

# 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

## RAINWATER FLOODING AND ITS COUNTER MEASURES IN URBAN AREA OF MEGA-UNDERGROUND MALL

森兼政行<sup>1</sup>・石垣泰輔<sup>2</sup>・尾崎平<sup>3</sup>・戸田圭一<sup>4</sup>

Masayuki MORIKANE, Taisuke ISHIGAKI, Taira OZAKI and Keiichi TODA

<sup>1</sup>正会員 工修 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

<sup>2</sup>正会員 工博 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>3</sup>正会員 工修 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>4</sup>正会員 Ph.D. 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Frequency of rainfalls over the capacity of drainage system is increasing and underground inundations occurred in some Japanese cities in recent years. It is an urgent matter that managers of underground spaces plan for safe evacuation of users. In order to make the plan, they should know when and from which entrances the rainwater will flow into there. In this paper, inflow discharge was calculated by using 1D-2D urban drainage model in a drainage basin where one of mega-underground mall is located. And appropriate counter measures were investigated. From the results, it is found that peak discharge of inflow appears behind the rainfall peak and that the delay time is from 0.5 to 2.5 hours and depends on the rainfall conditions. It means that several rainfalls should be considered for planning of counter measures and evacuation.

**Key Words :** rainwater flooding, mega-underground mall, 1D-2D urban drainage model, counter measures

### 1. 序論

我が国は1960年代以降の経済発展に伴い、都市部に人口・資産・産業が集中するようになった。都市部では、限られた土地を有効利用するため、建築物の高層化が図られるとともに、地下空間の開発も進展した。地下街や地下鉄などの地下施設は、有効な土地利用という観点からだけではなく、空調設備の整った快適な空間、商業施設の並んだ便利な空間、車の往来の無い安全な空間として、毎日多くの人に利用されている。

一方、都市化の進展は、地表面の不浸透域の増加を招き、都市部の保水・遊水機能を低下させた。都市域の雨水排除は、下水道に依存しており、下水道排水能力（降雨確率：5年～10年に1度の雨：概ね50mm/hr）を超える豪雨時には、内水氾濫が生じることになり、地下空間への氾濫水の流入、被害の発生が懸念される。

また、近年、地球規模での気候変化に伴い、我が国では集中豪雨の発生回数が増加傾向にあり、時間雨量が

100mmを超える豪雨も珍しくなく、地下空間における浸水の危険性は高まっている。

そのため、近年、地下空間の水害に着目した研究がなされている。石垣らは、地下空間を含む市街地における洪水氾濫の挙動を定量化するための大規模な模型実験と数値解析に関する研究<sup>1)</sup>や実物大模型を用いた地下空間からの避難およびその評価指標の開発に関する研究<sup>2)4)</sup>等を行っている。また、戸田らは、地上浸水と地下浸水の一体化モデルの開発<sup>5)</sup>や地下空間規模の違いによる地下浸水時の危険性に関する研究<sup>6)</sup>等を行っている。関根らは、地下空間浸水のモデル開発に関する研究<sup>7)</sup>や避難シミュレーションの開発に関する研究<sup>8)</sup>を行っている。

以上のような地下空間の水害に関する研究はなされてきているが、これまでの研究では、単一の地下鉄の駅を対象としたものが多く、出入り口数が多くても十数個程度の規模を対象としたものが多かった。また、筆者らは大規模な地下空間のうち一部分を対象とした水防・避難誘導に関する検討<sup>9)</sup>は行ってきたが、大規模地下空間の出入り口全てを対象とした評価、検討は行っていないかつ

た。これは、大規模地下空間（地下街）においては地下街管理者が複数存在するなど複雑な管理区分になっており、隣接する地下街全体の把握が困難であること等に起因している。

本研究では、大規模地下空間を有する都市域を対象として、下水道施設を考慮した内水氾濫解析を実施し、複数の降雨を用いて氾濫特性を把握した。さらに、水害に対する都市部の脆弱性を評価し、大規模地下空間全体を対象とした氾濫水流入対策のあり方について考察した。

## 2. 検討概要

### (1) 検討対象地域の概要

本検討対象地域は、JR、私鉄各線、市営地下鉄の主要駅が立地した交通の要衝であり、地下には約1km四方に広がる日本最大級の地下空間を有する都市域である。

対象地域の雨水排水区（管路網）と地下空間の位置図を図-1に示す。対象排水区は、面積が約1,215ha、中継ポンプ場3箇所と終末処理場1箇所を有している。

また、大規模地下空間は図-1中のほぼ中央に位置し、出入り口数は129箇所である。

本地下空間は、駅間の移動通路として利用されており、特に、駅前道路の自動車交通量が集中していることから、人の交通量を分担する地下通路として地上部の通行を円滑にし、交通安全性を確保する役割も果たしている。

このように、本検討対象地域は、日本を代表する繁華街に発達した大規模地下空間を有しており、近年増加傾向にある局地的豪雨に対して、水害リスクの高いエリアと言える。

### (2) 解析モデルの概要

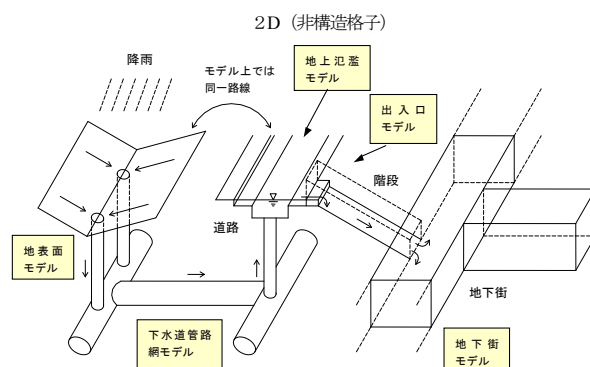
#### a) モデルの特徴

雨水流出解析モデルは、下水道施設および地表面の氾濫解析を同時に実施し、地下空間への流入特性も把握する必要があるため、下水道の流出解析で実績の多い「InfoWorks CS」（英国：Wallingford Software社製）を応用した。

本モデルは、降雨損失考慮後の有効降雨が地表面を流れ、ノード（マンホール）への流入量を算定する『地表面モデル』と、地表面流出モデルより算出された各ノードでのハイドログラフを用いて、運動量保存則からなる「完全サンブナン方程式」により管渠の流れを解析する『下水道管路網モデル』、また、下水道から地表面へ溢れた水の流れを、浅水方程式により解析する『地上氾濫モデル』から構成されている（図-2）。各モデルは連続的に計算がなされ、ノード地点において溢水および再流入を考慮できる。さらに、本研究では、地下空間への流入量を算定する必要があるため、『地下街出入口モデル（堰モデル）』を組み込んだ（図-3）。



図-1 対象地域の排水区(管路網)と大規模地下空間



（注）本解析では、地下街への流入までを解析対象としている。

図-2 解析モデルの概要

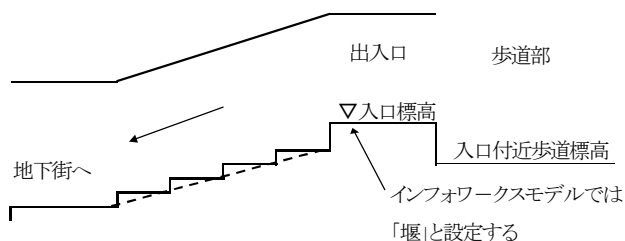
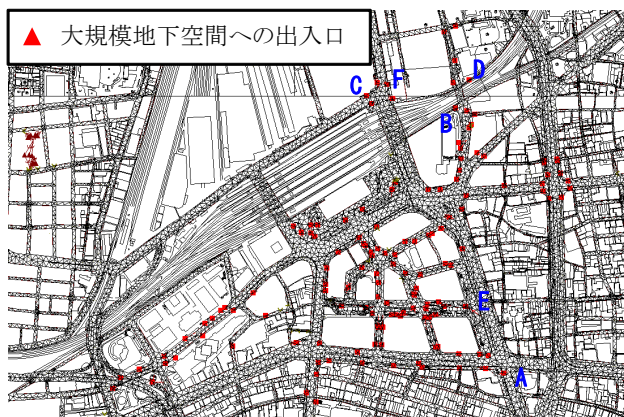


図-3 地下街出入口モデルの概要

なお、地下街出入口モデルは、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高を越えた場合に地下街へ流入するとした。

#### b) モデル化の範囲

InfoWorksCSによるモデル化は大規模地下空間が含まれる下水道の雨水排水区全体（ $a=1,215\text{ha}$ ）とし、処理場、ポンプ場、雨水吐きは考慮し、管渠については $\phi 200\text{mm}$ 以上をモデル化した。また、地上氾濫モデルについては、道路面のみを水が流れるとしてモデル化した（図-4）。そのため、住区への溢水は考慮していない。



(注) 図中の記号A～Fは、表-3及び図-7に対応している。

図-4 大規模地下空間エリア周辺の地上氾濫モデル図

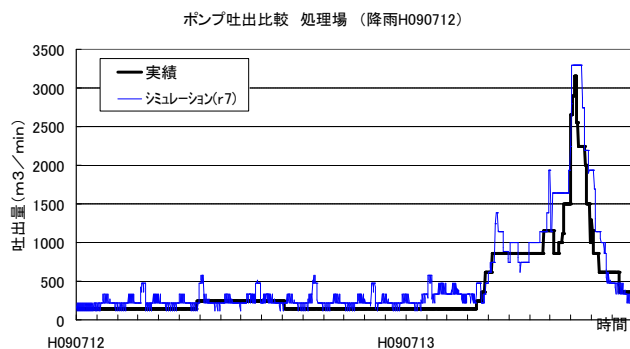


図-5 モデルのキャリブレーション結果の一例

### c) モデルの妥当性

本モデルは、処理場及びポンプ場における流入水量を対象としてキャリブレーションを実施しており、モデルの妥当性を確認している（図-5）。

### (3) 外力の設定

外力としては、近年、都市域において甚大な被害をもたらした「平成20年8月末豪雨（以下、「岡崎豪雨」という）」と「東海豪雨」を対象とし、異なった降雨条件による氾濫特性の違いを把握することとした。

岡崎豪雨と東海豪雨の概要は、表-1に示すとおりである。岡崎豪雨と東海豪雨を比較した場合、岡崎豪雨は146.5mm/hrという非常に強い降雨強度を有し、降雨波形は中央集中型に比較的近い降雨である（図-6参照：10分単位でのハイトグラフ）。

一方、東海豪雨（観測地点：名古屋）は、最大1時間降水量は、97.0mm/hrと岡崎豪雨よりもやや小さいものの、比較的強い雨が長時間継続し、日最大降雨量：428mm、総降雨量：567mmという降雨である。すなわち、岡崎豪雨は、最大1時間降水量が146.5mmと非常に強い降雨強度を伴う一方、東海豪雨に比べ総降雨量は小さいという特徴を有する。

表-1 外力の設定（概要）

	岡崎豪雨	東海豪雨
生起年月日	H20.8.29	H12.9.11～12
観測地点	岡崎市美合町	名古屋
最大1時間降水量	146.5 mm	97.0 mm
総降雨量	242.0 mm	567.0 mm

(注) 岡崎豪雨については、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ため、ここでは総降雨量から除外した。

表-2 大規模地下空間への流入特性

	岡崎豪雨	東海豪雨
流入箇所数 <sup>1)</sup>	52箇所	29箇所
ピーク流入量 <sup>2)</sup> (1箇所当)	4.31 m³/s	2.83 m³/s
総流入量 <sup>3)</sup>	332千 m³	276千 m³

- 1) 解析対象とした地下への出入り口数の合計は129箇所である。また、地下駐車場への出入り口も含んでいる。
- 2) 流入箇所のうち、最も大きなピーク流入量となる箇所（1箇所）の値を示す。
- 3) 地下街への総流入量を示す。

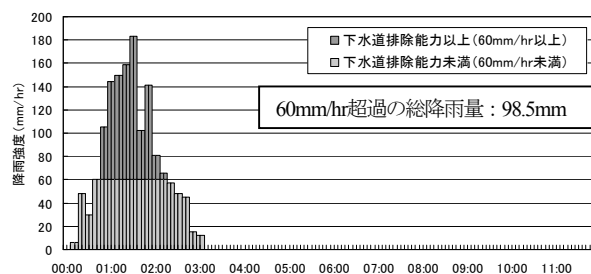


図-6(1) ハイトグラフ（岡崎豪雨）

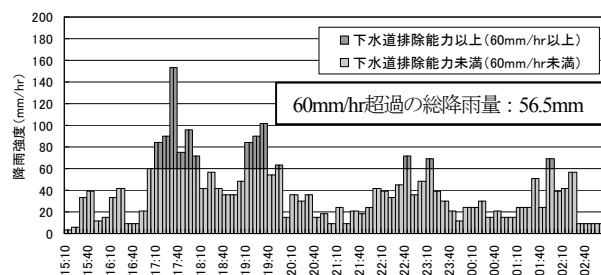


図-6(2) ハイトグラフ（東海豪雨：名古屋）

## 3. 内水氾濫の特性

### (1) 地下への流入箇所数と流入量

構築した解析モデルに、外力として「岡崎豪雨」と「東海豪雨」を与えた場合の大規模地下空間への流入特性を表-2に示す。解析の結果、解析対象とした大規模地下空間への出入り口数129箇所のうち岡崎豪雨の場合の流入箇所は52箇所、東海豪雨の場合の流入箇所は29箇所であった。また、大規模地下空間へのピーク流入量は、

岡崎豪雨で4.31 m<sup>3</sup>/s、東海豪雨で2.83m<sup>3</sup>/s、大規模地下空間への総流入量は、岡崎豪雨で約332千m<sup>3</sup>、東海豪雨で約276千m<sup>3</sup>となった。

すなわち、岡崎豪雨の方が、地下への流入箇所数、ピーク流入量、総流入量のいずれも大きいという結果を得た。

なお、岡崎豪雨で地下に流入が生じず、東海豪雨で地下に流入が生じる出入り口は存在しなかった。

この要因のひとつは、本排水区の雨水排水能力と外力の関係が上げられる。本排水区の下水道の排水能力は公称60mm/hrであり、両降雨について、下水道の排水能力以上の時間帯及び降雨量を比較すると図-6に示すとおりとなる。東海豪雨の場合は、下水道排除能力（60mm/hr）以上の降雨総量が56.5mmであるのに対し、岡崎豪雨では98.5mmと2倍近く上回っており、この差が地下への流入箇所数、ピーク流入量、総流入量に影響したと考えられる。

また、東海豪雨において甚大な被害を招いた要因のひとつに、放流先の河川水位の上昇に伴う、雨水ポンプの停止が上げられる。すなわち、ポンプの停止により内水排除ができなかったことが、浸水被害を拡大したと考えられている<sup>10)</sup>。しかし、今回の解析においては、放流先河川の水位を定量化しておらず、ポンプ能力までは雨水を放流できるという条件にて行っている。この外水位の境界条件の設定の有無は、内水氾濫に影響を与えると考えられるため、今後、検討が必要な課題のひとつである。

## (2) 流入順序等の比較

大規模地下空間のように出入り口数が、非常に多い場合、事前に流入する恐れのある出入り口を把握しておくことは、水害被害の軽減対策あるいは、利用者の避難計画等を立案する場合において有効である。そのため、本検討ケースにおいて流入が発生する出入り口地点の「①地下への流入開始時間」、「②ピーク流入量」、「③総流入量」を順位付けした結果を表-3に示す。

「①流入開始順序」については、シミュレーション上、時系列的に流入開始時刻が早いものから順位をつけたものであり、同順位となっている箇所は、流入開始時刻が同じであることを意味している。また、「②ピーク流入量」及び「③総流入量」は、シミュレーション上、各出入り口におけるピーク流入量（瞬間値）、総流入量が多い順に順位をつけたものである。

### a) 外力の違いによる比較

外力の違いによる「流入開始時間」、「ピーク流入量」、「総流入量」の順位に大きな違いは見られない。すなわち、外力によらず、雨水排水システムを考慮した解析を行うことにより、流入しやすい出入り口、大量に流入する出入り口をある程度、特定することが可能と思われる。

表-3 地下への流入順序等の整理

出入口 記号	順位					
	①流入開始順序		②ピーク流入量		③総流入量	
	岡崎豪雨	東海豪雨	岡崎豪雨	東海豪雨	岡崎豪雨	東海豪雨
A	1	1	20	16	19	16
B	2	2	2	1	1	1
C	2	2	5	2	2	2
D	2	2	6	6	6	3
E	2	2	1	4	5	6
F	6	8	8	7	7	5
G	6	8	14	13	14	14
H	6	6	16	15	16	15
I	6	7	33	25	30	23
J	6	8	38	27	34	27
K	11	8	9	9	9	9
L	11	8	12	11	11	11
M	11		43		43	
N	14	13	4	3	3	4
O	14	13	10	10	10	10
P	14	16	11	12	12	12
Q	14	13	22	19	21	18
R	14	16	19	20	18	19
S	14	27	31	29	32	29
T	14		30		29	
U	14		40		37	
V	14		44		44	
W	14		42		42	
X	24	16	7	8	8	8
Y	24	19	13	14	13	13
Z	24	22	24	22	24	22
AA	24		39		39	
AB	28	20	3	5	4	7
AC	28	23	21	24	23	24
AD	28	24	18	23	20	26
AE	28	29	32	28	33	28
AF	28		27		26	
AG	28		46		46	
AH	28		28		28	6
AI	35	21	15	17	15	17
AJ	35	26	23	21	22	21
AK	35		35		35	
AL	38	24	17	18	17	20
AM	38	27	25	26	25	25
AN	38		26		27	
AO	38		29		31	
AP	38		36		36	
AQ	38		41		41	
AR	38		48		48	
AS	38		52		52	
AT	46		37		38	
AU	46		45		45	
AV	46		49		49	
AW	46		50		50	
AX	46		51		51	
AY	51		34		40	
AZ	51		47		47	

- (注) 1. 上表は、地下駐車場への流入も含んでいる。  
2. 上表は、順位（順序）を示したものであり、①は流入開始の最も早い出入口が「1」、②③は流入量が最も大きい出入口を「1」としている。

今回の2つの外力の比較において、岡崎豪雨において流入があるが、東海豪雨において流入がない箇所（記号：M、T～W、AA、AF～AH、AK、AN～AZ）の特徴は、いずれの地点も岡崎豪雨のピーク流入量、総流入量の順位が下位の部類である。

これは、岡崎豪雨のような時間降雨量の大きい降雨の場合には一時的に流入が生じるが、その地点の地盤高および周辺の雨水排水能力の関係で、東海豪雨のケースでは地下への流入が無かったものと考えられる。すなわち、水防対策の選定箇所としては優先順位の低い出入口であると判断できる。



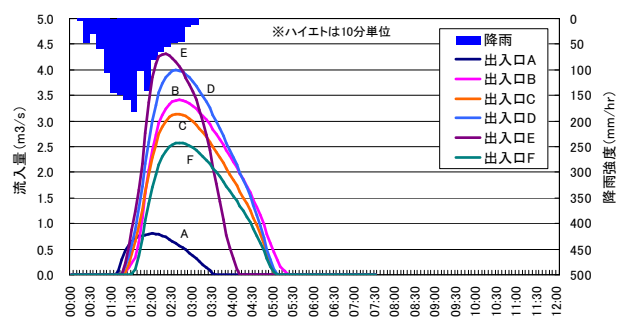


図-7(1) 地下流入ハイドロ（岡崎豪雨）

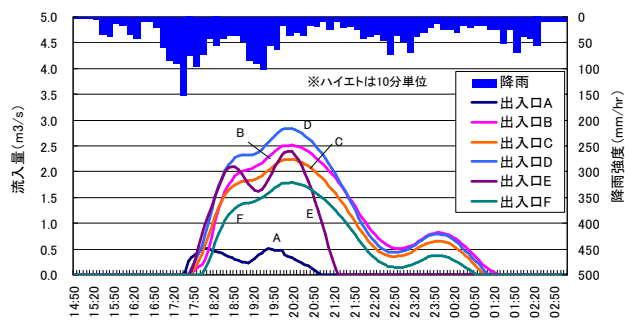


図-7(2) 地下流入ハイドロ（東海豪雨）

#### b) 評価項目間の比較

ピーク流入量の順位と総流入量の順位については、概ね一致している傾向にあるが、地下への流入開始時間の順位は、他の2つとは異なる傾向を示す出入口もある。これは、流入開始時刻が早い出入口への対応を図っているうちに、流入開始時刻が遅い出入口から後に大量に流入する可能性があることを示している。

すなわち、今回、検討したように雨水排水システムを考慮した解析に基づき、流入開始時間、ピーク流入量、総流入量を勘案した上で、対策を実施する出入口を事前に把握しておくことが重要である。

#### (3) 地下流入への時間的特徴

岡崎豪雨と東海豪雨の両ケースにおける地下空間への流入ハイドロ（例として出入口A～F）を図-7に示す。

いずれのケースも降雨量のピークと地下への流入量のピークとの間に時間差が生じている。降雨初期の雨水は、雨水ポンプにより放流されるが、ポンプ能力以上の雨水は排水できないため、徐々に管内水位が上昇し、その後、地上に溢水する。さらにポンプ能力以上の降雨が継続している場合、雨水は排水されずに、地上の水位が上昇し、地下出入口の地盤高より高くなると雨水が地下へ流入する。すなわち、この管内水位が上昇し始め、地下出入口の地盤高に達するまでに時間を要するため、降雨量のピークと流入量のピークには時間差が生じる。

岡崎豪雨の場合で、その時間差は約1時間。東海豪雨の場合は、降雨ピークが2つある「ふた山型」で、ひと山目の降雨強度の方が大きい、氾濫水のピークは、降

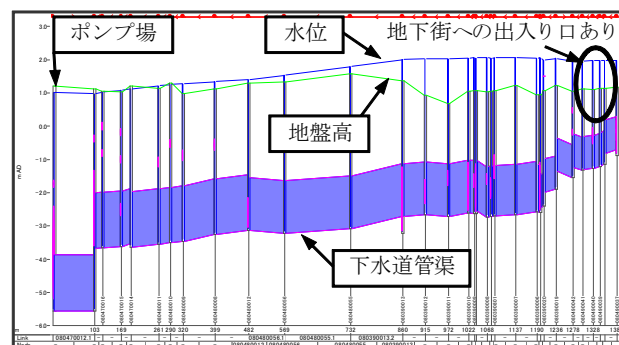


図-8 水位縦断面図の一例（ピーク水位）

雨ふた山目の後に発生する。単純に降雨ピークと流入ピークだけで比較すると、降雨ピーク後、約2.5時間後に流入ピークが発生する。また、ふた山目の降雨ピークを対象にしても、降雨ピーク後、約30分の差がある。

すなわち、降雨のピークが終わっても、地下街への流入の観点からは、決して安心できず、逆に降雨ピークが終わってから、その後、3時間程度までは、流入に対する警戒が必要となる場合もあることが明らかとなった。

#### 4. 脆弱箇所の抽出と地下空間への氾濫水流入対策

##### (1) 浸水しやすい地区の抽出とその要因

下水道排水施設を考慮した氾濫解析モデルにより、検討対象地区を含む排水区全体（1,215ha）を解析した結果、浸水しやすい箇所を面的に特定することができた。

対象地区全体における最大浸水深（アンダーパスを除く）は、岡崎豪雨の場合で約1.4mであり、大規模地下空間への出入口がある周辺での最大浸水深も約1.3mとなっている箇所がある。

浸水しやすい地区の要因について、分析した結果、以下のような特徴が得られた。

- 1) 幹線上流端の管渠が多数位置している
- 2) 大きな管径から小さな管径に変化している
- 3) 周辺よりも地盤高が低く、土被りも小さい
- 4) 処理場の排水区ではなく、中継ポンプの排水区（二次排水区）に位置している

上記1)～3)の説明として、検討対象地区における下水道水位縦断面図の一例を図-8に示す。下水道排水能力以上の流入があった場合、ポンプ場での水位が上昇し、上流側に背水の影響が生じる。また、対象地区の特徴として、下水道管渠上流側の地盤高が低くなっており、かつその低地盤部において、地下街が発達し、出入口も多数存在するという水害リスクの高い地区となっている。

また、上記の4)については、1)～3)のような条件となる場所で、処理場の排水区に位置するエリアと中継ポンプの排水区に位置するエリアを比較した場合、中継ポンプの排水区からの方が地下空間への流入量は多かった。

これは、処理場の雨水ポンプよりも中継ポンプ場の排水能力の方がやや小さいためである。

以上のように1)～4)に示した要因が重なる箇所が、都市雨水排水システム上、脆弱な箇所であることが確認できた。

## (2) 地下空間への氾濫水流入対策

雨水排水システムを考慮した解析を行うことにより、地下空間に流入する出入り口の場所、流入順序および流入量は、概ね推定できる。

これは、実際の豪雨を想定した場合、出入り口の止水等に従事できる人材には限りがあることから、事前に、脆弱である出入り口を事前に把握しておくことで、効率的な止水活動や避難誘導が可能となる。また、止水方法の改善により、止水活動時間の短縮化が可能となる。

これは、対象地域の出入り口を調査した結果、ほとんどの出入り口で、止水板が設置できる構造であったが、止水板の種類は多岐にわたり、止水板設置に多大な時間を要するタイプも散見された。

したがって、雨水排水システムを考慮した解析に基づき、水防計画を立案し、特に警戒レベルの高い出入り口については、比較的设置方法が簡単で、設置時間の短いタイプに変更しておくことがリスク管理上必要である。

また、近年の水害事例による調査報告<sup>11)</sup>では、台風などの、ある程度の規模と進路が予測できるような風水害に対するマニュアルは整備されているが、短時間の集中豪雨には適用不可能であったという指摘が多く、今後、短時間集中豪雨を想定した対策の立案が急務と言える。

## 5. 結論

本検討においては、日本を代表する大規模地下空間を有する都市域を対象とし、下水道排水施設を考慮した氾濫解析モデルを構築し、2種類の実績降雨を外力として与えた場合の氾濫及び地下街等への流入特性を把握し、水害に対する脆弱箇所を把握するとともに、地下空間への氾濫水流入対策について考察した。

本検討により得られた主な結果を以下に示す。

- ① 外力として、「岡崎豪雨」と「東海豪雨」を与えた結果、前者の方が、地下空間への総流入量、ピーク流量とも大きくなった。これは、当該地区での雨水排除能力60mm/hrを上回る時間及び雨量が、岡崎豪雨の方が大きいことに起因しており、内水氾濫においては、総降雨量よりも下水道排除能力以上の降雨量（強度）が重要であることが示唆された。
- ② 本解析結果においては、地下空間への流入順序については、外力の違いにより流入順序が大きく異なることはなかった。これは、予め注意を要する出入り口の絞込みが可能であり、重点的な予防対策及び発

災時の対応順序を明確にできることを示している。

- ③ 地下流入の時間的特徴として、降雨ピークと地下空間への流入ピークには差があり、岡崎豪雨の場合で0.5時間程度、東海豪雨の場合では最大2.5時間程度、ピーク差が生じた。降雨のピークが終わっても、地下空間への氾濫水流入の面からは決して安心できず、降雨ピーク後3時間程度は警戒が必要である。
- ④ 脆弱箇所の推定のため、ポンプ能力を上回る降雨が発生した場合の動水位、地盤高、地下出入り口の位置関係から、浸水要因を示した。出入り口に対する浸水対策（止水板の見直し）を講じる上では、道路面からの相対的な高さのみでは不十分であり、下水道施設（排水能力）を考慮した検討が必要である。
- ⑤ 地下空間への流入対策としては、少ない人員（特に夜間）で効率的な止水活動を行うためには、事前に、警戒すべき出入り口を把握し、かつ止水板の種類も設置し易いものに変更しておくことが重要である。

**謝辞：**各種の資料を提供してくださった自治体の関係各位に感謝いたします。本研究の解析・評価は得られたデータを基に著者らの責任で独自に行ったものである。

## 参考文献

- 1) 石垣泰輔，中川一，馬場康之：地下空間を含む都市洪水氾濫に関する水理模型実験，京都大学防災研究所年報，第47号B，pp.527-544，2004。
- 2) 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
- 3) 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。
- 4) 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，Vol.53，pp.859-864，2009。
- 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，Vol.48，pp.583-588，2004。
- 6) 戸田圭一，米山望，山本大介，大塚健太：地下空間スケールに着目した地下浸水の危険性について，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.14，pp.153-158，2009。
- 7) 関根正人，河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集No.789/II-71，pp.47-58，2005。
- 8) 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，Vol.52，pp.847-852，2008。
- 9) 森兼政行・浅見ユリ子・桑原正人・早見義一：浸水シミュレーションを活用した都市地下空間における水防・避難誘導の検討，河川技術論文集，第15巻，pp.405-410，2009。
- 10) 例えば，「東海豪雨災害 土木学会調査団 第一回視察（平成12年10月3日）報告」
- 11) 内閣府：大雨災害における市町村の主な取組事例集，2010。

(2010. 9. 30受付)