

洪水を対象とした名古屋駅前地下街の 浸水解析と避難に関わる検討

武田 誠¹・鷺山 陸²・佐藤大介³・村瀬将隆⁴

¹正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)
E-mail: mtakeda@isc.chubu.ac.jp

²正会員 静岡県 (〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9 番 6 号)

³学生会員 中部大学大学院建設工学専攻 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

⁴正会員 株式会社パスコ (〒153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2 東山ビル 5F)

本研究では、庄内川の洪水破堤による名古屋の浸水を対象とし、地上と階段、地下街の氾濫水の流動を表現する解析モデルを構築した。このモデルを用い、破堤箇所の違いによる地上の浸水の様子と、名古屋駅周辺の階段および地下街の浸水の様子を示し、地下街の避難対策について考察した。本研究により、庄内川左岸の JR 盛土上流部の破堤による浸水が、名古屋駅前の地下街の地下浸水にとって大きな被害を生じさせることを改めて示した。また、避難困難度指標を用いて地下街の避難について検討し、地下街よりも階段が先に避難困難になることを示した。さらに、浸水前の避難完了が非常に重要であることを示し、避難対策の在り方を考察した。

Key Words: underground spaces, flood, dike break, inundation, Nagoya, numerical simulation

1. はじめに

近年、日本では豪雨による洪水災害が頻繁に発生している。特に、平成 30 年 7 月豪雨および令和元年台風 19 号による豪雨では多くの河川において決壊・越水が発生し、周辺住民は甚大な被害を被った。これらの災害が大都市で発生した場合、甚大な被害をもたらすことは容易に予想される。特に大都市にある地下街は浸水に対して非常に脆弱である。したがって、地下街を対象とした、大規模浸水と避難に関する研究は重要と考える。

地下空間の浸水と避難に関しては、石垣、尾崎、戸田ら¹⁾、川中、石垣ら²⁾、関根ら^{3),4)}の研究がある。それぞれ大阪、東京を対象に浸水と避難に関する数値解析モデルを構築し、地下街などの地下空間の浸水の様子と避難シミュレーションまたは避難困難度指標を用いて浸水時の避難対策を検討している。本研究では、庄内川が破堤した場合の地上の浸水の様子および地下の浸水の様子を明らかにし、避難困難度指標を用いて避難対策に関する考察を行う。

これまで、著者らは、名古屋を対象に、庄内川の洪水破堤に伴う地下空間（特に地下鉄）を含めた都市浸水の特性を検討してきた。ハザードマップの浸水情報と地下

空間の入口情報の比較から、洪水氾濫が生じた場合の地下浸水の危険性を示した⁵⁾。また、河口から 14km 地点左岸の JR 盛土より上流域で破堤が生じた場合、地下浸水が大きくなることを示した⁶⁾。さらに仮想的な浸水を対象に名古屋駅前地下街の詳細な解析モデルを構築した⁷⁾。名古屋駅前地下街を対象とした解析では、現実的な浸水を対象にした計算および避難に関する考察が課題として残っていた。避難対策における重要な情報は、決壊から浸水までの時間、浸水する入り口の順番、階段を利用できなくなるまでの時間ならびに地下街の浸水の様子である。本研究では名古屋駅前を対象に庄内川が破堤した場合の、地上の浸水解析および駅前東側地下街の浸水の数値解析を実施し、上記の情報を示すことを目的とする。

2. 数値計算の概要

2.1 数値解析モデル

本研究では 2 ステップの計算を行う。

ステップ 1⁸⁾：洪水流を 1 次元不定流モデル、地表面の氾濫流をデカルト座標の平面 2 次元不定流モデルで解析し、互いを越流公式で接続する。また、地下街および地下鉄駅を一つのボックスとしてとらえ、水の連続式を

用い、さらに地下鉄線を伝う流れはスロットモデルを用いた1次元不定流モデルで解析した。

ステップ2⁷：ステップ1の計算の地下街の入口の水理情報を出力し、その情報を受けて、名古屋駅前地下街の詳細な計算を行う。階段の流れは1次元不定流モデルで、地下街の流れはデカルト座標の平面2次元不定流モデルで解析した。満水を考慮するため仮想的に天井の面積の1/10が開いているとするスロットモデルを導入した。

2.2 計算領域と計算条件

ステップ1では庄内川の想定破堤氾濫を対象とし、地上を50m格子で表現し、地盤高は5mメッシュ標高値を平均して設定した。ステップ2では名古屋駅の東側の地下街を計算対象とし、形状の表現と計算負荷を考慮して3.2m格子を用いた。地下空間の床高は地表面の最低地盤高から3m低いところに位置し、水平であると仮定した。また、蹴上高0.25m、踏み面0.5mの階段とした。図-1に地上における計算領域を、図-2と図-3に庄内川と名古屋駅の位置関係および地下街における計算領域と入口番号を示す。本研究では、庄内川の計画高水流量4,400m³/sをピークに持つ図-4の流量ハイドログラフを河川の上流端に与え、下流は大潮の満潮時を考慮した潮汐変動を与えた。庄内川の左岸堤防（河口から14kmから17kmまで1km毎）がピーク時（19時）に100mの幅で破堤する（堤防天端高が地盤高に置き換わる）とした。

2.3 単位幅比力を用いた避難困難度指標

地下街の解析にあたり、避難困難度指標として式(1)の単位幅比力(M)を用いた。

$$M = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (1)$$

ここで、 u ：流速(m/s)、 h ：水深(m)、 g ：重力加速度(m/s²)である。なお、浅井ら⁸⁾によれば、安全に避難できる目安は、高齢女性が0.08m³/m、成人女性および高齢男性が0.1m³/m、成人男性が0.125m³/mである。同様に、避難が困難となる目安は、高齢女性が0.16m³/m、成人女性および高齢男性が0.2m³/m、成人男性が0.25m³/mである。

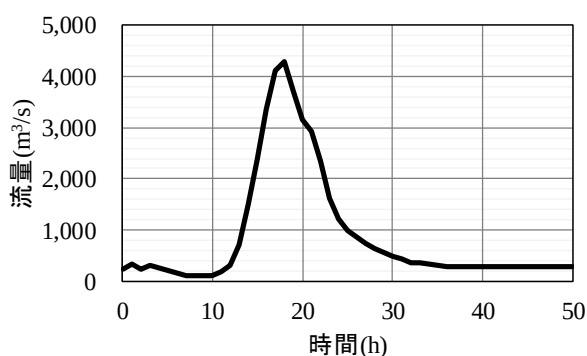


図-4 流量ハイドログラフ

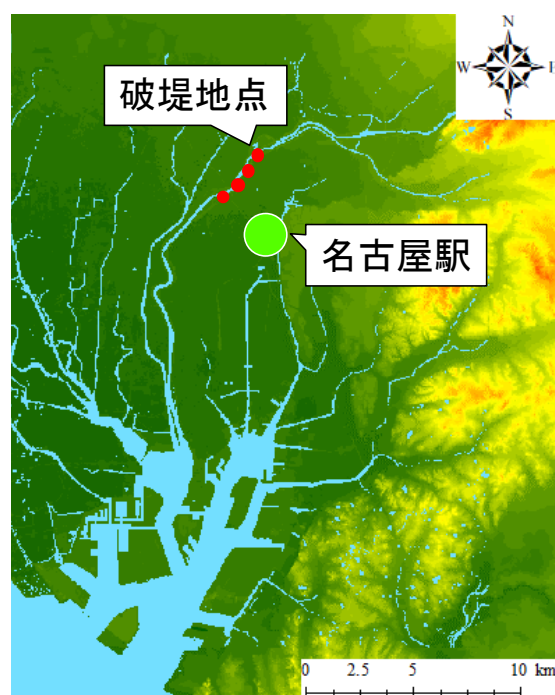


図-1 計算領域（ステップ1）



図-2 地上における計算領域の一部

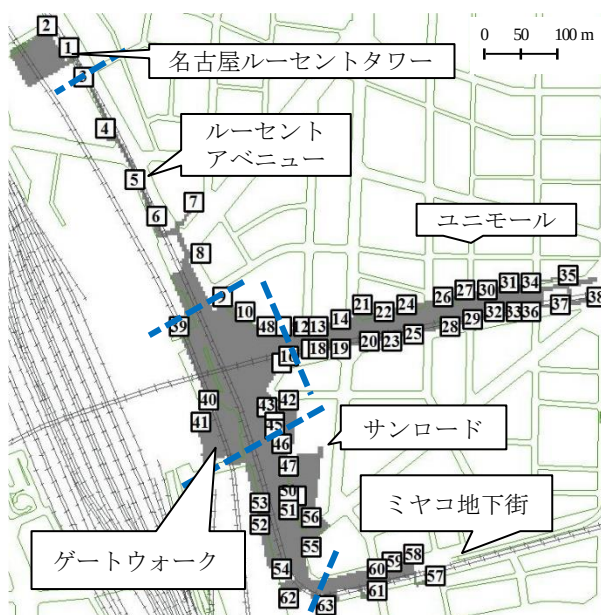


図-3 地下街の計算領域と入口番号（ステップ2）

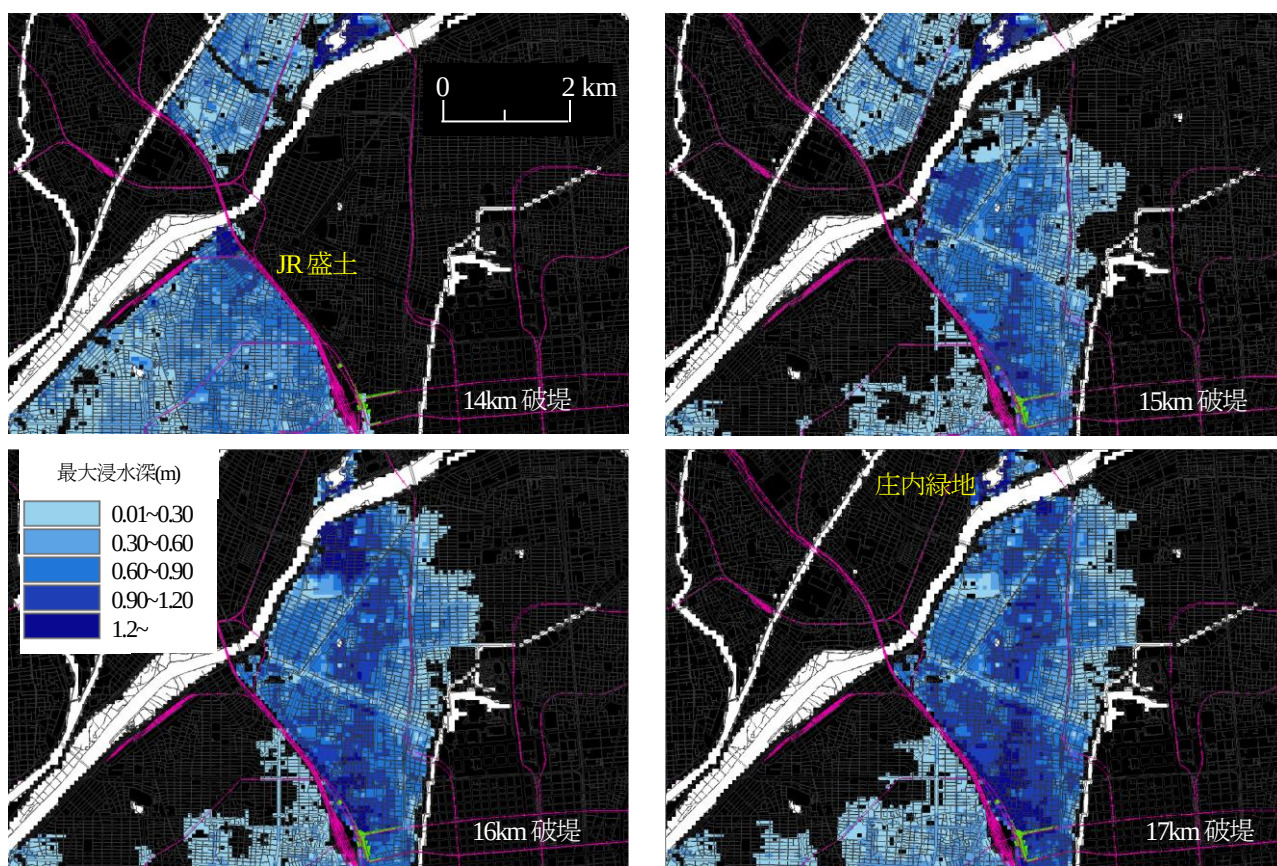


図-5 最大浸水深の分布

3. 計算結果および考察

図-5 に最大浸水深の分布を示す。14km 破堤では、破堤箇所が JR 盛土の下流に位置することから、15km～17km 破堤の場合と大きく異なる結果が得られている。14km 破堤の場合、名古屋駅前地下街（図中の緑色の箇所）にも浸水は広がっているが、その浸水深は小さい。14km 破堤と 15km 破堤の場合、庄内川右岸側にも浸水が広がっている。これは庄内緑地からの越水により浸水が広がっていた。16km 破堤および 17km 破堤では、流量がピークとなる 19 時に庄内緑地の近くで破堤が生じるので、その影響により庄内川の水位が低下し、右岸側の氾濫が生じなかったと考えられる。50m 格子では庄内緑地の堤防高が十分に表現できていないことも考えられるので、再度検証したい。また、16km 破堤による最大浸水深の分布の名古屋駅前の様子を図-6 に示す。本図から、1.2m を超える浸水深が生じる場所（周囲と比べて地盤高の低い場所）に地下街の入口が存在することが分かる。したがって、庄内川破堤による大規模な浸水が生じる場合、地下空間への流入が生じることが予想される。

図-7 に階段部分の浸水計算の様子を示す。定量的な妥当性評価は十分では無いが、本図に示すように、階段で適切に水理計算が行われていると考える。また、この計算から各階段ステップにおける比力を求めることがで

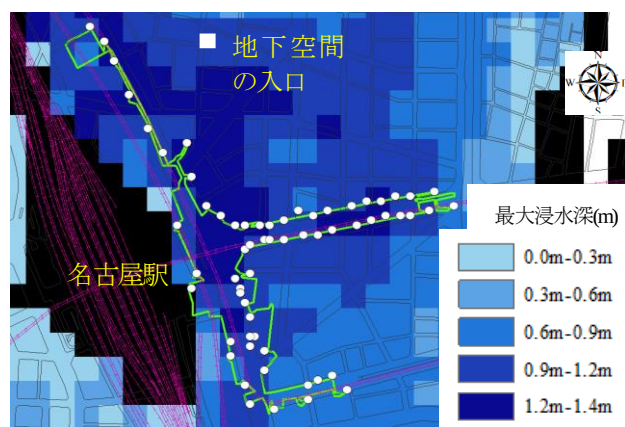


図-6 16km 破堤による名古屋駅前の最大浸水深

きる。表-1 に、地下街の入口の浸水開始時間と、高齢女性の避難困難時間を示す。なお、この浸水開始時間はいずれかの入口に浸水が発生した時間である。避難困難(最短)はいずれかの入口における単位幅比力が高齢女性避難困難指数に達した時間であり、すなわち、この時間に達した場合、高齢女性は、該当する階段を用いて避難することが困難となる。避難困難(全階段)は全ての階段において、単位幅比力が高齢女性避難困難指数に達した時間である。要するに、高齢女性は地下街の外に避難することが困難になる。本研究では、避難困難の目安として高齢女性避難困難指数を用いた。表-1 より、14km の

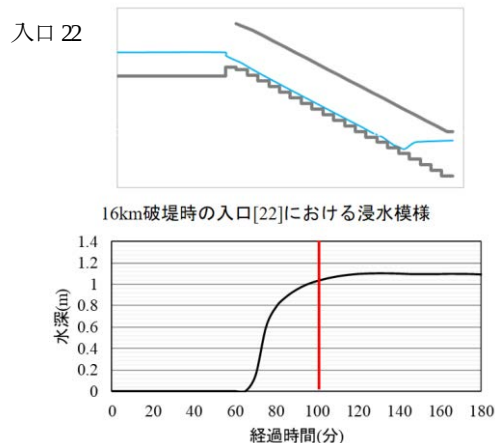
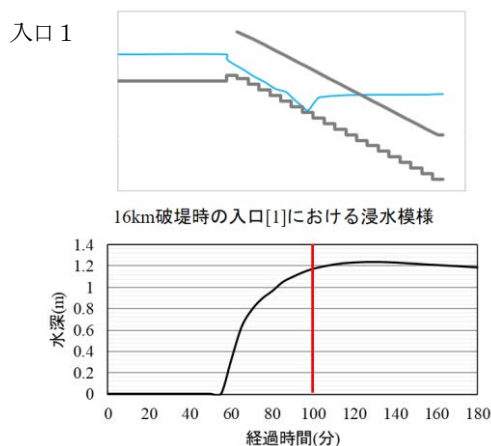


図-7 階段の浸水の様子と階段上部の地面における水深の時間変化

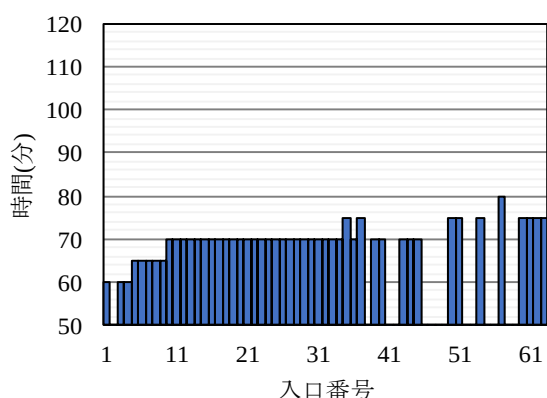


図-8 16km破堤の場合の入口の浸水開始時間

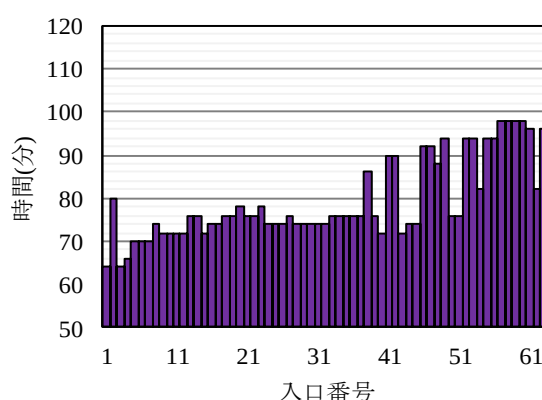


図-9 16km破堤の場合の入口の高齢者が避難困難になるまでの時間

破堤箇所以外においては、値はほぼ変わらなかった。また、表-1 より、浸水開始から全ての入口が高齢女性避難困難指数に達するまでの時間は 15km 地点で 45 分、16km 地点で 38 分、17km 地点で 42 分であった。これは、破堤箇所が 16km のとき、浸水と同時に避難を開始した場合、38 分後には、高齢女性は階段を用いての避難することが困難になることを示す。また、破堤から浸水までの時間が最も短い破堤点は 15km 地点であった。しかし、最も早く高齢女性が避難困難になる破堤点は 16km 地点である。図-8 に破堤箇所を河口から 16km 地点に設定した場合の各入口における破堤から浸水開始までの時間、図-9 に各入口における破堤から高齢女性が階段を用いて避難不能になるまでの時間を示す。これらの図から、60 分から 70 分の間に、多くの入口において浸水が発生するといえる。また、高齢女性が避難できる入口は 70 分から 80 分の間に著しく減少する。なお、図-8 で地上の浸水が生じていないのに、図-9 で避難困難となっている入口があるが、これは、入口の地下街につながっている階段部で浸水深が大きくなり、避難困難と判別されたためである。図-10 に、15km～17km 破堤による階段の地上部における浸水の有無と地下街の浸水深の分布

表-1 破堤から各項目までの時間

破堤箇所	浸水開始時間	避難困難(最短)	避難困難(全階段)
14km	90 分	無し	無し
15km	55 分	60 分	100 分
16km	60 分	64 分	98 分
17km	60 分	68 分	102 分

の時間変化を、図-11 に 16km 破堤による地下街の流速分布の時間変化を示す。浸水の様子は、時間や流入する水量において変化はあるが、本計算条件の場合、破堤箇所が異なっても概ね同様の浸水の様子であった。この点は、降雨の状況により流入する入口が異なる内水氾濫との違いともいえる。地下街の浸水過程に関して、まず、地下街北側に位置するルーセントアベニュー(地下通路)ならびに名古屋ルーセントタワーから浸水し、次いでユニモールに浸水する。その後、サンロードに浸水し、最後にミヤコ地下街に浸水が生じていた。また、図-11 から、入口付近や狭い箇所から広い箇所への接続部で流速が大きくなることも示された。さらに、浸水の進行に伴い、速い流速箇所は遠方へ移動していることも示された。こ

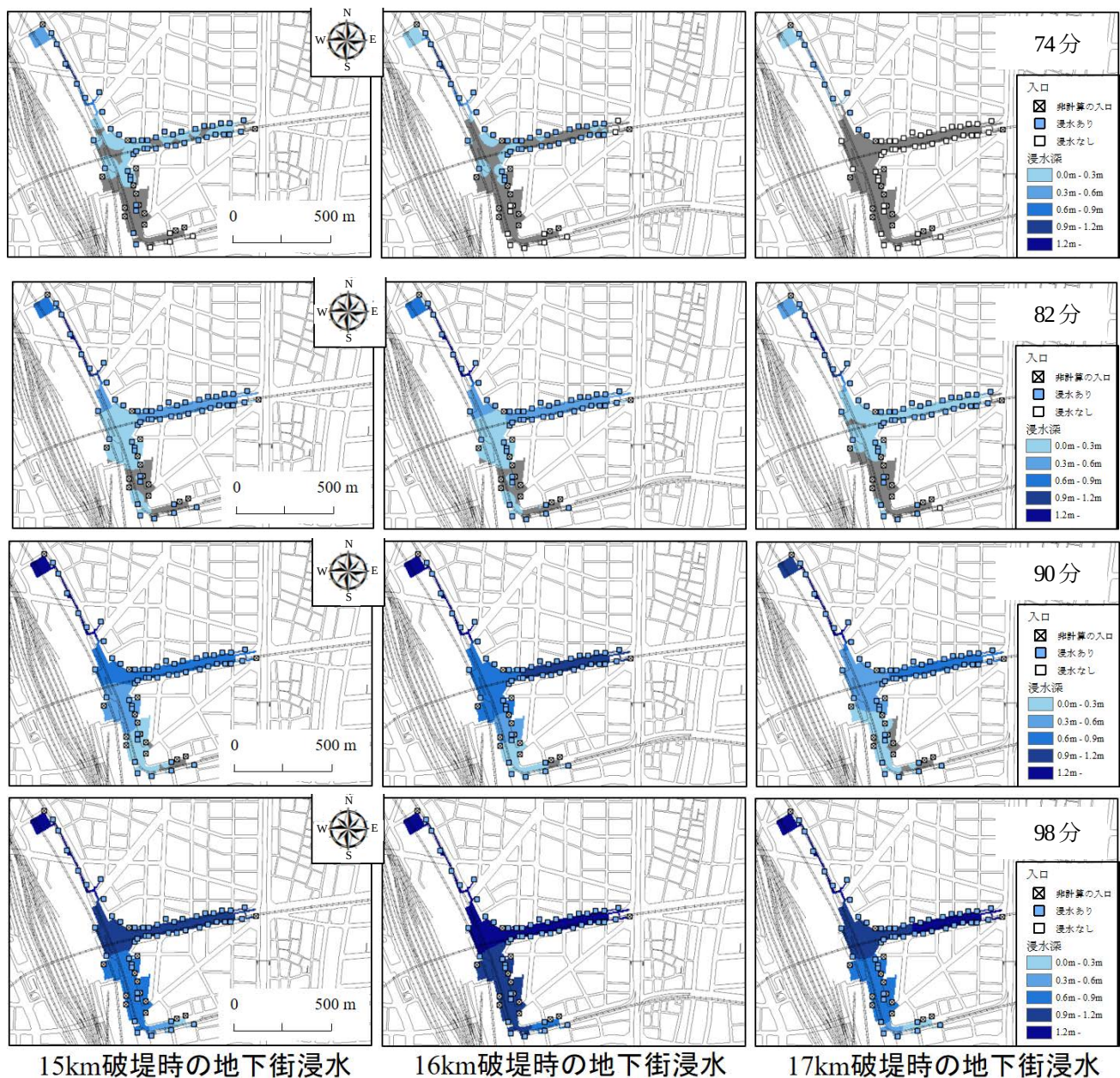


図-10 破堤箇所の違いによる地下の浸水深の様子

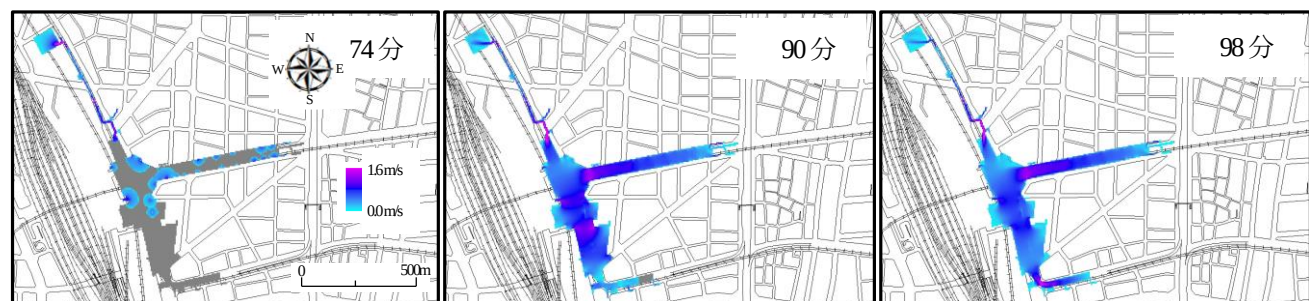
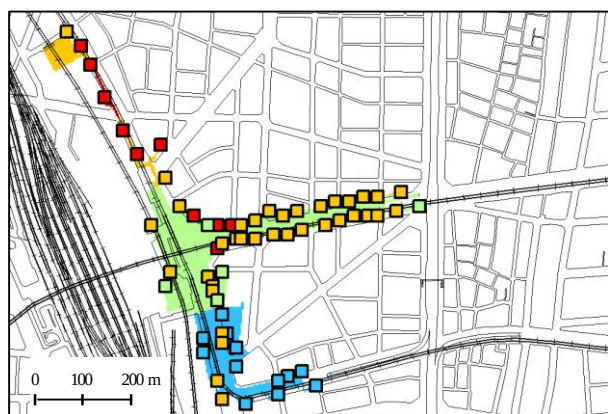


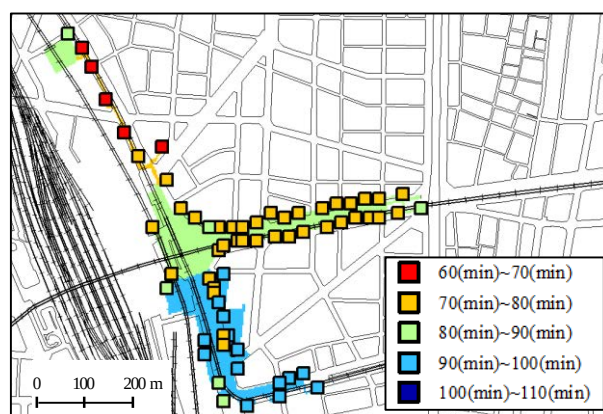
図-11 破堤箇所の違いによる地下の流速の様子(16km破堤の場合)

これらのことから、浸水が生じてからの避難を余儀なくされた場合、ミヤコ地下街方面へ利用者を誘導させることが得策である。しかし、利用者全員をミヤコ地下街方面に避難させると、人の密度が高くなり、避難速度が著し

く低下する恐れがあるため、その途中にある階段を使用し、利用者を適切に分散させることが重要である。これらの検討のためにも、川中・石垣ら²⁾や関根ら⁴⁾のような避難シミュレーションに関する研究は重要である。



高齢女性避難困難になる時間



成人男性避難困難になる時間

図-12 避難困難になる時間（16km破堤の場合）

図-12に庄内川河口から16km地点を破堤させた場合の地下街における高齢女性、成人男性の避難困難になる時間を示す。本図から、避難困難度に関しては、高齢女性、成人男性で大きな差はないといえ、階段部分で避難困難になる時間が早いことと、氾濫水が流入するエリアが早く避難困難になることが分かる。なお、本研究の場合、地下街の床面が平坦として取り扱っていることを注意する必要がある。

4. おわりに

本研究では、庄内川の破堤を考慮した地上と名古屋駅前地下街の浸水解析を実施し、その水理を考察した。さらに、避難困難度指標を用いて、避難対策についても考察した。浸水に関わる時間やそれによる避難状況は対象とする外力条件や計算の設定条件によって異なるが、本計算条件の場合、破堤から60分程度で地下街の入口が浸水し、高齢者が避難困難となるのは概ね5分後となること、さらに、地下街北側に位置する箇所から浸水が生じるなどの浸水の様子が明らかとなった。

浸水時の避難行動は多数の人が同時に行う。岡本ら⁹⁾が指摘しているように、人が密な状況では流水の疎通が悪くなり、体による堰上げが生じて作用する力が大きくなることも考えられる。したがって、浸水が無い状況下で避難が終了することが非常に重要と考える。

洪水破堤に伴う大規模浸水における地下街の避難を適切に実施するためには、まず、地下街に居る人が避難するまでの時間（避難時間）を求めることが大事である。対象となる地下街に影響を与える破堤箇所を求めて、そこから地下街までの氾濫の時間（氾濫時間）を求め、地下街の浸水の様子を明らかにすることで非常時の対策を検討することができる。そして、避難時間を考慮した破堤箇所の水位予測を行うことで、越流破堤や浸透破堤の観点からの避難情報を発信し、活用することが重要と考

える。現在は、危機管理型水位計も多く設置されることから、地下街避難対策の観点から、重要な河川箇所を設定しその水位情報を蓄積することで、効率的な避難対策が実装できると考える。

参考文献

- 1) 例えば、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，第55巻，pp.973-978，2011.
- 2) 川中龍児，吉川雅志，石垣泰輔：大規模地下空間における浸水時の避難成功率向上に関する検討，土木学会論文集 F2（地下空間研究），Vol.70，No.1，13-19,2014.
- 3) 関根正人，小林香野：荒川決壊を想定した東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値予測，土木学会 B1（水工学），Vol.73，No.4，I_1453-I_1458，2017.
- 4) 関根正人，大野龍馬：複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導，水工学論文集，Vol55，pp.961-966，2011.
- 5) 村瀬将隆，野澤智己，佐藤大介，武田 誠：洪水浸水想定区域図を用いた地下空間の浸水被害に関する基礎的検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第25巻，C2-6,pp.220-225，土木学会，2020.
- 6) 武田 誠，西田貢士郎，村瀬将隆，川池健司：地下鉄を考慮した都市の浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第21巻，pp.153-160，2016.
- 7) 武田 誠，久野智弘，中村正司，松尾直規：名古屋駅前地下街の入口調査と地下空間の浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第21巻，pp.161-166，2016.
- 8) 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.
- 9) 岡本隆明，戸田圭一，岡 宗佑，當麻泰史：幅の狭い地下通路における浸水時の危険性の評価に関する実験的研究，pp.196-201，地下空間シンポジウム論文・報告集，第25巻，土木学会，2020.

STUDY ON INUNDATION ANALYSIS AND EVACUATION OF UNDERGROUND SPACE OF NAGOYA STATION DUE TO DIKE BREAK IN FLOOD

Makoto TAKEDA, Riku WASHIYAMA, Daisuke SATO and Masataka MURASE

In this study, the analysis model for the water behavior in land, stairs, and underground spaces due to the dike break in flood was developed. The study region was the underground shopping mall near Nagoya station. From analysis results, the features of the temporal change and the spreading of the inundation water depth in land, stairs and underground spaces were shown obviously by each dike break point. Moreover, the evacuation situation was examined by using the evacuation difficulty index. As the results, it was shown that the stair became more difficult to evacuate than the underground shopping mall. Furthermore, it was shown that the completion of evacuation before flooding was very important.