

都市水害時の地下空間の浸水過程について

戸田圭一・大八木 亮*・井上和也・間島真嗣**

* (株)三井住友建設

** 京都大学大学院 工学研究科

要 旨

都市域およびそこに含まれる地下空間を複数の貯留槽(ポンド)が連結して構成される空間とした貯留槽モデルを構築し、都市域の氾濫解析を行った。基礎式として、連続式と、移流項を除いた開水路非定常流式、段落ち式を用いた。そして、JR博多駅地下空間に着目し、地上部と地下空間を統合して福岡水害(1999年)の再現計算を行った。その結果、地上部および地下空間において計算結果と実績がおおむね一致した。また、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による浸水解析を行った。その結果、京都御池地下街ならびにJR京都駅周辺の地下空間が浸水する可能性が高いことがわかった。

キーワード：氾濫解析，ポンドモデル，地下空間，JR博多駅地下街，京都市域

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(2003)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。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(2002)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。

2.1 地下街・地上部の解析手法

Fig.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

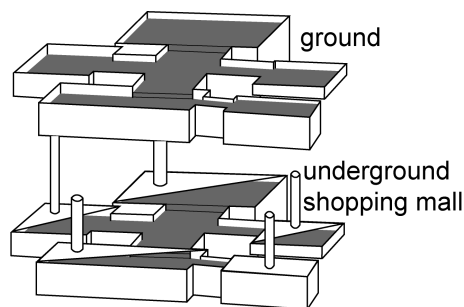


Fig.1 storage pond model

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。

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、 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。

2.2 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。

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

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

3.1 対象領域

Fig.2 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。Fig.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。

Fig.4 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、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

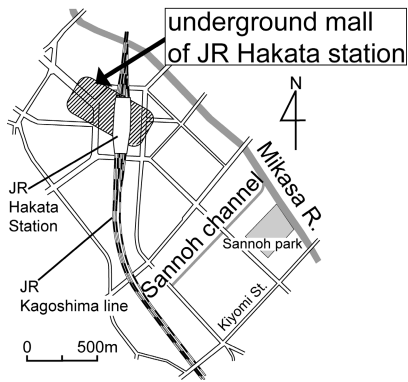


Fig.2 studied area of ground

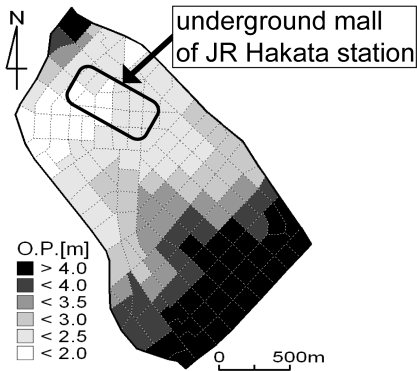


Fig.3 ground elevation

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。Fig.5 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して実際に水が溜まる部分の面積の割合である。

3.2 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(2003)が求めた越流流量を用いた。Fig.6 に流入流量の時間変化を、Fig.7 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。

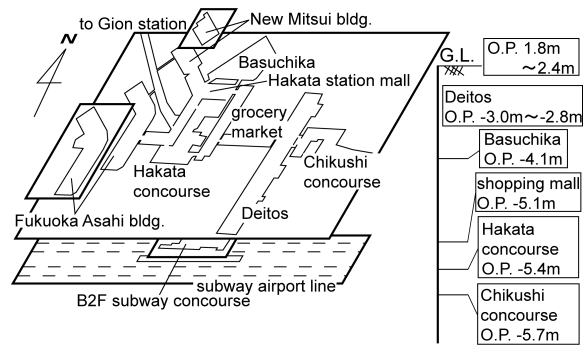


Fig.4 studied area of JR Hakata station underground mall

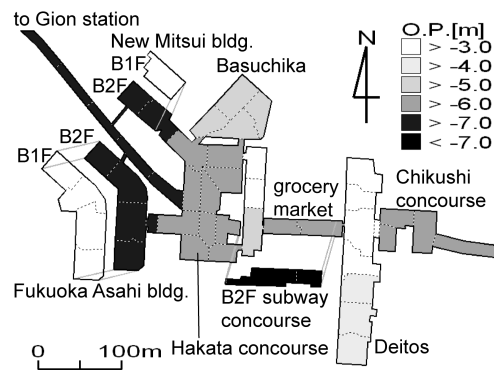


Fig.5 elevation of JR Hakata station underground mall

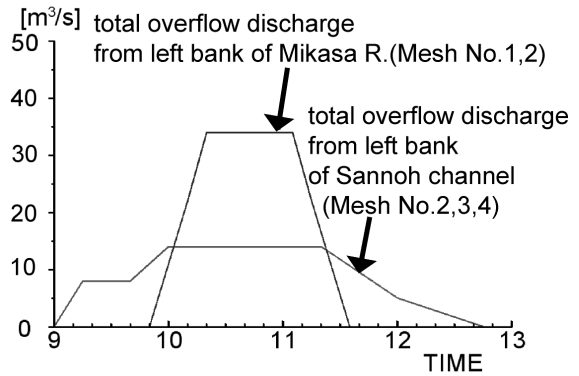


Fig.6 inflow discharge

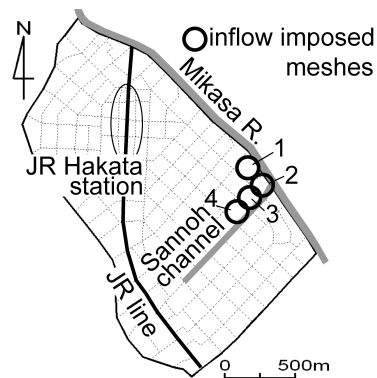


Fig.7 inflow imposed meshes

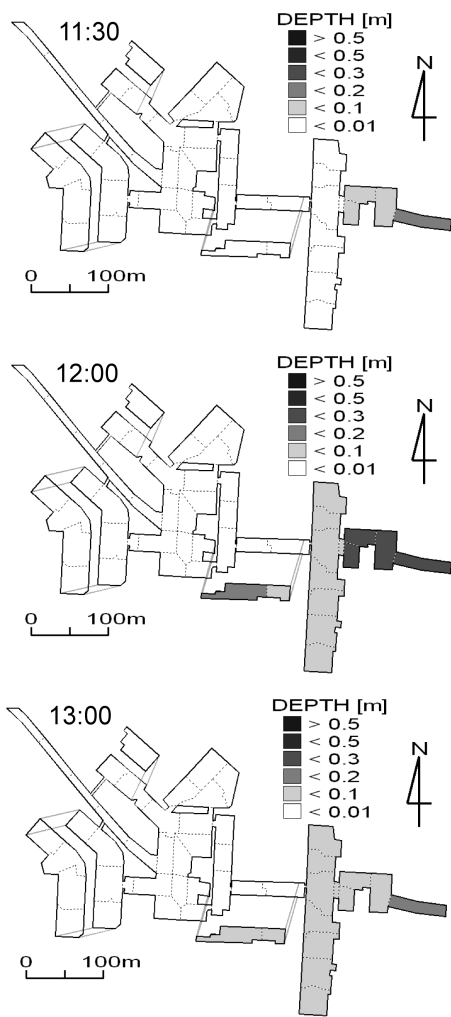


Fig.8 inundation at underground of JR Hakata station

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 $\Delta t=0.05s$ 、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。

3.3 計算結果と考察

Fig.8 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。Fig.9 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。浸水実績は記者発表資料 (1999) 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 $1000m^3 \sim 2000m^3$ といわれている。

Fig.10 に地上の最大浸水深図および 1999 年 6 月

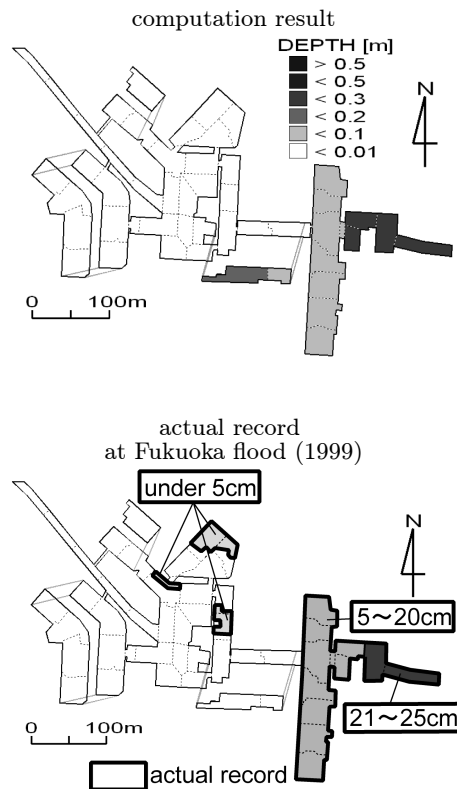


Fig.9 maximum inundation depth at underground of JR Hakata station

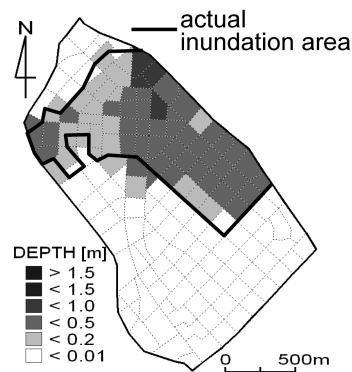


Fig.10 maximum inundation depth on the ground

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 (2001) 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ためであると考えられる。

Fig.11 に全氾濫水量、下水の排水量、地上の氾濫水量、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 $7.0 \times 10^4 m^3$ である。全氾濫水量が約 $27.7 \times 10^4 m^3$ 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

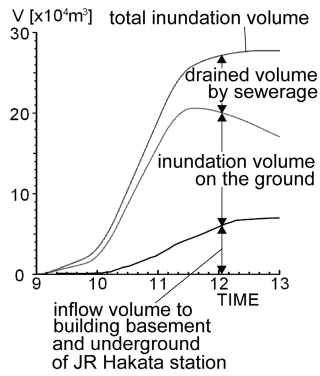


Fig. 11 water volume change(1)

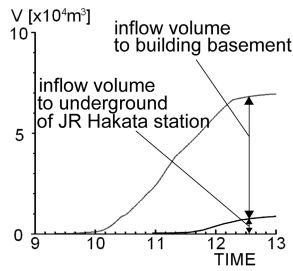


Fig. 12 water volume change(2)

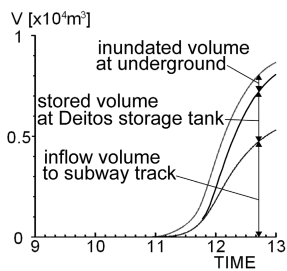


Fig. 13 water volume change(3)

空間へ流入したことがわかる。Fig.12 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 9000m³ 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。Fig.13 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 9000m³ のうち、約 5000m³ 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 3000m³ 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ものと予想される。

全般に、計算結果は実績とおおむね一致した。とくに JR 博多駅前地下街の浸水域および水深は実績と比較的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

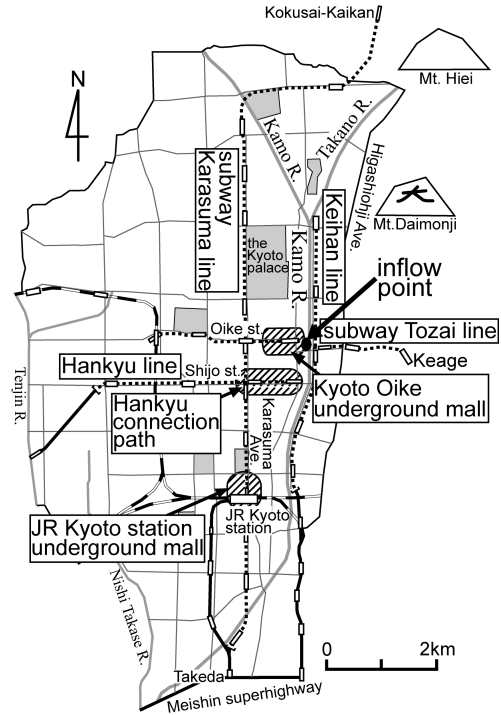


Fig. 14 studied area in Kyoto city

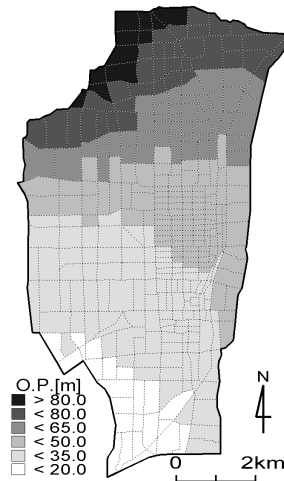


Fig. 15 ground elevation

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に厳密さを欠く点が考えられる。

4. 京都市の地上・地下空間の浸水解析

4.1 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。Fig.14 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

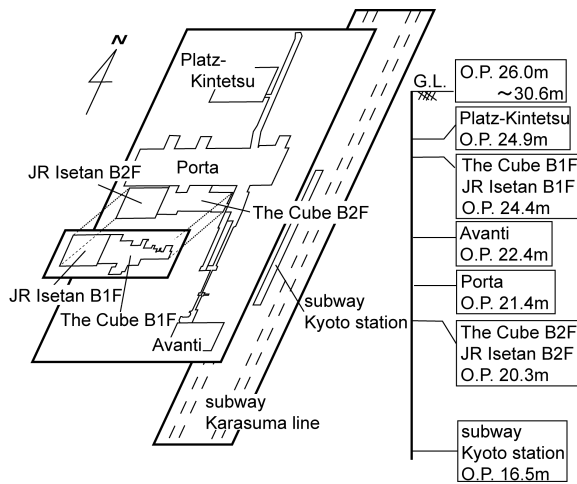


Fig.16 Kyoto station underground mall

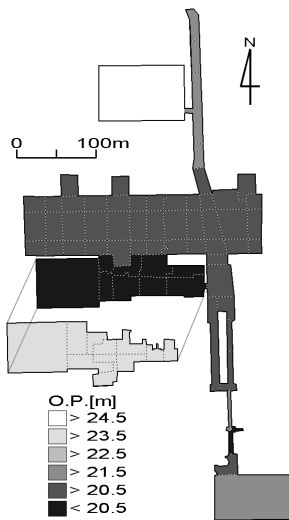


Fig.17 elevation of Kyoto station underground mall

街、京都御池地下街を対象とした。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、横断幅の異なる貯留槽が1次元的に接続したものと考えた。

Fig.15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51.6km²である。

京都駅前地下街の構造、地盤高をFig.16, Fig.17にそれぞれ示す。京都駅前地下街は地下街、デパー

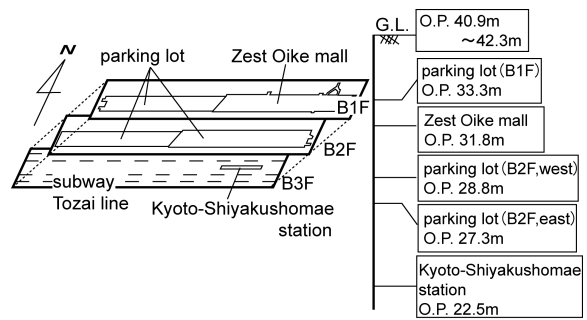


Fig.18 Kyoto Oike underground mall

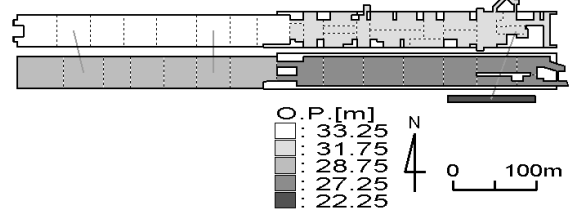


Fig.19 elevation of Kyoto Oike underground mall

トの地階、地下通路などが接続している。

同様に、Fig.18, Fig.19にそれぞれ京都御池地下街の構造、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。

地下鉄烏丸線、東西線、阪急電車、京阪電車の縦断面図を、それぞれFig.20, Fig.21, Fig.22, Fig.23に示す。これらの図を見てわかるように、地下鉄は全区間にわたって勾配が変化し、また高低差があるので、氾濫水がたまりやすいところとそうでないところがあるのは容易に想像できる。

4.2 計算条件

一定流量50m³/sを計算開始と同時に180分間、三条大橋～御池大橋右岸の格子に流入させた。

計算時間ステップ Δt 、段落ちの流量係数 μ 、マンングの粗度係数 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入口には歩道と車道の高低差として一律に15cmの段差があるものとした。また、地下鉄東西線には全ての駅にホーム扉が設置されているが、中井(2003)の実験結果より、扉の開閉は地下街全体の流況に影響を与えないことが示されている。そこで、ホーム扉は閉じているものとした。

4.3 計算結果と考察

氾濫水量の時間変化をFig.24に示す。また、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Fig.25, Fig.26, Fig.27に、地下鉄烏丸線、東西線の浸水深図(縦断面図)をそれぞ

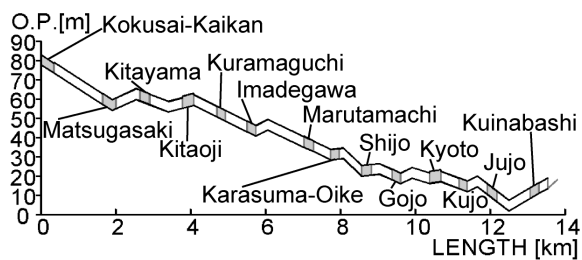


Fig. 20 subway Karasuma line

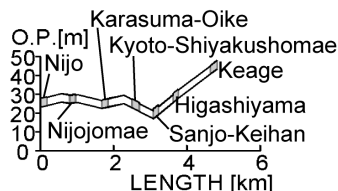


Fig. 21 subway Tozai line

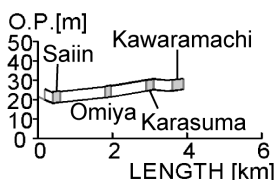


Fig. 22 Hankyu line

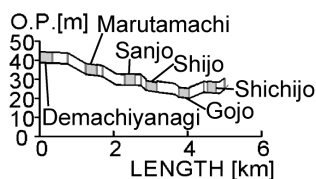


Fig. 23 Keihan line

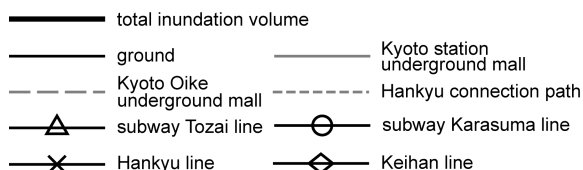
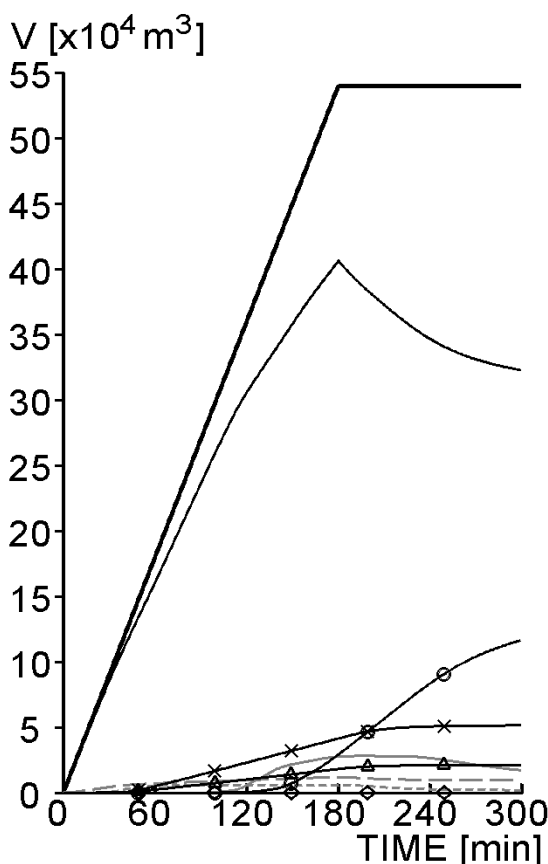


Fig. 24 inundated water volume change

れFig.28, Fig.29に示す。

Fig.24より、計算開始とほぼ同時に京都御池地下街に流入が始まる。計算開始後60分の直前にはFig.24により、地下鉄東西線や阪急電車でも浸水が開始することがわかる。そして、計算開始60分後にはFig.27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、Fig.25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。また、三条通沿いの西側にも浸水域が拡大している。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、60分後では河原町御池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經由して流入したことがわかる。

計算開始後60分を過ぎた後の40分間程度は地上の浸水域が拡大し、地下鉄東西線、阪急電車への流入が増加するのみである。計算開始後100分前後になると京都駅前地下街にも流入が開始し、計算開始120分後にはFig.26に示すように京都駅前地下街は

ほとんどの区域で浸水している。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ものの、全体としては浸水状況は計算開始60分後と変化がない。京都駅前地下街は氾濫水が流入してからの氾濫水量の増大が京都御池地下街に比べると急である。これはFig.25の120分後や180分後のように、京都駅周辺だけ地盤高が低いことにより、浸水深が大きくなるためであると考えられる。

計算開始後120分を越えると地下鉄烏丸線への流入が開始する。その後、180分後まで地下鉄烏丸線、東西線への流入量は増加し続ける。計算開始180分後に溢水が停止すると、地下街、連絡通路は氾濫水量が緩やかに減少する。一方、地下鉄東西線は氾濫水量の増加が緩やかになり、ほぼ一定となる。しかし、地下鉄烏丸線だけは溢水が停止しても氾濫水量が増大し続け、300分後には十条駅とくいな橋駅が水没する。また、この条件では京阪電車には氾濫水は流

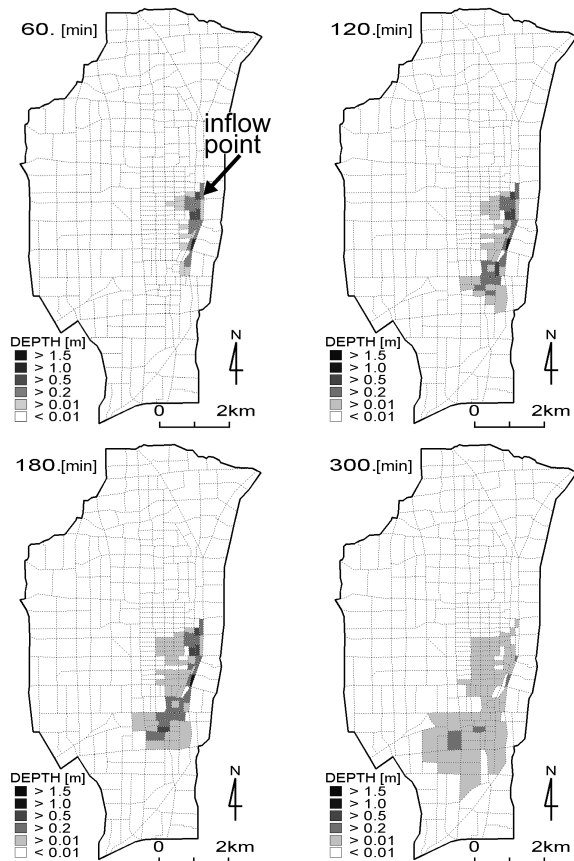


Fig.25 inundation on the ground

入しない。なお、180分後では全氾濫水量 $54 \times 10^4 \text{ m}^3$ のうち約4分の1となる $13 \times 10^4 \text{ m}^3$ が地下空間に流入し、300分後では約4割となる $22 \times 10^4 \text{ m}^3$ が地下空間に溜まっている。

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、京都駅の地下空間に浸入した氾濫水は、京都市営地下鉄の京都駅から地下鉄烏丸線軌道に入って南下し、最終的に鴨川をくぐる部分に滞留する。地下鉄東西線と同様、鴨川の溢水が予想される状況下では、地下鉄烏丸線の運行を即座に停止させる必要がある。

5. おわりに

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、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

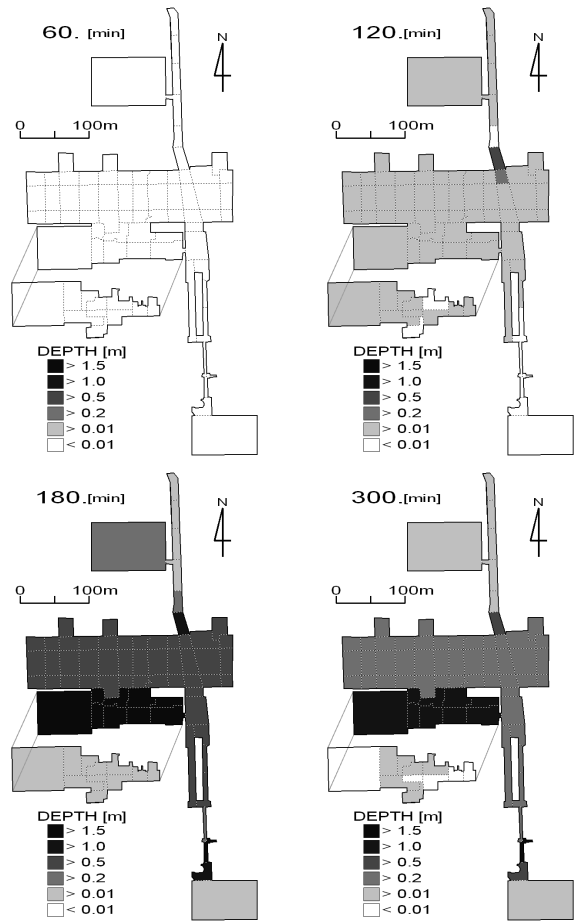


Fig.26 inundation at Kyoto station underground mall

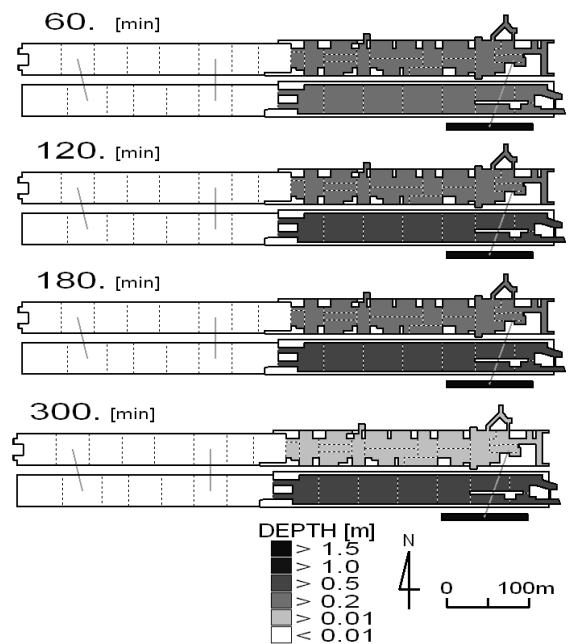


Fig.27 inundation at Kyoto Oike underground mall

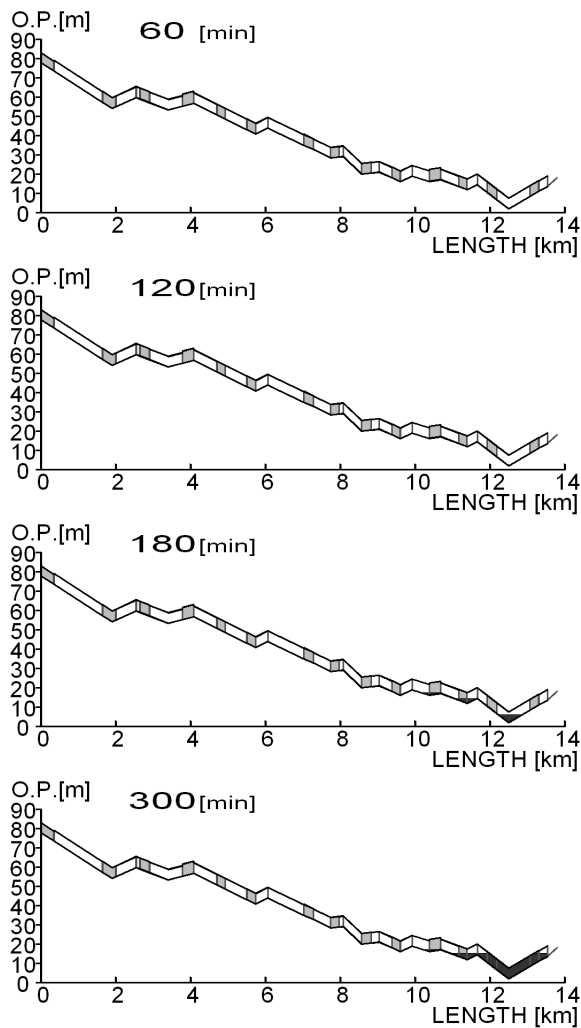


Fig.28 inundation at subway Karasuma line

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，下京区の京都駅周辺の地下街が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，地下鉄軌道を経由して地上の氾濫域よりも遠く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。

最後に地下空間に関する資料を提供いただいた京都市交通局，(株)京阪電気鉄道，(株)阪急電鉄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：橋本晴行)」の援助

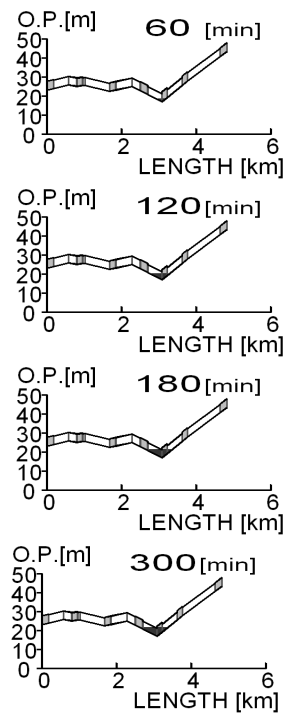


Fig.29 inundation at subway Tozai line

の下に実施された。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 井上和也・戸田圭一・川池健司・栗山健作・大八木亮 (2002)：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.
- 中井 勉 (2003)：地下空間の浸水危険性に関する水理学的研究，京都大学修士論文.
- 橋本晴行・朴 琦瑛・渡辺政広 (2003)：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.
- 橋本晴行・松永勝也・南里康久 (2001)：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.
- 6.29 博多駅周辺浸水調査連絡会 (1999)：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.

On the Inundation Process in the Underground Space in Urban Flooding

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

* Sumitomo Mitsui Construction Co.Ltd.

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

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.

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