

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

EFFECTS OF COUNTER MEASURES FOR REDUCING UNDERGROUND INUNDATION CAUSED BY PLUVIAL FLOODING

森兼政行¹・井上知美²・石垣泰輔³・尾崎平⁴・戸田圭一⁵

Masayuki MORIKANE, Tomomi INOUE, Taisuke ISHIGAKI, Taira OZAKI and Keiichi TODA

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 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)

⁴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)

⁵正会員 Ph.D. 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

In the last decade, torrential rain has been increasing and it caused pluvial and fluvial flooding in Japan. These floods caused inundations in urban and rural areas. Intensity of such rainfall was sometimes excesses over the design rainfall of drainage systems and rainwater was running over the road. In these floods, some portion of rainwater intruded into underground spaces and the users faced the danger of underground flooding. In this paper, pluvial flooding was investigated by InfoWorks CS and underground flooding in a mega-underground mall was also discussed on the bases of calculation by shallow flow model with structural mesh. And then, the effects of counter measures for reducing underground inundation were studied with the criteria of safe evacuation obtained by the previous evacuation tests.

Key Words : *pluvial flooding, mega-underground mall, counter measures, safe evacuation*

1. 序論

都市化の進展は、保水・遊水機能を低下させ、下水道による雨水排除が基本となっている。下水道排水能力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、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¹⁾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^{2)~4)}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⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾や避難シミュレーションの開発に関する研究⁸⁾を行っている。

筆者らは大規模な地下空間を対象とした流入特性に関する検討⁹⁾や、水防・避難誘導に関する検討¹⁰⁾を行ってきた。また、既往研究¹¹⁾において、複雑な地下空間に対して計画上の安全側となるよう地下空間の通路部分を主に対象として検討してきた。この場合、水の流下断面積が限定されるため、過度な流速や水深となる可能性がある。本論文では、大規模地下空間を対象として、通路部以外にも、店舗部分や鉄道地下駅を考慮した場合の評価を行うことにより、昼間と夜間といった発生時刻の違いによる避難危険度の違いを考察する。さらに、地下空間の浸水対策の違いについて、被害額の面から評価を行う。

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



図-1 対象地域の排水区(管路網)と大規模地下空間

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。

(2) 解析モデルの概要

a) 地上部の雨水流出解析モデル

地上部の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）を応用したモデルを用いる。

本モデルにより地上氾濫解析を行い、地下への出入り口部で設定した「堰」を越流した水を地下空間の浸水解析を行う上での外力として設定する。

b) 地下空間における浸水解析モデル

大規模地下街における浸水解析を行う上での計算モデルを以下の式(1a)～(1e)に示す。本研究では2次元浅水方程式を基礎式とする構造格子モデルを用いた。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

運動量式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(uN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (1c)$$

u, v : x, y 方向の流速成分(m), τ_{bx}, τ_{by} : x, y 方向成分のせん断応力(N/m²), h : 水深(m), H : 水位($H=h+z$, z は地盤高)(m), M, N : x, y 方向の流量フラックス($M=uh, N=vh$)(m²/s), g : 重力加速度(m²/s), ρ_w : 水の密度(kg/m³)
抵抗則にManning式を用いると以下のようなのである。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (1d)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (1e)$$

ρ_w : 水の密度(kg/m³), g : 重力加速度(m²/s), n : Manningの粗度係数

3. 地下空間での浸水解析条件

(1) 地下空間での浸水解析ケースの設定

地下空間への流入後における浸水解析ケースは、以下の4ケースを設定した。

- ① CASE-1: 通路のみ
- ② CASE-2: 通路, 店舗
- ③ CASE-3: 通路, 店舗, 地下駅
- ④ CASE-4: 通路, 地下駅

a) 店舗の考慮 (CASE-2, CASE-3)

地下街店舗の営業時間内においては、地下街利用者も多いが、地下街管理者（防災センター、警備員含む）や店舗従業員数も充足している。

一方、営業時間外（店舗休業日や早朝・夜間など）は、地下街管理者や店舗従業員数が少ないが、地下通路としての利用者は存在する。営業時間外に、地下での浸水が生じた場合には、地下街管理者等が少ない一方、店舗部分はドアの施錠やシャッターにより通路部分の浸水深が上昇するなど、水害時の被害拡大が懸念される。

したがって、店舗の有無を考慮することにより、地下街の「通常営業時間内」と「早朝・夜間・休日」の違いを見ることを目的としている。

b) 地下駅の考慮 (CASE-3, CASE-4)

既往研究⁹⁾においては、地下駅を考慮しない条件としていたため、地下空間での浸水深を過大（計画上の安全側）に評価している。地下駅は、地下街よりも低いフロアレベルに位置しており、地下街に流入した雨水の多くは地下駅に流入するものと推測される。本研究においては、地下駅を考慮することにより、実態に近い条件としている。

(2) 地下空間のモデル化の設定

a) 範囲とフロアレベル

対象とした大規模地下街の範囲及びフロアレベルでの高低差を図-2に示す。この大規模地下街のフロアレベルでの高低差は、現地での実測調査結果である。

なお、メッシュのサイズは、解析範囲、通路幅、店舗の大きさ等を考慮し2mの正方向格子とし、粗度係数は現場状況から0.020（粗いコンクリート程度）を用い、計算差分時間は0.005秒とした。

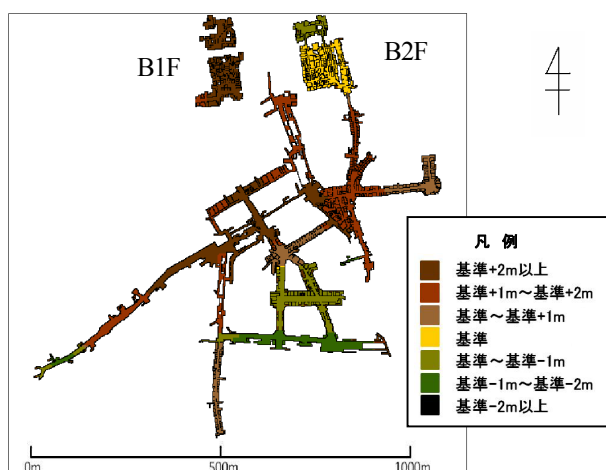


図-2 地下街のモデル図とフロアレベルでの高低差

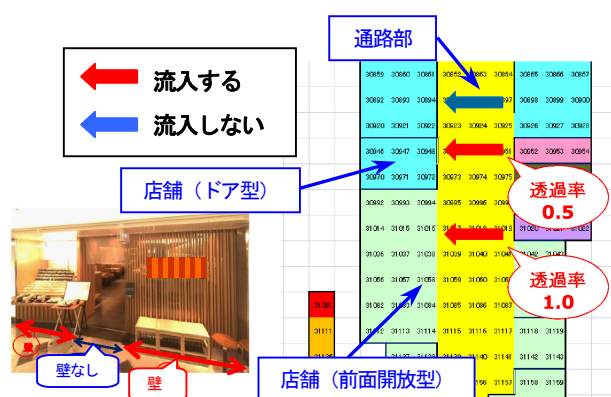


図-3 店舗と透過率の設定条件

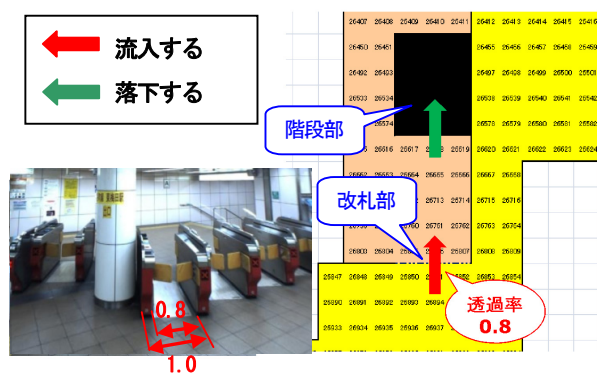


図-4 地下駅と透過率の設定条件

b) 店舗の設定

店舗を考慮するケース（CASE-2,3）については、ドア形式の出入り口については、透過率0.5として設定（メッシュ長2mに対し、ドア幅を1mと設定）し、全面開口の店舗の店舗は透過率1.0、壁部分は不透過として設定した（図-3）。

c) 地下駅の設定

地下駅については、改札部の透過率を0.8（改札幅：現地調査）と設定し、下層の地下ホームに通じる階段部分は、落水条件とした（図-4）。

表-1 岡崎豪雨の概要

生起年月日	H20.8.29
観測地点	岡崎市美合町
最大1時間降水量	146.5 mm
総降雨量	242.0 mm

(注) 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。

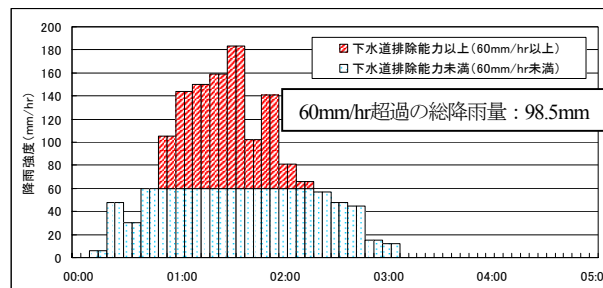


図-5 ハイエトグラフ（岡崎豪雨）

(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）」を対象とした。

岡崎豪雨の概要は、表-1に示すとおりである。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-5参照：10分単位でのハイエトグラフ）。

なお、当該降雨は、対象地域における下水道排水能力（計画値：60mm/hr）を大幅に超過しており、60mm/hr以上の総降雨量は98.5mmとなっている。

(4) 地下への流入条件

岡崎豪雨を外力として、InfoWorksCSで計算した大規模地下街への流入量を図-6に示す。図中のエリアについては、図-7に示すAreaA～Fのエリアごとでの水量を表している。大規模地下街への流入量のピークは、降雨量のピークよりも約1時間遅れることになる。また、エリアにより、流入量は大きく異なり、AreaBではピーク時で約20m³/sの流入が生じる。なお、この流入特性の違いは、各地区における下水道排水能力、及び地表の微地形（凹部）等に起因している。

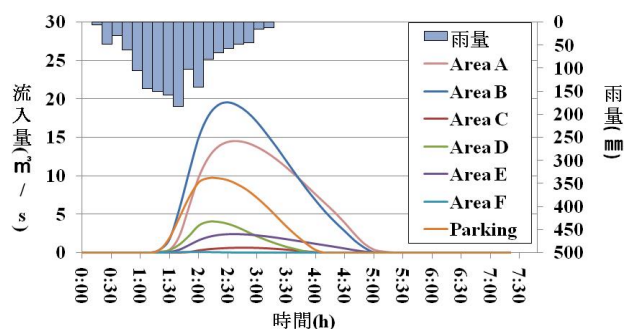


図-6 ハイエトグラフと地下への流入量（岡崎豪雨）

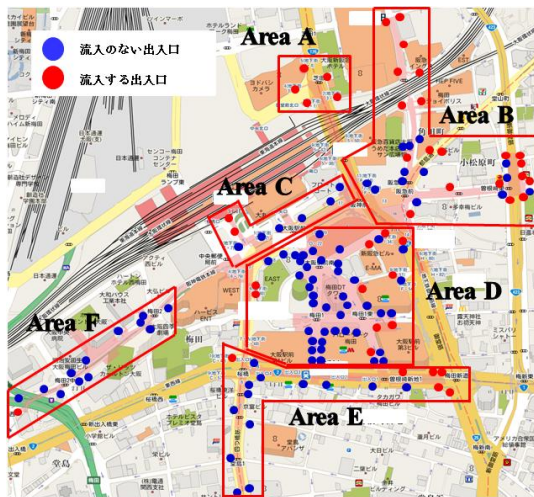


図-7 地下空間のエリア分けと雨水流入出入口の分布図
(Infoworks CSによるシミュレーション結果)

4. 地下空間での浸水解析結果

(1) 発生時刻の違いによる浸水深の違い

各浸水解析ケース（CASE-1～4）における地下街での最大浸水深を図-8に示す。

「CASE-2：通路・店舗」と比較し、通路のみのCASE-1の場合は、浸水面積が狭くなるため（図中の(A)部分等）、地下街全体の最大浸水深が増加する。例えば、図中(A)の部分については、CASE-2では0.5～1.0mのレンジとなっているが、CASE-1においては、1.0～2.0mのレンジに増加していることが分かる。

すなわち、地下街店舗の営業時間外に地下浸水が生じた場合には、営業時間内に比べ、水深が大きくなる場合もあり、避難危険度も高くなる。これは、避難計画を検討する上でも、考慮しておくべき事項であると考える。

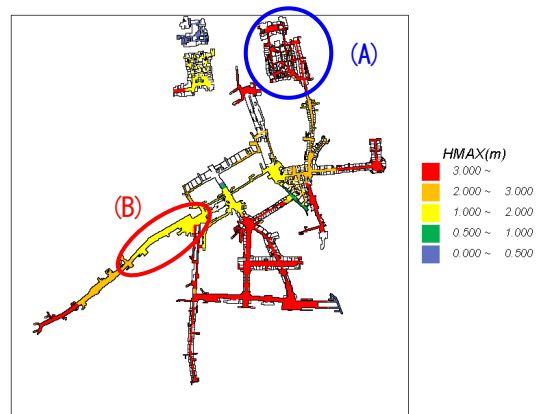
(2) 地下駅の考慮

地下駅への流入を考慮したCASE-3の場合は、地下駅への落水が大きく影響し、0.5m以下のレンジが50%以上となる。面的な浸水深の傾向として、地下駅への接続高よりも高いフロアについては、最大浸水深が0.5m以下になる一方、地下駅への接続よりも低いフロアについては、地下流入水の排水先がなく、深い浸水となる。

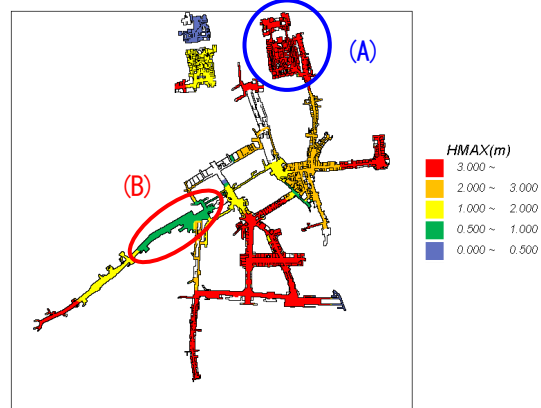
地下駅を考慮した場合は、地下街への総流入量288千 m^3 （地下駐車場除く）のうち、CASE-3の場合では222千 m^3 （77.0%）が地下駅に流入することになる。

したがって、避難計画等の算定の場合には、地下駅を考慮しなければ過大（計画上の安全側）な評価結果となるため、考慮した上で避難計画を策定することが妥当であると言える。

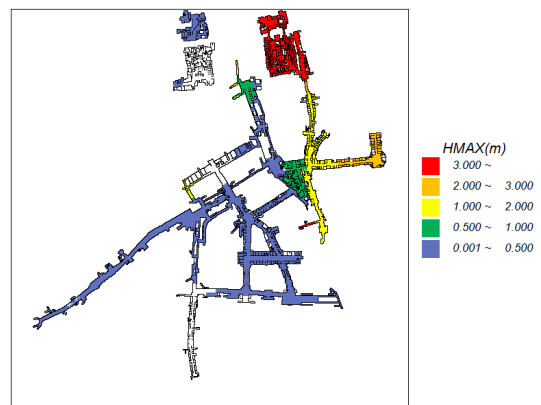
なお、CASE-4（通路・地下駅）の場合は、店舗浸水量に比べ、地下駅への流入量の方が卓越するため、浸水深の傾向とすればCASE-3とほぼ同様となる。



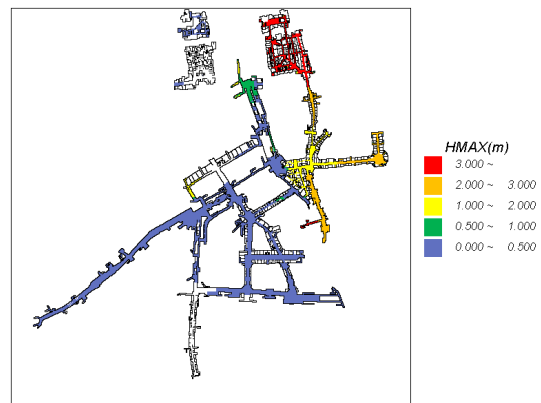
(1) CASE-1：通路のみ



(2) CASE-2：通路・店舗



(3) CASE-3：通路・店舗・地下駅



(4) CASE-4：通路・地下駅

図-8 地下街の最大水深

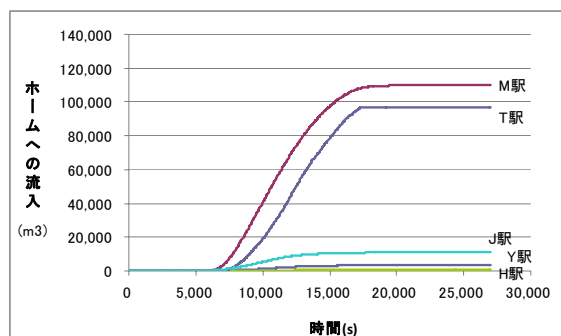


図-9(1) 地下駅への流入状況 (CASE-3の場合)

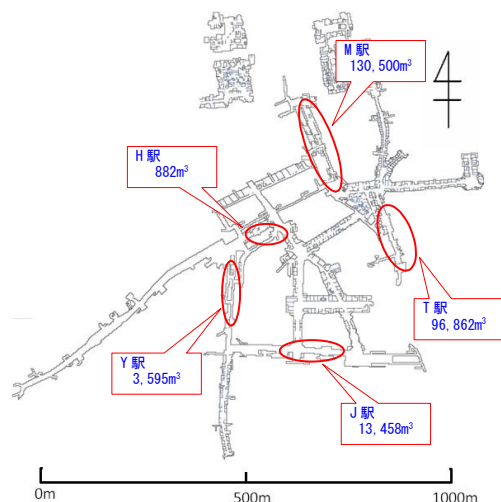


図-9(2) 地下駅への流入状況 (CASE-3の場合)

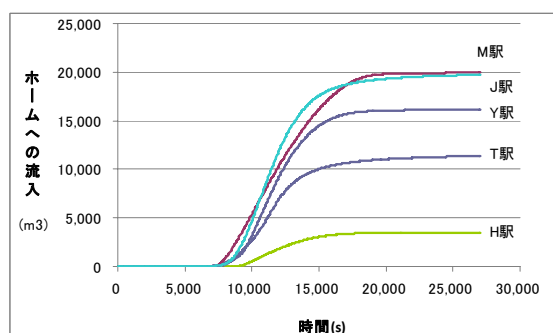


図-10 地下駅への流入状況 (CASE-B : 対策あり)

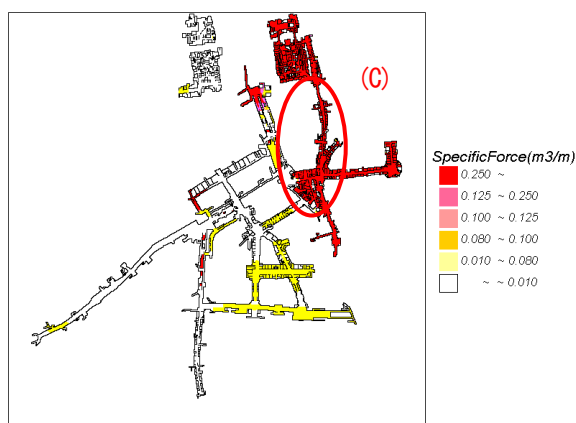


図-11(1) 最大単位幅比力の状況 (CASE-A : 対策なし)

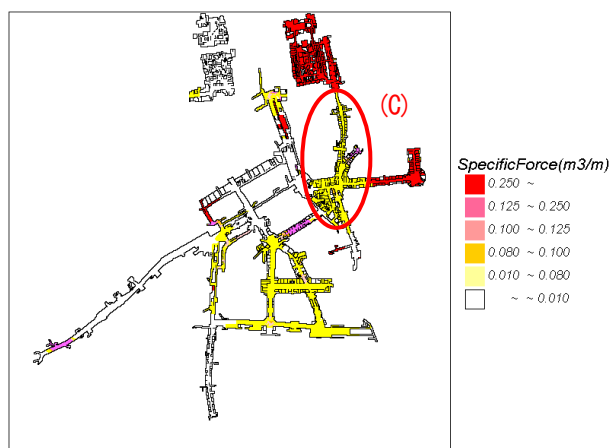


図-11(2) 最大単位幅比力の状況 (CASE-B : 対策あり)

5. 地下への流入防止対策の効果

(1) 検討の条件

CASE-3 (通路・店舗・地下駅) を対象として、地下への流入防止対策の有無について、「単位幅比力を指標とした避難困難度」と「被害額」を用いて、対策効果を検討する。検討ケースは、以下に示すとおりとする。

- ・ CASE-A : 対策なし
- ・ CASE-B : 地下への階段部に止水板 (H=0.5m) を設置
止水板の設置箇所については、以下の降雨を外力とした場合において、地下への流入が共通して生じた出入り口16箇所を対象とする。
 - ・ 岡崎豪雨 (H20.8.29, I=146.5mm/hr)
 - ・ 豊中豪雨 (H18.8.22, I=110.0mm/hr)
 - ・ 福井豪雨 (H16.7.18, I=96.0mm/hr)

(2) 地下駅への流入量

図-9に示したCASE-3条件で止水板なし (CASE-A) の場合における地下駅への流入状況に対し、CASE-B (対策あり) の場合の地下駅への流入状況を図-10に示す。例えば、M駅においては、地下駅への流入量は約131千m³から約20千m³と大幅に減少する。一方、地上部での浸水深や地下への流入箇所へも影響を受け、Y駅のように約3千m³から16千m³に増加する箇所も発生する。

(3) 避難困難度からの対策効果

a) 単位幅比力

単位幅比力(m³/m)とは、流れの単位幅あたりの力の大きさであり、式(2a)に示すように単位幅に作用する運動量と水圧の和を単位体積重量で除した値で表される。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (2a)$$

浅井ら⁴⁾の研究より、単位幅比力を用いて避難困難状態と避難限界状態を示すことが可能であり、属性ごとに得られている値を表-2に示す。

表-2 単位幅比力

	避難困難状態	避難限界状態
成人男性	0.125	0.250
高齢男性	0.100	0.200
成人女性	0.100	0.200
高齢女性	0.080	0.160

表-3 被害額の算定項目

直接被害	資産被害 抑止効果	一般資産被害	事業所償却資産 事業所在庫資産	① ②
間接被害	稼働被害 抑止効果 事後的被害 抑止効果	営業停止被害 応急対策費用	事業所 事業所	③ ④

(注) ③において、従業者数は、各店舗2人と設定した。

表-4 被害額の算定結果

(単位: 百万円)					
		Ⅰ. 店舗ごとに算出		Ⅱ. フロアレベルごとに算出	
		CASE-A 対策なし	CASE-B 対策あり	CASE-A 対策なし	CASE-B 対策あり
①	事業所償却資産	1,051	345	1,051	345
②	事業所在庫資産	403	114	403	114
③	営業停止被害	304	114	342	130
④	応急対策費用	1,094	276	1,094	276
	合 計	2,852	849	2,890	865

b) 最大単位幅比力の状況

止水板の対策なし (CASE-A) , あり (CASE-B) における最大単位幅比力の分布状況を図-11に示す。

地下流入の危険度の高い16箇所を重点的に止水することにより、単位幅比力が大きく減少されるフロアもあり (図-11中の(C)等) , 避難上、有効に機能すると言える。

(4) 被害額による対策効果

a) 被害額の算定項目

被害額は、治水経済調査マニュアル (案) ¹²⁾を基本とし、地下街での特性として以下の条件を設定した。

- ① 最終水深ではなく、最大水深でのデータを使用
- ② 「床下」と「床上」の区分に分け、浸水深別被害率を適用
- ③ 営業停止期間の差異を比較するため、「Ⅰ. 店舗ごと」と「Ⅱ. フロアレベル同一区間ごと」に被害額を算定
- ④ 事業所 (店舗) に関する4項目で算出 (表-3)
- ⑤ 対象店舗数は601店舗であり、解析上少しでも水深があれば被害対象とする

b) 被害額の算定結果

被害額の算定結果を表-4に示す。

CASE-A, Bを比較すると、Ⅰ. 店舗ごとに算出したケースでは、CASE-Aの2,852百万円に対しCASE-Bでは849百万円となり、被害額を70.2%減少できることになる。

また、「Ⅱ. フロアレベルごとに算出」のケースでは、「Ⅰ. 店舗ごとに算出」のケースよりもCASE-Aの場合で1.3%、CASE-Bの場合で1.9%、高い被害額となっている。これは、同一フロアレベルごとにエリア分けし、エリア内で一番長い期間停止している店舗に合わせて営業停止期間を設定していることに起因する。

6. 結論

本検討により得られた主な結果を以下に示す。

- ① 地下街の店舗の営業時間内と時間外では、地下街での浸水深に差異が生じる可能性があるため、避難計画策定の上で考慮しておく必要がある。
- ② 避難計画等の策定の場合には地下鉄を考慮しなければ過大となるため、考慮した上で避難計画を策定することが妥当である。
- ③ 地下への流入危険箇所を重点的に止水することにより、地下浸水時の単位幅比力の減少が確認され、被害額においても70.2%減少できるという試算結果を得た。

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・石垣泰輔・尾崎平・戸田圭一: 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, 水工学論文集, Vol.55, 2011.
- 10) 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.
- 11) 井上知美, 川中龍児, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 内水氾濫によ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.55, 2011.
- 12) 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル (案) , 平成17年4月.

(2011. 9. 30受付)