

都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析

INUNDATION ANALYSIS FOR GROUND AND UNDERGROUND SPACES IN URBAN AREA

間島真嗣¹・戸田圭一²・大八木 亮³・井上和也⁴

Shinji AIHATA, Keiichi TODA, Ryo OYAGI, and Kazuya INOUE

¹ 学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 正会員 Ph.D. 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 非会員 三井住友建設 (〒 160-8577 東京都新宿区荒木町 13 番地の 4)

⁴ フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A storage pond model is developed which can treat inundation of both ground and underground spaces in urban area. The continuity equation, momentum equation without advection, and drop formula are used in the model. The model is applied to Fukuoka city with the underground spaces in JR Hakata station, and Fukuoka flood (1999) is simulated. The computation results show good agreement with the actual record. In the case of Kyoto city, overflow from the Kamo river is assumed. As a result, the underground malls downtown and adjacent subways are inundated. Also the underground spaces which are far from inundation area of ground are inundated by the water flowing through subways.

*Key Words : inundation analysis, storage pond model, underground space,
underground mall in JR Hakata station, Kyoto City area*

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。地下浸水は人命を脅かす危険があるとともに、浸水後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こと、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ている。また、博多駅周辺の洪水氾濫について、平面 2 次元氾濫モデルを用いて再現計算を行っている。しかしながら、地上の氾濫と地下の浸水を組み合わせた解析にはいたっていない。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貯留槽モデルにより 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ている。さらに、京都市のほぼ全域の地上部と地下空間を対象として、鴨川の溢水氾濫を想定した浸水解析を行い、地下空間の浸水可能性を考察している。

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⁾の貯留槽モデル(pond model)の手法を用いた。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。以下に本研究で用い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。これにより、地下街を貯留槽が 3 次元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

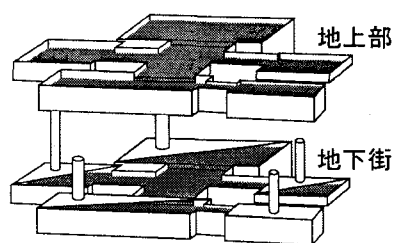


図-1 貯留槽モデルの概念図

がりは、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。

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している。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 番目の接面から流入する流量、 m :流量の出入りが行われる接面数、 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、 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、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。

(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

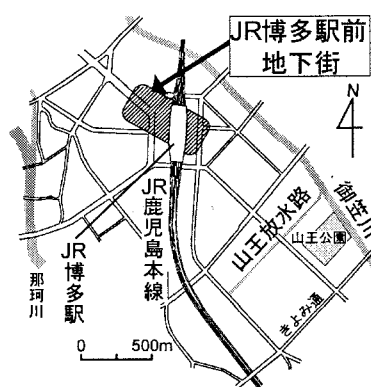


図-2 地上の対象領域

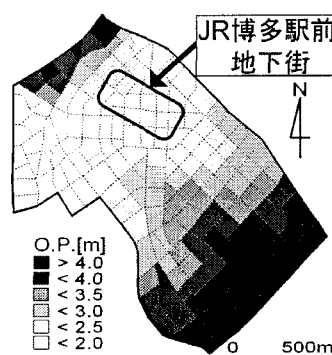


図-3 地上の地盤高図

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式で求める。

$$Q = B\mu h_0 \sqrt{gh_0} \quad (4)$$

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-2に示すように東を御笠川左岸とする地域を対象領域とした。面積は約3.2km²である。対象領域は1999年6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ものとした。図-3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ことがわかる。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。

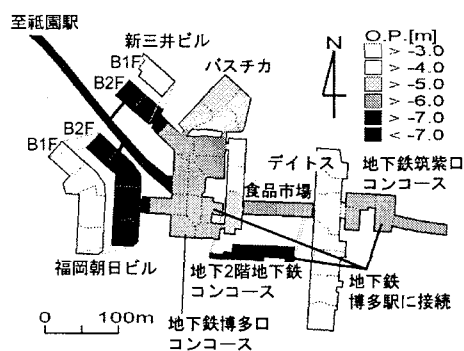


図-4 博多駅地下空間の概要と地盤高

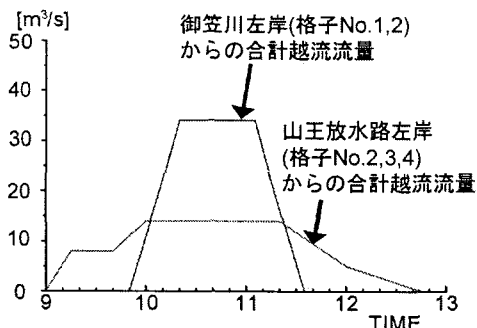


図-5 流入流量の時間変化

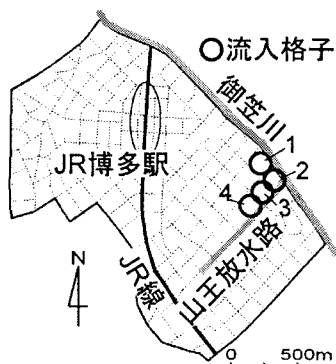


図-6 流入格子

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。計算格子は、道路をもとに隣り合う格子の大きさに大きな差が生じないことに留意し、1 個あたり 10000m² のオーダーで作成した。

図-4 に JR 博多駅地下空間の概要と地盤高を示す。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（地下鉄ホームを含む）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。計算格子は、地下街内の地盤高、仕切りをもとに格子 1 つあたり約 1000m² になるように作成した。地下空間の総格子数は 50 個である。地下鉄コンコースは 3 箇所、筑紫口側と博多口側、食品市場のさらに下の地下 2 階にある。地下鉄軌道空間

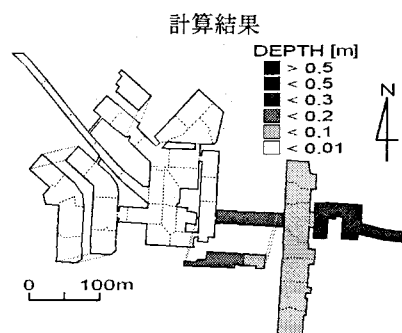


図-7 博多駅地下空間の最大浸水深図

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。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、格子の全面積に対して実際に水が溜まる部分の面積の割合である。

(2) 計算条件

1999 年 6 月の水害への適用を図った。流入流量として、橋本ら¹⁾が求めた越流流量を用いた。図-5 に流入流量の時間変化を、図-6 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、計算終了時刻を 13:00 とした。

再現計算にあたっては、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。

マンニングの粗度係数は、地上では $n=0.067$ とし、地下街は $n=0.030$ 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 $\Delta t=0.05\text{s}$ 、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。なお、これらの値は戸田ら⁴⁾に準じている。

(3) 計算結果と考察

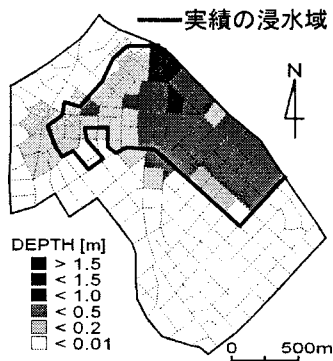


図-8 地上の最大浸水深図

図-7 に JR 博多駅地下空間の最大浸水深の計算結果と水害時の浸水実績を示す。浸水実績は記者発表資料⁵⁾を用いた。最大浸水深図と実績の浸水域を比較すると、筑紫口側の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が、実績の水深は5cm 未満と小さいものであり、不一致の程度は大きなものでない。また、食品市場、地下2階地下鉄コンコースで計算結果と実績の不一致が見られる。これは食品市場の上方に位置する JR 博多駅コンコースにおいて、水害時に地下街・地下鉄に接続する階段の止水対策がとられたためと考えられる⁶⁾。(今回の計算では、地下空間の止水対策は考慮していない。)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5000m³であり、実績値では約1000m³~2000m³といわれている。

図-8 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⁶⁾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いことが一因と考えられる。

全般に、計算結果は実績とおおむね一致した。とくに JR 博多駅地下空間の筑紫口側の浸水域および水深は実績と比較的によく一致したといえる。しかし、地下鉄への流入量が計算結果と実績で一致するまでに至っていない。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の精度の問題が考えられる。

4. 京都市の地上・地下空間の浸水解析

(1) 対象領域

対象領域は京都市地上部のほぼ全域とその地下にある地下街および地下鉄である。図-9 に対象領域図を示す。地上部の北部と東部は山地部付近まで、西部と南部は地下鉄の引込口がある地点までを目安として対象領域を決定した。地下街は京都駅前地下街、京都御池地下街

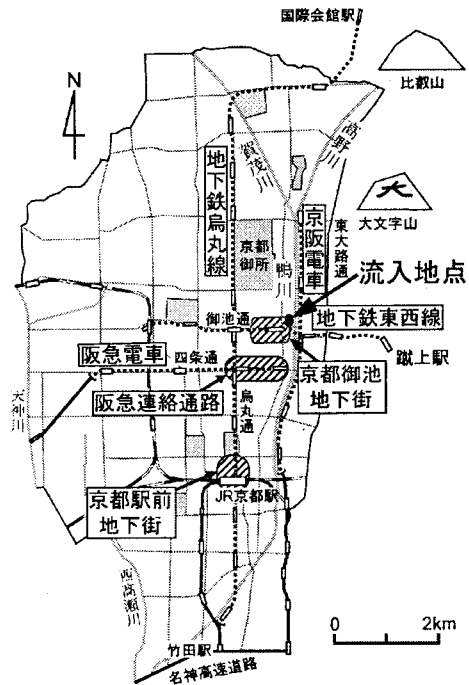


図-9 地上の対象領域

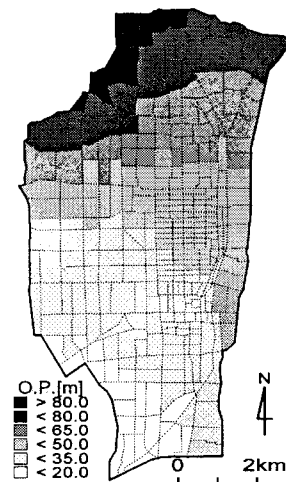


図-10 地上の地盤高図

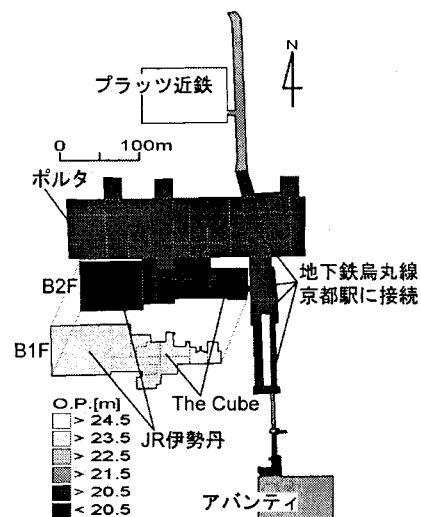


図-11 京都駅前地下街の概要と地盤高

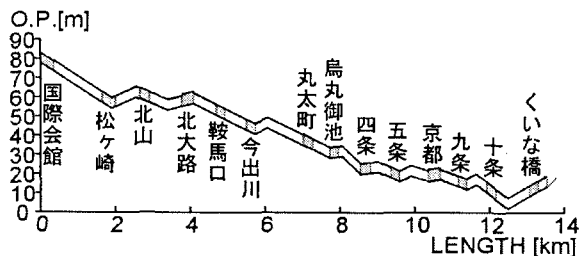
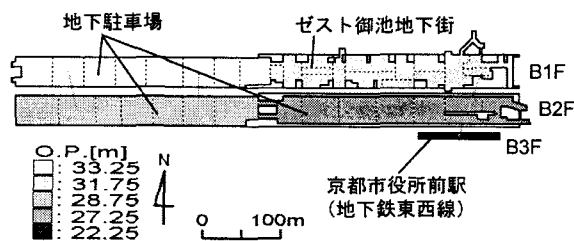


図-13 縦断図(烏丸線)

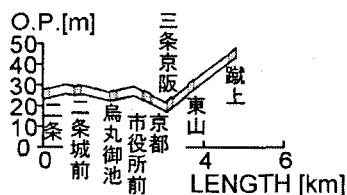


図-14 縦断図(東西線)

を対象とした。地下鉄は京都市営地下鉄烏丸線、東西線、阪急電車、京阪電車の4本の鉄道路線を対象としている。4路線とも地下部分すべてを対象としている。ただし、地下鉄東西線は東側を蹴上駅までとした。蹴上駅は三条京阪駅地上部の地盤高より高く、これより東側には水が拡がらないと考えたためである。なお、地上部の対象領域は十分広くとっているため、領域外との水のやり取りはないものとする。地下鉄の解析では、地下鉄軌道の空間を勾配、天井高、幅の異なる貯留槽が1次元的に接続したものと考えた。

図-10 に地上の地盤高図を示す。京都市は北から南に、また、東から西に地盤が低くなっていることがわかる。とくに北から南はその傾向が顕著である。地上の対象領域の面積は約 51.6 km^2 である。

京都駅前地下街の概要と地盤高を図-11に示す。京都駅前地下街は地下街、デパートの地階、地下通路などが接続している。また、地下街は地下鉄烏丸線京都駅に接続している。同様に、図-12に京都御池地下街の概要と地盤高を示す。京都御池地下街は地下1階の東側が商店街エリアで、地下1階西側と地下2階全体は地下駐車場となっている。また、地下3階は地下鉄東西線京都市役所前駅のホームである。

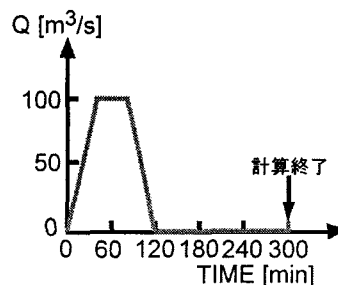


図-15 流入流量の時間変化

(2) 計算条件

図-15 に示すような流量を計算開始と同時に御池大橋右岸の格子(図-9 参照)に流入させた。この流量は、おおむね 100 年に 1 度の豪雨により生じると考えられる鴨川の溢水を想定したものである。

計算時間ステップ Δt 、段落ちの流量係数 μ 、マンニングの粗度係数 n 、スロットの面積率は福岡市の解析と同じ値を用いた。なお、地上部から地下空間への流入口には歩道と車道の高低差として一律に 15 cm の段差があるものとした。

(3) 計算結果と考察

地上部、京都駅前地下街、京都御池地下街の浸水深
図(平面図)をそれぞれ図-16、図-17、図-18に、地下
鉄東西線の浸水深図(縦断面図)を図-19に示す。

計算開始後 30 分後には図-18 より、京都御池地下街東側で浸水していることがわかる。このとき、図-16によると、地上部では鴨川の右岸沿いに浸水域が拡大し、七条通にまで浸水域が拡大している。これは、鴨川右岸付近の地盤高が低いことによるものである。

計算開始 60 分後になると、京都御池地下街では、計算開始 30 分後に比べて東側で浸水域が拡大し、浸水深も大きくなっている。また、地下 3 階京都市役所前駅ホームでは浸水深が 1.5m 以上と大きくなっている。

計算開始 90 分後には図-17 に示すように、京都駅前地下街が浸水している。また、計算開始 120 分後には、京都駅前地下街では浸水域が一部で拡大している。京都御池地下街では、計算開始 60 分後と比べると地下 2 階で浸水深が大きくなっている。地下鉄東西線では、図-19 によると、計算開始 90 分後には三条京阪駅付近が浸水していることがわかる。地下鉄東西線の駅と地上部の浸水域が重なっているのは、90 分後では京都御池地下街付近のみであるので、地下鉄東西線の氾濫水は京都御池地下街にある京都市役所前駅を経由して流入したことがわかる。なお、120 分後では全氾濫水量 $48 \times 10^4 \text{ m}^3$ のうち約 7% となる約 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ が地下空間に流入する。

以上に述べた数値解析結果から、鴨川の右岸が市中で溢水した際には、鴨川に近い御池の地下空間だけでなく、京都駅周辺の地下空間も浸水の危険があることが明らかとなった。また、京都御池地下街に浸入した氾濫水

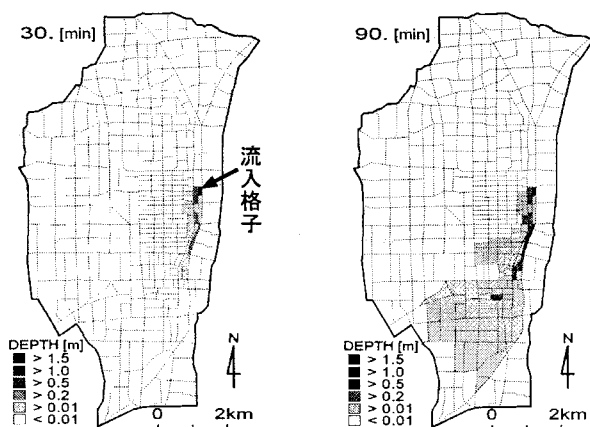


図-16 地上の浸水深図

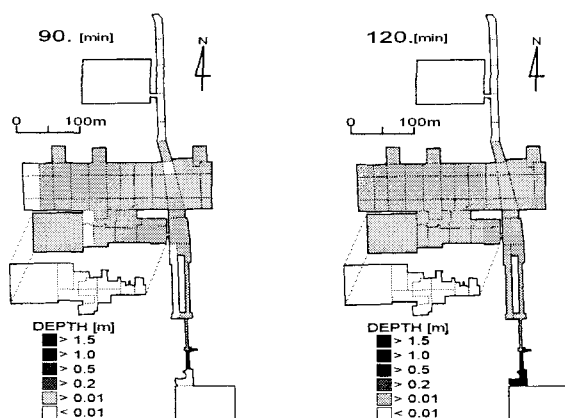


図-17 京都駅地下街の浸水深図

は、京都市営地下鉄の京都市役所前駅から地下鉄東西線軌道に入って三条京阪駅付近に滞留することも知られた。

5. おわりに

本研究では、福岡市域ならびに 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、同様の手法を京都市域とその地下空間にも適用した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・ 1999 年 6 月の福岡水害の再現計算を行うに際し、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。
- ・ 京都市域での解析の結果、鴨川の右岸が市中で溢れた際には、中京区の御池地下街だけでなく、下京区の京都駅周辺の地下街も浸水する危険性が高いことが明らかとなった。また、氾濫水が地下鉄空間に流入した際には、地下鉄軌道を経由することにより地上の氾濫域から離れた場所まで浸水が拡大する危険性があることも知られた。

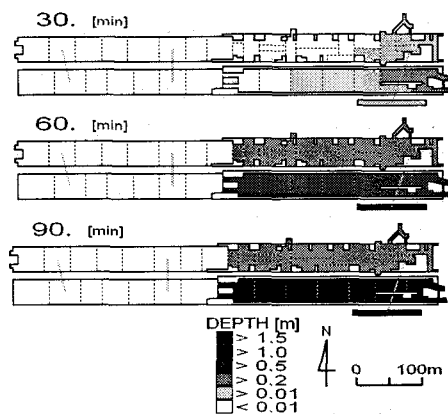


図-18 京都御池地下街の浸水深図

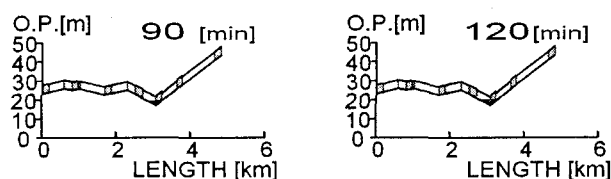


図-19 地下鉄東西線の浸水深図

謝辞：地下空間に関する資料を提供いただいた京都市交通局の関係各位に感謝いたします。本研究は平成 15 年度科学研究費補助金「都市水害に関する流域治水論的研究 (研究代表者：井上和也)」 「2003 年 7 月九州豪雨災害に関する調査研究 (研究代表者：九州大学 橋本晴行 助教授)」ならびに、平成 15 年度 (財) 国土技術研究センター研究開発助成「地下空間の水害危険度評価手法の開発と防御システムに関する研究 (研究代表者：戸田圭一)」の援助の下に実施された。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本晴行・朴 崎彦・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。
- 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。
- 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。
- 4) 戸田圭一・栗山健作・大八木 亮・井上和也：複雑な地下空間における浸水解析，水工学論文集 第 47 巻，pp877-882，2003。
- 5) 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。
- 6) 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。

(2004. 9. 30 受付)