

市街地における氾濫解析モデルの考察

井上和也・戸田圭一・林秀樹*・川池健司**・坂井広正***

*五洋建設

**京都大学大学院工学研究科

***京都大学工学部

要 旨

高潮氾濫計算モデルとして、通常よく用いられているデカルト座標系計算モデルでは、市街地の氾濫を取り扱うに際し、道路や建造物の影響を評価しにくいという問題点がある。本研究では、建造物の影響を考慮する新手法として街路ネットワークモデルを提案し、デカルト座標系モデルと一般曲線座標系モデルも含めた3種類の手法を大阪市港区に適用して、解析結果を相互に比較検討した。その結果、道路の占める割合を大きく表現できるモデルほど、氾濫水の伝わり方は速くなり、とくに街路ネットワークモデルでは、氾濫水が道路に沿って流れる様子を表現することができた。このことより、道路の影響を詳しく考慮するには、街路ネットワークモデルが有効であることが示された。

キーワード：高潮氾濫，氾濫解析モデル，都市域，街路ネットワークモデル

1. はじめに

都市化が進行している市街地では、地表部には建造物が林立し、その間を縫うようにして道路が走っている。このような地域で氾濫が発生すると、氾濫水は建造物が密集している箇所を避け、道路に沿って流れる可能性が高い。このような氾濫水の挙動をより正確に把握するためには、市街地という道路と建造物からなる複雑な場における氾濫水の流れを詳細に解析しなくてはならない。

本報では、氾濫水の挙動に最も大きい影響を与えると思われる市街地の要素として建造物と道路を考えると、それらの形状に合わせた格子網の作成と、氾濫水に与えるそれらの影響を取り入れることができる氾濫解析法を考察する。対象とした氾濫解析法のうち一つは、一般曲線座標系を用いた方法であり、もう一つは市街地の街路をネットワーク化した街路ネットワークモデルである。また、デカルト座標系も含めた3手法による氾濫解析の結果から、市街地における氾濫水の挙動を詳しく調べ、それぞ

れの氾濫解析手法の特徴を考察し、市街地における氾濫解析を行うにあたっての有効な氾濫解析モデルについて検討する。

2. 従来の氾濫解析法と市街地への適用上の問題

本報では、氾濫外力として台風による高潮を取り上げ、高潮氾濫解析を考える。従来、高潮氾濫解析においては、解析が容易であることからデカルト座標系 (Cartesian Coordinate) を用いることが多く、海上での高潮の解析だけでなく、市街地に高潮が氾濫した場合の解析にもデカルト座標系が適用されていた。

本章では、従来の高潮氾濫解析法をまとめるとともに、その解析法を実際の市街地に適用するときの問題点を考察する。

2.1 高潮の解析法

高潮氾濫解析モデルは高潮解析と氾濫解析の2つの部分から構成されている。本報では、高潮解析の

部分については従来のモデルをそのまま用い、以下に示す浅水方程式を支配方程式とした。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M^x}{\partial x} + \frac{\partial M^y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

<運動量式>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M^x}{\partial t} + \frac{\partial(u^x M^x)}{\partial x} + \frac{\partial(u^y M^x)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial x} \\ & \quad + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 M^x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M^x}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} + f M^y \\ & \frac{\partial M^y}{\partial t} + \frac{\partial(u^x M^y)}{\partial x} + \frac{\partial(u^y M^y)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial y} \\ & \quad + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 M^y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M^y}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - f M^x \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 h は水深、 u^x, u^y は x, y 方向の流速、 M^x, M^y は x, y 方向の流量フラックス($M^x = u^x h, M^y = u^y h$)、 H は水位、 τ_{sx}, τ_{sy} は自由水面上でのせん断応力の x, y 方向成分、 τ_{bx}, τ_{by} は水底面でのせん断応力の x, y 方向成分、 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密度、 P_0 は気圧、 ε_h は渦動粘性係数、 f はコリオリのパラメータ、 t は時間、 x, y はデカルト座標の座標値である。

自由水面上でのせん断応力には、一般に用いられている次式を使用する。

$$\tau_{sx} = \rho_a \gamma^2 W^x \sqrt{(W^x)^2 + (W^y)^2} \quad (4)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a \gamma^2 W^y \sqrt{(W^x)^2 + (W^y)^2}$$

ここに、 ρ_a は空気の密度、 γ^2 は自由水面上での抵抗係数、 W^x, W^y はそれぞれ自由水面上10mでの x, y 方向の風速である。水底面でのせん断応力は、高潮のように自由水面上に大きなせん断応力が作用する場合、次式(岩垣・樺木, 1982)が用いられる。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u^x \sqrt{(u^x)^2 + (u^y)^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sx} \quad (5)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 u^y \sqrt{(u^x)^2 + (u^y)^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sy}$$

ここに、 n はマンニングの粗度係数(高潮解析領域では、 $n = 0.02$)、 k は定数(ここでは、 $k = 0.25$)である。

離散化手法としては差分法の陽的解法であるLeap-Frog法を用いる。そして式(1)~(3)の離散化について、時間項には前進差分、移流項には保存性を考えてDonorスキーム、他の項には中央差分をそれぞれ

適用する。

開境界条件と気圧場・風速場の設定については武田・井上(1996)の方法を用いる。

2.2 氾濫の解析法

デカルト座標系における氾濫解析では、高潮解析と同様に式(1)~(3)の浅水方程式を用いる。しかし、隣り合う格子の地盤高と水深との関係により、越流公式あるいは段落ち式を用いる(武田, 1997)。つまり、隣り合う地盤高が低い方の水位(H_l)が、他方の地盤高(z_h)よりも高い場合に、 $h_1 = H_l - z_h$ として次に示す越流公式を用いて流量フラックス M_0 を求める。

$$M_0 = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (6)$$

ここに、 $\mu = 0.35$ である。また、地盤高の低い方の水位が一方の地盤高よりも低い場合に、地盤の高い方の水深 h_h を用いて次に示す段落ち式より流量フラックス M_0 を求める。

$$M_0 = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (7)$$

μ は段落ち部のエネルギー水頭に依存する値であるが、ここでは井上(1986)にしたがい一定値 $\mu = (2/3)^{3/2}$ を用いている。

氾濫解析の際に問題となる先端条件については、岩佐・井上・水鳥(1980)にしたがい、フロントの移動限界水深(h_c : 本報では0.001m)を用いて取り扱う。

2.3 デカルト座標系における市街地の氾濫解析

デカルト座標系において市街地の氾濫解析を行う場合、格子の中に建造物や道路が混在している。このような格子において建造物が氾濫水に与える影響を考慮するのに、中川(1989)は次のような方法を用いている。

計算格子 (i, j) の面積 $\Delta x \Delta y$ 中の建造物総面積を $\sum A_k$ とすると、 $\lambda_{i,j} = \sum A_k / \Delta x \Delta y$ で占有率と定義する。また、 $\lambda_{i,j}$ より通過率 $\beta_{i,j}$ を次のように求める。

$$\beta_{i,j} = \sqrt{1 - \lambda_{i,j}} \quad (8)$$

まず、建造物の占有率が高いほど氾濫水の進行が阻害されると考え、 $\beta_{i,j}$ により流量フラックスを次のように補正する。

$$\tilde{M}_{i+1/2,j}^{x,n+2} = \beta_{a,j} M_{i+1/2,j}^{x,n+2} \begin{cases} M_{i+1/2,j}^{x,n+2} \geq 0 & : a = i+1 \\ M_{i+1/2,j}^{x,n+2} < 0 & : a = i \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{M}_{i,j+1/2}^{y,n+2} = \beta_{i,b} M_{i,j+1/2}^{y,n+2} \begin{cases} M_{i,j+1/2}^{y,n+2} \geq 0 & : b = j+1 \\ M_{i,j+1/2}^{y,n+2} < 0 & : b = j \end{cases} \quad (10)$$

この場合、水深は、式で補正した流量フラックスを次の連続式に代入して求められる。

$$\begin{aligned} (1 - \lambda_{i,j}) \frac{h_{i,j}^{n+3} - h_{i,j}^{n+1}}{2\Delta t} \\ + \frac{\tilde{M}_{i+1/2,j}^{x,n+2} - \tilde{M}_{i-1/2,j}^{x,n+2}}{\Delta x} \\ + \frac{\tilde{M}_{i,j+1/2}^{y,n+2} - \tilde{M}_{i,j-1/2}^{y,n+2}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

一方、運動量式では建造物により流れが阻害される影響を評価するのに、粗度係数を割り増しすることが考えられるが、建造物の密集度と粗度係数との関係は明確でない(中川, 1989)ため、本報では、市街地の氾濫解析に通常用いられている $n = 0.067$ を一律に与えることにする。

以下に、この手法に基づいて市街地の氾濫解析を行い、その結果を示すとともに、デカルト座標系において市街地の氾濫解析を行うときの問題点を考察する。

(1) 計算領域

本報において、氾濫計算の対象領域は Fig. 1 に示すように大阪市港区の大部分と西区の一部から構

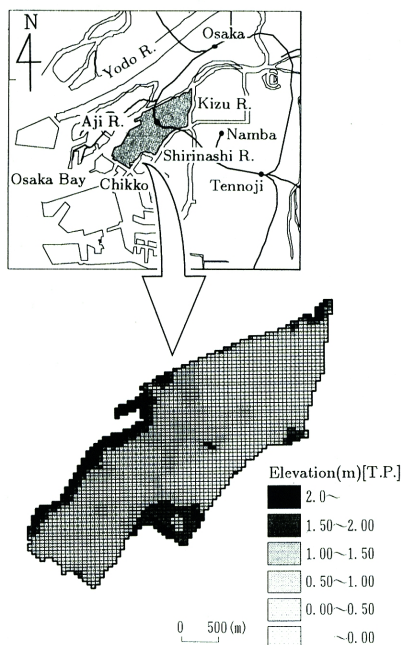


Fig. 1 Computational region

成され、堤防に囲まれた輪中の部分とする。この領域は、安治川、木津川、尻無川、および大阪湾に囲まれた地域である。Fig. 1 にはこの領域の地盤高の分布もあわせて示している。

格子の大きさは、建設省国土地理院の国土数値情報における第3次メッシュの $1/20$ を採用する。すなわち、経度方向に $\Delta x = 57.25\text{m}$ 、緯度方向に $\Delta y = 46.125\text{m}$ である。地形、地盤高は、現在の $1/2,500$ 地形図より読み取った。

(2) 計算条件

計算領域は、まわりを高い防潮堤防、河川堤防に囲まれている。ゆえに、想定破堤点を除いて、氾濫水がこれらを越えて流入、あるいは流出することはないと考え、計算領域の境界はすべて十分に高い直立壁とした。

高潮をもたらす台風として、大阪市が想定している計画台風(伊勢湾台風の規模で室戸台風の経路をたどるもの)を考える。この台風について、2.1の手法で高潮計算を行った結果、大阪築港付近では、Fig. 2 に示すような潮位図が得られた。本報では、いくつかの防潮堤の機能が万が一にも損なわれた場合を想定する。つまり、計算では防潮堤の異常(閉鎖不能)を想定し、破堤点における破堤として取り扱い、その幅はその場所に実在する防潮堤より大きく(1格子分, 57.25m) とすることにした。氾濫解析を行うにあたり、Fig. 2 に示す高潮計算で得られた大阪築港付近の潮位を、破堤点外洋側の格子の水位として与える。計算ケースには、市街地の影響を考慮しない場合として占有率に 0.0 を与える CASE(Ca)、市街地の影響を考慮する場合として占有率に $1/2,500$ 地形図から得られた対象領域内の平均値 0.48 を与える CASE(Cb) の2ケースを設定する。なお、氾濫解析の計算時間は浸水が始まってから9時間とする。

(3) 計算結果

Fig. 3 に氾濫水量 V と氾濫面積 A の時間変化を示す。ここでの氾濫面積とは、建造物の面積も含んだ

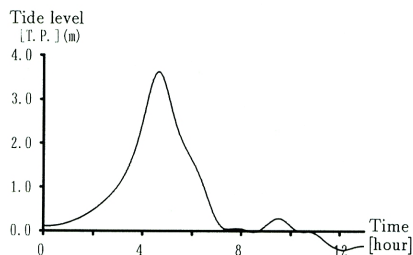


Fig. 2 Temporal change of tide level

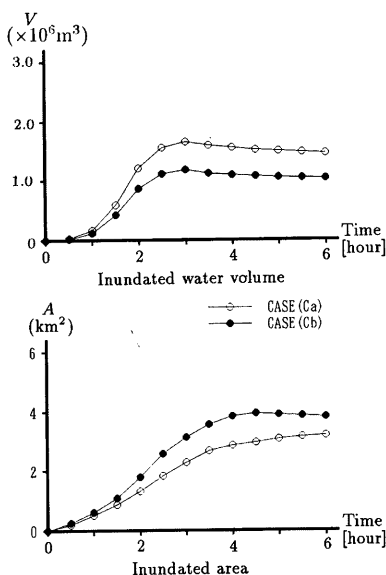


Fig. 3 Inundated water volume and area(1)

ものである。占有率を大きくして市街地の影響を考慮した場合には、考慮しない場合と比較して氾濫水の伝わる速度は氾濫面積からみて大きくなることがわかる。一方、氾濫水量は市街地の影響を考慮した場合の方が小さくなっている。これは、占有率を用いた手法では、建造物は氾濫水の通過能力を減少させる効果をもってあり、氾濫水量が小さくなるのは、氾濫水が流入する箇所においても占有率が考慮されているためであろう。つまり、想定破堤点のすぐ内側にも占有率に相当する建造物が存在すると仮定されており、その建造物により外海から浸入する流れが阻害され、浸入水量が計算上減少するのである。しかし、このように氾濫水量が小さくなっているにもかかわらず、氾濫面積は大きくなり、氾濫の拡がりが速くなるのは、氾濫水量が小さくなる影響以上に、建造物の面積を考慮することにより浸水可能域が減少した影響が大きいと思われる。したがって、占有率を用いて市街地の影響を考慮した場合、氾濫の状況がかなり悪化するといえる。占有率を用いた市街地の氾濫解析については、上塚(1996)や武田(1997)が詳しく述べている。

本手法では、建造物は非浸水性と考えている。しかし、実際はある程度は浸水することが考えられるため、占有率は単純に建造物の敷地面積と土地面積の比と考えることはできず、この値をどのようにし

て定めるかという問題点がある。さきに述べたように、粗度係数についても建造物の密集度との関係は明確ではなかった。従来、市街地の影響評価手法の欠点の一つとして、このように、地形、建造物の密集度、道路の分布といった現実の市街地特性から明確に値が定められないパラメータ(λ, n)に、解析結果が依存していることが挙げられる。

3. 一般曲線座標系における氾濫解析

一般曲線座標系 (Generalized Curvilinear Coordinate) を導入する本来の目的は、不規則な境界形状の影響を考慮したり、あるいは流れの変化が大きい領域を細かく解析したりするためである。ここでは、デカルト座標系で直線によって表せない形状の道路に着目して格子を形成し、氾濫における道路と建造物の効果をより詳しく計算に取り入れることを目的として、一般曲線座標系を用いることにする。

3.1 一般曲線座標系における基礎方程式

一般曲線座標系の基礎式を得るためには、デカルト座標系の基礎方程式を、 (x, y) 系から (ξ, η) 系へ変数変換すればよい。 (x, y) 系は物理平面であり、 (ξ, η) 系は計算平面である。本節ではこの座標系の変換法を展開するとともに、得られる基礎方程式を示す。

x あるいは y による偏微分関数は、チェーンルールとよばれる変換法則を用いて変数変換される。チェーンルールは次式に示される。

$$\frac{\partial}{\partial x} = \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (13)$$

ここに、下付き添字はこの変数による偏微分値を意味する。

(ξ, η) 平面で計算を行うので、最終的には ξ, η のみによる偏微分で構成されているほうが望ましい。そのため、変換行列の成分である $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ を、次式により変換する。以後、 $x_\xi, y_\xi, x_\eta, y_\eta$ を成分とする行列を変換行列と呼ぶ。

$$\xi_x = J y_\eta \quad \xi_y = -J x_\eta \quad \eta_x = -J y_\xi \quad \eta_y = J x_\xi \quad (14)$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x \quad (15)$$

ここに、 J はヤコビアンである。ヤコビアンについても偏微分変数を ξ, η に変換するため、式(14)を用いて変形すると、

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad (16)$$

である。

流速 u^x, u^y 、流量フラックス M^x, M^y などの x, y 方

向のベクトル成分を ξ, η 方向のベクトル成分に変換するため、次に示すベクトル変換式を用いる。

$$f^x = x_\xi f^\xi + x_\eta f^\eta \quad (17)$$

$$f^y = y_\xi f^\xi + y_\eta f^\eta \quad (18)$$

この変換式により、物理平面上の流速は、計算平面上の反変速度に変換される。反変速度は、物理平面 (x, y) における流速ベクトルを (ξ, η) 方向へ投影したときの成分に比例する量をもつ。本来の流速の次元はもたず、大きさは格子形状により変化する量である。

2.1で述べたデカルト座標系の基礎方程式に、式(12)～(18)を用いて変数変換を行うと、次に示す連続式と運動量式が導かれる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + J \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{M^\xi}{J} \right) + J \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{M^\eta}{J} \right) = 0 \quad (19)$$

<運動量式>

(ξ 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\xi}{\partial t} = & -J^2 y_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\ & + J^2 x_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 g h \left\{ (x_\eta^2 + y_\eta^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\ & \quad \left. - (x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\ & - \frac{g n^2 M^\xi \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}} \end{aligned} \quad (20)$$

(η 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\eta}{\partial t} = & J^2 y_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 x_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 g h \left\{ -(x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\ & \quad \left. + (x_\xi^2 + y_\xi^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\ & - \frac{g n^2 M^\eta \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}} \end{aligned} \quad (21)$$

3.2 氾濫水の解析

一般曲線座標系において氾濫解析を行うにあたり、基本的には基礎方程式(19)～(21)を用いるが、2.2で述べたように、2格子間の地盤高と水深の関係により式(6)あるいは式(7)を用いる。しかし、これらの式より得られる M_0 は物理平面上の値であるため、そのまま一般曲線座標系における計算に用いることはできない。そのため、次に示す式を用いて M_0 を

M^ξ あるいは M^η に変換する。

$$M^\xi = \frac{M_0}{\sqrt{\bar{x}_\xi^2 + \bar{y}_\xi^2}} \quad (22)$$

$$M^\eta = \frac{M_0}{\sqrt{\bar{x}_\eta^2 + \bar{y}_\eta^2}} \quad (23)$$

ここに、 $\bar{x}_\xi, \bar{y}_\xi, \bar{x}_\eta, \bar{y}_\eta$ は M^ξ, M^η と同じ位置における変換行列の成分である。また、以後、上線は本来の定義点ではない位置での変数を表し、補間が必要であることを示す。

また、逆に、この式を用いることにより、 ξ 方向、 η 方向の計算平面上の流速、流量フラックスを物理平面上の量に変換することができる。

3.3 一般曲線座標系における市街地の氾濫解析

一般曲線座標系における計算を市街地に適用する際、占有率と粗度係数を用いる点では、デカルト座標系の場合と同様である。しかし、一般曲線座標系では、対象領域を建造物の存在しない道路格子と、それ以外の格子である住区(細かい道路と建造物とからなる)に分類することができる。このように、一般曲線座標系を用いる計算では、格子を属性により細かく分類できる長所がある。この道路格子と住区に対して、それぞれ別々の占有率と粗度係数の値を与えることにより、建造物に加えて道路およびそれらの粗度の影響も考慮することができる。

以下に、一般曲線座標系において市街地の氾濫計算を行う。

計算領域

対象領域は、デカルト座標系における計算と同じ地域であり、Fig. 4のように住区と道路格子に分類する。道路格子の面積は1.62km²であり、対象領域の全面積の約25%を占める。

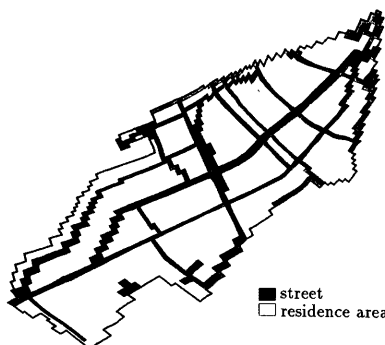


Fig. 4 Street meshes in generalized curvilinear coordinate

計算条件

外力もデカルト座標系における計算と同様とし、Fig. 2に示される潮位を破堤点外洋側の格子に与える。破堤点は道路格子とし、破堤幅は2格子分62.0mとした。

計算ケースとしては、市街地の影響を考慮せずに、道路格子と住区の区別なく全ての格子に $\lambda=0.0$ 、 $n=0.067$ を与えるCASE(Ga)と、市街地の影響を考慮して、道路格子には $\lambda=0.0$ 、 $n=0.043$ (福岡らの実験(1994)による)、住区には $\lambda=0.64$ (地形図から読み取った値)、 $n=0.067$ を与えるCASE(Gb)の2ケースの計算を行った。

計算結果

Fig. 5に氾濫水量 V と氾濫面積 A の時間変化を示す。これによると、CASE(Gb)はCASE(Ga)に比べて、氾濫水の広がる速度は大きくなるのがわかる。この結果より、一般曲線座標系においてもデカルト座標系の場合と同様に、市街地の影響を考慮した場合の方が氾濫面積は大きく、氾濫水の広がりは速くなるのがわかる。一方、Fig. 5より、市街地の影響を考慮すると、氾濫水量は小さくなっていることがわかる。破堤点格子は道路格子とされているので、占有率は与えられていないこと、道路格子の粗度係数が小さいことにより、市街地の影響を考慮しない場合よりも氾濫水が流入しやすくなると予

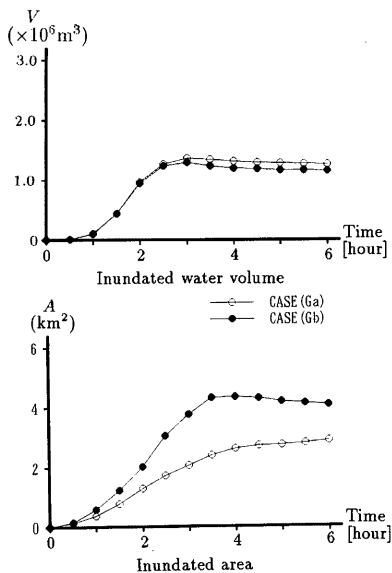


Fig. 5 Inundated water volume and area(2)

想されるが、これとは逆の結果が現れている。これは、本章の手法によると、堤内地の住区に占有率を与えているため堤内地の水位が上昇し、その結果破堤点近くで氾濫水の流入が抑制される影響の方が、粗度係数の影響よりも大きいと思われる。

4. 街路ネットワークを考慮した氾濫解析

前章までに述べてきたように、デカルト座標系や一般曲線座標系では、格子形状に制約があるため、複雑なネットワークを形成している道路の形状を格子に反映させて、それらの影響を考慮するには限界があった。そこで本章では、道路の形状をより簡単に取り入れることのできる氾濫解析モデルとして、市街地の街路網をネットワークとして扱う街路ネットワークモデル(Street Network Model)を提案する。

4.1 数値計算の方法

対象領域としている地域では、道路の両側には建造物が建ち並んでおり、氾濫が生じると、氾濫水は道路に沿って流れる可能性がかなり高いことが予想される。ゆえに、このような市街地においては、氾濫水の流れを連続式および運動方程式を用いて解析するのは道路のみでよいと考え、道路での流れを解析することに重点をおいた氾濫解析手法を試みる。

都市化の進んだ地域においては、対象域を道路の部分とそれ以外の建造物の密集している部分とに二分できる。さらに、道路の部分は、交差点と交差点間の道路とに再分類すれば、交差点をノードとして、交差点間の道路をリンクとするネットワークとみなすことができる。一方、建造物の密集している部分を住区とよぶことにする。住区は建造物と細かい道路からなる。このようなネットワーク化の概念をFig. 6に示す。

計算においては、リンク(交差点間の道路)において一次元解析を行い、ノードおよび住区はそれぞれ1格子とみなし連続式のみを考慮する。リンク内の一次元解析では、リンクを格子に分割してleap-frog的に計算を進める。つまり、一次元解析の領域も含めた対象領域の全格子で、時間ステップ n で全ての隣接格子間の流量フラックスを求め、時間ステップ $(n+1)$ で格子の水深を求めることにする。

氾濫解析にあたって、基本的には以下に示す式を用いるが、2.2で述べたように地盤高と水深の関係によっては、式(6)、(7)を用いる。

(1) リンク内の計算

リンク内の1次元解析には以下に示す方程式を支配方程式とする。つまり、リンクを長方形様断面水路とみなし、始点ノードから終点ノードの向きに

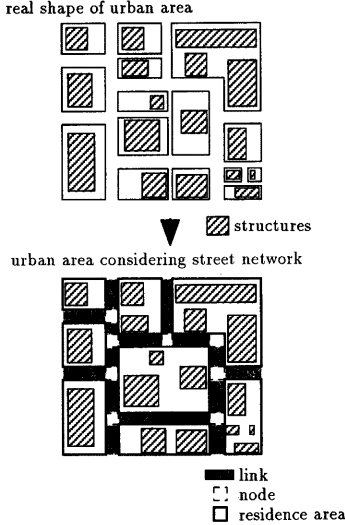


Fig. 6 Modeling of street network

x 軸をとる。

(a) 基礎式

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} \quad (24)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M| M}{h^{5/3}} \quad (25)$$

ここに、 u , M は x 方向の流速、流量フラックスであり、 q_{in} は横流入流量、 B はリンク幅である。住区はリンクの左右に位置するので、リンクと住区間の流量フラックスは q_{in} で表される。その算定法は後で述べる。地形図から読み取ったリンクの平面形は細長い四辺形であるが、これを上述のように長方形一様断面水路に簡略化する。リンク長 l は、リンク両側の境界の長さの平均 $(l_1 + l_2)/2$ とし、リンク幅 B は、道路面積 S_{link} から、 $B = S_{link}/l$ とする。

(b) 離散化

上に示した連続式および運動量式を二次元解析のときと同様に離散化する。リンク内の格子において水理量を定義する位置をFig. 7に示す。

<連続式>

$$\frac{h_P^{n+2} - h_P^n}{2\Delta t} + \frac{M_e^{n+1} - M_w^{n+1}}{\Delta x_i} = \frac{q_{r,P}^{n+1} + q_{l,P}^{n+1}}{B} \quad (26)$$

$$h_P, M_e, M_w = h_{(i,l)}, M_{(i,l+1/2)}, M_{(i,l-1/2)}$$

$$q_{l,P}, q_{r,P} = q_{l(i,l)}, q_{r(i,l)}$$

ここに、 i はリンク番号、 l は格子番号であり、 q_l および q_r はリンクの左右（始点ノードから終点ノードを見た向きに対して）からの横流入流量である。 Δx はリンクにより異なるが、約20mを標準としている。下付き添字 P, e, w はFig. 8に示す位置を表す。

<運動量式>

$$\begin{aligned} & \frac{M_P^{n+2} - M_P^n}{2\Delta t} \\ &= - \left\{ \frac{u_e^n \{M_P^n + M_E^n\} + |u_e^n| \{M_P^n - M_E^n\}}{2\Delta x_i} \right. \\ & \quad \left. - \frac{u_w^n \{M_W^n + M_P^n\} + |u_w^n| \{M_W^n - M_P^n\}}{2\Delta x_i} \right\} \\ & \quad - g h_P^{n+1} \frac{H_e^{n+1} - H_w^{n+1}}{\Delta x_i} \\ & \quad + \frac{gn^2 \frac{M_P^{n+2} + M_P^n}{2} |M_P^n|}{(h_P^{n+1})^{5/3}} \end{aligned} \quad (27)$$

$$M_P, M_E, M_W = M_{(i,l-1/2)}, M_{(i,l+1/2)}, M_{(i,l-3/2)}$$

$$h_P, H_e, H_w = \bar{h}_{(i,l-1/2)}, \bar{H}_{(i,l)}, \bar{H}_{(i,l-1)}$$

$$u_e, u_w, n_P = \bar{u}_{(i,l)}, \bar{u}_{(i,l-1)}, \bar{n}_{(i,l-1/2)}$$

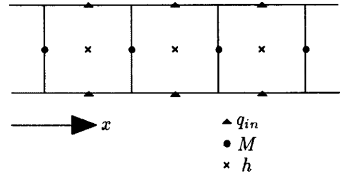


Fig. 7 Definition points of variables

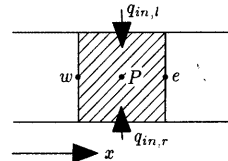


Fig. 8 Control volume of continuity equation

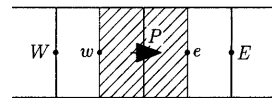


Fig. 9 Control volume of momentum equation

ここに、下付き添字 P, E, W, e, w は Fig. 9 に示す位置を表す。

(2) ノードおよび住区の計算

ノードと住区においては、それらを1格子と考えて、次に示す連続式から水深を求める。

$$\frac{h^{n+2} - h^n}{2\Delta t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k \quad (28)$$

ここに、 h は格子の水深、 A は格子の面積、 Q_k は格子辺からの流入量、 m は格子を構成する辺の数を表す。

(3) リンク、ノード、住区間の流量フラックス

リンクとノード、リンクと住区、ノードと住区間の流量フラックス M_P は、運動方程式の移流項を省略して以下の式(程・劉, 1995)を用いて求める。

$$\begin{aligned} \frac{M_P^{n+2} - M_P^n}{2\Delta t} \\ = -g h_P^{n+1} \frac{H_e^{n+1} - H_w^{n+1}}{DL} - \frac{g n_P^2 \frac{M_P^{n+2} + M_P^n}{2} |M_P^n|}{(h_P^{n+1})^{\frac{5}{3}}} \end{aligned} \quad (29)$$

ここに、 H_e, H_w は、始点ノード js からリンク i へのフラックス流量を求めるときは $H_{(i,1)}, H_{node,js}$ 、リンク i から終点ノード je への流量フラックスを求めるときは $H_{node,je}, H_{(i,lm)}$ 、住区 k からリンク i 内の格子 l への流量フラックスを求めるときは $H_{(i,l)}, H_{house,k}$ 、ノード j から住区 k への流量フラックスを求めるときは $H_{house,k}, H_{node,j}$ である。 DL は下で述べる水理量の補間に用いる式(30)における $L_1 + L_2$ である。 lm はリンク i の格子分割数である。また、式中の h_P, n_P は格子の境界上の値であり、補間の必要がある。例えば、これらの両格子上の水理量を C_1, C_2 とし、それらから $\bar{C}_P$ を補間するために距離 L_1, L_2 を用いて次の式より計算する。

$$\bar{C}_P = \frac{L_2 C_1 + L_1 C_2}{L_1 + L_2} \quad (30)$$

C_1, C_2, L_1, L_2 は、具体的には以下のようなものである。

始点ノード js からリンク i への流量フラックス M_P を求めるときは、 C_1, C_2 は $C_{(i,1)}, C_{node,js}$ であり、 L_1, L_2 については、Fig. 10 に示すようにノードの図心とリンク端の格子の図心間距離 L_s を用いて次のように表す。

$$L_1 = \frac{\Delta x_i}{2}, L_2 = L_s - L_1 \quad (31)$$

リンク i から終点ノード je への流量フラックス M_P を求めるときは、 C_1, C_2 は $C_{(i,lm)}, C_{node,je}$ であり、 L_1, L_2 については Fig. 11 に示すようにノードの図心とリンク端の格子の図心間距離 L_e を用いて次のように表す。

$$L_1 = \frac{\Delta x_i}{2}, L_2 = L_e - L_1 \quad (32)$$

住区 k からリンク i への流量フラックス M_P を求めるときは、 C_1, C_2 は $C_{(i,l)}, C_{house,k}$ である。 L_1, L_2 は、

Fig. 12 に示すようにリンクの図心からリンクと住区の境界線に垂直にのぼした直線をひき、その直線が住区に切り取られる長さ L_h を用いて次のように表す。

$$L_1 = \frac{B}{2}, L_2 = \frac{L_h}{2} \quad (33)$$

リンクと住区との間の流量フラックスはリンク内の各格子ごとに求め、一つのリンク内では全ての格子に同じ L_1, L_2 を用いる。また、住区からリンク i の l 番目の格子への流量フラックスが、式(26)における横流入量 $q_{l(i,l)}$ あるいは $q_{r(i,l)}$ である。

ノード j から住区 k への流量フラックス M_P を求めるときは、 C_1, C_2 は $C_{node,j}, C_{house,k}$ である。 L_1, L_2 は、Fig. 12 に示すようにノードの図心からノードと住区の境界線に垂直にのぼした直線をひき、その直線が住区に切り取られる長さ L_h' と、ノードの図心から境界線までの距離 L_n を用いて次のように表す。

$$L_1 = L_n, L_2 = \frac{L_h'}{2} \quad (34)$$

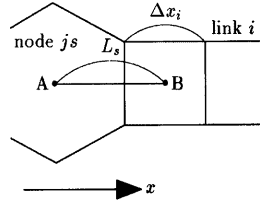


Fig. 10 Distance used for interpolation between starting node and link

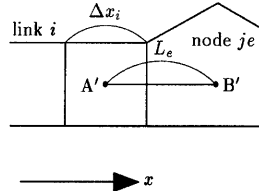


Fig. 11 Distance used for interpolation between terminal node and link

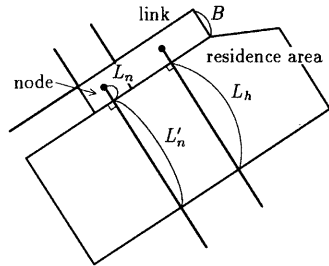


Fig. 12 Distance used for interpolation between link and residence area or node and residence area

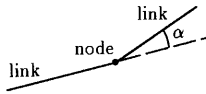


Fig. 13 Straightly connecting link

(4) 直線連結リンクの扱い

Fig. 13のように2本のリンクがほぼ直線で連結されているリンクのことを直線連結リンクと呼ぶ。本報では、この2本のリンクのなす角度 α が 10° 以内の場合はほぼ直線であると考えて、直線連結リンクとみなすことにする。街路ネットワークモデルにおいては、地形図上の道路をネットワーク化する段階で、長い直線の道路をいくつかのリンクに分割する必要がある場合が多く、このような場合に直線連結リンクが生じる。ノードとリンクの間の流量フラックスを求めるとき、基本的には式(29)を用いるが、直線連結リンクについては、ノードを含めて2本のリンクを1つの方程式で解析できるように、リンクとノード間の流量フラックスを求めるときにも、リンク内の基礎方程式である式(27)をそのまま用いることにする。その場合の式中の変数のとり方は以下のようなのである。

(a) 始点ノード j からリンク i_1 への流量フラックス M_P を求めるとき：

$$\begin{aligned} M_E, M_W &= M_{(i_1, 3/2)}, M_{(i_2, l_m+1/2)} \\ h_P, H_e, H_w &= \bar{h}_{(i_1, 1/2)}, H_{(i_1, 1)}, H_{node, j} \\ u_e, u_w, n_P &= \bar{u}_{(i_1, 1)}, \bar{u}_{node, j}, \bar{n}_{(i_1, 1/2)} \\ \bar{h}_{(i_1, 1/2)}, \bar{n}_{(i_1, 1/2)} &\text{および}\bar{u}_{(i_1, 1)}\text{は式(30)を用いて補間する。補間には式(31)で示される距離を用いる。} \\ \text{また、}\bar{u}_{node, j} &\text{は次の式で補間する。} \\ \bar{u}_{node, j} &= \frac{u_{(i_1, 1/2)} + u_{(i_2, l_m+1/2)}}{2} \quad (35) \end{aligned}$$

(b) リンク i_2 から終点ノード j への流量フラックス M_P を求めるとき：

$$\begin{aligned} M_E, M_W &= M_{(i_1, 1/2)}, M_{(i_2, l_m-1/2)} \\ h_P, H_e, H_w &= \bar{h}_{(i_2, i_m+1/2)}, H_{node, j}, H_{(i_2, l_m)} \\ u_e, u_w, n_P &= \bar{u}_{node, j}, \bar{u}_{(i_2, l_m-1/2)}, \bar{n}_{i_2, i_m+1/2} \end{aligned}$$

4.2 街路ネットワークモデルによる市街地の氾濫解析

街路ネットワークモデルにおいても、占有率と粗度係数を用いて道路と建造物の影響を別々に考慮する。建造物の影響評価に関しては、2.3の考え方に

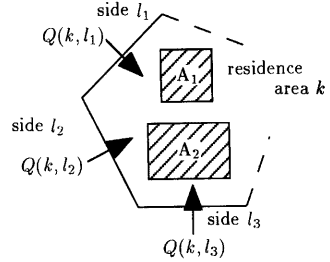


Fig. 14 Influence of structures

基づき、以下のような手法を用いる。

Fig. 14に示す住区 k について考える。住区 k における占有率 λ_k を用いて通過率 β_k を次式により決定する。

$$\beta_k = \sqrt{1 - \lambda_k} \quad (36)$$

住区 k と住区 k に格子辺 l で接しているリンクあるいはノードとの間の流量 $Q_{k, l}$ を、住区へ流入する向きを正として次のように補正する。

$$\tilde{Q}_{k, l} = \alpha Q_{k, l}, \begin{cases} Q_{k, l} < 0 & : \alpha = 1 \\ Q_{k, l} \geq 0 & : \alpha = \beta_k \end{cases} \quad (37)$$

上式で補正した流量を次式の連続式に代入し水深を求める。

$$\frac{h^{n+2} - h^n}{2\Delta t} = \frac{1}{(1 - \lambda_k)A_k} \sum_{i=1}^m \tilde{Q}_{k, l_i} \quad (38)$$

対象領域

対象領域は、これまでの計算と同じ地域であり、Fig. 15に対象領域を住区と道路（リンクとノード）からなるに分類した結果を示す。リンクとノードをあわせた道路格子の総面積は 2.17km^2 であり、対象領域の約33%を占めている。一般曲線座標系のモデルでは道路としてとり上げられた面積が対象領域の約25%だったことを考えると、街路ネットワーク



Fig. 15 Street meshes in street network model

モデルはより細かい道路まで計算に取り入れて考慮できるモデルであるといえる。

計算条件

外力もこれまでと同様であるが、破堤点はリンクに設定し、破堤流入流量は式(29)より求め、リンクへの横流入流量として扱う。なお、破堤幅は20.0m(1格子分)である。

計算ケースには、市街地の影響を考慮せずに、道路格子と住区の区別なく全ての格子に $\lambda = 0.0$, $n = 0.067$ を与えるCASE(Sa)と、市街地の影響を考慮して、道路格子に $\lambda = 0.0$, $n = 0.043$, 住区には $\lambda = 0.72$ (地図から読み取った値), $n = 0.067$ を与えるCASE(Sb)の2ケースを考える。

計算結果

Fig. 16に氾濫面積と氾濫水量の時間変化を示す。Fig. 16より、氾濫水量は、市街地の影響を考慮してもほとんど減少していない。この結果は、デカルト座標系や一般曲線座標系における計算結果とは異なり、街路ネットワークモデルでは、堤内地の住区に占有率を与えることにより水位が上昇し流入流量が抑制される影響と、道路格子の粗度係数が小さく設定されているために氾濫水が流入しやすくなる影響とが同程度で相殺しあうといえる。

しかし、CASE(Sb)はCASE(Sa)に比べて、氾濫水

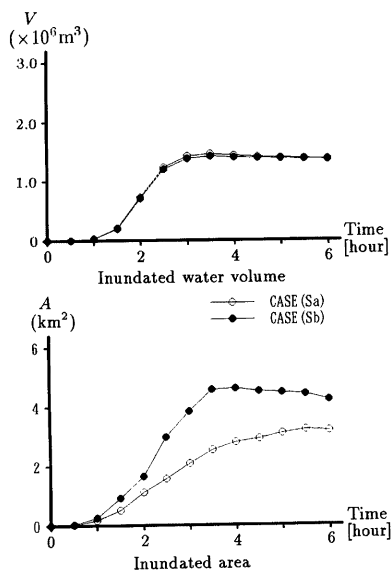


Fig. 16 Inundated water volume and area(3)

の広がる速さは大きくなっていることがわかる。この結果は、これまでの計算と同様であり、街路ネットワークモデルにおいても、市街地の影響を考慮した場合の方が氾濫面積は大きく、氾濫水の拡がりは速くなることが確認される。

5. 市街地における氾濫水の拡がり方

従来の研究により、氾濫地域が市街地であると、そこに存在する非浸水性の建造物の影響により浸水面積が増加するという知見が得られている。しかし、道路や建造物の影響は明確には考慮されていないことが多く、そのため市街地特有の氾濫の挙動を解析することが難しかった。

ここでは前章までに述べた氾濫解析結果に、新たにいくつかの計算を加えて、市街地において氾濫水が示す特有の挙動について考察する。

5.1 各計算における氾濫水の拡がり方の比較

計算条件

これまででは、境界条件に水位を与えて計算してきたが、ここでは、外力条件を同一にして比較することを考えて、境界条件には同一の流入流量を与えることにした。境界条件として与える破堤による流入流量は、第3章で行った一般曲線座標系における計算ケースCASE(Ga)のものを考える。この流入流量をFig. 17に示す。それ以外の条件はこれまでと同様である。

計算ケースの分類はTable. 1のとおりである。それぞれの計算方法における市街地の影響評価手法は、これまで各章で述べてきたとおりである。

計算結果

Fig. 18に、全てのケースについての氾濫面積の時間変化を示す。市街地の影響を考慮しなかったCASE(C₀), CASE(G₀), CASE(S₀)の間では、それほど

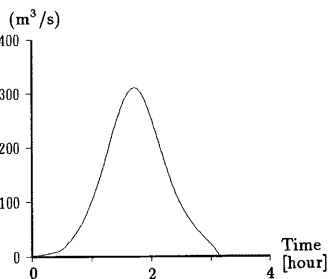


Fig. 17 Inundation discharge from the coastal dike

Table. 1 Cases for analysis

	without consideration of the influence of urban area	consideration of the influence of urban area
Cartesian coordinate	C_0	C_1 (street...0%)
Generalized curvilinear coordinate	G_0	G_1 (street...25%)
Street network model	S_0	S_1 (street...33%)

without consideration of the influence of urban area

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda(\text{residence area}) = \lambda(\text{street}) = 0.0 \\ n(\text{residence area}) = n(\text{street}) = 0.067 \end{array} \right.$$

consideration of the influence of urban area

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda(\text{residence area}) = \\ \quad 0.48 \cdots \text{Cartesian coordinate} \\ \quad 0.64 \cdots \text{Generalized curvilinear coordinate} \\ \quad 0.72 \cdots \text{Street network model} \\ \lambda(\text{street}) = 0.0 \\ n(\text{residence area}) = 0.043 \\ n(\text{street}) = 0.067 \end{array} \right.$$

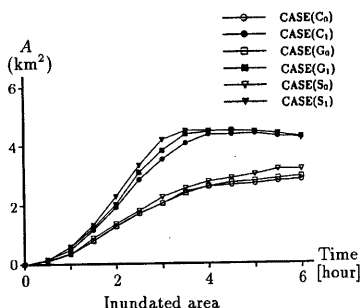


Fig. 18 Temporal change of inundated area(1)

大きな差はみられない。Fig. 19(a)には、それらのケースについて、浸水開始2時間後の氾濫水の先端部分の比較を示す。Fig. 18, Fig. 19(a)によると、街路ネットワークモデルにおいては氾濫水の伝わりが速くなるものの、他のモデルと比較してその差はわずかである。つまり、市街地の影響を考慮しない場合、一般曲線座標系と街路ネットワークモデルによる計算は、従来用いられてきたデカルト座標系による計算と大差ない結果をもたらすといえる。

Fig. 18の、市街地の影響を考慮した場合の3ケースをみると、市街地の影響を考慮していない場合の3ケースに比べて、氾濫面積の増加する速さが大きくなっているが、その中でも最も大きいのがCASE(S₁)で、CASE(G₁)、CASE(C₁)と続いている。つまり、氾濫水の拡がる速さは、道路格子として評価できている面積の順番となっている。つまり、道

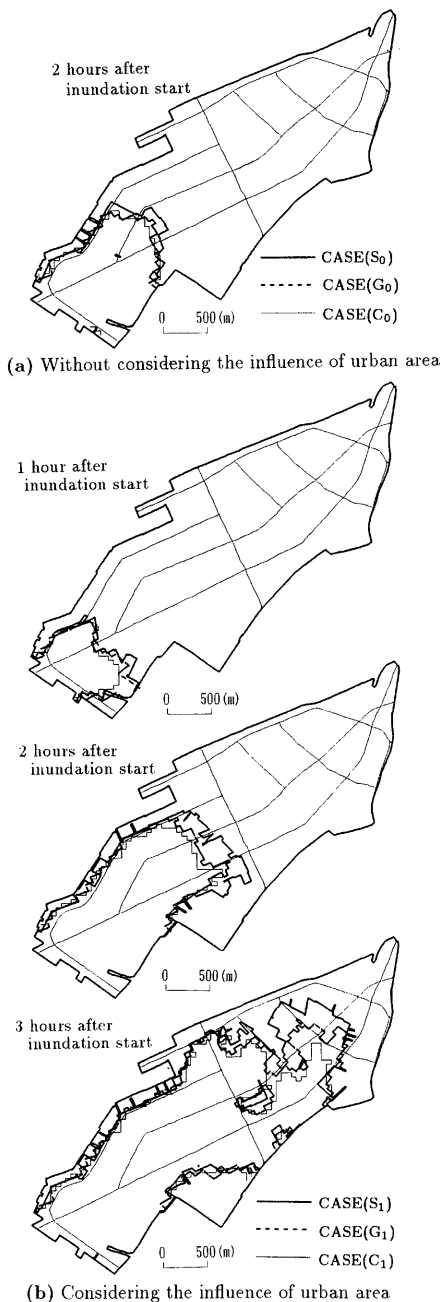


Fig. 19 Comparison of inundated area

路として取り入れられる面積が大きいくほど、氾濫水の拡がる速さが大きくなると考えられる。

Fig. 19(b)からは、氾濫水の先端の伝わり方はCASE(S₁)が最も速く、CASE(G₁)、CASE(C₁)の順となっており、先端の位置には距離にして500m近くの差が生じていることがわかる。また、CASE(S₁)では、氾濫水がかなり細かい道路にも浸入している様子がよく現れている。

本報で対象としている領域は輪中であるため、ある程度の時間が経過すると氾濫水はそれ以上ひろがらなくなり、道路の影響はほぼみられなくなる。しかし、輪中でない地域にいよめる拡散型の氾濫が生じた場合を考えると、氾濫域が市街地であれば、主に道路を伝わって地盤高の低い地域へと氾濫がひろがっていくことが予想される。このような場合に、道路の影響の評価法により、氾濫水が下流部に到達する時間には大きな差が生じることが考えられる。このように、氾濫水の伝わる速さには道路の影響が大きく、これを計算に取り入れることが重要であるといえる。

5.2 住区壁を想定した場合の氾濫水のひろがり方

街路ネットワークモデルでは、道路と住区の境界は、建造物の壁、あるいは塀に相当し、氾濫水はその隙間（具体的には建造物間の細かい街路など）からしか住区内を出入りすることはできないであろう。この隙間が浸水に対しての有効な幅であり、このことを考えた手法を以下に述べる。

例えば、Fig. 20に示すような住区*k*を考える。この住区*k*の境界となっている辺*i*には*m*個の隙間があり、その*j*個目の隙間の幅を $D_{k,(i,j)}$ とする。このとき、辺*i*の浸水に対する有効幅 $B_{k,i}$ は

$$B_{k,i} = \sum_{j=1}^m D_{k,(i,j)} \quad (39)$$

と表される。従来は通過率は式(36)より占有率から計算されていたが、この節では、通過率は占有率とは独立に、浸水有効幅を用いて、次のように定める

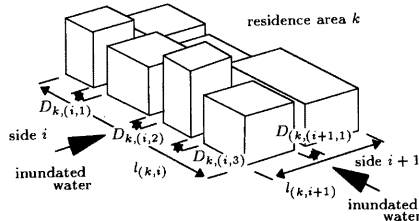


Fig. 20 Effective width of residence area wall

ことにする。

$$\beta_{k,i} = B_{k,i}/l_{k,i} \quad (40)$$

ここで、 $\beta_{k,i}$ は住区*k*の辺*i*を出入りする流量フラックスに対する通過率、 $l_{k,i}$ は辺*i*の長さである。また、この手法では、住区から流出する流量フラックスも上記と同じ通過率により調整される。この点でも、従来の占有率による手法とは異なる。

本節では、 $\beta_{k,i}$ を対象領域全体に一律に与えて計算を行うことにし、以下では添字を略する。これまでの計算では $\lambda = 0.72$ を用いていたが、式(36)を用いたときの β は0.53であることより、これに近い値として β に0.6を与える場合をCASE(S₀)とする。また、対象領域では、もう少し浸水有効幅が小さいと考えられるので、0.4と0.2を与えた計算も行い、それぞれCASE(S_β)、CASE(S_γ)とする。その他の条件は、これまでの市街地の影響を考慮した場合と同様である。この条件で解析を行った結果から、CASE(S₁)とあわせて氾濫面積*A*の時間変化についてFig. 21に示す。Fig. 21によると、浸水有効幅が小さくなるにつれて氾濫水の拡がりが遅くなっている。これは、浸水有効幅を用いることにより、氾濫水が住区を通り抜けにくくなっているからと考えられる。また、以上のことからすれば、CASE(S₀)では浸水有効幅はCASE(S₁)より大きく氾濫が拡がりやすいはずであるにもかかわらず、わずかではあるが、CASE(S₁)より遅れている。これは、CASE(S₁)では住区に流入する流量フラックスのみに通過率を用いているのに対して、CASE(S₀)では、住区から流出する氾濫水にも通過率が考慮されているため、CASE(S₁)より住区内を氾濫水が通過しにくくなっているからと考えられる。

従来、デカルト座標系では通過率は占有率から求めていた。しかし、街路ネットワークモデルでは、住区に浸入する氾濫水を建造物が遮断すると考えることで、通過率を占有率から独立させることができ

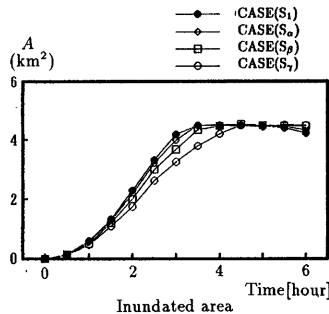


Fig. 21 Temporal change of inundated area(2)

る。このように占有率と通過率を用いることで、氾濫水に対する建造物の効果を、より詳しく計算に取り入れることができると考えられる。

6. おわりに

本報で格子のとり方に着目したのは、計算格子を道路のみで構成される道路格子と、住区格子とに分類するためであった。これにより、道路格子と住区格子に異なる占有率や粗度係数を与える（ただし、道路格子の占有率は常に0である）という非常に簡単な操作で、道路の影響を計算に取り入れることができた。このようにして道路の影響を評価した場合、道路の占める面積を大きく表現できるモデルほど、氾濫水の拡がる速さは大きくなるという結果が得られた。また、街路ネットワークモデルでは、かなり細かい道路の影響まで計算にとり入れることができ、道路に沿って氾濫水が伝播する様子をより顕著に表現することができた。さらにこのモデルでは、住区壁を考慮することで氾濫水の通過率を直接パラメータ化することもでき、市街地の氾濫水の挙動を予測するのに有効なモデルであることも知られた。

参考文献

- 井上和也（1986）：開水路非定常流とその水工学への応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.172-177。
岩垣雄一・樫木亨（1982）：海岸工学，共立出版，p.224。
岩佐義朗・井上和也・水島雅文（1980）：氾濫水の水理の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp.305-317。
上塚哲彦（1996）：都市域の高潮氾濫解析手法とその応用に関する研究，京都大学修士論文，pp.40-44。
武田誠（1997）：高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に関する研究，京都大学学位論文。
武田誠・井上和也・上塚哲彦・松村貴義（1996）：高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討，水工学論文集 第40巻，pp.1089-1094。
程曉陶・劉如雲・顔元亮・楊磊（1995）：黄河治理興水資源開發利用 黄河下游灘区水沙運行数学模型及減災措施的研究，中国水利水電科學研究院，pp.11-15。
中川一（1989）：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究，京都大学学位論文。
福岡捷二・川島幹雄・松永宜夫・前内永敏（1994）：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集 No.491 II-27，pp.51-60。

Study of inundation flow model in urban area

Kazuya INOUE, Kei-ichi TODA, Hideki HAYASHI*, Kenji KAWAIKE** and Hiromasa Sakai***

* Penta-Ocean Construction Co.,Ltd.

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

*** Faculty of Engineering, Kyoto University

Synopsis

In overland flood flow analysis in urban area, it is important to consider the influence of street network. In this study, a street network model is proposed as a new analysis model, and its model, cartesian coordinate model and generalized curvilinear coordinate model are applied to the Minato Ward of Osaka City. As the results, it has been found that as the model distinguishes the wider area of street, the extension of floods becomes faster, especially, in the street network model, flood flow expanding along streets can be well expressed. Therefore it is suggested that the street network model is an effective model for treating inundation flow in urban area.

Keywords : Storm surge flooding, Inundation flow model, City area, Street network model