

大都市の地下空間の氾濫浸水シミュレーション

Numerical Simulation of Overland Flood Flow Intrusion into Underground Space in Urban Area

戸田圭一¹ ・ 井上和也² ・ 前田修³ ・ 谷野知伸⁴

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Osamu MAEDA and Tomonobu TANINO

This paper treats a numerical simulation 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. The effect of flash-board of stairs entrance is also discussed.

「Key Words」 numerical simulation, inundation flow, urban area, underground space, Umeda

1. 緒言

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が、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。現に1999年6月福岡市においては、市内を流れる御笠川が氾濫し、氾濫水がビルの地下空間や地下街に侵入し、多くの被害をもたらすとともに、ビルの地下に位置する飲食店の従業員が水没した店から逃げ遅れて水死するという痛ましい事故までも発生した。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、大河川の破堤による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従来の研究としては高橋ら¹⁾および著者ら²⁾の研究が挙げられるが、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。ここでは複雑に入り組んだ地下空間を対象として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。さらに浸水対策として、地上から地下空間に通じる入口すべてに止水板を設置した場合の計算を実施し、その効果についても検討を加えている。

2. 対象領域

本研究の対象領域は、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いるが、「梅田」地下街もその例外ではない。

「キーワード」 数値解析、氾濫、都市域、地下空間、梅田

- | | | | | |
|---|-----|-------|---------|---------|
| 1 | 正会員 | Ph.D. | 京都大学助教授 | 防災研究所 |
| 2 | 正会員 | 工博 | 京都大学教授 | 防災研究所 |
| 3 | 学生員 | | 京都大学大学院 | |
| 4 | 正会員 | 工修 | 日本道路公団 | 高松工事事務所 |

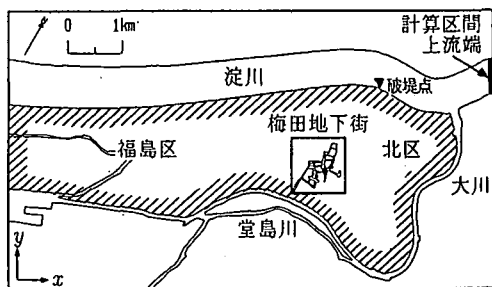


図-1 地上部対象領域

3. 数値解析手法

3.1 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³⁾の考え方を適用し、差分法はIwasa and Inoueら⁴⁾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)に示す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⁵⁾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⁶⁾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述べる。

3.2 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⁶⁾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

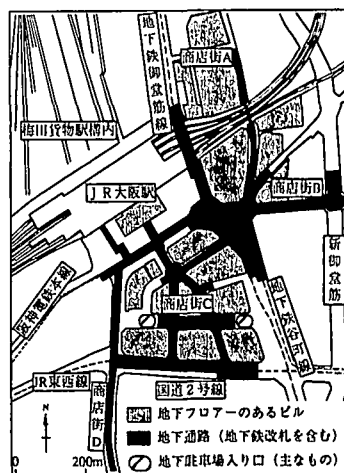


図-2(1) 地下街対象領域 (平面図)

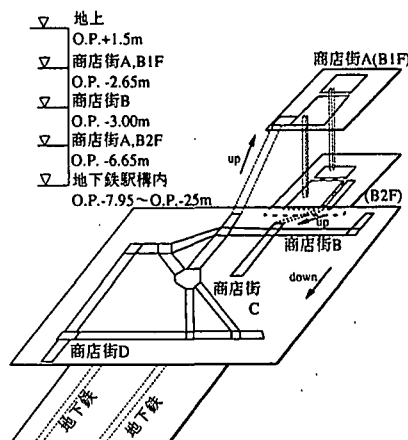


図-2(2) 地下街対象領域 (立体図)

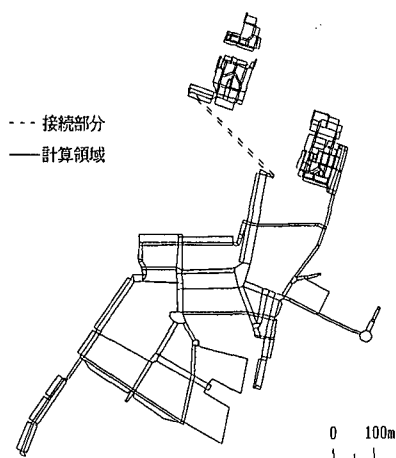


図-3 地下街計算領域

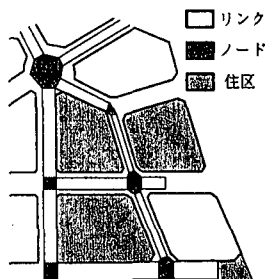


図-4 ネットワークモデル

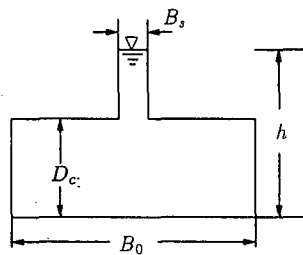


図-5 スロットモデル

は次式で表現される。

連続式

運動量式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_l} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{\Delta x_l} \quad B_l = \begin{cases} B_0 : (h < D) \\ B_s : (h \geq D) \end{cases} \quad (2) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 \frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \quad (3)$$

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、 Δx_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、運動量式は、

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

であり、ここに、 h_b :接面(リンクとノード、あるいはリンクと住区が接する面)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 :リンクとノード、あるいはリンクと住区の間隔距離である。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

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

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。

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

ここに B_{sdi} 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。なお解析手法の詳細は、文献 7) を参照されたい。

3.3 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¹⁾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、 μ_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

4.1 計算条件

地上部の氾濫解析では計算格子を $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ 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-6 に示すピーク流量 $12,000\text{m}^3/\text{s}$ の想定洪水ハイドログラフ (ケース 1) およびその 5/8 の量のハイドログラフ (ケース 2) の 2 つのケースを境界条件として与えた。計算時間間隔は $\Delta t = 5$ 秒で、計算開始時刻は想定洪水ハイドログラフのピークの 3 時間前とし、全計算時間は 9 時間とした。破堤は、ハイドログラフのピーク時に発生するとし、その時刻を 0.0hr と定めた。よって計算開始時刻は -3.0hr、同終了時刻は 6.0hr である。

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▼の点を破堤点に選定した。破堤条件として、破堤幅は 100m、破堤敷高は堤内地盤高より 3m 高い位置に設定した。また、浸水対策による効果を算定するために、地上部と地下街との接続部分である地下街入口すべてに図-7 に示すような 0.5m の止水板が設置された場合も計算ケースに含めた。

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 α の値に関しては、渡辺ら⁸⁾ 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 $\alpha = 20 \sim 50\text{m/s}$ が用いられている。ここでは、この値を参考に α の値を変化させた試計算を実施し、満管時の地下の異層間の圧力水頭が不連続にならないとの条件から $\alpha = 10\text{m/s}$ を用いた。

4.2 計算結果とその考察

(a) ケース 1

ケース 1 のハイドログラフを与えた地上部の氾濫計算において、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浸水対策がある場合とない場合とで示した結果が図-8 である。この図より、浸水対策がなされない場合には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、地下空間への氾濫水の流入流量の時間変化を示した結果が図-9 であり、時刻 2.0hr 頃が最大であることがわかる。図-8、図-9 より、ケース 1 においては止水板による氾濫水浸入抑制効果は約 20% ほどである。

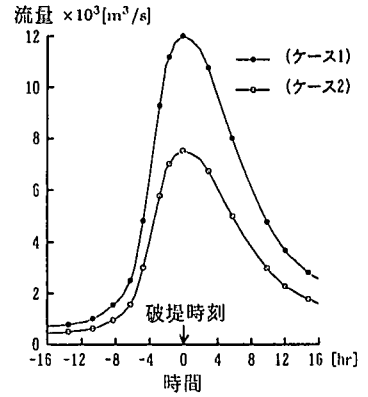


図-6 想定洪水ハイドログラフ

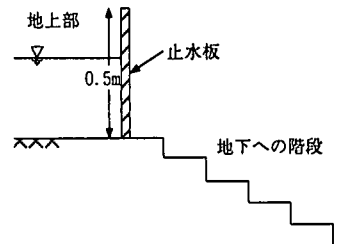


図-7 止水板の概念図

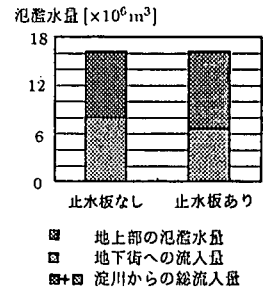


図-8 破堤後 6 時間の総流入量

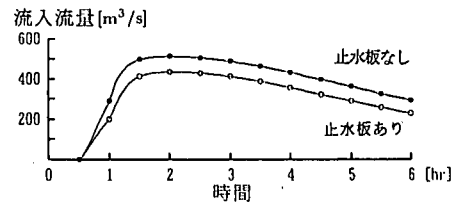


図-9 地下街への流入流量

浸水対策が施されていない場合の地上部の浸水深分布の時間変化を示したものが図-10である。図-10から、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ことがよみとれる。

次に、地下街の氾濫の拡がりの時間変化を示したものが図-11である。浸水対策の有無による浸水深の分布を比較すると、浸水深の分布はほぼ同様であるが時刻1.5hrにおいて商店街C、Dの一部分ではわずかながら止水板により浸水深が低下していることがわかる。しかし、浸水対策の有無に関わらず時刻1.5hrにおいて全ての場所で浸水深が0.5m以上に達し、時刻2.5hrにおいては地下街のほとんどで浸水深が1m以上となっており、このようなケースの大規模な洪水氾濫に対しては止水板による浸水対策は効果を発揮しえないと言えよう。

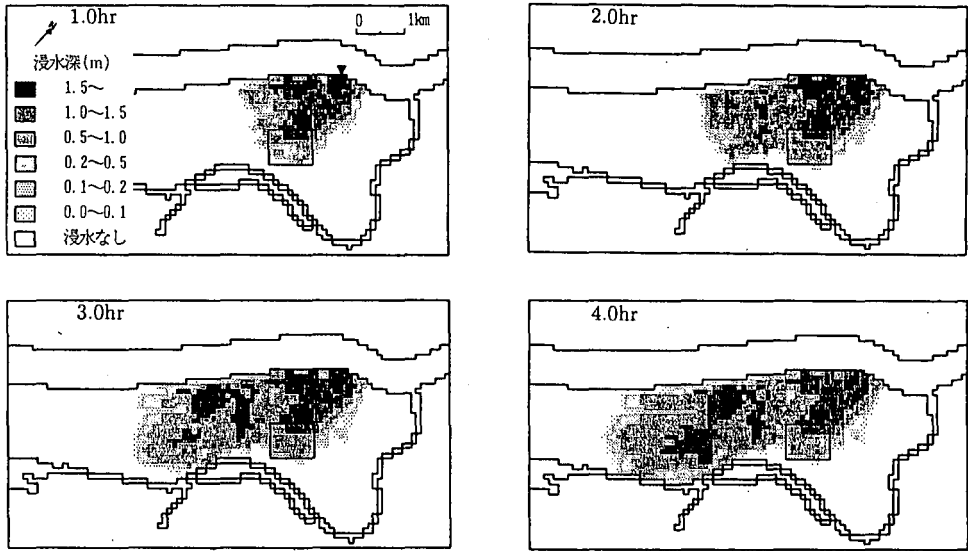


図-10 地上部の氾濫水の拡がり (止水板なし)

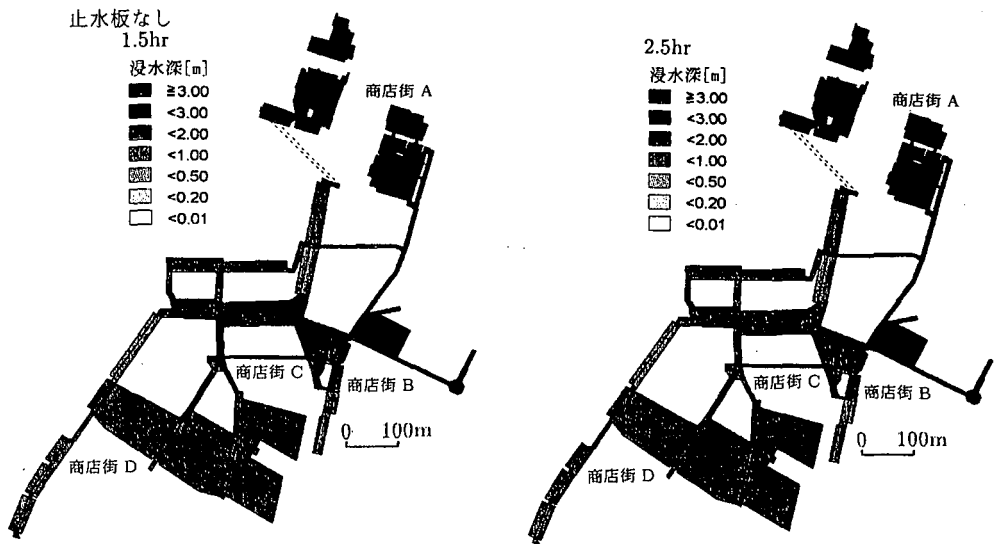


図-11(1) 地下街の氾濫水の拡がり (止水板なし)

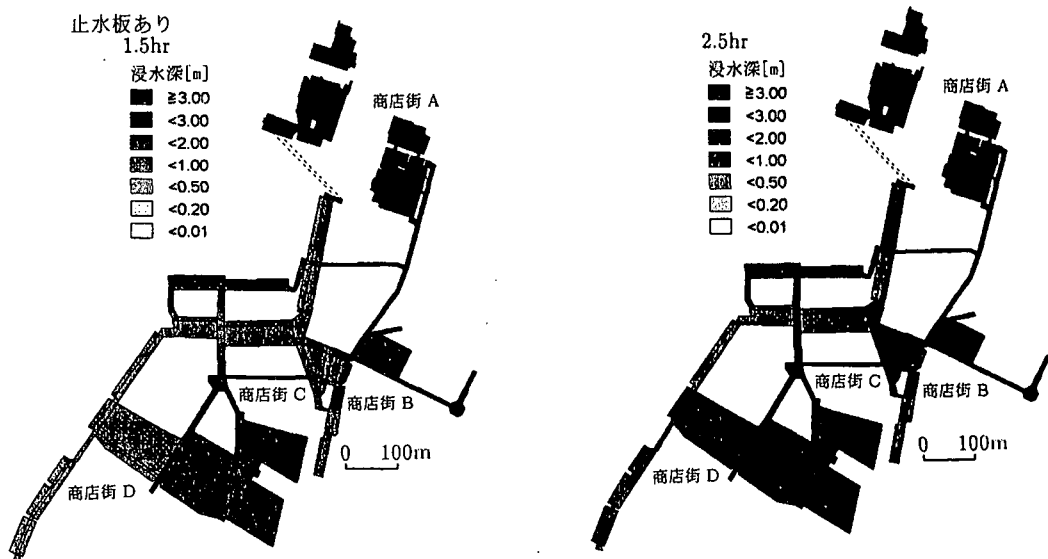


図-11(2) 地下街の氾濫水の拡がり(止水板あり)

(b) ケース 2

ケース 2 において、破堤から計算終了時刻までの 6 時間の、地上部の氾濫水量および地下街への流入量を浸水対策がある場合とない場合とで比較したものが図-12 である。この図より、浸水対策がなされない場合にはケース 1 と同様に淀川からの総氾濫水量の約半量が地下空間へ流入するが、止水板を設置した場合には地下街への流入量の約 1/3 の量を削減することができることがわかる。また、地下空間への氾濫水の流入流量の時間変化を示したのが図-13 である。地下への氾濫水の流入が始まると急激に流入流量は増大する傾向はケース 1 と同様であるが、流入流量がピークとなるのは 2.5hr 頃である。また、止水板が設置された場合の流入流量のピークは 2/3 程度に低減している。

止水板が設置されていない場合について地上部の浸水分布の時間変化を示したものが図-14 であるが、淀川からの総流入量がケース 1 の約 30 % 程度にまで減少しているため、ケース 1 の場合よりも浸水深が全般的に低下している。

地下街の氾濫の拡がりの時間変化を示したものが図-15、図-15 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-16 である。止水板を設置した場合の効果は、(a) 地点における浸水深の急激に増加する時間の大幅な遅れに現れている。また、(c)(d) 地点においては浸水深の若干の減少がみられる。しかしながら、商店街 A の B2F に位置する (b) 地点では時刻 1.5hr において天井高の 3m まで浸水深が達している。商店街 A の B2F は、商店街 A が淀川の破堤点に近く氾濫水が直接おしよせてくること、商店街の地盤高がその他のフロアよりも低いことから氾濫水が集まりやすい状況にあり、このように浸水深を増加させる要因を含む場所においては、浸水対策の効果을期待することはできない。また、それ以外の場所においても時刻 2.5hr には避難に支障をきたすと考えられる 50cm 以上の浸水深の箇所が多く見られる。止水板の効果を過度に期待することはできないようである。

以上の結果より、洪水氾濫の規模に応じては、一部、止水板の設置による地下空間の浸水対策の効果を確認するものの、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浸水深の増加は地上よりも急激であり、今回のような外水氾濫という外力条件に対しては、止水板による浸水対策にも自ずと限界があることが知られた。よって、止水板の設置のようなハードな対策だけでなく、情報伝達システムや避難・誘導システムといったソフトな対策の確立も大変重要となつてこよう。

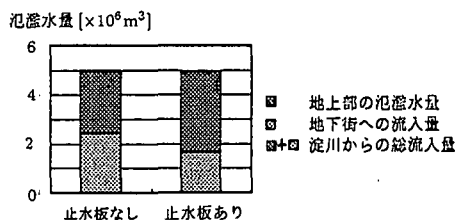


図-12 破堤後 6 時間の総流入量

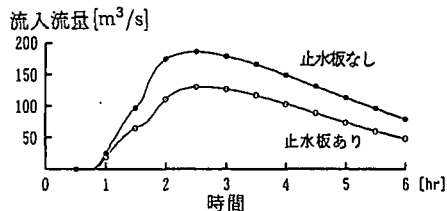


図-13 地下街への流入流量

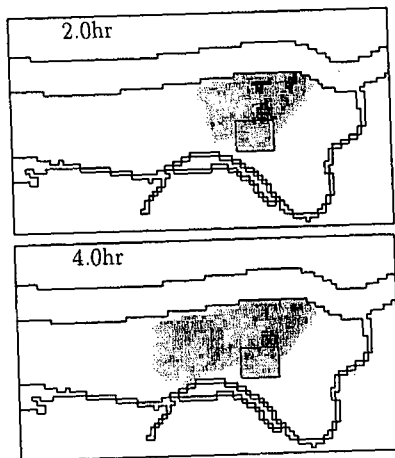
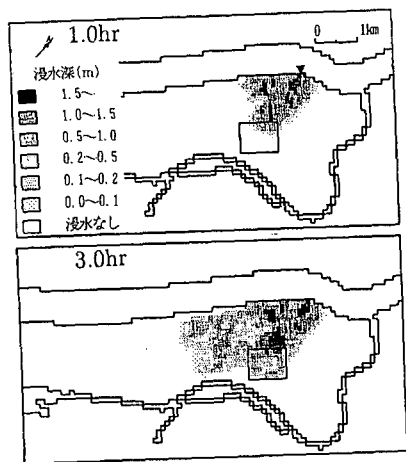


図-14 地上部の氾濫水の拡がり (止水板なし)

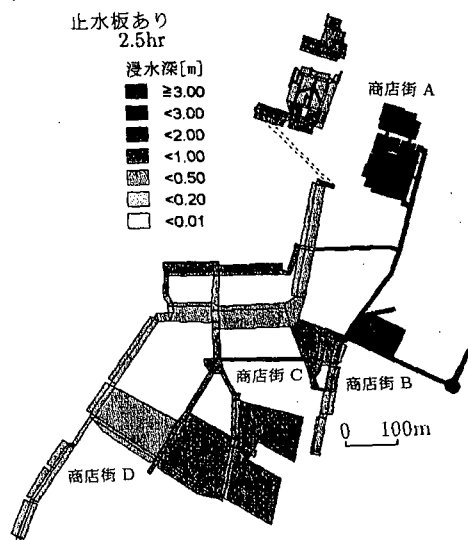
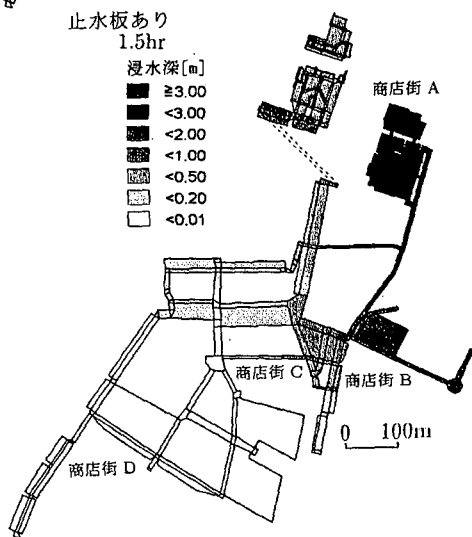
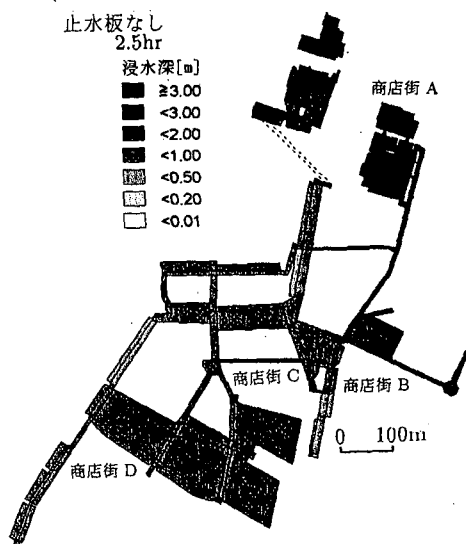
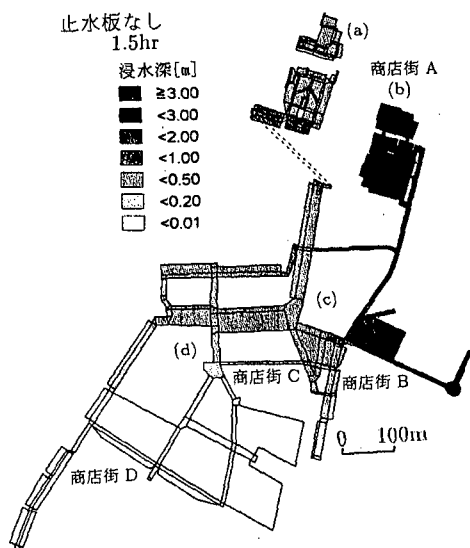


図-15 地下街の氾濫水の拡がり

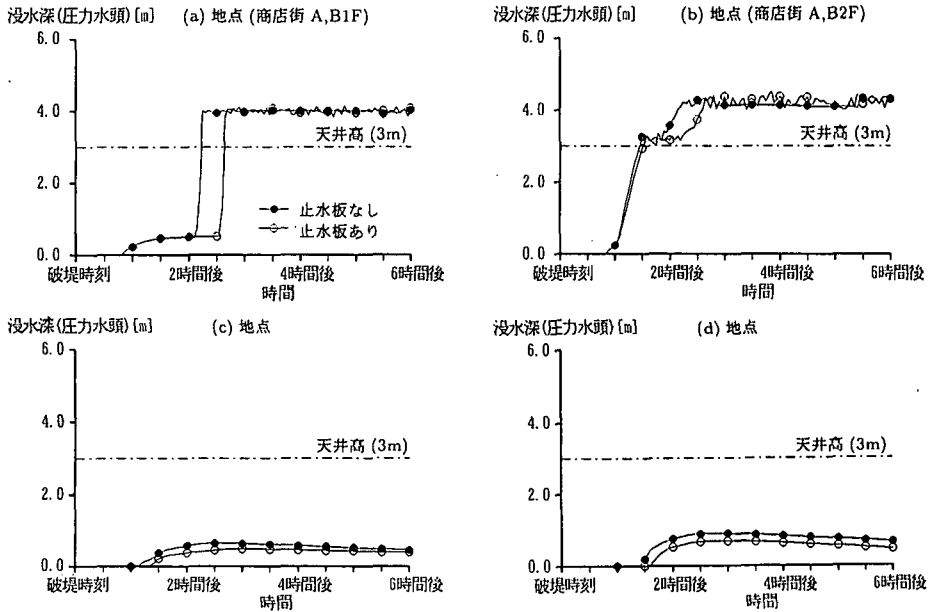


図-16 地下街の浸水深の時間変化

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。また、浸水対策として止水板を設置した場合をも取り扱った。その結果、今回取り扱ったような大河川の破堤により生じる外水氾濫に対しては止水板の効果に限界があり、避難・誘導システムの整備といったソフトな対策もあわせて考えることが大変重要であることが知られた。

今後は氾濫水の地下への浸水解析結果に基づいて、洪水氾濫時の地下空間の適切な避難・誘導システムについて検討を加えていきたい。

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) 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.
- 6) Chaudhry, M.H.: *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold, pp.426-431, 1987.
- 7) 戸田圭一, 井上和也, 谷野知伸, 前田 修: 地下街の氾濫浸水解析, 京都大学防災研究所年報, 第41号 B-2, pp.313-323, 1998.
- 8) 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.