

地下空間を有する都市の浸水特性に関する考察

武田 誠¹・藤田涼子²・西脇 翔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 中日本建設コンサルタント (〒460-0003 名古屋市中区錦 1 丁目 8 番 6 号)

³非会員 いであ (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢 3-15-1)

⁴正会員 株式会社パスコ (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 1-7-1 パスコ目黒さくらビル 3F)

大都市に建設される地下鉄・地下街などの地下空間は、氾濫水の流入による危険性が高いだけでなく、それらが水路となって新たな浸水を引き起こす可能性もある。本研究では、地下空間を有する都市の浸水特性とその地域特性について考察する。まず、名古屋における庄内川の破堤氾濫の特徴を考察した。庄内川の洪水時の破堤箇所による地下浸水の危険性や駅における氾濫水の流入流出の特徴が示され、氾濫水が地下へ流下することで地上の氾濫水量と氾濫面積が減少したが、地上の浸水では地下空間の有無による大きな差は示されなかった。つぎに、同様の解析モデルを大阪における淀川の破堤氾濫災害に適用し、地下空間が地上の浸水に与える影響について考察した。大阪の場合、地下鉄線路を伝って氾濫水が拡がり、新たな浸水域が生じていることが得られた。本研究により、名古屋と大阪の都市浸水の特徴が示された。

Key Words: *underground spaces, flood, dike break, inundation, Nagoya, Osaka*

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。平成 30 年 7 月豪雨、令和元年台風 19 号、令和 2 年 7 月豪雨など、多くの河川において越水・破堤が生じ、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・地下鉄などの地下空間は浸水に対して非常に脆弱である。したがって、地下空間を対象とした、大規模浸水とその対策に関する研究は重要と考える。

地下街・地下鉄などの地下空間を考慮した都市の浸水について、関根ら^{1),2)}、石垣・尾崎・戸田ら^{3),4)}の研究がある。それぞれ東京、大阪を対象に地上と地下の浸水に関する数値解析モデルを活用し、都市浸水に関する考察を進めている。例えば、関根⁵⁾は、都市における精緻な浸水解析モデルを展開し、豪雨を対象としたリアルタイムな都市浸水予測が可能なシステムを開発した。また、庄田ら⁶⁾は、津波を考慮した解析を行い、都市浸水において地上からの浸水と地下鉄を伝う浸水に分けて浸水の様子を分類し、都市の浸水の特徴を明確にしている。本研究では、庄内川や淀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、特に地上の浸水に与える地下空間の影響を中心に整理する。

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⁷⁾。また、河口から 15km 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⁸⁾。本研究では、名古屋における庄内川の破堤氾濫を対象に、地下街・地下鉄の有無による地上の浸水の特徴を明らかにするとともに、地下鉄駅における流入流出流量の特徴と、時間に関わる浸水特性の考察を行い、都市浸水の特徴を明らかにする。さらに、同様の解析モデルを、大阪における淀川の破堤氾濫に適用し、名古屋と大阪の浸水特性の違いや時間の観点からの浸水特性を明らかにする。村瀬らの研究⁹⁾では、同様の目的で、地下鉄の有無における地上の浸水深の変化や、破堤箇所の違いによる浸水状況の変化などが整理されている。本研究では、浸水の様子を再度考察するとともに、それに加えて、駅による流入流量の時間変化、浸水の様子の変時間変化などを示し、都市浸水に関するより詳細な検討を実施している。

2. 数値計算の概要

(1) 数値解析モデル

本研究では、武田ら⁹⁾が構築した地下街・地下鉄などの地下空間を考慮した都市浸水モデルを活用する。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、さらに地下鉄線路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。道路上にある地下空間の入口で地上からの氾濫水の流入流出を考慮し、その流量を越流公式を用いて求めた。また、地下街および地下鉄駅と地下鉄線路に関わる流入流出流量も越流公式で求めた。詳細は武田ら⁹⁾を参考にされたい。

(2) 名古屋における計算領域と計算条件

図-1 に名古屋の計算領域を示す。本計算では庄内川の想定破堤氾濫を対象とする。地上域を50m格子で、地下鉄線路も概ね50m格子で表現し、名古屋港へつながる堀川と、中川運河、荒子川のポンプ排水を考慮した。地下鉄断面は名古屋市の提供情報を基に幅7.75m、高さ4.35mの短形断面とした。庄内川の計画洪水流量(4400m³/s)をピーク流量とする図-2の洪水を想定し、庄内川の河口には潮汐による水位変動を与えた。破堤の条件として、ピーク時(19時)に庄内川左岸が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、村瀬ら⁸⁾を参考に、破堤箇所を庄内川河口から17km上流と9km上流の2地点とした。計算時間は36時間とし、10分毎に地下街・地下鉄の浸水結果を出力した。村瀬ら⁸⁾も示しているように、対象地域では、河口から15km上流にあるJR盛土の影響を受けて、その上流と下流で破堤が生じた場合の浸水特性は大きく異なる。また、図-1のように、対象領域の東側は熱田台地であるので、庄内川の氾濫が及ばない地域となる。計算結果にはこれらの影響がみられる。

3. 計算結果および考察

(1) 名古屋における浸水特性(17km地点破堤の場合)

図-3 に17km地点で破堤した場合の地上の最大浸水深と、計算終了時の地下鉄線路内の水深を示す。本図から、破堤に伴う氾濫水は南下し、JR盛土の北で浸水深が大きくなり、堀川より東側には広がらないことが示された。また、鶴舞線、東山線、桜通線に4.35mを超える地下浸水が示されており、満水状態になっていることが分かる。さらに、名城線、名港線でも浸水がみられた。しかし、

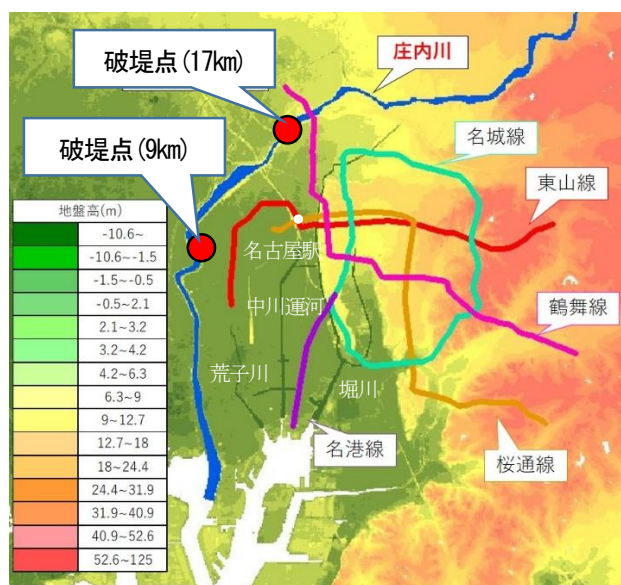


図-1 計算領域

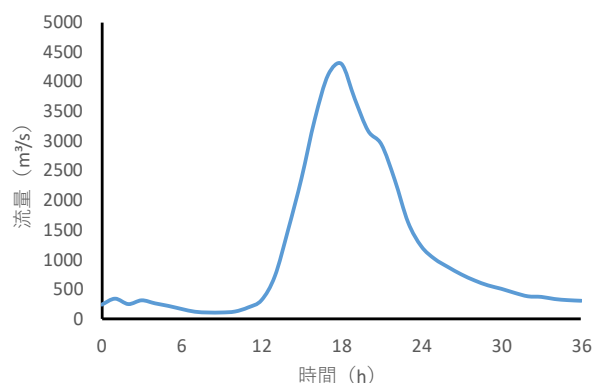


図-2 庄内川の流量ハイドログラフ

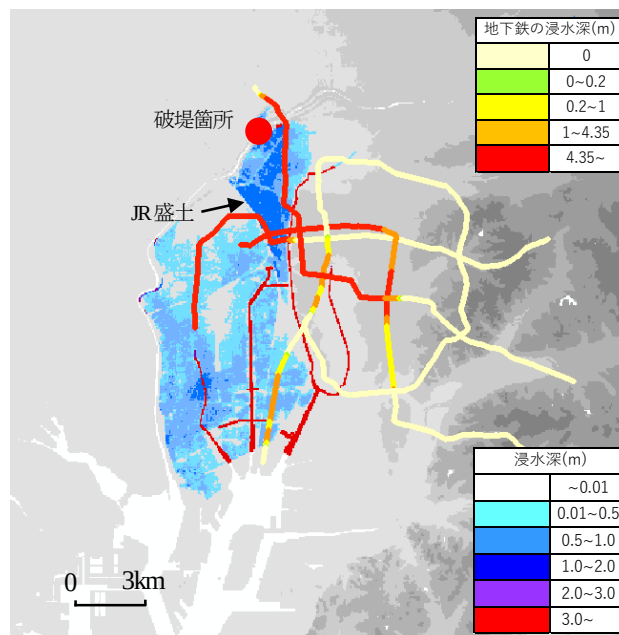


図-3 最大浸水深の分布

地下鉄においても、東側へは浸水が広がっていないことも示された。なお、地下鉄が無い場合の地上の最大浸水深の図もほぼ同様であったので、紙面の都合上省略した。

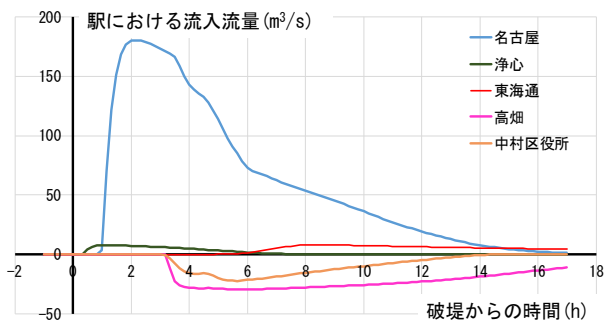


図-4 駅における流入流量

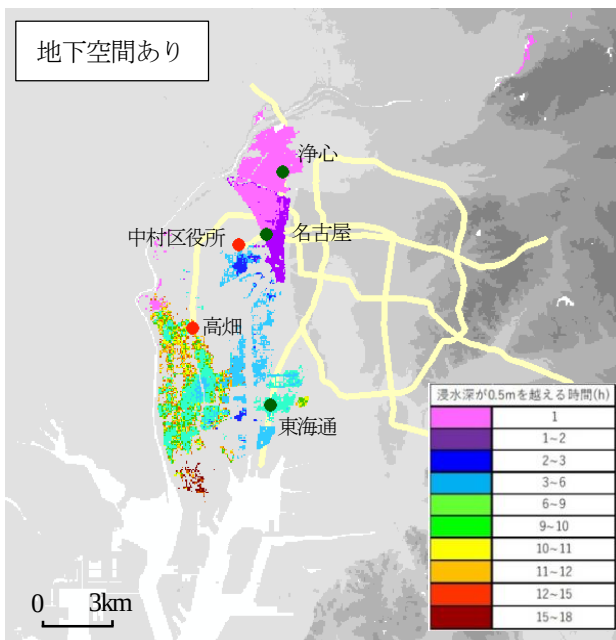
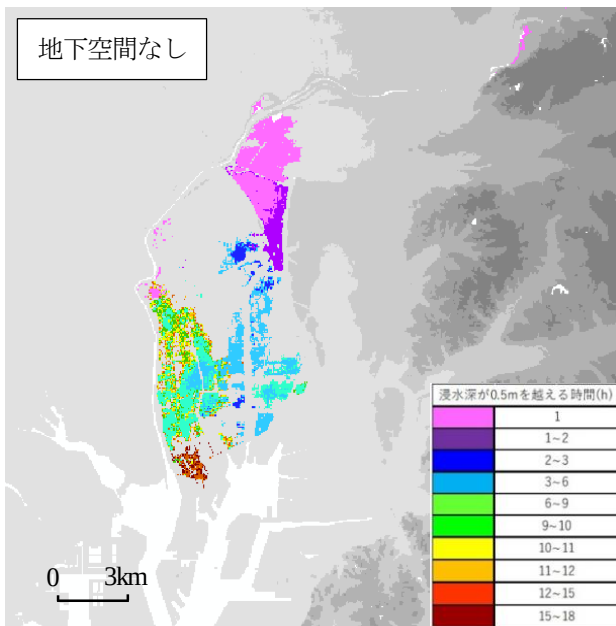


図-5 浸水深 0.5m を超える破堤後の到達時間(地上のみ)と流入流出がみられた駅の地点

ここで、地下鉄駅における流入流出流量を検討する。
図-4 は大きな流入出が確認された 4 つの駅の流入流出

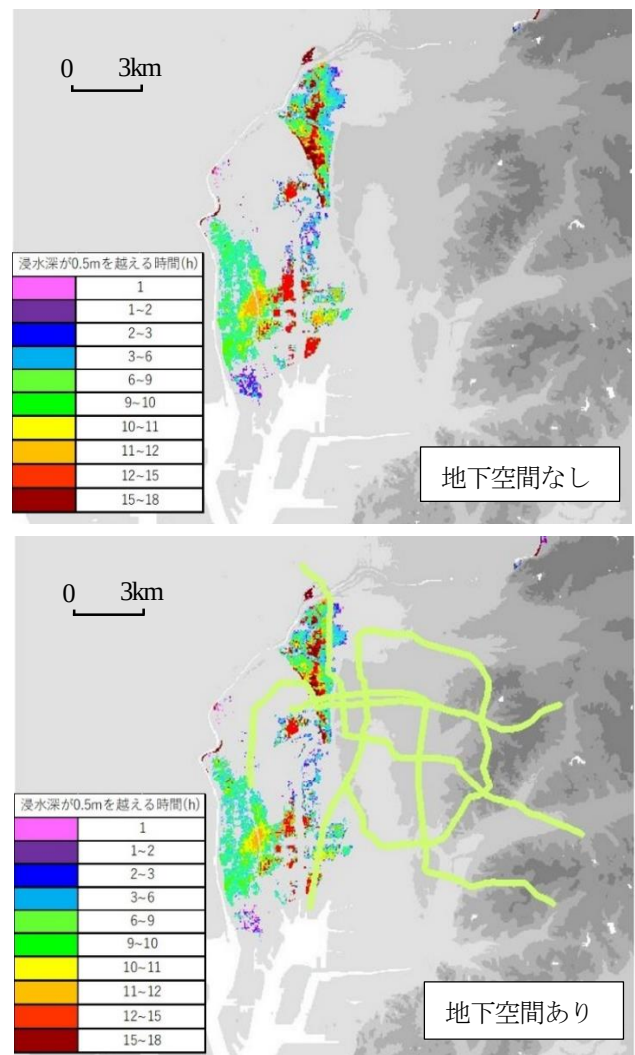


図-6 浸水深が 0.5m を超える場合の継続時間
(地上のみ)

量（正值が流入を意味する）の時間変化であり、その場所を図-5 に示す。本図から地下空間への入口が多数存在する名古屋駅（地下街も含む）で大きな流入があり、高畑駅や中村区役所駅からは流出があることが分かる。名古屋の場合、隣接する地下街の容積も大きく、入口も多数あるので、地下空間が満杯になるまで大きな流入が生じ、高畑駅の場合、東山線を管路流れ状態で伝った氾濫水が流出するため、東山線の終着駅である高畑駅からの流出流量に大きな時間変化が生じなかったと考える。

図-5 に初めて浸水深が 0.5m（床上浸水の目安として使用）に至る時間（破堤からの到達時間）を示す。図-5 による地下鉄の有無の影響を考察すると、地下鉄がある場合、わずかに図中の青色(3～6 時間)や茶色(15～18 時間)の範囲が狭くなっていた。また、図-6 に浸水深が 0.5m 以上となる継続時間を示す。破堤点周辺では継続時間に大きな変化は見られないが、地下鉄がある場合、図-6 の南部で茶色(15～18 時間)や青色(2～3 時間)の範囲が狭くなっている。これらは、地下空間への流入により地上の氾濫水量が減少したことによる影響と考えられる。

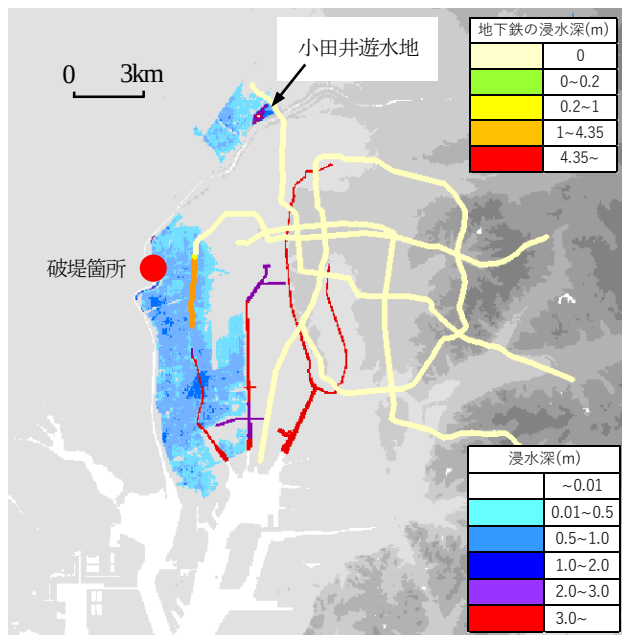


図-7 最大浸水深の分布(破堤：河口から 9km 地点)

以上より、名古屋においては、地下鉄が存在することにより地下に氾濫水が流入することで地上の浸水がわずかに低下すること、氾濫水の拡がりを示す最大浸水深に大きな変化は無いこと、地上の浸水の到達時間や継続時間に大きな差は生じないこと、地下鉄線路を通じて氾濫水の輸送はあるが、地上の浸水の全体に与える影響は小さいことが示された。

(2) 破堤箇所の違いによる浸水特性

3(1)では、JR 盛土より上流の 17km 地点の破堤による結果を整理した。ここでは JR 盛土より下流の 9km 地点の破堤による結果を示し、3(1)の結果と比較することで、破堤箇所の違いによる浸水の特徴を考察する。

図-7に、9km地点で破堤した場合の地上の最大浸水深と、計算終了時の地下鉄線路内の水深を示す。図-7と図-3を比較すると、9km地点で破堤した場合、左岸側の浸水の範囲は下流側のみとなっている。右岸側では越水が発生し、小田井遊水地に氾濫水が流れ込み、左岸に破堤がないため名古屋駅の方へ水が流れることはない。また、地下鉄の浸水も少なく、浸水が発生するのは東山線の高畑～中村公園駅間のみであることが分かる。この場合、駅周辺の浸水深が低く、地下への流入量が抑えられたと考えられる。地下鉄線路は満水にならず、17km地点の破堤時に確認された吹き出しによる氾濫水の輸送は存在しない。

ここで、床上浸水の基準とした浸水深 0.5m の到達時間を考察する。図-8に破堤箇所 9kmの場合の浸水深が最初に 0.5m となる時間を図化した。図-5の 17km破堤の場合、東山線高畑駅周辺の浸水は、破堤から 9~10 時間で 0.5m に到達していることが分かる。一方、9 km破堤の場合、遅くとも破堤から 2 時間で浸水は 0.5m に到達している。つぎに、9km破堤の場合の水深 0.5m 以上の継続時間を図-9に示す。図-6から、17 kmで破堤した場合の継続時間は、3~15 時間であることが示されている。一方、9 km破堤の場合、赤い箇所（12~15 時間の浸水時間）が広域に広がっている。これは、破堤箇所が下流なために破堤からの浸水時間が早いことと、下水道などの排水を考慮していないため、結果的に浸水継続時間が長くなったと考えられる。したがって、継続時間については今後詳細に検討したい。

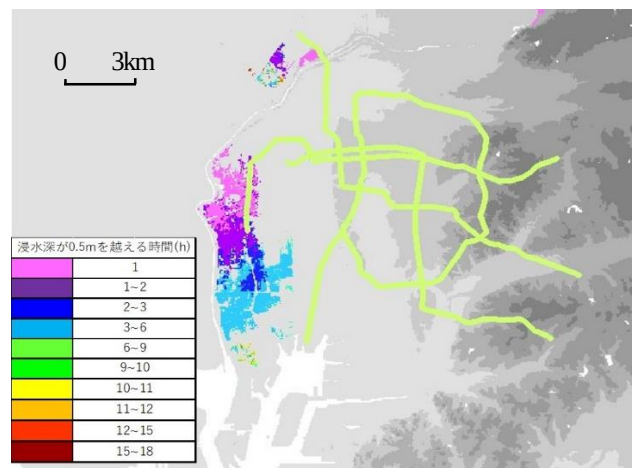


図-8 浸水深が 0.5m を超える破堤からの経過時間 (9km 破堤の場合)

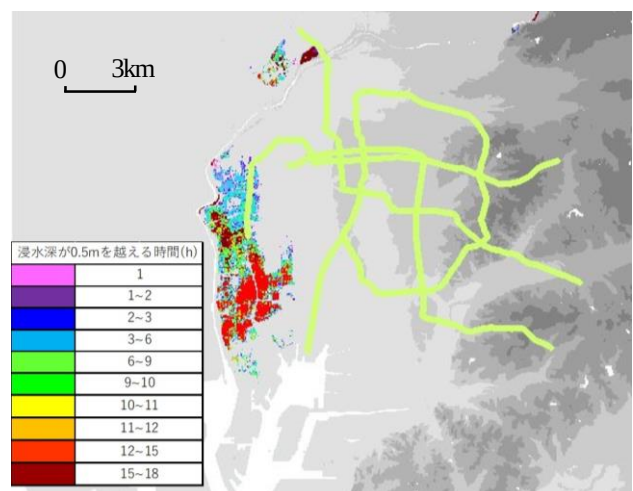


図-9 浸水深が 0.5m を超える場合の継続時間 (9km 破堤の場合)

合、遅くとも破堤から 2 時間で浸水は 0.5m に到達している。つぎに、9km破堤の場合の水深 0.5m 以上の継続時間を図-9に示す。図-6から、17 kmで破堤した場合の継続時間は、3~15 時間であることが示されている。一方、9 km破堤の場合、赤い箇所（12~15 時間の浸水時間）が広域に広がっている。これは、破堤箇所が下流なために破堤からの浸水時間が早いことと、下水道などの排水を考慮していないため、結果的に浸水継続時間が長くなったと考えられる。したがって、継続時間については今後詳細に検討したい。

以上より、名古屋において、JR 盛土より下流で破堤した場合、浸水は広く拡がり地下鉄駅における地下への流入も少ないため地下空間の浸水は小さくなること、東山線高畑駅周辺やそれより南の地域では、JR 盛土の上流側の破堤に比べて、浸水到達時間は早くなる（本条件の場合約 8 時間早くなる）ことが示された。

(3) 名古屋における都市浸水の特徴の整理

これまでの結果から、地下空間が存在することによる

名古屋の浸水の特徴は以下のように整理できる。

1) 地下鉄の有無による氾濫水の時間的な変化を比較し、名古屋において地下鉄を伝った氾濫水の輸送は存在するが、地上の浸水へ与える影響は小さい。

2) JR盛土より上流側で破堤した場合、浸水範囲は広く地下空間の浸水への影響も大きい。下流側で破堤した場合、浸水範囲は狭く浅くなり地下鉄への影響は小さい。

本研究では、地下空間の有無による地上の浸水の特徴を中心に考察している。名古屋では、地下空間の有無による地上の氾濫水への影響が小さいことが示されたが、条件によっては、地下鉄線路が満水となる状況も見られ、その被害は多大となることが容易に想定できるため、地下空間の危険性とその対策について、今後も十分に検討する必要があると考える。

つぎに、本解析モデルを大阪へ適用した場合の検討を行う。

4. 大阪における地下空間を考慮した都市浸水の特徴の検討

(1) 計算条件

図-10 に計算領域を示す。ここでは、淀川の想定破堤氾濫を対象とする。地上域を50m格子で、地下鉄線路も概ね50m格子で表現し、淀川沿いの小河川を考慮した。名古屋の場合と同様に、地下鉄断面を幅7.75m、高さ4.35mの短形断面と仮定した。淀川の計画洪水流量(12000m³/s)をピーク流量とする洪水を想定し、淀川の河口には潮汐による水位変動を与えた。破堤の条件として、ピーク時(19時)に淀川左岸が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。破堤箇所を淀川河口から9km地点と15km地点を対象とし、時間の観点から浸水特性を考察する。なお、村瀬らの研究⁹⁾により、洪水破堤に伴う大規模浸水と地下鉄の危険性が示されている。その結果から、大阪の場合は、低平地に都市があり、地下鉄も配置されていることから、計画規模の洪水において、河口から3km~15kmにある堤防が100m幅で破堤した場合、どの場所の条件でも、大きな地下浸水が生じる様子がみられた。これは、名古屋の場合と異なり、大阪における地下浸水の脆弱性を示している。本研究では、2つの破堤箇所を用いて、大阪における浸水特性を考察する。

(2) 地上と地下鉄線路の浸水の様子

図-11 に、9km破堤と15km破堤における、地下鉄の有無による地上の最大浸水深と計算終了時の地下鉄浸水を示す。本図から、9km破堤の場合、地下鉄が無い場合は、小河川の堤防で囲まれた地域に氾濫水が溜まり、浸水深

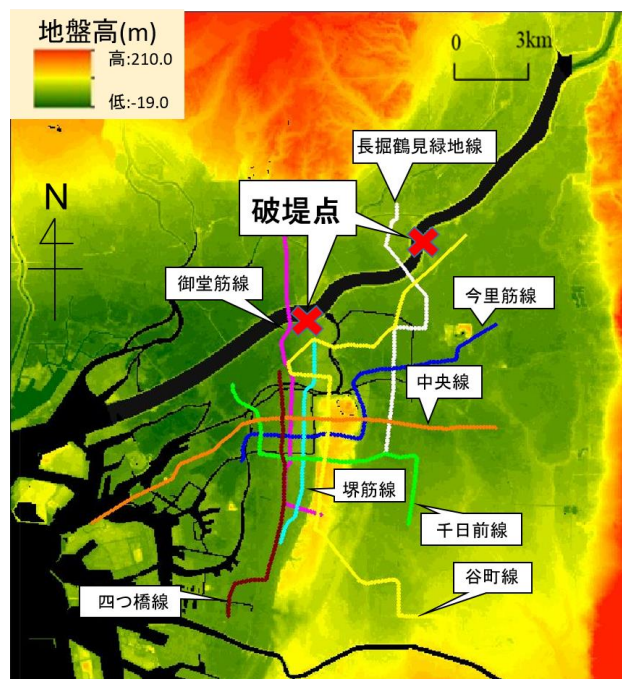


図-10 大阪における計算領域

も3mを超えている。ここで、地下空間が有る場合、氾濫水は地下鉄線路を水路として通過し、河川を超えて地下鉄駅からの吹き出しにより、浸水が広域に及んでいる。地下鉄の浸水を見ると、御堂筋線と谷町線以外の路線において、地下鉄トンネルの高さ4.35mを越え、満水になっていることが分かる。これらにより、本計算条件の場合、地下鉄トンネルは極めて危険な状況になることが分かる。また、15km破堤の場合も同様であり、地下空間が無い場合は、小河川による影響が無いことから、9km破堤の場合と比べて広域に拡がり、浸水深も小さくなる。しかし、氾濫の様子をみると、河川堤防による拡がりの制御がみられる。一方、15km破堤における地下空間が有る場合の計算では、地下鉄線路を伝って氾濫が広がっている。

名古屋の場合、地上の浸水は庄内川と熱田台地に挟まれた箇所を流下し、地下鉄線路を伝う氾濫水も同様の地域に流出するため、地下空間の有無による浸水の変化は顕著にみられなかった。大阪の場合、地下鉄線路を伝って水が拡がり、河川を超えて別の地域に拡がる様子がみられた。さらに、地下鉄線路の浸水の範囲も広い。この様子は、名古屋の結果と異なる地域的な特徴といえる。

(3) 各地下鉄駅の流入流出流量

図-12 に駅の流入流出流量の時間変化を、図-13 にその場所を示す。正值は駅への流入を示し、負値は駅から氾濫水が拡がることを意味する。図-12 より、9km破堤の場合、千日前線の野田阪神駅と四つ橋線の西梅田駅などでは、破堤初期から氾濫水が流入していることが分かる。長堀鶴見緑地線の大正駅では7時間後、長堀鶴見緑

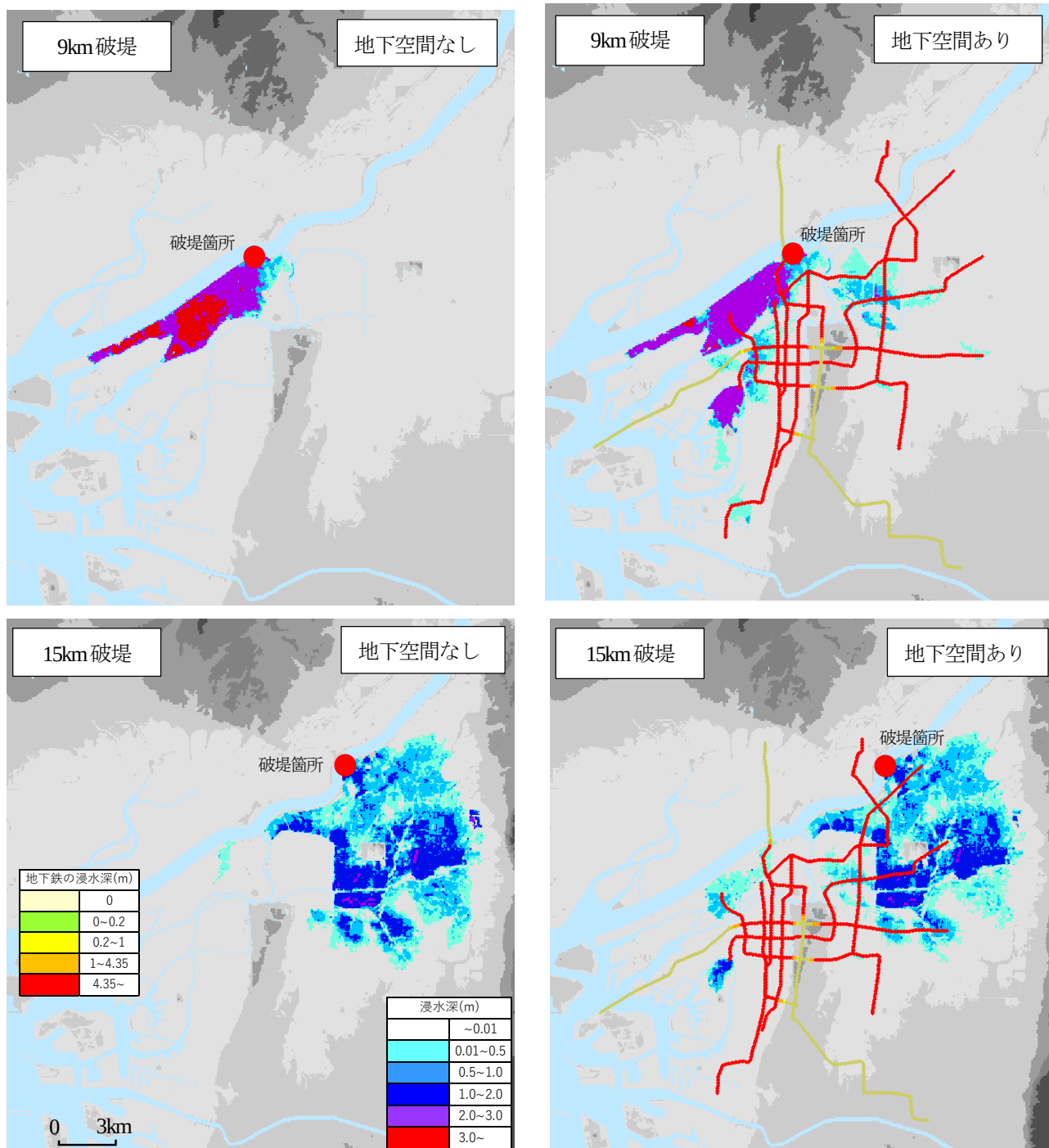


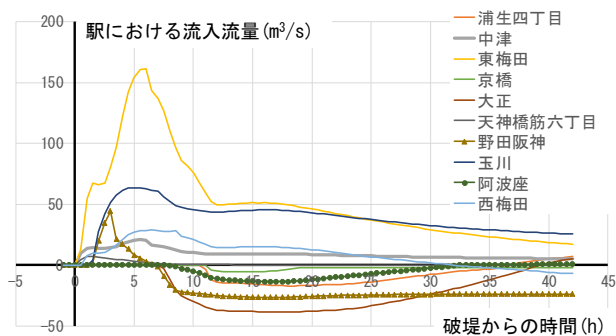
図-11 最大浸水深の分布

地線の蒲生四丁目駅では11時間後に水が流出していることから、地下空間からの水の流出には、駅によって時間のズレがあることが分かる。また、野田阪神駅では水が一度流入してから約5時間後に流出していることが分かる。これは氾濫の初期において水が流入するが、その後の浸水の拡がりにより、地下の流況が変化し、逆流（駅から流出）したものと考えられる。一方、15km破堤の場合、大日駅のように、早い時間から流入流量が生じる駅もあるが、5時間が経過して浸水が広がった頃に大量の氾濫水が駅へ流入する様子もみられた。さらに、

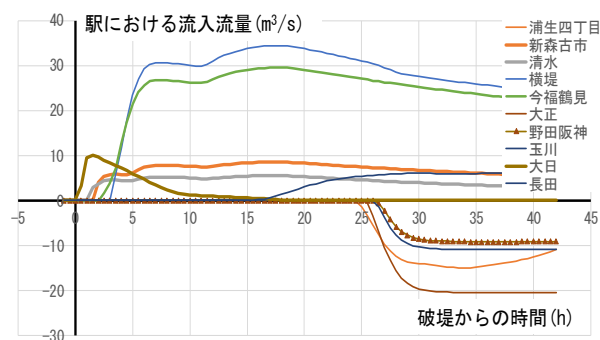
25時間を経過したあたりから、大正駅、玉川駅などで、駅からの流出がみられた。

(4) 水深が基準の高さに達する時間

地表面の浸水の拡がる様子をより詳細に考察するために、地表面の水深が基準の高さを越えたときの時間を検討した。図-13に0.5mの浸水深が生じる時間を示す。河口から9km破堤の場合、破堤箇所近くでは2時間のうちに0.5mを越える浸水状況になること、14時間後くらいで、地下鉄線路を伝う氾濫水による0.5mの浸水が生



破堤箇所：河口から 9km



破堤箇所：河口から 17km

図-12 駅における流入流量

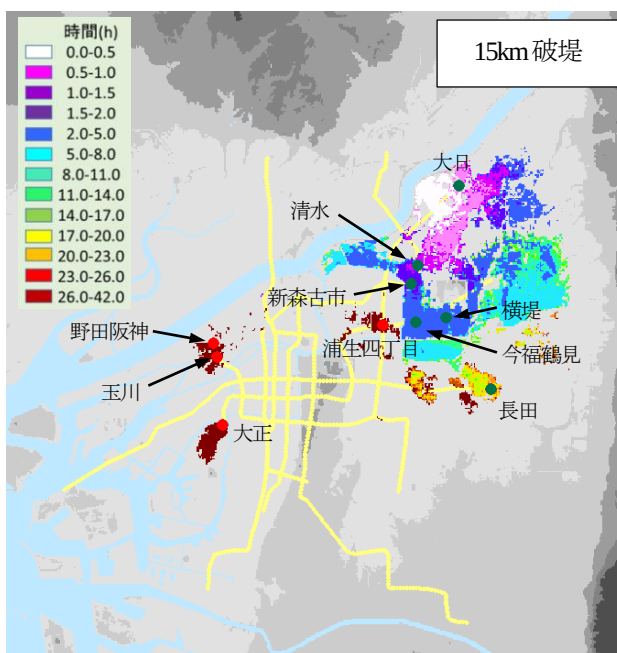
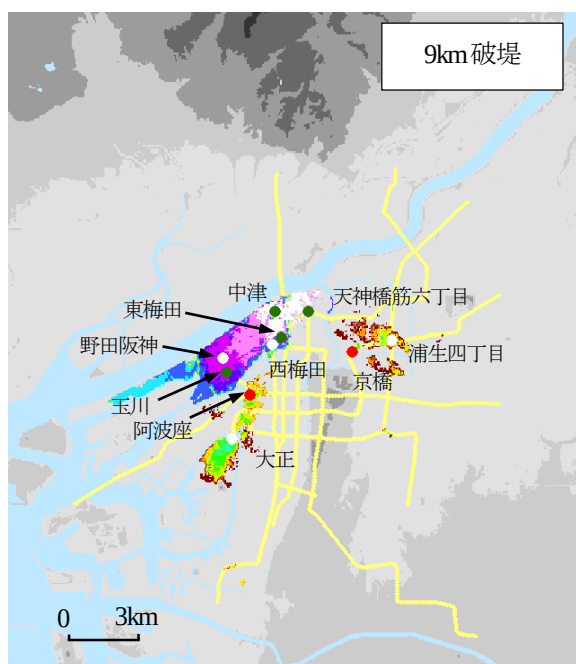


図-13 浸水深が 0.5m を超える破堤からの経過時間

じることが分かる。また、その後は、時間をかけて、26 時間後になって 0.5m の浸水が生じている場所もみられる。15km 破堤の場合、遠方の大正駅、野田阪神駅、玉川駅では、25 時間を超えて 0.5m の浸水が生じている。大阪の場合、小河川が多数存在し、地上は小河川で分断されているところが多い。その場合、堤防高が高いとその中に氾濫水が閉ざされる。本研究では、地上をつなげる地下鉄線を伝って、新たな箇所でも浸水が広がっており、9km 破堤の場合では 14 時間（15km 破堤の場合は、25 時間以上）をかけて浸水深が 0.5m となっている。したがって、地下鉄線を伝って氾濫水が移動しながら、長い時間をかけて遠方でも浸水被害が生じることも懸念される。

なお、本計算では、小河川の堤防の破堤を考慮しておらず、今後の課題として挙げられる。また、計算結果において地下鉄線路は満水となっており、このことは淀川が破堤した場合、大阪市の地下鉄の危険性はかなり高い

ことを示している。本研究では、地上の浸水の様子の特徴を意識して考察を行っている。地下空間が危険であることは都市浸水の場合強く意識する必要がある。

(5) 大阪における都市浸水の特徴の整理

これまでの結果から、地下空間が存在することによる大阪の浸水の特徴を以下のように整理できる。

1) 破堤箇所による地下浸水（最終的な地下鉄の浸水状況）の違いは見られなかった。それは、低平地であること、その低平地に地下鉄が存在するため、多くの場所から氾濫水が地下空間へ流入し、地下浸水が広がること、破堤箇所における流入水量が地下空間の容量よりも大きいことが考えられる。

2) 小河川によって氾濫水の拡がりは制御される。その中で、地下空間（地下鉄線路）があれば、線路を水路として氾濫水が流れ、川を越えて他地域へ浸水が生じる。

3) 破堤箇所によって、地上の浸水の様子や地下空間の

浸水の様子が異なる。本計算結果の場合、例えば、15km 破堤では、25 時間をかけて遠方の駅で氾濫水の流出が生じ、それを受けて浸水が生じた。

5. おわりに

本研究では、庄内川および淀川による計画洪水流量を用いた想定破堤氾濫を対象に、地下空間の有無による地上の浸水特性、破堤箇所の違いによる浸水特性を整理した。特に、駅における流入流出流量の様子、浸水の時間的な特徴を考察した。得られた名古屋と大阪における都市浸水の特徴は、3(3)および4(5)に記した。

名古屋と大阪の浸水の特徴は以下のように整理できる。名古屋では、地下浸水が大きくなる破堤箇所が特定でき、さらに、地下空間に氾濫水が流入した場合に、本計算条件の場合、地上の浸水は僅かに低下し、地下鉄を伝って新たな浸水を発生することは無い結果となった。一方、大阪の場合、村瀬ら⁹⁾により多くの破堤箇所では危険な地下浸水の状況となることが指摘されており、地下鉄を伝って新たな浸水が生じる危険性も有している。また、その場合、1 日以上をかけて地上の浸水被害が生じる危険性もみられる。このような都市浸水の地域の特徴は、防災・減災活動に考慮すべき情報と考える。

本研究は、地上の都市浸水に関わる検討を進めてきたが、地下鉄など地下空間が満水となった場合、人的被害、経済被害は甚大なものとなる。したがって、破堤時の地下空間の浸水対策は極めて重要である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 関根正人, 関根貴広: 東京都心部の地下空間への氾濫水の流入危険度とトンネル内の浸水域拡大過程に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), 72(4), I_1369 - I_1374 2016.
- 3) 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.
- 4) 尾崎平, 河南友也, 檀寛成, 石垣泰輔: 内水氾濫と避難シミュレーションによる地下空間浸水対策の評価, 地下空間シンポジウム論文・報告集, pp.8-17, 2021.
- 5) 早稲田大学 TOPIC: リアルタイムな都市浸水予測が可能に, <https://www.waseda.jp/top/news/64900>, (2021/06/30 確認)
- 6) 庄田 侑平, 石垣 泰輔, 尾崎 平, 安田 誠宏: 南海トラフ巨大地震の津波氾濫による大阪市の地下鉄の浸水解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.4, I_751-I_756, 2020.
- 7) 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.
- 8) 村瀬将隆・中島勇介・武田 誠・川池健司・松尾直規: 地下鉄を考慮した名古屋と大阪の大規模浸水解析, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_1441-I_1446, 2017.
- 9) 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.

EXAMINATION OF INUNDAITON CHARACTERISTICS IN URBAN AREA WITH UNDERGROUND SPACES

Makoto TAKEDA, Ryoko FUJITA, Kakeru NISHIWAKI and Masataka MURASE

Underground spaces such as subways and underground malls are vulnerable to the inflow of flooded water. In addition, flood water may flow along subway line and cause inundation in other areas. In this study, the inundation characteristics of urban area (Nagoya and Osaka) with underground spaces and their regional characteristics can be examined. In the inundation of Nagoya due to the flood of the Shonai River, the danger of underground inundation due to the embankment breach and the characteristics of inflow and outflow discharge of inundation water at the station were shown. In addition, in the inundation of Osaka due to the flood of the Yodo River, the inundation spreads along the subway line. This study showed the characteristics of urban inundation in Nagoya and Osaka.