

地下鉄を考慮した都市の浸水解析

INUNDATION ANALYSIS CONSIDERING THE WATER BEHAVIOUR OF SUBWAY IN URBAN AREA

武田 誠^{1*}・西田貢士郎²・村瀬将隆³・川池健司⁴

Makoto TAKEDA^{1*}, Koshiro NISHIDA², Masataka MURASE³
and Kenji KAWAIKE⁴

Recently, the risk and the measures of water disaster of underground space in urban areas has been examined. In many discussions, heavy rain was treated as the external force of inundation of underground space. And water stop plate at the gate of underground space and evacuation system were discussed as countermeasures of inundation disaster of underground space. In generally, though the water stop plate may be effective for the countermeasures of the inundation due to heavy rain, it is impossible to prevent inflow of flooding due to dike break to underground space. Moreover, any urban cities have subway network. If large scale inundation occurs, the inundation water may flow to the rail way of subway and spread widely in underground space. In this study, numerical analysis model considering the water behavior of the subway network and overland area is developed. Analysis area is the Nagoya city, and it deals with inundation due to dike break conditions. Analysis results show that the inundation water spreads out widely, the water which inflows to the underground space also spreads out widely in the subway line.

Key Words : Underground space, Subway, Inundation, Dike break, Numerical analysis

1. はじめに

近年、浸水に対する地下空間の脆弱性およびその対策が注目されており、多くの機会で議論されている。その対象は主に豪雨による浸水（内水氾濫）である。内水氾濫は、洪水や津波、高潮による外水氾濫よりも高い頻度で生じることから、その対策の検討は非常に重要であるが、外水氾濫による大規模浸水の地下空間へ与える影響を検討することも危機管理の面から非常に重要である。名古屋市や国土交通省のホームページ上で、洪水破堤によるハザードマップや、東海・東南海・南海地震による津波の浸水被害想定、あるいは、スーパー伊勢湾台風による高潮の浸水被害想定が公開されている。これらによれば、都市の中に1m以上の浸水が示されているが、それらと関連付けて地下空間の危険性が議論されていない。すなわち、大規模浸水の地下空間に与える影響という非常に重要な情報が公開されていないといえる。

戸田・石垣・尾崎ら¹⁾、関根ら²⁾など、近年、地下空間の浸水被害を扱った研究は盛んに行われている。これらの研究では、大阪や東京に位置する地下街を対象に、豪雨に伴う内水氾濫や避難シミュレーションを実施しており、地下空間の浸水特性や現実的な浸水対策、避難対策を報告している。さらに、最近では、津波による地下浸水特性の評価³⁾、内水モデルによる広域の洪水氾濫解析⁴⁾など、広域浸水およびそれによる地下空間の浸水特性が議論されている。

また、内閣府では地下鉄を考慮した浸水解析が実施されており⁵⁾。さらに、地下鉄を考慮した都市浸水に関する戸田・辻本の研究⁶⁾も報告されている。本研究は、東京を対象にした池内らの研究⁵⁾と同様の目的をもって実施しており、名古屋を対象としていることに特徴がある。

武田・島田ら⁷⁾は、庄内川を対象に、破堤箇所を想定した氾濫解析により、地表面の浸水特性を明らかにした。さらに、地下空間への流入水量を見積もり、破堤箇所に

キーワード：地下空間、地下鉄、浸水、破堤、数値解析

¹正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 Professor, Faculty of Engineering, Chubu University, (E-mail:mtakeda@isc.chubu.ac.jp)

²正会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 Central Nippon Highway Engineering Nagoya Ltd.

³学生会員 中部大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Chubu University.

⁴正会員 京都大学准教授 防災研究所 Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

よる流入水量の違いと、その観点からの破堤箇所の重要性を明らかにした。その結果、河口から19km地点の庄内川左岸を破堤させた場合、氾濫水が地下空間の入口が多数存在する名古屋駅前に集まり流下するので、多くの水が地下空間へ流入することが示された。さらに、氾濫水量が多いため、その水は一つの駅に留まらずに、地下鉄線路を伝って広域に拡がるのが予想された。そこで、本研究では、武田・島田らの解析モデルに地下空間および地下鉄線路内の水の挙動の解析モデルを加えて、大規模浸水時の地下鉄線路内の浸水の様子を検討した。

2. 地下空間への流入を考慮した氾濫解析

(1) 洪水氾濫解析

都市における洪水氾濫解析では、洪水流解析と浸水解析を連結して実施している。洪水流解析には一次元の運動量方程式および連続式を用いた。また、浸水解析には平面二次元の運動量方程式および連続式を用いた。これらの基礎式は武田・島田ら⁷⁾を参考にさせていただきたい。

ただし、地下空間への流入流量の算出は、本研究で工夫した部分であり、地下空間および地下鉄の浸水解析の境界条件ともいえるので再度以下に示す。

本研究では、大規模浸水に対する地下空間への流入現象および地下空間における水の広がり解析する。大規模浸水を対象にするので、50mの幅を持つ計算格子で都市空間（地盤高）を表現しており、数m程度の地下空間（地下街・地下鉄駅）の入口の浸水過程を詳細に表現することは難しい。ここでは、つぎの方法で地下空間の入口の流入流量を求めた。

まず、名古屋市域に存在する岩塚、亀島、高畑、中村公園、中村日赤、本陣八田、中村区役所の地下鉄駅の現地調査を行い、地下空間の入口の情報（道路から歩道の段差($d2$)、歩道から地下空間の入口の段差($d3$)、止水板（溝）の高さ($d4$)、横幅(B)を求めた。現地調査以外の地下街・地下鉄駅の入口には、調査で得られた情報の最頻値（ $d2=0.15\text{m}$ 、 $d3=0.15\text{m}$ 、 $d4=0.4\text{m}$ 、 $B=4\text{m}$ ）を与えた。予め5mメッシュ標高値より地下鉄の入口付近の地盤高($z1$)を求め、これを道路面とした。数値計算において氾濫水位(H)を求めた後で、入口の水深を以下の方法で求める。

$$h_{in} = H - (z1 + d2 + d3) \quad (1)$$

ただし、 h_{in} が計算された水深よりも大きい場合には、 h_{in} を水深に置き換えた。その後、次式を用いて、流入流量を求めた。

$$Q_{in} = h_{in} B \sqrt{gh_{in}} \quad (2)$$

また、氾濫域の連続式において、地下への流入による水量の減少を考慮しており、地下への水量には上限を定めていない。さらに、止水板が設置された場合は、式(1)において、止水板の高さが考慮される。本解析では、5mメッシュの標高値を用い、50m格子の地盤高を作成した。格子内の地盤高の凸凹が大きい場合には、式(1)および式(2)の取り扱いに実際との大きなズレが生じると考えられるが、対象とした地域は低平地であり、大きな問題にはならないと考えている。

(2) 計算領域および計算条件

図-1に計算領域を示す。本計算では、河口から志段味までの庄内川の河川区間およびそれらを包含する陸域を計算格子とした。また、平成23年9月の台風15号による洪水を対象とし、河川上流端には当時の洪水流量と支川の矢田川の流量を合算して与え、下流端には名古屋港の潮位を与えた。なお、河川の粗時計数は0.0275を与えた。得られた水位は概ね観測水位と一致していた。詳細は武田・島田ら⁷⁾を参考にさせていただきたい。また、庄内川河口から3km～19kmまでを2km毎に100mの間隔で破堤（枇杷島においてピーク水位となったときに、破堤箇所の堤防天端が堤内地の地盤高に置き換わる）させた想定破堤氾濫解析を実施した。その結果の計算終了時の氾濫水量と最大浸水深を対象とした氾濫面積の破堤箇所毎の情報を図-2に示す。本図から、最大浸水深毎の氾濫面積と計算終了時の浸水水量が破堤箇所によって異なることが分かり、特に、河口から17km地点や19km地点では、多大の水が地下空間へ流入していることが分かる。これ

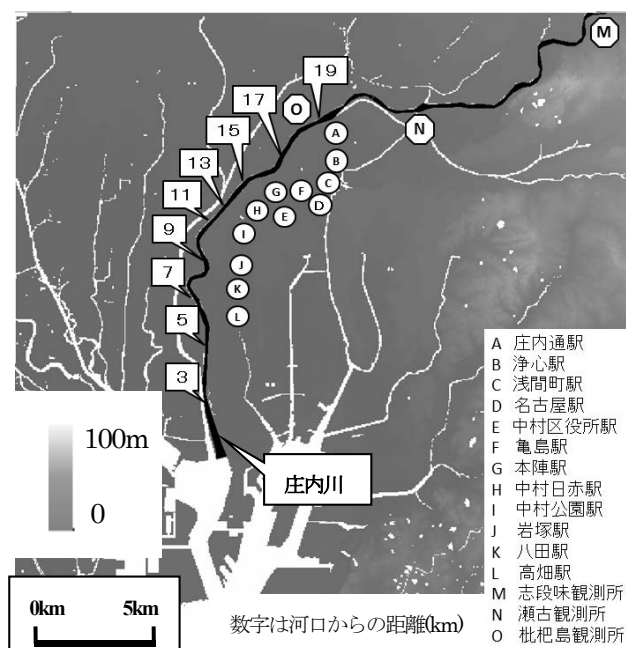


図-1 計算領域

は、15km付近にある盛土（鉄道線路）の影響により、その上下流の破堤による水の挙動が大きく変化し、上流域で破堤すれば氾濫水は多くの地下空間の入口がある名古屋駅前に集まって流下することから、多大の水が地下空間へ流入することが計算された。また、下流域の破堤による氾濫は、浸水箇所地下空間の入口が少ないので、地下へ流入する水も少ない。本研究は、河口から19km地点の想定破堤氾濫による浸水の地下空間（地下鉄）内の挙動を明らかにすることを目的とする。

3. 地下鉄の水輸送を考慮した氾濫解析

(1) 解析概要

本研究では、地下街・地下鉄駅を一つのボックスとしてとらえ、線路を約50mの長さで分割して地下鉄線路の計算格子を設定した。氾濫水は複数ある地上の入口から地下街・地下鉄駅へ流入・流出し、地下街・地下鉄駅では地上からの流入・流出流量と鉄道線路への流入・流出流量を考慮して連続式により水の収支が計算される。また、地下街・地下鉄駅に繋がっている線路では流入・流出流量が考慮され、その他の線路では考慮されずに、スロットモデルを用いた一次元不定流解析で水の流れを表現した。さらに、乗換駅のように一つの駅に複数ある線路間の水の輸送も考慮している。解析に用いた地下鉄・地下鉄駅と地下鉄線路のイメージを図-3に示す。

(2) 地下街と地下鉄駅の水輸送

地下街・地下鉄駅の連続式には以下の式を用いた。

$$A_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \sum Q_e - \sum Q_o \quad (3)$$

ここで、 A_u は地下街・地下鉄駅の平面面積、 h_u は地下街・地下鉄駅の水深、 Q_e は地下空間への流入流量、 Q_o は線路への流入流量である。

地下空間の入口では、入口のステップにおける地下街・地下鉄駅の水深を $h_{in_u} = h_u + z_{bu} - (z_1 + d_2 + d_3)$ （ここに、 h_u ：地下街・地下鉄駅の水深、 z_{bu} ：地下街・地下鉄駅の底面高）から求め、式(1)の h_{in} と h_{in_u} の大きい方を h_1 、小さい方を h_2 として以下の越流公式から流入流量 Q_e を求めている。なお、 μ を 0.35、 μ' を 0.91 とし、 B は入口の幅である。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_e = \mu B h_1 \sqrt{2gh_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_e = \mu' B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (4)$$

また、地下街・地下鉄駅と線路においても地下空間の入口と同様に、地下街・地下鉄駅の底面からの水深を求

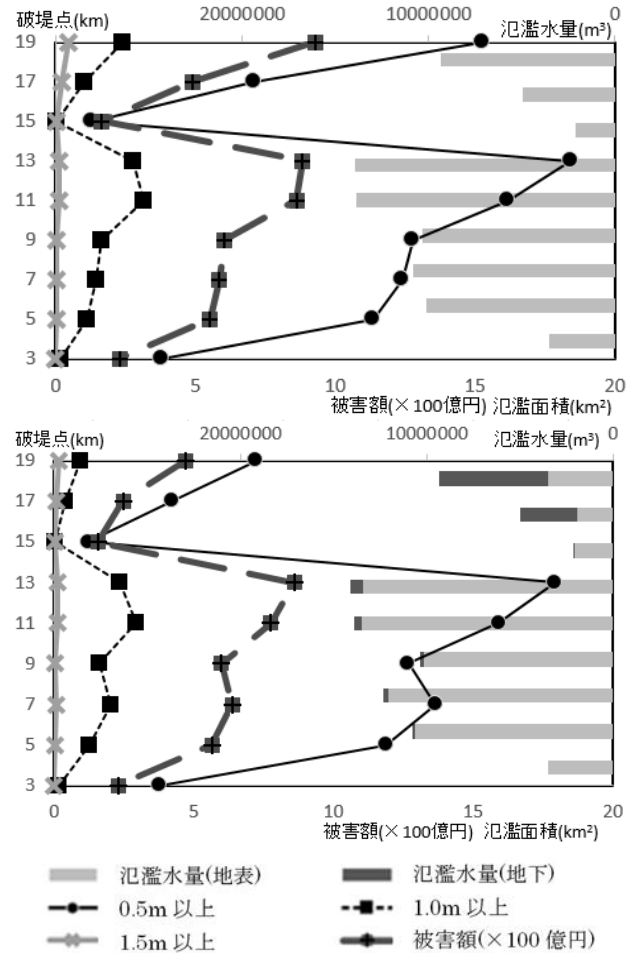


図-2 氾濫水量と氾濫面積
(上：地下空間無し、下：地下空間あり)

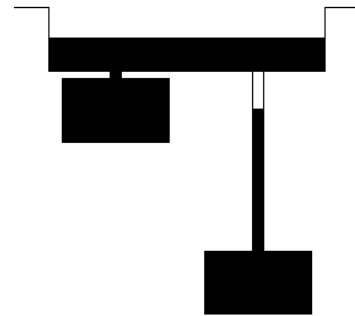


図-3 地下街・地下鉄のモデル

め、以下の式で Q_o を求める。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_o = \mu L h_1 \sqrt{2gh_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_o = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、地下街・地下鉄駅の水深 h_u 、地下街・地下鉄駅の底面高からみた線路の水深 $h_{s_u} = h_s + z_{bs} - z_u$ （ h_s は線路の水深、 z_{bs} は地下鉄線路の底面高）の大きい方を h_1 、小さい方を h_2 とし、入口の周長を L 、 μ を 0.35、 μ' を 0.91 とした。

さらに、地下鉄トンネルではスロットモデルを導入し、次式を考慮している。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_o \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s Q_s}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial (h_s + z_{bs})}{\partial x} - \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \quad (7)$$

ここで、 A_s は流水断面積、 Q_s は流量、 q_o は単位幅横流入流量であり $q_o = Q_o / \Delta x_s$ 、 h_s は線路の水深、 U_s は流速、 n_s はマンニングの粗度計数、 R_s は径深である。

地下鉄の断面は、図-4に示すように、幅 7.75m、高さ 4.35m の矩形断面を想定している。本研究では乗換駅の水輸送も考慮している。乗換駅では、関連するすべての線路で式(5)の流量が計算される。また、地下鉄路線に侵入した氾濫水が、乗換駅で吹き出し地下街・地下鉄格子に氾濫水が浸入して別の路線へ浸水が生じることもモデル化している。

(3) 計算領域の設定

本研究において、地下街・地下鉄駅の面積および底面高と各駅の線路高を整備した。地下鉄・地下鉄駅の面積は 2. (1) に示したように Web にある数値地図より入手した情報を基に整理し、それ以外は最頻値を与えた。また、駅における地下鉄路線高を基礎として、縦 4.35m×横 7.75m の地下鉄断面があり、駅間の線路は直線で結ばれるとした。また、線路断面の天井の上 0.5m に地下街・地下鉄の底面高があると仮定した。なお、乗換駅では複数の底面高が現れるので、一番高い値を地下街・地下鉄駅の底面高とし、地下鉄線路とは周長 20m の入口で接続されているとみなしている。なお、このように、地下街・地下鉄駅を一つのボックスでモデル化していることから、今後、この点の詳細化が必要と考える。

解析における境界条件として、2. (2) の計算条件と同様に、庄内川の上流端流量には、平成 23 年 9 月 15 日の庄内川洪水流量として志段味（庄内川本川）と当地（支川の矢田川）の流量を合算して与え、庄内川の下流端水位には、同時刻の名古屋港の潮位を与えた。また、枇杷島の水位がピークとなる時間に河口 19km の左岸地点で破堤（破堤幅 100m）が生じた場合を想定した。

4. 計算結果および考察

(1) 浸水の様子

計算結果として、図-6 に破堤 1 時間後、5 時間後、17 時間後の浸水深の分布と地下鉄路線の浸水深の分布を示す。まず、地下空間を考慮しない(A)の図をみれば、破堤によって生じた浸水が、鉄道の盛土を伝わって南下し

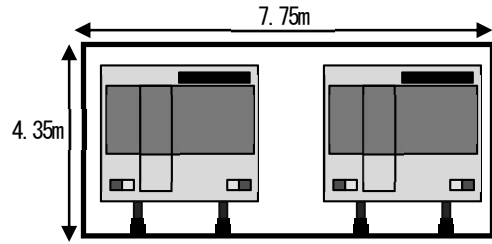


図-4 地下鉄断面

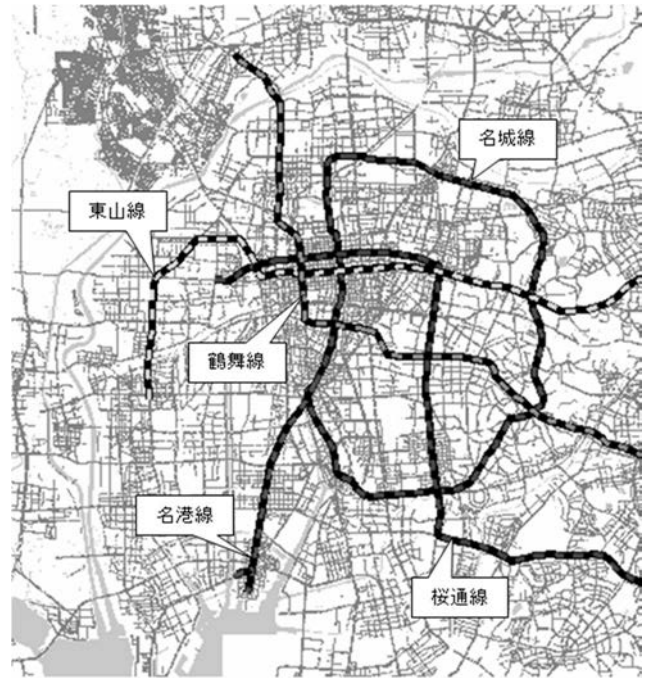
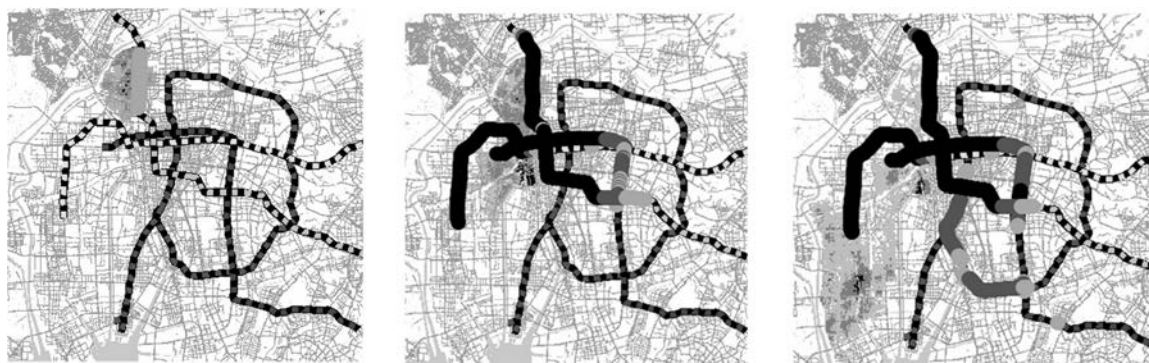


図-5 取り扱った地下鉄線路

広がっていることが分かる。一方、地下空間を考慮した(B)の図をみれば、(A)と同様の浸水のプロセスを示しているが、(A)よりは広がり小さいことが分かる。これは地下空間への氾濫水が流入することによるものであり、地下鉄路線では陸上の氾濫水よりも広域に線路を伝って広がっていることが分かる。また、図-7 に地下空間を考慮しない場合と考慮した場合の最大浸水深の分布を示す。本図から、両者とも同様の浸水深の分布を示している。また、地下鉄を考慮しない場合の結果は考慮した場合の結果よりも浸水深が大きくなっており、氾濫水が地下空間へ広がることによる陸上の浸水低下が示されている。これは陸上の浸水被害が軽減されることになるが、一方で、地下空間の浸水被害を引き起こしており、特に地下街の経済被害、地下鉄の実質的な経済被害と機能回復までの交通不能による間接的な経済被害が生じることから、注意が必要である。



(A) 地下鉄を考慮しない場合（左から破堤1時間後、5時間後、17時間後）



(B) 地下鉄を考慮した場合（左から破堤1時間後、5時間後、17時間後）



図-6 浸水深の分布

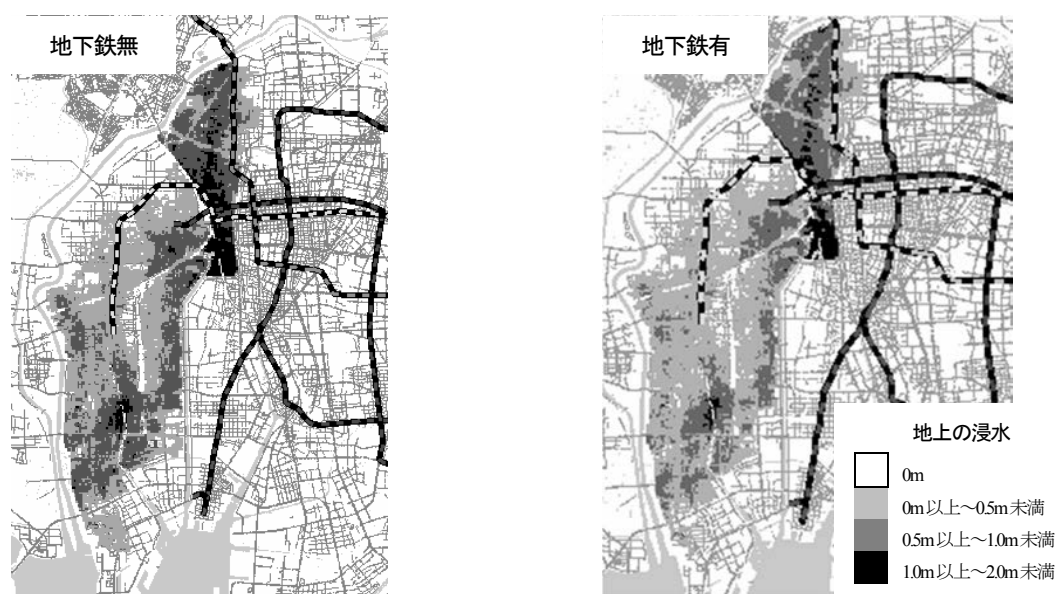


図-7 最大浸水深の分布

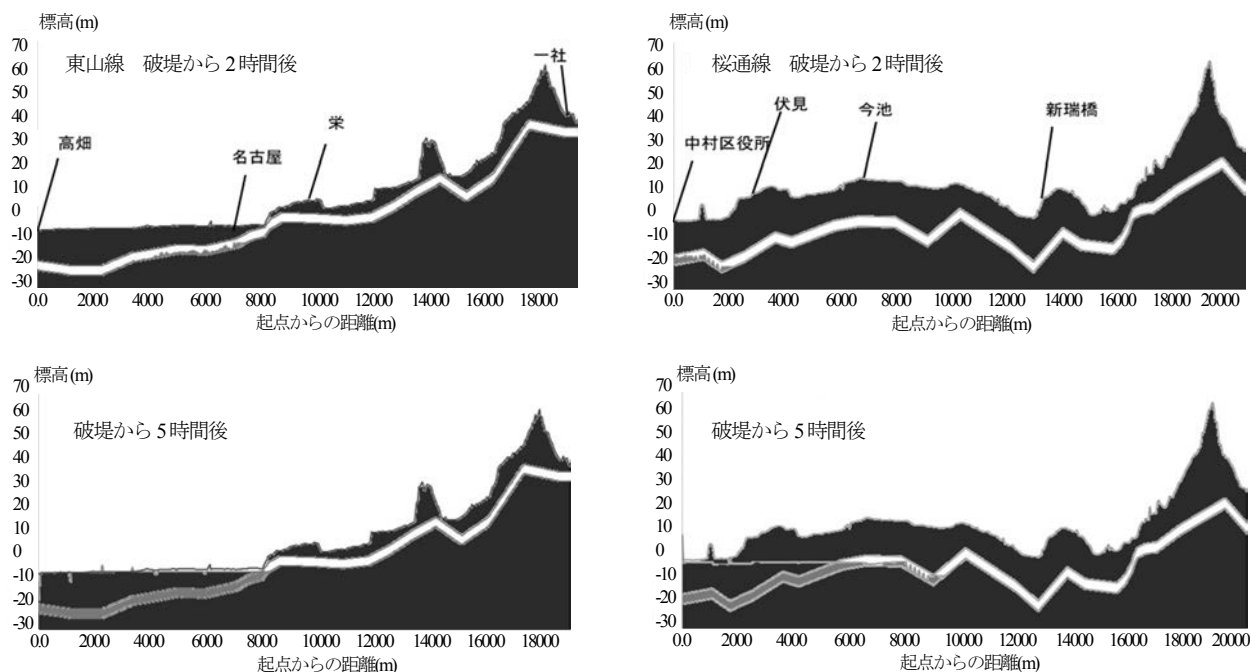


図-8 地下鉄の浸水深の分布

(2) 地下鉄路線の浸水の様子

図-8に地下鉄路線の浸水の例として、東山線および桜通線の結果を示す。本図から、駅から流入した氾濫水が時間の経過とともに地下鉄線路を伝って広がっていることが分かる。庄内川19km地点で破堤した場合、氾濫水は鶴舞線に流入し、地上の氾濫水の流入や乗換駅からの流入を受けて東山線など他路線へ広がっている。ただし、東側の地盤高および地下鉄線路高が高い地域では浸水が生じない結果となった。また、後述の図-9に示すように東山線の名古屋駅～高畑駅と鶴舞線の浅間町駅～庄内通駅を含む名古屋駅より西側の地域は、地上上部と地下部の浸水が同時に進むため、危険な区間である。本研究結果から、大規模浸水が生じた場合、地下鉄線路内を氾濫水が浸入し、満水になるなどの非常に危険な状況になることも想定される。なお、図-8の結果には線路勾配が大きい場所の浸水初期において激しい流れの様子が示されている。これは、射流の発生による数値解析上の問題の可能性もあるので、数値モデルの検討も必要と考える。

破堤からの線路内が浸水するまでの時間は対策に係る重要な情報である。名古屋市地下鉄は、レールが冠水した時点で運転を休止する対策を採っている。そこで、破堤から線路内の浸水深が0.2mになった時間を求め図化したものが図-9である。本図から、破堤箇所付近の線路では早い時間に浸水が生じ、名古屋駅などでは2時間程度で地下鉄被害が生じる可能性も示された。なお、図-9は破堤箇所の違いにより様子が変わることから、他の破堤箇所を対象とした同様な解析を実施して総

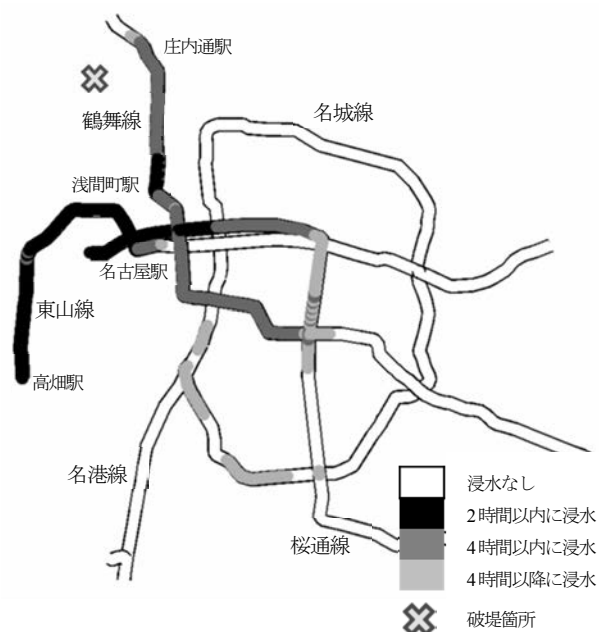


図-9 地下鉄線路内の0.2m浸水を受ける最短時間の分布

合的な浸水時間を求めることが、実際の対策にとって有益な情報になるものと考えられる。なお、本研究では、3で示したように、地下街・地下鉄駅における水輸送を粗いモデルで表現しており、実際には、地下街での貯留、地下鉄線路への水輸送の遅れなどが生じることから、現実的な解析に向けての課題も多い。すなわち、詳細な検討を進めるためには、これらの課題の解決が必要であると考えている。

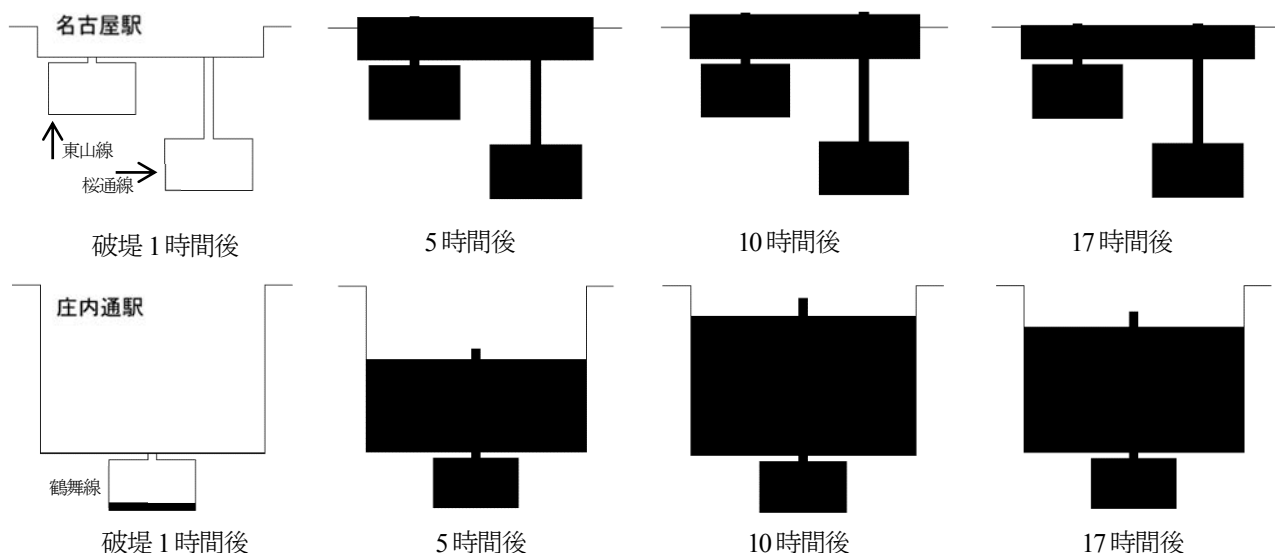


図-10 地下街・地下鉄駅と地下鉄線路の浸水の様子

(3) 地下街・地下鉄駅における浸水の様子

地下鉄・地下街の浸水の様子を図-10 に示す。表記の都合上、図-10 の地下街・地下鉄の横幅は意味を持たず、それぞれ有する平面面積を持っており、水深は計算された値を用いて図化している。また、線路断面と地下街・地下鉄駅の鉛直方向の位置関係はモデル化されたものを用いており、線路断面の高さは 4.35m である。本図から、東山線や桜通線を有する名古屋駅や、鶴舞線を有する庄内通駅の浸水の様子などが分かる。本研究では、地下鉄を考慮した解析を実施し、公開されている情報を活用して、広域の浸水プロセスを表現した。この観点からは、十分な成果が得られたと考えている。

5. 電車の浸水被害の評価

本研究では、地下鉄の浸水プロセスを考慮した都市の浸水解析を実施し、特に地下鉄内の水理を明らかにした。地下鉄には電車が運行していることから、電車の時刻表を活用し、運行中の電車の被害評価を試みた。

時刻表にそれぞれの駅における出発時刻が記載されている。GIS を用いて駅の空間座標値および線路の空間座標値を求め、到着時刻と出発時刻の間はその駅に留まり、それ以外は時間を用いて線形的に電車を移動させて、それぞれの時刻における電車の位置を求めた。

4 で示した計算結果を基礎とし、破堤が午前 5 時に生じたとする解析を実施した。線路内の浸水と平日の時刻表通りの電車の運行を重ね合わせ、電車の受ける浸水の程度を求めた。浸水を受ける電車は停止せずに時刻表通りに運行させている。解析結果を図-11 に示す。本図から、個々の電車が受ける浸水深が求められており、破堤

から 2 時間後までは破堤箇所近傍の電車は浸水を受けており、4 時間後ではその被害が広域にわたっていることが分かる。本計算は、時刻を変更させることで、浸水と電車運行の様々なタイミングを考慮した解析および検討が実施できる。このような解析により、個々の電車に対する浸水被害を評価することができ、実際の対策への検討にも役立つ情報が得られる。

6. おわりに

本研究では大規模浸水における地下空間を有する都市の浸水被害について数値解析的な検討を行った。特に地下鉄の浸水による被害を定量的に明らかにした。本研究で得られた成果を以下に記す。

- 1) 地下鉄への浸水を考慮した想定破堤氾濫解析の結果を示した。庄内川の河口から 19km 地点の左岸の破堤について、地下鉄の有無による浸水の違いを比較した。地下鉄を考慮する場合には、考慮しない場合と比べて地上部の浸水の程度が小さくなっている。また、地上部の浸水が無くても地下鉄内は浸水する箇所があり、地上の浸水よりも広域に広がることが示された。
- 2) 庄内川 19km 地点で破堤した場合、氾濫水は鶴舞線に流入し、地上の氾濫水の流入や乗換駅からの流入を受けて東山線など他路線へ広がっている。ただし、東側の地盤高および地下鉄線路高が高い地域では浸水が生じない結果となった。また、東山線の名古屋駅～高畑駅と鶴舞線の浅間町駅～庄内通駅を含む名古屋駅より西側の地域は、地上部と地下部の浸水が同時に進むため、危険な区間であるといえる。
- 3) 時刻表の情報を基礎とし、駅および地下鉄線路の位置

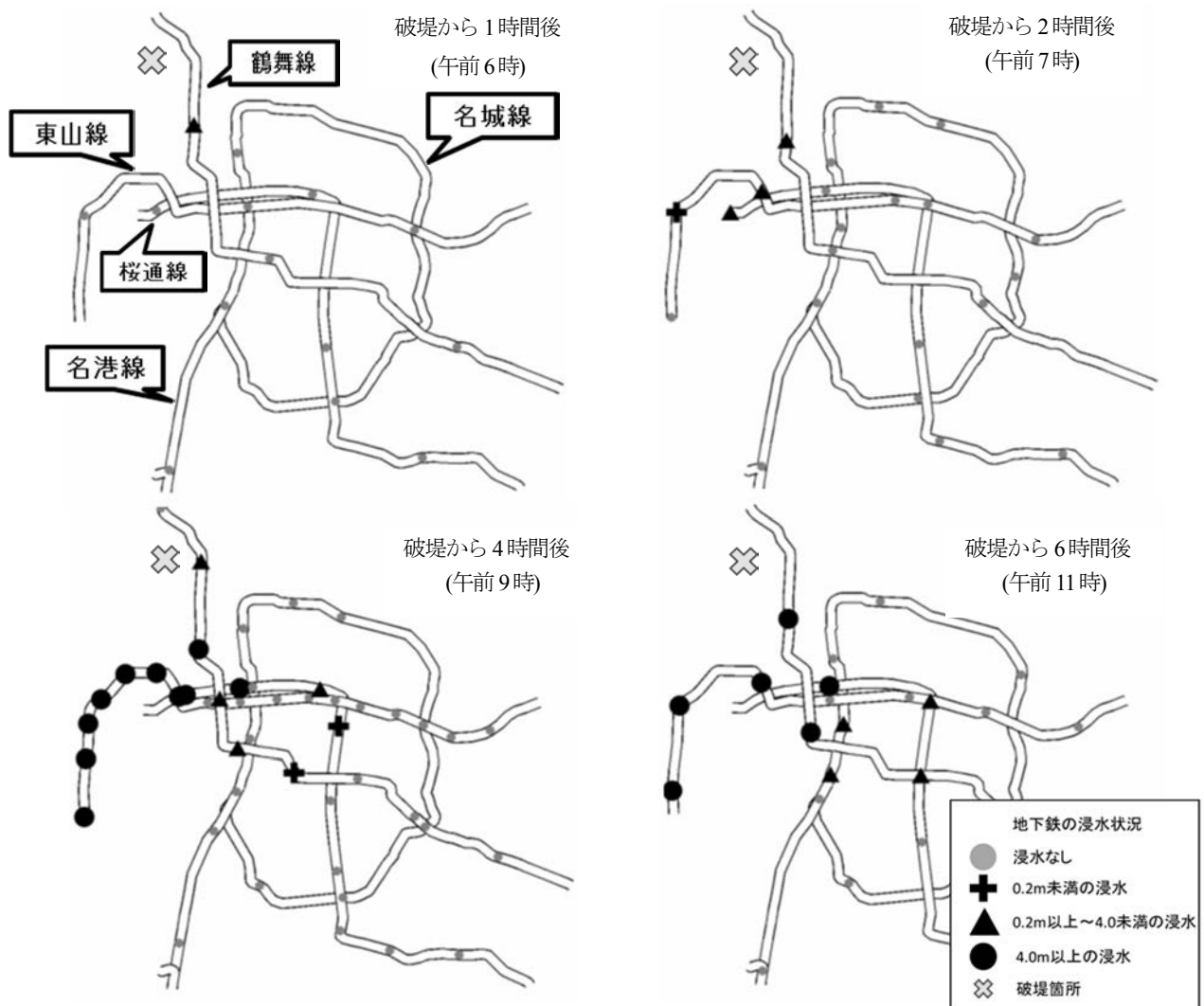


図-11 電車の浸水被害の評価

情報を活用して、時刻における電車の位置を求め、個々の電車の受ける浸水深を見積もった。このような情報は実際の電車の浸水対策において、有益な情報になるといえる。

本研究では、公開されている情報を活用して、地下街・地下鉄駅を整理し、想定破堤による大規模浸水の様子を求めた。より具体的な対策のためには、モデルの詳細化が求められ、今後の課題として残っている。

謝辞：本研究は文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムの支援を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 尾崎平，浅野統弘，石垣泰輔，戸田圭一：短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.70，No.4，I_1417-I_1422，2014.
- 2) 関根正人，河上展久：都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析，水工学論文

集，第47巻，pp889-894，2003.

- 3) 浅野統弘，尾崎平，石垣泰輔，戸田圭一：南海トラフ巨大地震による津波来襲時の大規模地下空間の浸水予測，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.70，No.4，I_1435-I_1440，2014.
- 4) 関根正人，池田遼：東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値解析，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.70，No.4，I_1429-I_1434，2014.
- 5) 池内幸司，越智繁雄，安田吾郎，岡村次郎，青野正志：大規模浸水時における地下鉄等の浸水想定と被害軽減方策の効果分析，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.3，pp136-147，2012.
- 6) 朝日一堯，戸田祐嗣，辻本哲郎：地上一地下鉄トンネルの統合氾濫解析による地下鉄路線およびその周辺地域の水害脆弱性に関する基礎的検討，河川技術論文集，第20巻，2014.
- 7) 武田誠，島田嘉樹，川池健司，松尾直規：庄内川の想定破堤氾濫による地下空間への流入水量の検討，第20回地下空間シンポジウム論文・報告集，pp155-164，2015.