

# 大都市の地下空間の氾濫浸水解析

## ANALYSIS OF OVERLAND FLOOD FLOW INTRUSION INTO UNDERGROUND SPACE IN URBAN AREA

戸田圭一<sup>1</sup>・井上和也<sup>2</sup>・前田修<sup>3</sup>・谷野知伸<sup>4</sup>

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Osamu MAEDA and Tomonobu TANINO

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

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>学生員 京都大学大学院 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>正会員 工修 日本道路公団 高松工事事務所 (〒761-8084 高松市一宮町 1040-1)

This paper treats a numerical analysis of overland flood flow intrusion into underground space in an urban area. A one-dimensional network model to express inundation flow in underground space linked with a horizontally two-dimensional overland flood flows by river bank collapse is developed and applied to Umeda underground market in Osaka city. A slot model is used for the treatment of the pressurized flow condition in underground space. The results obtained show that the model developed here can simulate the aspects of inundation flow into underground space fairly well.

**Key Words :** *numerical analysis, inundation flow, urban area, underground space, slot model, Umeda*

### 1. 緒言

わが国の大都市は河川河口部の沖積地である沿岸域に位置することが多く、必然的に洪水や高潮などによる外水氾濫の危険性が高い。外水防御の高堤防による輪中形成のため、内水氾濫の危険性もまた高い。一方、大都市では、空間の有効利用の観点から地下空間の開発や利用がめざましい状況である。このような大都市域において、ひとたび大規模な洪水氾濫が生じれば、その氾濫は地上部のみならず、地下空間へも拡がるのが予想され、被害の拡大が危惧される。本研究は、人口、資産、情報などが高密度に集中している大都市の水防災研究の一環として、大都市の洪水氾濫時の氾濫水の地下空間への拡がりの水理特性を数値解析により考察したものである。

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<sup>1)</sup>の研究が挙げられる。彼らは、地下空間へ階段を通して流入する流量を段落ちの水流とみなし、それを地下街への流入境界条件として与えることにより地上部と地下空間の浸水過程を平面二次元流れとして扱い、同一の計算方式を用いて地上部と地下空間とを並行して解析できることを示した。また著者ら<sup>2)</sup>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、実在する複雑な地下街への平面二次元モデルの適用が妥当か否かは議論の余地がある。またそれらのモデルでは地下街の天井高の影響を考慮していない点が課題として残されている。以上の点を考慮して、ここでは地下空間の通路を一次元の水路ネットワークで表現し、かつ開水路・管路共存した流れが表現可能な新たなモデルによる解析を行っている。

### 2. 対象領域

本研究で対象としたのは、大阪北の中心地区「梅田」および「梅田地下街」である。この地域を選定したのは、(1) 大阪の中心地の一部に属し、都市の水防災の観点から重要な地域であること、(2) 台風と洪水の重畳災害が発生した際に浸水の危険性が高いこと、(3) 地下街の形状が複雑に入り組んでおり、地下街への氾濫水の浸入過程を調べるうえで興味深い場所であること、の理由からである。

地上部の計算対象領域は図-1 に示される大阪梅田地下街を含む淀川左岸側である。また、対象としている地下空間の領域およびその構造を図-2(1)、図-2(2) に示す。地下街は、一般に空間利用をより高度化するため、複雑に入り組み、かつ多層化した構造になって

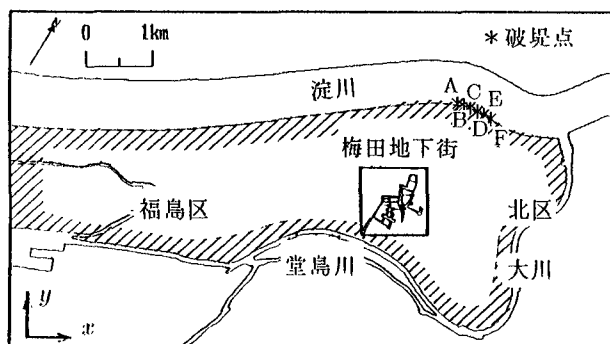


図-1 地上部対象領域

いるが、「梅田」地下街もその例外ではない。

### 3. 数値解析手法

#### (1) 解析手法の概要

解析手法の概要は以下のとおりである。地上部の氾濫解析には、従来どおりのデカルト座標系に基づく平面二次元流れの解析法<sup>3)</sup>の考え方を適用し、差分法は Iwasa and Inoue<sup>4)</sup>の方法を用いる。多層化している地下街の氾濫解析においては、地下街を図-2(2)に示されるような複数の平面で構成される場としてとらえ、各平面において、地下街の通路を水が流れる空間、それ以外は水が貯留される空間とみなし、図-3のような一次元の水路ネットワークに基づく解析<sup>5)</sup>を行っている。さらに地下街においては浸水が天井に達し、満管流になることが予想されるため、スロットモデル<sup>6)</sup>を導入して開水路・管路共存状態を考慮した解析を行っている。また地上部と地下空間、上下の地下空間を結びつける階段などの施設における水の流れは、段落ちの流れとしてモデル化している。次節において地下街のモデル化および解析手法について詳述する。

#### (2) 地下街の浸水解析手法

一般に地下街の構造は公共用の通路、その両側に立ち並ぶ店舗、および地上や階下層との連絡部から成り立っている。本研究で対象領域としている「梅田地下街」では、通路が網状に形成されており、その網の中に店舗や百貨店が存在する形になっている。また、主に通路の交差点で、階の連絡部である階段やエスカレーターが設置されている。通路幅は広いところでも10m以下であり、通路の左右両端における地盤高の差はほとんどない。従って、氾濫水の流れは通路と平行な方向へ一次元的に拡がると考えられ、さらに通路が網状に構成されていることを考慮すれば、図-4に示すように地下通路をリンク、通路の交差点をノード、店舗・ビルの区域を住区と定義し、地下街はリンク・ノード・住区からなるネットワークを形成するととらえることができる。そして地下通路を表すリンクをいくつかの格子に分割し、一つのリンク内で通路幅を一定と

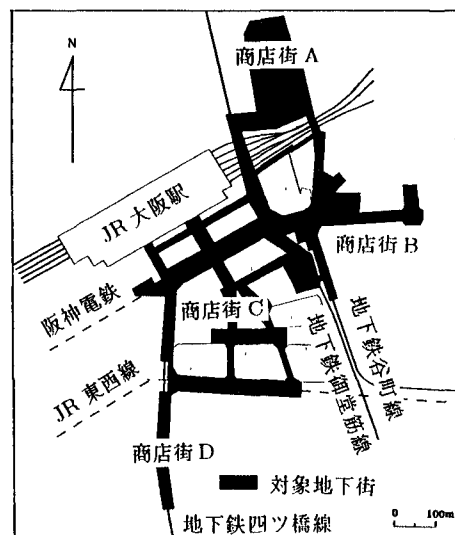


図-2(1) 地下街対象領域 (平面図)

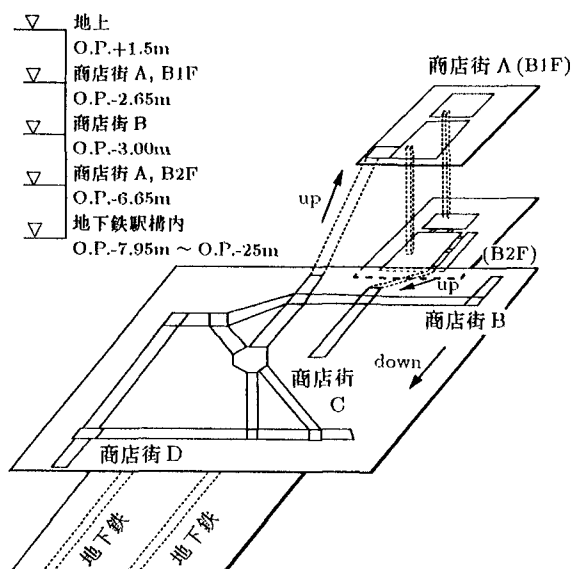


図-2(2) 地下街対象領域 (立体図)

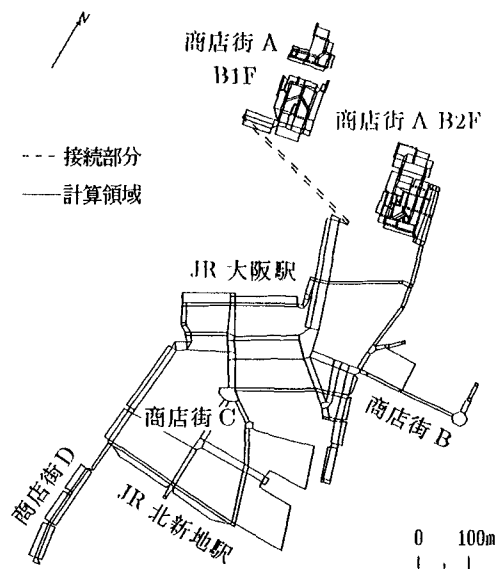


図-3 地下街計算領域

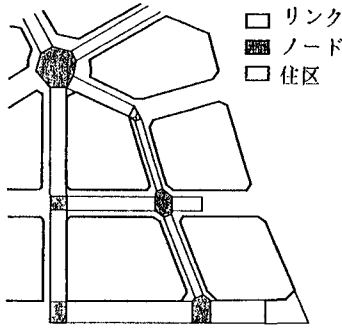


図-4 ネットワークモデル

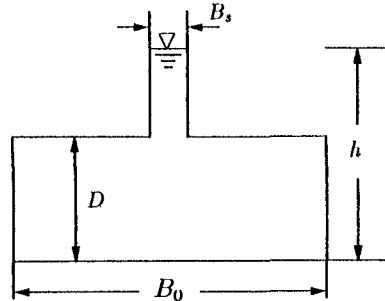


図-5 スロットモデル

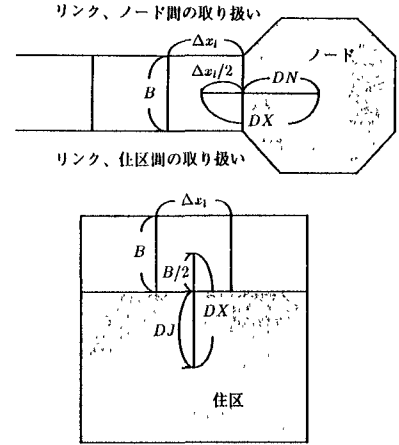


図-6 リンクの境界の取り扱い

仮定すれば、一次元の不定流計算の手法を適用することが可能である。

また地下通路の天井高は3m程度であるので、地下空間へ浸入する流量によっては、開水路状態と管路状態の共存や遷移の可能性がある。この状態を解析するにあたりここではスロットモデル<sup>6)</sup>を導入する。

スロットモデルでは、図-5に示すように管路の頂部に幅  $B_s$  のスロットを取り付けた仮想断面を考え、管路の流れを開水路の流れとして扱う。そうすると管路流れの場合、管路底を基準高としたピエゾ水頭は水深と考えることができ、運動量式は管路、開水路の流れとも同一の式で表現可能となる。またスロット幅  $B_s$  を、 $g$ :重力加速度、 $A_0$ :管路の断面積、 $a$ :管路状態の場合の疎密波の伝播速度、を用いて、

$$B_s = \frac{gA_0}{a^2} \quad (1)$$

となるように定めると、連続式も開水路、管路の場合で同一となる。すなわち、リンクにおける連続式、運動量式は次式で表現される。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_l} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{\Delta x_l} \quad B_l = \begin{cases} B_0: & (h < D) \\ B_s: & (h \geq D) \end{cases} \quad (2)$$

運動量式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 \frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \quad (3)$$

ここに、 $h$ :水深(ピエゾ水頭)、 $u$ :流速、 $Q$ :流量、 $H$ :基準面から自由水面までの高さ、 $n$ :マンニングの粗度係数、 $q$ : (住区からの) 横流入量、 $\Delta x_l$ :リンクの格子長、 $A$ :断面積、 $R$ :径深、 $B_l$ :リンクの水面幅、 $B_0$ :水路幅である。なお(3)式において、住区からの氾濫水の流入・流出に伴う運動量の項は省略している。

次に、リンクの境界部分、すなわちリンクとノード、リンクと住区の境界の取り扱いについて述べる。運動量式については移流項を考慮せず、圧力項と底面摩擦項のみで運動量式を計算する。すなわち、運動量式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{DH}{DX} - gn^2 \frac{|Q|Q}{h_b^{4/3} A_b} \quad (4)$$

ここに、 $h_b$ :接面における水深、 $A_b$ :接面における断面積、 $DH$ :それぞれの水位差、 $DX$ :中心間距離である。ただし接面とは、リンクとノード、あるいはリンクと住区が互いに接している境界面を指す。中心間距離  $DX$  は、

リンクとノードの場合、 $DX = DN + \Delta x_l/2$

リンクと住区の場合、 $DX = DJ + B/2$

とする(図-6参照)。ただし、 $B$ は通路幅、 $DN, DJ$ はノード、住区それぞれの中心から接面までの最短距離である。また接面で定義される水深  $h_b$  と断面積  $A_b$  は、図-6より、

リンクとノードの場合、

$$h_b = \frac{DN \times h_l + \Delta x_l/2 \times h_n}{DX} \quad A_b = B \times h_b$$

リンクと住区の場合、

$$h_b = \frac{DJ \times h_l + B/2 \times h_j}{DX} \quad A_b = \Delta x_l \times h_b$$

と定める。ただし  $h_l, h_n, h_j$  はそれぞれリンク、ノード、住区の水深を表す。ノードと住区の境界における運動量の取り扱いも、上述した方法と同様である。

次にノードと住区の連続式は、それらに出入りする流量より以下のように表現される。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m Q_i \quad A = \begin{cases} A_p: & (h < D) \\ A_s: & (h \geq D) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 $m$ :接面数、 $D_c$ :ノード、住区の天井高、 $A_p$ :ノード、住区の平面積である。また、 $A_s$ は次式で表現される。

$$A_s = \sum_{i=1}^m B_{s,i} DL_i \quad (6)$$

ここに  $B_{sd_i}$  は  $i$  番目の接面の断面積に対するスロット幅,  $DL_i$  は図心から接面までの距離である.

### (3) 異層間の境界条件の取り扱い

階段部において地上部から地下街へ流入する氾濫水量  $Q$  は高橋ら<sup>1)</sup>の提案する次式

$$Q = B_0 \mu_0 h \sqrt{gh} \quad (7)$$

で表現される. ここに  $h$ : 階段入口のステップを乗り越える浸水深,  $B_0$ : 階段の有効幅,  $\mu_0$ : 段落ち流れの流量係数であり, 今回は  $\mu_0 = 0.91$  を用いている. 階段が含まれる地上部の格子においてそれぞれ  $Q$  を求め, その格子に対応する地下街のノードに  $Q$  を与える. すなわち, 流入流量  $Q$  は地下街において連続式のみで取り扱われる. 地下1階と同2階のように地下街平面が多層のところでは, 上層の住区から下層のノードへの接続のための流量を(7)式で与える. 地下街からの流出は, 住区に設定された地下鉄駅改札口から地下鉄駅構内へ落ち込む流量を同様の方法で与える. なお, 層的に最下部に位置する地下鉄駅構内は, 簡単のため, 十分広い水槽とみなし, 流入水の貯留機能のみを考え, 線路沿いの氾濫水の伝播までは考慮しないこととする.

## 4. 数値解析結果

### (1) 計算条件

地上部の氾濫解析では  $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$  にとり, 氾濫計算対象域を  $x$  方向に 90,  $y$  方向に 50 分割した. 淀川の堤防が一部決壊することを想定し, 計算区間上流端である淀川毛馬地点において図-7 に示す想定洪水ハイドログラフを境界条件として与えた. 計算時間間隔は  $\Delta t = 5$  秒で, 全計算時間は 9 時間, 破堤は想定洪水ハイドログラフのピークである計算開始 3 時間後に発生するとし, その 6 時間後まで氾濫計算を実施した. 破堤時刻を 0.0hr と定めると, 計算開始時刻は -3.0hr, 同終了時刻は 6.0hr である.

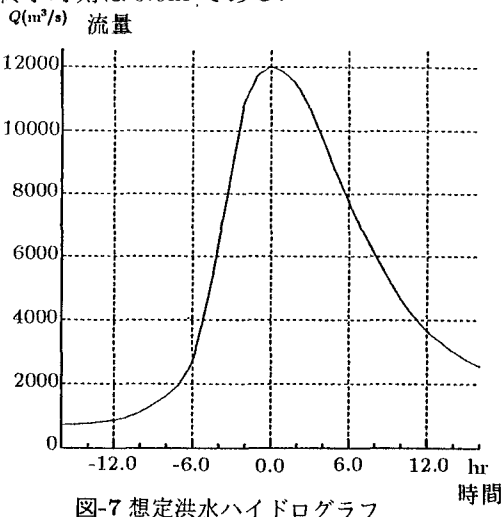


図-7 想定洪水ハイドログラフ

破堤位置は, 氾濫水が「梅田」地下街へ到達して地下街に流入することを念頭におき, 図-1 中の A~F の 100m 毎に離れた 6 点を破堤点に選定した. 破堤条件として, 破堤幅は 100m, 破堤敷高は堤内地地盤高より 3m 高い位置に設定した.

地下街の氾濫解析において, 計算時間間隔は  $\Delta t = 0.05$  秒である. 計算時間は, 地上部の氾濫水が地下空間を含む領域に到達する破堤後 30 分 (0.5hr) から地上部の計算終了時刻 (6.0hr) までの 5 時間 30 分とした. リンクの分割格子長は  $\Delta x_l = 3\text{m}$  程度となるように設定している. 一つのリンクでは通路幅は一定とし, 天井高はすべてのリンクおよび住区で 3m, ノードの天井高は, 上層につながる階段部分が含まれるときはその上層までの高さとし, それ以外の箇所では 3m とした.

(1) 式中の  $a$  の値に関しては, 渡辺ら<sup>7)</sup>らが指摘しているように, 下水道管内の流れにおいては, 経験的な値として  $a = 20 \sim 50\text{m/s}$  が用いられている. ここでは, この値を参考に  $a$  の値を変化させた試計算を実施したところ, 満管時の地下の異層間の圧力水頭が不連続にならない条件を満たす  $a$  は  $a = 10\text{m/s}$  となった. なお,  $a$  すなわちスロット幅の合理的な設定法は今後の検討課題である.

### (2) 計算結果とその考察

地上部の氾濫計算において, 破堤点を種々変化させて行った計算 (ただし, 一計算では一破堤点しか考えていない) 結果より, 破堤から計算終了時刻までの 6 時間の, 淀川からの総流入量, 地上部の氾濫水量および地下街への流入量を想定破堤点毎に示したものが図-8 である. この図より, 淀川からの総流入量の約半量が地下空間へ流入することがわかる. また地下街への流入量を最大とする破堤点は C と考えられる. 破堤点 C における地上部の浸水分布の時間変化を示したものが図-9 である. 時刻 1.0hr 以降, 浸水深 1.5m 以上の区域が破堤点から南に伸び, 地下街の北端に通じている. なお紙面の都合でここでは示さなかったが, 地下空間への氾濫水の流入量の時間変化を調べたところ, 時刻 2.0hr 頃が最大であった.

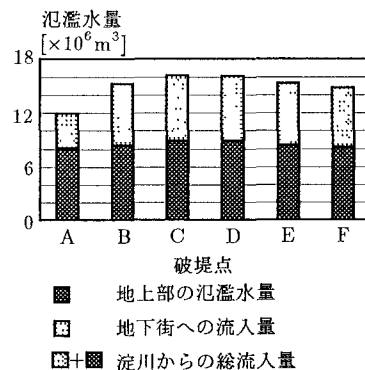


図-8 破堤後 6 時間の総流入量

地下街の氾濫の拡がりの時間変化を示したものが図-10、図-10に示すいくつかの代表地点での浸水深の時間変化を表したものが図-11である。地下街の北端に位置する商店街 A では、時刻 1.0hr 頃から急激に浸水深が増大し、3m の天井高に達した後 B2F が満管状態となる。その影響は即座に B1F に及び、B1F が満管状態となる。図-11 には、参考までにスロットモデルを用いずに開水路状態のみを想定して行った計算

結果もあわせて掲載しているが、B1F の浸水深に大きな差が生じている。一方、商店街 A 以外では、浸水深は天井に達することはないものの時刻 1.0hr を過ぎた頃から急速に水深が増大し、最大時に 1.5m 以上に上る。また、1.5hr から 6.0hr (計算時間終了時刻) にわたってその値は大きく変化しない。

以上の結果より地下空間においては、地下空間そのものの容積がさほど大きくないために、一旦氾濫水が

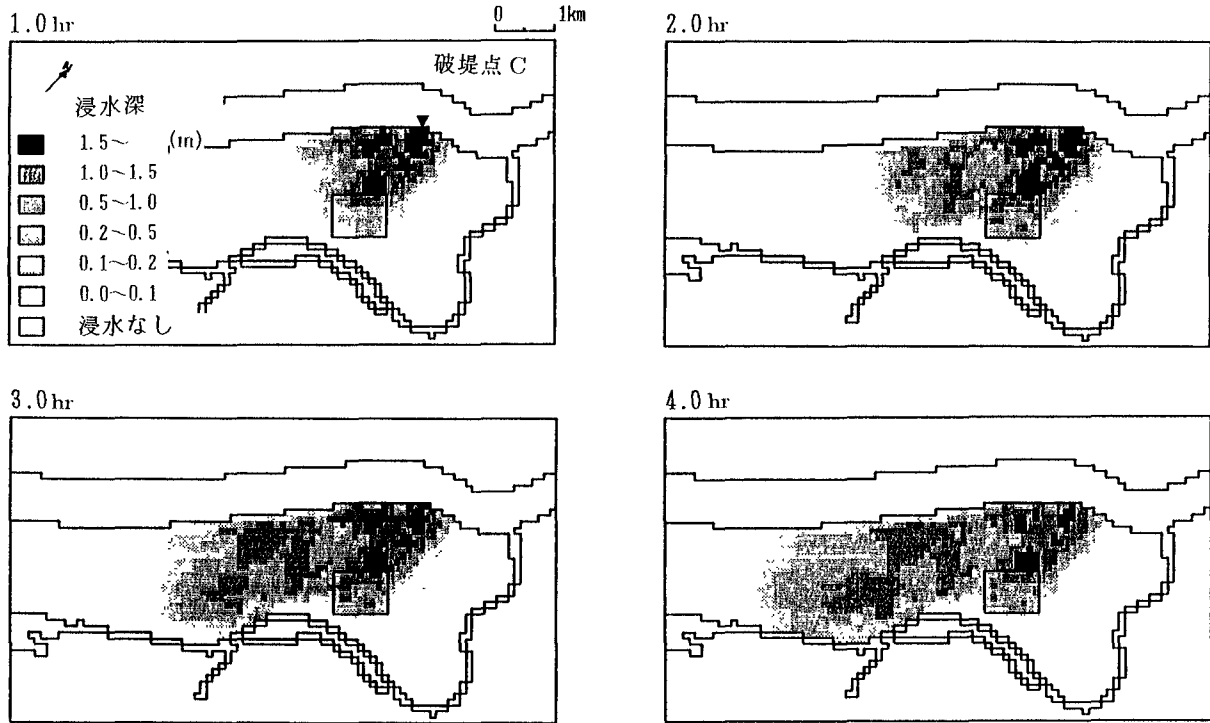


図-9 地上部の氾濫水の拡がり

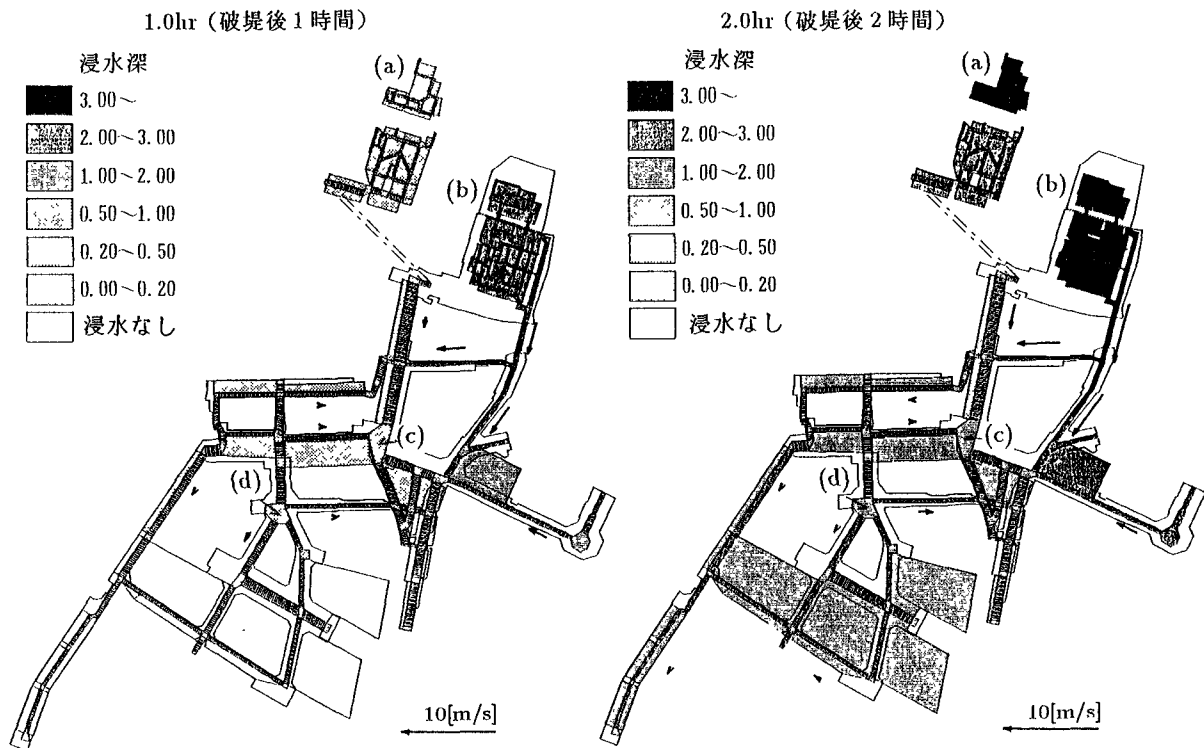


図-10 地下街の氾濫水の拡がり

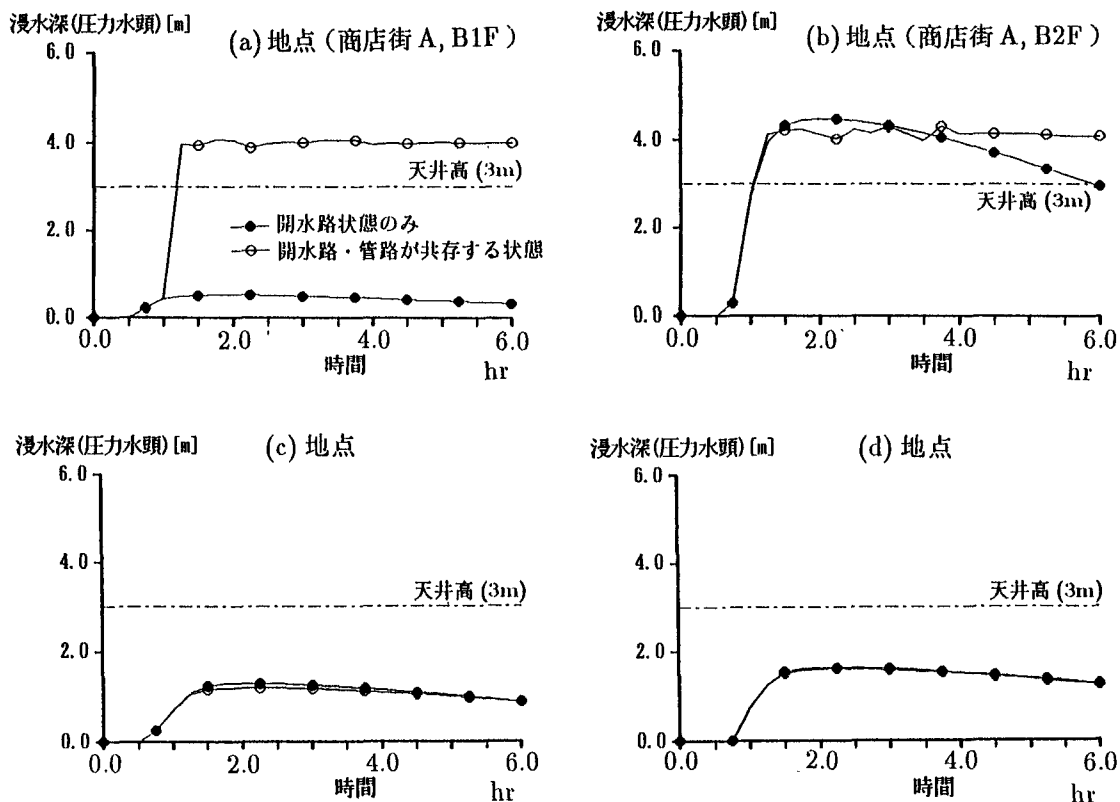


図-11 地下街の浸水深の時間変化

流入してくると浸水深は急激に増大する傾向にあることが確認された。浸水深 1m 以上の状況下で、しかも複雑な地下空間での避難は現実には困難であり、現在のところ一般に危機意識の乏しい地下街の氾濫浸水の危険性、重大性をこの結果からも窺い知ることができる。

## 5. 結言

本研究では、地下空間を有する場での氾濫解析を扱うにあたり、地上部の洪水氾濫解析においては平面二次元モデルを、地下空間の浸水解析においては一次元ネットワークモデルに地下街の天井高を考慮できるスロットモデルを組み込んだ数学モデルを開発するとともに、これを大阪市内の「梅田」地下街に適用した。その結果、予想され得る氾濫水の地下空間への浸水過程がこのモデルによって表現されることが知られた。

今後の課題としては、解析の条件設定として、外水氾濫より頻度の高い内水氾濫をも考慮すること、数値解析法として、スロットモデル中のスロット幅の合理的な設定法の検討、ならびに地上部と地下空間の解析の同時進行の計算方式の導入などが挙げられる。今後、解析手法に改善を加えモデルの精度向上に努めること、必要に応じて抽出部分模型を用いた水理実験を実施しモデルの妥当性を検証することとともに、得られた成果をもとに地下空間の浸水軽減策や避難誘導システムなどの防災対策の検討を進めていきたい。

## 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, pp.95-102, 1997.
- 3) 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文: 氾濫水の水利の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第 23 号 B-2, pp.305-317, 1980.
- 4) Iwasa, Y. and Inoue, K.: Numerical Effect of Non-linear Convective Terms on Two-dimensional Flood Flows Invasion Analysis, *Hydrosoft'84, Hydraulic Engineering Software*, Vol.2, pp.17-28, 1984.
- 5) 坂井広正, 林秀樹, 井上和也, 川池健司: 街路系を考慮した都市域の氾濫解析モデルの研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, pp.632-633, II, 1998.
- 6) Chaudhry, M.H.: *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold, pp.426-431, 1987.
- 7) 渡辺政広, 竹内明, 川裾利雄: 取付管の調圧効果を考慮した下水道管渠網の雨水流出モデル, 第 33 回水理講演会論文集, pp.157-162, 1989.

(1998.9.30 受付)