

# 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

## CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND MALL INUNDATION BY FLUSH FLOOD IN SHORT TIME HEAVY RAINFALL

尾崎 平<sup>1</sup>・浅野統弘<sup>2</sup>・石垣泰輔<sup>3</sup>・戸田圭一<sup>4</sup>

Taira OZAKI, Norihiro ASANO, Taisuke ISHIGAKI, Keiichi TODA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 関西大学助教 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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 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)

<sup>4</sup>正会員 Ph.D. 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Short-time heavy rainfall and high intensity rainfall events have increased in Japan. The rainfall events cause flush floods in urban area. In these floods, some rainwater intruded into underground spaces like a shopping mall and the users faced the danger of underground flooding. Therefore, it is very important to have an emergency plan for flooding. In order to make a plan, manager for underground spaces should know when and from which entrances the rainwater will flow into there. We simulate an inflow discharge by three different profiles of short-time high intensity rainfall using 1D-2D urban flood model and calculated an underground flooding using shallow flow model with structural mesh. It is found that inflow volume, start time of inflow and velocity spread are quite different in the three cases, but location of inflow is almost same. These results indicate that we have to move a quick response to the flush flood by high intensity rainfall.

**Key Words :** inundation of mega-underground mall, pluvial flood prevention plan, high intensity rainfall

### 1. 緒論

近年、都市部での短時間の集中豪雨が多発している。平成25年8月25日には、大阪市周辺において局地的な短時間豪雨により、内水氾濫が発生し、床上浸水、床下浸水、道路の冠水などの被害が発生した。また、平成25年9月4日には、名古屋市近郊において同様の被害が発生している。

これらの被害の特徴は、短時間に局地的な大雨が降ったことにより、内水氾濫が発生したことである。その規模について、時間雨量は大阪府の豊中、枚方、大阪市中央区においてそれぞれ66mm, 49mm, 38.5mmと、これまでの観測記録最大値(110mm, 91mm, 77.5mm)よりも小さい値である。しかし、10分間雨量は、各地点において20.5mm, 11.5mm, 27.5mmと、非常に多く、豊中、大阪市中央区の10分間雨量は、観測史上2位、1位の豪雨である(枚方市は10位以下)<sup>1)</sup>。

このように時間雨量としては、下水道による雨水排除能力(一般的に30~50mm/hr)よりもやや多い雨量であるが、10分間雨量を降雨強度に換算した場合のそれは下水道の雨水排除能力を大きく上回る値である。下水道は河川に比べ、その流達時間が短いため、このような10分程度の短時間の集中豪雨に対してでも脆弱である。

そのため、時間雨量が過去の降雨イベントに比べて少ないにもかかわらず、10分間雨量が多いために、8月末に生じた床下、床上浸水、道路の冠水等による交通障害が発生した。特に、大阪や名古屋などその中心部に大規模な地下街を有するエリアでは、地下への浸水によるリスクが高く、その対応が急務である。今回の事例は、その継続時間が比較的短時間であったため、トイレの水の逆流や排水不良等を除けば、直接的な地下街への大きな被害はなかった。しかしながら、近年、増大している短時間豪雨に対して、地下街、地下空間といった都市内の浸水に対する脆弱箇所とされるエリアにおいて事前にシミュレーションを用いた内水氾濫の浸水特性を理解した

上で、発災時の初期行動を計画・立案しておくことは極めて重要である。

先行研究事例として、関根らは集中豪雨により発生する内水氾濫、地下空間の浸水と利用者の避難に関する検討<sup>2)3)</sup>や事前対策としてのリアルタイム予報に関する研究<sup>4)</sup>を行っている。木村らは集中豪雨に対する内水氾濫のリアルタイム浸水予測<sup>5)</sup>、武田らは内水氾濫対策の検討<sup>6)</sup>等を行っている。また、秋山らは短時間豪雨に対する外水氾濫の浸水特性に関する研究<sup>7)</sup>を実施している。

このように内水氾濫、外水氾濫の数値シミュレーションに基づく氾濫特性、避難に関する研究、リアルタイム浸水予測に関する研究は精力的になされている。筆者らもこれまで内水氾濫解析や地下街を対象とした浸水特性とその避難について論じてきた<sup>8)10)</sup>。

しかしながら、シミュレーション手法や利用者の避難、リアルタイム予測に関する研究は行われているが、近年、多発しているような極めて短時間の豪雨に対する検討や地上と地下空間の浸水特性、地下空間構造を考慮した浸水対策に関する検討は十分に行われていない。

本研究の目的は、3種類のモデル豪雨を用いて地上の内水氾濫解析と、地下の浸水解析を行い、地上から地下への流入地点、流入量と地下駅や袋小路等、地下の浸水被害を拡大あるいは深刻化させる構造的特徴を考慮した水防対策を提案することである。3種類のモデル豪雨を用いることで、10分間雨量の多いケースや継続時間が長いケース等、雨の降り方の違いによる浸水特性を把握する。また、シミュレーション結果に基づき、短時間豪雨による内水氾濫に対して地下街管理者が水防・避難計画を策定する上で、考慮すべき点について考察した。

## 2. 対象流域と解析方法

### (1) 対象流域

対象流域は大阪市北区、福島区および此花区の一部を含む、北は淀川、南は大川・堂島川に挟まれた1024haの内水地域である。図-1(a)に示すとおり、本地域の標高は低く、雨水は4か所の雨水ポンプにより排除される。

本エリアは大阪の中心部であり、図-1(a)の赤丸周辺には、大阪駅、梅田駅といった主要ターミナル駅、地下には大規模地下街、地下駅が位置している。地下街への公的な出入口数（接続ビルからの出入口除く）は131カ所、地下街と地下駅改札口は同レベルのフロアーにあり、プラットフォームは、さらに深いレベルに位置している。

### (2) シミュレーションモデル

本研究では、内水氾濫解析にはInfoWorks CSを、地下街の浸水解析には、独自に開発したプログラムを用いた。

内水氾濫解析は、下水道ネットワークを1次元モデル、地表面の氾濫を2次元モデルとした1D-2Dモデルである。

本モデルにより、下水道管きょからマンホールを介して、溢水、再流入する現象を表現し、また、地下空間への出入口の幅とマウンドアップ高を、現地にて調査し、出入口を堰によりモデル化した。なお、本研究では、内水氾濫水は建築物（住区）内には流入せず、道路面のみを流れるとした。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<sup>8)11)</sup>。主なモデルパラメータは、①流出モデル（固定係数法）の流出係数0.85（中心市街地）、0.65（周辺住宅地）、初期損失係数0.28mm、②氾濫解析の粗度係数0.043とした。

地下街の浸水解析は、浅水方程式を基礎式とした2次元解析（構造格子）モデルである<sup>9)10)</sup>。メッシュサイズは2mの正方格子である。地下街への氾濫水の流入量、流入開始時刻は、内水氾濫解析結果を用いた。モデル化において、大規模地下街の通路部および地下駅出入口は考慮し、店舗や接続ビルは対象外とした。また、地下街には数カ所、止水板を設置できる箇所があるが、本検討では無視した。地下駅へ流入した水は、計算域外として扱い、地下駅内への止水板の設置による地下街への再流入は考慮していない。また、地下街浸水解析のモデルパラメータとして、粗度係数は0.020とし、計算差分時間は0.005秒とした。

### (3) 対象降雨

短時間の大きい降雨強度の降雨による内水氾濫水の地下への流入特性、地下街浸水特性を明らかにするため、図-2に示す3種類のモデル豪雨を設定した。総降雨量はいずれも180mmであるが、降雨継続時間と10分間雨量が異なる。10分間雨量はそれぞれ10,20,30mmとした。各降雨の時間雨量（降雨強度）は、60,120,180mm/hrとなる。

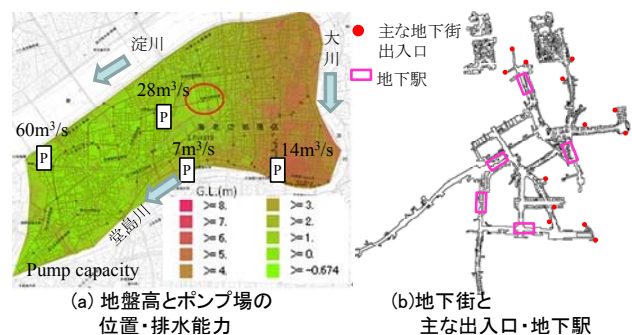


図-1 対象流域

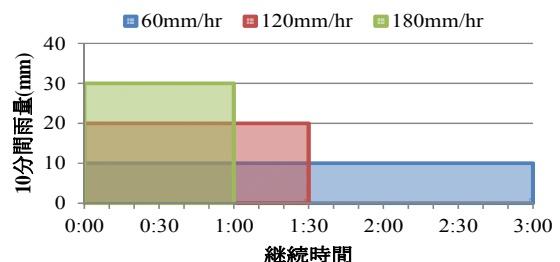


図-2 対象降雨（モデル豪雨）

### 3. 内水氾濫解析に基づく地下への流入特性

#### (1) 内水氾濫水の流入する箇所数と流入量

図-3に各モデル豪雨による内水氾濫水が地下街へ流入する箇所（出入口）数と総流入量を示す。いずれのモデル豪雨も総降雨量は180mmと同じであるが、降雨強度が大きいほど、流入箇所数、総流入量が多い。特に降雨強度が120、180mm/hrのケースは、60mm/hrのケースに比べ、流入箇所数、流入量とも2倍以上多い。

この理由は、地盤高、地下出入口の標高、出入口付近の構造が影響している。120、180mm/hrのケースの流入箇所数、流入量が多いのは、60mm/hrケースの地下への流入箇所のほとんどは北東側の地下街であるのに対し、北東側と同様に南側の地下街への流入量も、相対的に多いためである。北東側の流入量が多いのは、南部側に比べ、地盤高、地下出入口の標高が低く、かつ/あるいは、出入口付近の道路が建物や鉄道の高架橋、高架下店舗に挟まれたところがあり、氾濫水の水位上昇が起りやすく、地下への流入がしやすい状況にあるためである。

また、南側地下街周辺は北東部に比べ、地盤高がやや高いものの、下水道の雨水排除能力を大きく上回る120、180mm/hrのケースでは、内水氾濫が広範囲において発生するため、このような結果となっている。

#### (2) 降雨強度と内水氾濫水の流入箇所の関係

各モデル豪雨による流入量の上位5位までの流入箇所とその流入量、累積流入割合の関係を図-4に示す。なお流入地点は、後述の図-7に記している。いずれのモデル豪雨においても流入量の多い上位5位の出入口の箇所は同じである。その順位は一部逆転するところもあるが、その差は総流入量の1%程度であり大きなものではない。これより、流入量の上位5箇所に限って言えば、短時間豪雨に対する危険箇所（流入箇所）は、降雨強度にかかわらず、同じと判断できる。次に流入量割合を見ると降雨強度60mm/hrのケースでは上位5箇所です総流入量の70%程度を占めるが、他の2ケースでは約50%程度しかない。これは地下出入口の幅が影響している。出入口幅は2～4mであるが、流入量が多いNO.5-68の幅は4mである。他の地点より浸水深はやや低い、幅が広いため流入量が多い。なお、ここで示した上位5位の出入口はいずれも北東側の地下街につながる出入口である(図-1(b))。

#### (3) 流入箇所毎の流入開始・終了時刻

各モデル豪雨による流入量の上位5位までの流入箇所毎の流入開始・終了時刻を図-5に示す。なお、図中の0:00が降雨の開始時刻である。

流入開始時刻は、降雨強度が大きいほど早く、180mm/hrのケースでは、降雨開始後わずか30分後に地下街へ氾濫水が流入し始める。すなわち、本対象地域の

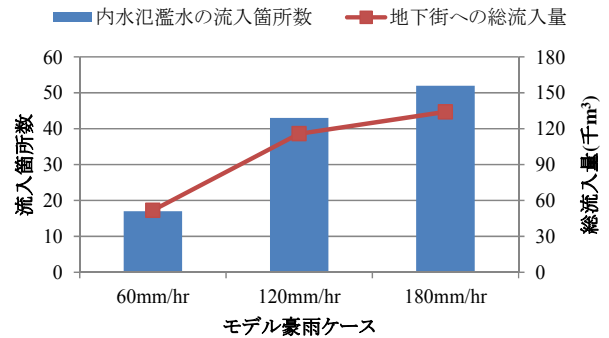


図-3 地下街への流入箇所数と総流入量

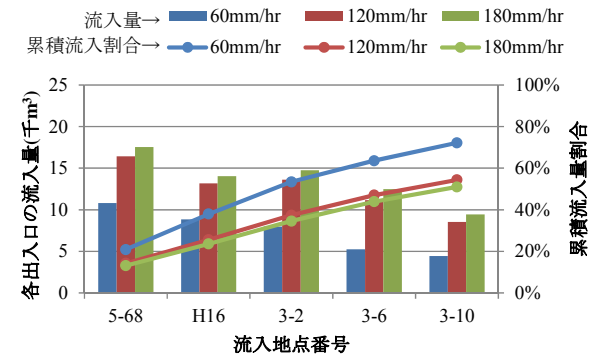
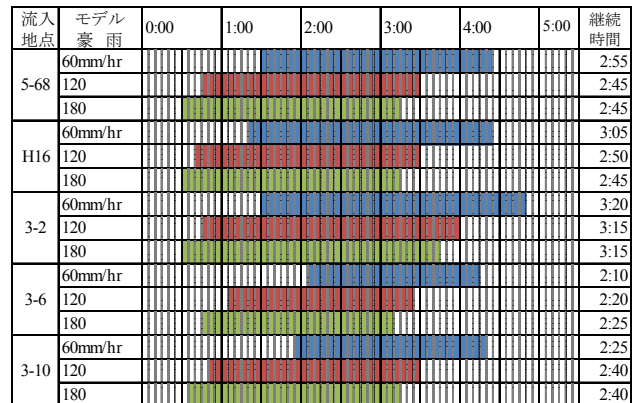


図-4 流入地点(流入量上位5位)毎の内水氾濫水の流入量と累積流入割合



(0:00が降雨開始時刻, ΔT=5分)

図-5 流入地点(流入量上位5位)毎の流入開始・終了時刻

場合、10分間雨量30mmの雨が30分継続すると、地下への浸水が開始することになる。一方、60mm/hrのケースにおける地下街への流入開始は、降雨開始後、早くても1時間20分後である。両ケースを比較すると、前者のケースの方が地下街への流入開始時刻が40分も早い。

次に、地下街への流入継続時間について、いずれの流入地点においても降雨強度の違いによる継続時間の差は5～15分程度であり、大きな差はない。これは、今回のモデル豪雨の設定（総降雨量は同じ180mmであるが、降雨強度および継続時間が異なる）に依存している。大きい降雨強度のケースでは、溢水量も多いが降雨継続時間が短く、逆に小さい降雨強度のケースでは、溢水量は相対的に少ないが、降雨継続時間が長い。このため、下水道の雨水ポンプを用いた排除方式の本排水区では、地下街への流入継続時間に大きな差が生じなかった。

#### (4) 流入箇所毎のピーク流入量に達する時間

流入箇所の違いによるピーク流入量に達する時間を比較するために、一例として降雨強度120mm/hrのケースにおける各流入箇所の地下街への流入水量を図-6(a)に示す。また、降雨強度の違いによるピーク流入量に達する時間を比較するために、一例として流入箇所5-68地点の結果を図-6(b)に示す。

図-6(a)より、流入開始時刻は、箇所により5～25分程度のズレは見られるが、どの出入口もピーク流入量に達する時刻はほぼ同時である。これは他の降雨強度ケースにおいても同様であった。

次に、図-6(b)より、各降雨強度によりピーク流入量に達する時刻が異なる。流入開始時刻と同様に、降雨強度が大きい場合、短時間で流入量がピークに達する。ピーク流入量に達する時間は、60,120,180mm/hrの各ケースで、降雨開始後、3時間10分、1時間45分、1時間25分である。また、降雨終了後からは、10分、15分、25分である。これは降雨強度が大きい場合は、降雨終了後も、しばらくは地下街への流入水量が増加することを意味している。

#### 4. 内水氾濫水による地下街の浸水特性

3章で求めた各モデル豪雨において生じた内水氾濫水の地下街への流入条件をインプットデータとし、地下街の浸水解析を行った。モデル豪雨毎の浸水特性を比較するため、一例として、地下街への流入開始30分後（最も早い流入があった時刻から30分後）ならびに、ほぼ定常状態となる降雨開始8時間後の浸水深の結果を図-7に示す。

##### (1) 流入開始時の浸水特性

流入開始30分後について、図-6(b)に示したように各降雨による単位時間当たりの流入量が異なるため、大きい降雨強度のケースほど浸水面積は広く、浸水深は深い。180mm/hrのケースでは、エリアA～Cのエリアにおいて、既に浸水深が70～80cmに達しており、避難が困難な状態になっている。また、南側（出入口10-21周辺）の地下街について、60mm/hrのケースでは、まだ、浸水が始まっていないが、他の2ケースでは、既に浸水が始まっており、かつ、流入した氾濫水の広がりも早い。

##### (2) 降雨終了後の定常状態時の浸水特性

次に降雨開始8時間後の結果より、特にエリアA、エリアBの浸水深が深い。これは両エリアが本地下街の中でも低いところに位置しており、かつ袋小路となっているため、出入口5-68、H16や同7-66、M1、M14より流入してきた内水氾濫水がたまりやすい構造となっている。

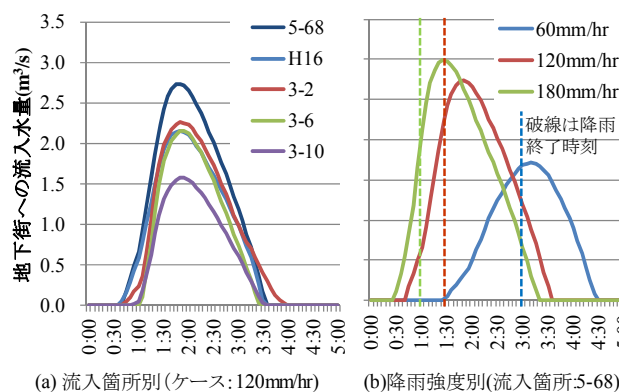


図-6 地下街への流入水量

一方、エリアCは、内水氾濫水の流入量が多いエリア（出入口3-2,3-6,3-10が存在）ではあるが、8時間後の浸水深は浅い。これは、本エリアが地下駅と接続しており、流入水が滞留することなく、地下駅構内に流入しているためである。

#### (3) 地下街の構造的脆弱性

地下街の浸水解析結果より、本対象地域では、南部に比べ、著しく北東部における地下浸水量が多く、また、構造的にも北東部のエリアA、B周辺では流入水が滞留するため、北東部が脆弱である。これは内水氾濫解析による地下街への流入特性と、地下街の浸水解析による浸水特性を照らし合わせることで、得られる結果である。

エリアBとエリアCを比較した場合、エリアCに接続している出入口からの方が内水氾濫水の流入量が多いため、一時的に浸水深が高くなる。しかし、エリアCは地下駅と接続しているため、内水氾濫による流入水が地下駅側に流れる。そのため、エリアCでは、人命に多大な影響を与えるほどの浸水深とはならないが、一方で、地下駅利用者のリスクが高まる。

#### 5. 内水氾濫・地下街浸水特性を考慮した地下街

##### における短時間集中豪雨に対する浸水対策

##### (1) 現状

対象の地下街は複数の（会社）地下街管理者により管理されている。いずれの地下街管理者も避難確保計画を策定しており、外水、内水、津波災害に対する対応を規定している<sup>12)</sup>。内水氾濫に対しての基本方針は「それぞれ土嚢、止水板等の設置（Defense）と来街者、店舗従業員等の地上・接続ビルへの避難(Evacuation)」である。

その警戒レベルは「注意」、「警戒」、「非常」の3段階である。「注意」は、大阪管区気象台から大阪市に大雨・洪水・暴風警報のいずれかが発表された場合、「警戒」は、水害の発生の恐れがある場合、「非常」は、



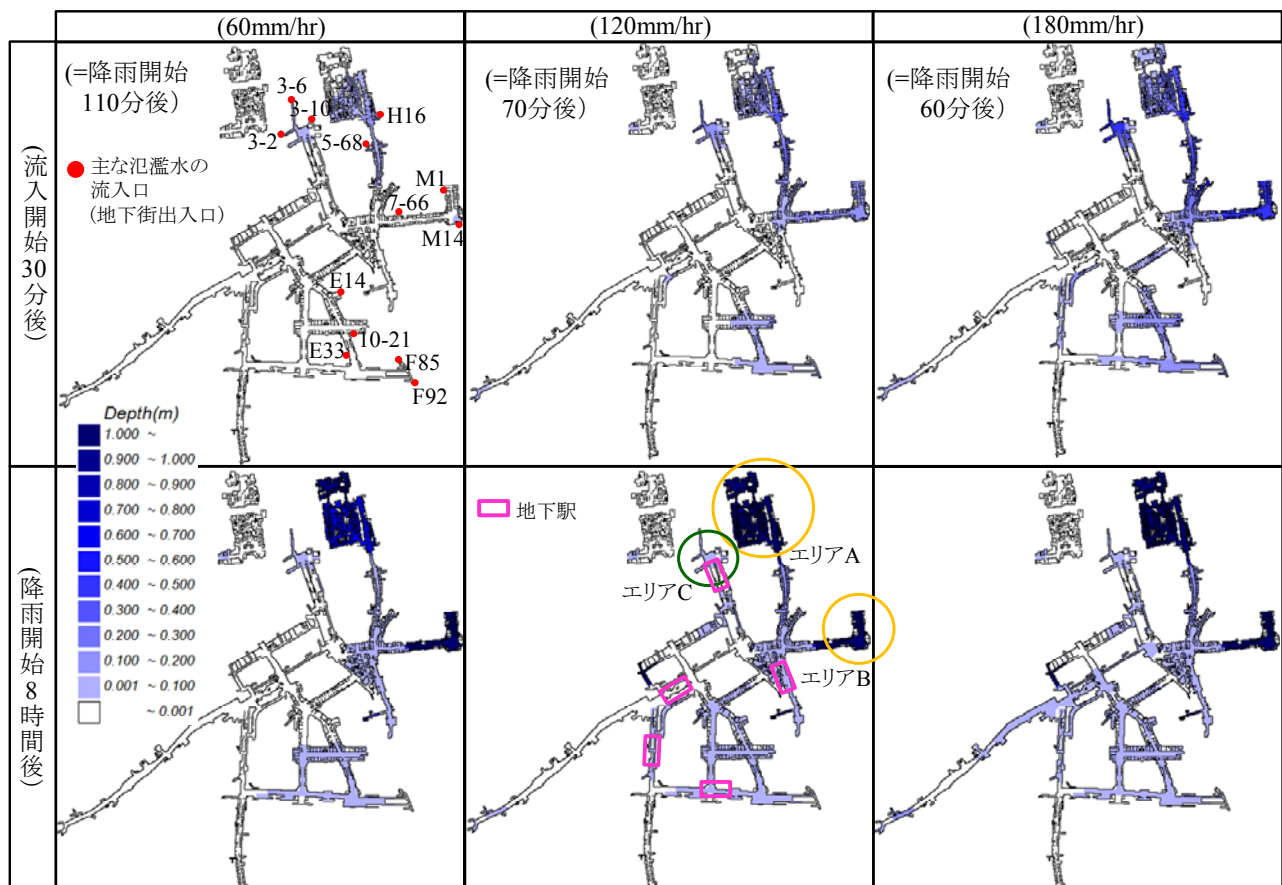


図-7 モデル豪雨別の地下街の浸水状況(上:流入開始30分後, 下:降雨開始8時間後の浸水深)

全市にわたり浸水被害等で甚大な被害が発生する場合で関係機関に応援要請が必要な場合とされている。したがって、管理者は「警戒」体制をとる判断基準と、初期行動を明確にしておかなければならない。

## (2) 対策方法に関する考察

### 1) 初期行動の判断基準と意思決定の支援技術

短時間集中豪雨（ゲリラ豪雨）の予測に関する研究<sup>13)</sup>は、進められているが、現時点において、時間、場所、降雨量を特定することは容易ではない。また、予測に加え、現地において雨量や下水道の水位などを観測した値も水防・避難誘導活動開始のための一つの重要な判断指標となり得る。

この現地観測手法（雨量）について、筆者らはリアルタイムで雨量を観測する仕組みと、雨量の微分値を降雨強度(時間雨量)に換算し、浸水が発生するレベルの降雨かどうかを判断するソフトウェアを開発し、現在、試験運用中である。浸水が発生するレベルの豪雨かどうかの判定は、本研究で行った事前のシミュレーションにより、可能であり、また、水防活動としての止水板設置場所についても特定可能である。

### 2) 水防・避難誘導計画策定時に留意すべき事項

次に、本研究より得られた知見をもとに地下街管理者

が、内水災害に対して水防・避難誘導計画を策定する上で留意すべき点について考察する。

①事前解析により内水氾濫水の流入地点は推定可能であり、具体的な浸水対策に反映させるべきである。

対象とした地下街では、降雨強度に関わらず雨水が流入しやすい危険な出入口は同じであった。そのため、危険を察知した段階で止水板の設置を行うことが重要である。

また、今回の異なる降雨規模のケースによる解析を通じて、降雨規模毎の浸水が開始するまでのリードタイムも把握でき（今回のケースの例：10分雨量30mmで約30分、同20mmで40分、同30mmで90分）、初期活動計画に活かすべきである。

②内水災害による地下街への浸水が生じる場合、他地点で同時に発生することを認識した上で計画策定をすべきである。

内水氾濫解析結果より、降雨規模が異なるとその流入開始時刻は違うが、いずれの降雨規模でも出入口より内水氾濫水が流入する時刻は5～15分程度の差しかなく、ほぼ同時である。このことから、予兆現象、現地観測、降雨予測データを活用し、早期に水防活動が実施できる計画と仕組みを導入しておくことが重要である。

③地下街の地点により、対処行動の内容、優先順位は異なることを理解した上で計画を策定すべきである。

地下街浸水解析を通じて、袋小路のようなエリアでは、流入水を排除できず、早期に水没する恐れがある。一方で、地下駅が隣接するエリアでは、浸水深は深くならないものの、駅利用者のリスクが高くなる。

袋小路のエリアでは、地上部の止水板設置の遅れは致命的な被害を招くため、事前に止水板の設置位置とその設置順序を明確にしておくことが重要である。

また、地下駅への浸水に対しては、地下街管理者による地上部の水防活動のみではなく、駅管理者による改札付近あるいは、プラットフォームと連絡する階段部分での止水を行った上で、両者が連携した避難誘導を実施すべきである。

④過去の経験から水防・避難誘導活動に支障を与える要因は考慮した上で計画を策定すべきである。

これまで対象エリア付近の内水氾濫発生時には、浸水に至らないまでも、トイレの水が逆流したり、地下水排水用のポンプの排水不良が生じたり等の予兆的な事象が生じている。この対応に管理者側の人員が割れすぎると、止水板設置の水防活動や避難誘導の活動の人員不足が生じ、行動の遅れを招く恐れがある。そのため、このような予兆的現象は生じることを認識した上で行動計画を立案しておくべきである。

## 6. 結論

本研究では、大規模地下街を有する大阪市の中心部を対象に、3種類の短時間豪雨を用いて地上の内水氾濫解析と、地下街の浸水解析を行い、雨の降り方の違いによる浸水特性を明らかにし、今後の地下街における水防・避難誘導計画に寄与することを目的とした。

内水氾濫解析を通じて、内水氾濫水の流入地点、流入量、流入開始時刻の推定を行い、豪雨規模毎の地下街への内水氾濫水の流入特性を明らかにした。また、地下街の浸水解析に基づき、地下街に流入した氾濫水の広がり方、浸水深を求め、浸水特性を明らかにし、地下街における脆弱箇所とその構造に応じた対応策が必要であることを指摘した。さらに、これらの浸水特性を考慮した地下街における短時間集中豪雨に対する浸水対策について考察し、地下街管理者が水防・避難誘導計画策定時に留意すべき事項を明示した。

今後は、本検討結果の知見を生かした地下街の内水災害に対する脆弱性評価手法の提案と、現在、試験運用中である地下街管理者向けの水防・避難誘導活動の意思決定を支援するシステムの開発、有用性について検討を行って行く予定である。

**謝辞：**本研究は日本学術振興会の科研費（24710053、研究代表者：尾崎平）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) 大阪管区气象台：平成25年8月25日の大雨について（大阪府の気象速報），2013
- 2) 関根正人，大野龍馬：集中豪雨により発生する地下空間の浸水と利用者の避難誘導に関する数値解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 69, No.1, pp.30-43, 2013
- 3) 関根正人，竹順哉：大規模地下空間を抱える東京都心部を対象とした内水氾濫ならびに地下浸水の数値解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69, No.4, I\_1567-I\_1572, 2013
- 4) 関根正人，櫻井康博，佐藤隆光，田中創，古市信道，佐藤裕隆，和田祐樹：リアルタイム予報を目指した豪雨ならびに浸水・氾濫の数値予測，土木学会論文集B1（水工学）Vol.68, No.4, I\_991-996, 2012
- 5) 木村誠，城戸由能，中北英一：都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法の簡素化，土木学会論文集B1（水工学）Vol.68, No.4, I\_985-990, 2012
- 6) 武田誠，高橋俊彦，長尾佳幸，平山康典，松尾直規：都市域の内水氾濫モデルの検討と浸水時対策への応用について，土木学会論文集B1（水工学）Vol.68, No.4, I\_1015-1020, 2012
- 7) 秋山壽一郎，重枝未玲，野村心平：数値シミュレーションに基づく短時間豪雨に対する遠賀川流域の洪水と飯塚市街地の浸水特性の検討，Vol.69, No.4, I\_1579-1584, 2013
- 8) 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，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.68, NO.4, I\_1009-I\_1014, 2012.
- 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, pp.I\_1003-I\_1008, 2012
- 10) 井上知美，川中龍児，石垣泰輔，尾崎平，戸田圭一：内水氾濫におけ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，Vol.56, pp.973-978, 2011
- 11) 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
- 12) 一例として，大阪地下街株式会社：梅田地下空間避難確保計画，2012版。
- 13) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，土木学会論文集，B1（水工学），第57巻，pp.325-330, 2013.

(2013. 9. 30受付)