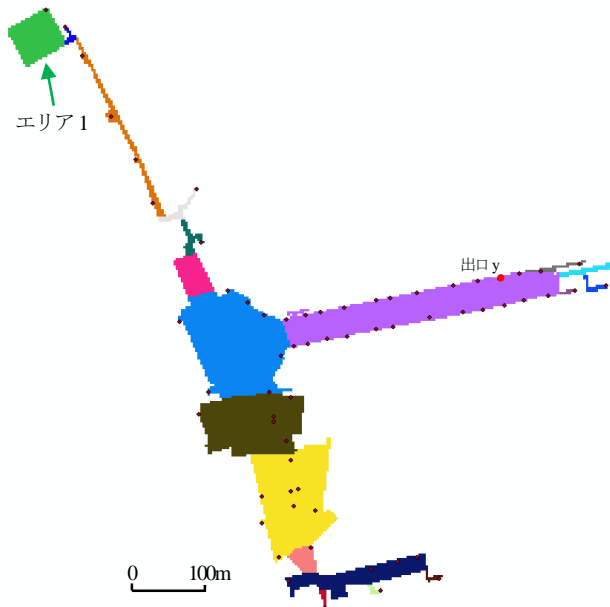


図-12 名古屋駅前地下街の計算領域とエリア分割
(茶点および赤点は出口を示す)

る場合（避難途中で目標とする出口を変える場合）も考えられる。本研究で扱ったモデルは、個々に避難場所（出口）を設定しており、避難途中で目的とする出口を変えることは容易である。また、個々に避難速度を変更することも可能である。地下浸水における人的被害対策のためには、浸水前の避難完了が重要となる。そのためには、様々な状況下での避難シミュレーションを実施し、避難対策を検討する必要があり、そのためにも人の行動を反映させた汎用性の高いモデルが重要となる。より現実的な避難行動モデルへの改良は今後の課題と考える。

3. 名古屋駅前地下街への適用

(1) 領域の設定と計算条件

2. で検討した人の移動のモデルを名古屋駅前の地下街に適用する。名古屋駅前地下街を図-12 のようにエリア分割し、人は指定された出口に向かい、エリア間の目標格子は隣接する格子の中で最短となる箇所とした。ここでは、エリア1の格子中央に人を配置し、出口yに向かう計算を行った。なお、図-12 は地下街の外壁情報から作成したものであり、地下街の通路が反映されていないが、モデル開発の第一段階として使用した。

(2) 計算結果および考察

図-13 に計算で得られた各時間における人の位置を示す。本図からエリア1から通路を伝って遠方の出口に移動している様子が分かる。ただし、細い通路から出てきた後の様子（例えば480秒後の様子）は、ほぼ一列の細



図-13 名古屋駅前地下街の避難する人の分布の解析結果
(時間毎の人の分布を合わせて表示している)

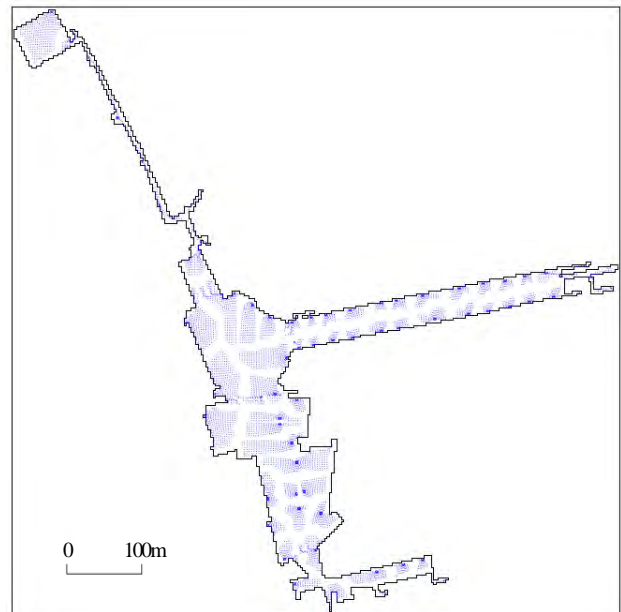


図-14 最短の出口へ向かう人の分布の解析結果(16秒後)

い集団となって最短となる経路を移動している。今後、実際の人の移動の様子をさらに確認して、適切なモデル化を進めたい。なお、すべての計算格子中央に人を配置し、図-12 のすべての出口を対象にした、最短の出口への移動の様子を図-14 に示す。浸水に関わる避難を検討する場合、最短の出口への避難が優先されるので、エリアを跨ぐ移動を考慮しなくても良い場合には、問題なく計算できるといえる。ただし、汎用性のある検討を進めるためには、さらなるモデル開発が必要と考える。

4. おわりに

本研究では、地下街を対象とした避難シミュレーションモデルの構築を目指し、モデル領域および実領域における検討を行った。得られた成果は下のとおりである。

1) モデル領域において、人の移動方向に関するモデル化を2種類検討した。基本的には本研究で定義したA（出口などの指定された方向）の方法を用いるが、非計算格子に入る場合には出口に対して最短となる隣接格子の中央に移動するBの方法を採用した。さらに、通路を考慮したモデル開発を行い、適切に通路を伝って出口へ向かう人の移動の様子を確認した。

2) モデル領域において、人の重なり修正を行った。移動方向に人がいれば向きを変え、対象とするすべての方向に人がいれば移動速度を減少させ、人の移動の拡がりや、避難時間の遅れなどの結果を得た。

3) 名古屋駅前地下街に対して、避難シミュレーションモデルを適用した。最短となる出口への移動、エリアを跨ぐ人の移動が計算できた。ただし、エリアを跨ぐ場合に、集団で最短の経路をとる行動（狭い通路を出た集団がほぼ一列になって行動している様子）が計算されたことから、その妥当性も含めて、さらに検討を行いたい。

本研究では、名古屋駅前地下街への適用を行った。しかし、前述したように、集団で最短の経路をとることの妥当性を検証する必要がある。さらに、名古屋駅前地下街の店舗と通路に分けた検討、浸水による歩行速度低下時の避難状況と人的被害の想定、避難箇所（出口）の認知に関わるモデル化、解析モデルの妥当性評価など、検討する項目も多い。今後、これらに対して、モデルの改良を進めていきたい。

参考文献

- 1) 武田 誠, 鷲山 陸, 佐藤大介, 村瀬将隆: 洪水を対

象とした名古屋駅前地下街の浸水解析と避難に関わる検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第26巻, pp.37-43, 土木学会, 2021.

- 2) 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.547-5528, 2007.
- 3) 関根正人, 本山量啓: 地下空間浸水時の避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第52巻, pp.847-852, 2008.
- 4) 関根正人, 大野龍馬: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.67, No.4, I_961-I_966, 2011.
- 5) 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.
- 6) 中阪友太郎, 石垣泰輔: 大規模地下街での短期間集中豪雨を想定した浸水時における安全避難に関する検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, pp.18-29, 2021.
- 7) 吉野攝津子, 村岡宏: 地下街浸水避難シミュレーション, 大林組技術研究所報 No.79, 2015. https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/079/2015_079_11.pdf (2022年6月30日確認)
- 8) 村瀬将隆, 野澤智己, 佐藤大介, 武田 誠: 洪水浸水想定区域図を用いた地下空間の浸水被害に関する基礎的検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第25巻, C2-6, pp.220-225, 土木学会, 2020.
- 9) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田 誠, 川池健司, 松尾直規: 地下鉄を考慮した名古屋と大阪の大規模浸水解析, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_1441-I_1446, 2017.

STUDY ON EVACUATION SIMULATION MODEL FOR UNDERGROUND SHOPPING MALL

Makoto TAKEDA, Masaki MATSUI and Makiko OBANA

If large scale inundation occurs in an urban area, the inundation water flows to lower areas. Cities have underground spaces such as subways and underground malls. If inundation waters flow into underground spaces, extensive human and economic damage will be caused. The aims of this study is to develop the evacuation simulation model to investigate evacuation behavior in inundation situation in underground shopping malls. First, the basic structure of the evacuation simulation model was developed using model domain calculations. After that, simulations of human evacuation behaviour was conducted for the underground shopping mall in front of Nagoya Station. Furthermore, issues related to actual evacuation analysis were clarified.