

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

SAFETY EVACUATION FROM UNDERGROUND MALL DURING URBAN FLOODING

井上知美¹・川中龍児¹・石垣泰輔²・尾崎平³・戸田圭一⁴

Tomomi INOUE, Ryuji KAWANAKA, Taisuke ISHIGAKI, Taira OZAKI, Keiichi TODA

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)

²正会員 工博 関西大学 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)

³正会員 工修 関西大学 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 Ph. D. 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Torrential rainfalls have been observed frequently in recent years and these rainfalls caused inundations in urban and rural areas. Intensity of such rainfalls were sometimes excess over the design rainfall of drainage systems and rain 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, underground flooding in a mega-underground mall were investigated by using 2D shallow flow model with structural mesh and evacuation from there was also studied with the criteria of safety evacuation obtained by evacuation tests. The results show that flooding processes and safety of evacuation are quite different in the two cases with and without the consideration of drainage system. It means that the inflow conditions into underground space are depend on calculation results of rainwater flooding.

Key Words : urban flooding, underground space, evacuation

1. はじめに

近年、地球規模の気候変動の影響と考えられるゲリラ豪雨と呼ばれる集中豪雨の発生回数が増加している。時間雨量50mmを超える降雨も少なくなく、時間雨量100mmを超える降雨も観測されている。最近10年間の平均では時間雨量50mmを超える降雨は1年間に200回以上である。さらに、地表面がコンクリートやアスファルトによって被覆され、保水・遊水機能が低下している。都市部の雨水排除は下水道施設に依存しているが、その雨水排水能力は一般的に時間雨量40~50mm程度の雨にしか対応しておらず、この雨量を超える降雨が発生すると内水氾濫が生じる恐れがある。そしてその氾濫水は地下空間へと流入し、地下街・地下鉄などの都市機能を大きく麻痺させる。過去の都市型水害において、地下空間への浸水被害、施設物品の被害のみでなく、地下空間からの避難が遅れ、人命が失われたという事例もある。

従来からこのような問題を解決するため、地下空間の浸水解析や避難に関する検討が行われている。戸田ら¹⁾は京都市御池地下街を対象として、実物大の1/30の大き

さの亚克力製の模型を用いて実験を行っている。また、貯留槽モデルにより数値解析を行い、地下空間の浸水解析に適用可能であること、地下街からの避難を考える際に平面部と階段部の避難可能性をともに考慮することが重要であることを指摘している。また、関根ら²⁾は新宿駅周辺を対象に下水道網を対象とした雨水の排水計算を行い、内水氾濫シミュレーションを行っている。解析モデルとして地表面における内水氾濫モデル、下水道網による雨水流出モデル、地下街の浸水モデルを用いており、解析の結果、浸水被害の恐れのある区域と規模を予測している。しかしながらManningの粗度係数の値など検討の余地を残している。

一方、避難に関して、石垣ら³⁾は実物大の階段模型とドア模型を用いて、避難に関する実験、検討を行っている。実物大階段模型を用いた実験では、上流端水深を変化させ、被験者の昇降時間を計測している。上流端での水深の上昇に伴い避難が困難になることが分かり、成人女性では0.2m、成人男性は0.3m以上になると避難の所要時間は大幅に増加する。地下室からの避難を想定した実験では、ドア前面水深が成人男性で0.4m、成人女性で0.3mまでがドアを押しあけられる限界であり、地下室か

らの避難は早期に行うべきであることを指摘している。また、避難困難度指標として単位幅運動量(u^2h)のみを用いていたが、大西ら⁴⁾の研究では運動量と水深の大きさを表現できる単位幅比力($u^2h/g+h^2/2$)を新たな指標として提案している。

以上のように従来の研究において、浸水解析では模型実験とともに数値解析が行われ、近年では下水道網を考慮した内水氾濫シミュレーションも行われている。避難困難度については、単位幅比力が新たな指標として得られている。本研究の目的は、大規模地下街を対象とし、①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づいて大規模地下街の地上部の浸水深が一様に上昇する場合、②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合、の2つの条件のもとでの地下空間浸水時の流入量を用いた浸水解析を行い、浸水状況を比較するとともに、単位幅比力を用いて避難困難度の検討を行い、安全な避難計画の策定の際に考慮すべき事項を明らかにすることである。

2. 対象地の概要

対象としたのは実在する大規模地下街である。(図-1)この大規模地下街は約1km四方に広がる日本で有数の地下街で、隣接する駅が7つあり、百貨店、ビルなどが存在する。また、対象地域の地上の地盤高を図-2に、大規模地下街のフロアーレベルでの高低差を図-1に示す。この大規模地下街のフロアーレベルでの高低差の図は実際に現地へ赴いて調査を行った結果である。調査では、地上と地下街を結ぶ階段の段数を数えるとともに、階段の高さ、幅の計測を行った。この調査により地上と地下街の高低差を求めた。また、地上の地盤高を基準に出入口の高さを現地調査結果に基づいて設定した。大規模地下街の出入口を図-3に示す。全出入口は129ヶ所であり2m幅の出入口は49ヶ所、4m幅の出入口は80ヶ所である。

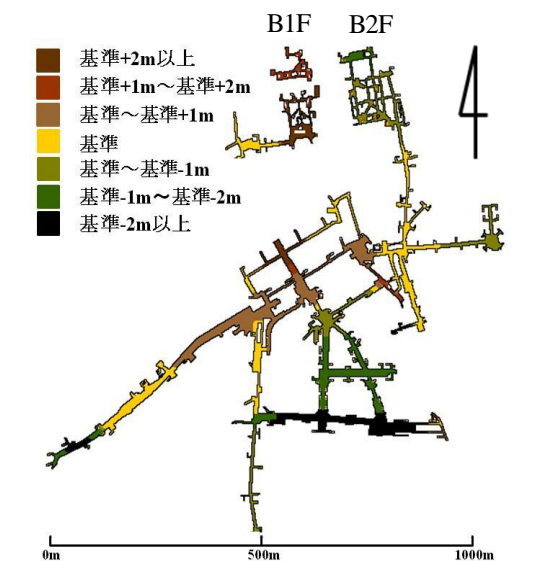


図-1 地下街のモデル図とフロアーレベルでの高低差

3. 浸水解析

(1) 浸水解析の条件

本研究では大規模地下街の流入条件として、簡易的な方法である①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づいて大規模地下街の地上部の浸水深が一様に上昇する場合、現状に即した方法である②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合の2ケースを設定し、大規模地下街の浸水解析を行った。①は、水位が2cm/min上昇するものとし、敷高の低い出入口より浸水が開始するものとした。流量は、出入口幅と水深の関係より求め、それを大規模地下街への流入条件とした。②は、実降雨用いた解析を行い、出入口地点の流入量を求め、それを大規模地下街への流入条件とした。InfoWorks CSとはWallingford Software社より開発された下水管路網を考慮した地上部の氾濫解析可能な解析ソフトである。図-4は、InfoWorks CS解析対象とした処理区であり、管路網モデルである。計画処理面積は1,215ha、管径200mm以上の

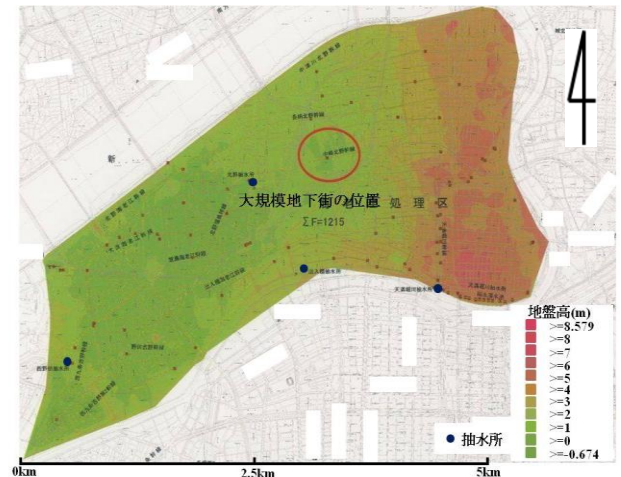


図-2 対象地域の地上の地盤高

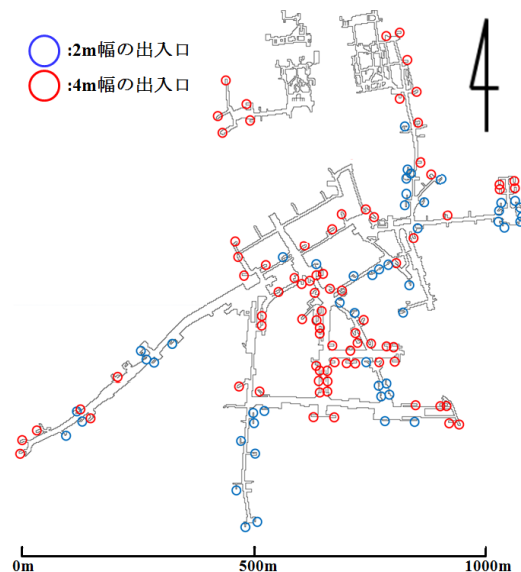


図-3 地下街の出入口

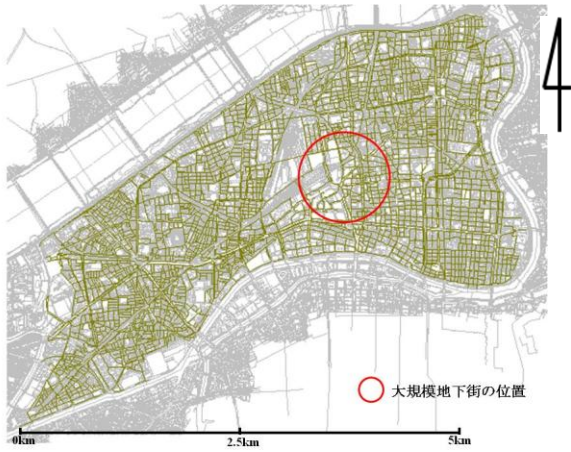


図-4 対象地域の管路網モデル

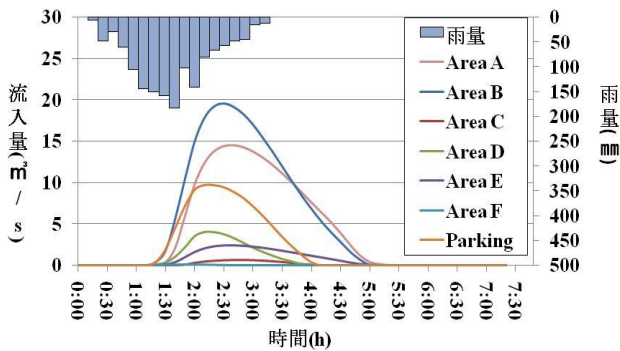


図-5 平成20年8月末の岡崎豪雨の雨量とInfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した地下街への流入量

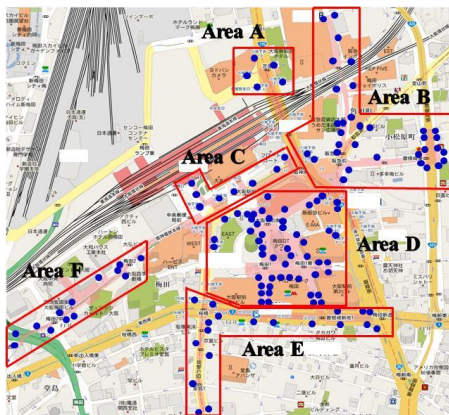


図-6 地下街流入箇所のエリア分け

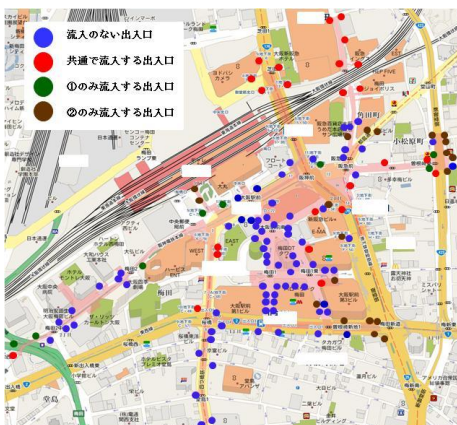


図-7 雨水が流入する出入口

管路を考慮し、管本数は32,396本である。また、地表面の氾濫解析は、道路部分のみを考慮し、2次元氾濫解析とし、マンホール地点における溢水、再流入を考慮している。なお、本研究では建物群への浸水はしていない。

①では、地下空間における浸水対策ガイドラインに基づき、地上での水深上昇速度を2cm/minとし、地上での冠水状況を最大1mと想定し、地上水深が1mとなる $t=3,000s$ までは水深を上昇させ、それ以降は一定とした。解析時間は6,600s、Manningの粗度係数は0.02、計算差分時間は0.01sとした。なお、大規模地下街への流入水の排水は行わない条件にて解析した。

②では、平成20年8月末の岡崎豪雨を外力とした。この豪雨は1時間で146.5mmを記録し、8月の降水量では観測史上1位を記録している。用いた降雨とInfoWorksCSで計算された大規模地下街への流入量を図-5に示し、図-6のエリアごとにAreaA～Fで表している。またParkingは地下駐車場である。図より、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時間遅れていることが分かる。降雨当初の雨水は、雨水ポンプにより放流されているが、降雨量が多いため降雨量のピークを迎える前にポンプ能力を上回る雨水が下水道に流入する。ポンプ能力以上の雨水は、地表面に溢水し、道路を流下しながら水位が上昇し、地下街へと流入するためピークに差が生じる。大規模地下街の浸水解析時間は降雨開始から27,000s、Manningの粗度係数は0.02、計算差分時間は0.01sとし、大規模地下街への流入後の排水は行っていない。

上記の地上氾濫条件を基にした結果、①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づく場合、雨水が流入する出入口は32ヶ所であり、②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合、雨水が流入する出入口は45ヶ所である。雨水が流入する出入口を図-7に示す。浸水解析の対象は大規模地下街の通路部分のみとし、地下鉄・店舗・他ビルなどは対象外とした。また、メッシュのサイズは2mの正方格子である。出入口の幅は流入の際に重要であり、2m、4mの幅で考慮している。

(2) 浸水解析の計算モデル

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

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

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

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

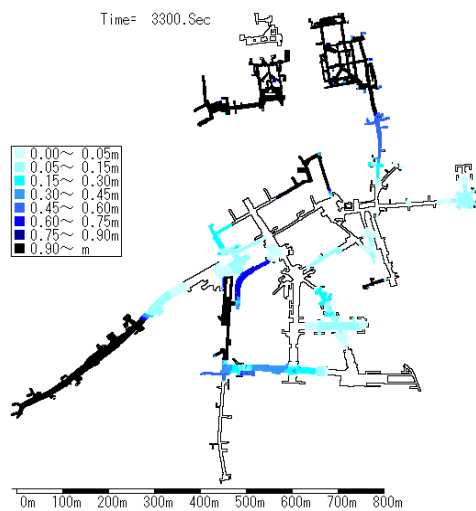
(3) 浸水解析の結果

①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づく場合, ②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合, それぞれの浸水状況を図-8, 図-9に示す。①と②の

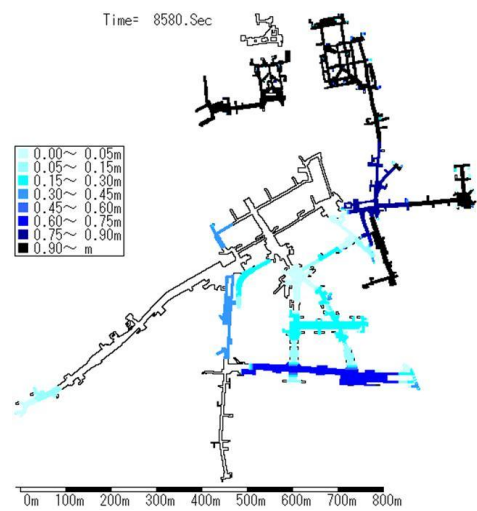
大規模地下街への流入量が(i) 50,000m³ (ii) 150,000m³となった時を示している。さらに全体の面積に対する浸水面積割合を図-10に, 流入量の変化の様子を図-11に表した。②の条件では大規模地下街への雨水の流入は, 降雨開始より約4,000s後から始まるが, 図-10, 11は大規模地下街への流入開始時間をゼロとして比較した。

(i) 大規模地下街への流入量が50,000m³のとき, 浸水面積割合は同じであり, ①の場合, 北側と西側での浸水深上昇が激しく, 中央部からも徐々に浸水している。②の場合, 北側と東側からの浸水深上昇が顕著であり, 南東側からも浸水域が広がっている。

(ii) 大規模地下街への流入量が150,000m³のとき, 北側と東側においては, ほぼ同様に浸水しており, 浸水面積割合はほぼ同じである。しかし, 南側と西側では大きな違いが見られ, ①の場合では0.90mを超える浸水深であるにもかかわらず, ②の場合ではあまり浸水していない。

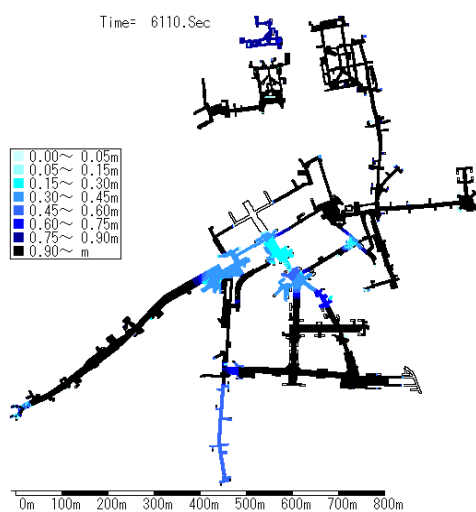


①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づく場合

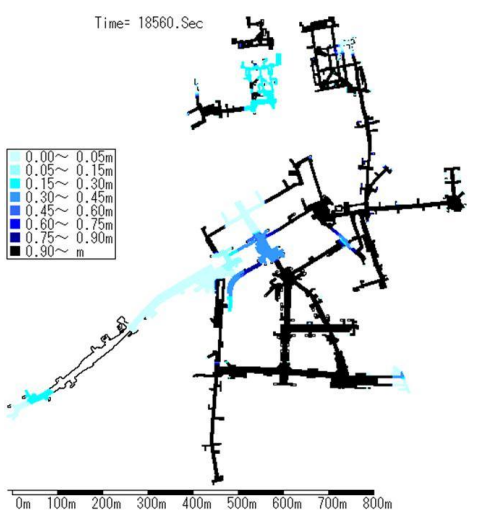


②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合

図-8 流入量50,000m³の時の浸水状況



①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づく場合



②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合

図-9 流入量150,000m³の時の浸水状況

浸水面積割合をみると、①ではほぼ一様に浸水面積が増加し、②においても、大規模地下街への流入開始から約10,000s(降雨開始から14,000s)までは①と同様に浸水面積が増加している。

流入量をみると、①はほぼ一様に流入量が増加している。②においても、大規模地下街への流入開始から約7,000s(降雨開始から11,000s)までは①と同じ様に浸水面積が増加しており、それ以降は徐々に増加していることが分かる。

①、②を比較した結果、①では、マウンドアップを考慮した上で大規模地下街の地上の地盤高の低い地点から大規模地下街への流入が開始される。②では、雨水排水施設が考慮されているため雨水排水能力の低い箇所から大規模地下街への流入が開始される。このことにより、流入地点および各地点における流入量が異なることが明らかになった。重要なことは①の条件で地上の地盤高とマウンドアップを考慮した結果と、②の条件で雨水排水能力を考慮した結果を比べると溢水が地盤の低いところから必ずしも生じるわけではなく、対象エリアの雨水排水施設の処理能力や配置条件により、溢水地点が異なるということである。

4. 避難困難度の検討

(1) 検討の条件

ここでは避難困難度指標として単位幅比力を用いる。単位幅比力(m^3/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堆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⁵⁾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-1に示す。表-1の値より、単位幅比力において成人男性が一番高い値を示し、次に高齢男性と成人女性、高齢女性が一番低い値を示している。全員が安全に避難する必要があることを踏まえ、高齢女性の単位幅比力の値を評価基準とした。

(2) 結果及び考察

図-12、図-13は、大規模地下街への流入開始から単位幅比力が $0.080\text{m}^3/\text{m}$ (高齢女性の避難困難状態)を超えるときまでの時間を600s間隔で区域を分けたゾーンマップであり、6,000s以降は白色で示している。

表-1 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

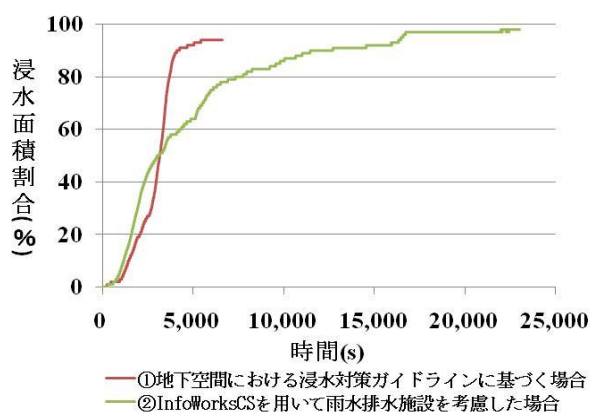


図-10 浸水面積割合(地下街への流入開始から)

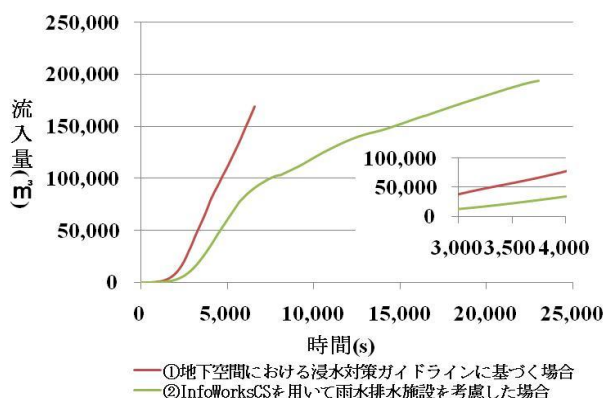


図-11 流入量(地下街への流入開始から)



図-12 ①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づく場合の避難困難度のゾーンマップ

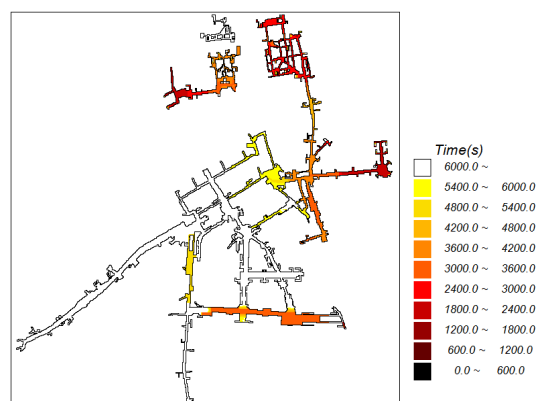


図-13 ②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合の避難困難度のゾーンマップ(地下街への流入開始から)

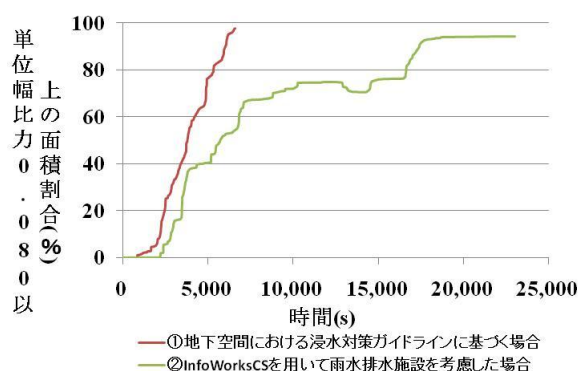


図-14 単位幅比力 $0.08\text{m}^3/\text{m}$ 以上の面積割合(大規模地下街への流入開始から)

①の場合、大規模地下街への流入開始から3,600sで、全体の約42%が単位幅比力 $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を超え、西側では0～600sで危険となることが分かる。

②の場合、大規模地下街への流入開始から3,600s(降雨開始から7,600s)で全体の約22%で単位幅比力 $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を超えている。0～600sで危険となる場所はない。

①と②を比較すると、共通事項は中央部と南側では大規模地下街への流入開始から3,600s以内では単位幅比力が $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を超えないことが分かる。北側においては①で1,200～1,800s、②で1,800～2,400s(降雨開始から5,800～6,400s)と同じくらいの時間で単位幅比力が $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を超えている。また、単位幅比力 $0.08\text{m}^3/\text{m}$ 以上の面積割合の時系列変化を図-14に示す。

雨水の流入する出入口が増加するなどの際にはグラフが急激に増加し、雨水の流入が終わると緩やかになる。また3,600sまでの①、②の避難困難度のゾーンマップでは割合に差が見られる。これは流入量が大幅に違うことによる、と分かる。

5. おわりに

本研究では実在する大規模地下街を対象に、①地下空間における浸水対策ガイドラインに基づいて大規模地下街の地上部の浸水深が一様に上昇する場合、②InfoWorksCSを用いて雨水排水施設を考慮した場合、の2ケースで浸水解析を行った。本研究の重要な結論は、避難計画を立てる際の浸水状況の把握には雨水排水施設を考慮する必要があることを示したことである。また高齢女性を基準とした単位幅比力を用いて避難困難度のゾーンマップを作成した。このような避難困難度のゾーンマップを作成することで、一定時間ごとの浸水時の大規模地下街の危険であると考えられる場所を示すことができた。以上の解析の結果より、避難計画策定時に考慮すべき点を以下に示す。

1)地上と地下街をつなぐ階段は多く存在しており、またどのように浸水するかは条件により異なってくる。避

難者はどこが危険か把握していないので、地下街管理者は実際に誘導できるように管理エリア内、雨水排水施設の脆弱箇所を熟知しておくことである。

2)今回対象としたのは大規模地下街である。大規模であるかないかにかかわらず、地下街にはビルや地下鉄などが隣接しているため、利用客は多い。浸水が始まると単位幅比力は増加する。浸水が始まるまでの避難が必須となり、避難は短時間でなければならない。利用客が分散し出入口に停滞することのないような避難を心がけることである。

本研究では大規模地下街の通路部分を対象として解析を行ったが、店舗、地下鉄など解析において考慮すべき場所は存在する。今後、対象範囲に含めて解析を行う予定である。

参考文献

- 1)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，第48巻，pp.583-588，2004.
- 2)関根正人・河上展久・安武弘道・三好裕：新宿駅周辺を対象とした内水氾濫ならびに地下街浸水過程の数値シミュレーション，河川技術論文集，第8巻，pp.43-48，2002.
- 3)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.
- 4)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.
- 5)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，第53巻，pp.859-864，2009.
- 6)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.
- 7)尾崎平・森兼政行・石垣泰輔・戸田圭一：市街地外水氾濫解析への分布型解析モデルの適用性-模型実験と数値解析結果の比較，下水道協会誌，第47巻，pp.93-102，2010.
- 8)財団法人日本建築防災協会：地下空間における浸水対策ガイドライン・同解説，2002.

(2010. 9. 30受付)