

地下空間における浸水過程の解析について

井上和也・戸田圭一・川池健司*・栗山健作**・大八木亮***

*長崎大学工学部

**（株）戸田建設

***京都大学大学院工学研究科

要 旨

本報は、地下空間の浸水過程を比較的容易に解析できる数学モデルの開発を行ったものである。モデルでは1次元の地下鉄空間および平面的に広がる地下街を、複数の貯留槽が連結して構成される空間とみた。貯留槽間の水の動きを表現するにあたり、地下鉄空間には連続式と流量公式を、地下街には連続式と移流項を省略した開水路非定常流式をそれぞれ適用した。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、地下街の構造とともに、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地下鉄駅、トンネル部の容量）が地下空間の浸水過程に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード：大都市域、地下街、地下鉄空間、貯留槽モデル、浸水解析

1. はじめに

1999年6月の福岡市での水害や2000年9月の東海豪雨による名古屋市での水害、さらに2001年7月の韓国ソウル市の水害から明らかなように、大都市域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入する。地下空間への浸水は死亡事故を含め、被害の甚大化、長期化を引き起こす傾向が強い。

独立したビルの地下室を除けば、地下街や地下鉄など地下空間の立体構造は複雑なものが多く、一旦氾濫水が浸入すれば、それがどこを通過してどこに溜まるのか、あるいはどこに流れていくのか簡単に把握できないことが多い。そのため地下空間への浸水過程を予測しようと地上の氾濫解析モデルの地下空間への適用が試みられてきた（例えば、高橋ら（1990）、戸田ら（1999））。地上の氾濫解析を地下空間へ適用するにあたっての難しさは次の2点に大別される。

- (a) 地下空間のデータセット作成の難しさ
- (b) 地下空間の場での解析の難しさ

地下街や地下鉄は地方公共団体や民間会社により個々に管理・運営されており、地下空間のデータとして共通した整理があまりなされていない。したがって実際の場を対象とした解析を行う場合にはデータの収集やデータセットの作成に多くの労力を要する。

また地下街の多くは、地上から地下1階、地下2階へと多層化しており、しかも各層の中に店舗が所狭しと立ち並んでいる。各階には天井があり、氾濫水も場合によっては開水路から管路流に移行することもある。各階層間の水の移動も決して単純ではない。このような場を対象とするため、氾濫解析手法もタフなものであることが強く要求される。

以上のような事由より本報では、地形データの作成にさほど苦労がなく、比較的簡便に実際の地下空間に適用でき、氾濫水の動きを概略把握できる数学モデルの開発を取り扱っている。そして得られたモ

デルを、従来より研究の対象としている大阪市北区の梅田地下街およびそれに接続する地下鉄空間に適用している。

2. 従来の研究

2.1 地下空間における浸水過程に関する研究

地下空間への浸水に関する先駆的な研究としては高橋ら（1990）の研究が挙げられる。彼らは、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次元流れとして扱い、浅水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（1997）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。

その後、戸田ら（1999）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井上ら（1998）が開発した街路ネットワークモデルを適用し、スロットモデルを導入して天井の影響を考慮した。前田（2000）は戸田らの解析をさらに進め、地下鉄や地下駐車場もモデルに組み込むとともに、地下街の形状をより詳細に取り扱った。彼らは、地下街での氾濫水の挙動を詳細に追跡しているが、彼らの方法にも、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・管路が共存する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こと、また、粗度係数や流量条件によっては局所的に大きな水位変動が現れるなどの課題が残されている。

2.2 ポンドモデルによる氾濫解析

上で述べたように地下空間の浸水解析にはまだ多くの課題が残されており、その解決は容易なものではない。そこで、実用的な浸水解析手法を考えるにあたって、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）を今一度見直してみることとする。

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。林立するポンドが仮想の開水路や管路で連結されており、イメージとしてとらえやすく、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。

鶴巻ら（1981）は、ポンド間の流れを盛土堤を越える流れと仮想の連結管を通して起こる流れとの組み合わせとしてとらえ、越流式と管路流の運動量式によって氾濫水の二次元平面的な拡がりを表現する解析手法を提示した。彼らはこの手法を用いて、揖斐川、牧田川、津屋川に囲まれた多芸輪中（岐阜県養老町）で伊勢湾台風時に発生した洪水氾濫の解析とその検証を行っている。また建設省土木研究所（1985）は、ポンドモデルを含めた様々な氾濫解析モデルの適用性について基礎的な検証を行っている。

前述したように、ポンドモデルは簡便に氾濫水の拡がりを表現できる手法である。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、決して万能な手法ではないが、氾濫水の大まかな伝播をとらえるには充分有効な手法である。次章では、このポンドモデルによる氾濫解析手法を手がかりとして構築した、地下空間の特性（容積が有限であること、多層空間であることなど）を反映させた解析手法について説明することとする。

3. 基礎式および解析手法

3.1 地下鉄空間の浸水解析

地下鉄空間へ浸入した氾濫水は、地下鉄軌道面の地盤高の低い方へと流れ落ち、窪地（下に凸）の部分から次第に溜まっていく。もし、窪地に溜まった氾濫水の水位が軌道面の山（上に凸）の部分より高くなれば、氾濫水はその山の部分を乗り越えて、より遠くへ拡がっていくものと考えることができる。そこでFig.1に示すように、地下鉄空間を、両端に接続穴を有するV字型の貯留槽が一次的に連結して構成された空間と考える。そして、貯留槽間を移動する流量を求めれば、地下鉄空間における氾濫水の拡がりが表現できよう。以上のような地下鉄空間の連結貯留槽モデルに、管路状態への対応を考慮してスロットを組み込む。

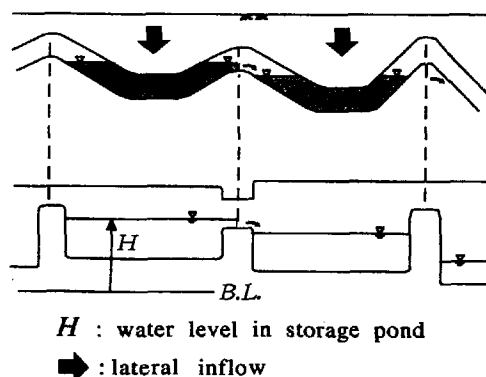


Fig.1 Storage pond model for subway

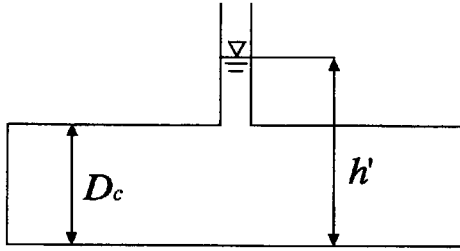


Fig.2 Slot model

Fig.2に示すように、貯留槽の頂部に仮想のスロットを取り付け、貯留槽の頂部よりも水深 h' が小さいときには h' をそのまま水深と考え、貯留槽の頂部よりも h' が大きいときには h' を貯留槽底面からの圧力水頭（ピエゾ水頭）と見なす。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>

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

$$A(H) = \begin{cases} \text{貯留槽形状を反映した面積} & : h' < D_c \\ A_s & : h' \geq D_c \end{cases}$$

ここに、 V ：貯留槽内の水量、 H ：水位、 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、 D_c ：貯留槽の高さ（天井高）である。また、 A_s はスロットの底面積である。

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、下縁の高さとの関係に応じて、以下に示す場合に分類し、越流公式とオリフィスの流量公式とを併用した解析を行う（Fig.3参照）。 h_{up} 、 h_{dn} をそれぞれ、穴口の地盤高を基準とした高さからの上流側、下流側の貯留槽の水深、 D を穴口の高さ（開口高さ）、 B を穴口の幅（横幅）とすると、流量式は以下のように表される。

<流量式>

(1) $D \geq h_{up} \geq 0.0$ の場合：

本間の越流公式（土木学会編，1971）を用いて、

$$Q = \begin{cases} \mu B h_{up} \sqrt{2g h_{up}} & h_{dn}/h_{up} \leq 2/3 \\ \mu' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} & h_{dn}/h_{up} > 2/3 \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 g は重力加速度、 μ 、 μ' は流量係数で、それぞれ0.35、0.91とする。

(2) $h_{up} \geq D$ の場合：

オリフィスの流量公式（椿・荒木，1961）を用いて、

(i) $h_{dn} \leq 0.0$ （下流水位が穴口の地盤高以下）のとき、

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

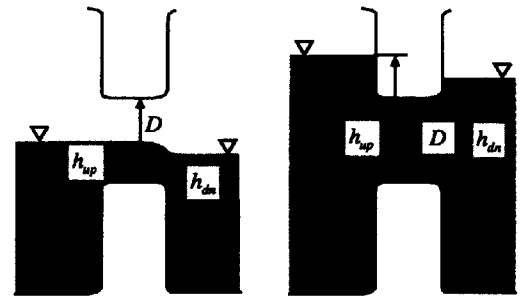


Fig.3 Flow pattern between storage ponds

(ii) $D \geq h_{dn} > 0.0$ のとき、

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

(iii) $h_{dn} > D$ のとき、

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

ここに、 C および C' は流量係数で、ここでは $C = 0.61$ 、 $C' = 0.55$ を用いる。

3.2 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。そのため、領域を隔てる壁の存在、地下街の区分、地盤高、階層の違い（地下1階と2階のように）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てれば、地下街はそれらの貯留槽が立体的に連結している空間としてとらえることができる。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を変現することができよう。以上のような地下街の貯留槽モデルに、スロットを組み込んだ解析手法を適用する。

(1) 平面的な拡がりの解析

Fig.4に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現される。

<連続式>

$$A \frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad A = \begin{cases} A_f & : h < D \\ A_s & : h \geq D \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 A ：貯留槽の有効面積、 A_f ：貯留槽の形状を反映した面積、 h ：水深、 H ：水位、 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外部からの流入流量、 D ：貯留槽の天井高さである。

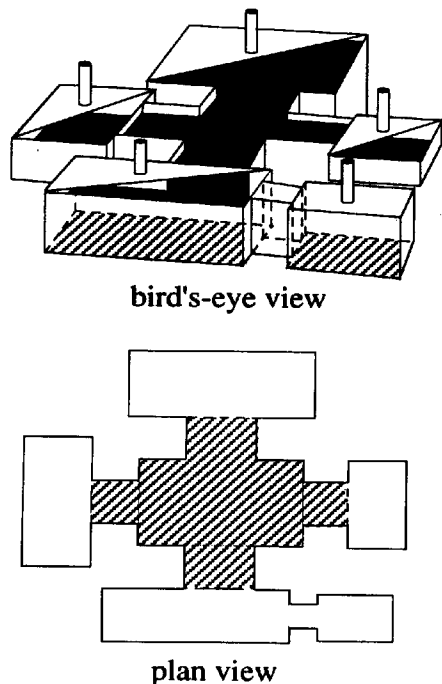


Fig.4 Storage model for underground mall

貯留槽間の運動量式については、次式を用いる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha LQ|Q| \quad (7)$$

ここに、 ΔH ：隣接する貯留槽間の水位差、 Q ：流量、 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 $i \cdot j$ とし、隣接した貯留槽の平均水深および接面の幅 B_b から、接面の断面積 A_b を次式のように表す。

$$A_b = B_b \frac{\min(h_i, D_i) + \min(h_j, D_j)}{2} \quad (8)$$

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。

$$\alpha = \frac{n^2 s_b^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (9)$$

ここに s_b は接面の潤辺で、次式で表す。

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

$$\text{ただし } B' = \begin{cases} 2B_e & h_i \geq D_i, h_j \geq D_j \\ B_e & \text{上記以外の場合} \end{cases} \quad (10)$$

本研究では、氾濫水の先端条件について特別な扱いはしていない。ただし、貯留槽の水深が 0.001m 以下の場合はゼロに置き換えている。

(2) 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階と同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、上層と下層をつなぐ階段部分や吹き抜けなどの穴口を流入口としてモデル化し、以下の解析手法を用いる。

Fig.5(1) に示すように、上層から下層へ氾濫水が落ち込む場合については、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式で求める。

$$Q = B_e \mu_0 h_e \sqrt{gh_e} \quad (11)$$

ここに、 μ_0 は段落流れの流量係数であり、ここでは $\mu_0 = (2/3)^{3/2} = 0.544$ を用いる。

次に、Fig.5(2) に示すように、下層の水位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、穴口を仮定の管路と見立て、上層から下層へ落ちる方向を流れの正方向と考えて、 $\Delta H = H_i - H_j$ ($i \cdot j$ は上層・下層を示す添字)、 A_e を穴口の断面積、 L_e を上下層間の床厚として、(7) 式と同様の次の運動量式を用いる。

$$\frac{L_e}{gA_e} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha_e L_e Q|Q| \quad (12)$$

ここに α_e は損失係数で、(9) 式と同様の式で表現される。また、Fig.5(3) に示すように、下層の水位が上層の水位よりも高い場合についても、 $\Delta H = H_i - H_j$ (≤ 0.0) として (12) 式を用いる。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、急縮および急拡流れによる形状損失を考慮し、マンニングの粗度係数 n の値については (9) 式の n の値よりも大きな値を用いることとする。

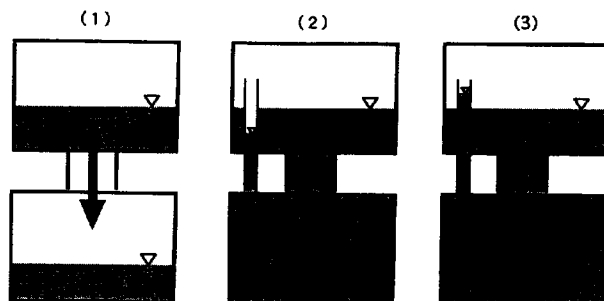


Fig.5 Conditions between upper and lower storage ponds

4. 地下鉄・地下街空間への適用

4.1 概説

前章で述べた貯留槽に基づく浸水モデルを実際の地下鉄・地下街に適用した。適用した地下空間は、従来から研究の対象としている大阪市北区梅田地下街およびこれに接続する地下鉄である。

4.2 地下鉄御堂筋線での浸水解析

(1) 計算領域と計算条件

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、Fig.6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。この区間に限定したのは、中津には北部に地上からの引き込み口があり、また、動物園前駅から南に行くと、淀川の堤防天端高T.P.5.78mより地盤が高くなり、仮に市中で洪水氾濫が発生しても、そこより遠くへは氾濫水が拡がらないと考えたからである。

地上からの流入条件として一定流量($20\text{m}^3/\text{s}$)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1、動物園前駅を含む貯留槽に流入させる場合をケース2とした。

引き込み口のある中津の貯留槽では、水位が引き込み口付近の地上の地盤高まで上昇したとき、地上への排出が起こるとした。計算時間ステップは、後で述べる地下街の浸水計算にあわせて $\Delta t=0.05\text{s}$ に設定した。底面積全体に対するスロットの面積の割合は0.02とした。これは地下鉄空間全体の底面積に対して階段が占める割合として算定した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。また、駅天井高、駅以外の天井高をそれぞれ一律に5.5m、5.0mと設定した。これらの値も現地調査の結果や資料をもとに作成した。

貯留槽の水位と貯留量の関係は、貯留槽を駅と駅以外のトンネル部からできた複数管路の集合体と考え、その管路毎に水位と貯留量の関係を求め、それらを重ね合わせた。なお、トンネル部の水位と貯留量の関係を決めるにあたっては、地下鉄軌道の断面積は簡単のため長方形と仮定した。これについては、予備検討で長方形断面と円形断面との間で有意な差がないことを確認している。

(2) 計算結果とその考察

ケース1、ケース2の浸水の時間変化をFig.6(1),(2)にそれぞれ示す。図では順に流入開始から1時間毎に5時間後までの流入水の拡がりの様子を表している。なお、流入開始時刻が計算開始時刻である。

ケース1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2の1時間後では、流入水は大国町駅まで拡がっている。同様に、流入開始5時間後では、ケース1での浸水はなんば駅までであるのに対して、ケース2では梅田駅まで浸水している。このように地形の影響をうけて、流入口が異なると拡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影響しているものと考えられる。また、ケース2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。このことは、氾濫水の流入場所から遠く離れたところであっても「もらい水」的に浸水被害が発生する可能性があるということを示唆している。

なお、このモデルでは、一つの貯留槽から水が隣の貯留槽に拡がる場合、水は隣の貯留槽の底に直接溜まるように表現される。例えば、ケース2の4時間後の淀屋橋駅を含む貯留槽では、淀屋橋駅自体やその南側では浸水がおこらず、駅の北側の地盤が低い箇所だけが浸水している結果となっている。このように、貯留槽内の水位、貯留槽間の水のやりとり以上の詳細な水の流れまでは表現できないのは、このモデルの限界でもある。

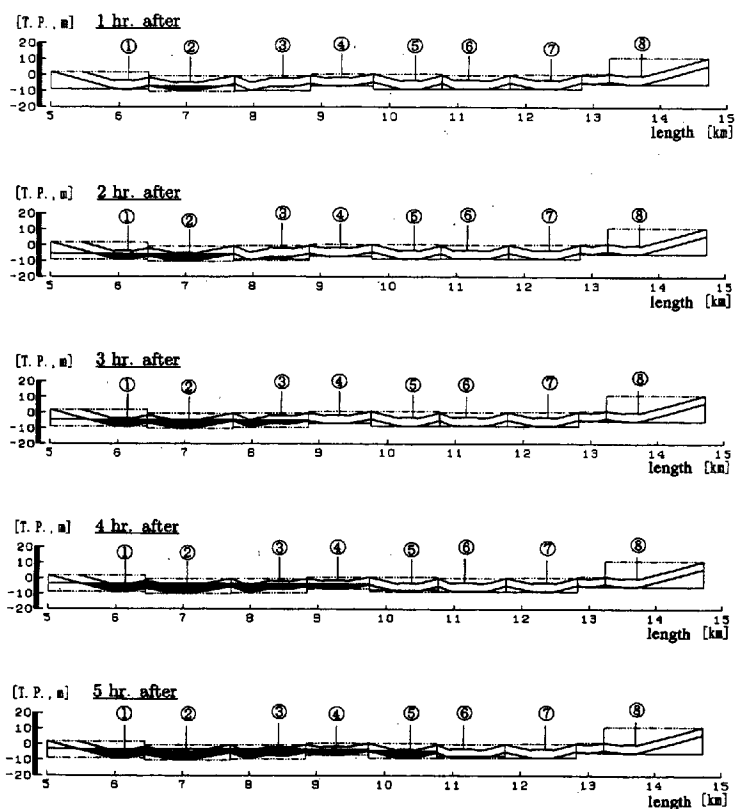
4.3 地下鉄空間を含んだ梅田地下街の浸水解析

(1) 計算領域

梅田地下街の対象領域は、Fig.7のように阪急三番街、ホワイティ梅田、ディアモール大阪、ハービス大阪、堂島地下街および隣接するビルの地階部のうち主要なものなどから構成されている。Fig.8に示すように、阪急三番街、新阪急ビル、大阪駅前第一ビルから第四ビルは地下1階、地下2階の2層構造となっている。これらの地下街は、地下1階、2階とも、必ずしも同じ高さの平面上に位置しているわけではない。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。

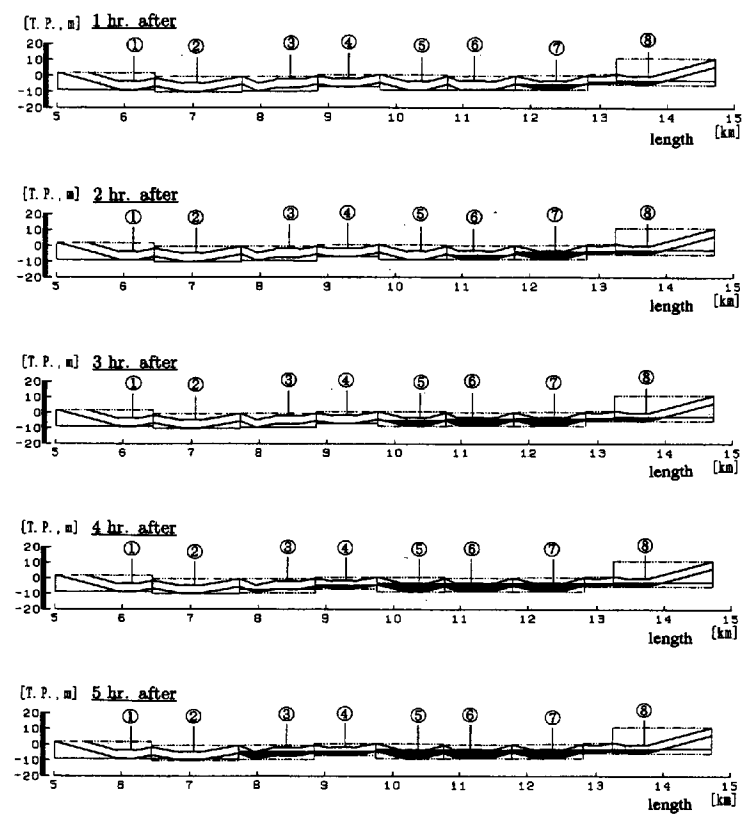
地下街を、連結する貯留槽としてモデル化した(Fig.9参照)。地下街での貯留槽間の接続関係をFig.10に示す。また、地盤高の分布をFig.11に示す。なお、貯留槽毎の天井高、面積の有効率(底面積に対して実際に水が溜まる部分の面積比)は市販の地図や現地調査の結果を基に設定した。

地下街と直結する地下鉄(地下鉄道)路線は、Fig.12に示す大阪市営地下鉄御堂筋線、谷町線、四つ橋線、J R東西線、阪神電鉄である。地下街と地下鉄空間とのつながりの箇所をFig.7に示す。各路線の区間は前節の御堂筋線と同様、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(Fig.12参照)。地



- ① Nakatsu
- ② Umeda
- ③ Yodoyabashi
- ④ Honmachi
- ⑤ Shinsaibashi
- ⑥ Nanba
- ⑦ Daikokucho
- ⑧ Doubutsuenmae

(1) (Case1)



(2) (Case2)

Fig.6 Inundation in Midousuji-line

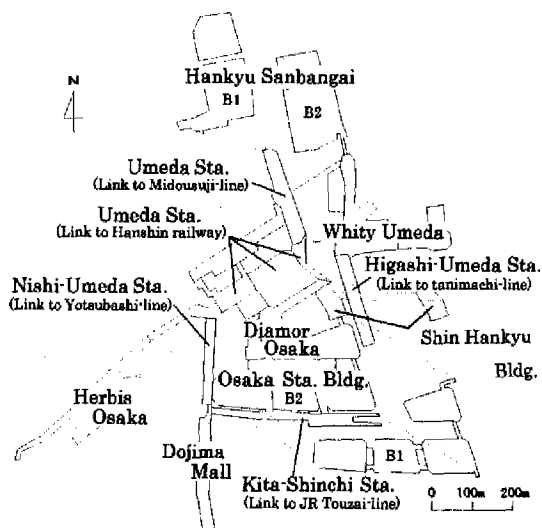


Fig.7 Studied underground mall

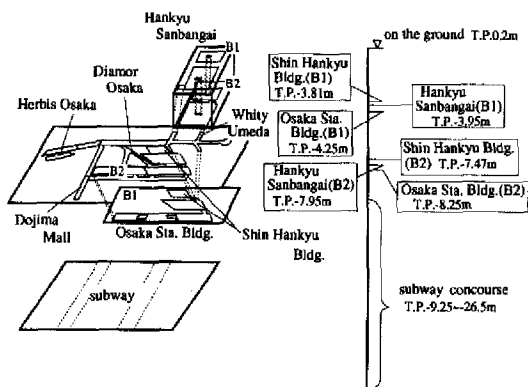


Fig.8 Structure of underground mall

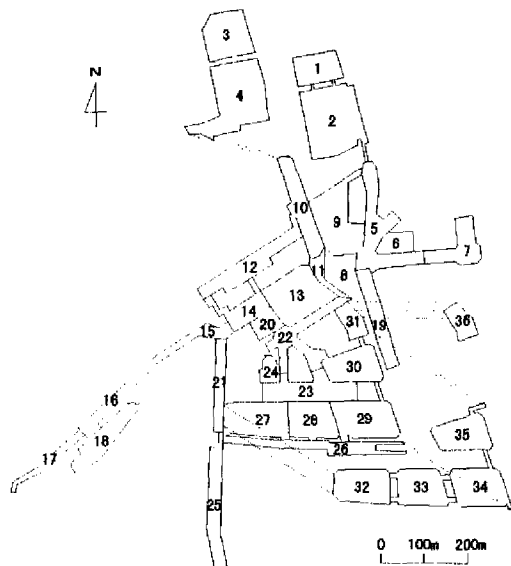


Fig.9 Modelled underground mall

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。路線別の区間長と容積をTable 1に示す。前節に示したように、地下鉄空間をV字形の貯留槽が連結した空間としてモデル化し

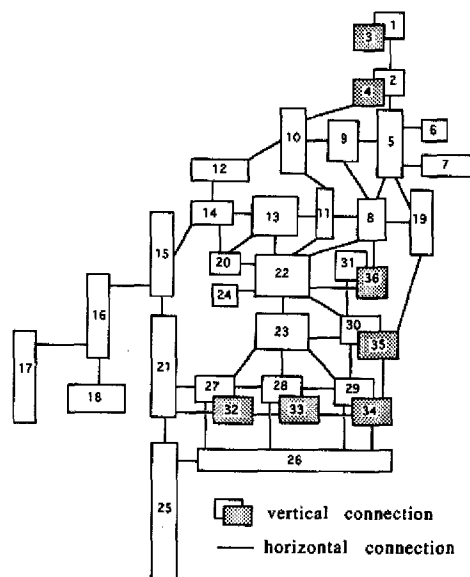


Fig.10 Connection of storage ponds

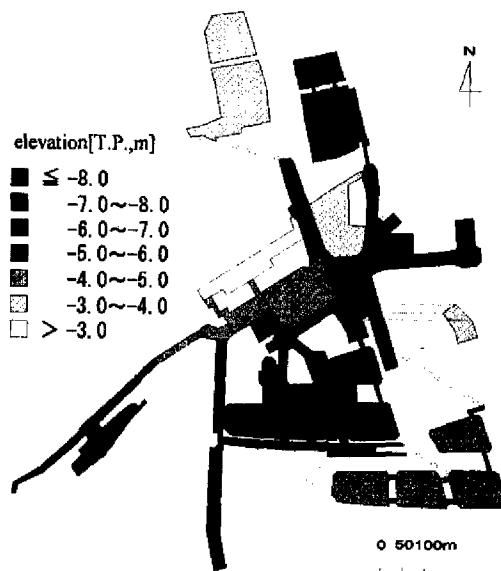


Fig.11 Elevation of underground mall

た。Fig.13に四つ橋線、阪神電鉄のモデル図を示す。なお、御堂筋線のモデル図はFig.6に示しており、谷町線、JR東西線のモデル図は後出のFig.15, Fig.17にそれぞれ示す。

(2) 計算条件

一定流量の氾濫水を流入箇所を変えて地下街に流入させた。地下街北側に位置する、Fig.9中のNo.3,4,5,7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A、地下街南側のNo.25,26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Bとした。この流量規模は地上の外水氾濫を想定している。地下街のマニングの粗度係数は上下層間では $n=0.10$ 、平面場では $n=0.03$ を用いた。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

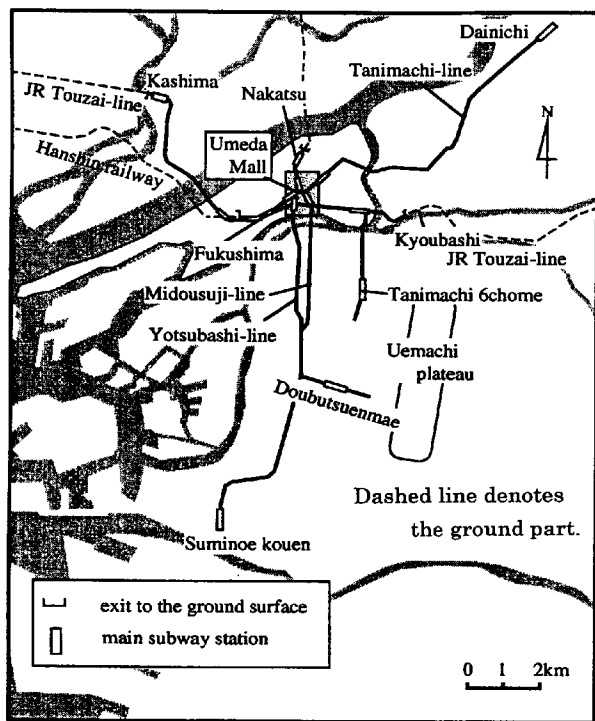


Fig.12 Studied subway lines

Table 1 Distance and volume of subway lines

	distance (km)	volume $\times 10^3(m^3)$
Midousuji-line	9.7	710
Tanimachi-line	15.3	1192
Yotsubashi-line	11.5	739
JR Touzai-line	10.2	751
Hanshin railway	1.7	102

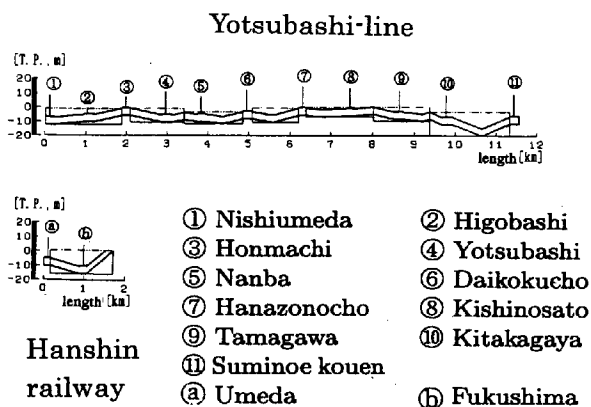


Fig.13 Yotsubashi-line and Hanshin railway

り大きくすると解が不安定になり、また $\Delta t=0.05s$ より小さい場合には解に大差がなかったため $\Delta t=0.05s$ を今回は採用した。また地下鉄、地下街ともに、底面積全体に対するスロット面積の割合を0.02と設定した。

(3) 計算結果とその考察

先ずケースAの浸水過程を調べてみる。Fig.14に地下街の浸水状況の時間変化を示す。流入開始から順に1時間後、2時間後、4時間後、6時間後の浸水状況を表している。

阪急三番街（貯留槽No.3.4）、ホワイティうめだ（貯留槽No.5,7）から浸入しはじめた氾濫水は、地盤の低い空間に沿うように流れ、流入開始1時間後には、阪急三番街、ホワイティうめだ、ディモール大阪（貯留槽No.22,23）の全域と大阪駅前ビルの地下2階（貯留槽No.27,28,29,30）まで浸水域が拡大する。地盤が低い北東部では浸水深も大きく、貯留槽No.1,2の阪急三番街の地下2階では浸水深が2mを超えている。Fig.15に地下鉄谷町線の浸水状況の時間変化を示すが、1時間後ですでに東梅田駅（貯留槽No.19）から地下鉄谷町線へ氾濫水が流出しているのがわかる。地下街では、その後、流入開始4時間後までほぼ一定の浸水状況が続くが、谷町線の浸水範囲は拡大し、流入開始4時間後には浸水は守口駅北部にまで達する。その後、谷町線の貯留量が一杯になり、谷町線へ流出しなくなるとその影響が地下街に現れ、流入開始6時間後では、東梅田駅、ディモール大阪、大阪駅前ビル地下2階で浸水深が増大している。またここでは図に示さなかったが、4時間後以降、JR東西線、御堂筋線への流出量も増大している。

次にケースBの浸水過程を調べてみる。Fig.16に地下街の浸水状況の時間変化を、Fig.17にJR東西線の浸水状況の時間変化を示す。

堂島地下街（貯留槽No.25）、JR東西線北新地駅を含む地下街（貯留槽No.26）から浸水しはじめた氾濫水は、地下街ではディモール大阪、大阪駅前ビル地下2階、地下鉄ではJR東西線に集中的に流れ込む。たとえば、大阪駅前ビル地下2階では、流入開始1時間後に浸水深は1mを超えている。そして流入開始2時間後までは、地下街の浸水域がさほど拡大することはない。地下鉄はJR東西線のみ浸水範囲が拡大し、他の路線は浸水していない。流入開始4時間後になると、地下街ではディモール大阪全域が浸水する。地下鉄空間はJR東西線がほぼ水没する。そして6時間後になると、阪急三番街、ホワイティうめだ、ハービス大阪（貯留槽No.15,16）方面へ浸水域が拡大する。図は割愛するが、地下鉄空間では谷町線、四つ橋線においても浸水が広がる。

また、地下鉄が浸水する事態では、当然のことながら駅のホームおよび改札口からホームに至る空間も浸水する。地下鉄駅の部分は、今回の解析では軌道部を含むV字形の貯留槽の空間の一部としての扱

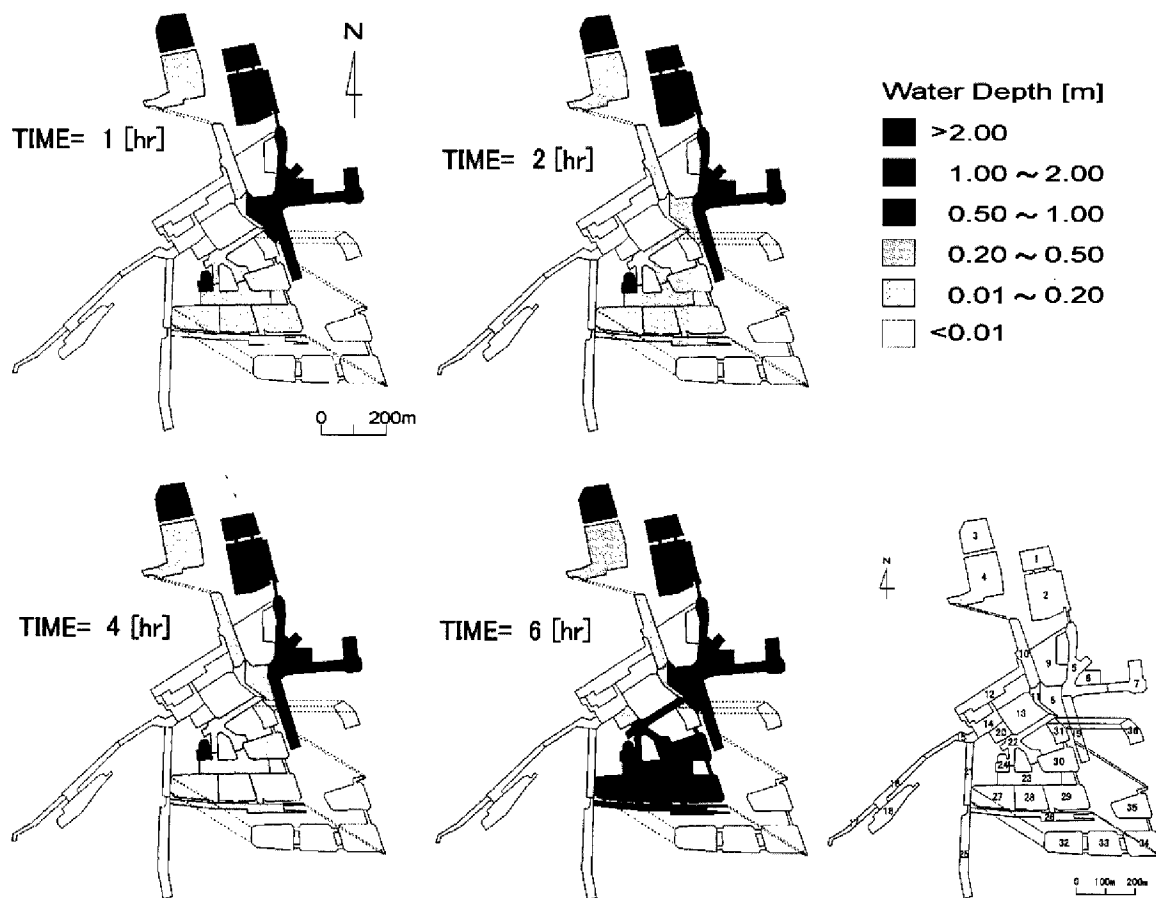


Fig.14 Inundation in underground mall (Case A)

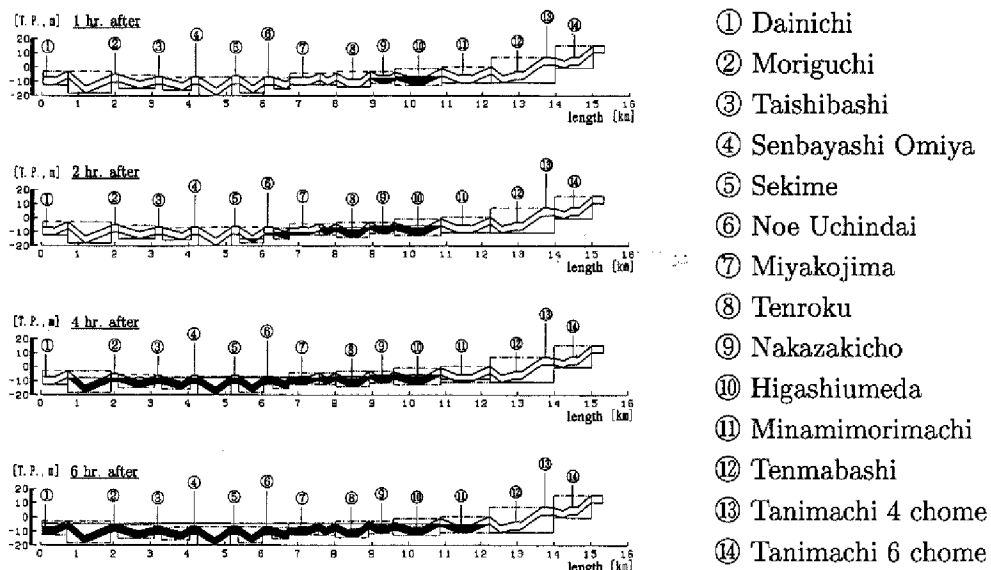


Fig.15 Inundation in Tanimachi-line

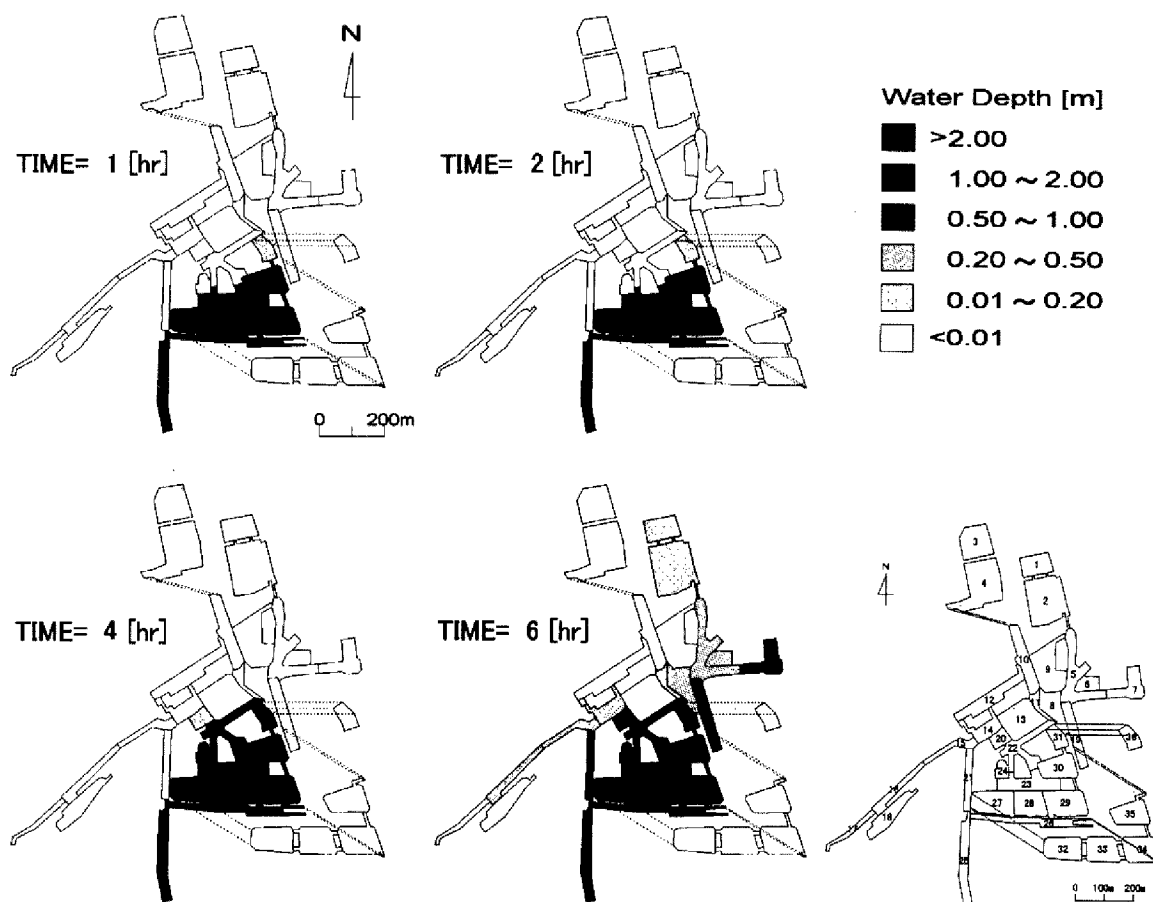


Fig.16 Inundation in underground mall (Case B)

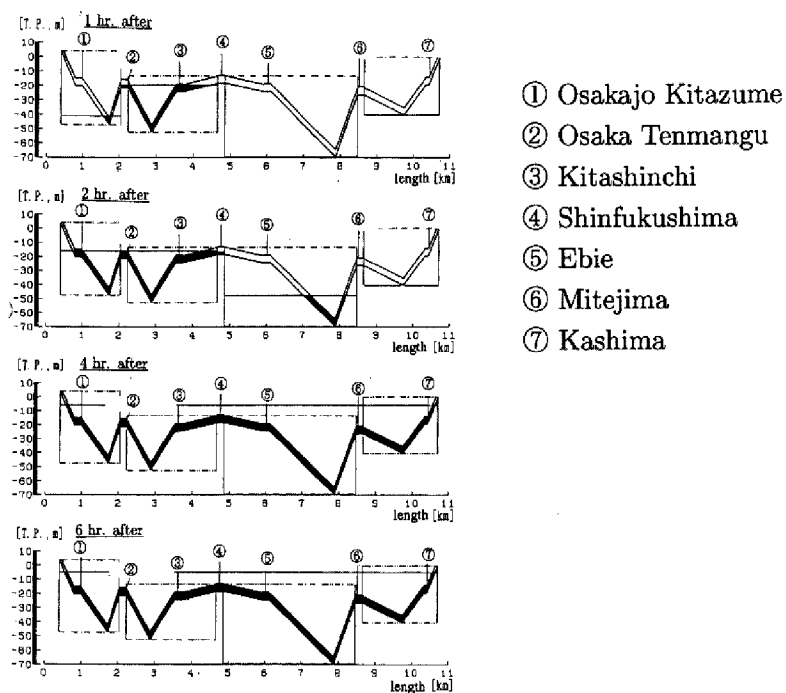


Fig.17 Inundation in JR Touzai-line

いにとどめているにすぎないが、ケースAの東梅田駅やケースBの北新地駅は、流入開始1時間後にほぼ水没する結果となっており（Fig.15,17参照）、地下鉄駅の危険性がこれらの結果からも窺い知ることができる。

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2ケース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。

今後は、地上の洪水氾濫モデルに今回構築した地下空間の氾濫モデルを結合することにより、内水あるいは外水氾濫時の地下空間の浸水過程の解析を進めていく必要がある。

5. おわりに

大阪市北区にある梅田地下街およびそれに接続した地下鉄空間を対象として浸水解析を行った。得られた結論を箇条書きに記せば以下のとおりである。

- (1) 1次元の地下鉄空間および平面的に広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する解析手法を構築した。
- (2) 地下鉄御堂筋線に上記の解析手法を適用した結果、地形の影響により、流入場所を変えると流入水の拡がりに差異が生じることがわかった。また、流入口から離れた地点においても浸水被害が生じることがわかった。
- (3) 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、対象とした地下街特有の構造とともに、連結する地下鉄の構造（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およぼすことが明らかになった。
- (4) 地下鉄空間への浸水が生じるときには、地下鉄駅の構造によっては、ホームおよび改札口からホームにいたる空間が大変危険な状況になることが示唆された。

一方、今後の課題は次のとおりである。

- (1) 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などを実施して、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。
- (2) ここでは一定流量の氾濫水を地下街に流入させる解析にとどまっているが、地上の内水・外水氾濫モデルと結合した浸水解析を進めていく必要がある。
- (3) 地下鉄では、路線どうしが独立したものとして取り扱っているが、路線どうしの結合、つまり、地下鉄路線の交差部をモデル化して取り込む必要がある。また、地下鉄駅の構造も、もう少し踏みこんだ形でモデルに組み込む必要がある。

本研究を実施するにあたり、社団法人近畿建設協会の研究助成を受けた。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・林秀樹・川池健司・坂井広正 (1998):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.
- 井上和也・中川一・戸田圭一・溝田敏夫 (1997):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.
- 建設省土木研究所 (1985):氾濫シミュレーション (2) 一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一, 土木研究所資料第2175号.
- 高橋保・中川一・野村出 (1990):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.
- 椿東一郎・荒木正夫 (1961):水理学演習上巻, 森北出版, pp.204-207.
- 鶴巻有一郎・奥田朗・神月隆一 (1981):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.
- 戸田圭一・井上和也・前田修・谷野知伸 (1999):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.
- 土木学会編 (1971):水理公式集, 昭和46年改訂版, 土木学会, p.265.
- 前田修 (2000):都市およびその多層地下空間における氾濫解析法の研究, 京都大学修士論文.

On Flood Inundation Analysis in Underground Space

Kazuya INOUE, Keiichi TODA, Kenji KAWAIKE*, Kensaku KURIYAMA** and Ryou OHYAGI***

*Faculty of Engineering, Nagasaki University

**Toda Co. Ltd.

***Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

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 ponds, 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 much influence the inundation behavior in underground mall.

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