

福岡市の地下空間を考慮した浸水解析

INUNDATION ANALYSIS CONSIDERING THE WATER BEHAVIOUR OF UNDERGROUND SPACE IN FUKUOKA CITY

武田 誠^{1*}・村瀬将隆²・三木研弥³・中島勇介⁴

Makoto TAKEDA^{1*}, Masataka MURASE², Kenya MIKI³
and Yusuke NAKAJIMA⁴

Recently, the risk and the countermeasures of the water disaster has been examined for the underground space in urban areas. In metropolitan areas subways and underground shopping centers are highly constructed. If large scale inundation occurs there, flood damage becomes serious in the underground space. In Fukuoka city the flood damage occurred in 1999 due to the flooding of the Mikasa River, then the subway line was inundated. Moreover, in our study group, the urban inundation analysis model was developed with consideration of the analysis on the water behavior in the underground space and subway lines. In this study, the developed analysis model was applied to the inundation situations on the water disaster of Fukuoka city in 1999. From this study, the inundation analysis results are good agreement with the observed inundated area and inundation situation in the subway line. In addition, the necessity of urban inundation analysis with high accuracy for evaluation of inflow discharge to underground space and the importance of the improvement of the analysis model of the underground shopping center and subway stations are shown.

Key Words : *Underground space, Subway, Inundation, Fukuoka City, Numerical analysis*

1. はじめに

近年, 大規模洪水・豪雨による浸水被害が多発しており, 2015年の鬼怒川における破堤氾濫災害や2017年の九州北部豪雨など, 甚大な被害が生じている。地球温暖化に伴う気候変動を考慮すれば, さらに大きな外力による洪水災害の発生も懸念されることから, 大規模浸水に対する備えは十分に検討する必要がある。

また, 地下鉄・地下街などの地下空間が高度に発展している都市域で大規模浸水が生じれば, 非常に深刻な被害となることは容易に想像できる。氾濫水は低い個所へと流れていくことから, ひとたび大規模浸水が生じ, その水が地下空間へ流れ込むことで, 人的被害, 経済被害, 地下鉄などの交通被害を生じさせるだけでなく, 地下鉄を伝って氾濫水が伝播し, 新たな浸水被害が生じる危険性もある。このような被害を想定し, 対策を講じるためには, まず, 大規模浸水における地下空間の浸水状況を

明らかにすることが重要である。

現在, 各市町や県, 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, 浸水予想図や, 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, 津波による地下浸水特性の評価³⁾, 内水氾濫モデルによる広域の洪水氾濫解析⁴⁾など,

キーワード: 地下空間, 地下鉄, 浸水, 福岡市, 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学生会員 中部大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Chubu University.

³非会員 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.

⁴正会員 若鈴コンサルタンツ株式会社 Wakasuzu Consultants Co., Ltd.

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⁹⁾。さらに、地下鉄を考慮した都市浸水に関する戸田・辻本⁹⁾、関根ら⁷⁾、石垣ら⁸⁾の研究も報告されている。

本研究の先行研究として、武田・島田ら⁹⁾、西田・武田ら¹⁰⁾、村瀬・武田ら¹¹⁾の研究がある。武田・島田ら⁹⁾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17km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広がるのが予想された。そこで、西田・武田ら¹⁰⁾は、武田・島田ら⁹⁾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。その結果、地下鉄内を氾濫水が流れ拡がり、満水になる様子と、名古屋市の東側は丘陵地であるので地下鉄内の浸水が拡がらないことなどが示された。村瀬・武田ら¹¹⁾は、開発された解析モデルを大阪（淀川）と東京（荒川）に適用し、都市浸水および地下浸水の様子を示し、異なる地域における浸水の危険性を示した。これらの比較から、特に、大阪において淀川が破堤した場合には、大きな浸水状況となり、低平地を通る地下鉄に流入し広域に拡がると共に、地上に噴出して他地域へ拡がる危険性も示された。

福岡市では、平成11年と平成15年に市内を流れる御笠川が氾濫し、博多駅周辺に浸水被害が生じ、氾濫水が地下空間へ流入し、地下鉄線路が浸水した。平成11年の浸水の様子は橋本ら¹²⁾により報告されている。本研究では、橋本らの成果を活用して、平成11年の福岡市における浸水を対象に、地下鉄を考慮した都市浸水解析を実施し、地下空間を有する都市域の浸水の特徴と、解析モデルの精度について検討した。なお、本研究は、下水道などの排水やビルの地下部における貯留などが考慮されておらず、第一段階的な位置づけである。

2. 地下空間への流入を考慮した氾濫解析

(1) 解析モデルの概要

村瀬・武田ら¹¹⁾の研究では、河川の洪水流には1次元不定流モデルを、都市域の氾濫域にはデカルト座標の平面2次元不定流モデルを、地下鉄線路の流れにはスロッ

トモデルによる1次元不定流モデルを適用し、地下街・地下鉄駅を1つのボックスとして連続式を考慮した水理計算を行っている。また、河川と氾濫格子の間の堤防では越流現象を考慮し、水位が堤防高よりも高い状況下では自動的に越流流量を求めた。本研究では、橋本ら¹²⁾による越水流量を境界条件として用いたことから、河川流は解かないものとした。解析モデルを以下に示す。

(2) 浸水解析

陸域における浸水解析には、以下に示す平面二次元の運動量方程式および連続式を用いた。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(z_G + h)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(z_G + h)}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速(m/s)、 h は水深(m)、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス($M = uh, N = vh$)(m^2/s)、 q_o は単位面積当たりの流出流量(m^2/s)であり、 $q_o = \sum q_n l_n / \Delta x \Delta y$ (q_n : 単位幅当たりの横流入流量(m^2/s)、 l_n : 格子にある河川区分の長さ(m)、 $\Delta x \Delta y$: 格子の面積(m^2))、 z_G は地盤高(m)、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力(Pa)、 ρ は水の密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数(m^2/s)であり、本研究では0とした。 x, y は平面の座標、 t は時間である。

底面のせん断応力は、マンニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

また、堤防箇所の単位幅横流入流量は以下のように求めた。橋本ら¹²⁾により、後述する越流流量と越流箇所が示されている。そこで、計算格子上での越流箇所を設定し、その格子に隣接する陸域格子に氾濫水が幅一様に流入するとした。また、それぞれの越流箇所からの流入流量は同じと仮定して、越流箇所からの総越流流量が、橋本らの算出値¹²⁾と同じになるように該当箇所の単位幅流入流量(M, N)を求めた。

本研究では、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。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($d3$)、止水板の高さ($d4$)、横幅 (B) は、後述するように現地調査により求めた。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。

$$h_{in} = H - (z1 + d2 + d3 + d4) \quad (6)$$

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。

$$Q_{in} = h_{in} B \sqrt{gh_{in}} \quad (7)$$

(3) 地下空間のモデル化の概要

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。解析に用いた地下街・地下鉄駅と地下鉄線路のイメージを図-1に示す。

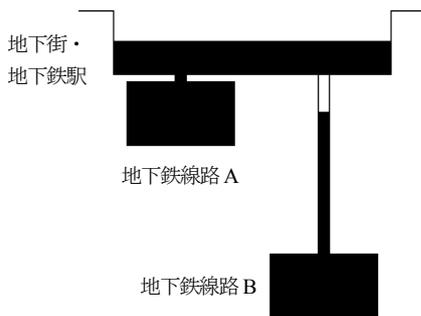


図-1 地下街・地下鉄のモデル

a) 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。

$$A_u \frac{dh_u}{dt} = \sum Q_e - \sum Q_o \quad (8)$$

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 $h_{in_u} = h_u + z_{bu} - (z1 + d2 + d3 + d4)$ （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(6)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。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_e = \mu B h_1 \sqrt{2gh_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_e = \mu' B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

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。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_o = \mu L h_1 \sqrt{2gh_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_o = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (10)$$

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。

b) 地下鉄線路

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。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_o \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s Q_s}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial (h_s + z_{bs})}{\partial x} - \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \quad (12)$$

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。なお、スロット幅は $g A_{SS} / C^2$ から求め、 A_{SS} は地下鉄の断面積、 C は満管時の波速(20m/sと仮定)である。

地下鉄の断面は、図-2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(10)の流量が計算される。また、地下鉄路線に

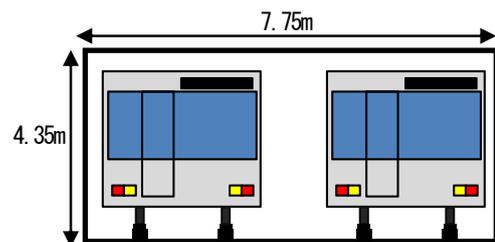


図-2 地下鉄断面

侵入した氾濫水が、乗換駅で吹き出し地下街・地下鉄駅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。

(4) 計算領域の設定

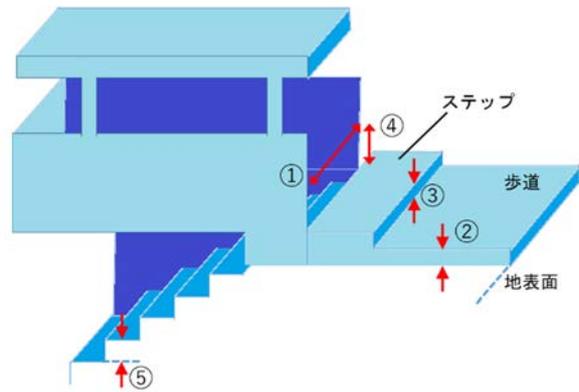
本研究において、地下街・地下鉄駅の面積および底面高と各駅の線路高を整備した。地下街・地下鉄駅の面積は Web にある数値地図より入手した。また、駅における地下鉄線路高を基礎として、縦 4.35m×横 7.75m の地下鉄断面があり、駅間の線路の平面線形は web と GIS を活用して求め、駅間の線路高は直線的に変化するとした。また、線路断面の天井の上 0.5m に地下街・地下鉄の底面高があると仮定した。なお、乗換駅では複数の底面高が現れるので、一番高い値を地下街・地下鉄の底面高とし、地下鉄線路とは周長 20m の入口で接続されているとみなしている。なお、このように、地下街・地下鉄駅を一つのボ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。

3. 福岡市の地下空間の入口調査

福岡市における地下空間を考慮した都市浸水解析を実施するために、平成29年7月10日に、福岡市にある地下鉄および地下街の入口の情報を調査した。表-1に対象とした駅を、図-3に入口で測定した諸量を示す。表-1から、対象とした地下鉄には入口の数が極端に多い駅は少なく、地下街も含めた入口の多い地下空間は、博多駅と天神駅であった。また、図-4に、得られた測量結果から求めた入口のステップ高を示す。図-4から、博多駅の場合、駅の中心部の入口のステップ高が低く、離れるほど高くなっている様子が分かる。後に示す浸水解析の結果からも、博多駅を中心として浸水している様子があり、平成11年の浸水実績の様子からも同じことがいえる。したがって、博多駅を中心として低くなっているという地盤高の分布特性は、博多駅周辺の浸水特性に大きな影響を与えている。さらに、空港線と箱崎線は中洲川端駅で連結しており、両者の水の輸送は中洲川端駅を通じて行われる。また、空港線と七隈線は天神地下街を通じて連結しているが、5.の検討では、七隈線が開通していない平成11年当時を考慮して、天神地下街を通じた七隈線への水輸送は無いものとした。したがって、七隈線には浸水が生じない計算となる。なお、想定浸水解析である6.の検討では、天神地下街の七隈線との接続を考慮した。また、本調査から得られた止水板の高さは、場所による違いもあるが、1m程度のものが多かった。

表-1 測定した駅と出入口の個数

空港線	入口数	七隈線	入口数	箱崎線	入口数
福岡空港駅	3	天神南駅	4	貝塚駅	2
東比恵駅	6	渡辺通駅	2	箱崎九大前駅	3
博多駅	30	薬院駅	2	箱崎宮前駅	3
祇園駅	5	薬院大通駅	2	馬出九大病院前駅	7
天神駅	41	桜坂駅	2	千代県庁口駅	7
赤坂駅	5	六本松駅	2	呉服町駅	4
大濠公園駅	5	別府駅	3		
唐人町駅	6	茶山駅	2		
西新駅	6	金山駅	2		
藤崎駅	4	七隈駅	2		
室見駅	5	福大前駅	2		
姪浜	2	梅林駅	2		
中洲川端駅	5	野芥駅	2		
		賀茂駅	2		
		次郎丸駅	2		
		橋本駅	2		
		合計	35駅		184箇所



調査項目	
地下入口の場所確認	地上～駅構内の階段1段の高さ：⑤
入口の幅：①	地上～駅構内の階段の段数
地表面から歩道までの高さ：②	駅構内～ホームの階段1段の高さ
歩道からステップまでの高さ：③	駅構内～ホームの階段の段数
止水板の高さ：④	

図-3 入口の計測の諸量



図-4 地下空間入口の標高の分布

4. 平成11年の福岡水害の様子

平成11年6月28日夜から29日にかけて、九州北部に豪雨が生じ、各地で土砂崩れや浸水などの被害が発生した。特に福岡市では、29日午前8時から9時にかけて77mmの降水量を観測し、御笠川や山王放水路が氾濫し、博多駅周辺が浸水すると共に、地下空間に氾濫水が流入した。当時の水理を示す情報として、橋本ら¹²⁾により、図-6の浸水域および図-7の越流流量が示されている。本研究では、これらの情報を活用した。

5. 計算条件および計算結果

(1) 計算条件

本研究では、橋本ら¹²⁾による平成11年の水害の調査情報を活用し、図-8の越水箇所からの越流流量の総量が図-7と等しくなるように設定して、10時間の計算を行った。なお、越水箇所の越流流量は同一河川において同じと仮定した。ここでは、止水板は無いものとした。

(2) 計算結果

計算結果として、最大浸水深の分布を図-8に示す。ここでは、図-5の赤枠の博多駅周辺の様子を拡大して示している。図-8では、博多駅の西側の浸水の様子が示されていない。これは、鉄道をくぐる道路を表現できていないためである。そこで、アンダーパスのある計算格子に周辺の道路高を与えて計算を進めた。図-9にアンダーパスを考慮した場合の浸水の様子を示す。本図から、氾濫水が博多駅を越えて那珂川まで広がっていることが分かる。図-6と図-9とを比べると、明らかに計算結果は拡がり過ぎている。これは、用いた計算格子が50m×50mの大きさのものであり、実際の微地形が表現できていないこと、解析に建物が考慮されておらず、実際には建物が氾濫水の拡がりを防ぐように機能した可能性があること、水防活動により水の拡がりが制御されたこと、などが考えられるが、現時点では、その理由を確定することはできない。ここで用いた地盤高分布からは氾濫水が広域に拡がることも理解できるので、氾濫域が図-6となるように、図-10で示された箇所の地盤高を80cm上げて計算を行った。この値の妥当性には不明な点が残る。この点については今後の課題とし、ここでは、氾濫域を図-6に合わせたときの地下浸水の様子を検討した。まず、最大浸水深の分布を図-11に示す。本図と図-6との比較を行うと、両者が類似した浸水域を示していることが分かる。また、実測値の浸水深の最大値は約100cmであり、本解析の浸水深の最大値は約80cmであ

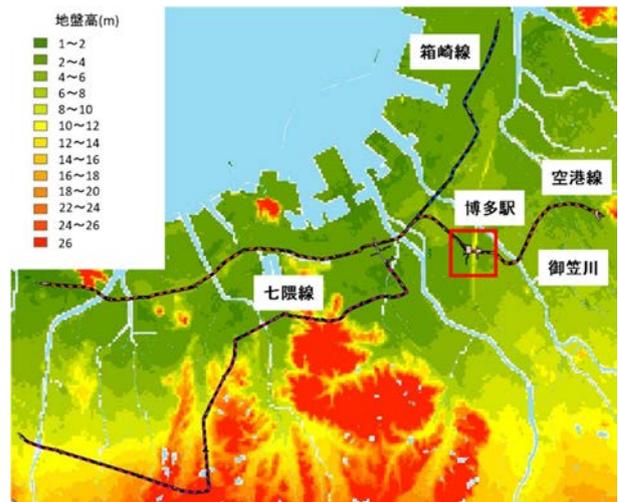


図-5 計算領域および地下鉄路線

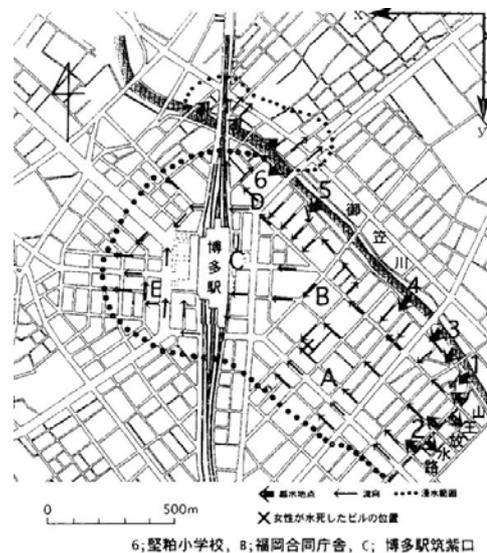


図-6 博多駅周辺の浸水の様子(橋本ら¹²⁾)

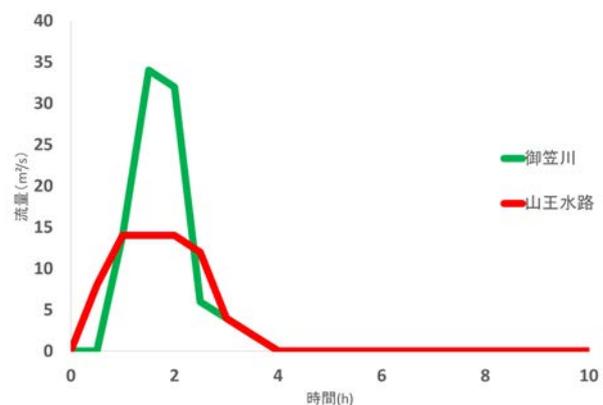


図-7 越流流量(橋本ら¹²⁾の情報を加工)

った。このことから、地表面の浸水計算は概ね平成11年当時の浸水を表現している。つぎに、地下鉄の浸水の様子を図-12に示す。本図から地下鉄の浸水が生じていることが分かる。これらのことから、本研究により、地

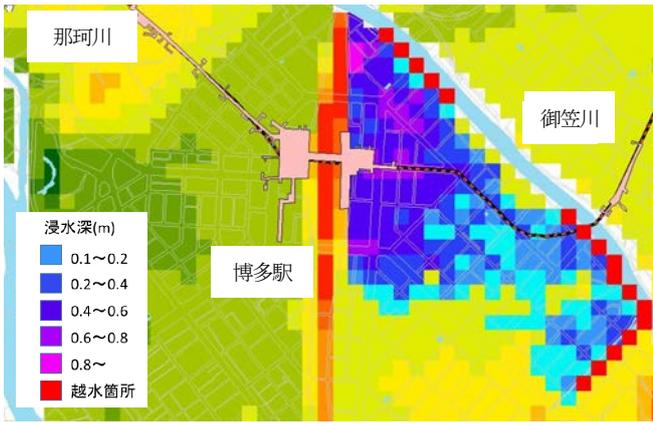


図-8 最大浸水深

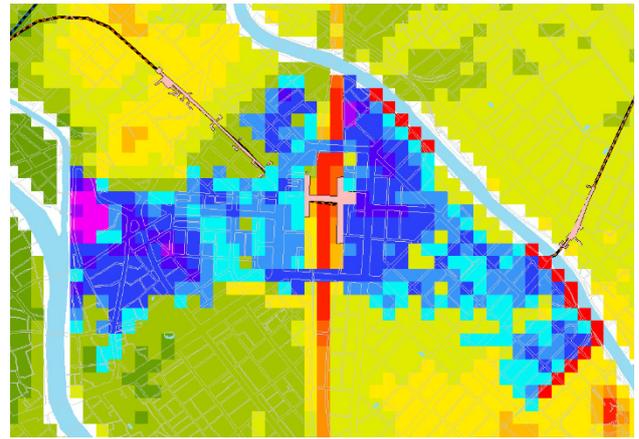


図-9 最大浸水深(道路の高架を考慮した場合)



図-10 地盤高の修正箇所

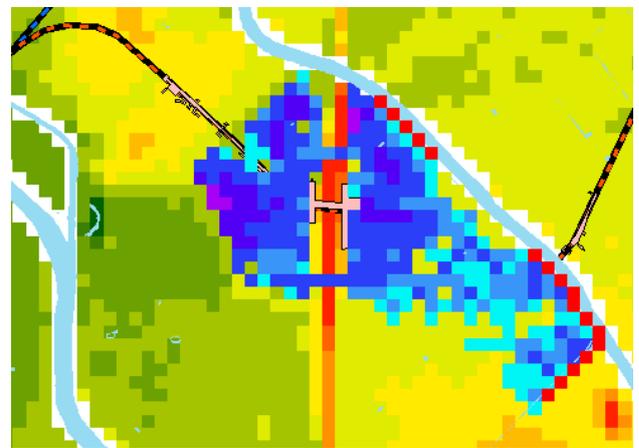


図-11 最大浸水深(地盤高の修正を考慮した場合)

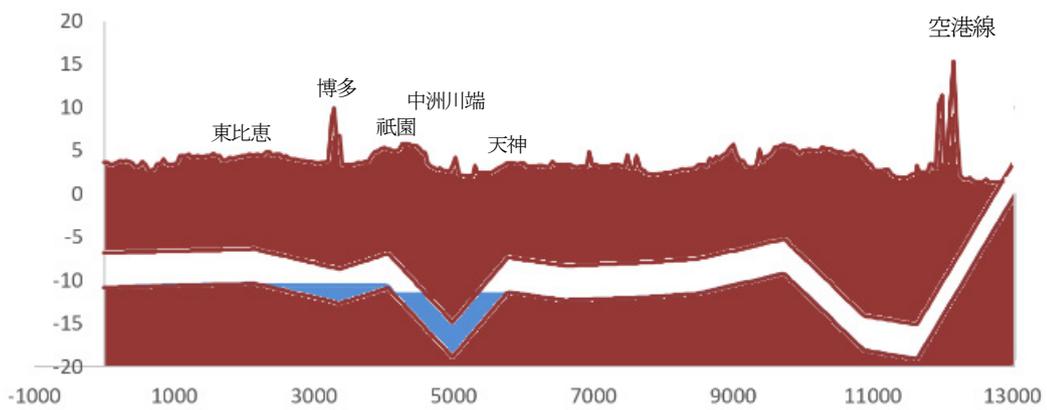


図-12 地下鉄線路の浸水の様子(計算終了時)

上の浸水，地下空間への氾濫水の流入，地下鉄駅の浸水と地下鉄内の氾濫水の拡がり計算できた。平成 11 年の福岡水害では，博多駅から東比恵駅方面に約 1km 冠水し，博多駅では線路部において 1.3m の浸水があった。本計算では博多駅の地下鉄の浸水深は 2m 近くあり，中

洲川端駅では鉄道線路が水没しており，本計算では実際よりも多くの水が地下鉄線路に流入している。これらの課題の解決のためには，地上の氾濫計算における格子の詳細化，下水道などの排水システムやビルの地下部，地下鉄駅および地下街の貯留効果の考慮などが挙げられる。

6. 止水板と越流流量増加を考慮した数値実験

(1) 地下空間の入口の止水板設置の効果

5.で得られた浸水水量に対する地下空間の浸水水量の割合（計算終了時の地下の浸水水量 / (計算終了時の地上の浸水水量 + 地下空間の浸水水量)）をみれば、その値は約47%であった。このことから本計算では相当の水量が地下空間へ流入している。ここでは、地下空間の入口にある止水板（(6)式のd4）を考慮し、5. (1)と同様の計算条件を用いて、浸水解析を行った。その結果を図-13に示す。なお、ここでは次に示す流量変化の検討を考慮し、図-11と最大浸水深の表示の区分けを変えている。

計算結果からは地下浸水が生じておらず、図-13の地下浸水の平面図からも地下鉄線路内に浸水が無いことが分かる。これは、博多駅周辺の最大浸水深は1m以下であり、地下空間の入口も道路面から高く、さらに止水板が在るので、地下浸水が生じなかったことが考えられる。このことから、博多駅周辺における止水板設置の効果と重要性が改めて示された。

(2) 越流流量増加を考慮した数値実験

近年、気候変動に伴う大規模出水について多くの場所で検討が行われている。ここでは、仮に、越流流量を2倍、5倍、10倍とした場合の計算結果について検討する。

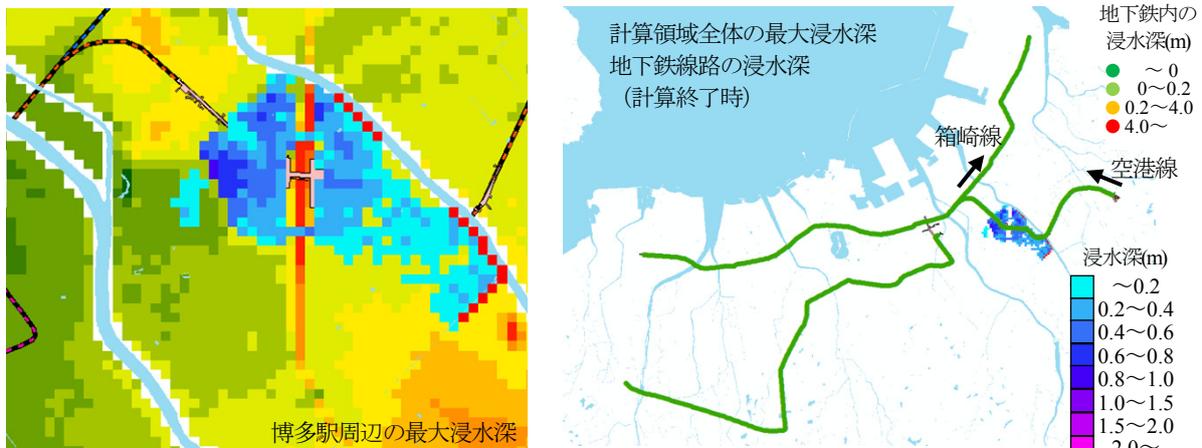


図-13 止水板を考慮した計算結果

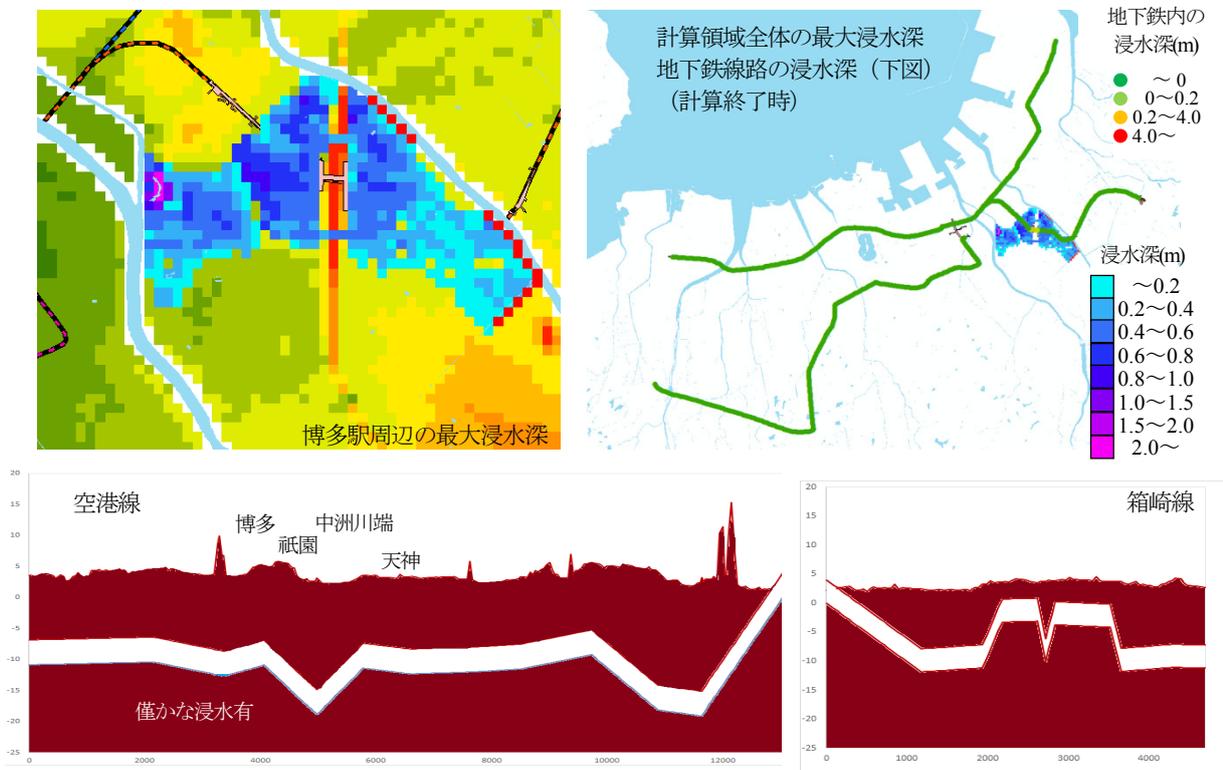


図-14 止水板を考慮し越流流量を2倍とした計算結果

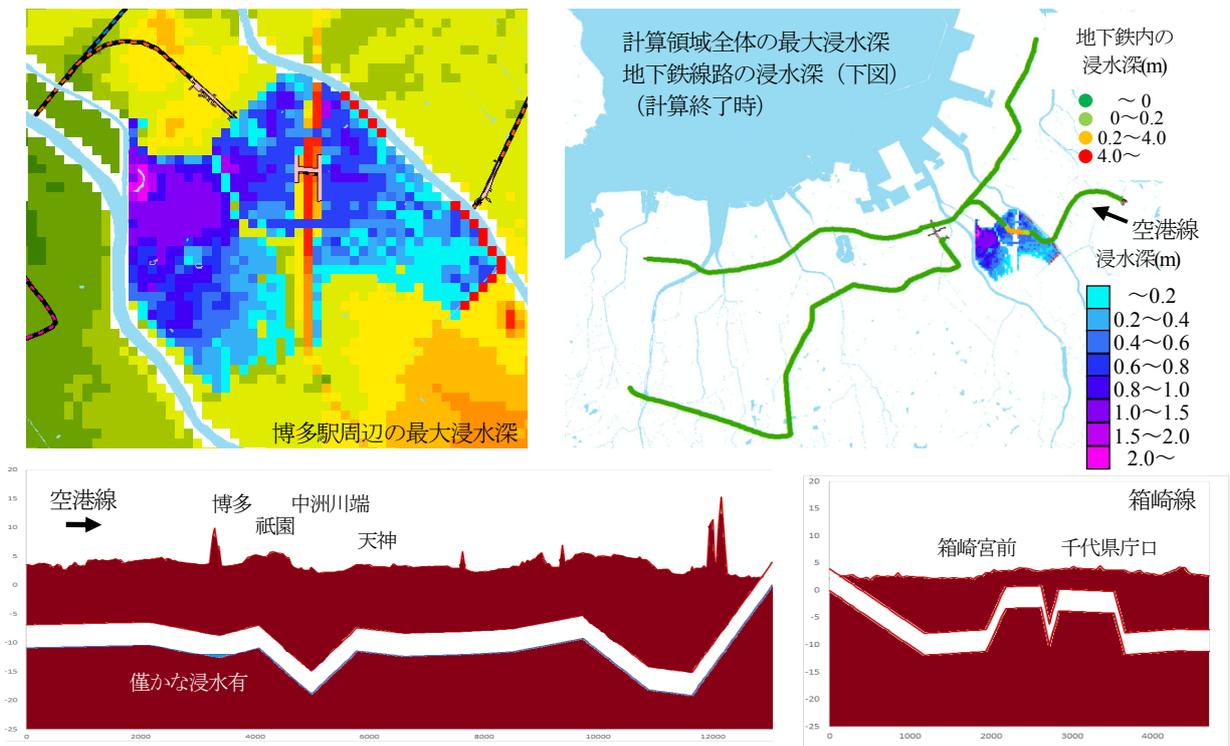


図-15 止水板を考慮し越流流量を5倍とした計算結果

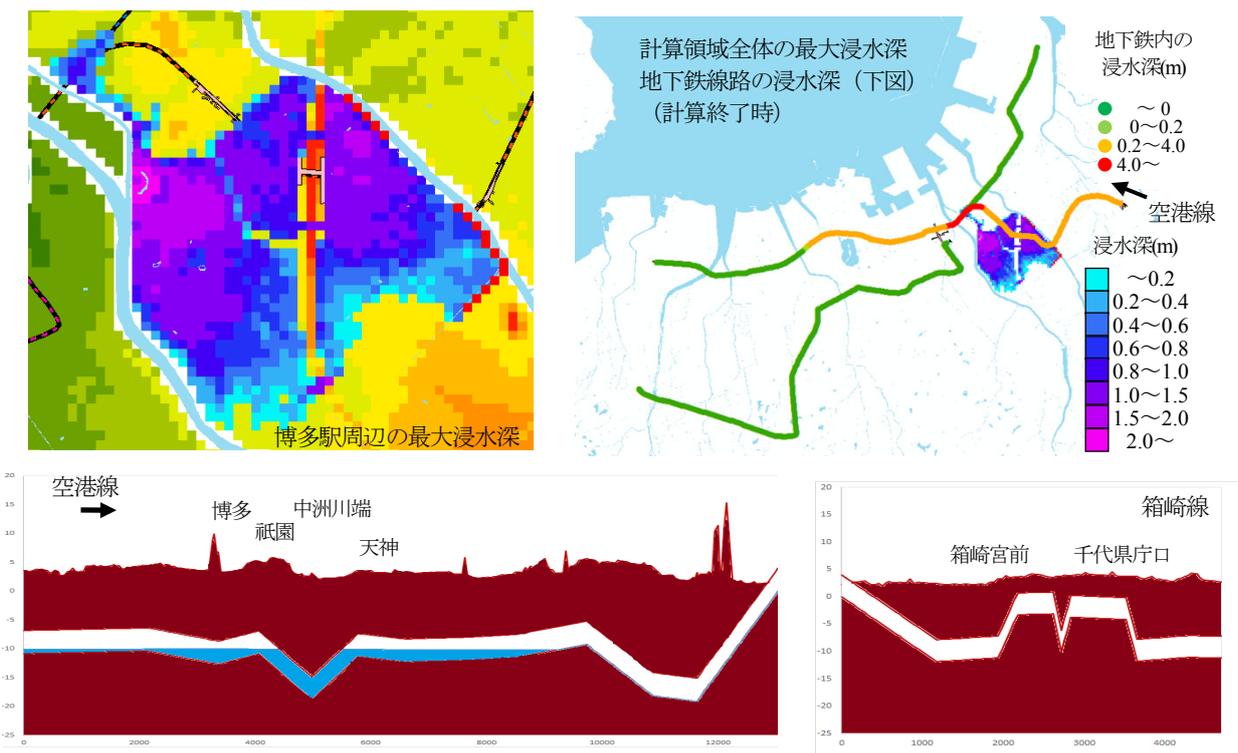


図-16 止水板を考慮し越流流量を10倍とした計算結果

なお、それぞれの条件設定に明確な根拠はないが、越流流量が増大した場合の浸水被害の想定参考資料になると考えた。図-14～図-16にそれぞれの条件における地上と地下の浸水の様子を示す。越流流量を2倍、5倍とした場合の計算結果では、地上の浸水の拡がりが大きくな

るが、地下空間の浸水は僅かであった。これは越流流量が多い場合でも地形の影響により氾濫水が西側へ流下し、地下鉄入口の浸水が止水板を超えるほどには大きくならず、地下空間への流入が少ないことが考えられる。また、越流流量を10倍とした場合は、博多駅周辺の浸水

深も大きくなり、地下への流入流量も増えて、氾濫水が地下鉄線路内を拡がっていることが分かる。しかし、この場合においても、乗換駅を介して他の地下鉄線路へ氾濫水が拡がる様子は見られなかった。これらの結果から、大規模浸水時における博多駅周辺の氾濫水の様子と、地下浸水に対する止水板設置の効果は大きいことが示された。

7. おわりに

本研究では、福岡市を対象に、大規模浸水における地下空間を有する都市の浸水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水の拡がり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) 洪水越流による都市浸水、地下への流入と地下鉄による浸水の拡がりを求める数値解析モデルを平成11年の福岡市の水害に適用した。地盤高の修正を考慮して、当時の浸水域を再現することができた。さらに、地下鉄内の浸水も表現することができた。しかし、計算結果と実績における地下鉄内の水量の不一致もみられたことから、今後、精度に関する検討を行う必要がある。

2) 入口の止水板を設置した数値実験を行ったところ、地下流入を防ぐことができていた。このことから、適切な止水板の設置は、平成11年の福岡水害における地下浸水にとって非常に効果的であることが改めて示された。

3) 越流流量を2倍、5倍、10倍と変化させ、止水板を設置した場合の数値実験を行った。その結果、越流流量の増加に伴って、地上の浸水範囲が大きくなっていることが示されたが、越流流量が2倍と5倍の場合は氾濫水が博多駅を越えて西側へ流下し、地下浸水は僅かであった。このことから、博多駅周辺の浸水特性が示されたと共に、止水板の重要性も改めて示された。

本研究では、公開されている情報を活用して、地下街・地下鉄駅を有する都市の大規模浸水の様子を求めた。本研究により、地下空間の浸水を検討するためには、まず、適切に地上の浸水を表現する必要があること、地下鉄駅・地下街の水の貯留を適切に見積もることなど、課題も明らかとなった。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を受けて実施されました。また、図面の作成に当たっては、中部大学4年生の藪下大貴君の支援を受けました。ここに記して謝意を表します。

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-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) 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), Vol.72, I_1369-I_1374, 2016.
- 8) 岡部良治, 寺田光宏, 土井峻平, 石垣泰輔, 外水氾濫における地下鉄軌道を伝播する氾濫水の挙動予測に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会, II-116, 2016.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田 誠, 川池健司, 洪水破堤による三大都市圏の浸水解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, pp.97-102, 第23巻, 2018.
- 12) 橋本晴行, 朴埼瑛, 渡辺政広, 1999年6月福岡水害時に発生した博多駅周辺の洪水および氾濫流の再現計算, 自然災害科学 JJSNDS 21-4 369-384, 2003.