

都市域における多層的地下空間を対象とした 浸水時の避難成功率向上に関する検討

中阪 友太郎¹・石垣 泰輔²

¹学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目3-35)
E-mail: k192114@kansai-u.ac.jp

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目3-35)
E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

近年、都市化の進展や気候変動の影響により、集中豪雨の発生回数が増加傾向にあり、都市部での水害による浸水のリスクが高くなっている。特に、都市部での水害で懸念されている問題点として地下空間への浸水が考えられる。都市部の地下空間は地下街や地下鉄といった多くの人が利用する施設であることから、浸水時の人的な被害は甚大なものになると予測される。このことから、浸水状況や避難時の利用者の挙動を把握することが、避難計画の策定において重要となる。そこで、本研究では、都市部での河川氾濫を想定した地下空間浸水時の避難シミュレーションにより、地下空間内の避難経路の安全性について検討した。また、地下空間管理者によるアナウンス、避難誘導、浸水対策を考慮し、早期の避難と流入量の軽減により避難成功率が向上することを示した。

Key Words : *underground space, urban flood, inundation, evacuation, multi-agent simulation*

1. はじめに

近年、都市化の進展や気候変動の影響により、集中豪雨の頻度や強度が増加している。気象庁¹⁾によると、時間雨量50mm以上の年間発生回数は、1976～1985年で平均174回、2007～2016年で232回と約1.3倍、時間雨量80mm以上の年間発生回数は、1976～1985年で平均11回、2007～2016年で18回と約1.7倍であり、増加傾向である。

また、都市部では、限られた土地を有効活用するために、高層ビルや地下鉄・地下街・地下駐車場といった地下空間の多層化が進んでいる。しかし、地上で集中豪雨による雨水の氾濫や周辺に存在する河川の氾濫などが発生することで、地下空間への浸水が引き起こされるリスクが考えられる。都市部の地下空間は、多くの人が利用する施設であることから、浸水時の人的な被害は甚大なものになると予測される。

今後発生する浸水被害を対処するために、国土交通省により平成27年度²⁾、29年度³⁾に水防法が改正され、27年度では想定し得る最大規模に対する浸水想定区域の設定、浸水被害対策区域の指定、29年度では要配慮者利用施設における避難確保計画の作成などが目標として掲げられ、想定される災害に対して浸水対策などのハード的な対策だけでなく、ソフト的な対策として避難計画を

策定することで、地下空間滞在者への適切な情報提供と避難誘導を行うことが重要である。そのためには、浸水状況や避難時の利用者の挙動を把握し、浸水対策や避難計画を評価することが重要となる。

都市域の地下空間を対象とした水害時の浸水・避難に関する研究はこれまで多数なされている。例えば、浸水過程に関する研究については、井上ら⁴⁾、戸田ら⁵⁾により模型実験や浸水シミュレーションによって研究が進められてきた。地下空間浸水時の避難については、大西ら⁶⁾、浅井ら⁷⁾が実物大の模型を用いた実験を行い、避難者の歩行速度が個人属性、流況、歩行密集度によってどのように変化するかについて「単位幅比力」という指標を用いて評価を行っている。また、地下空間浸水時の避難行動の予測と分析については、関根ら⁸⁾¹⁰⁾、川中ら¹¹⁾¹²⁾が避難者を個別に取り扱える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モデルを行っている。

本研究では、都市部の地下空間を対象として、周辺の河川氾濫による地下浸水を想定した場合の避難シミュレーションを行った。また、浸水状況や避難者の挙動を分析し、避難経路の安全性を評価した。さらに、地下空間管理者によるアナウンスや避難誘導というソフト面の対策やマウンドアップや止水板の設置というハード面の対策を考慮し、避難成功率の向上について検討した。

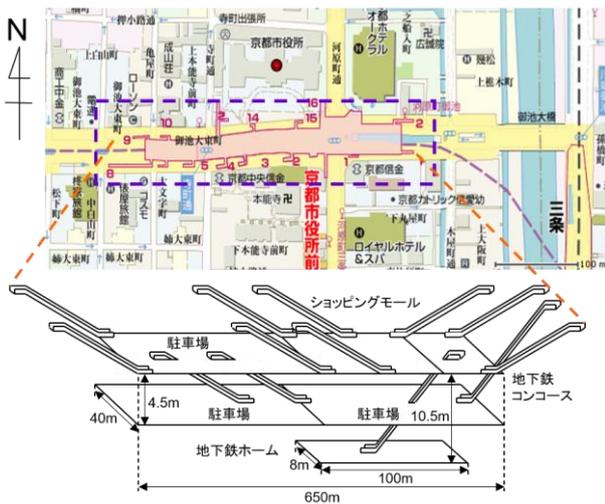


図-1 対象地域と地下空間の構造

2. 対象地域の概要

対象地域は、京都市中京区に存在する「御池地下街」である。この地下空間は、京都市の中心部の御池通の地下に位置し、東西に約 650m の範囲で広がり、その東端付近には鴨川が北から南に向かって流れている。この地下空間は、図-1 に示すように 3 層構造であり、地下 1 階は麩屋町通東側がショッピングモールと地下駅のコンコース、西側が駐車場、地下 2 階は全面駐車場、地下 3 階は地下鉄東西線・京都市役所前駅のホームで構成されている。地下 3 階ホームは地下 1 階東側コンコースのみと接続しており、地下 1 階には横断方向中央部（麩屋町通）に段差があり、西側は東側よりも床面が 1.5m 高くなっている。本研究では、利用者が多数存在すると考えられる地下 1 階東側のショッピングモールと地下 3 階の地下駅ホームのみを対象として解析を行った。

3. 地下街の浸水・避難シミュレータ

(1) 地下空間のモデル化

地下空間の浸水・避難解析は、2次元の構造格子モデルを用いた。メッシュサイズは、解析範囲、通路幅、店舗の大きさを考慮し 2m の正方格子とする。それぞれの格子を、通路、出口、階段、踊り場、店舗に分割し、格子の隣り合う2辺には壁（仕切り）が設置できるようにした。このとき、格子の辺に設置された壁は、水も避難者も出入りできず、店舗の格子は水の出入りは可能であり、避難者の出入りは行わないものと設定している。

図-2に、対象範囲の出入口の位置を示す。便宜上、出入口に番号を付けている。地上への出口につながる階段は計19ヶ所、地下3階から地下1階へつながる階段はA階段、B階段、C階段の3ヶ所である。また、地下1階の西

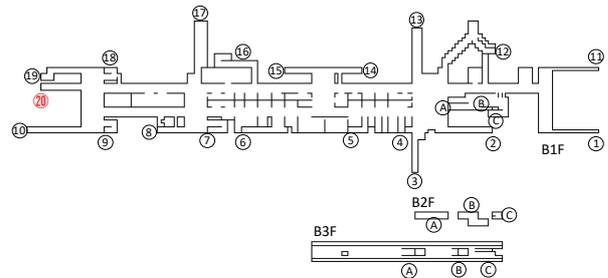


図-2 地下街モデル・階段の位置と流入箇所

表-1 流入箇所ごとの流入時間と流入量

出入口番号	流入開始時間	流入量(m ³ /s)
1	00分00秒	1.58
3	10分03秒	1.32
5	10分14秒	2.13
4	10分30秒	1.88
2	10分47秒	2.63
12	11分25秒	0.38
6	11分53秒	1.31
11	12分42秒	2.00
7	14分09秒	1.08

側の駐車場の床面が東側のショッピングモールよりも 1.5m 高くなっていることから、そこへの避難を行った場合にも避難完了と見なした。地下1階の西側駐車場への出入口は図中の番号20の位置である。

(2) 浸水状況のモデル化

本研究では、武田ら¹³⁾の方法を参考として、デカルト系座標モデルを用いて地下空間の浸水解析を行った。

a) 浸水外力条件

地下空間の浸水を考える際に、流入口と流入状況を把握することが重要である。本研究では、戸田ら²⁾により鴨川の氾濫を想定して御池大橋付近から 100m³/s で5時間溢水する条件下で行われた縮尺 1/100 の対象地下街の模型実験を実物大の値に換算した結果¹⁰⁾を用いた。表-1に、地下空間の流入口、流入開始時間、流入量を示す。地下駅への階段がある東側の出入口の流入時間が早いため、地下3階の流入時間も早くなると予測できる。地下空間内の店舗は、すべて開店しているものとした。流入した水は地下3階のホームから排水されるが、地下3階のホームには高さ 2.5m の落下防止用仕切りが存在するため、水深が 2.5m を超えるまでは排水されないものとした。

b) 浸水解析モデルに用いる式

本研究では、以下の 2 次元浅水方程式を基礎式としている。対象範囲を一边が 2m の正方格子に分割し、各格子辺上で運動方程式、格子内で連続式を解くことで流速と水深を求めることができる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

<運動方程式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここで、 h は水深 (m), t は時間 (s), u, v は x, y 方向の流速 (m/s), M, N は x, y 方向の流量フラックス ($M = uh, N = vh$), $H (H = h + z, z$ は地盤高): 水位 (m), τ_{bx}, τ_{by} は水底面での x, y 方向のせん断応力成分 (kg/m^2), ρ_w は水の密度 (g/cm^3), g は重力加速度 (m/s^2) である。

また、底面のせん断応力は、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここで、 n はマンシングの粗度係数で $n = 0.02$ (粗いコンクリート程度) である。

なお、これらの基礎式の離散化については、時間項には前進差分、移流項には Doner Cell スキーム、底面摩擦項には Vasiliev の不安定を避けるため局所的 implicit な形を用いた中央差分、それ以外の項には中央差分をそれぞれ適用した。また、未知量 (h, M, N) については千鳥格子状に配置し、運動方程式と連続式を交互に計算する Leap-Frog 法を用いて時間ステップを進めることで、計算終了時間まで解析した。このとき、計算の差分時間は $\Delta t = 0.005$ (s) と設定した。

c) 浸水時の避難困難度指標

地下空間は階段部分では流速が速く、通路部分では水深が高くなることから、流速と水深を同時に評価できる指標が必要である。そこで、大西ら^{9,7)}や浅井ら⁸⁾の研究より、運動量だけでなく水圧も考慮できる単位幅比力が検討され、地下空間で安全に避難できるかどうかの判断に用いるための指標として示されている。単位幅比力とは、流れの単位幅あたりの力の大きさであり、以下の式のように表される。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (6)$$

なお、 M_0 : 単位幅比力 (m^3/m), u : 流速 (m/s), h : 水深 (m), g : 重力加速度 (m/s^2) である。

また、浅井ら⁸⁾の実験結果から得られた、年齢層と性別を考慮した通常時 (非浸水時) の歩行速度と、単位幅比力に基づく避難困難度指標をまとめたものを表-2 に示す。ここで、安全避難困難状態とは、避難時に危険を感じる状態であり、自力避難限界状態とは、手すりや他人の補助がないと歩行できない状態である。

表-2 単位幅比力を用いた避難困難度指標

		通常の歩行速度 (m/s)	単位幅比力 (m^3/m)	
			安全避難困難	自力避難限界
男性	成人	1.4	0.125	0.250
	高齢	1.1	0.100	0.200
女性	成人	1.1	0.100	0.200
	高齢	0.8	0.080	0.160

表-3 浸水対策を考慮した場合の流入量

出入口番号	流入開始時間	流入量 (m^3/s)	
		マウンドアップ (0.2m)	止水板 (0.5m)
1	00分00秒	0.71	0.33
3	10分03秒	0.57	0.22
5	10分14秒	1.03	0.59
4	10分30秒	0.89	0.47
2	10分47秒	1.33	0.84
12	11分25秒	0.08	0.00
6	11分53秒	0.56	0.22
11	12分42秒	0.96	0.53
7	14分09秒	0.43	0.13

d) 浸水対策の検討

地下空間の浸水対策として、止水板が導入される場合がある。また、地下空間への入り口を少し高くするようなマウンドアップが行われている場所もある。このように、流入を阻止するか流入量を削減することで避難成功率にどのような影響を与えるかについても検討した。止水板とマウンドアップの高さをそれぞれ 0.5m と 0.2m とした。また、マウンドアップはすべての出入口で行われるものとし、止水板は流入する箇所の階段に設置されるものとする。このとき、止水板設置による溢水量増加に伴う他の出入口への流入は考慮しないものとする。浸水対策を踏まえた流入量については、対策なしの場合の流入量を基に、止水板やマウンドアップの高さを用いて越流公式によって流入量を算出した。この際に、越流しない場所については流入量 $0.0\text{m}^3/\text{s}$ とした。表-3 に、計算した流入量を示す。

(3) 避難行動のモデル化

基本的なモデルの考え方については、関根ら^{9, 10)}の研究を参考にし、川中ら^{11, 12)}の研究をベースとした。

a) エージェントのモデル化

実際の人間の形状は、上方から見ると前後に短く左右に長い楕円形をしている。よって、エージェントのサイズを長径が 0.5m, 短径が 0.3m の楕円と設定した。また、各々に、年齢層、性別、非浸水時の歩行速度、避難開始条件を設定することで、個別の属性を与えた。

エージェントの視野範囲は、歩行時において左右に 60° 程度で、標識などの認識距離は 40m として、扇形になるように設定した。また、正面を基準に 1° ごとに視野線を伸ばし、それぞれの視野線と最も近い壁や障害物との交点までを可視距離とした。この距離を、エージェントがそのまま移動した場合の移動予測範囲と仮定し、その範囲内で次の移動目標の決定を行った。

b) エージェントの配置

避難者の人数・配置については、地下空間の利用者が最も多いと思われる朝の通勤ラッシュ時（午前8時から30分間）を想定した。通勤ラッシュ時の混雑率は、令和元年度京都市交通白書¹⁴より得られた京都市役所前駅の乗降客数と、第11回大都市交通センサス¹⁵より得られた近畿圏の時刻別鉄道利用者人数から、約 $0.59 \text{人}/\text{m}^2$ と算定した。また、避難者の個人属性は、京都市の推計人口データ¹⁶より算出した結果、成人男性 35%、成人女性 36%、高齢男性 12%、高齢女性 16% となった。以上より、この混雑度と属性割合に基づいて避難者をモデル内に一様に配置した結果、地下1階部分は 3053 人、地下3階部分は 429 人で合計 3482 人となった。なお、人の配置場所は、階段、踊り場、店舗を除く通路部のみとした。

c) 避難開始の条件

避難開始の条件は、自主的な判断と地下空間の管理者からの避難アナウンスによる判断という2種類の条件を設定した。自主的な判断による避難開始は、大西ら⁷の調査結果に基づき、自身の存在する格子水深が 0.1m 以上となった場合に各々で避難を開始するようにした。避難アナウンスによる避難開始については、浸水開始と同時にもしくは浸水開始5分前に避難アナウンスが発令されるという条件下で、各階での時間差を考慮して一斉に避難を開始するようにした。各階での避難開始時間は、既往研究^{17,18}を参考にして以下のように設定した。

$$t_{start} = \min(t_1, t_2) \quad (7)$$

$$t_2 = t_a + \frac{\sqrt{A_{floor}}}{30} + 3 \quad (8)$$

ここで、 t_{start} は避難開始時間 (min)、 t_1 は自身の存在する格子水深が 0.1m 以上になる時間 (min)、 t_2 はアナウンス発令により避難を開始する時間 (min)、 t_a はアナウンス発令時間 (min)、 A_{floor} は各フロアの床面積の合計 (m^2) である。

なお、アナウンス発令が行われない場合では、全員が浸水状況に応じて自主的に避難することになる。

d) 移動目標の設定

移動する際には、何らかの目標が必要なため、計算格子を階段、踊り場、通路、店舗のような属性を持った領域に分割し、人はそれらの領域の境界線を目指すようにした。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。地上への出口に向かう場合は、出口が最も優先度が高く、上に向かうための階段、踊り場、通路、店舗の順となる。同じ優先度の境界が複数存在する場合は、最も近い境界を移動目標と設定した。なお、実物大の階段実験の際に実施したアンケート調査結果¹⁹により、階段上部の水深が 0.1m から 0.2m 程度で恐怖を感じることを示されたため、階段の上部の水深が 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。

e) 歩行速度の設定

戸田ら¹¹や石垣ら¹⁹の研究より、地下空間における浸水時の避難行動は、それぞれの利用者の年齢層、性別、浸水による流れの影響、歩行密集度などが大きく関係することが指摘されている。したがって、浸水時の歩行速度は、通常時の歩行速度に流速や水深による影響と歩行者の密集度による影響を乗じることで求められる¹¹。

$$v = S_p \cdot D_e \cdot v_{normal} \quad (9)$$

ここで、 v は影響を考慮した歩行速度 (m/s)、 S_p は流速や水深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_{normal} は通常時の歩行速度 (m/s) である。

水深や流速の影響については自分の存在する格子の水深と流速から単位幅比力を求めその値より次式を用いて計算した。

$$S_p = 0.22 \cdot \exp(-125.3 \cdot M_0) - 0.71 \cdot M_0 + 0.78 \quad (10)$$

ここで、 M_0 は単位幅比力 (m^3/m) を示している。

次に歩行密集度の影響については、避難者の進行方向に存在する人との距離により次式を用いて計算した。

$$D_e = \exp\left(L^{4.37}/2.55\right) - 0.48 \quad (11)$$

ここで、 L は進行方向に存在する最も近い人間との距離 (m) を示している。

また、階段部における歩行速度は、石垣ら¹⁷による体験実験の結果より、通路部の約半分となることが確認されていることから、浸水の影響や避難時の密集度による変化の後に $1/2$ を乗じて歩行速度とした。

f) 避難解析条件

浸水時の避難シミュレーションのケースを、表-4に示す。本研究では、アナウンス・避難誘導・ステップ（マウンドアップ）と止水板による浸水対策の効果について検討した。ここでの避難誘導とは、東側の通路部にいる歩行者や地下駅のホームから上がってきた歩行者を西側へ移動させ、氾濫水が流入しない出口へ避難させるように行った。計算時間の間隔は 1.0s ごとに行い、アナウンス発令時間（なしの場合は浸水開始時間）を解析開始時間とし、浸水開始から30分経過するまで解析を行った。

表-4 避難解析ケース

アナウンス	対策	避難開始時間 (s)	避難開始水深 (m)
なし	なし	—	0.1
なし	避難誘導	—	0.1
なし	ステップ(0.2m)	—	0.1
なし	止水板(0.5m)	—	0.1
あり(浸水開始)	なし	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水開始)	避難誘導	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水開始)	ステップ(0.2m)	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水開始)	止水板(0.5m)	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水5分前)	なし	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水5分前)	避難誘導	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水5分前)	ステップ(0.2m)	354 (B1), 234 (B3)	0.1
あり(浸水5分前)	止水板(0.5m)	354 (B1), 234 (B3)	0.1

※ 避難開始時間は、アナウンス発令時間を 0 (s) とする。

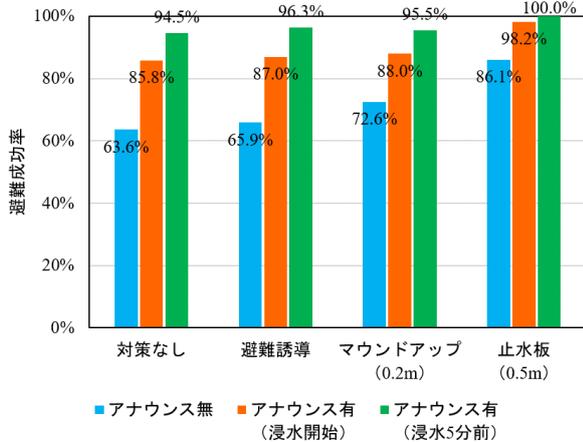


図-3 避難成功率のまとめ

避難の成否については、避難者が地上への階段の上部へ到達するか、地下1階西側の駐車場へ避難した場合に避難完了と見なした。避難者の状態は、安全避難可能状態、安全避難困難状態、自力避難限界状態のいずれかとなり、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した。自力避難限界状態では手すりや他人の補助が無いと歩行ができない状態であるため、歩行速度を $v = 0$ (m/s) としてその場で停止するようにした。なお、避難者の移動方向や階段の選択は避難成功率に影響を与えると考えられるため、ランダムに人の配置を変更し、各ケース 10 回ずつ解析を行い、平均値を各ケースの解析結果（避難成功率）とした。

4. 浸水・避難シミュレーション結果

(1) 解析結果

図-3 に、各ケースにおける避難成功率を示す。避難アナウンスにより、より早く避難を行えるため、避難成功率が向上した。避難誘導により、東側の歩行者が効率的に避難を行えるため、避難成功率がわずかではあるが

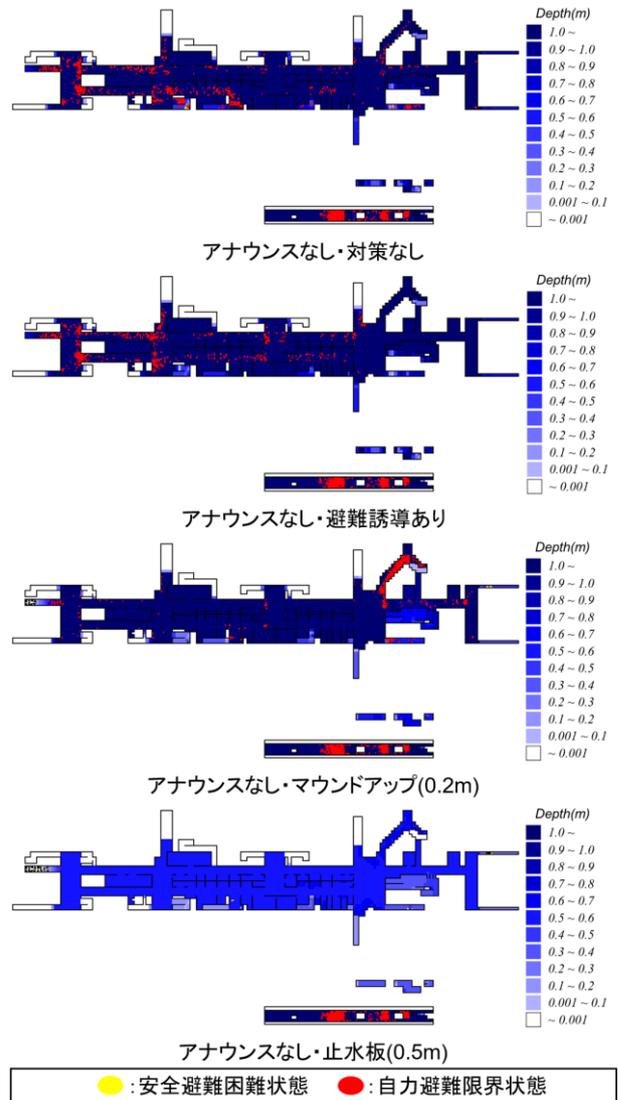


図-4 浸水開始から30分後の避難状況（アナウンスなし）

向上した。浸水対策により、地下空間の流入量が減少し、避難猶予時間が増加するため、避難成功率が向上した。

(2) 避難成功率向上に関する検討

図-4-図-6 に、浸水開始から 30 分経過した後の浸水状況とエージェントの避難状況を示す。地下空間内部の浸水の傾向として、流入が東側の階段から始まり、時間が経過するごとに西側に向かって浸水し、14 分ほどで地下空間全体が浸水した。また、地下 3 階が浸水し始めるのは、浸水開始から約 3 分後であった。

a) 避難アナウンスなしの場合

避難アナウンスを行わない場合の避難状況に着目すると、地下 1 階では西側や階段で、地下 3 階では階段と踊り場で自力避難限界状態となっている人が多く見られる。地下 1 階では、東側から早期に水が流入するため東側の人はずっと避難を開始するが、西側が浸水し始めるまで時間がかかり、避難を開始する時点ですでに通路の水深が上昇しているため避難が間に合わなくなることを考え

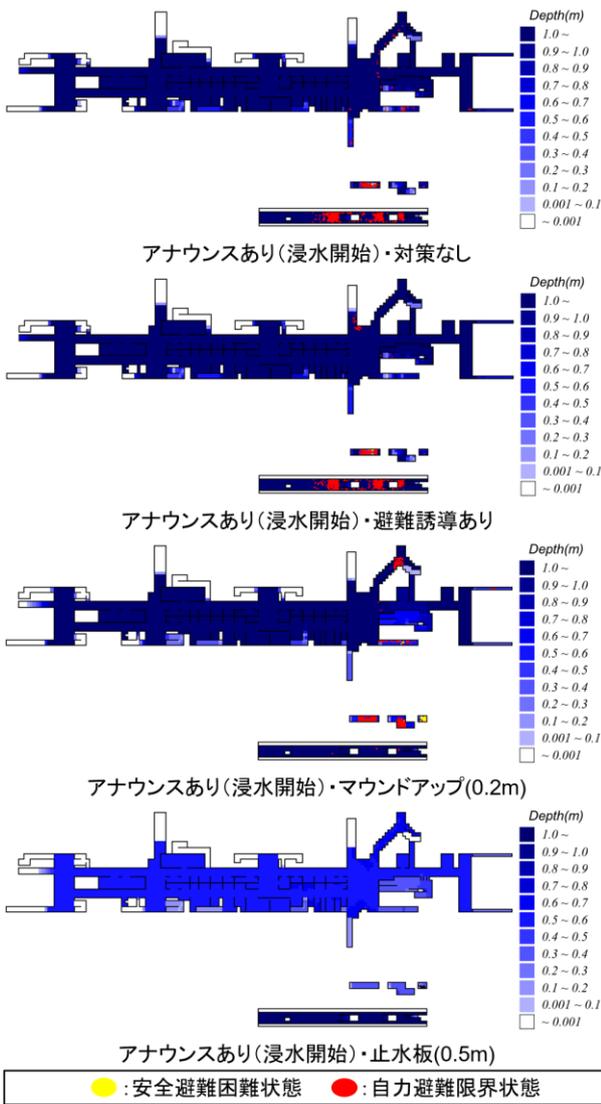


図-5 浸水から30分後の避難状況 (浸水開始時アナウンス)

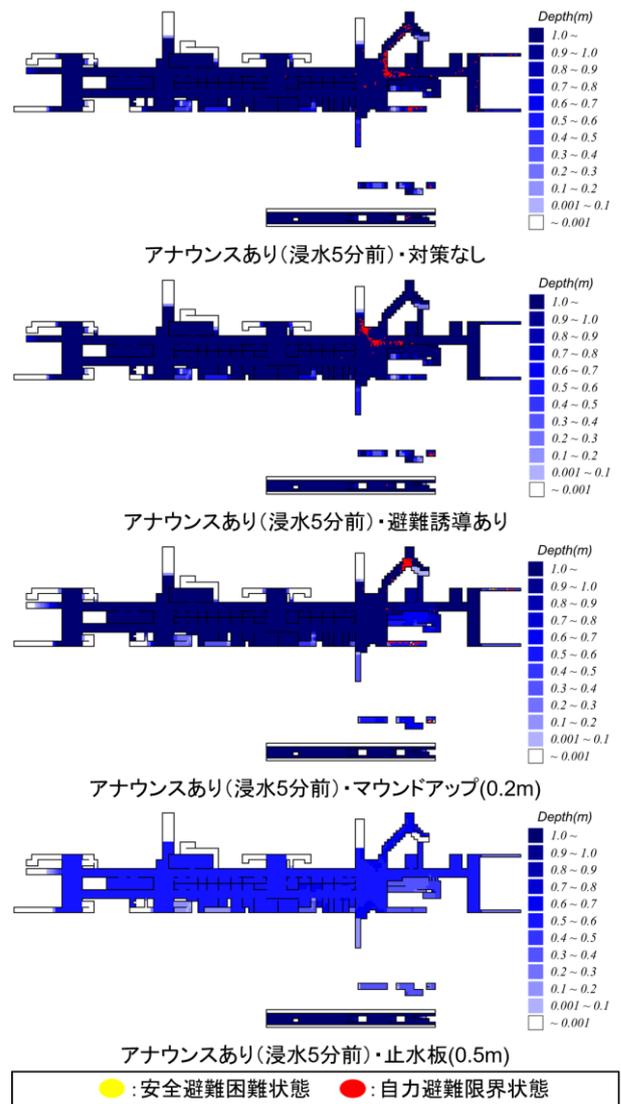


図-6 浸水から30分後の避難状況 (浸水5分後アナウンス)

られる。地下3階では、流入する階段へ避難を行い、階段が混雑して渋滞となることで待機している間に単位幅比が増加して避難が困難になったと考えられる。避難誘導を考慮した結果、地下1階の東側では自力避難限界となっている人は見られず、その分だけ避難成功率が向上したと考えられる。マウンドアップや止水板による浸水対策を行った結果、流入量が抑制されたため地下1階の人は避難できる人数が増加しているが、地下3階のホーム部では避難できない人数の減少はあまり見られなかったため、早期の避難を促す必要があると考えられる。

b) 避難アナウンスありの場合

避難アナウンスを行った場合の避難状況に着目すると、浸水開始と同時にアナウンスを行った場合には、地下1階では浸水に気付きにくかった西側も含めてほぼ全員避難できたが、地下3階の避難者は地下2階の踊り場と階段まで行った段階で自力避難限界に達していることがわかる。本研究では避難の遅れも考慮しているため、地下浸水が始まる段階でアナウンスを発令しても、ホームにい

る人は避難が間に合わないと考えられる。浸水5分前にアナウンスを行った場合には、地下3階も早期に避難を開始できることで避難が完了している。このことから、わずか5分早く避難を始めるだけでも、避難成功率に大きく影響していることがわかった。また、避難誘導により、ホームから地下街へ上がった避難者を氾濫水が流入している東側に行かせないようにし、安全な避難経路に誘導させることができるため、避難成功率が向上したと考えられる。しかし、それでも間に合わない人が見られるため、さらに早く避難を開始する必要がある。浸水対策を行った結果、止水板によって全員が安全に避難を行うことができ、避難者の早期避難と管理者の浸水対策の両方が重要であることが示された。また、マウンドアップの場合には、流入している階段の方に移動している人が避難できなくなっていることがわかった。マウンドアップなどの段差を設定する場合は、避難誘導と併用することで、効率的な避難を行うことができ、避難成功率を向上させることができると考えられる。

5. おわりに

本研究では、都市部における多層化された地下空間を対象とし、周辺河川の氾濫を想定した地下空間浸水時の避難行動シミュレーションを行い、避難指示のタイミングや浸水対策の効果を評価し、避難成功率向上に関する検討を行った。シミュレーション結果より、避難成功率を向上させるためには、早期の避難開始、階段部での混雑の緩和、流入量の軽減といったことが重要であることが示された。

このように、浸水のみの影響だけでなく人の避難状況も分析することで、避難経路の安全性を評価でき、危険な箇所を明確にできた。また、浸水時の避難困難度評価指標を用いることで、避難指示のタイミング、避難誘導、浸水対策の効果を検討し、どの場所に有効に作用するかを検討することが可能となった。このような結果を用いることで、地下空間浸水時の迅速かつ効率的な避難が可能であると考えられる。

地下街内部の浸水状況は、地上の氾濫状況と地下街の構造が大きく影響すると考えられる。本研究の対象である御池地下街では東側にホームへの階段があり、鴨川も地上部の東側にあることから、氾濫時には東側から流入が始まり、ホームへの浸水開始時間も早くなった。このことが、ホームからの避難を困難にし、避難成功率を大きく低下させる原因となった。このことから、地下街の浸水状況や避難困難状況は、地上及び地下街内部の地盤高、地下街の出入口の標高、出入口付近の構造が影響していることが考えられる。したがって、地下空間の地理的かつ構造的な特徴を把握し、水害に対して脆弱なエリアについて重点的に対策を行う必要がある。

今後の課題として、地下空間内の避難誘導方法の改善と、避難救助やグループによる避難など様々なケースを検討すべきであると考えられる。また、今回の設定外力は鴨川の氾濫を想定した地下空間浸水について検討しているため、地上部の避難場所までの移動状況についても検討すべきであると考えられる。

参考文献

- 1) 気象庁：大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index_extreme.html, 2021年3月7日閲覧。
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局長：水防法等の一部を改正する法律の一部施行等について, https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/bunkakai/dai52kai/siryou3-2_01.pdf, 2021年3月7日閲覧。
- 3) 国土交通省：水防法等の一部を改正する法律の施行について, <http://www.mlit.go.jp/common/001189346.pdf>, 2021年3月7日閲覧。
- 4) 井上和也, 中川一, 戸田圭一, 溝田敏夫：地下空間への氾濫浸水の解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第2巻, 土木学会地下空間研究委員会, pp95-102, 1997.
- 5) 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回, pp.583-588, 2004.
- 6) 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.
- 7) 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, pp841-846, 2008.
- 8) 浅井良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討, 水工学論文集, 第53巻, pp859-864, 2009.
- 9) 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50巻, pp583-588, 2006.
- 10) 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, pp907-912, 2010.
- 11) 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.
- 12) 川中龍児, 吉川雅志, 石垣泰輔：大規模地下空間における浸水時の避難成功率に関する検討, 土木学会論文集 F2(地下空間研究), Vol.70, No.1, I_13-I_19, 2014.
- 13) 武田誠, 井上和也, 上塚哲彦, 松村貴義, 高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討, 水工学論文集, 第40巻, pp.1089-1094, 1996.
- 14) 日本建築防災協会：地下街等浸水時避難計画策定の手引き(案), https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/tisiki/sinsui_tebiki/, 2004.
- 15) 吉野攝津子, 村岡宏：地下街浸水シミュレーション, 大林組技術研究所報, No. 79, 2015.
- 16) 国土交通省, 第11回大都市交通センサス平成24年度分析結果報告, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000047.html, 2021年3月7日閲覧。
- 17) 京都市：令和元年京都市交通事業白書(事業概要), <https://www.city.kyoto.lg.jp/kotsu/cmsfiles/contents/0000073/73257/hakusho01.pdf>, pp.53-54, 2021年3月7日閲覧。
- 18) 京都市統計ポータル：推計人口年齢別データ, <https://www2.city.kyoto.lg.jp/sogo/toukei/Population/Suikai/>, 2021年3月7日閲覧。
- 19) 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.

(2021.3.7 受付)

STUDY ON FACTORS FOR IMPROVING EVACUATION SUCCESS RATE IN SAFETY OF MULTI-LAYERED UNDERGROUND SPACE

Yutaro NAKASAKA and Taisuke ISHIGAKI

In recent years, due to the progress of urbanization and the effects of climate change, the number of torrential rains and the risk of flooding in urban areas have increased. In particular, the inundation of underground space should be considered as a problem of concern about flood damage in urban areas. Since the underground spaces in urban areas are facilities used by many people such as underground malls and subways, it is predicted that human damage during flooding would be enormous. For this reason, it is important to understand the inundation situation and the behaviour of users during evacuation when formulating an evacuation plan. Therefore, in this study, the safety of evacuation routes in the underground space was investigated by evacuating simulations when the underground space was inundated assuming river flooding in urban areas. In addition, considering the announcement by the underground space manager, evacuation guidance, and inundation countermeasures, it has been shown that the evacuation success rate is improved by early evacuation and reduction of inflow.