

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

A STUDY OF FLOOD PROTECTION AND EVACUATION SYSTEM AT URBAN UNDERGROUND SPACE USING NUMERICAL SIMULATION

森兼政行¹・浅見ユリ子²・桑原正人³・速水義一⁴

Masayuki Morikane, Yuriko Asami, Masato Kuwahara and Yoshikazu Hayami

¹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)

²正会員 農学 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

³正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

⁴正会員 大阪地下街株式会社 (〒530-0013 大阪市北区茶屋町1-27)

In Japanese urban areas, a lot of underground spaces have been formed complicatedly. In these underground spaces, the risk of inundation has increased more and more, as heavy rainfall happens frequently in recent years. Each manager of the underground spaces is obligated to make the evacuation plan under the Flood Control Act. However, some of them do not manifest when flood prevention activity should be set off, so it is necessary to examine the inundation process. In this study, we simulated the inundation process by a numerical simulation model which unifies street level and underground spaces, and we cleared a criterion to start the flood prevention activity and evacuation direction in the underground space in Umeda, Osaka. Furthermore, it is cleared that improving some barricades at the street level entrance to the underground space and cooperating with related organizations are indispensable for effective and efficient execution of the plan.

Key Words : *Underground space, urban flood, numerical simulation, Infoworks CS, anti-disaster activity, evacuation guidance, evacuation plan*

1. はじめに

我が国の都市部では、土地を有効利用するため、地下鉄・地下通路・地下街・ビル群等が複雑に接続された地下空間が形成されており、都市活動において不可欠な空間となっている。このような地下空間では水害の危険性が高く、近年増加している局地的豪雨等により、その危険性は助長されている¹⁾²⁾。

このため、地下街管理者による地下空間の資産と地下利用者の生命を守るための対策は喫緊の課題となっており、平成17年水防法改正を受けて、いくつかの地下街管理者は避難確保計画の策定や浸水防御施設整備を実施している。

しかし、局地的豪雨は「ゲリラ豪雨」等とも呼ばれるように、極めて局地的に雨を降らせ、かつ雨雲の発生から降雨の最大化までの時間が非常に短いため、現在の技

術では事前に発生場所や時刻の特定、雨量の予測は困難な状況である。

このことから、貴重な都市空間である地下空間の安全・安心を実現するためには、台風や梅雨前線豪雨などを想定した従来型の避難確保計画について、局地的豪雨を想定して短時間で対応できるよう再考する必要性が生じている。

2. 検討対象地域の概要

ホワイティうめだ(以下、本地下街と呼ぶ)は、JR大阪駅、阪急電鉄・阪神電鉄・大阪市営地下鉄の梅田駅・東梅田駅が直結する日本で最も広い地下空間のひとつである(図-1)。本地下街は、これらの駅間の移動通路として利用されており、多くの商業店舗も集積している。また、地上部では商業・オフィスビル間を移動する人が

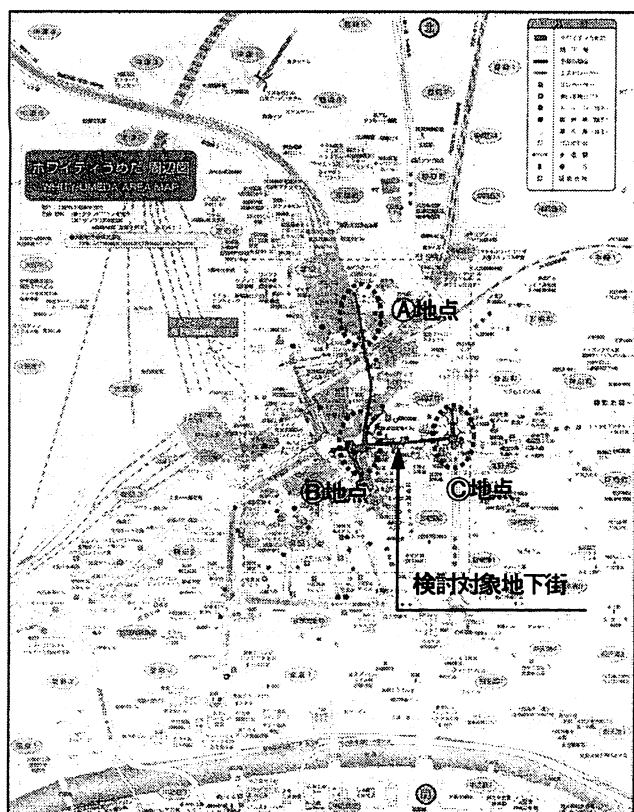


図-1 本地下街の位置³⁾

多いうえに、駅前道路の自動車交通量も集中していることから、本地下街は、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。

このように本地下街は都市機能の重役を担っているが、今後の社会情勢等を鑑みると、都市空間のさらなる高度利用が望まれるため、本地下街においても利便性の向上や、平常時のみならず緊急時の有効活用への期待が寄せられている。このためにも、局地的豪雨等による水害に対しても、適切な浸水防御および安全な避難誘導を実現することが不可欠である。

以上のことから、本論文では本地下街を対象として、局地的豪雨を想定した浸水リスクの評価分析と、今後の対策の充実を図る観点で、より効率的な方策について検討し、地下空間の防災力の維持・向上対策の方向性を示す。

3. 浸水シミュレーションモデルの構築

地下空間の浸水対策を講じる上で、浸水リスクを評価する必要があることから、地上・下水道管路網・地下通路網の氾濫水の挙動を一体的に表現できる氾濫数値シミュレーションモデルを構築した。

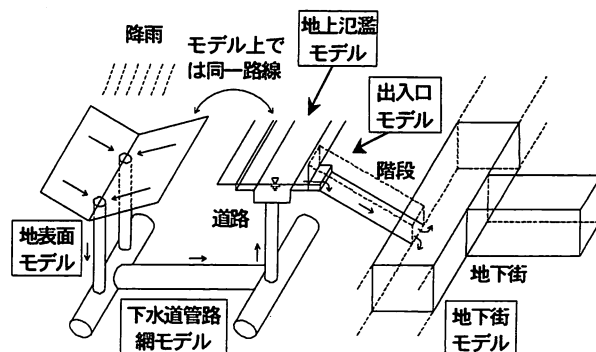


図-2 シミュレーションモデルの概要

(1) シミュレーションモデルの特徴

シミュレーションモデルは、下水道の雨水流出解析で実績の多い「Infoworks CS」⁴⁾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』から構成される。

本モデルの主な特徴を以下に示す。

- ① 地表面解析と管路解析を連続的に計算
 - ② 時間軸を考慮した不定流解析を実施
 - ③ ネットワーク管路網の計算が可能
 - ④ プライスマンスロットにより、仮想的に圧力管状態も解析
 - ⑤ 解析結果は、グラフやアニメーション等で表示可能
- なお、「地表面+管路網」のモデル化範囲は、当該地下空間を含む排水区全域（A=1,215ha）を対象とし、ポンプ場施設や雨水吐き（合流式下水道）等も考慮している。

(2) 地上氾濫モデル及び地下街モデル

上記の「地表面+管路網モデル」に、「地上氾濫モデル」、「地下街出入口モデル」、「地下街モデル」を組み込むことにより、地上・地下空間一体型のシミュレーションモデルを構築した（図-2）。

a) 地上氾濫モデル

解析上、下水道管路網が満水となり、動水位が地表面を越えた場合は、地表面に溢水することになる。

地表面は、道路を仮想水路としてモデル化し、地盤標高に応じて、低地方向に流下（氾濫）する現象を表現している。なお、流下過程において、下水道管路に余裕がある場合には、マンホールから再び管路に流入させる。

b) 地下街出入口モデル

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ことになる。

表-2 シミュレーションケース

出入り口番号	a	b	c	d	e	f
Case-1	止水なし	×	×	×	×	×
Case-2	aのみ止水※1	○	×	×	×	×
Case-3	4箇所止水※2	○	×	○	○	○
備考	管理	Whity	接続t' #	Whity	接続t' #	Whity
	止水板タイプ	ハット #	土嚢	組立	組立	組立
流入順序 →						

(注) ○：止水板設置，×：止水板未設置

※1：最も地下街への流入が早く、大量に流入が予想される出入り口「a」のみを優先して対策を講じた場合を想定

※2：接続ビルが閉鎖した後の夜間等に発災したことを想定し、地下街管理者が直接管理している出入り口のみ対策した場合を想定

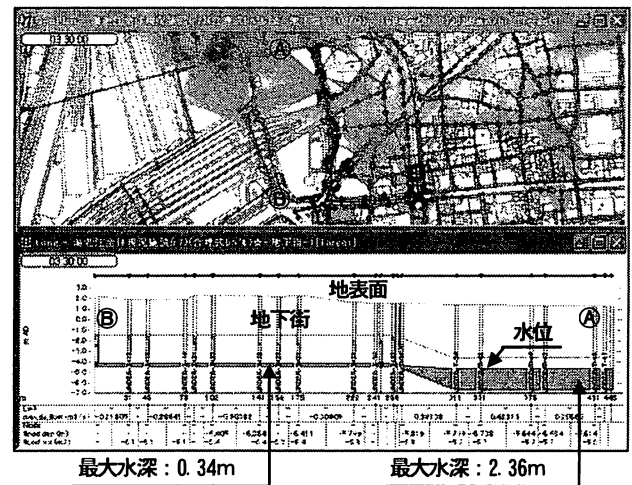


図-4 地表及び地下街内水位縦断面図 (Case-1)
〔南北方向：地下街流入1.5時間後の状況〕

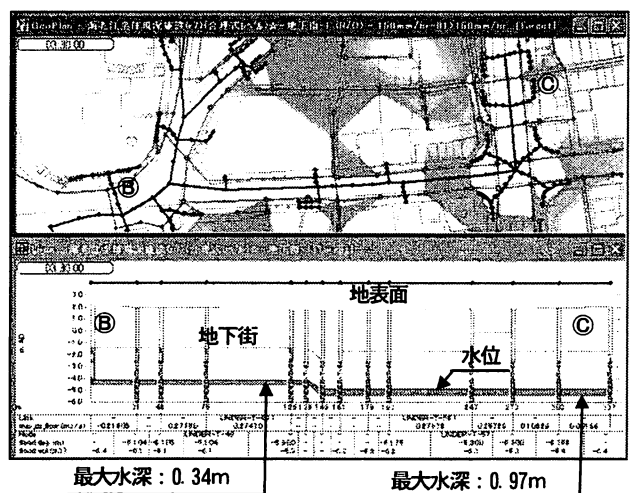


図-5 地表及び地下街内水位縦断面図 (Case-1)
〔東西方向：地下街流入1.5時間後の状況〕

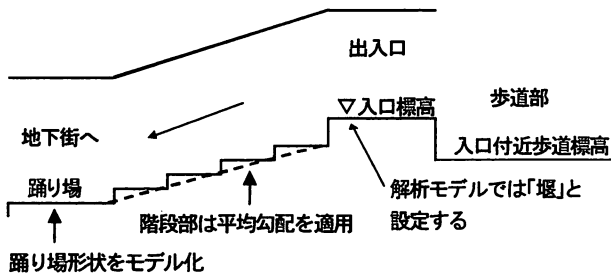


図-3 地下街出入口モデルの概要

表-1 地下街モデル化の条件

箇所	モデル化の条件
テナント部	テナント部はモデル化せず、通路部をモデル化（浸水時にはシャッターを閉めるものとして、安全側を考慮）
地下鉄	地下鉄と地下街の間で防水屏が設置されるものとして、地下鉄は考慮しない
接続地下街	現時点では対象地下街のみを考慮
接続ビル	接続ビルへの階段（地下街管理区間）は考慮するが、接続ビル内部からの雨水流入は考慮しない。
排水ポンプ	設定なし

階段部については、ボックスカルバートと見立てモデル化し、1段1段の段差についてはモデル化せず、平均勾配を用いてモデル化した。

なお、階段途中の踊り場については、構造（幅・長さ）をモデルに反映させることとした（図-3）。

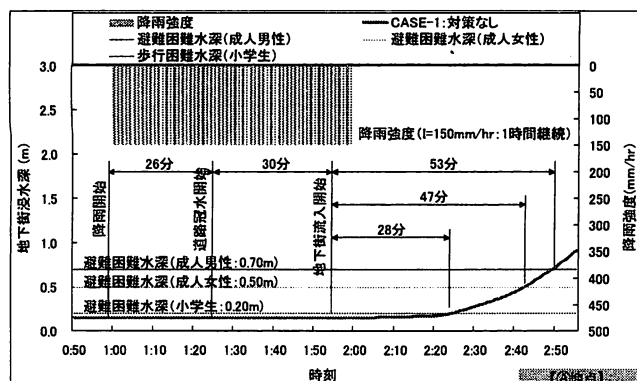
c) 地下街モデル

本地下街（地下通路を含む）のモデル化は、基本的にボックスカルバートと見立てて、計画上の安全側を考慮し、表-1の条件を設定した。

4. 浸水シミュレーションのケース設定

降雨条件としては、100mm/hr（2時間継続）のケースなど複数のケースを想定する中、近年頻発する局地的豪雨の中で、愛知県岡崎市周辺で発生した「平成20年8月末豪雨（H20.8.26：146.5mm/hr）」相当の150mm/hrの降雨を本モデルに与えた。

地下街出入り口の条件としては、まず出入り口が無対策の場合の浸水シミュレーションを実施し（Case-1），①地表の氾濫水が流入して地下空間が浸水する時刻，②地下通路内の氾濫水が避難困難水深に到達するまでの時間を把握した。



(注) 地下街浸水深が時間軸前半に0.15mで一定水深となっているのは、完全サンブナン方程式を解くために、計算上、基底流量を与えているためであり、実際は「ゼロ」である。

図-6 地下空間での浸水深の時刻変化 (Case-1)



図-7 本地下街周辺の地盤高コンター図

次に、流入する可能性のある出入り口のいくつかに浸水防御施設を設置した場合の氾濫シミュレーションを数ケース実施し (Case-2, Case-3), ③浸水防御施設 (止水板等) の設置位置による地下通路の浸水過程の効果を比較した。

5. 浸水シミュレーション結果と考察

(1) 地下空間が浸水するまでの時刻 (Case-1)

時間150mmの降雨が1時間継続する局地的豪雨の場合 (図-4および図-5), 降雨開始から約30分後に下水道施設が満管状態となるとともに溢水が開始し, 地表の氾濫水は降雨開始から約60分後 (道路冠水開始から約30分後) に地下へ流入する (図-6)。

このことは、降雨が終了した後に、地下空間への流入がピークに達することを示している。これは、当該地区が周辺地区と比較し、微地形的に窪地形状となっており、降雨終了後にも当該地区に地表氾濫水が集中することに

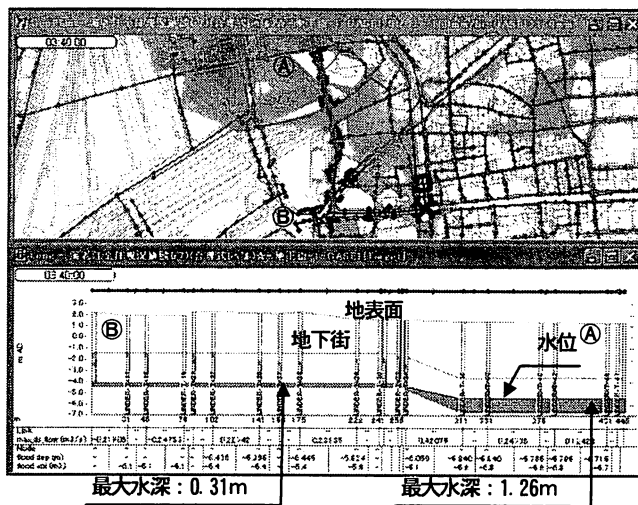


図-8 地表及び地下街内水位縦断面図 (Case-2)
〔南北方向：地下街流入1.5時間後の状況〕

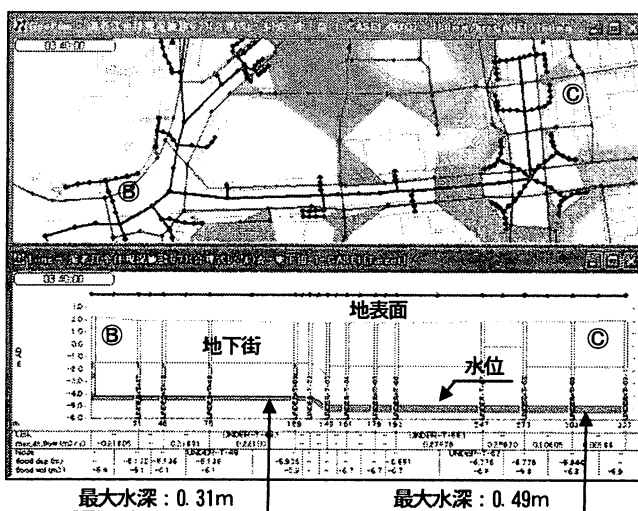


図-9 地表及び地下街内水位縦断面図 (Case-2)
〔東西方向：地下街流入1.5時間後の状況〕

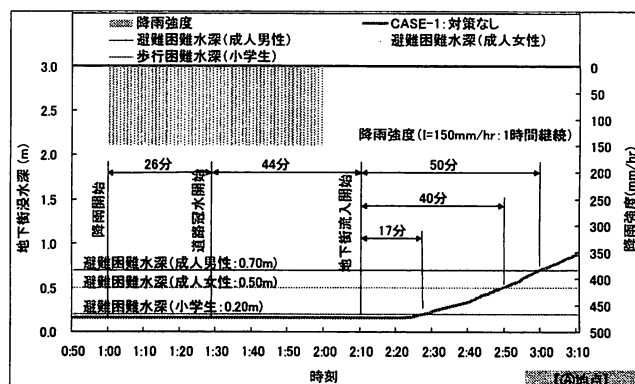


図-10 地下空間での浸水深の時刻変化 (Case-2)

起因していると考えられる (図-7)。

したがって、地下街管理者は降雨終了後も浸水の危険性を監視し、地上の歩行者が地下空間に入ることのないように、地上の歩行者に警告し続ける必要がある。

表-3 浸水防御対策の効果例（時間）

	総流入量 (m^3)	道路冠水後、地下街流入開始までの時間 (分)	道路冠水後、地下街内水深が70cmに達するまでの時間 (分)
Case-1	5,275	30	83
Case-2	2,660	44	94
Case-3	1,186	44	—※

※最大水深は36cmに抑制される。

表-4 浸水防御対策の効果例（浸水深）

	最大浸水深 (m)		
	①地点	②地点	③地点
Case-1	2.36	0.34	0.97
Case-2	1.26	0.31	0.49
Case-3	0.36	0.31	0.34

(2) 効率的・効果的な水防・避難誘導活動 (Case-2, 3)

浸水防御すべき出入口の位置については、その出入口が直結する地下通路や間接的に接続する他の地下通路の浸水を遅延させたり、あるいは浸水深を低減させる効果が高い箇所が抽出できた。

具体的には、解析対象とした41箇所の出入口のうち、6箇所からの流入が予測された（表-2）。これらのうち、4箇所（a, c, e, f出入口）については地下街管理者が直接管理しているものであるが、残りの2箇所については接続ビルが管理している出入口である。

これらの箇所に重点的に浸水防御対策を実施することにより、地下街管理者や防災関係機関が適切に初動体制をとり、地下街利用者等を安全に避難誘導することが期待できる。

しかし、接続ビルが閉館となる夜間や早朝または休館日において少ない警備体制で効率的な効果を上げるためには、事前に水防活動の優先順位を明確にしておく必要がある。

表-3は、各検討ケースにおける地下街への総流入量、道路冠水開始から地下街流入までの時間、道路冠水開始から地下街内の水深が70cm（成人男性の避難困難水深）⁵⁾に達するまでの時間をそれぞれ示したものである。本地下街への流入が最も早く、かつ大量に流入が予想されるa出入口を優先的に止水することにより（Case-2）、総流入量を約半分に抑制できるだけでなく、避難活動に費やすことができる時間を10分以上延長させることが可能となる。

さらに、地下街管理者が直接管理している4箇所に対して優先的に止水することができれば（Case-3）、無対策時に比べ総流入量を約22%に、地下街最深部での水深を約36cmまでそれぞれ抑制でき、限られた人員・時間の中で人命・財産等の確保が飛躍的に向上することが期待

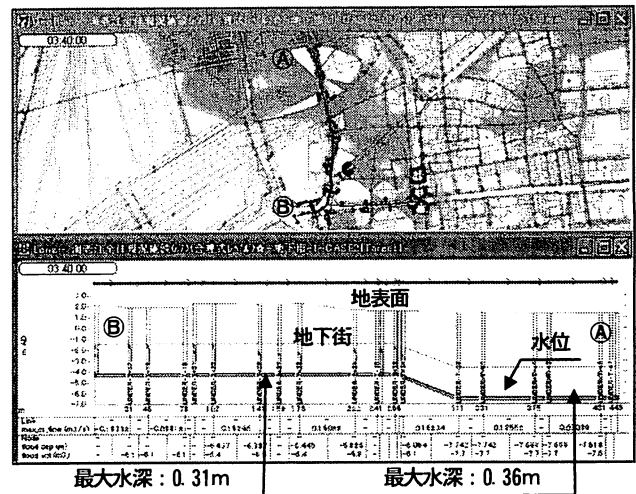


図-11 地表及び地下街内水位縦断面図（Case-3）
〔南北方向：地下街流入1.5時間後の状況〕

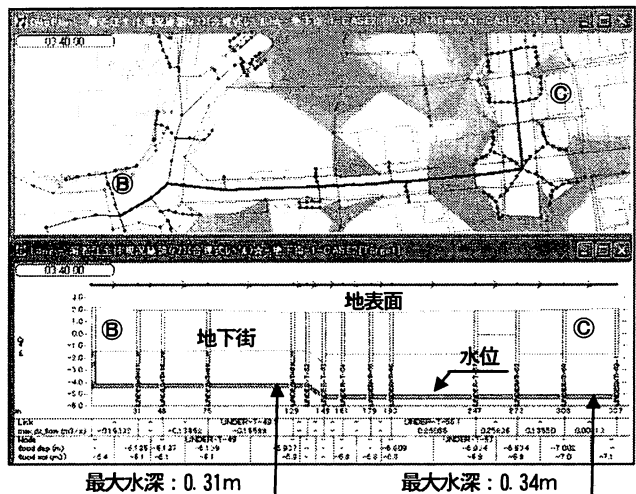


図-12 地表及び地下街内水位縦断面図（Case-3）
〔東西方向：地下街流入1.5時間後の状況〕

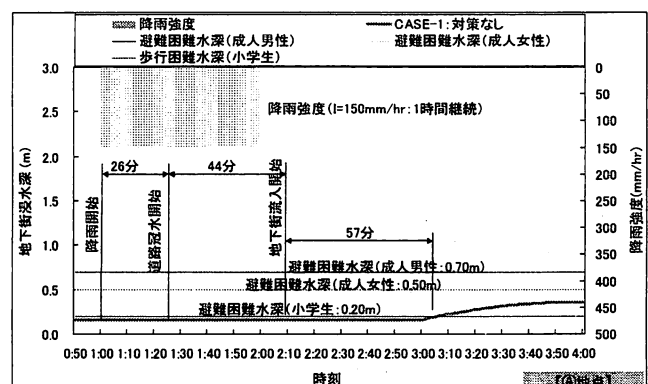


図-13 地下空間での浸水深の時刻変化（Case-3）

される。

表-4は、主要地点での最大水深を整理したものである（図-4, 5, 8, 9, 11, 12に対応）。例えば、本地下街で最も低い床高である①地点でみると、Case-1では2.36mとなっているが、優先的にA出入口を止水することによ

り (Case-2) 1.26mまで軽減される。さらに、4箇所を優先的に止水 (Case-3) することにより0.36mまで浸水深を軽減でき、避難時間の余裕確保だけではなく、物理的な被害軽減に大きく寄与できると期待される。

(3) 店舗従業員に対する啓蒙活動 (Case-1, 2, 3)

地下空間の浸水深が、成人男性が歩行困難と感じる70cmまで到達するのは、出入り口が無対策の場合、地下空間の浸水開始から約50分後である (Case-1)。

ただし、70cmという基準は流速がほとんどない状況を前提としており、実際に避難が困難となる水深と流速に到達するまでの時間はさらに短い。まして、女性、小学生等の属性によって避難困難水深は大きく異なることから、より効率的な避難誘導を行う必要がある。

降りをはじめから地下空間浸水に至るまでの非常に限られた時間の中で、地下街管理者はすべての地下街にいる人々を避難するように指示・誘導を行う必要がある。

対策を行った場合 (Case-2, 3) は、その70cm到達までの時間がブロックによっては長くなるが、その時間まで地下街が安全であるということではない。

局地的豪雨による浸水の経験が極めて少ないため、各地下街店舗のオーナーや従業員等の中には、資産を守ろうとして店舗の商品を移動させたり、店舗前の浸水対策などを行っているうちに逃げ遅れる人が出る可能性がある。

また、本地下街の中でも相対的に低い場所もあるため、そのような場所に避難させると被害を助長させる可能性もある。地下街利用者を避難誘導させる場合には、避難方向にも配慮し、最寄りの接続ビルの2階以上に誘導するなど、予め避難方法に関する情報提供も必要である。

このため、地下街管理者は店舗従業員等に対して、浸水時に地下に留まることの危険性、及び避難方法を普及・啓発することが重要である。

5. おわりに

浸水シミュレーションを用いることで、局地的集中豪雨時における浸水防御・避難誘導実施の際に、管理者が留意すべき点や事前に対応すべき事項を洗い出すことができた。得られた成果をまとめると以下ようになる。

- ・ 時間 150mm の降雨が1時間継続する局地的豪雨を対象として浸水シミュレーションした結果、降雨終了後に、地下空間への流入がピークに達する可能性が示唆され、地下街管理者は降雨終了後も浸水の危険性を監視し続ける必要がある。
- ・ 降雨開始から地下空間浸水に至るまでの非常に限られた時間の中で、地下街管理者はすべての地下街にいる人々を避難するように指示・誘導を行う必要が

ある。実際に地下街浸水が発生した場合には、店舗前の浸水対策などを行っているうちに逃げ遅れる人が出る可能性がある。このため、地下街管理者は店舗従業員等に対して、浸水時に地下に留まることの危険性を普及・啓発することが重要である。

- ・ 浸水防御すべき出入り口の位置については、浸水深を低減させる効果が高い箇所が抽出できた。これらの箇所に重点的に浸水防御対策を実施することにより、地下街管理者や防災関係機関が適切に初動体制をとり、地下街利用者等を安全に避難誘導することが期待できる。

地下空間の安全・安心は、地下街管理者の対応のみでは実現しない。店舗従業員は火災と同様に水害にも気を配り、利用者と自らの安全確保を第一に考え、避難行動に協力することが必要である。

また、地下街利用者は、「地下空間の利便性と同時に水害リスクを正しく理解」する必要があり、大雨の際には自ら気象情報などに注意し、避難指示があった場合には速やかに指示に従い行動することで、自らの安全を確保することが重要である。

本検討結果を踏まえ、今後、具体的な水防避難訓練等に反映させ、訓練・マニュアルの充実を図るとともに、常に見直しを行いながらレベルアップを図る。

さらに、適切な地下空間の浸水リスクの評価や浸水防御施策の整備等に資するため、今後は地下空間が浸水した場合の被害額の試算・想定を試みる予定である。

謝辞：本検討にあたっては、関西大学：古田均教授、関西大学：石垣泰輔教授、京都大学防災研究所：戸田圭一教授、関西大学：尾崎平助教からご指導いただきました。また、浸水シミュレーションモデルの構築にあたり、下水道施設等に関するデータを大阪市建設局よりご提供いただきました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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数とその適用、水工学論文集、第52巻、pp. 841-846, 2008.
- 3) 大阪地下街開発：ホワイティうめだ周辺図, 2004.
- 4) (財)下水道新技術推進機構：流出解析モデル利活用マニュアル, 2006.
- 5) 亀井勇：台風に対して、天災人災住まいの文化誌、ミサワホーム総合研究所, 1984.

(2009. 4. 9受付)