

福岡市の地上・地下空間を統合した浸水解析

Inundation analysis for ground and underground spaces in Fukuoka city

戸田圭一¹・間島真嗣²・大八木 亮³

Keiichi TODA, Shinji AIHATA and Ryo OYAGI

¹ 京都大学防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 京都大学工学部 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 京都大学大学院工学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

1. はじめに

地下空間の存在する大都市中心部で水害が発生すると、地上だけでなく地下も被害を受ける。地下空間は地上より地盤が低いため、地上の氾濫水が流入しやすいことは、容易に想像できる。地下空間に溜まった氾濫水はポンプにより排水されるため、排水に時間がかかり、復旧が遅れることが考えられる。また、復旧に時間がかかると、地下鉄の運休や商店の営業停止期間が長引くことになる。

福岡市では、1999年6月と2003年7月の2度にわたって御笠川およびそれに合流する山王放水路が溢水した。これによる氾濫水がJR博多駅地下空間に流入し、大きな被害を与えた。橋本ら¹⁾は1999年6月水害時の御笠川と山王放水路からの越流について、洪水流の不定流計算によりその時間的な経緯や越流量を調べた。また、博多駅周辺の洪水氾濫流を、平面2次元氾濫モデルを用いて再現計算を行った。本研究では、JR博多駅地下空間に着目し、地上と地下空間を統合して1999年6月水害の再現計算を行い、モデルの妥当性を検討した。そして、2003年7月水害の条件でも計算を行い、地下の浸水状況を調べた。

2. 基礎式および解析手法

地下街の浸水解析には井上ら²⁾の手法に先端条件をくわえたものを用いた。そして、地上部の浸水解析にも同じ手法を適用し、地上部と地下空間を統合した浸水解析手法を提示する。

(1) 地下街・地上部の解析手法

図-1に今回用いるモデルの概念図を示す。地下街は商業スペース、広場、地下鉄改札口、隣接ビルの地階などがつながっている。そこで、各ゾーンを隔てる壁や、地盤高、階層の違いなどによって地下街を複数の領域に分割し、各領域を固有の容積をもった貯留槽と見立てた。そうすると、地下街を貯留槽が3次的に連結した空間として考えることができる。地下街内での浸水の拡がりや、その貯留槽間の流量を求めることで表現することができる。以上のような地下街のモデルに、スロットを組み込んだ解析手法を適用した。

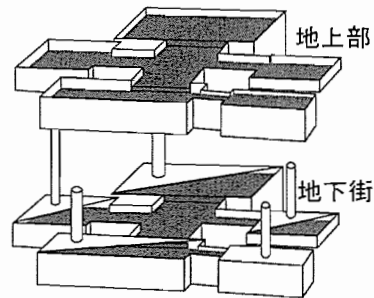


図-1 貯留槽モデルの概念図

地上部にも同様の手法を適用した。ただし、スロットは組み込んでいない。この解析手法を用いたのは複雑な地形場に対してもモデル化が比較的容易であるためである。今回の研究で対象とした地上部は都市化が進んでいて、とくに市内中心部では道路が網羅されている。そこで、おもに道路で多数の領域に分割し、それらを貯留槽とみなした。

まず、貯留槽間の連続式は、断面積 A_s のスロットを考えることにより以下のように表す。

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad \text{ただし、} A = \begin{cases} A_f & h < D \\ A_s & h \geq D \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 A :貯留槽の有効底面積、 A_f :貯留槽の底面積、 A_s :スロットの面積、 h :水深、 t :時間、 Q_i :貯留槽が有する i 番目の界面から流入する流量、 m :流量の出入りが行われる界面数、 Q_{in} :地上や地下街の他の階層などからの流入流量、 D :貯留槽の天井高である。ただし、地上部の解析では、スロットは用いていないので常に $A = A_f$ となる。

次に、貯留槽間の運動量式は、次式を用いる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha LQ|Q| \quad (2)$$

ここで、 ΔH :隣接した貯留槽間の水位差、 Q :流量、 g :重力加速度、 t :時間、 L :隣接した貯留槽の図心間の距離、 A_b :接面の断面積である。また、 α は損失係数であり、

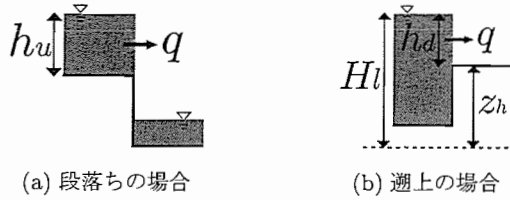


図-2 先端の扱い

マンニングの粗度係数 n を用い、次式のように表す。

$$\alpha = \frac{n^2 s^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (3)$$

ここで、 s は接面の潤辺である。

本研究では井上²⁾の手法に先端条件を付加した。先端の扱いについては川池³⁾が地上部で適用した手法を用いた。それを以下に示す。

地盤高の低い方の水位が他方の地盤高より低い場合(図-2(a))は、地盤の高い方の水深(h_u)を用いて以下の段落ち式より単位幅流量 q を求める。

$$q = \mu_1 h_u \sqrt{g h_u} \quad (4)$$

地盤高の低いほうの水位(H_l)が他方の地盤高(z_h)よりも高い場合(図-2(b))は、 $h_d = H_l - z_h$ として以下の越流公式を用いて単位幅流量 q を求める。

$$q = \mu_2 h_d \sqrt{2g h_d} \quad (5)$$

ここに、 μ_1, μ_2 :流量係数で、 $\mu_1 = 0.544, \mu_2 = 0.35$ とする。また、 g は重力加速度である。

(2) 上層と下層の接続

地下街と地下鉄空間とをつなぐ階段や地下街内の地下1階と地下2階をつなぐ階段、地上部と地下空間とをつなぐ階段では、上層から下層への氾濫水の落ち込み、あるいは下層が満杯となって氾濫水が下層から上層に逆流する状態が考えられる。そこで、上下層の水のやり取りについては、以下の解析手法を用いる。

上層から下層へ氾濫水が流入し、かつ下層が管路状態でない場合は下層への流入流量を以下の段落ち式で求める。

$$Q = B \mu h_0 \sqrt{g h_0} \quad (6)$$

ただし、 B :流入口の流下幅、 h_0 :上層の水深とした。ここで、 μ は段落ち流れの流量係数である。

下層が管路状態(水位が天井に達している状態)になっている場合、水の移動は上層の水位と下層の水位(スロットの水位)との水位差で生じるものとした。流量算出には地下街と地上部の浸水解析で用いた式(2)を用いる。ただし、 ΔH :上層と下層の水位差、 A_b :開口部の断面積、 L :上下層間の床厚である。

3. 福岡市の地上・地下空間の浸水解析

(1) 対象領域

図-3に示すように東を御笠川左岸、西をJR線より100m~700m西の道路、南をきよみ通に囲まれた地域を対象領域とした。面積は約2.8km²である。対象領域は1999年6月と2003年7月の水害による浸水域の実績から決定した。領域の境界では水のやりとりがない

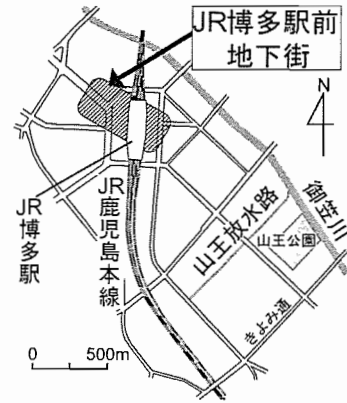


図-3 地上の対象領域

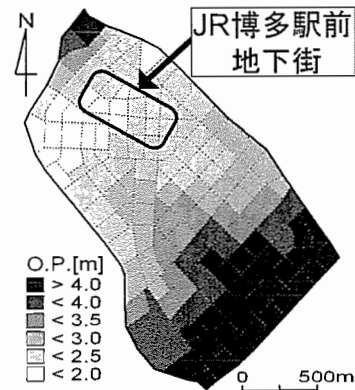


図-4 地上の地盤高図

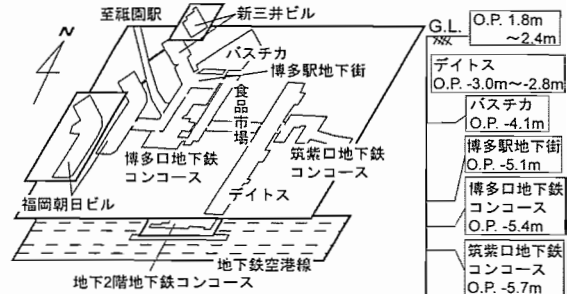


図-5 JR 博多駅地下空間の対象領域

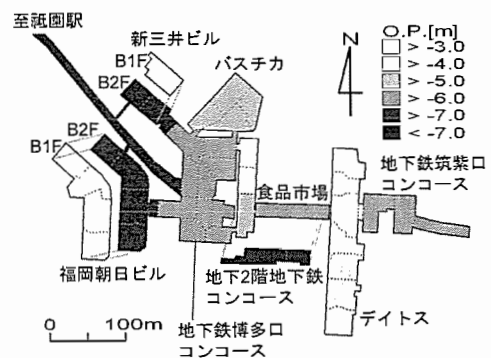


図-6 JR 博多駅地下空間の地盤高図

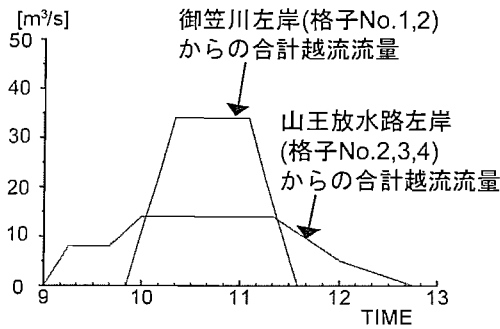


図-7 流入流量の時間変化

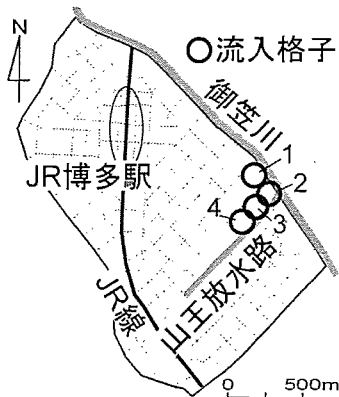


図-8 流入格子

ものとした。図-4に地盤高図を示す。これより、御笠川からJR博多駅に向かって地盤が低くなるのがわかる。御笠川からの氾濫水がJR博多駅方面に流れていくことは容易に想像できる。盛土であるJR線では、水位が盛土上面を超えると氾濫水のやりとりが生じるとした。ただし、JR線高架下を横切る道路がある箇所では、氾濫水が通過することができるとした。

図-5にJR博多駅地下空間の対象領域を示す。JR博多駅地下空間は、大きく分けると、JR博多駅前地下街と地下鉄軌道空間の2つの空間から構成されている。JR博多駅前地下街は、筑紫口側と博多口側から構成されている。筑紫口側と博多口側は食品市場でつながっている。地下鉄コンコースは3箇所、博多口側と筑紫口側、食品市場のさらに下の地下2階にある。地下鉄軌道空間は、十分大きな容積を持った貯留槽とした。地下空間の延べ床面積は地下鉄軌道空間を除いて約 $5.2 \times 10^4 \text{m}^2$ であり、容積は約 $16.9 \times 10^4 \text{m}^3$ である。図-6に対象領域の地盤高図を示す。JR博多駅前地下街を構成する各地下商店街、雑居ビル、地下鉄コンコースの地盤高はそれぞれ異なる。

また、地上・地下空間ともに、各格子における面積の有効率を考慮した。ここで、面積の有効率とはそれぞれの格子につき、それぞれの格子の全面積に対する実際に水が溜まる部分の面積の割合と定義する。

(2) 1999年6月水害への適用

a) 計算条件

流入流量として、橋本ら¹⁾が求めた越流流量を用いた。図-7に流入流量の時間変化を、図-8に流入させる格子を示す。ただし、1つの格子への流入流量はそれぞ

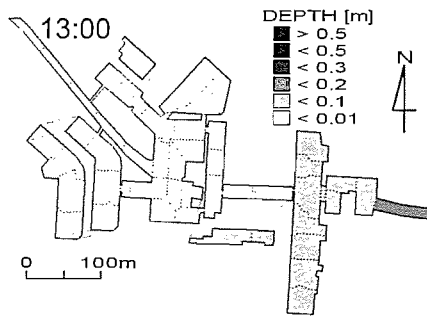
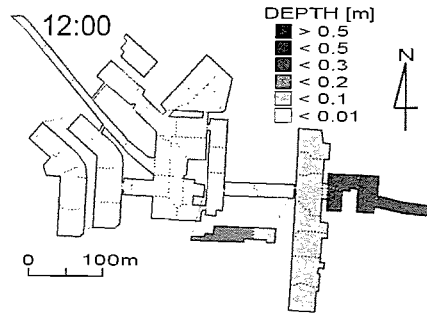
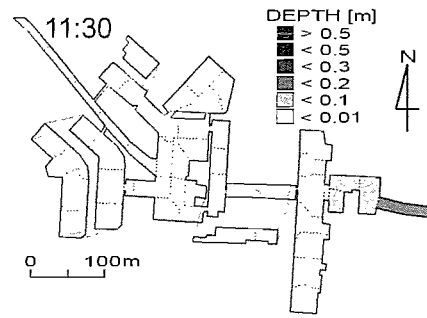


図-9 JR博多駅地下空間の浸水の時間変化

れ均等に配分した。計算開始時刻は山王放水路からの越流が始まる1999年6月29日9:00とした。

1999年6月の水害を再現計算するため、下水道による排水(下水道の設計値である52mm/hrの7割に相当する36.4mm/hrで雨水を排水)、地上の対象領域内にあるビル地階への流入(合計約 $6.0 \times 10^4 \text{m}^3$)、デイトスの地下貯水槽(容量約 $1.3 \times 10^4 \text{m}^3$)への貯留、歩道から地下街入口への段差および車道と歩道の段差(合計30cm)を考慮した。

マンシングの粗度係数は、地上では $n=0.067$ とし、地下街、ならびに上下層のつながりの箇所は $n=0.030$ とした。段落ち式の流量係数 μ は $\mu=0.544$ とした。計算時間ステップ Δt は $\Delta t=0.05\text{s}$ とした。スロットの面積は、有効率を考慮した格子面積の2%とした。

b) 計算結果と考察

図-9に計算で得られたJR博多駅地下空間の浸水の時間変化を示す。図-10にJR博多駅地下空間の最大浸水深と1999年6月水害時の浸水実績を示す。1999年6月水害時の浸水実績は記者発表資料⁴⁾を用いた。最大浸水深図と実績の浸水域を比較すると、浸水域はおおむね一致していることがわかる。博多口側において、実績では浸水しているが計算結果では浸水していない箇所が見られる。しかし、この箇所の実績の水深は5cm未満と小さいので、ほぼ実績と計算結果が一致していると

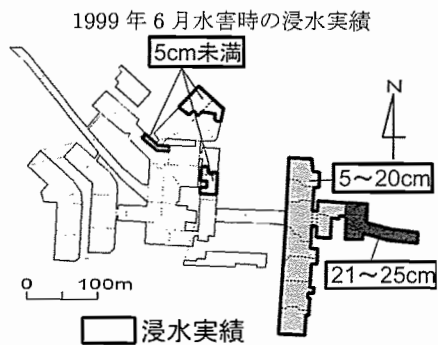
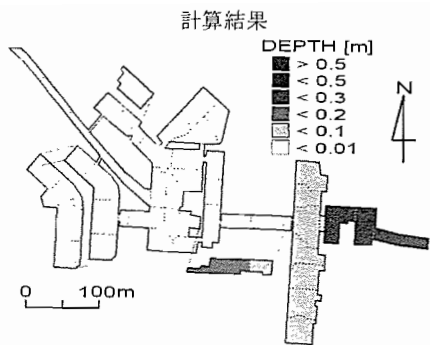


図-10 JR 博多駅地下空間の最大浸水深図

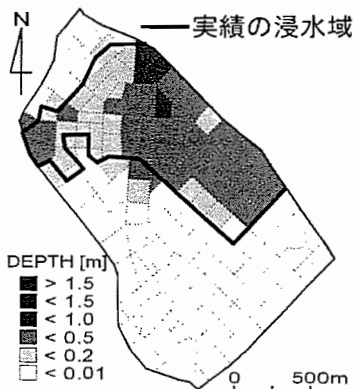


図-11 地上の最大浸水深図

いえる。地下鉄軌道空間に流入した水量は計算終了時点(13:00)では約 5000m^3 であり、実績値では約 $1000\text{m}^3 \sim 2000\text{m}^3$ といわれている。

図-11 に地上の最大浸水深図および1999年6月水害時の浸水域の実績を示す。浸水域の実績は橋本らの調査結果⁵⁾を用いた。計算結果と実績の浸水域はおおむね一致しているといえる。計算結果の最大浸水深はJR線の東側で大きく、西側で小さい。これは、JR線に盛土があるため、東側と西側の氾濫水のやりとりが高架下の道路を通じてしか行われなかったためである。

図-12 に全氾濫水量、下水の排水量、ビル地階とJR博多駅地下空間への流入量の時間変化を示す。ビル地階とJR博多駅地下空間への流入量の合計は計算終了時点(13:00)で約 $7.0 \times 10^4\text{m}^3$ である。全氾濫水量が約 $27.7 \times 10^4\text{m}^3$ であるので、全氾濫水量の約4分の1がビル地階とJR博多駅前地下空間へ流入したことがわ

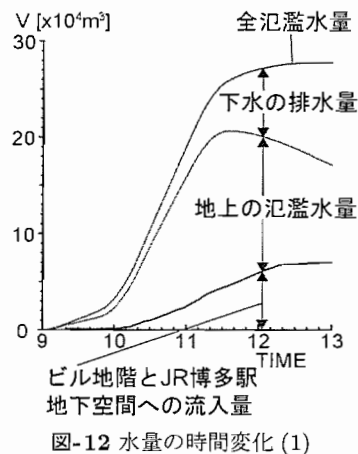


図-12 水量の時間変化 (1)

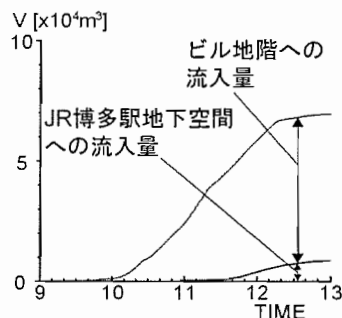


図-13 水量の時間変化 (2)

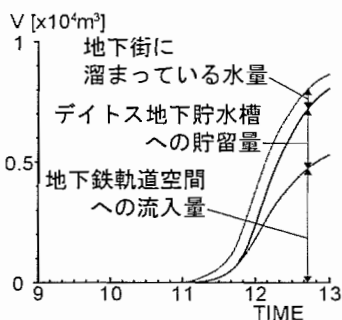


図-14 水量の時間変化 (3)

かる。図-13 にビル地階とJR博多駅地下空間への流入量の時間変化を示す。JR博多駅地下空間への流入量は計算終了時点(13:00)で約 9000m^3 である。全氾濫水量の約3%がJR博多駅地下空間へ流入した。図-14 に地下街に溜まっている水量、デイトス地下貯水槽への貯留量、地下鉄軌道空間への流入量を示す。計算終了時点(13:00)で、JR博多駅地下空間への流入量約 9000m^3 のうち、約 5000m^3 が地下鉄軌道空間に流入した。JR博多駅地下空間に流入した氾濫水の約6割が地下鉄軌道空間へ流入したことがわかる。また、デイトス地下貯水槽へは計算終了時点(13:00)で約 3000m^3 が流入した。地下鉄軌道空間とデイトス地下貯水槽がなければ、地下街の浸水被害が大きくなったと予想される。

全般に、計算結果は実績とおおむね一致した。特にJR博多駅前地下街の浸水域および水深は実績とおおむね一致したといえる。しかし、地下鉄への流入量が計

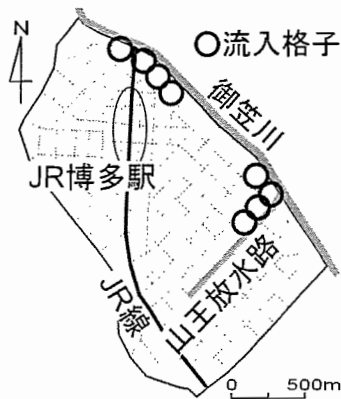


図-15 流入格子

算結果と実績で一致しない。この原因として、今回考慮した下水道による排水、地上の対象領域内にあるビル地階への流入、デイトスの地下貯水槽への貯留、JR博多駅前地下街入口に設置された段差の評価方法に厳密さを欠く点が考えられる。

(3) 2003年7月水害への適用

a) 計算条件

御笠川および山王放水路から流入する格子を、橋本ら⁶⁾による2003年7月水害時の越流箇所より決定した。この水害では、山王放水路と御笠川の合流地点付近に加えて、JR博多駅北部の御笠川左岸からも越流した。また、JR博多駅北部では、越流箇所が、JR線の東側だけでなく西側にも位置していた。そのため、JR博多駅前地下街の筑紫口側だけでなく、博多口側も浸水被害を受けた。図-15に流入させる格子を示す。山王放水路と御笠川の合流地点付近の4つの格子と、JR博多駅北部の4つの格子から流入させた。前節の1999年6月水害では、山王放水路と御笠川の合流地点付近で最大約50m³/sの流量が約50分間続くとした。2003年7月水害でも山王放水路と御笠川の合流地点付近で同程度の越流が発生するとし、流量40m³/sの越流が50分間続くとした。JR博多駅北部の御笠川においても、同様に流量40m³/sの越流が50分間続くとした。ただし、1つの格子への流量はそれぞれ均等に配分した。合計流量80m³/sの越流が50分間続くとときの合計越流量は、24.0×10⁴m³である。これらを計算開始とともに流入させた。その他の条件は全て1999年6月水害の再現計算と同様とした。

b) 計算結果と考察

図-16にJR博多駅前地下街の最大浸水深図を示す。筑紫口側だけでなく博多口側も浸水することがわかる。ほとんどの箇所の水深が10cm未満と小さいが、筑紫口地下鉄コンコースと地下2階地下鉄コンコースの一部は、水深が20cm～30cmと大きい。2003年7月水害では、筑紫口側と博多口側双方が浸水したが、水深はさほど大きくなかったといわれている。これを考えると、この計算結果は妥当といえる。

図-17に地上の最大浸水深図および浸水域の実績を示す。浸水域の実績は九州地方測量部の調査結果⁷⁾を用いた。JR線東側で計算結果と実績がほぼ一致している。しかし、西側では、計算結果の浸水域が実績より広がっている。これは、対象領域への流入流量が徐々に増加

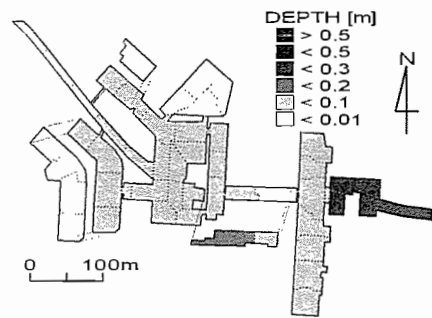


図-16 JR博多駅地下空間の最大浸水深図

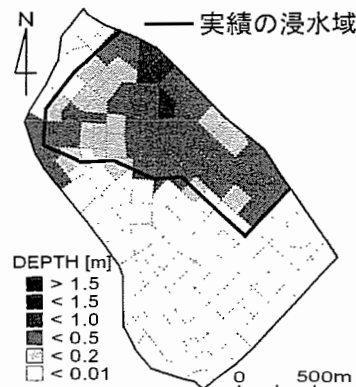


図-17 地上の最大浸水深図

し最大流量に達するのではなく、計算開始と同時に最大流量を与えたため、その影響で浸水域が広がったのではないかと考えられる。

地下鉄軌道空間への流入量は計算終了時点(計算開始4時間後)で、約6000m³である。実績の流入量は約10000m³といわれている。全氾濫水量の地下鉄軌道空間へ流入した水量の割合は、約3%である。

地上からJR博多駅前地下街へ氾濫水が流入する際、階段によりおもに地下鉄軌道空間に流入する場合と、地下街内に溜まる場合がある。デイトスに流入した場合は、ほとんどがデイトスの地下貯水槽に流入する。福岡朝日ビル、新三井ビル、祇園駅への連絡通路に流入した場合は、その箇所に溜まる。これは、福岡朝日ビル、新三井ビル、祇園駅への連絡通路の地盤が周囲の地下空間のそれよりも低いためである。そのほかの箇所に流入した場合はほとんどが地下鉄軌道空間に流入する。

JR博多駅地下空間の浸水状況に着目すると、実績に近いと考えられる結果が得られた。しかし、地上の浸水域の一部では、計算結果と実績が一致しないところもあった。これは、河川からの越流流量を仮定せざるを得ない現状では限界といえる。1999年6月の場合のように河川からの越流流量が得られ、その値を用いれば、もう少し実績に近い結果が得られると思われる。

4. 結論

本研究では、JR博多駅地下空間に着目し、地上と地下空間を統合して1999年6月水害の再現計算を行った。また、2003年7月水害の条件でも計算を行った。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・1999年6月水害の再現計算を行った。下水道による排水，地上の対象領域内にあるビル地階への流入，デイトスの地下貯水槽への貯留，JR博多駅前地下街入口に設置された段差を考慮した。その結果，計算結果は浸水実績とおおむね一致した。
- ・2003年7月に発生した水害の再現計算でも，地下空間に着目するとおおむね実績に近い結果を示した。

参考文献

- 1) 橋本晴行・朴 崎 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 21-4，pp.369-384，2003年2月
- 2) 井上和也・戸田圭一・川池健司・栗山健作・大八木 亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報 第45号B，pp173-184，2002年4月
- 3) 川池健司：都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究，京都大学博士論文，2001年11月
- 4) 6.29博多駅周辺浸水調査連絡会：6.29福岡豪雨にともなう「博多駅周辺地下空間浸水状況調査結果」まとまる，記者発表資料，1999年8月
- 5) 橋本晴行・松永勝也・南里康久：1999年6月福岡水害における氾濫水の挙動と水害体験者の対応・意識，自然災害科学 20-1，pp.43-58，2001年5月
- 6) 橋本晴行・北園芳人・守田 治：2003年7月九州豪雨災害について，自然災害科学 22-2，pp.159-165，2003年8月
- 7) 九州地方測量部：GSIテクノニュース 第133号 pp.2-3，2003年10月