草野 魁叶¹·太田 和樹²·石垣 泰輔³·尾崎 平⁴

¹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) E-mail: k185752@kansai-u.ac.jp

²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) ³正会員 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) ⁴正会員 関西大学准教授 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)

近年,都市部において局所的短時間豪雨の発生頻度が高まっている.また,都市化の進展により不浸透 域が増加しているため、雨水排除が下水道に依存してしまっている.さらに、都市部では、限られたスペ ースを有効利用するために、地下街や地下鉄などの地下空間の利用が進展していったため、地下空間への 氾濫水流入の危険性が高まっている.本研究では、複数の地下鉄路線や地下街を有することで複雑な大規 模地下空間を構成している都市域を対象として、InfoWorks ICM のモデルを構築し、内水氾濫解析及び地 下出入口における氾濫水の浸水過程や流入量の予測に関する検討を行った.解析結果から、地下空間への 流入は、地下駅出入口からの流入量が最も大きくなり、地下街は地下鉄や地下駐車場と比べて氾濫水の流 入は小さくなる結果となった.

Key Words: pluvial flood, short-time rainfall, mega-underground space, flood propagation

1. 緒論

近年,都市部において局所的短時間豪雨の発生頻度が 高まっている.気象庁のデータによると,1時間 50mm 以上の降雨発生回数が統計開始当初の1976~1985年の10 年間に対して,2008~2017年の10年間では約14倍に増 加していることが分かっている.また,1時間 80mm 以 上の降雨発生回数も約1.6倍に増加していることが分か っている.また,都市化の進展により不浸透域が増加し ているため,雨水排除が下水道に依存してしまっている. さらに,都市部では,限られたスペースを有効利用する ために,地下街や地下鉄などの地下空間の利用が進展し ていった.これらのことから,短時間で局所的な大雨が 降った場合には,内水氾濫が生じるだけでなく,地下空 間への氾濫水流入の危険性が高まっている.

そのため、大規模地下空間の浸水に関して、現在まで 様々な形で研究がなされている.石垣ら¹は、大阪市北 区の梅田地下街を有する海老江処理区を対象に、内水氾 濫時の地下空間の脆弱性を検討しており、結果から、地 上の氾濫状態が地下浸水過程に影響することを明らかに している.浅野ら²は、大阪市の海老江処理区を対象地 域として、2011年8月27日に対象地域で観測された1時 間降水量 77.5mm の局所的な集中豪雨の降雨データを使 用し、下水道ネットワークと地上の氾濫解析を同時に行 える InfoWorks CS を用いた内水氾濫解析精度の検証を行 った、その結果、現地調査による実績浸水深と本モデル による内水氾濫解析の結果は、全ての箇所で概ね一致し、 解析精度は高くなったと述べている. 寺田ら ³は, 大阪 市の海老江処理区を対象区域とし、平成20年8月の「岡 崎豪雨」の降雨データを用いて、内水氾濫時に地下鉄へ 流入した氾濫水が地下鉄軌道を伝播する挙動の予測を行 っている.対象地域近辺を運行する8路線を対象路線と し、地下鉄各駅の標高を求め、InfoWorks CS を用いるこ とで地下鉄軌道のモデルを構築している. 結果から, 全 ての路線において海老江処理区内で発生した氾濫水が地 下鉄軌道を伝播することが明らかとなり、海老江処理区 外の地下鉄駅へ氾濫水が伝播することも確認された.

以上の研究では、大規模地下空間の梅田地下街を有す る海老江処理区において、実績豪雨やモデル豪雨を用い て地下空間の浸水に対する内水氾濫解析が行われている ものの、他処理区を対象とした研究は行っていない.し かし、氾濫水が地下鉄軌道を伝播して他処理区へ流出す ることが明らかになっているため、他処理区で発生した 氾濫水が海老江処理区内の地下空間へ流入する可能性も あり、複数地下鉄路線における広範囲での浸水や地下空 間での人的被害が発生することも考えられる.そこで本 研究では、海老江処理区内と地下鉄路線により接続して いる大阪市中央部の津守処理区を対象にし、InfoWorks ICMを用いて道路、雨水排水網及び地下鉄出入口を含む モデルを構築した.さらに、対象区域内にある地下街や 地下駐車場についても出入口のモデル化を行うことで、 対象区域内の大規模地下空間における内水氾濫時の氾濫 水の浸水過程や流入量の予測に関する検討を行った.

2. 検討概要

(1) 対象地域の概要

本研究では、大阪市中央部の津守処理区を対象とする. 図-1に対象区域の下水道管網と抽水所及び処理場の位置 を示す.対象排水区の排水面積は19.62km²で,処理区内 には5つの抽水所及び処理場が存在する.また、処理区 の東側は、「上町台地」があることで地盤高が10m以上 と高くなっており, 西側の木津川に向かって低くなって いる. さらに、津守処理区では、地下空間として地下街 が点在し、地下鉄と接続しており、地下駐車場やアンダ ーパスも複数ある. 図-2は対象区域の地下鉄道路線を示 している.本研究では、地下空間にある11路線31駅を 対象としている.この大規模地下空間は、東西方向 6km, 南北方向3kmの範囲において格子状に広がっており、JR、 京阪,阪神,近鉄,Osaka Metro といった鉄道が相互に接 続する鉄道網を形成しているため、人々の移動手段とし て日々利用されている.また、図-3に地下駅以外の大規 模地下空間の位置を示す.本研究では、地下街として、 クリスタ長堀・なんばウォーク・NAMBA なんなんの3 箇所,地下駐車場 10 箇所,アンダーパス 5 箇所を対象 としている.

(2) 解析モデルの概要

a) 解析モデル

本研究では、都市下水道と河川流域の両方の統合解析 が可能な InfoWorks ICM を応用して氾濫解析を行った. 本モデルは、有効降雨が地表面を流れ、マンホールへの 流入量を算出する地表面モデルと、地表面モデルにより 算出された各マンホールに流入するハイドログラフを用 い、Saint Venant 方程式を適用した. 管渠内の水理解析を 行う下水道管路網モデル、下水道から地表面へ溢れた水 の流れを、浅水方程式を用いて解析する地上氾濫解析モ デルから構成されている. また、地下空間への流入量を 算定するため、地下空間への出入口の幅とマウンドアッ



図-1 対象地域の下水道管網



図-2 津守処理区内の地下鉄道路線図 (注)図中の記号 A~El は,**表-1**に対応している.



図-3 地下駅を除く津守処理区内の大規模地下空間 (注)図中の記号は,表-1に対応している.

プ高を現地で調査し、出入ロモデル(堰モデル)としてモ デル化した.出入ロモデルでは、道路部と階段部の境界 に、仮想の堰を設定し、道路における浸水深が堰の頂部 高を越えた場合に地下空間へ流入するとした(図-4).

b) 解析条件

InfoWorks ICM によるモデル化は、中之島地区を除い た津守処理区の雨水排水区を対象とした.処理場や抽水 所,雨水吐きは考慮し,管路については**6150mm**以上を モデル化した.対象区域では、長堀抽水所、桜川抽水所、 東四条抽水所を経由し、津守下水処理場から木津川へ排 水している. 地上氾濫モデルにおいて、本研究では氾濫 水は主に道路を流れるものとしており、建物等の住区内 へ流れこむ水に関しては考慮していない. 主なモデルパ ラメータは、初期損失係数 0.000071m、地表面流出量モ デル(固定係数法)の流出係数 0.85, 氾濫解析の粗度係数 0.043 とした. 出入ロモデルでは, 流入した水について は計算域外とし、吐き口から排水することで無視した. また、地下鉄や地下街の出入口には止水板を設置できる 箇所があるが、本研究では無視した.また、中央線の九 条駅, 阿波座駅間と関西本線の JR 難波駅, 今宮駅間に 存在している、地上と地下を結ぶトンネル坑口から地下 空間への水の流入は考慮しておらず、本研究でモデル化 は行っていない.

(3) 降雨条件

本研究では、2008 年 8 月 26 日~8 月 30 日にかけて、 愛知県岡崎市美合町で発生した「平成20年8月末豪雨」 (以下, 「岡崎豪雨」という)を対象として解析を行った. 図-5 には「岡崎豪雨」の 10 分単位でのハイエトグラフ を示している.総降雨量は242.0mmで,大阪市の下水道 排水能力60mm/hrを超過する総降雨量は98.5mmである. 降雨データは、気象庁の観測データを用いて、2008 年 8 月 29 日の 10 分間降雨観測データを1時間降雨強度に変 換して利用している.8月28日、30 日にも降雨が発生し ているが、無降雨時間が6時間以上空いていることから、 本研究では総降雨量から除外した.

3. 解析結果

(1) 地上の浸水結果

InfoWorksICMを用いて構築した解析モデルに、「岡崎 豪雨」を外力として与えた場合の内水氾濫解析における 地上の浸水結果を以下に示す.本研究における対象区域 の集水域面積は約 1,917ha で、計算対象とした道路面の 全体面積は約 553ha であった.また、降雨総量は約 464 万 m³であった.降雨損失考慮後、下水道管路網へは約 392 万 m³が流入し、マンホールからの溢水量は約 235 万 m³であった.最大浸水面積は約 443ha であり、計算対象 道路の約 80%の範囲が浸水する結果となった.図-6、図



凶-5 両崎家的のハイエトクラフ

-7には津守処理区の地上の氾濫計算結果を示している. 浸水深については 0.01m から 3m 以上で色分けをし、図 中にある指標で示した. 図中から,計算開始後1時間で は対象区域南部や中南部,北東部で0.01m~0.25mの浸水 が見られる. これらの地域は周辺より局所的に地盤高が 低く窪地となっている箇所が多く, 降雨開始後の早い 時間帯で浸水が発生したと考えられる. 降雨量のピーク を迎えた計算開始後2時間では津守処理区全域において 氾濫水が拡がりを見せており,対象区域北部や北西部, 西部,中南部及び南西部では浸水深が 1m 以上となって いる.計算開始から3時間後では、対象区域北西部にお いてさらに氾濫水が拡がりを見せており、浸水深が 1m 以上となる範囲も増加している.また、浸水深のピーク も計算開始から約3時間となっており、降雨のピークと は約 1.5 時間の差が生まれる結果となった.計算開始後 4時間では、津守処理区全域において浸水の拡がりは収 まっており、浸水面積も減少しているが、対象区域北西 部では浸水深が 0.75m 以上と大きいままである.また, 対象区域西部や中南部、南部においても浸水深は依然と して 0.5m 以上となっており、氾濫が収まっている様子 は見られない.計算開始後6時間では、対象区域南部や 北西部でわずかに浸水が残っているものの、氾濫水はほ ぼ終息している.



図-6 地上の氾濫解析(解析開始後1時間~3時間)

(2) 大規模地下空間への流入特性

a) 地下鉄駅への流入特性

本研究でモデル化を行った地下駅は 31 駅, 出入口は 261 箇所である. 各地下空間の氾濫水の流入特性を表-1 に示す. 解析の結果, 氾濫水が流入する駅は 24 駅であ る. また,84 箇所の出入口で氾濫水が流入し、地下鉄 への総流入量は 280,123m³である. 各駅の総流入量は, 阿波座駅が 90,636m³と最も大きく,地下鉄への総流入量 の約 32%を占めている. その他は、本町駅 31,991m³、恵 美須町駅25,560m3, 大国町駅16,629m3, 花園町駅16,037m3, 天下茶屋駅 14,031m3, 西長堀駅 11,467m3と続いており, 総流入量は阿波座駅を含めた上位6駅で全体の74%を占 めている. また,総流入量が 1,000m³以上となっていた 駅のピーク時間は全て計算開始後2時間以降となってお り、降雨量のピークと駅への流入量のピークには 30 分 以上の時間差が生じている結果が得られたが、各駅のピ ーク時間には最大で 49 分の差がある.総流入量が 10.000m³以上となった 6駅の流入量を図-8 に示している が、各駅で流入量のピーク時間が異なっている.また、 表-1及び図-8から、阿波座駅、西長堀駅以外の4駅は、 降雨のピークから約 30 分後には流入量がピークを迎え ている. これらの駅は、前述した地上の浸水解析におい て、地上部が窪地となっていることで降雨開始後の早い 時間帯に浸水が発生していた箇所に位置している. 阿波



図-7 地上の氾濫解析(解析開始後4時間~12時間)

座駅,西長堀駅は,降雨ピーク後,約13時間後に流入 量のピークが発生しており,流入量ピークが上記の4駅 から約50分遅れている.この結果から,降雨量がピー クを迎える頃では,早い時間帯から浸水が発生する局所 的な窪地において浸水深が大きくなることで,本町駅や 恵美須町駅などで浸水が発生するが,その後,道路面の 水路化によって地盤高が0m地帯となっている阿波座駅, 西長堀駅周辺に氾濫水が流れ込むことで駅への流入 量のピーク時間に差が生じたと考えられる.さらに,図 -8から,阿波座駅以外の5駅は計算開始後4時間程度で 氾濫水の流入が収束しているが,阿波座駅は計算開始後 5時間頃まで継続しており,降雨が終了してから2時間 程度は流入に対して警戒する必要があると言える.

b) 地下街への流入特性

本研究でモデル化を行った地下街は3駅,出入口は71 箇所である.解析の結果,氾濫水は各地下街に流入して おり,地下街への総流入量は1,653m³である.また,地 下街は3箇所とも地下駅及び後述する地下駐車場に比べ て総流入量は小さい結果となる(表-1).一方で,地下鉄 の浸水結果から,なんばウォークとNAMBAなんなんが 同フロアで接続しているなんば駅と日本橋駅において浸 水が発生している.地下駅出入口から流入した水は,地 下鉄軌道ではなく地下街へ流入する可能性もあるため,

表-1 大規模地下空間への流入特性

大規模地下空間	流入 箇所数 ¹⁾	ピーク 時間 ²⁾	総流入量(m ³) ³
淀屋橋(A)	3(11)	2:02:00	5,106
本町(B)	15 (22)	2:01:00	31,991
心斎橋(C)	1(7)	1:40:00	541
なんば(D)	4(30)	2:21:00	4,730
大国町(E)	4(6)	2:01:00	16,629
動物園前(F)	5(8)	2:11:00	9,987
堺筋本町(H)	4(15)	1:40:00	960
日本橋(J)	2(7)	2:01:00	3,585
恵美須町(K)	7(7)	2:15:00	25,560
天下茶屋(L)	1(2)	2:05:00	14,031
阿波座(M)	9(10)	2:49:00	90,636
西長堀(N)	4(9)	2:49:00	11,467
桜川(O)	2(6)	2:50:00	3,596
谷町九丁目(P)	1 (9)	1:42:00	16
谷町四丁目(R)	1 (12)	1:40:00	50
四天王寺前 夕陽ヶ丘(T)	1 (5)	1:40:00	58
肥後橋(U)	3(11)	2:01:00	3,319
四ツ橋(V)	3(6)	2:13:00	3,960
花園町(W)	5(5)	2:10:00	16,037
岸里(X)	3(3)	2:05:00	2,679
西大橋(Y)	1(5)	2:05:00	10
京阪淀屋橋(Al)	1 (10)	1:41:00	38
京阪北浜(B1)	1 (9)	1:40:00	194
桜川(阪神)(D1)	3(4)	2:46:00	2,937
クリスタ長堀(a)	3(31)	2:06:00	212
なんば ウォーク (b)	2 (29)	1:45:00	1,004
NAMBA たんたん(c)	2(11)	1:43:00	437
谷町駐車場(①)	1(4)	1:40:00	9
土佐堀駐車場(2)	2(4)	2:03:00	11,589
安土町駐車場(③)	2(2)	1:41:00	7,930
本町駐車場(④)	1(1)	2:04:00	7
靭駐車場(⑤)	2(2)	2:46:00	49,601
東長堀駐車場(⑥)	2(2)	2:03:00	3,234
上汐駐車場(⑦)	1 (2)	1:40:00	329
1) ()内には各地下空間の出入口数を示している.			
2) 各箇所でピーク流量となった時間を示している.示し			
ている時間は計算経過時間と対応している.			
3) 谷地下空間への総流人量を示す.			
(注)以下の IU 箇所は、 流入か無かったため、 表記していな			
14供(U),			
(2), 示欧入侗裔(U), JK 新汉(El), 文堂社平物(①), 塭早 駐車場(⑧), OCAT駐車場(⑩)			

「岡崎豪雨」と同規模かそれ以上の降雨が発生した場合 に、なんば周辺の地下街では浸水する危険性が高いと考 えられる.クリスタ長堀は、接続している長堀橋駅では 流入が無く、心斎橋駅も流入量が小さいことから、なん ば周辺に比べて浸水の危険性は低いと言える.



図-8 地下駅への流入量

(注)表-1において地下駅への総流入量が10,000m³を越えていた6駅を示している.



c) その他の地下空間への流入特性

本研究では、大阪市が所管する地下駐車場とアンダ ーパスについてモデル化を行った.地下駐車場は 10 箇 所、アンダーパスは5箇所を対象とした.解析の結果、 7 箇所の地下駐車場に氾濫水が流入し(表-1)、地下駐車 場への総流入量は72,699m³である. 靭駐車場と土佐掘駐 車場は、地上部の浸水範囲が広く、長時間浸水している 対象区域北西部に位置しているため総流入量が大きくな ったと考えられる.

次に、アンダーパス(以下、「UP」という)における浸水解析の結果を示す.本解析結果から、5箇所のUPへの総流入量は22,356m³である. 図-9 は各UPの浸水深を示している.UPへの流入開始時間は地下鉄や地下街、地下駐車場よりも速くなっている.また、高橋ら⁴によると、地下空間において、車が水没した場合に成人男性の脱出限界水深は0.56mであると述べられているが、図-9から、全てのUPで浸水深が0.56mを越えている結果となり、UPでは浸水時の早期避難が重要になってくることが示唆される.

4. 結論

本研究では、大阪市の津守処理区を対象とし、下水道 排水施設を考慮した氾濫解析モデルを構築し、「岡崎豪 雨」を外力として与えた場合の内水氾濫解析及び大規模 地下空間への流入特性を把握し、水害に対する脆弱箇所 について検討した.

本研究で得られた結果を以下に示す.

- 津守処理区を対象として、内水氾濫現象を計算する解析モデルを新たに構築した。
- ② 「岡崎豪雨」を外力として与えて氾濫解析を行った結果,計算対象道路の約80%の範囲が浸水し,対象区域北西部及び西部では1時間以上浸水深が1m以上となる場所もあった。
- ③ 外力による総流入量の内,各地下空間への流入割 合は、地下鉄が 6.04%、地下街が 0.04%、地下駐車 場が 1.57%、アンダーパスが 0.48%であった.
- ④ 本解析結果から,約28万m³の氾濫水が地下鉄へ流入していた.また,地下鉄へ流入した水の約74% は浸水が発生した24駅の内の6駅から流入しており,阿波座駅では降雨が終了してから2時間程度は流入に対して警戒する必要がある.
- ⑤ 津守処理区内の3箇所の地下街は、地下鉄や地下駐 車場と比べて氾濫水の流入量は小さい.しかし、 これらの地下街は地下鉄ホームと同フロアにある ため、地下鉄の浸水も踏まえて大規模地下空間に おける流入後の氾濫水の挙動を把握することが重 要である.

- ⑥ 対象区域北西部に位置している靭駐車場と土佐掘 駐車場では、地上の浸水深が大きいことから総流 入量が大きくなるという結果が得られた。
- ⑦ 津守処理区内では、全てのアンダーパスが脱出限 界水深を越える結果となった.また、降雨開始か ら約 50 分で脱出限界水深を越える箇所もあるため、 止水を開始するタイミングが重要である.

謝辞:最後に本研究を遂行するにあたり、多数の方々に お力添えを頂きました.ここで感謝の意を表します.

参考文献

- 石垣泰助・戸田圭一・尾崎平・馬場康之・井上和美:内 水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難,京都大学 防災研究所年報,第54号B,pp.471-476,2011.
- 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.
- 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, I_1357-I_1362, 2016.
- 4) 高橋祐樹・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一:浸水した大 規模地下駐車場からの避難に関する検討,土木学会論文 集F2(地下空間研究), Vol.69, No.1, 1-10, 2013.

UNDERGROUND INUNDATION BY PLUVIAL FLOOD IN CENTRAL OSAKA

Kaito KUSANO, Kazuki OTA, Taisuke ISHIGAKI and Taira OZAKI

In recent years, the frequency of local short-time heavy rain in urban areas is increasing. Due to the progress of urbanization, rainwater drainage has become dependent on sewerage. In addition, in urban areas, the use of underground spaces such as underground malls and subways has progressed in order to effectively utilize the limited space. Therefore, the risk of underground inundation is increasing. In this paper, for the urban area constituting a complicated mega-underground space by having multiple subway lines and underground malls, a simulation model of InfoWorks ICM is built. The inflow process is measured at the entrance of the underground space. The results show that, the largest inflow into the underground space was through the subway station entrance. Beside, in the underground malls, the inflow of flood water was smaller than the subway and underground parking lot.