大規模地下街での短時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

中阪 友太朗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,気候変動の影響により局所的かつ短時間の集中豪雨の発生回数が増加している.都市部で集中豪 雨が発生した場合,地上だけでなく地下街等の地下空間への浸水の危険性が考えられる.よって,浸水時 を想定した地下空間における安全避難を計画することが防災上の重要な課題といえる.本研究では,都市 部の密集市街地に存在する大規模地下街を対象とし,短時間集中豪雨に伴う地上の氾濫解析・地下の浸水 解析を行うことで,地下街の浸水リスクについて検討を行った.また,地下街における浸水時の避難行動 シミュレーションを行うことにより,避難成功率の向上について検討を行った.解析結果として,降雨量 の増加により地下街の浸水リスクが高まり,避難の早期開始や地下街と接続しているビルへの避難等によ り,避難成功率が向上することが示された.

Key Words: underground mall, pluvial 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等により、集中 豪雨の発生回数や降雨量の増加が確認されている.昨今 の集中豪雨の特徴として、10~20分間といった短時間か つ局地的に発生することが挙げられる.そのため、発生 の予測と対策が困難であり、深刻な被害を与える可能性 がある.都市部では、一般的に時間雨量 40~50mm 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 下水道の処理能力を超える豪雨が発生した場合には、内 水氾濫が生じるリスクがある.例えば、2013年8月に大 阪で発生した集中豪雨では、大阪の梅田地区で内水氾濫 が発生し、駅や商店が浸水の被害を受けた.これは、10 分間雨量で約 23.5mm の降雨が観測され、約 20 分間で計 画降雨量を上回る規模の猛烈な豪雨であった.

東京,大阪,名古屋等の都市域では,地下鉄や地下街 等の地下空間の高度利用が発達しているが,海抜 0m 地 帯が広がっている.よって,水害が発生した場合は,地 上の浸水のみでなく,地下空間への浸水が危惧されてい る.そのため,大規模な集中豪雨に伴う地下浸水を想定 し,地下空間における安全かつ迅速な避難計画を作成す ることが防災上の重要な課題といえる. 都市部の内水氾濫に伴う地下空間の浸水や地下空間からの避難に関する研究は、これまでに多数なされている。 例えば、森兼ら¹⁾、尾崎ら³は、内水氾濫では総降雨量よりも降雨強度が地下街の流入に影響を与えることを示している。関根ら^{3,4}は、地下街浸水時には避難誘導により効率的に避難が可能であることを示している。川中ら⁵は、地下街利用者の密集度の増加によって、避難成功率が低下することを示している。瀧澤ら⁹は、地下街の接続ビルへの垂直避難や避難場所の容量を考慮した研究を行っている。このように、地下空間の浸水や避難に関する研究が行われている一方で、将来的な降雨量の増加を含めて検討している研究はあまり見られない。

本研究では、都市部の密集市街地に存在する大規模地 下街を対象とし、短時間集中豪雨による内水氾濫の発生 に伴う地下街の浸水解析により、地下街の浸水状況の把 握と浸水危険度の評価を行った.このとき、下水道の計 画降雨を基準とし、降雨量の増加が地下街浸水に与える 影響について検討した.また、地下街浸水時の避難行動 シミュレーションを行い、降雨量の増加、排水ポンプの 有無、避難経路の変更、避難開始のタイミングといった 様々な条件を考慮することにより、避難成功率の向上に 関する検討も行った.



図-1 海老江処理区内の位置関係(国土地理院に加筆)



図-2 大規模地下街内の位置関係(Yahoo!地図に加筆)

2. 対象地域の概要

対象地域は、大阪市にある下水道処理区の1つである 海老江処理区である(図-1).この処理区内は、東の地 盤高は比較的高く、西に向かって地盤高が低くなってい る.特に中央部に位置する梅田は周辺部に比べて1~2m ほど低くなっている.よって、地上で氾濫が発生した場 合、地盤高の高い場所から低い場所に向かって氾濫水が 流れるため、梅田は非常に危険な場所であるといえる.

また,対象地域には排水ポンプ場が存在するが,処理 能力を上回る規模の豪雨が短時間に集中すると,ポンプ が機能を停止する可能性がある.そこで,ポンプ稼働時 とポンプ停止時の両方で検討を行った.なお,ポンプは 解析の間は継続的に稼働または停止すると設定した.

海老江処理区に存在する大規模地下空間は、約 1km 四方に広がる日本有数の地下街である(図-2).公共の 出入口(接続ビルからの出入口除く)は約 140 ヶ所存在 し、多数のビルや5つの地下駅が接続し、管理者の異な る複数の地下空間で形成されている.



図-3 地上・地下統合氾濫解析モデル



図-4 モデル降雨のハイエトグラフ

3. 大規模地下街を含む地上部の氾濫解析

(1) 氾濫解析モデルの概要

地上部の内水氾濫解析を行い,地下街への氾濫水の流入量を計算するために,地表面と下水道管路網の統合解 析が可能な InfoWorks CS(現:ICM)を用いた.本モデ ルは,地表面モデルと下水道管路網モデルから構成され ている(図-3).地表面モデルは,降雨を入力データと し,降雨損失考慮後の有効降雨が単一貯留池モデルによ って地表面を流れ,マンホールへの流入量を算定するモ デルである.下水道管路網モデルは,算出された各マン ホールでのハイドログラフを用いて Saint Venant 方程式を 適用して管渠内の水の流れを解析するモデルである.

また,地下街のモデル化の際には,地下街を巨大な管 渠とし,出入口をマンホールで再現し,地表面と階段部 の境界に仮想の堰を設けることで,地表面における浸水 深が堰高を越えると地下街に水が流入するように設定し ている.出入口のモデル化には,現地調査の結果より得 られた各出入口の幅とマウンドアップ高を適用した.

なお,本モデルは,2011 年 8 月末の豪雨(時間雨量 77.5mm)を用いて内水氾濫の再現性の検証及びキャリ ブレーションが行われたものを用いている⁷.



図-5 各降雨条件における地上部の最大浸水深(浸水深の高さで色分け)

(2) 氾濫解析条件

海老江処理区では、既に森兼ら 1の研究をベースとし、 尾崎ら²⁾, 黄ら⁸によって, 様々な外力条件による内水 氾濫解析が検討されている. ここでは, 短時間の降雨強 度が大きな降雨に伴う内水氾濫時の地下街への流入及び 浸水特性を明らかにするため、黄らが作成した計画降雨 を考慮したモデル降雨を用いる.対象地域の雨水排水能 力は,1時間降雨 60mm (20 年確率降雨に相当) で計画 されている.よって、時間降雨 60mm を基準とし、その 2倍,3倍の規模に相当する時間降雨120mm,180mmの モデル降雨を作成した. 図-4に示すように、モデル降雨 はそれぞれ時間間隔5分,降雨継続時間2時間の中央集 中型のハイエトグラフである. なお、モデル降雨は対象 地域(集水区)に一様に発生させるものとし、面的な分 布の偏りなどは考慮しないものとする. また, 氾濫解析 に関する主なモデルパラメータとして、流出モデル(固 定係数法)の流出係数を 0.85 (中心市街地) と 0.65 (周 辺住宅地)とし、初期損失係数を 0.28mm とし、氾濫解 析の粗度係数を0.043とした.

(3) 氾濫解析結果·分析

決定した解析条件をもとにして、対象地域での内水氾 濫解析を行った.図-5に、各降雨条件における地上部の 道路面の最大浸水深の結果を示す.なお、浸水深の凡例 は、各地点における浸水深を 0.01m から 2m 以上で示し、 2m までは 0.25m ずつの色分けを行っている.また、図-6 に、氾濫解析結果から得られた各モデル降雨における地 下街への氾濫水の流入量を示す.



図-6 各降雨条件における地下街への流入量

図-5より,降雨量が増加するにつれて,地上部における浸水域が広がっている.ポンプ停止時は,主に対象地域の西側と地下街周辺で浸水が発生し,降雨量が増加するにつれて,全体に浸水が広がっている.これは図-1の通り,周辺よりも地盤高が低いためである.ポンプ稼働時は,停止時よりも内水氾濫の規模が小さくなり,西側の浸水深は抑制されているものの,地下街周辺を中心に浸水が発生していることがわかる.

図-6より,降雨量が大きくなるにつれて,地下街への 流入量が増加していることがわかる.排水ポンプの稼働 により,流入量が抑制され,特に下水道の設定基準であ る 60mm/hrではほぼゼロに抑えられている.また,いず れの場合も地下街では約2時間後に流入がピークを迎え ることから,流入のピークが到達するまでの時間に大き な差はないことが示された.

4. 大規模地下街における浸水解析

(1) 浸水解析モデルの概要

地上部の氾濫解析結果より得られた地下街の各出入口 の流入量を外力とし、地下街における浸水解析を行った. 解析モデルは、森兼ら⁹の構造格子モデル(図-7)を用 いた.メッシュのサイズは、解析範囲、通路幅、店舗の 大きさ等を考慮し 2m の正方格子とする.また、フロア レベルの高低差は現地実測によるもので、地下駅が存在 する場所のメッシュは地盤高を低く設定し、氾濫水が地 下駅のメッシュに溜まるような設定を行った.浸水計算 は、以下の2次元浅水方程式(運動方程式と連続式)を 基礎式としている.

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

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

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

ここで、h:水深 (m)、t:時間 (s)、u:x方向の流速 (m/s)、 v:y方向の流速 (m/s)、M:x方向の流量フラックス(M= uh)、N:y方向の流量フラックス(N=vh)、H (H=h+z, z は地盤高):水位 (m)、 τ_{bx} :水底面でのx方向のせん断応 力成分 (kg/m²)、 τ_{by} :y 方向のせん断応力成分 (kg/m²)、 ρ_w :水の密度 (g/cm³)、g:重力加速度 (m/s²)である.

また,底面のせん断応力は,マニングの粗度係数*n*を 用いて,以下の式で表される.

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

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

また、地下街の浸水解析に関するパラメータとして、粗 度係数は0.020(粗いコンクリート程度)と設定した.

浸水解析の方法について説明する.まず,計算の最初 のステップとして,初期条件から運動量方程式を計算す る.次に,流入出による境界条件を計算し,格子間を移 動する流量フラックスを求める.その後,タイムステッ プ△tを1つ進める.次に,移動した流量フラックスに より格子内に出入りした水の量を計算し,格子内の水深 を計算する.その水深の値から,境界上の流量フラック スより流速を求める.その後,時間ステップ△tを1つ 進め,計算終了時間まで同様のことを繰り返す.

なお、これらの基礎式の差分化については、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(staggered grid),運動量方程式と連続式 を交互に計算する Leap-Frog 法を用いて時間ステップを



図-7 梅田地下街モデル・フロアマップ

		避難困難指標 (単位幅比力)				
	非浸水深時					
	の歩行速度	安全避難	自力避難			
	(m/s)	限界	困難			
		(m³/m)	(m³/m)			
成人男性	1.40	0.125	0.250			
成人女性	1.10	0.100	0.200			
高齡男性	1.10	0.100	0.200			
高齡女性	0.80	0.080	0.160			

表-1 歩行速度・避難困難度指標(単位幅比力)

進めることで、計算終了時間まで解析を行った.なお、 計算差分時間は、0.005秒と設定した

(2) 単位幅比力を用いた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^{10,10}や浅井ら¹⁰の 実験結果より,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.以下 に,単位幅比力の算定式を示す.

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

なお, M_0 :単位幅比力 (m³/m), u:流速 (m/s), h:水深 (m), g:重力加速度 (m/s²)である.また,浅井ら¹²の実験 結果から得られた,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-1**に示す.

地下街の浸水解析により,各格子のメッシュにおける時間ごとの流速と水深を求めることで,単位幅比力を算出した.本研究では,最も早期に避難が困難となる高齢女性を対象とし,安全に避難できる限界である単位幅比力 0.08 (m³/m)を用いて評価を行った.



図-8 降雨条件別の地下街における最大浸水範囲・最大浸水深(浸水深の高さで色分け)

(3) 浸水解析結果·分析

地下街内部の浸水解析は,降雨開始時を解析開始のタ イミングとし,6時間経過するまで解析を行った. 図-8 に,地下街の最大浸水深(ほぼ定常状態となる降雨開始 6時間後の様子)を示す.ここでは,浸水深が0mを上 回る格子を浸水箇所と判定し,浸水深の高さで色分けを 行っている.また,図-9に,各降雨条件での地下街全体 における浸水面積の割合の時間変化を示す.

地下街の浸水状況は、図-2で示した地下街の位置関係 と、図-8で示したエリア A~Dを用いて説明する.まず、 地下街への流入は、エリア A (梅田駅北側周辺)とエリ ア B (Whity うめだ)の出入口が最も早く開始する.エ リア A は、地下駅と接続しているため、流入した水が滞 留することなく、地下駅構内へ流れる.エリア B と C は、 図-7 より地盤高が低いため、流入した水が溜まりやすく、 浸水深が増加しやすい場所である.また、降雨量が増加 した場合(120mm/hr,180mm/hr)では、エリア D (北新 地駅周辺・ディアモール)の浸水深が高くなる.これは、 降雨量の増加により、地上部の内水氾濫が広範囲におい て発生し、地下街南部からも水が流入するためである.

流入開始 1 時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hr では浸水面積は 2.2%、120mm/hr では 60.2%、180mm/hr で は 70.5% となった. また、ポンプ停止時には、60mm/hr では 31.2% であり、120mm/hr では 64.0%、180mm/hr では 57.1% となった.



図-9 浸水面積の割合の時間変化

また,降雨開始から6時間後(定常状態)では,ポン プ稼働時には,60mm/hrでは浸水面積は2.2%,120mm/hr では78.5%,180mm/hrでは86.4%となった.また,ポン プ停止時には,60mm/hrでは73.3%であり,120mm/hrで は86.4%,180mm/hrでは93.2%となった.

以上より,降雨量の増加により,地下街の浸水範囲が 広がり,浸水深が増加することが示された.また,排水 ポンプの稼働により,浸水範囲が抑制され,地下駅を除 く全域で浸水深が減少することが示された.



図-10 降雨条件別の地下街における避難困難の状況(降雨開始6時間後)

(4) 浸水時の避難困難度評価

地下街浸水時の避難困難度評価は,浸水解析と同様に 降雨開始時を解析開始のタイミングとし,6時間経過す るまで解析を行った.前述の通り,高齢女性の安全避難 限界である0.08m³/mを基準とし,それを上回る格子を危 険,下回る格子を安全として評価を行った.ここで,安 全避難可能面積を白色,安全避難困難面積が赤色となる ように設定した.降雨開始6時間後の地下街における避 難困難の状況を,図-10に示す.また,地下街全体に対 する安全避難可能面積割合の時間変化を,図-11に示す.

浸水状況と同様に、図-2の位置関係と、図-10のエリ ア A~Dを用いて説明する.まず、60mm/hr(ポンプ稼 働時)を除くすべての条件で、エリア A(梅田駅北側周 辺)とエリア B(Whity うめだの一部)は、流入が早い ため、早期に避難が困難となる.エリア C(Whity うめ だ)も、エリア Bから水が流入するため、避難困難箇所 が徐々に増加する.降雨量が増加した場合(120mm/hr, 180mm/hr)では、地上部の内水氾濫結果より、地下街の 南側周辺からも水が流入するため、エリア D(北新地駅

図-11 より,流入開始1時間後では,ポンプ稼働時には,60mm/hrでは安全避難可能面積は100%(地下街全域)であるが,120mm/hrでは78.5%,180mm/hrでは64.4%となり,降雨量の増加に伴い減少した.また,ポンプ停止時には,60mm/hrでは97.3%であり,120mm/hrでは76.2%,180mm/hrでは57.1%となった.

周辺・ディアモール)でも避難困難箇所が増加している.



図-11 安全避難可能面積の割合の時間変化

また,降雨開始から6時間後では,ポンプ稼働時には, 60mm/hrでは安全避難可能面積は100%で,120mm/hrでは 49.0%,180mm/hrでは30.6%となった.また,ポンプ停止 時には,60mm/hrでは64.2%であり,120mm/hrでは29.3%, 180mm/hrでは8.8%となった.

以上より,降雨量の増加により,地下街の安全避難可 能面積が減少し,ポンプの稼働により,面積の減少が抑 制されることが示された.また,60mm/hr(ポンプ稼働 時)を除くすべての条件で,主に北東部(Whity うめだ) のほぼ全域で避難が困難になることが示された.



図-12 浸水・避難解析の対象領域

5. 大規模地下街における浸水・避難統合解析

(1) マルチエージェントモデルの概要

マルチエージェントモデルとは、仮想空間に複数(マ ルチ)の人間や生物(エージェント)を配置し、各々に 独自のルールを持たせ、それらの干渉(相互作用)を考 慮しつつ、人間の自律的な意思決定をモデル化すること ができるというものである.地下空間浸水時の避難行動 は、戸田ら¹³や石垣ら¹⁴の研究より、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係することが 指摘されている.そこで、避難行動者を個々に取り扱う ことが可能なマルチエージェントモデルを地下街モデル に組み込みことで、浸水・避難の統合解析を行った.

(2) 対象地域・避難経路の設定

地下街の浸水状況から,いずれの降雨条件でも, 主に 北東部(Whity うめだ・阪急三番街 B2) で避難が困難に なることが示された. そこで、このエリアを避難解析の 対象領域とし、重点的に検討を行った. 浸水及び避難の 解析対象領域について、図-12 に示す.また、避難場所 の設定のため、対象領域を2つのエリアに分割した. エ リアαは、商業ビルの内部(阪急三番街 B2) も考慮す るため、地上への出口と商業ビルの上の階の2種類を避 難場所と設定した.エリアβは、図-13のように地階で 隣接するビルが多数存在するため、地上への出口と接続 ビル入口の2種類を避難場所と設定した.現地調査で確 認した接続ビルの例を、図-14 に示す. なお、接続ビル の防水対策は万全であるものとし、ビル内は浸水しない 広い空間であると仮定した.よって,解析に反映させる のは入口部までとし、エージェントは接続ビルの入口部 を通過し、接続ビル内に入った瞬間に避難完了とした.



図-13 エリアβにおける地上への出口・接続ビル入口



図-14 接続ビル入口の例(上:ビルA,下:ビルC)

(3) エージェントのモデル化

本研究では、エージェントの体型や視野について全員 を同じ条件としてモデル化を行った.

a) 人体のモデル化・初期条件の設定

実際の人の形状は、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.本研究では、図-15 に示すよう に長径が 0.5m,短径が 0.3m の楕円とした.また、それ ぞれのエージェントには、性別、年齢層、非浸水時の歩 行速度、視野距離、避難開始条件(時間と水深)を設定 することで、個別の属性を与えられるようにした.

b) 可視範囲の決定

人間の視野範囲は、歩行時において左右に 60°程度 で、標識等の認識距離は 40m としたため、図-15 に示す ような視野範囲を設定した.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する.この距離を、人がその まま移動した場合の移動予測範囲と仮定して、その範囲 内で次の移動目標の決定を行うこととする.



(4) 避難行動のモデル化

基本的な考え方は、関根らの研究^{3,4}を参考にし、川 中らの研究⁹をベースとして用いた.図-16に、避難行動 シミュレーションの手順を示す.

a) 避難行動開始の意思決定

避難行動を開始する意思決定の基準として,浸水等の 周囲の状況変化による自主的な判断(個別避難)と管理 者からの避難アナウンスのような他者からの指示による 判断(一斉避難)の2種類が考えられる.自主的な避難 開始条件は,大西ら¹⁰⁰の調査結果(図-17)より,自身 が存在する格子の水深が2cm以上,10cm以上,20cm以 上と場合分けして「避難開始水深」とした.また,避難 アナウンスによる避難開始条件は,地下街のどこかで浸 水が開始した直後に利用者に情報を与えて避難開始を促 すと仮定し,浸水開始時間を「避難開始時間」とした.

b) 移動目標の決定

避難を行う際には、何らかの目標に向かって移動する ため、計算格子を階段、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 の境界を目指すようにした.また、境界に様々な選択の 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.まず、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 う階段、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¹⁰により、階段の上部の水深が0.1m~0.2m程度で恐 怖を感じることが示されたため、階段の上部の水深が

c) 状況変化に基づく歩行速度の決定

避難行動時の歩行速度の変化は,表-1に示した非浸水時の歩行速度に,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¹⁵.

$$v = S_p \cdot D_e \cdot v_{normal} \tag{7}$$

ここで、vは歩行速度 (m/s), 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_{normal} は非浸水時の歩行速度 (m/s)である.

水流の影響による減少率は、避難者の存在する計算格



図-16 避難行動シミュレーションの計算フロー



図-17 避難開始水深に関する調査結果(大西ら¹⁰より)

子における流速と水深を基に、次式を用いて評価した. $S_p = 0.22 \cdot exp(-125.3 \cdot M_0) - 0.71 \cdot M_0 + 0.78$ (8)

ここで、M₀は単位幅比力であり、運動量と水圧を同時 に考慮して歩行速度を変化させることができる.

歩行密集度の影響による減少率は、川中ら¹⁹により最 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、次式を用いて評価した.

$$D_e = \exp(L^{4.37}/2.55) - 0.48 \tag{9}$$

ここで, *L* は避難者の進行方向にいる最も近い他者との 距離(m)である.

階段部における歩行速度は、石垣ら¹⁴により通路部の 約半分となるため、浸水の影響や避難時の密集度による 変化の後に、1/2を乗じた歩行速度とした.

d) 避難困難度指標に基づく状態の決定

避難者は,表-1における安全避難状態,安全避難困難 状態,自力避難困難状態のいずれかの状態となり,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¹⁵. なお,自力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=0.0m/s としてその場に滞留するようにした.

Case	時間降雨 (mm/hr)	排水 ポンプ	避難経路(目的地の設定)	避難開始 時間(分)	避難開始 水深(m)	Cas	時間降雨 (mm/hr)	掛水 ポンプ	避難経路(目的地の設定)	避難開始 時間(分)	避難開始 水深(m)
A-1	60	ON	地上への出口	86	—	D-1	120	OFF	地上への出口	41	—
A-2	60	ON	地上への出口	—	0.02	D-2	120	OFF	地上への出口	—	0.02
A-3	60	ON	地上への出口	—	0.1	D-3	120	OFF	地上への出口	—	0.1
A-4	60	ON	地上への出口	—	0.2	D-4	120	OFF	地上への出口	—	0.2
A-5	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	86	—	D-5	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	41	—
A-6	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	D-6	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
A-7	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	D-7	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
A-8	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	D-8	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2
B-1	60	OFF	地上への出口	61	—	E-1	180	ON	地上への出口	52	—
B-2	60	OFF	地上への出口	—	0.02	E-2	180	ON	地上への出口	—	0.02
B-3	60	OFF	地上への出口	—	0.1	E-3	180	ON	地上への出口	—	0.1
B-4	60	OFF	地上への出口	—	0.2	E-4	180	ON	地上への出口	—	0.2
B-5	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	61	—	E-5	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	52	—
B-6	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	E-6	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
B-7	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	E-7	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
B-8	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	E-8	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2
C-1	120	ON	地上への出口	64	—	F-1	180	OFF	地上への出口	33	—
C-2	120	ON	地上への出口	—	0.02	F-2	180	OFF	地上への出口	—	0.02
C-3	120	ON	地上への出口	—	0.1	F-3	180	OFF	地上への出口	—	0.1
C-4	120	ON	地上への出口	—	0.2	F-4	180	OFF	地上への出口	—	0.2
C-5	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	64	—	F-5	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	33	—
C-6	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	_	0.02	F-6	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	_	0.02
C-7	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	_	0.1	F-7	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
C-8	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	_	0.2	F-8	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	_	0.2

表-2 浸水・避難統合シミュレーション条件(全48ケース)

(5) 浸水·避難統合解析条件

表-2のように,降雨量,排水ポンプ,避難場所,避難 開始のタイミングといった条件の変更により,解析のケ ース分けを行った.

a) エージェントの人数・配置

本研究では、エージェントはすべて最も早く自力での 避難が困難になる高齢女性とした.対象領域に配置する エージェントの人数を求めるため、現地調査から実際の 混雑率(密度)を計算した.図-18 に、現地調査で撮影 した平日の混雑時の様子を示す.橙色で囲んだ箇所の面 積は約 320m²であり、その中にいる人数が 105 人である ことから、混雑率は約 0.33 人/m²と算定できる.対象領 域にこの混雑率を適用するため、本解析ではエージェン トの配置人数を 4450 人と設定した.初期の配置条件に ついては、乱数を用いることで、X 座標、Y 座標、向き を与え、各々が接触しないように密集度を考慮して偏り が出ないように一様にエージェントを配置した.

b) 降雨・ポンプの条件

降雨量の違いが避難成功率に与える影響について検討 するため、地上部の氾濫解析で用いた3種類のモデル降 雨(60mm/hr, 120mm/hr, 180mm/hr)でケース分けを行 った.また、排水ポンプについては、稼働時と停止時と いう2通りの条件でケース分けを行った.

c) 避難経路(目的地)の条件

本研究では、地上への出口と接続ビル入口の2種類を 避難の目的地とし、地上への出口のみへ避難する場合と 地上への出口と接続ビル入口を併用する場合という2通 りの条件でケース分けを行った.ただし、接続ビル入口



図-18 現地調査で撮影した平日の混雑時の様子 (橙色で囲んだ箇所に105人,混雑率0.33人m²)

はエリアβのみに設定し,エリアαは商業ビル内(阪急 三番街 B2)の上の階も地上への出口と同様に避難場所 として設定した.

d) 避難開始のタイミング

避難行動を開始する意思検定の基準として、エージェ ント自身の格子水深が上昇することによって自主的に避 難を開始する場合と、管理者からの避難アナウンスを想 定して、地下街のどこかが浸水した直後に一斉に避難を 開始する場合の2通りでケース分けを行った。自主的な 避難については、図-17で示した調査結果に基づき、自 身の格子水深が0.02m、0.1m、0.2mの3種類でケース分 けを行った。避難アナウンスを想定した一斉避難の場合 は、降雨開始時間を0分とし、地下街の浸水開始時間を 避難開始時間として設定した。



図-19 避難成功率のまとめ(左:地上への出口のみの場合,右:地上への出口と接続ビル入口を併用する場合)



図-20 避難開始水深に着目した避難経路の安全性評価(自力避難困難状態のエージェントを赤で示し、密集箇所を丸で囲む)

(6) 解析結果·分析

解析結果(避難成功率)を、図-19に示す.ここでの 避難開始水深 0m は、避難アナウンスで地下街の浸水開 始時間に一斉に避難を開始した場合である.また、避難 者エージェント全員が避難完了状態または自力避難困難 状態となった時点での状況を、図-20及び図-21に示す. これらの図では、浸水深を青色で示し、グラデーション で深さを表現している.ただし、時間降雨 60mm(ポン プ稼働時)では、図-8より格子水深が0.02m以上となる 箇所が少なく、図-10より避難困難状態になる箇所が発 生しないことが示されている.よって、Aシリーズ(A- 1~A-8) では、避難を開始しないエージェントが多数存在し、かつ対象領域全体が安全な状態のままであるため、 解析を行わずに避難成功率をすべて100%と仮定し、他のB~Fケースの結果との比較に用いることとした。

a) 避難開始の遅れが避難成功率に与える影響

図-19 より,避難開始水深が同じ場合,降雨量の増加 により,避難成功率は低下している.また,降雨量が同 じ場合,避難開始水深の増加により,避難成功率は低下 している.また,図-20より,B,D,Fシリーズの結果 で比較を行ったところ,丸で囲まれた箇所で避難できな いエージェントが滞留している.これらの箇所は,出口



図-21 接続ビルの有無による避難経路の安全性評価(自力避難困難状態のエージェントを赤で示し,密集箇所を丸で囲む)

付近であり、多くのエージェントが密集していることが 避難成功率を低下させていると考えられる.また、地下 街への氾濫水の流入が一定量を超えた場合、浸水を発見 した時にはすでに大量の水が広範囲に流れ込んでいるた め、避難を開始しても間に合わないということが考えら れる.以上のことから、避難の早期開始が避難成功率を 向上させる要因であると考えられる.

b) 接続ビルとの併用が避難成功率に与える影響

図-19より,接続ビル入口を避難経路として併用する ことにより,地上への出口のみへ避難する場合と比較し て,いずれの解析ケースでも避難成功率は向上すること が示された.このことから,水が流入する地上への出口 だけでなく,接続しているビルの内部から上の階を目指 すような避難も行うことで,より安全な避難が可能と考 えられる.また,図-21より,D~Fシリーズの接続ビル なしの場合では,紫色と黄色の丸で囲んだ箇所にエージ ェントが滞留していて,近くの出口から水が流入してい るため,避難が一層困難となっている.一方で,接続ビ ル入口との併用により,これらの箇所にいる赤色のエー ジェントの数が減少していることから,出口に増加によ る滞留の解消によって避難成功率が向上していると考え られる.以上のことから,複数の避難経路の確保が避難 成功率を向上させる要因であると考えられる.

7. おわりに

本研究では、大阪市の海老江処理区内にある大規模地 下街を対象地域として、短時間集中豪雨に伴う地上部の 内水氾濫解析を行い、地下街への流入量をもとに地下街 内部の浸水解析及び避難解析を行った.

地上部の氾濫解析結果より,降雨量の増加により,浸 水面積・浸水深は増加した.また,排水ポンプの停止に より,地下街の浸水リスクが高まることが示された.

地下街の浸水解析結果より,降雨量の増加により,地 下街の浸水面積は大きく,浸水深も高くなった.単位幅 比力を用いた地下街の避難困難度評価結果より,降雨量 の増加により,避難可能面積の減少が著しく,早期に避 難を行う必要があることがわかった.排水ポンプが停止 した場合には,地下街への流入量が増加するため,安全 に避難できる時間がさらに短くなることが示された.

地下街の避難解析結果より,降雨量や避難開始水深の 増加に従い,避難成功率は減少することが示された.と りわけ,避難開始水深が 0.2m を超えると,避難成功率 は急激に減少した.また,接続ビルを避難場所として考 慮することで,地上への出口のみを避難場所とした場合 と比較して,避難者をより多くの避難先に分散させるこ とができるため,避難成功率が向上すると考えられる. なお、本研究では、地下街の出入口に浸水対策を行わ ない場合での検討を行った.しかし、実際には地下街や ビルの管理者による止水板の設置等の対策が考えられる. 今後は、降雨条件に応じた最適な止水板の設置箇所や順 番を考慮した検討を行う予定である.また、降雨量が増 加した場合の地下街の浸水リスクが示されたが、それら の氾濫水は地下駅へと流れていくため、地下駅のホーム 等から避難する場合の検討も行う予定である.

参考文献

- 森兼政行,石垣泰輔,尾崎平,戸田圭一:大規模地 下空間を有する都市域における地下空間への内水氾 濫水の流入特性とその対策,水工学論文集,第55巻, I_967-I_972,2011.
- 2) 尾崎平,浅野統弘,石垣泰輔,戸田圭一:短時間集 中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1417- I_1422, 2014.
- 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.
- 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,水工学論文集, 第55巻, pp.961-966, 2011.
- 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.
- 6) 瀧澤重志,高木尚哉,谷口与史也:浸水被害を想定した梅田地下街の垂直避難シミュレーション,大阪市立大学都市防災研究プロジェクト,都市防災研究 論文集,第2巻,pp.35-38,2015.
- 7) 浅野統弘,尾崎平,石垣泰輔,戸田圭一:密集市街

地における内水氾濫時の歩行避難および車両移動の 危険度評価,土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1561-I_1566, 2013.

- 8) 黄碧蕊,石垣泰輔,尾崎平,戸田圭一:極端気象下 での地下街浸水時の安全避難について、地下空間シ ンポジウム,第23巻,pp.103-108,2017.
- 9) 森兼政行,井上知美,石垣泰輔,尾崎平,戸田圭
 一:地下駅を考慮した大規模地下空間での浸水特性
 と浸水対応策の効果に関する検討,土木学会論文集
 B1(水工学), Vol.68, No.4, I_1003-I_1008, 2012.
- 10) 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.
- 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.
- 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,pp.859-864, 2009.
- 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.
- 14) 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.
- 15) 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.

STUDY ON SAFE EVACUATION IN FLOODED LARGE UNDERGROUND MALL CONSIDERING SHORT-TIME TORRENTIAL RAIN

Yutaro NAKASAKA and Taisuke ISHIGAKI

In recent years, the frequency of localized and short-time heavy rainfall has increased because of climate change. In urban areas, underground spaces such as underground shopping malls have been used. For this reason, when pluvial flood occurs in urban areas with underground space, there is an inundation risk not only above the ground but also underground. In this study, pluvial flood analysis was performed by using the short-term torrential rainfall data, and the inundation risk of an underground mall was evaluated. In addition, the improvement of the evacuation success rate was examined by simulating the evacuation behavior when underground inundation occurred. The results of these analyses have shown that the inflow of flood water to underground increases with rainfall increasing and that the safe evacuation rate depends on the timing of evacuation, and evacuation into a connecting building is very important to improve the rate of safe evacuation.