

内水氾濫と避難シミュレーションによる 地下空間浸水対策の評価

尾崎 平¹・河南 友也²・檀 寛成³・石垣 泰輔⁴

¹正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)
E-mail: ozaki_t@kansai-u.ac.jp

²非会員 元関西大学学生 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

³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 3-3-35)

⁴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 3-3-35)

IPCC の第 5 次評価報告書では, 大雨などの極端気象が頻度, 強度ともに増加することが報告されている. そのため, 特に水害に対して脆弱な地下空間において浸水対策は重要な課題である. 本研究では, 将来の気候データ (d4PDF) から対象エリアの時間最大雨量の降雨イベントを抽出した. 同降雨による地上と地下の内水氾濫解析ならびに, それに伴う地下空間利用者の避難解析を行い, 地下空間への止水板による流入水対策ならびに, 避難行動対策の効果について考察を行った. その結果, 将来想定される豪雨に対しても, 止水板の設置による流入量の抑制が避難成功率に与える効果は大きいことを示した.

Key Words: flood analysis, evacuation analysis, d4PDF, flood management

1. 結論

近年, 異常気象による集中豪雨が増加している. 時間雨量 50mm 以上の年間発生回数は, 気象庁¹⁾によると, 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, 東京, 大阪, 名古屋など, 大都市圏においては, 海拔 0m 地帯が広がっていることに加え, 地下空間の高度利用が進んでおり, 水害に対して脆弱である. 地下空間の特徴として, 地上の状況が把握しづらいことや, 浸水開始後, 避難時間の猶予が少ないことから, 内水氾濫であっても地下空間が浸水すると被害が増大することが懸念される.

そのような脆弱性に対して, 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」「雨水排除に特化した公共下水道の創設」, 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とともに, 関係機関が連携して, 計画に基づき, 地下空間滞在者への適切な情報提供と適切な避難誘導を行うことが重要である. 本研究で対象とする大阪の梅田地区においても, 大阪地下空間浸水対策協議会が設立され, 地下空間の浸水対策計画が策定されている⁴⁾.

地下空間を対象とした水害からの避難に関する研究は多数見られる. 例えば, 避難シミュレーションの解析技術の高度化, 精緻化を行った岡本ら⁵⁾, 川崎ら⁶⁾の研究や, 中村・小池⁷⁾, 瀧澤ら⁸⁾の地下街利用者の滞留時間などを考慮した避難誘導や垂直避難に関する研究, また, 西尾ら⁹⁾による地下空間の防災情報システムの構築に関する研究などがなされている.

本研究の特徴は, 地上と地下の浸水解析を一体的に行い, その結果を用いて地下空間からの避難に関する解析を実施し, 地下空間への流入水対策と地下空間からの避難行動対策を一体的に評価することである. 一体的に評価することで, 流入水量の変化などの状況に応じた避難行動の評価が可能となる. また, 本研究では, 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース: d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change) (5km, SI-CAT) より, 将来の時間最大雨量が

ワーストケースとなる降雨を抽出し、対象降雨とすることで、将来の豪雨に対する現状の浸水対策の有用性と限界について考察する。なお、本研究で対象とする水害は、内水氾濫である。本来、河川との一体的な解析により、外水氾濫と内水氾濫を一体的に取り扱うことが望ましいと考えるが、現時点では、そこまでは至っていない。

2. 解析方法

本章では、地上・地下の内水氾濫解析手法ならびに避難解析手法について説明する。また、合わせて、対象地域の概要も示す。

(1) 対象地域

対象地域は大阪府大阪市の海老江処理区であり、面積は約 1,215ha である（図-1）。梅田地区の地下空間への出入口は約 140 箇所存在し、複数のビルが隣接しており、管理者の異なる複数の地下空間で形成されている（図-2）。そこには JR・私鉄・市営地下鉄駅が地上・地下を合わせて 7 駅あり、また、梅田以外にも地下駅が 11 駅存在している。なお、地下空間、地下鉄ともに対象エリア内全域をモデル化しているが、本研究では地下空間への流入量、地下空間からの避難の評価は、北東部に位置する Whity うめだ（図-2 右上部）を対象とした。

(2) 地上・地下の内水氾濫解析の概要

本研究では、地下空間への流入量と地下空間内の浸水深を計算するために InfoWorks ICM を用いた。このソフトは「有効降雨モデル」「地表面流出モデル」「管内水理モデル」「地表面氾濫計算モデル」から構成される¹¹⁾。有効降雨モデルにより算出された有効降雨が地表面を流れ、地表面流出モデルによりマンホールへの流入量を算定する。これが管内水理モデルの入力データとなる。管内水理は、サンブナン式で計算され、管きよの流れを解析している。地表面氾濫計算モデルでは、浅水方程式を用いて、下水道から地表面へ溢れた水の流れを解析しており、管内水理計算と地表面氾濫計算は連動して行われる¹²⁾。また、地上の氾濫水は住区内には流入せず、道路面のみを流れるとした¹³⁾。モデルの妥当性について、地下出入口口に仮想の堰を設けることで、止水板の効果を検討した。本モデルは、2011 年 8 月末の豪雨（時間雨量 77.5mm）を用いて検証を行っており、現地調査を実施した 5 地点における浸水深はおおむね妥当な結果を得ている¹⁴⁾。

次に、対象地域における地下空間への浸水量、浸水箇所を評価するために、道路と階段の境界を堰によりモデル化し、道路における浸水深が堰の高さを超えた時、地

下空間へ流入するとした。また、地下空間の通路を管渠に見立てて解析することで、地下空間の浸水深を求めた。この際、通路の幅、高さは現地でのレーザー距離計を用いた簡易計測に基づき設定した。また、地下空間の標高については地上の出入口部部の標高を基準に階段の段数（高さ）より推定した。

(3) 避難解析

a) 概要

本研究では、地下空間からの避難行動を再現するにあたり、株式会社構造計画研究所が開発した解析ソフト artisoc3.0 を用いた。本研究で用いた artisoc3.0 とは、artificial societies の略称であり、人間の相互作用や個人の特性などが影響する社会現象などをコンピュータ上に再現することで、社会現象をより現実的に分析する「マルチエージェント・シミュレーション」を構築することが可能なシミュレーションプラットフォームである。プログラムを加えることで避難者ごとに特性が設定可能であり、避難経路や避難開始のタイミングを設定し、避難誘導等の検討を行うことができる。



図-1 対象地域

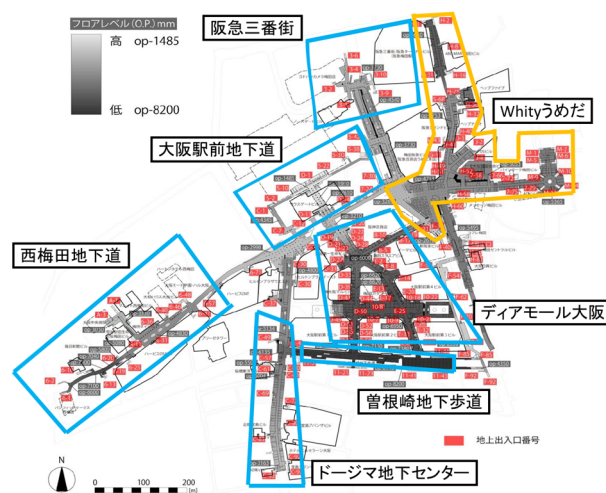


図-2 対象エリア内の地下空間の概要（文献⁴⁾に筆者ら加筆）

b) 地下空間（構造物）のモデル化

Whity うめだは、近年工事などの影響により、形状に一部変化があるため、本研究では現地調査を行い、森兼ら¹⁹⁾が過去に構築したモデルを最新（現状、2019年）の形状に改善して用いた。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の正方格子としており、モデルの通路部総面積が8,520 m²、店舗総面積は10,720 m²、その他の面積は168 m²、全体面積が19,408 m²となっている。また、各店舗間などの壁は、厚さ0.25mとし、避難者は通路部のみを歩行する設定としている。

c) 地下空間利用者の行動ルール

初期配置：地下空間利用者は、モデル内の通路部にランダムに配置され、シミュレーション実行ごとに初期配置箇所は変わる設定とした。次に、地下空間利用者の共通条件や、配置後の行動ルールについて述べる。

避難目的地：Whity うめだには地上に繋がる地上出入口が39箇所、接続ビルに繋がるビル接続口が11箇所ある。本研究の避難シミュレーションでは、この地上出入口とビル接続口を目的地とする。

移動速度：避難時の移動速度は、artisoで始める歩行者エージェントシミュレーション¹⁶⁾を参考に、65歳未満を4.7km/h、65歳以上を3.6km/hとし、階段部分での歩行速度を1/2と定義する。また、浸水時の歩行速度は、既往研究¹⁷⁾を参考に、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考慮した(1)式で表すものとする。

$$v = S_p D_e v_0 \quad (1)$$

ここで、 $v(\text{m/s})$ は避難者の歩行速度、 $S_p(\text{m}^2)$ は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 $D_e(1/\text{m}^2)$ は歩行密集度による歩行速度の減少率、 $v_0(\text{m/s})$ は通常歩行速度を示している。

水流による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(2)式で表現した。

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

$$M_0 = (u^2 h / g + h^2 / 2) \quad (3)$$

ここで、 $M_0(\text{m}^3/\text{m})$ ：単位幅比力、 $h(\text{m})$ ：水深、 $u(\text{m/s})$ ：断面平均流速、 $g(\text{m/s}^2)$ ：重力加速度を示している。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との距離を考慮すること(4)式で評価した。

$$D_e = \exp(L^{4.37} / 2.55) - 0.48 \quad (4)$$

ここで、 $L(\text{m})$ は避難者が進む方向の前方1m内で最も近くに存在する人との距離を示している。

出入口における避難限界：石垣ら¹⁸⁾によると、地上水深

が0.3m以上の水深となると階段からの避難が困難になるため、地上水深が0.3m以上となった出入口は、その時点から避難ができないものとする。

3. 地下空間における浸水対策の検討

(1) 本研究で対象とする浸水対策の概要

緒論に示したように本研究の目的は、今後、想定される最大規模降雨を想定した対策の評価である。そのため、対策として、大きく次の2種類について評価する。①地下空間への浸水を抑制、あるいは避難のための時間を確保するための流入水対策、②地下空間が大規模浸水する恐れがある場合の地下空間利用者の避難を促すための避難行動対策である。

大規模降雨による地下空間の浸水は、人命への影響を与える。地下空間は閉鎖された空間であることから、氾濫水の流入により、氾濫の規模によっては、流入開始後、急激に水位が上昇し、地下空間利用者の避難困難・限界を招く。そのため、地下空間への流入水対策を講じることが第一の対策となる。そのため、本研究では、現状、既に導入されている止水板を用いた地下空間への流入対策について検討する。止水板設置については、その設置開始の基準ならびに設置方法が課題となるため、ここでは開始基準（時間）ならびに設置方法の違いが、浸水量や浸水開始時間に与える影響について評価する。

一般的に、地下空間に居ると地上の様子はわからない。そのため、地上部で浸水被害が発生している様子に気づかないこともある¹³⁾。そのため、豪雨による浸水対策として、地下空間への流入水対策だけではなく、地下空間利用者の避難行動対策も必要である。ここでは、避難行動指示のタイミング違いや、避難経路を判別するためのフロアマップの増加、避難を円滑に行うための避難誘導の有無が避難成功率に与える影響について評価する。

(2) 流入水対策

止水板の設置による浸水対策においては、特に、①設置開始基準、②止水板を設置するチーム数と止水板の設置順序が重要である。ここでは、止水板設置の行動ルールについて定義する。

a) 止水板設置基準

止水板設置の目安について、現在、対象地域では、雨量のモニタリングや地上カメラによる道路面の浸水状況を観察し、判断している⁹⁾。そのため、本研究では、第一に、カメラによるモニタリングを行い、地上部での浸水を確認した時点の一つの判断基準とする（ケース名：カメラ）。カメラのモニタリング位置は、事前シミュレーションにより¹⁹⁾、対象地下空間周辺で最も早く浸水が

発生するマンホールとする。

その他の方法として、平成 27 年 5 月の水防法の一部改正に伴い、主に政令市、中核市等で、地下空間として利用されている区域を含む排水区において内水氾濫危険水位の情報を水防管理者・地下空間の管理者に通知し、緊急速報メール等を活用して、管理者が地下空間利用者等に情報周知を行う仕組みが導入可能となった。このため、下水道管きょ内に水位計を設置し、浸水の危険水位を超えた時点を見断基準とした（ケース名：水位計）。なお、当該地区の浸水の危険水位に関しては、先行研究¹⁹⁾に詳述しているが、複数の降雨ケースによる浸水解析を行い、降雨強度と管きょ内水位の関係から設定し、7 割水深を上回る時（概ね時間雨量 32mm/hr を上回る時）を見断基準とした。なお、水位計の設置位置は、事前シミュレーションにより¹⁹⁾、対象地下空間周辺で最も早く浸水が発生するマンホールの上流側管きょとする。

また、比較対象ケースとして、止水板を設置しない場合（ケース名：止水板なし）ならびに、情報が適切に伝達されず、地下空間の出入口に流入が確認された後に設置を開始する場合（ケース名：流入後）とした。

b) 止水板の設置チーム数と順序

Whity うめだは地上出入口が 39 箇所あり、地下空間への浸水を防止するために、止水板を設置する優先順位を把握し、効率的に浸水対策を実行可能なように準備しておく必要がある。

止水板設置の方法としては、地下空間の管理者が 2 人 1 組となり、地下空間への流入可能性のある出入口を回り、設置していくものとする。また、止水板設置可能チームは、日中の十分な人員がいる場合を想定して(i) 6 チームに分かれて止水板設置を行う時（ケース名：6 チーム）、夜間などの十分な人員がいない場合を想定して(ii) 2 チームに分かれて行う時（ケース名：2 チーム）の 2 種類とする。

止水板設置順序は、事前の浸水解析により、目的変数を「各出入口からの地下空間への流入時間の総和が最小」となるように、制約条件として「1 つのチームで止水板設置開始から設置完了するまでの時間が、30 分以内」を与えて、数理モデルによる最適計算を行い、設置順序を決定した。なお、設置開始場所は、防災センター、歩行速度は 4km/h、止水板の設置にかかる時間は 5 分とした。なお、止水板の高さは 50cm とする。

(3) 避難行動対策

対象とした地下空間には、物販や飲食店などの各店舗も豊富にあり、かつ、JR、私鉄（阪急、阪神）、大阪メトロの複数の鉄道駅が存在する。そのため、非常に多くの利用者が存在している。避難行動を促す方法として、

ここでは、①アナウンスによる方法と、地下空間利用者の全員が避難経路を認知しているわけではないので、②フロアマップの増設、ならびに、円滑に避難誘導を促すための③避難誘導員の配置の、3 種類を検討する。

a) 避難アナウンス

避難開始の合図は、避難勧告に関するガイドライン²⁰⁾に定められた警戒レベルを判断基準とする。現状においても、警戒レベル 5（大雨特別警戒発表）において、利用者への避難準備情報などの周知、地下からの退出の呼びかけ、地下階店舗の閉店などの警戒活動が開始される計画となっている²¹⁾。そのため、ここでは 2 ケースを想定し、現状の警戒レベル 5（3 時間降雨 150mm 以上）を用いた場合と、より安全側で、高齢者等の避難が必要とされる警戒レベル 3（降雨量 60mm/h 以上）を用いた場合とした。

また、避難に関するアナウンスを行っても、必ずしも全員が避難行動をすぐにとるわけではない。そのため、本来であれば、アンケート調査などにに基づき、避難開始時間の行動割合などを調査し、設定することが望ましい。今回は、東日本大震災の避難行動²²⁾を参考に、人々の避難開始に関する時間差を用いた場合（行動 m と呼ぶ）と、比較として、より早期に避難を開始するケースとして、10 分早く行動を開始する場合（行動 n と呼ぶ）を設定した（図-3）。

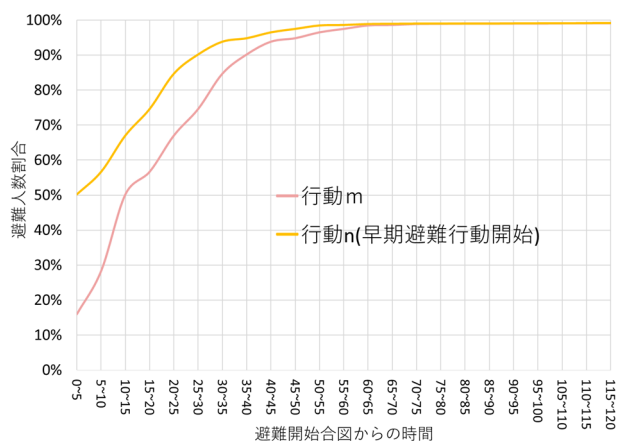


図-3 避難行動開始時間差

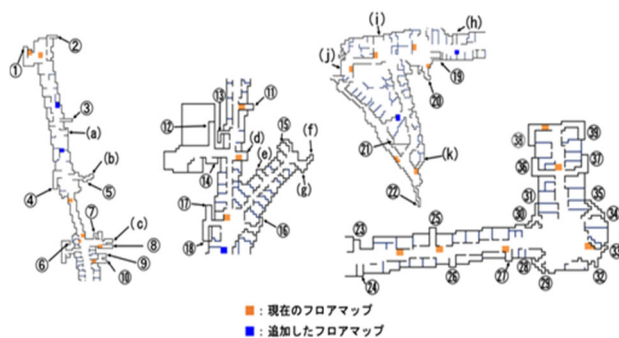


図-4 フロアマップ位置

b)フロアマップと避難誘導

避難をする際、避難者全員が避難経路を認知しているわけではない。現在、対象地下空間内にはフロアマップが22個あるが、フロアマップが周辺にないエリアもあるため、図-4のように仮想的にフロアマップ数を5つ増加させ、27個にしたものを比較対象とする。

c)避難誘導

避難者が1つの出入口に集中することにより出入口付近で混雑する可能性がある。そこで、混雑する場所に避難誘導員を配置し、周辺の出入口に誘導し、混雑緩和による効果を評価する。また、地下空間の出入口から氾濫水が流入すると、避難が困難あるいはできないため、止水板を越流して水が流入している出入口を利用しないよう知らせ、他の出入口から避難するように誘導することの効果を評価する。

(4) 評価ケースと評価指標

a) 評価ケース

上記に流入水対策と避難行動対策について説明した。地上・地下の内水氾濫解析は、止水板を設置しない場合と、流入水対策を行った場合（設置基準：流入後、カメラ、水位計と設置チーム数：2、6チームの組み合わせ）について、すべて実施する。それに対して避難解析は、すべての組み合わせ実施すると評価ケースが非常に多くなるため、表-1に示すように、各対策の効果が評価できるケースを設定した。

具体的には、ケース①は、比較対象ケースとして、無対策、ケース②～④は止水板設置による効果、⑤は止水板設置のチーム数が与える影響、⑥～⑨は、止水板はなく、各避難行動対策について、よりよい方策を採用した場合の効果、⑩～⑬は、止水板を設置し、各避難行動対策について、よりよい方策を採用した場合の組み合わせ効果、⑭はすべてにおいてより良い方策を採用した場合の効果を評価することを意図して、ケース設定を行った。

b) 評価指標

本研究における評価指標は、地下空間の浸水対策に対する評価のため、第一に地下空間への流入量、第二に地下空間からの避難成功率を評価指標とする。

4. 結果および考察

(1) 解析条件

a) 対象降雨の設定

緒論で示したように本研究では、内水氾濫ではあるが、想定最大規模の降雨を用いた解析により、地下からの避難を必要とする程度の豪雨を対象降雨とする。ここでは、

想定最大規模の降雨として d4PDF (5km, SI-CAT) より、将来の時間最大雨量が、ワーストケースとなる降雨を抽出し、対象降雨とする。

本研究では、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) において d4PDF (20km) の領域モデルの 50 アンサンブルから過去および将来それぞれについて、無作為に 12 及び 2 アンサンブルを抽出しダウンスケリングを行った d4PDF (5km, SI-CAT) ²³⁾ のうち 4℃上昇実験 (実験名:HFB4K) のデータを用いた。4℃上昇実験は、1850 年の産業革命以前に比べて全球平均温度が 4℃上昇すると仮定して、2080 年 9 月～2111 年 8 月の 31 年間の気候を予測する 12 メンバ (6SST×2 アンサンブルメンバ) 、合計 372 年分の実験である。

HFB4K より抽出した時間最大雨量のワースト 1 の降雨を図-5 に示す。最大の降雨強度は 117.0mm/hr、総降雨量は 404.5mm、降雨継続時間は 8 時間である。

b) 避難人数と避難者の分類

避難人数ならびに配置は避難成功率に影響を及ぼす。ここでは、既往研究 ¹⁰⁾ を参考に、最も混雑している状態 (混雑度 1.0 人/㎡) を想定した。具体的には、本研究のモデルでは、通路部総面積が 8520 ㎡であることから、8500 人とした。また、初期配置は、2 章に示したように解析毎にランダムに配置される方式とした。

表-1 避難解析の評価ケース

ケース	流入水対策	避難行動対策			
	止水板	避難情報発令	行動開始時間	フロアマップ 数	避難誘導(場所)
①	止水板なし	警戒レベル5	行動m	22	なし
②	流入後6チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
③	カメラ6チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
④	水位計6チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
⑤	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
⑥	止水板なし	警戒レベル3	行動m	22	なし
⑦	止水板なし	警戒レベル5	行動n	22	なし
⑧	止水板なし	警戒レベル5	行動m	27	なし
⑨-a	止水板なし	警戒レベル5	行動m	22	8人(混雑場所)
⑨-b	止水板なし	警戒レベル5	行動m	22	8人(浸水危険箇所)
⑩	水位計2チーム	警戒レベル3	行動m	22	なし
⑪	水位計2チーム	警戒レベル5	行動n	22	なし
⑫	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	27	なし
⑬-a	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	22	8人(混雑場所)
⑬-b	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	22	8人(浸水危険箇所)
⑭	水位計6チーム	警戒レベル3	行動n	27	8人(混雑場所)

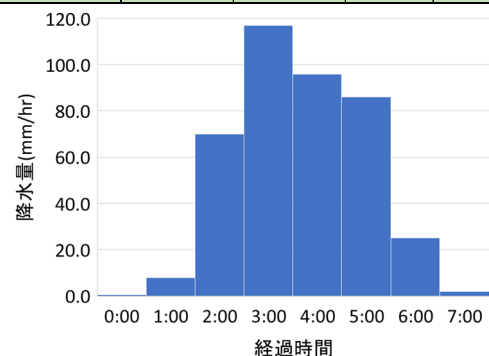


図-5 本研究の対象降雨

次に避難者の属性について、65歳未満と65歳以上で歩行速度に差を与えていることから、利用者割合を設定する必要がある。ここでは、明確に地下空間の利用者属性の年齢割合を定義することが困難であることから、大阪市における2015年の国勢調査結果、65歳未満：81%、65歳以上：19%を用いた。

また、地下空間利用者の全員が避難経路を認知しているわけではない。大阪地下空間浸水対策協議会の資料⁴⁾によれば、平日夕方18時の地下街・地下駅など利用者数のうち、近隣従業員の利用者割合が26%とのことより、経路を理解している避難者を26%とする。なお、経路を理解していない避難者は、ランダムに一定方向に向かって進むとし、フロアマップ前にて、20秒間立ち止まり、避難経路を理解するものとする。避難経路は各地点から最も距離が近い出入口、接続口に避難するものとする。

次に、避難誘導員について、その配置に関する明確な根拠はないが、マップを見ながら、概ね通路部面積1000㎡に対して1人の割合で配置するとし、図-6のようにエリア全体で8人の避難誘導員を配置した。なお、図-6には、混雑を緩和するケース（凡例名：混雑場所）と、浸水の危険を通知するケース（凡例名：浸水危険場所）の両ケースを併記している。

(2) 地上・地下の内水氾濫解析による流入水対策の評価

a) 地上の内水氾濫解析結果

内水氾濫解析に基づく地上の最大浸水深図を図-7に示す。結果からわかるように、将来の想定最大規模降雨による氾濫解析により多くの地点で、浸水が生じている。地上の最大湛水量を浸水面積で除した平均浸水深は0.32mであり、平均的に見ても浸水深が深いことがわかる。また、対象地下空間周辺は、0.5～1.25mの浸水が生じており、地点により1mを超える箇所もあり、特に脆弱であることがわかる。

b) 地下空間への流入量の比較

流入水対策毎の地下空間への流入量の違いを図-8に示す。なお、図-8中の「越流」は地下空間の出入口に止水板を設置したが、止水板の高さを超えて水が流入したもの、「回り込み」は地下空間の出入口に止水板を設置したことで、せき止められた水が、ほかの出入口口に回り込んで流入したもの、「設置前」は止水板の設置が間に合わずに、設置する以前に地下空間へ流入したものを示す。

止水板の有無の比較より、止水板を設置することで、概ね7割程度の地下空間への流入量を削減できる。そのため、止水板設置による流入水対策は極めて有効である。

次に、止水板を設置するケースとして水位計、カメラ、流入後のそれぞれで2チームと6チームで設置する場合の流入量の比較より、2チームに比べ6チームでは、約

1.4ポイントほど削減効果はみられるが、モニタリング手法の違いによる削減効果に差はほとんど見られなかった。

また、流入水の種類を見ても、止水板を設置するケースではいずれも越流による流入量が支配的である。すなわち、6チームで止水板の設置を行うと、地下空間への流入前に止水板を設置することはできている。それでも浸水している要因は、止水板の設置高さが50cmと低いためである。地上部の浸水深が止水板の高さよりも高くなり、地下への浸水が発生している。2チームの場合は、一部、止水板の設置前に地下への流入が見られるが、割合で見ると、設置前の流入よりも、設置後に止水板を越流して流入する割合の方が多い。

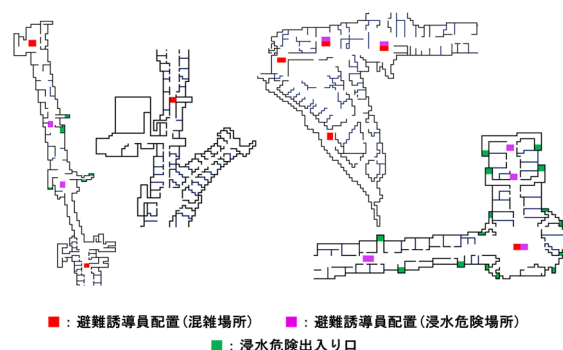


図-6 避難誘導員配置位置

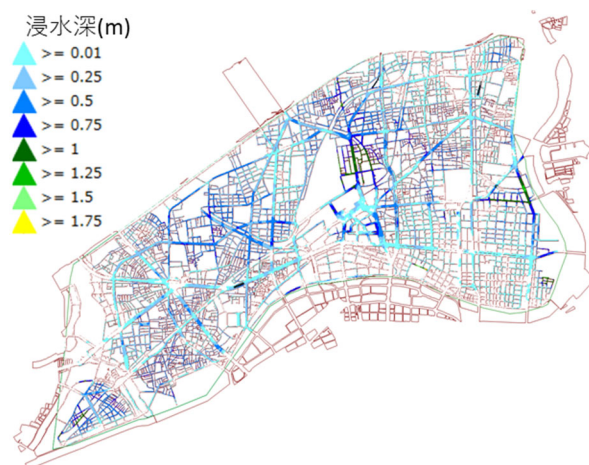


図-7 地上の内水氾濫解析結果（最大浸水深図）

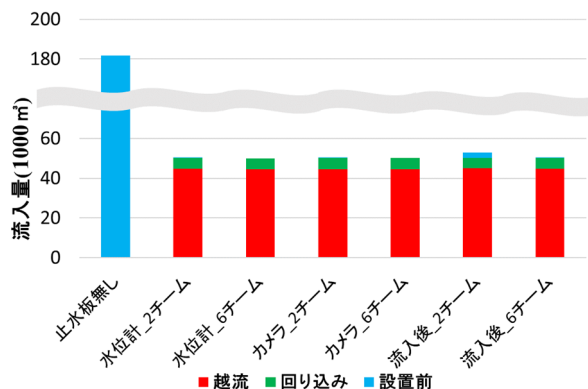


図-8 地下空間への流入量の比較

c) 地下空間の浸水結果

地下空間の浸水深を比較するため、止水板なしと流入量が最も少ない水位計 6 チームでの、降雨開始から 240 分後(4 時間後)の浸水深ならびに最大浸水深を図-9 に示す。

まず、240 分経過後を比較すると、止水板が未設置の場合は、降雨開始から 175 分で流入が始まり、240 分経過すると北側のエリアの浸水深が 1.25m を越えている。それに対して、止水板を設置するケースでは、降雨開始から 210 分で流入が始まり、240 分経過した場合の浸水深は 0.2~0.5m 程度である。そのため、止水板未設置であると、避難(移動)限界を超える比力となるが、止水板を設置することで、避難することが可能な時間(リードタイム)が確保される。

次に、最大浸水深を比較すると、北部および東部の箇所は、袋小路となっているため水位が上昇し、いずれのケースも危険な状態である。そのため、止水板を設置したから安全というわけではなく、避難のための時間を確保することはできるが、避難を行わない場合、人命に影響を与えることが示唆された。

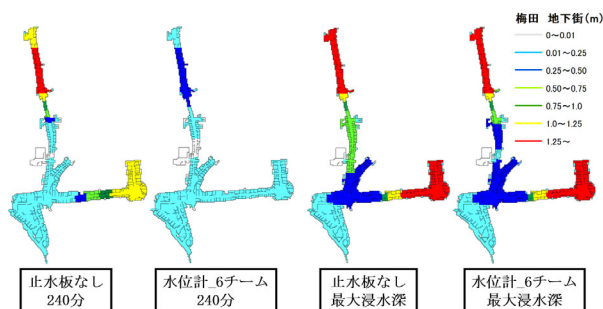


図-9 地下空間の浸水深の比較

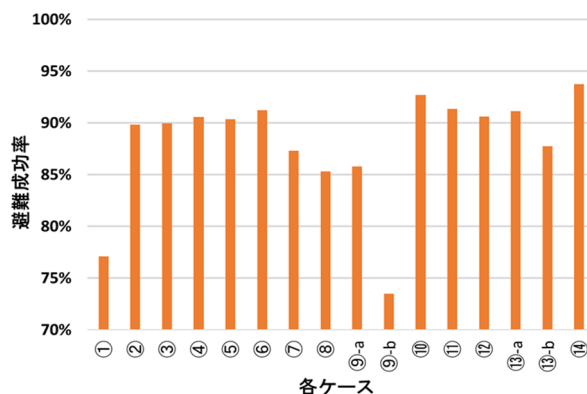


図-10 各ケースにおける避難成功率

(3) 避難解析による避難行動対策の評価

避難解析は地下空間利用者の初期の配置や属性が結果に影響を与えるため、表-1 の各ケースに対して 100 回の解析を行い、得られた解析結果の平均を求め分析を行う。

各対策における避難成功率と時間変化について比較する。各ケースにおける避難成功率を比較したものを図-10 に示し、避難成功率と避難成功人数の平均値、標準偏差、最大値、最小値の比較したものを表-2 に示す。

表-2 各ケースの避難成功率(避難成功人数)

各ケース	平均	標準偏差	最大	最少
①	77.1%(6555人)	166.4	82.1%(6982人)	72.5%(6161人)
②	89.8%(7635人)	57.6	90.8%(7718人)	87.9%(7471人)
③	90.0%(7647人)	50.7	91.1%(7742人)	88.5%(7525人)
④	90.6%(7698人)	34.4	91.3%(7762人)	89.7%(7624人)
⑤	90.4%(7681人)	41.7	91.3%(7760人)	88.8%(7546人)
⑥	91.2%(7753人)	18.6	91.6%(7787人)	90.2%(7669人)
⑦	87.3%(7418人)	79.4	90.4%(7681人)	85.0%(7226人)
⑧	85.3%(7253人)	130.5	88.5%(7523人)	82.4%(7006人)
⑨-a	85.8%(7294人)	76.6	87.9%(7468人)	82.7%(7032人)
⑨-b	73.5%(6246人)	91.4	75.6%(6424人)	69.4%(5900人)
⑩	92.7%(7878人)	29.4	93.6%(7956人)	92.0%(7820人)
⑪	91.3%(7764人)	35.0	92.5%(7860人)	90.6%(7697人)
⑫	90.6%(7816人)	194.3	97.6%(8299人)	89.2%(7579人)
⑬-a	91.1%(7747人)	31.7	91.8%(7802人)	89.9%(7642人)
⑬-b	87.7%(7458人)	84.1	89.5%(7607人)	86.1%(7318人)
⑭	93.7%(7968人)	18.5	95.7%(8134人)	93.2%(7920人)

a) 止水板設置の効果

流入水対策(ケース②~⑤)の違いによる避難への影響について、止水板がない場合と止水板の設置ルールの違いによる避難成功率の時間変化の比較を図-11 に示す。最も流入量が少なかった水位計 6 チームで止水板を設置するケースが 91%で最も高い結果であり、止水板なしと比べ、約 13.5 ポイント、避難成功人数は約 1100 人の差であった。

経過時間と避難成功率の関係を見ると、避難開始当初より、やや止水板なしのケース①の避難成功率は低いが、40 分を過ぎた辺りから、避難成功率には差が大きく開き始めている。この差が、止水板による地下空間への流入量を抑制した効果と見なせる。

止水板設置の行動を早める対策内では、最も流入量が多い流入後 6 チームで設置するケースでも避難成功率は 90%であり、水位計 6 チームのケースと差は約 0.8 ポイントである。今回検討した止水板の設置開始基準の違いによる避難成功率へ与える影響は少ないと考える。

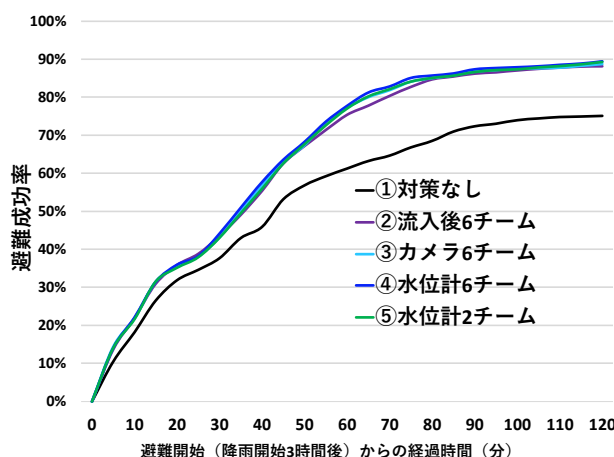


図-11 止水板の有無による避難成功率の時間変化

b) 避難行動対策の効果

次に、流入水対策（止水板）がなく、避難行動対策のみの効果について（ケース⑥～⑨）、止水板のないケース①との比較では、ケース⑥、⑨-bを除き、7～10ポイント高い避難成功率となっており、一定の効果が見られる。ケース⑥は早期に避難情報発令するケースであり、早期避難の有用性は確認できた。一方で、現実的には、大雨特別警戒が発令されるほど大雨にならなかった、いわゆる空振りの可能性もあり、店舗の営業損失などのリスクを伴う。ケース⑨-bは、地下空間の出入り口での浸水が発生している場合に、避難限界を迎える前から、同出入り口を利用しないように避難誘導した場合の結果であり、避難の比較的早い段階で、利用できなくなる出入り口数が増えるために、避難成功率が低下している。また、ケース②～⑤の止水板のあるケースと、ケース⑥～⑨の避難行動対策のみの場合の比較では、早期避難のケース⑥を除き、いずれも止水板のあるケースの方が避難成功率は高く、止水板の設置による流入量の抑制が避難成功率に与える効果は大きいことがわかる。

c) 早期避難情報の発令の効果

避難開始目安を早めることによる影響について、ケース①と水位計2チームで止水板を設置するケース⑤、避難アナウンス開始目安を警戒レベル3としたケース⑥との比較を図-12に示す。ケース⑥は止水板を設置していないが、避難成功率が91%と避難行動対策のみの対策の中で最も効果が高く、止水板なしと比べ、約14ポイント、避難成功人数は約1200人の差であった。また、ケース⑩の止水板との併用により、早期に安全避難が可能となっている。一方で、早期避難については上述したような営業損失を伴うリスクもあるため、現実的には実施が困難と思われる。早期避難は、防災上、極めて重要であることは間違いないが、今回の結果では、早期避難を行わなくても、流入水対策により、同等の避難成功率が得られる結果となった。

d) 避難行動の早期化による効果

ここでは、避難の発令は、警戒レベル5であるが、図-3で示した早期に避難行動を取る人の割合が増えた場合の効果について考察する。比較対象として、対策のないケース①、現状のケース③との比較を図-13に示す。アナウンスや緊急メールなどを工夫し、避難行動に改善が見られ、早期に避難行動を取る人の割合が増えた場合、出入口付近での混雑度も上がり、避難開始合図から10分～25分での避難者数の増加率は低い。しかし、図-14のように、各出入口付近に避難している避難者が多く、逃げ遅れによる避難の失敗が少ないため、避難成功率は10ポイント（約850人）増加した。現状の状態と比べると、序盤の避難成功率は高いが最終的な成功率にあまり差はなかった。

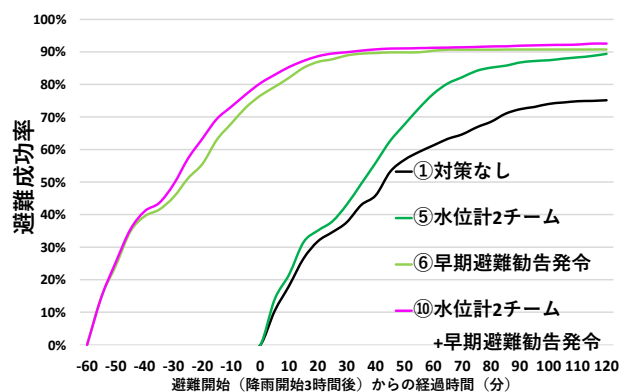


図-12 早期避難情報の発令による避難成功率の時間変化

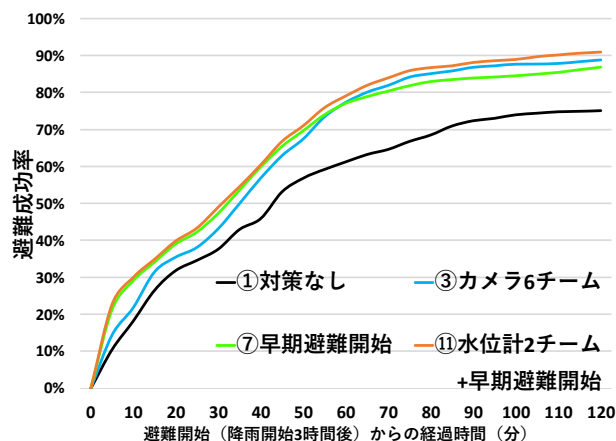


図-13 避難行動の早期化による避難成功率の時間変化

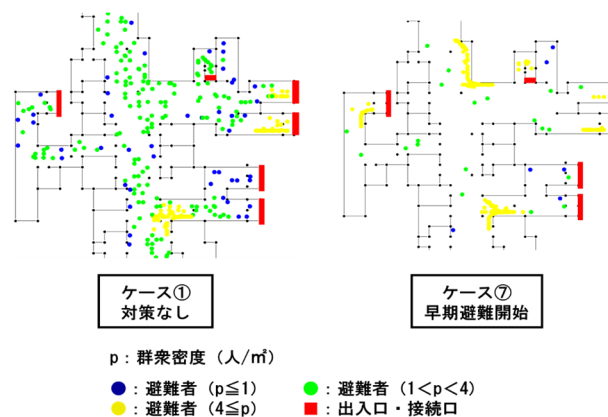


図-14 避難開始20分後の避難状況比較

e) フロアマップ数の増加による効果

フロアマップを増加させた場合と対策のないケース①、ケース③を比較したものを図-15に示す。フロアマップを設置することで、右往左往せずマップを見て、最も近い出入口やビル接続口へ最短経路で出口に向かう人が増加するため避難成功率は増加する。また、最も距離が近い出入口が浸水や流入の影響を与える箇所だった場合、速度低下や避難失敗となるため止水板の有無の違いによる避難成功率にも大きな差が出た。止水板とフロアマップの組み合わせによって現状に比べ、約0.6ポイント（約150人）の効果が見られた。

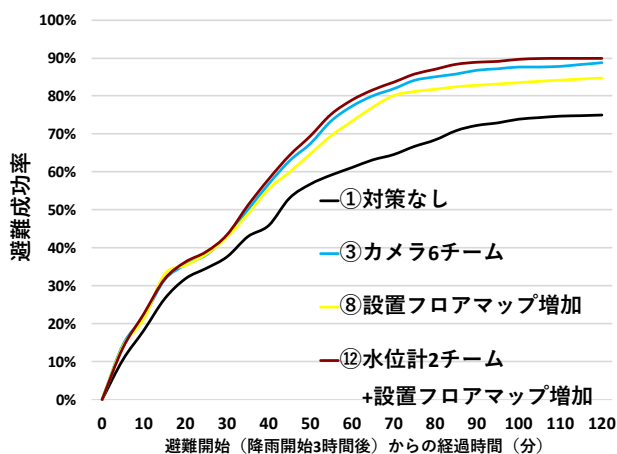


図-15 フロアマップ増加による避難成功率の時間変化

ここでフロアマップ数の増加対策のケース⑧と⑫の標準偏差をみると(表-2), 対策のないケース①と同様あるいは、それ以上に標準偏差が大きいという特徴が見られる。標準偏差が大きくなる要因は、地下空間利用者の初期配置によるものと考えられる。ケース①の場合は、地下浸水の被害が、他のケースよりも相対的に早く、かつ大きくなるために初期配置の影響を受ける。一方、ケース⑧、⑫の場合は、フロアマップが増加されたことにより、初期配置によっては、早期に避難経路を見つける人の割合が増えるために標準偏差が大きくなったと考えられる。

5. 結論

本研究では、将来の想定最大降雨を用いて、地上と地下の内水氾濫解析ならびにそれに伴う地下空間利用者の避難解析を行い、地下空間への止水板による流入水対策ならびに、避難行動対策の効果について考察を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 地下への流入水対策としての止水板設置は、想定最大規模の降雨に対しても有用であることを確認した。ただし、現状の止水板高さ 50cm では不十分な箇所がある。現状の止水板高さは、人が乗り越えられる高さとして設定されていることから、このトレードオフの関係を今後、評価する必要がある。
- 2) 止水板の有無による避難解析結果より、今回の検討条件においては、止水板の有無により避難成功率に 13 ポイント以上の差が見られた。止水板を設置した場合、避難成功率は約 90% と高い効果が得られ、止水板の設置による流入量の抑制が避難成功率に与える効果は大きいことを示した。
- 3) 避難行動対策として、早期避難のアナウンスは効果的であるが、営業損失なども招くリスクもある。一

方で、避難アナウンスを早期に実施しない場合でも、止水板による流入水量を抑制し、一人一人が早期に避難行動を開始したり、避難混雑を緩和するような避難誘導を行ったりすることにより、同等の避難成功率を得ることが示唆された。

最後に、本研究の課題点について示す。本研究では地下空間の出入り口の階段を上がった、あるいは接続ビルに到達した時点で避難完了と定義し、評価を行っているため、地上への到達後の避難を想定していない。地上部も浸水しており、避難困難になっている箇所もあるが、本研究ではその点を考慮できていない。次に、今回はマルチエージェントモデルによる避難解析を実施したが、非常に簡単な行動ルールに基づく解析である。現在、解析技術が非常に向上し、3次元シミュレーションなどによる避難解析なども実施されているため、避難解析については、その高度化が必要である。ただし、今回のように複数の対策案の代替案比較という点においては、本研究で用いた避難解析手法であっても有用であると考えられる。

謝辞: 本研究は日本学術振興会の科研費(19K04966, 研究代表者:戸田圭一)の助成を得て行った研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, 最終更新 2019 年 3 月, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html, 2019 年 8 月閲覧
- 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, 最終更新 2015 年 6 月, https://www.mlit.go.jp/river/shin-ngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/bunkakai/dai52kai/siryou3-2_01.pdf, 2019 年 8 月閲覧
- 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, 最終更新 2017 年 7 月, <http://www.mlit.go.jp/common/001189346.pdf>, 2019 年 8 月閲覧
- 4) 大阪地下空間浸水対策協議会: 大阪駅周辺地区 地下空間浸水対策計画, <https://www.city.osaka.lg.jp/kikikan-rishitsu/cmsfiles/contents/0000259/259323/osakaekitiku-shinsuitaisakukeikaku2.pdf>, 2019 年 12 月閲覧
- 5) 岡本隆明, 戸田圭一, 岡宗佑, 當麻泰史: 幅の狭い地下通路における浸水時の危険性の評価に関する実験的研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.25 pp.196-201, 2020.
- 6) 川崎順二, 原田英治, 後藤仁志, 水口尚司, 春名慧: DEM-MPS カップリングモデルを用いた浸水時の登陸避難過程シミュレーション, 土木学会論文集 F2(地下空間研究), Vol.75, No.1, pp.1-16, 2019.
- 7) 中村栄治, 小池則満: 地下街での来街者調査に基づいた避難シミュレーションからの滞留者予測と避難誘導の提案 ~名古屋・セントラルパークを例として~, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.74, No.2 pp.1_93-1_100, 2018.

- 8) 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, 都市防災研究論文集, Vol.2, pp.35-38, 2015.
- 9) 西尾信彦, 井下泰具, 伊藤博幸, 森兼政行: 地下空間防災システムの高度化に関する検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.22, pp.115-122, 2017.
- 10) 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向上に関する検討, 土木学会論文集(地下空間研究), 70 巻 1 号 pp.13-19, 2014
- 11) 寺田光宏, 岡部良治, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 密集市街地における内水氾濫時の地下鉄浸水に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72, No. 4, pp. 1357-1362, 2016.
- 12) 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 低平地住宅密集地域における内水氾濫の危険度評価に関する研究, 水工学論文集, Vol.53, pp.823-828, 2009.
- 13) 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 高密度商業地域における内水氾濫の脆弱要因に関する考察—2011 年 8 月 27 日大阪の豪雨を対象として—, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, NO.4, I_1009-I_1014, 2012.
- 14) 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
- 15) 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 68 巻 4 号, pp.I_1003-I_1008, 2012
- 16) 兼田敏之 artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション, pp 61 62, 構造計画研究所, 2010
- 17) 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向上に関する検討, 土木学会論文集(地下空間研究), 70 巻 1 号 p.13-19, 2014
- 18) 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, 50 巻, pp.583-588, 2006
- 19) 尾崎平, 川口徹矢, 盛岡 通: 大規模地下空間の浸水対策としての管内水位情報の有用性に関する一考察, 第 54 回下水道研究発表会講演集, pp.345-347, 2017.07
- 20) 内閣府: 避難勧告に関するガイドライン, 最終更新日 2019 年 3 月, http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinan-kankoku/pdf/hinan_guideline_01.pdf, 2019 年 12 月閲覧
- 21) 大阪地下街株式会社: 梅田地下空間避難確保・浸水防止計画 (東梅田地区), 2017.7
- 22) 国土交通省・都市局街路交通施設課都市計画課: 東日本大震災の津波被災現況調査結果(第 3 次報告), <http://www.mlit.go.jp/common/000186474.pdf>, 2019 年 12 月 16 日閲覧
- 23) 佐々井崇博. (2019). 大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ (東北から九州) by SI-CAT [Data set]. データ統合・解析システム (DIAS). <https://doi.org/10.20783/DIAS.562>

EVALUATION OF FLOOD MANAGEMENT FOR UNDERGROUND BASED ON FLOOD ANALYSIS AND EVACUATION ANALYSIS

Taira OZAKI, Tomoya KAWANAMI, Hiroshige DAN and Taisuke ISHIGAKI

According to the IPCC Fifth Assessment Report, extreme weather events such as heavy rainfall being reported with increasing frequency and intensity worldwide. The underground space is vulnerable to flood damage, and preparation for flood damage is important. We used a large scale ensemble climate prediction database d4PDF composed of numerous ensemble experiment data, and extracted hourly maximum rainfall events from the database. In this study, we evaluated both countermeasures for inflowing underground and evacuation behavior from underground based on the results of flood analysis and evacuation analysis. As a result, it was indicate that the reduction of inflow water by installing a water stop board at the entrance is effective for evacuation behavior for the expected maximum rainfall event.