

複雑な地下空間における浸水解析

INUNDATION ANALYSIS OF COMPLICATED UNDERGROUND SPACE

戸田圭一¹・栗山健作²・大八木 亮³・井上和也⁴

Keiichi TODA, Kensaku KURIYAMA, Ryo OYAGI and Kazuya INOUE

¹ 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 正会員 工修 戸田建設株式会社 (〒 104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1)

³ 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)

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 mathematical model called 'storage pond model' is developed for inundation analysis in underground space. In this model, underground mall and subway are treated by the combination of multiple storage pond, and the water volume exchange between adjacent ponds is computed by discharge formula or momentum equation. This model was applied to Umeda underground mall and adjacent subway spaces. The results show that the location and elevation of subway station and the volume of subway space have major influence on the inundation behavior in underground mall.

Key Words : large city area, underground mall, subway space, storage pond model, inundation analysis

1. 緒論

1999 年 6 月の福岡市の水害や 2000 年 9 月の東海豪雨による名古屋市の水害などのように、大都市部で洪水氾濫が発生すると、地表の氾濫水はビルの地下室、地下鉄、地下街といった地下空間に浸水する。地下空間への浸水は死亡事故を招く危険性が高く、また、被害の甚大化、長期化を引き起こす傾向が強い。

そのため、防災対策を考える上で氾濫水の挙動を予測することが重要となるが、都市部の地下空間は複雑かつ多層化していて直感的な予測が非常に困難である。そのため浸水解析モデルによる予測が必要になってくるが、都市の地下空間は地下街、地下鉄、地下駐車場などが連結しており、各階層間の水の移動も単純ではない。また、各階には天井があるため、場合によっては氾濫水が開水路から管路流に移行することも考えられる。よって、解析モデルは多種多様な氾濫水の挙動に対応するための堅牢さが必要となる。

地下空間の浸水解析に関する研究は以前からなされてきている。高橋ら¹⁾は、階段を経て流入する流量を段落ち流れによる流量ととらえ、地下空間への流入境界条件とした。そして地上部と地下の浸水過程を平面 2 次流れとして扱い、浅水流方程式に基づく氾濫解析法で地

上部と地下の浸水過程を並行して解析できることを示した。また井上ら²⁾は、同様の手法を大阪市北区堂島地下街に適用し、地下街の浸水特性ならびに浸水対策の評価を行っている。これらの研究で取り扱われた地下空間は形状が比較的単純なものであり、また地下街の流れも開水路状態を仮定し、天井高の影響を考慮していない。

また、著者ら³⁾は、淀川の破堤を想定した地上部の氾濫解析と大阪梅田地下街ほぼ全域を対象とした地下街の氾濫解析を組み合わせた解析を行った。地下街の氾濫解析には街路ネットワークモデル⁴⁾を適用し、スロットモデルを導入して天井の影響を考慮した。著者らは地下街での氾濫水の挙動を詳細に追跡しているが、粗度係数、スロット幅や流量条件によっては上下層間の氾濫水の流動や開水路・管路共存状態での氾濫水の挙動が適切に表現できない場合があるなどの課題が残されている。

一方、実用的な浸水解析手法として、従来から地上の氾濫解析に広く用いられてきたポンドモデル(タンクモデルとも呼ばれる)がある。ポンドモデルは、氾濫域を多数の仮想的なポンド(貯留槽)に分割し、ポンド間を移動する流量を求めることで氾濫水の拡がりを表す解析モデルである。貯留槽内の詳細な氾濫現象を表すことができないこと、モデル中の連結管の通水能の決定方法があいまいであることなど、決して精緻な手法ではない

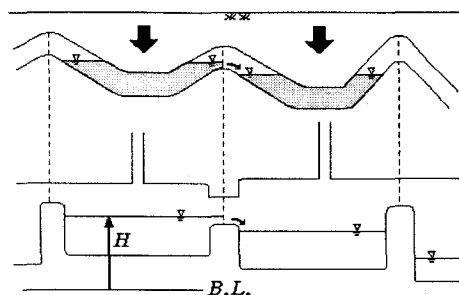


図-1 地下鉄空間のモデル化
 H : 貯留槽の水位
 $\Rightarrow$: 地上や他の地下空間からの流入

図-1 地下鉄空間のモデル化

が、氾濫水のたまかな伝播をとらえるには充分有効な手法で、データ作成も容易で計算量もそれほど多くないため、これまでもこの方法を用いて多くの氾濫解析がなされてきた(例えば鶴巻ら⁵⁾、建設省土木研究所⁶⁾)。

本研究はこのポンドモデルによる氾濫解析法を基にして、実際の地下空間に比較的簡便に適用できる浸水解析モデルを構築することを目的としている。そしてこのモデルを大阪市北区梅田の地下街、及びその地下街に接続する地下鉄空間に適用し、そこでの浸水過程を考察している。

2. 基礎式及び解析手法

(1) 地下鉄空間の浸水解析

地下鉄空間は図-1のように、軌道面の勾配が山になる個所でブロック分けしてできたV字型の貯留槽が、両端に接続穴を有し、それらが一次元的に連結していると考えられる。このような地下鉄空間の連結貯留槽モデルに、管路状態への対応としてスロットを組み込む。

貯留槽の頂部に仮想的なスロットを取り付け、水位が貯留槽の頂部よりも高いときにはその水位をピエゾ水頭と見なしている。すなわち、各貯留槽における連続式を以下のように考える。

< 連続式 >

$$\frac{dV}{dt} = A(H) \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{ins} \quad (1)$$

$$A(H) = \begin{cases} A_f & : h' < D_c \\ A_s & : h' \geq D_c \end{cases}$$

ここで、 V : 貯留槽の水量、 t : 時間、 Q_{in} : 隣接した貯留槽からの流入流量、 Q_{out} : 隣接した貯留槽への流出流量、 Q_{ins} : 地上など外部からの流入流量、 h' : 貯留槽の水深、 D_c : 貯留槽の高さ(天井高)、 A_f : 貯留槽の形状を反映した面積、 A_s : スロットの断面積である。

次に、流量式は隣接する貯留槽の水位と貯留槽間の接続部である穴口の上縁、下縁との高さの関係に応じて以下のように分類し、越流公式⁷⁾とオリフィスの流量公式⁸⁾とを併用した解析を行う(図-2参照)。ここで、 h :

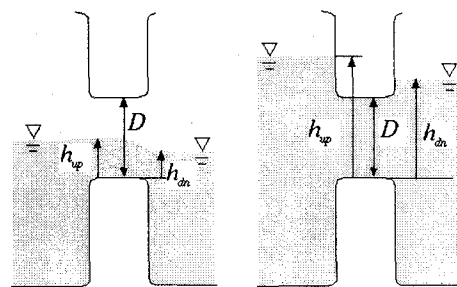


図-2 貯留槽間の流況の模式図

穴口の地盤高を基準とした貯留槽の水位、 D : 穴口の高さ(開口高さ)、 B : 穴口の幅(横幅)である。

< 流量式 > (ここでは常に $h_{up} \geq h_{dn}$ とする。)

(I) $D \geq h_{up} \geq 0.0$ の場合

本間の越流公式⁷⁾を用いる。

(i) $h_{dn}/h_{up} \leq 2/3$ の場合

$$Q = \mu B h_{up} \sqrt{2g h_{up}} \quad (2)$$

(ii) $h_{dn}/h_{up} > 2/3$ の場合

$$Q = \mu' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (3)$$

ここに、 g は重力加速度で、 μ 、 μ' は流量係数である。

(II) $h_{up} \geq D$ の場合

オリフィスの流量公式⁸⁾を準用する。

(i) $h_{dn} \leq 0.0$ の場合

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} B \{ h_{up}^{\frac{3}{2}} - (h_{up} - D)^{\frac{3}{2}} \} \quad (4)$$

(ii) $D \geq h_{dn} \geq 0.0$ の場合

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} B \{ (h_{up} - h_{dn})^{\frac{3}{2}} - (h_{up} - D)^{\frac{3}{2}} \} + C' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (5)$$

(iii) $h_{dn} \geq D$ の場合

$$Q = C' B D \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (6)$$

ここに、 C 及び C' は流量係数である。

(2) 地下街の浸水解析

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複数の領域がつながって形成されている。そこで、領域を隔てる壁の存在、地下街の区分、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たと地下街はそれらの貯留槽が立体的に連結してできた空間と考えることができる。そして、貯留槽間を移動する流量を求めることで、地下街内での浸水の拡がり表現することができよう。以上のような地下街の連結貯留槽モデルに、スロットを組み込んだ解析手法を適用する。図-3には貯留槽モデルの概念図を示す。

貯留槽の連続式は、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。

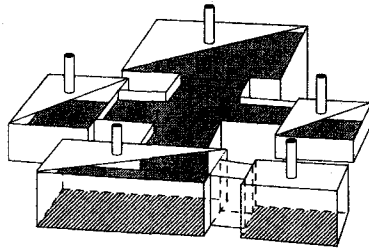


図-3 貯留槽モデルの概念図

< 連続式 >

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad A = \begin{cases} A_f & : h < D \\ A_s & : h \geq D \end{cases} \quad (7)$$

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外部からの流入流量、 D ：貯留槽の天井高である。

貯留槽間の運動量式については次式を用いる。

< 運動量式 >

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha LQ|Q| \quad (8)$$

ここで、 ΔH ：隣接する貯留槽間の水位差、 Q ：流量、 g ：重力加速度、 L ：隣接した貯留槽の図心間の距離である。また、隣接した貯留槽の番号をそれぞれ i, j とし、隣接した貯留槽の平均水深及び接面の幅 B から、接面の断面積 A_b を次式のように表す。

$$A_b = B \frac{\min(h_i, D_i) + \min(h_j, D_j)}{2} \quad (9)$$

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。

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

ここに、 s は接面の潤辺で、次式で表す。

$$s = B' + 2 \frac{\min(h_i, D_i) + \min(h_j, D_j)}{2} \quad (11)$$

$$\text{ただし、} B' = \begin{cases} 2B & : h_i \geq D_i, h_j \geq D_j \\ B & : \text{上記以外の場合} \end{cases}$$

(3) 上層と下層との接続

地下街と地下鉄空間との接続部分、あるいは地下街そのものが多層（地下1階と2階のように）となっているところでは、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、階段部分や吹き抜けなどの穴口を流入口とし

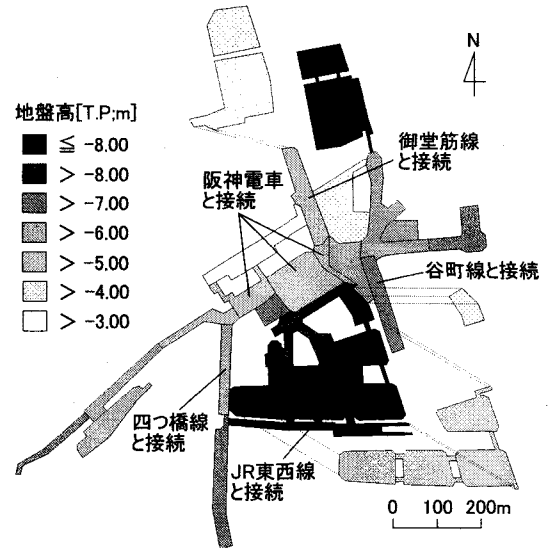


図-4 梅田地下街の対象領域

てモデル化し、以下の解析手法を用いる。

上層から下層へ氾濫水が落ち込む場合は、流入口の有効流下幅を B_e 、流入口のある上層の貯留槽の水深を h_e として、下層への流入流量を次の段落ち式で求める。

$$Q = B_e \mu_0 h_e \sqrt{gh_e} \quad (12)$$

ここに、 μ_0 は段落ち流れの流量係数である。次に、下層のピエゾ水頭が上層の床面の地盤高よりも高く、かつ上層の水位よりも低い場合については、穴口を仮想的な管路と見立て、上層から下層へ落ちる方向を流れの正方向と考えて、 i, j をそれぞれ上層、下層の番号、ピエゾ水頭を H 、 $\Delta H = H_i - H_j$ 、 A_e を穴口の断面積、 L_e を上下層間の床厚として、次の運動量式を用いる。

$$\frac{L_e}{gA_e} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha_e L_e Q|Q| \quad (13)$$

ここに、 α_e は損失係数で、(10) 式と同様の式で表現される。下層のピエゾ水頭が上層の水位よりも高い場合についても、 $\Delta H = H_i - H_j (\leq 0.0\text{m})$ として式 (13) を用いる。ただし、上層と下層との水のやり取りは狭い穴口を通じて行われるので、急縮及び急拡流れによる形状損失を考慮し、マンニング粗度係数 n の値については式 (10) の n よりも大きな値を用いることとする。

3. 梅田地下街への適用

(1) 地下空間の概要

梅田地下街の対象領域を図-4に示す。また、梅田地下街の構造図を図-5に示す。梅田地下街は全ての領域で単一階層であるわけではなく部分的に地下1階、地下2階の2層構造となっている個所がある。また、同一階層であっても地盤高が場所により異なっている。地下街と接続する地下鉄路線は大阪市営地下鉄御堂筋線、谷町線、四つ橋線、JR東西線、阪神電車である。各路線

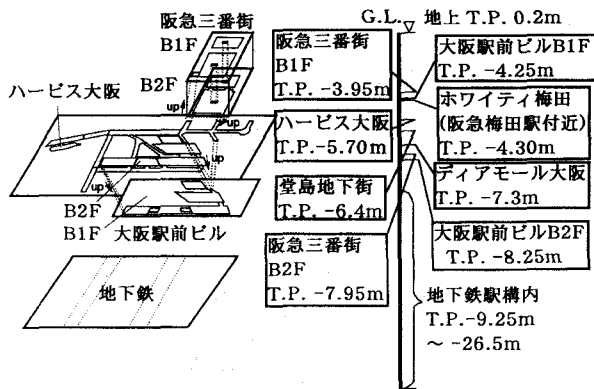


図-5 梅田地下街の構造図

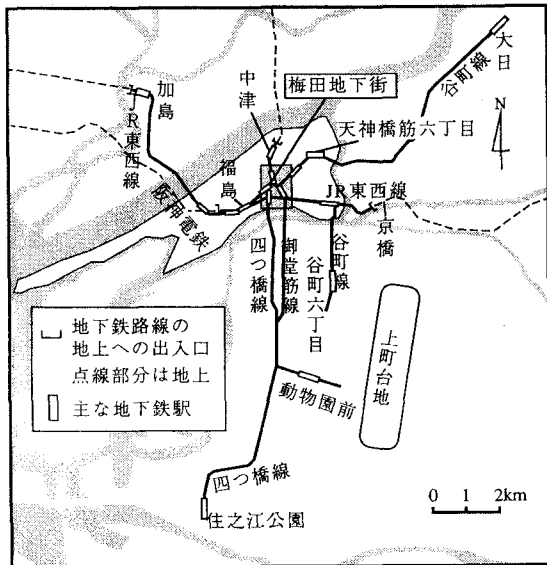


図-6 本研究の対象路線図

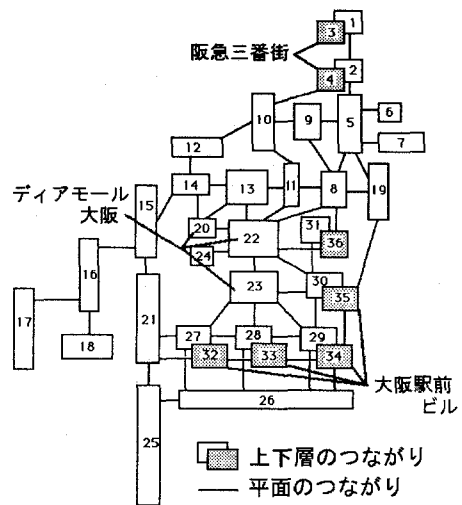
表-1 地下鉄の区間長と容積

路線名	距離 (km)	容積 $\times 10^3 (\text{m}^3)$
御堂筋線	9.7	710
谷町線	15.3	1192
四つ橋線	11.5	739
JR 東西線	10.2	751
阪神電車	1.7	102

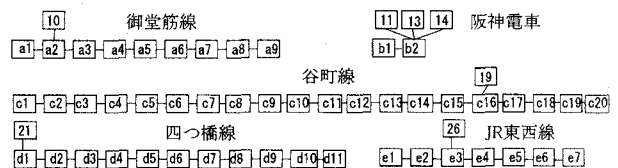
の解析対象区間は図-6のように地上からの引き込み口がある地点、または淀川の堤防天端高 T.P.5.78m と地盤高が同じ地点までとした。なお、対象領域について、地下鉄空間の天井高は全ての路線で駅では5.5m、駅以外では5.0mとした。対象とした地下街の底面積、容積はそれぞれ $2.1 \times 10^5 \text{m}^2$ 、 $6.5 \times 10^5 \text{m}^3$ である。地下鉄の区間長と容積を路線別に表-1に示す。対象地下空間の貯留槽間の接続関係を図-7に示す。

(2) 計算条件

まず、地下鉄の代表として大阪市営地下鉄御堂筋線を取りあげ、浸水解析を行った。対象区間は図-8に示す中津駅の北から動物園前駅の南までの約9.7kmとし、図のようにV字形の9個の貯留槽に分割した。

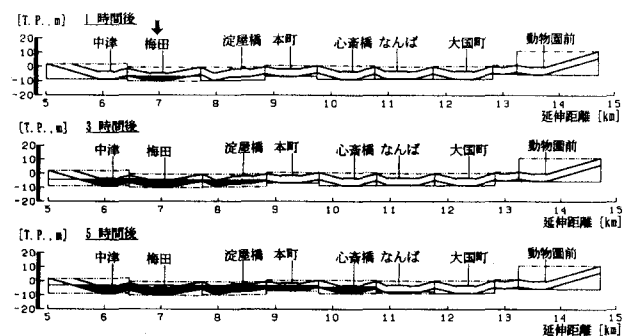


(a) 地下街の接続関係

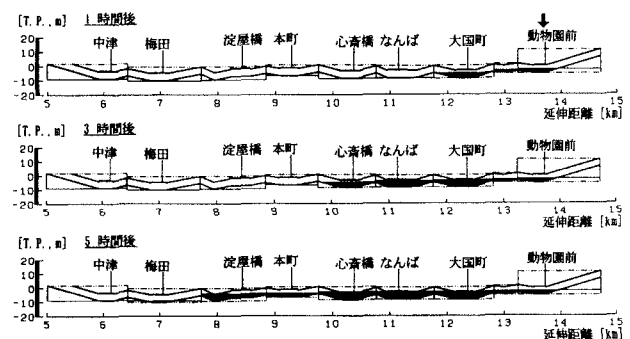


(b) 地下鉄の接続関係

図-7 貯留槽間の接続関係



(a) ケース A

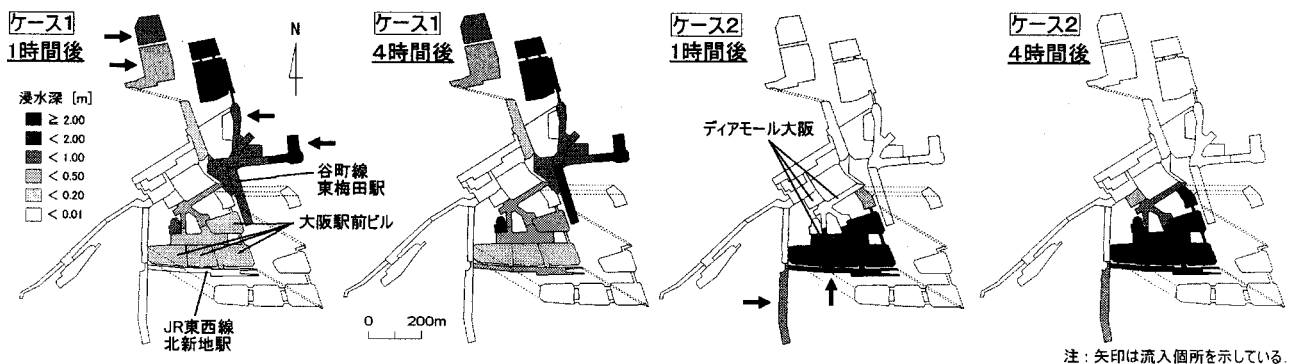


(b) ケース B

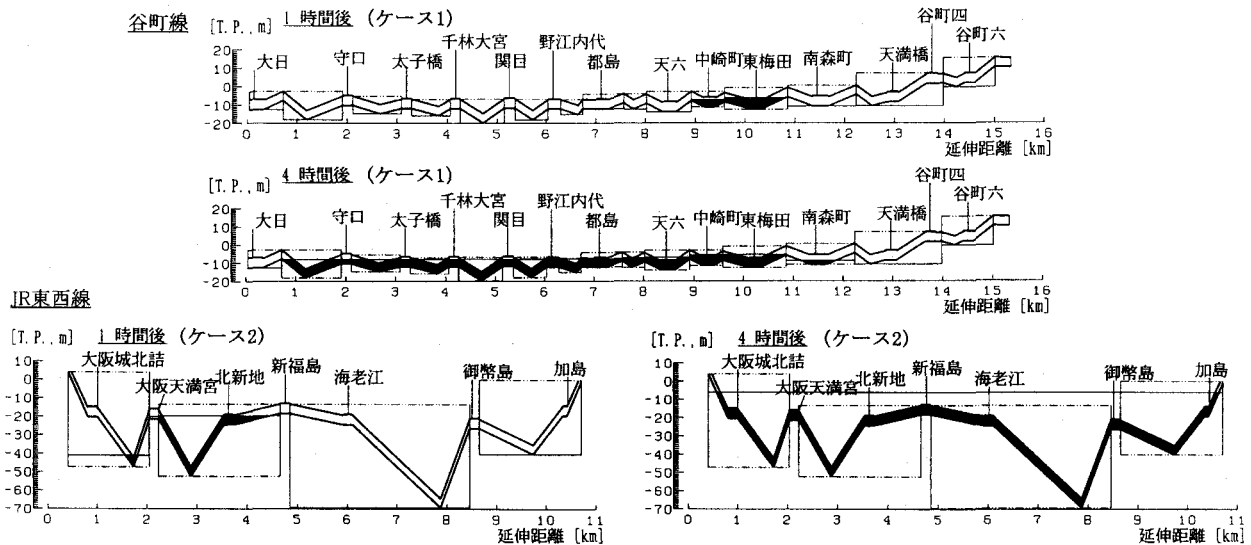
図-8 御堂筋線の浸水解析

一定流量 ($20 \text{m}^3/\text{s}$) の氾濫水を一ヶ所の貯留槽に流入させた。梅田駅を含む貯留槽に流入させる場合をケース A、動物園前駅を含む貯留槽に流入させる場合をケース B とした。

次に、一定流量の氾濫水を流入個所を変えて地下鉄を



(a) 地下街の浸水状況



(b) 地下鉄の浸水状況

図-9 地下空間の浸水状況

含む地下街に流入させた。地下街北側に位置する、図-7中のNo3,4,5,7の貯留槽に $15\text{m}^3/\text{s}$ ずつ、計 $60\text{m}^3/\text{s}$ 流入させる場合をケース1、地下街南側のNo25,26の貯留槽に $30\text{m}^3/\text{s}$ ずつ、計 $60\text{m}^3/\text{s}$ 流入させる場合をケース2とした。地下街のマニングの粗度係数は上下層間では $n=0.100$ 、平面場では $n=0.030$ とした。計算時間ステップはさまざまな試行の結果、 $\Delta t=0.05\text{s}$ より値を大きくすると解が不安定になる場合が生じ、また $\Delta t=0.05\text{s}$ より小さい場合には解に大差がなかったため $\Delta t=0.05\text{s}$ を今回は採用した。地下鉄・地下街空間ともに底面積全体に対するスロット面積の割合を 0.02 とした。これは対象とした地下鉄全体の底面積に対して階段など地上に通じる部分が占める面積の割合である 0.016 という値に、地下鉄の通気孔など調査できなかった部分を考慮して定めた値である。地下街空間についても今回はこの値を採用した。流量係数は $\mu = 0.35$, $\mu' = 0.91$, $C = 0.61$, $C' = 0.55$, $\mu_0 = 0.54$ とした。

(3) 計算結果とその考察

ケースA、ケースBの浸水の時間変化を図-8に示す。流入開始時刻が計算開始時刻である。

ケースAでは、流入開始1時間後、中津駅や淀屋橋駅では浸水していない。これに対してケースBの1時間後では、流入水は大国町駅まで広がっている。同様に、流入開始5時間後では、ケースAでの浸水はなんば駅までであるのに対して、ケースBでは梅田駅まで浸水している。また、ケースBの1時間後では動物園前駅よりも大国町駅のほうが浸水深が大きくなっている。このように地形の影響を受けて、流入口が異なると広がり方に差異が生じている。すなわち、各貯留槽の底面部の地盤高や隣接した貯留槽境界部の地盤高が浸水過程に大きく影響しているものと考えられる。

図-9にケース1, 2における計算開始から1時間後と4時間後の浸水状況、図-10に地下鉄の路線別貯留量を示す。ケース1では、浸水開始1時間後に地下街の浸水域はディアモール大阪や大阪駅前ビルにまで拡大する。その後、4時間後まで浸水域、浸水深はほぼ一定のままである。地下鉄へは、東梅田駅から谷町線へ集中的に流れ込んでおり、4時間後には東梅田駅から約10km離れた守口駅北部まで浸水区間が広がっている。これは氾濫水の流入地点から遠く離れた場所でも浸水被害が生じる

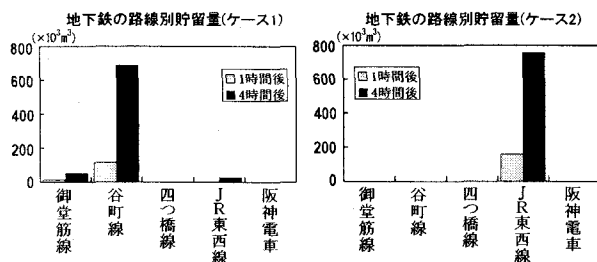


図-10 地下鉄の路線別貯留量

可能性があるということを示している。

一方、ケース2では、浸水域の短時間での拡がりが増著であったケース1とは対照的に、4時間後でもディアモール大阪までしか浸水は拡がらない。これは図-4からも明らかのように、流入地点に近いディアモール大阪や大阪駅前ビルが梅田地下街の中で最も地盤が低く、浸水域がその付近から拡がらなかったためと考えられる。また地下鉄では、北新地駅からJR東西線へ集中的に流れ込んでおり、JR東西線は浸水開始4時間後ではほぼ没している。

以上の解析より、地下空間の浸水過程の複雑さが改めて浮き彫りにされた。対象とした地下街特有の構造とともに連結する地下鉄空間の構造(地下街との連結位置の高さと空間の容量)が浸水過程に大きな影響を及ぼすことが、今回の単純な流入条件の解析結果からだけでも明らかとなった。従来の解析では、連結する地下鉄は考慮されていなかったり、考慮された場合でも単純な槽として扱われ、地下街との連結箇所の高さや、地下鉄駅、トンネル部の容量についてはそれほど深い注意を払われていなかった。今後、複合地下空間を解析するにあたっては、地下鉄の存在は等閑視できない。

4. 結論

本研究では大阪市北区にある梅田地下街及びそれに接続した地下鉄空間を対象として新たな浸水解析を行った。本研究により得られた結論を以下にまとめる。

- 1次元の地下鉄空間及び平面的に拡がる地下街を複数の貯留槽が連結して構成される空間とみた。そして地下鉄空間には流量公式を、地下街には移流項を省略した開水路非定常流式を適用し、それぞれにスロットモデルを導入した解析手法を構築した。

- 地下鉄空間を含んだ梅田地下街に上記の解析手法を適用した結果、対象とした地下空間特有の複雑な構造とともに、連結する地下鉄の構造も浸水過程に大きな影響を及ぼし、地表からの流入箇所が変われば氾濫水の挙動も多様に変化することが明らかになった。

- 氾濫水が地下鉄空間に流入した場合、本解析例の谷町線の守口駅のように、地下鉄空間の地盤高や勾配、貯留容量や地下街との連結位置によっては流入地点から遠く離れた場所でも浸水被害が生じる可能性があることが明らかになった。

一方、今後の課題は次のとおりである。

- 今回の研究ではモデルの検証を行っていない。よって、今後は地下街浸水の模型実験を実施し、実験結果との比較より、ここで提示した数値解析法の精度を確かめる必要がある。
- 今回は一定流量の氾濫水を地下街に流入させたが、地上の内水・外水氾濫モデルと結合した浸水解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 高橋保, 中川一, 野村出: 洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報第33号 B-2, pp.427-442, 1990.
- 2) 井上和也, 中川一, 戸田圭一, 溝田敏夫: 地下空間への氾濫浸水の解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第2巻, 土木学会地下空間研究委員会, pp.95-102, 1997.
- 3) 戸田圭一, 井上和也, 前田修, 谷野知伸: 大都市の地下空間の氾濫浸水解析, 水工学論文集, 土木学会水理委員会, 第43巻, pp.539-544, 1999.
- 4) 井上和也, 戸田圭一, 林秀樹, 川池健司, 坂井広正: 市街地における氾濫解析モデルの考察, 京都大学防災研究所年報第41号 B-2, pp.299-311, 1998.
- 5) 鶴巻有一郎, 奥田朗, 神月隆一: 平面流れとして取り扱った氾濫シミュレーションについて, 第25回水理講演会論文集, 土木学会水理委員会, pp.249-256, 1981.
- 6) 建設省土木研究所: 氾濫シミュレーション(2)—氾濫現象の実態調査と氾濫モデルの適用性に関する検討—, 土木研究所資料第2175号, 1985.
- 7) 土木学会編: 水理公式集, 昭和46年改訂版, p.265, 1971.
- 8) 椿東一郎, 荒木正夫: 水理学演習上巻, 森北出版, pp.204-207, 1961.

(2002. 9. 30受付)