局地的豪雨を対象とした都市地下空間における防災力の 維持・向上対策の検討 A STUDY OF PROGRESSING OF DISASTER PREVENTION CAPABILITY FROM UNDERGROUND INUNDATION BY LOCALIZED TORRENTIAL RAINFALL

森下 祐1・桑原 正人1・森兼 政行2・浅見 ユリ子3 Yuu MORISHITA・Masato KUWAHARA・Masayuki MORIKANE・Yuriko ASAMI

In urban areas in Japan, a lot of underground spaces have complicated layouts. In these underground spaces, the risk of inundation has increased due to the frequent occurrence of heavy rainfall in recent years. Under the Flood Control Act, it is required for managers of underground spaces to make evacuation plans. However, some of these plans do not specify when to start flood prevention activity. Therefore, an examination of the inundation process is necessary to make suitable recommendations for flood evacuation. In this study, we simulated the inundation process with a numerical simulation model which unified aboveground and underground spaces, and evaluated the effectiveness of flood evacuation methods in the underground space of Umeda, Osaka. From the results, this paper posits that the provision of some cut-off plates at the street level entrance and cooperation with related organizations are indispensable for an effective and efficient execution of the plan.

Key Words : Underground space, localized torrential rainfall, urban flood, numerical simulation, 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,局地的豪雨による内水氾濫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.

本論文では、大阪市の中心市街地に位置する大規模な地下空間「ホワイティうめだ(以下、本地下街と 呼ぶ)」を対象として、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浸水シミ ュレーションモデルを用いて地下街浸水時の課題を洗い出した上で、近年の実績降雨を基に地下街管理者 が初動体制に入るための目安の短時間降雨量について検討し、安全・安心な都市地下空間の実現のために 地下街管理者・従業員・利用者が実施すべき事項を示すものである.

キーワード:都市地下空間,局地的豪雨,内水氾濫,浸水対策シミュレーション,避難確保計画

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社大阪本社水工技術部

²正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社環境・防災系部門

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社国土保全技術部防災部



図-3 本シミュレーションモデルの概要

2. 検討対象地域の概要

本地下街は、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多い上に、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.

また、当該地区は周辺地区と比較して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しやすい地形特性を持っている(図-2).

3. 浸水対策シミュレーション

(1) 浸水対策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-3).

本モデルは、下水道計画の雨水流出解析で実績の多い「Infoworks CS」⁴⁾を応用しており、① 地表面解 析と管路解析を連続的に計算できること、②時間軸を考慮した不定流解析を実施できること、③ ネットワ ーク管路網の計算が可能であること、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すること、 表-1 シミュレーションケース

	出入り口番号	а	b	с	d	е	f	
Case-1	止水なし	×	×	×	×	×	×	
Case 2	a のみ止水*1	0	×	×	×	×	×	
Case-3	4 箇所止水*2	0	×	0	×	0	0	
備考	管理	Whity	接続ヒ [゙] ル	Whity	接続ヒ [゙] ル	Whity	Whity	
	止水板タイプ	ハント・ル	土嚢	組立	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:接続ビルが閉館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図(Case-1) 〔東西方向:地下街流入1.5時間後の状況〕



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.

⑤解析結果はグラフやアニメーション等で表示可能であることが特徴として挙げられる.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.計算条件は,基本的にボックスカルバートと見立てて計画上 の安全側を考慮して設定を行っているが,詳細は参考文献5)を参照にされたい.

(2) 浸水対策シミュレーションの実施

降雨条件は、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の降雨を与えた.シミュレーションケース(表-1)、まず出 入り口が無対策の場合の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.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シミュレーションを実施し(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.

a) 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り地表面に溢水が開始し、地表の氾濫水は降雨開始から約 60 分後(道路冠水開始

図-6 地下空間での浸水深の時刻変化 (Case-1)



図-10 地下空間での浸水深の時刻変化 (Case-2)

から約 30 分後)に地下へ流入する(図-6). つまり,降雨が終了した後に,地下空間への氾濫流入量がピークに達することを示している. このことは,図-2 に示したように,当該地区が微地形的に窪地形状となっているため,降雨終了後も当該地区に地表氾濫水が集中することに起因していると考えられる.

以上のことから,地下街管理者は道路冠水開始から 30 分以内に止水板を設置する必要があると同時に, 降雨終了後も地下空間の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警告し

図-13 地下空間での浸水深の時刻変化 (Case-3)

表-2 浸水防御対策の効果例(時間)

	総流入量	道路冠水後,地	道路冠水後,地		
	(m ³)	下街流入開始ま	下街内水深が		
		での時間 (分)	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	_*		

表-3 浸水防御対策の効果例(浸水深)

	最大浸水深(m)						
	④地点	围地点	©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				

続ける必要がある.

b) 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り口の位置については、その出入り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 箇所の出入り口のうち、6 箇所からの流入が予測された(表-1). 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り口である. 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-2 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)⁶⁰に達するまでの時間を示したものである. 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 出入り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,地下街最深部での最大水深を 0.36m までそれぞれ抑 制でき,限られた人員・時間の中で人命・財産等の救助・救出が飛躍的に向上することが期待される.

表-3 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 と対応)。例えば、本地下街で最も低い床高である④地点でみると、Case-1 では最大浸水深は 2.36mであるが、優先的に a 出入り口を止水することにより(Case-2)最大浸水深は 1.26mまで軽減される. さらに、4 箇所を優先的に止水(Case-3)することにより最大浸水深を 0.36mまで軽減でき、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ことが期待される.

c) 効率的・効果的な水防・避難誘導活動(Case-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し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す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 等を普及・啓発することが重要である.

4. 初動体制の目安検討

前章の検討では,止水板設置による浸水防御 効果を定量的に把握することで,適切な箇所へ の止水板設置の必要性や避難方法等の普及・啓 発の重要性が示された.これらを実効あるもの とするには,限られた人材の中で,地下街管理 者が迅速に初動体制(大雨待機等)に移行でき ることが不可欠である.よって本章では,地下 街管理者が,止水板設置や避難誘導等の水防活 動を円滑に開始できるような初動体制移行の目 安について検討する.

初動体制移行の目安としては、台風や梅雨前 線豪雨などを想定した従来型の風水害では、気 象庁による「大雨警報発令」(大阪府の場合、1 時間雨量 40mm 等)が挙げられるが、局地的豪雨 にも対応できるようにする必要があるため、よ



図-14 10 分間雨量と 60 分間雨量の関係 (大阪管区 1978 年~2007 年) 〔10 分間雨量が 8.0mm以上を対象〕

り短時間降雨量を目安とする. つまり, 面的な 1 時間雨量ではなく, 時空間的に局地的な降雨量を捕捉す ることが不可欠である.

一方,外水氾濫の場合は,自治体による避難勧告や避難指示が行動を開始するひとつの基準となる(本 来は自主避難が最も望ましい)が,都市地下空間近傍の内水氾濫という特性を踏まえると,地下街管理者 が独自の判断基準を有することが望ましいと考えられる.ここで大阪市の下水道整備基準では,60mm/hr を 対象とした雨水排除整備が実施されているが,急激な都市化や地盤沈下等に起因する管渠勾配の不具合等 もあり,60mm/hr の整備水準を満足していない場合も多い.そこで,当該地域の下水道流下能力を Infoworks CS により現況解析した結果,概ね50mm/hr の水準であることが分かった.

まず初動体制移行の目安として、現況下水道流下能力の 50mm/hr (=8.3mm/10 分)を用いる場合について 考察する.この程度の短時間雨量は頻繁に発生しているため、この降雨傾向に基づくと待機命令も頻繁に 発令されることになり、「狼少年」的心理状況をもたらす可能性があるため、目安として「安全側過ぎ る」ため妥当とは言えない.

次に近年の降雨実績を基に、初動体制の判断基準として妥当な降雨強度について検討する. 1978~2007 年の30年間に大阪管区気象台(地点:大阪)において、8.0mm/10分以上の降雨強度が観測された全降雨に ついて、10分間雨量と60分間雨量を抽出し、相関図(図-14)を作成した. この図によると、近年30年間 で、現況下水道流下能力(50mm/hr)を上回る降雨は5回発生している. このうち3回は下水道整備基準で ある60mm/hrを上回っている. ここで10分間雨量が10mm以下の降雨であっても60分間雨量が40mm/hr程 度の雨が3回観測されており(図-14の点線囲み部)、これらの降雨に着目し初動体制移行の目安を考える. なお、大阪管区気象台の既往最大降雨も、この3点を結ぶライン上に位置する. これらの3回の実績から、 現況下水道流下能力(50mm/hr)を超える場合に想定される最小10分間雨量を推測すると、11.5mm/10分と なる.

すなわち、当該地域周辺で 11.5mm/10 分以上の降雨観測が得られた場合に、現況下水道流下能力 (50mm/hr) を超える恐れがあるとして、地下街管理者は初動体制に移行することが妥当であると考える.

5. 水防・避難安全確保対策のロードマップ

局地的豪雨による内水氾濫を軽減し,安全・安心な地下空間を実現するためには,地下街管理者が今後 改善すべき課題が明確となった。局地的豪雨に対する浸水対策として,止水板設置や避難誘導等をはじめ とした水防活動をより効果的に行うことや初動体制の迅速化を図るための判断基準を確立することは,防 災力向上を期待する上で重要な要素である.しかしながら,このような種々の浸水対策を同時に進めるこ とは、労力や費用等を勘案した場合,現実的とはいえない.こうした現状を踏まえ,効率よく浸水対策を 推進し,安全度の向上を図るためには,「どの対策をどのような順序で進めていくか」を示したロードマ ップを検討することが重要である.その際には,ハード整備は浸水の危険性を大幅に抑えることができる ものの多大な時間と費用を要するため,即効性の高いソフト対策との両輪で推進する必要があることを念 頭に置いたロードマップが望まれる.

早期に着手すべき対策のロードマップの一例としては,限られた人員を考慮すると初動体制の迅速化は 急務の課題であるため,初動体制に移行する目安雨量を得るための雨量計や,水防上注意が必要な出入り 口付近に道路浸水センサーや監視カメラの設置(ハード整備)が望まれる.

さらに、正確な情報が早期に収集できたとしても、地下街管理者がそれらの情報を店舗従業員等と連携 しながら適切に活用出来ない限り、防災力の向上には繋がらない.そこで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、及び避難方法等を普及・啓発する防災教育(ソフト対応) の推進も重要である.

6. おわりに

本検討により、局地的集中豪雨による内水氾濫時における浸水防御・避難誘導実施の際に、地下街管理 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のよ 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し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。
- ・ 近年の降雨実績を基に、地下街管理者が初動体制に移行する際に目安となる短時間雨量を設定した.

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.

このように、地下街管理者、地下街店舗従業員、地下街利用者が連携することで、地下空間の防災力の 維持・向上に資することができる.

さらに、地下街管理者は、店舗従業員とともに甚大な被害を受けることを想定した「業務継続計画」に ついても継続的に検討することが必要がある.

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、浸水対策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㈱発行: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) 森兼政行・浅見ユリ子, 桑原正人, 速水義一: 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.
- 6) 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.