

地下街の氾濫浸水解析

戸田圭一・井上和也・谷野知伸*・前田 修**

* 日本道路公団

** 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本報は、大阪市北区の「梅田」地下街を対象として、地上部における洪水氾濫とその氾濫水の地下空間への浸水過程を解析したものである。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適用した。数値シミュレーションの結果、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。スロットモデルを用いた場合の計算精度の向上が今後の課題である。

キーワード：氾濫解析，地下空間，都市域，水防災，数値解析

1. 序論

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い。したがって必然的に、洪水や高潮などによる外水氾濫の潜在的な危険性が高い地域であるうえ、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、ひとたび河川堤防や防潮堤が決壊して洪水氾濫が発生すれば、地上での氾濫のみならず地下空間にまでもその影響が及び被害の拡大が懸念される。しかも、物的被害だけでなく、人々が危険性を認識していないことに起因する人的被害の拡大も予想される。

本報は人口、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、大阪市北区の「梅田」および「梅田地下街」を対象として、大水害時の地上部の氾濫にともなう地下空間の浸水解析を取り扱ったものである。この地域を選定した理由は、

- (1) 大阪市北区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) 台風と洪水の重量災害が発生した際に浸水の危険性が高い地域であること、
- (3) 地下街の形状が複雑に入り組んでおり、地下街へ流入した浸水の挙動を調べる上で興味深い場所であること、

による。

2. 従来の研究

2.1 地下空間への浸水に関する研究

地下空間への浸水に関する先駆的な研究としては、高橋らの研究が挙げられる。彼らはまず、地上から地下空間へ流入する流れを実験によって解析している。そして地下空間へ階段を通して流入する流量フラックス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、地上部と地下街とを並行的に解析できることを示した。また溝田は同様の手法を用い、大阪市北区堂島地下街を実例的にとり上げ解析を行った。この解析では高潮と洪水が重疊した

場合を想定し、地下街における浸水過程の水理特性、および地下街の浸水対策について評価を行っている。

彼らが取り扱った地下空間は形状が比較的単純なものであり、複雑な地下街には平面二次元モデルの適用が妥当かどうか検討の余地がある。また、彼らのモデルでは後述するような地下街の天井高の影響が考慮されていないという課題が残されている。

2.2 地下空間での浸入水の流動に関する研究

地下空間における浸入水の流動が地上部のそれと最も異なる点は、流れに自由表面を有する開水路流れの状態と、自由表面が地下空間の天井に着水した管路流れの状態が共存しうることである。

開水路流れと管路流れが、一つの流れの場に共存している非定常流の解析法に関しては、対象とする現象に応じて個々に研究が進められてきているが、それだけに、用いられる基礎式や解析法が研究ごとに異なっている。また、境界面の非定常な伝播の水理学的取扱いなどに検討すべき課題が多い。

細田らは、非圧縮性流体の仮定の下で、開水路・管路状態の境界面の伝播の取り扱いについて考察し、これを従来の非定常流解析法に組み込むことにより共存状態の基本的な解析モデルを作成した。彼らはこの解析法をモデル場に適用し、現象の再現可能性と実用性を検討している。

また鮎川らは、地下放水路における管路状態の非定常流の数値計算にスロットモデルを適用している。スロットモデルは、開水路の非定常流の支配方程式をそのまま管路状態にも適用できるため、開水路・管路状態が共存する流れを取り扱うには、実用性の観点からは有効な手段である。

本研究で対象としているような多層構造の地下空間では、地上からの氾濫水の流入が多い場合、両者の共存や遷移は十分考えられるため、そのどちらにも柔軟に対応できるモデル化が重要である。また、地下街の地形は複雑に入り組んでいるため、そのような場にも適用性が高いと思えるスロットモデルは、有効な手法の一つであると思われる。よって本研究では、このスロットモデルを用いて、開水路・管路状態が共存する流れも考慮した解析を行うことにする。

3. 数値シミュレーション手法

3.1 地上部の洪水氾濫シミュレーション

(1) 基礎方程式

地上部の洪水氾濫シミュレーションは、河道および地表の氾濫想定域を対象とした平面二次元モデルを用いている。氾濫水の鉛直運動が水平運動に比べて十分小さいと考え長波近似を行い、圧力に静水圧

分布を仮定することにより次式に示すような浅水長波の基礎式が適用可能である。なお、水平混合項は他の項と比較して無視できるとして省略する。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -\frac{Q}{\Delta x \Delta y} \quad (1)$$

< x 方向の運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

< y 方向の運動量式>

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここに、 t : 時間、 x, y : 二次元平面の座標軸、 h : 水深、 u, v : それぞれ x, y 方向の流速、 $\Delta x, \Delta y$: それぞれ x, y 方向の計算格子長、 M, N : それぞれ x, y 方向の流量フラックスで、 $M = uh, N = vh$ 、 Q : 計算格子から地下空間へ流入する氾濫水の流量、 H : 基準面から自由水面までの高さ、 ρ_w : 水の密度、 τ_{bx}, τ_{by} : それぞれ x, y 方向の水底面でのせん断応力、 g : 重力加速度である。

水底面での摩擦応力については、次式の Manning 則を用いる。

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \\ \tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 n は Manning の粗度係数である。今回の解析において粗度係数 n は、一般に用いられている値で、河道域では 0.03、氾濫域では 0.067 を採用した。

破堤点からの氾濫流入流量は、岩佐らの方法に準じる。すなわち、外水位を H_r 、堤防高を H_0 、堤内水位を H_f 、破堤長さを L としたとき、 $h_1 = H_r - H_0$ 、 $h_2 = H_f - H_0$ とすれば、 $H_r > H_f$ のときの越流量 Q_0 は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 \text{ のとき } & Q_0 = \mu L h_1 \sqrt{2gh_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 \text{ のとき } & Q_0 = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに μ および μ' は、完全越流および潜り越流時の流量係数で、長方形の堰の場合、それぞれ 0.35 及び 0.91 とされている。 $H_r < H_f$ のときに生ずる堤内地から堤外地へ逆越流する場合の流量にも上式を適用する。

地下街へ流入する流量 Q は高橋らの方法により、階段の入り口に設けられているステップを乗り越える水深を h 、階段の有効幅を B とするとき、次式で求められるとする。

$$Q = B\mu_0 h \sqrt{gh} \quad (6)$$

ここに μ_0 は段落ち流れの流量係数であり、高橋らの実験によれば、近似的に $\mu_0 = 0.8 \sim 1.0$ 程度の値をとるとされており、今回の解析では $\mu_0 = 0.91$ とする。

基礎方程式の離散化については、中川の方法に従って行う。運動量式の離散化は、時間に関しては前進差分、移流項には保存性と移動性をとを保つようにした第一次風上差分、圧力項には中心差分、底面摩擦項には Vasiliev の不安定を避けるため implicit な形にして中央差分を行う。連続式の離散化は、時間に関しては前進差分、空間に関しては中央差分を行う。

3.2 地下街の浸水シミュレーション

(1) 開水路状態のみを考慮した浸水シミュレーション

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、おもに通路の交差点で地上や階下層と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。したがって、氾濫水の流れは通路と平行な方向へ一次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、Fig.1 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て、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。

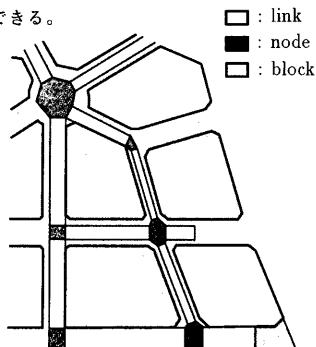


Fig.1 Schematic view of network model

本研究では以上の点を踏まえて、地下街の浸水シミュレーションを実施するにあたり Fig.1 に示すように地形をモデル化し、ネットワークを用いた一次元解析を行う。ここで地下通路を表すリンクは、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、以下に示される一次元の不定流計算と同様の式を用いることができる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q_{in}}{\Delta x_l} \quad (7)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 \frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \quad (8)$$

ここに、 h : 水深、 u : 流速、 Q : 流量、 H : 基準面から自由水面までの高さ、 n : マニングの粗度係数、 q_{in} : (住区からの) 横流入量、 Δx_l : リンクの格子長、 B : 水路幅、 A : 断面積、 R : 径深、 g : 重力加速度である。

リンクの境界となる部分、すなわちリンクとノード、リンクと住区の取り扱いは、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>

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA_b \frac{DH}{DX} - gn_b^2 \frac{|Q|Q}{h_b^{4/3}A_b} \quad (9)$$

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部分を指す。ここで、中心間距離 DX とは Fig.2 に示すように、

リンクとノードの場合、

$$DX = DN + \Delta x_l / 2 \quad (10)$$

リンクと住区の場合、

$$DX = DJ + B/2 \quad (11)$$

とする。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を表す。

また接面で定義される水深 h_b と断面積 A_b は、Fig.2 より

リンクとノードの場合、

$$h_b = \frac{DN \times h_l + \Delta x_l / 2 \times h_n}{DX} \quad (12)$$

$$A_b = B \times h_b \quad (13)$$

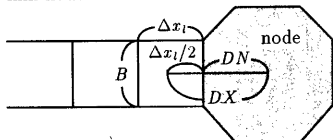
リンクと住区の場合、

$$h_b = \frac{DJ \times h_l + B/2 \times h_j}{DX} \quad (14)$$

$$A_b = \Delta x_l \times h_b \quad (15)$$

と定める。ただし h_l , h_n , h_j はリンク, ノード, 住区の水深を表す。

link-node



link-block

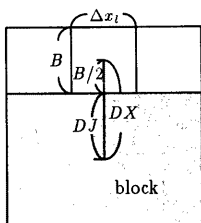


Fig.2 Treatment of link-node and link-block

また、ノードと住区における運動量の取り扱いにもこの式を適用し、Fig.3より DX , h_b , A_b は、それぞれ次式で与えられる。

$$DX = DN' + DJ' \quad (16)$$

$$h_b = \frac{DJ' \times h_n + DN' \times h_j}{DX} \quad (17)$$

$$A_b = B_{nj} \times h_b \quad (18)$$

ただし、 B_{nj} はノードと住区の接辺の長さを表す。

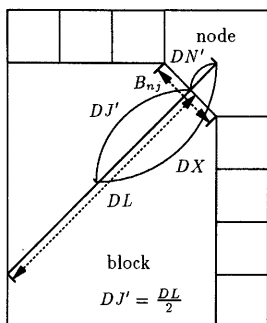


Fig.3 Treatment of node-block

次にノード、住区の水深の算定法について説明する。運動量式より、ノード、住区に出入りする流量が求まるから、連続式は以下ようになる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m Q_i \quad (19)$$

ここに、 A : ノードまたは住区の面積, Q_i : ノード、住区が有する i 番目の界面から出入りする流量, m : 流量の出入りが行われる界面数である。

これらの式の離散化については、平面二次元解析の場合と同様である。

(2) 開水路・管路状態が共存する浸水シミュレーション

本研究では、開水路状態と管路状態の共存や遷移を解析する方法として、スロットモデルを用いる。

スロットモデルを概念的に示したのがFig.4である。スロットモデルは開水路・管路状態を同じ支配方程式で取り扱うもので、管路の頂部に幅 B_s の仮想的なスロットをとりつけ、管路の流れを開水路の流れとして計算する方法である。このような考え方によれば、管の高さ D より h が小さいときには h をそのまま水深と考えて、逆に D より h が大きいときには h を圧力水頭(ピエゾ水頭)とみなすことができる。また、このモデルによれば、運動量式は開水路の場合も管路の場合も同一であり、連続式は水路幅 B の値を h の大小によって、

$$B = \begin{cases} \text{水路幅: } (h < D) \\ B_s: (h \geq D) \end{cases} \quad (20)$$

ととれば、リンクについて基礎式(7)、(8)をそのまま用いることができる。

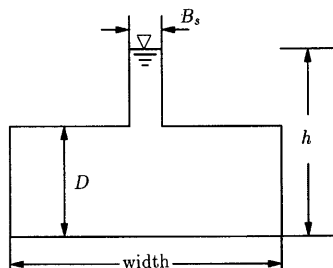


Fig.4 Schematic view of slot model

仮想スロットの幅 B_s は、一般に用いられている次式によって求めることにする。

$$B_s = \frac{gA_o}{a^2} \quad (21)$$

ここに、 A_o は断面積、 a は管路状態の場合の疎密波の伝播速度であるが、ここでは下水道における渡辺らの研究成果より $a = 10$ [m/s] とする。

スロットモデルにおける運動量式は開水路の場合と同じであるから、リンカーノード間、リンカー住区間、ノード・住区間における運動量式は、スロットモデルにおいても開水路と同じ式をそのまま用いることができる。なお、ノード、住区における連続式はFig.5に示すように、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>

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m Q_i$$

ただし、

$$A = \begin{cases} \text{ノード、住区の面積：} & (h < D_c) \\ A_s : & (h \geq D_c) \end{cases} \quad (22)$$

であり、 D_c はノード、住区の天井高を表す。

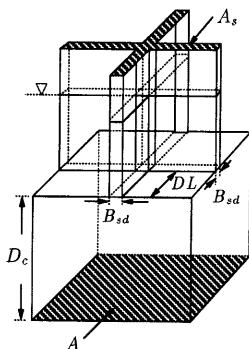


Fig.5 Slot at node or block

A_s は、ノード、住区が接面を有するとき、まずその接面の断面積に対するスロット幅を求め、その幅に接面からノード、住区の圆心位置までの距離を乗じ、もし接面が複数ある場合にはそれらを合計し、その結果得られる値を A_s とする。以上を式でまとめると式 (23) のようになる。

$$A_s = \sum_{i=1}^m B_{sd,i} DL_i \quad (23)$$

$B_{sd,i}$ は接面の断面積に対するスロット幅、 DL_i は圆心から接面までの距離である。

なお、離散化は開水路のみの場合と同様に行う。

(3) 境界条件の取り扱い

地上部から地下街へ氾濫水が流入するという境界条件は、先にも述べたとおり式 (6) より求めた流量 Q として表される。ただし、本研究では地上部においては平面二次元流れ、地下街においては一次元ネットワークによる解析法を用いているため、地上部と地下街の接続には注意を要する。

ここでは、まず階段が含まれる格子においてそれぞれ Q を求め、その格子に対応するノードに Q を与える。 Q はノードの水深のみに寄与するように、すなわち流入流量 Q は地下街においては連続式のみで考えられるものとする。

地下街からの流出という境界条件には、地下鉄駅構内へ落ち込む流量を与える。つまり、ネットワークを構成している地下街平面において、地下鉄駅の改札口には住区を設定し、住区の水深から地下鉄駅構内へ流出する流量を求める。ただし、このときの流出流量の算定にも式 (6) を用いることとする。これは地上部から地下街への場合と同様に、改札口から駅構内への連絡口が主に階段やエスカレーターであるため、浸水深に応じて有効幅が変化し、それにより流出流量が決まると考えられるからである。また地下街平面そのものが多層（地下1階と同2階のように）となっているところにも式 (6) を適用し、上層の住区から下層のノードに接続のための流量を与えている。

層的に最下部に位置する地下鉄構内は水槽と見なし、地下街からの流入水をそのまま貯留するだけの機能と考え、地下鉄線路沿いの氾濫水の伝播までは、ここでは考えないことにする。

4. 大阪市北区および梅田地下街への適用

4.1 計算領域の概要

地上部氾濫解析の対象は、大阪市北部域で北に淀川、南に堂島川、東に大川をそれぞれ境界とする領域である。この領域は、原点を東経 $135^\circ 22' 30''$ 、北緯 $34^\circ 40' 00''$ にとり、この点を中心に時計回りに 30° 回転させた地形図において縦5km横9km四方の領域に含まれている。ここで、地形図を 30° 回転させて対象領域をとったのは、氾濫解析においてデカルト座標系を用いており、解析手法の特性上、淀川を座標軸とほぼ平行にとる必要があるからである。以上のようにして定められた地上部の対象領域図を、Fig.6に示す。

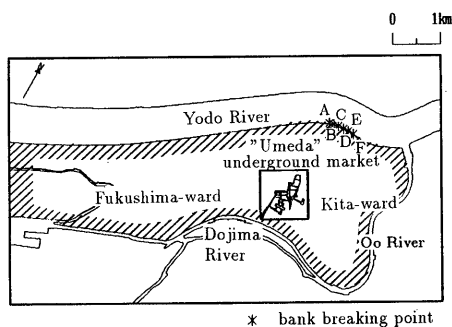


Fig.6 Studied area on the ground

次に、地下街の浸水解析では、Fig.7に示すように阪急三番街、ホワイティうめだ、ディアモール大阪、堂島地下街、地下鉄御堂筋線梅田駅、地下鉄谷町線東梅田駅、地下鉄四ツ橋線西梅田駅、阪神梅田駅、JR北新地駅、およびこれらに隣接するビルの地下フロアーを対象とする。

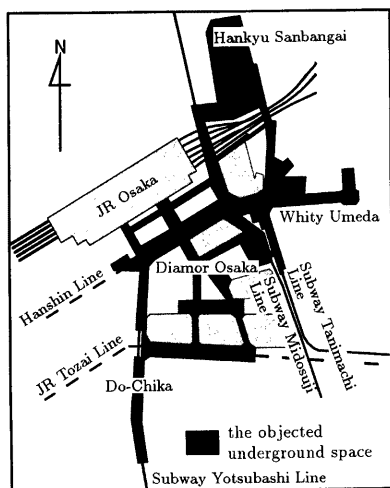


Fig.7 Studied area in the underground space

地上部氾濫解析の対象領域からみた地下街の位置はFig.6に示されている。地下街のうち今回計算対象とした領域を示したのが、Fig.8である。

地下街は、一般に空間利用をより高度化するため、複雑に入り組んだ状態になっている。「梅田」地下街においても例外ではなく、Fig.9に示すように、おも

にディアモール大阪、ホワイティうめだなどが位置する地下1階平面を基準にして、さらにそれがホワイティうめだ側では阪急三番街B2Fへ、ディアモール大阪側では地下鉄御堂筋線梅田駅の改札口を介して阪急三番街B1Fへと接続する複雑な形状である。また、さらに下層には地下鉄路線が存在し、地下街が階段を介して地下鉄構内へ接続している。この複雑に入り組んだ地下街路網と多層の地下構造が、今回対象とした地下街の最大の特徴である。

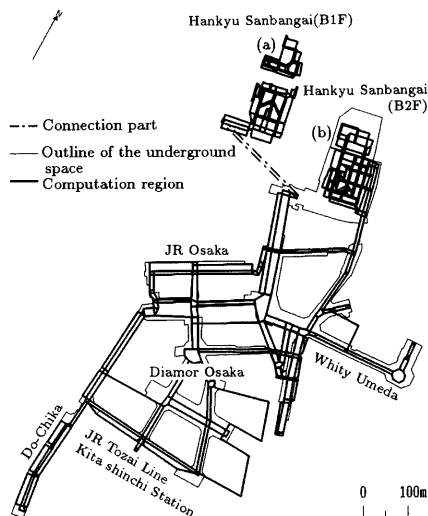


Fig.8 Computation region in the underground space

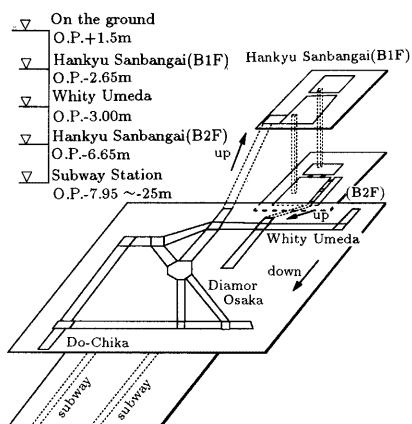


Fig.9 Structure of underground space

4.2 計算条件

地上部の氾濫解析では、 $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ にとり、氾濫計算の対象域を x 方向に90、 y 方向に50のメッシュに分割した。そして淀川の堤防が決壊することを想定し、計算区間上流端、すなわち毛馬地点においてFig.10の想定洪水ハイドログラフを境界条件として与えた。

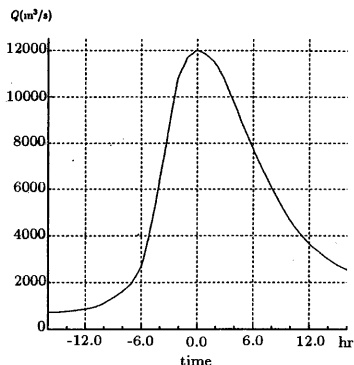


Fig.10 Assumed flood hydrograph

計算時間は $\Delta t = 5$ 秒で、全計算時間は9時間、破堤は最初の3時間計算を行ったときとし、その後の6時間で氾濫計算を行った。ここでは計算開始時刻を-3.0hr、破堤時刻を0.0hr、計算終了時刻を6.0hrと定めた。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、Fig.6に示されるA～Fの100m毎に離れた点を破堤点に想定した。破堤条件として、破堤幅は100m、破堤数高は堤内地地盤高より3m高く設定した。地下街への流出については、地下街へ通じる階段を含む格子において、3.1で示した階段部の取り扱いによって地下街への流出流量を計算した。

地下街への浸水過程は、地上部の氾濫解析における地下街への流入流量を境界条件に与えて解析した。具体的には、地上部からの流入流量は、流入口に最も近いノードに与え、阪急三番街B1FからB2Fや、地下街から地下鉄構内への流出は、上層階では階段に最も近い住区から流出することとし、下層階では階段に最も近いノードへ流入するものとした。上層階からの流入流量は、地上から地下街へ流入する流量を決定したのと同じ段落ちの式を用いて計算した。

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。時間間隔は $\Delta t = 0.05$ 秒である。リンクの分割格子長は、

$\Delta x_i = 3\text{m}$ 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層までの高さ、それ以外では3mとした。

4.3 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、各破堤点における地下街への流入流量をFig.11に、計算終了時刻の破堤後6時間の淀川からの氾濫水量、地上部の氾濫水量および地下街への流入量をFig.12に示す。

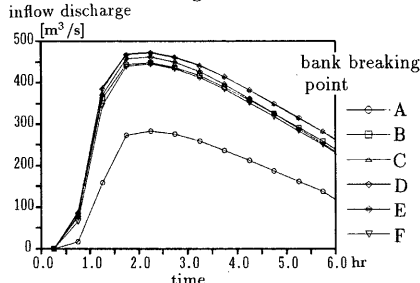


Fig.11 Inflow discharge into underground space inundation water volume

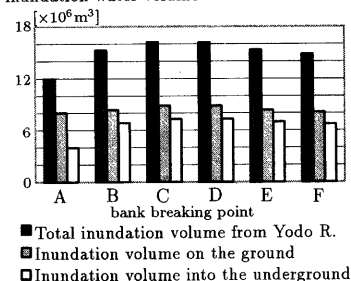


Fig.12 Inundation water volume for 6 hours

Fig.11、Fig.12より、破堤点Aより西で破堤した場合、地下街への流入量は破堤点Aの場合よりさらに減少することが予想される。また、破堤点Bより東で破堤した場合、破堤点Cの場合を最大として、破堤点が東に移行するにつれて氾濫水量が僅かずつではあるが減少している。これより、破堤点Fより東で破堤した場合もほぼ同様の傾向を示すと考えられる。以上から、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Fig.13である。以下に示す地下街の解析では、破堤点Cの場合を対象とすることとする。

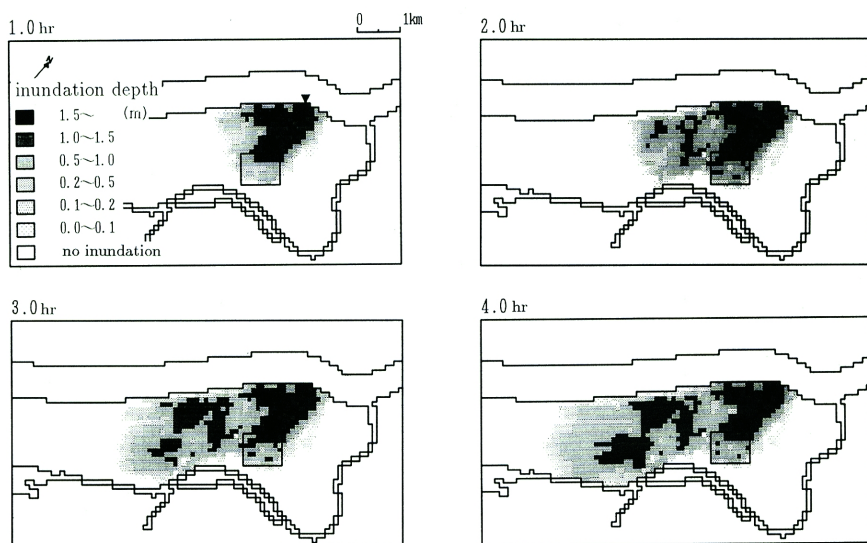


Fig.13 Computational results on the ground (temporal change)

2 hours after bank collapse

2 hours after bank collapse

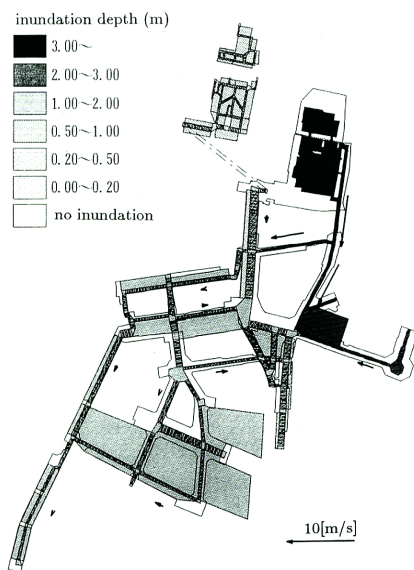


Fig.14 Computational results in the underground space considering only free-surface flow condition

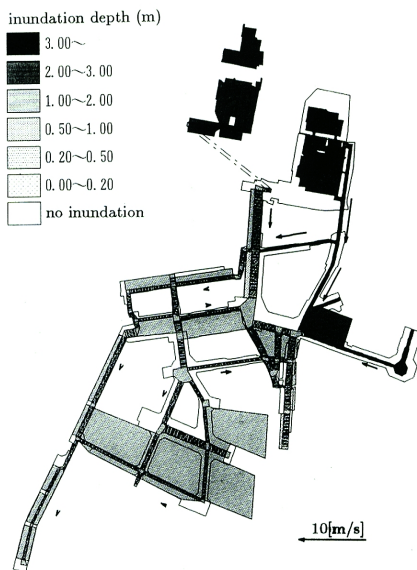


Fig.15 Computational results in the underground space considering free-surface and pressurized flow condition

地下街の解析結果のうち、まず開水路流れのみを想定した場合、地下街への流入流量が最大となる破堤後2時間(2.0hr)における浸水状況を示したものがFig.14である。実際の地下街の天井高は3m程度であるから、ここでは一部管路流れが生じているとみなされる。そこでスロットモデルを導入して、開水路・管路流れの共存およびそれらの遷移状態をも考慮した解析を行った結果がFig.15である。

Fig.14とFig.15を比較すると、天井高を考慮することにより、Fig.15において阪急三番街B2Fの影響がB1Fに及び、B1Fの浸水深が上昇することがみられる。これをもう少し詳しくみるために、阪急三番街B1F、B2Fにおける地点(それぞれ(a)地点(b)地点とする)でのハイドログラフを、Fig.16に示す。

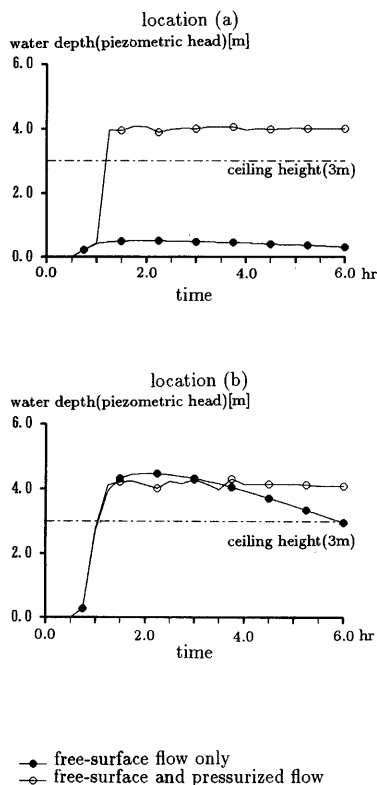


Fig.16 Temporal change of inundation flow depth

淀川堤防破堤後1時間で(b)地点(B2F)での浸水深が3mとなり管路流れへと遷移しており、その影響を受けて(b)地点が満管状態になった直後から(a)地点の浸水深が急激に増加している。

最後に、スロットモデルを導入した場合の浸水深の時間変化を、破堤後4時間(4.0hr)までFig.17に示す。時刻2.0hr以降は、阪急三番街B1F南館を除いて浸水深の分布に変化がほとんどないことがうかがえる。

これらの結果は全体的にみれば、地下街が浸水し、そこが一部満管状態になった場合に生じるであろうと予想される現象をほぼ表しているといえよう。

5. 結論

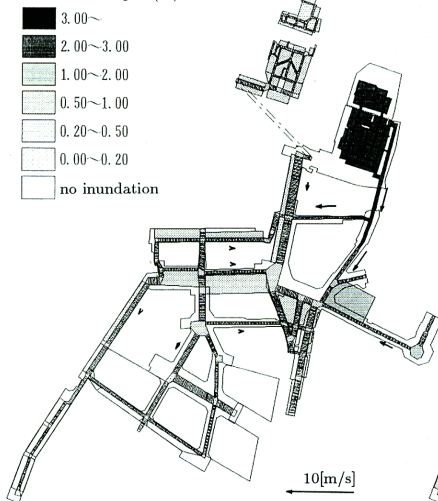
本研究では地下空間を有する場での氾濫解析を対象にし、地上部では平面二次元モデルを、地下空間においては一次元ネットワークモデルをそれぞれ適用し、それらを地下への流入箇所(具体的には地下への階段など)で結合するという手法を展開するとともに、大阪市北区梅田地区を例にとって浸水過程の考察を行った。本研究によって得られた主要な結果は、以下のとおりである。

1. 地上部を含めた多層構造の対象領域における氾濫解析に対して、各層間の境界条件として接続部分に段落ち流れを考えることにより、各層の接続を可能にした。
2. 地下街の氾濫解析において、一次元ネットワークモデルを適用することにより、複雑な地下街路の平面構造およびそこを通過する流れをモデル化することができた。
3. スロットモデルを導入することで、地下街の天井高を考慮した場合の開水路流れと管路流れとが混在した浸水解析を行うことができた。

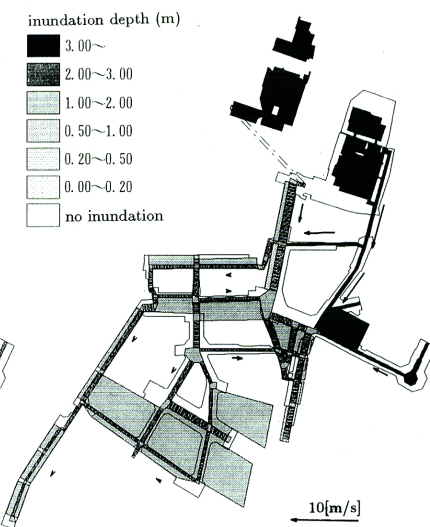
一方、本研究の問題点を挙げると以下のとおりである。

1. 内部の境界条件として与えた段落ちの式では、有効幅 B の決定方法に問題が残っている。すなわち、構造的に一般に4断面を有する階段部において、ある一断面だけからの段落ち流れを考える場合を別にして、周囲のすべての断面から流入する場合、隣合う断面から流入する段落ち流れは互いに影響し合うと予想される。 B の扱いを含めて、流れの取り扱いに検討の余地が残されている。
2. 下層部への流入に関しては、流入口の階段に最も近いノードで連続式において流入流量を考えているが、実際には相当大きい運動量をもって流入すると考えられる。解析においてこの点も

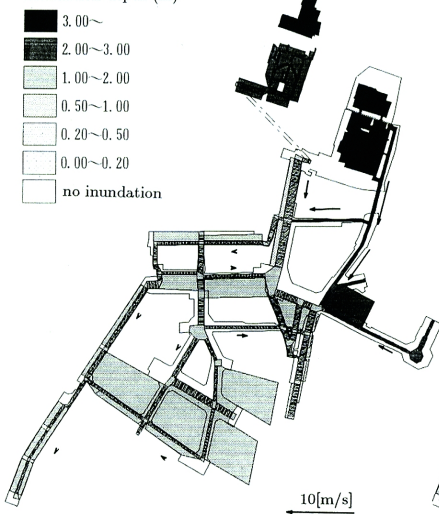
1 hours after bank collapse
inundation depth (m)



2 hours after bank collapse



3 hours after bank collapse
inundation depth (m)



4 hours after bank collapse

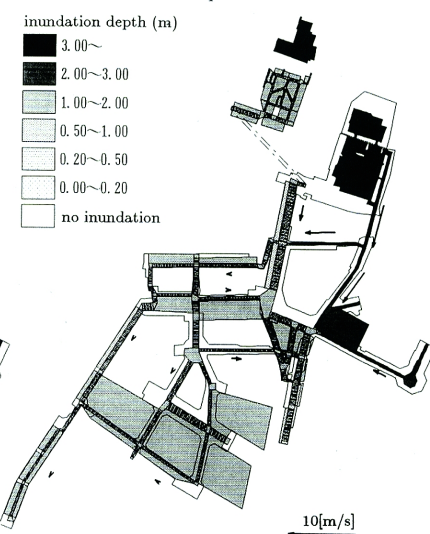


Fig.17 Computational results in the underground (temporal change)

考慮する必要がある。

3. スロットモデルは、管路・開水路共存流れを扱うには、あくまでも簡易的な方法（しかし、一方でその実用的な点は評価しなければならない）と言わざるをえない。たとえばスロットの寸法決定には、試行錯誤的な方法をとっており、物理的な根拠に基づいた設定がなされているいとは言いがたい。
4. 地上部と地下街の解析において、同時進行の計算方式を行っていないため、本来、互いに影響を及ぼし合う現象と予想されることが計算に取り入れられていない。

今後、これらの問題を解決するために解析手法に改善を加え、解析モデルの精度の向上に努めるとともに、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行きたい。

謝辞

この研究を進めるにあたり必要となった図面、データ等を頂きました関係各位に深く感謝をいたします。

参考文献

- 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文(1980): 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
- 鮎川登, 栗崎夏代子, 富田強, 大淵真志(1996): 地下放水路の管水路状態の非定常流の数値計算, 土木学会論文集 No.545/II-36, pp.55-67
- 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
- 中川一(1992): 氾濫水・土石流の動態とその解析, 水工学シリーズ92-A-9, 土木学会水理委員会
- 細田尚, 井上和也, 多田彰秀(1993): 管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非定常流の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第36号B-2, pp.593-605
- 溝田敏夫(1994): 高潮氾濫の地下空間への浸水に関する研究, 京都大学卒業論文
- 渡辺政広・竹内明・川裾利雄(1989): 取付管の超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

Analysis of overland flood flow intrusion into underground space

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Tomonobu TANINO*, Osamu MAEDA**

* Japan Highway Public Corporation

** Graduate school of Engineering, Kyoto University

Synopsis

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

Keywords : inundation flow analysis, underground space, urban area, flood disaster prevention, numerical simulation