

市街地の高潮氾濫解析法の研究

川池 健司*・井上 和也**・戸田 圭一***・林 秀樹****

1. はじめに

従来、洪水や高潮の氾濫を平面二次元流れとして解析する場合、格子形成の簡便さからデカルト座標系が主として用いられてきた。一方、高潮氾濫が問題となる市街地においては、氾濫水の挙動の特徴として、建造物による流れの遮断、道路に沿う流れの伝播が挙げられる。したがって、市街地においては、このような道路と建造物の特徴をとり入れた解析モデルが望まれる。しかし、デカルト座標系では、一律な格子分割のため、一格子の中に道路と建造物を混在させざるをえず、市街地を網の目のように走る道路と、その両側に建ち並ぶ建造物の影響を考慮することは不可能である。そこで本研究では、高潮氾濫モデルとして、街路系に着目した一般曲線座標系モデル、街路と建造物を個別にとり入れられるようにした街路ネットワークモデルをそれぞれ開発するとともに、従来のデカルト座標系モデルとあわせて大阪市港区に適用し、3手法の解析結果を相互に比較検討する。

2. 各モデルの概要

2.1 デカルト座標系における氾濫解析

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。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、海域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。

本研究では、海域での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、浅水方程式を支配方程式とする。これらの離散化、および開境界条件と気圧場・風速場の設定については武田・井上ら (1996) の方法を用いる。また、氾濫の解析にも浅水方程式を用い、氾濫水の先端条件は岩佐・井上・水鳥 (1980) らの手法にしたが

う。

2.2 一般曲線座標系における氾濫解析

デカルト座標系とは別に、ここでは、氾濫における道路と建造物の影響をより詳しく計算に取り入れることを目的として、デカルト座標系のような直線で区切られた格子では表せない形状の道路に重点をおいた格子形成が可能な一般曲線座標系 (Generalized Curvilinear Coordinate) を用いることにする。

一般曲線座標系の基礎式は、デカルト座標系の基礎方程式を、物理平面 (x, y) 系から計算平面 (ξ, η) 系へ変数変換することによって得られる (たとえば、細田ら (1996) より)。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) に分類するなど、格子をその属性により細かく分類できる長所がある。

2.3 街路ネットワークを考慮した氾濫解析

高度に市街化した地域では、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と予想される。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においてのみと考え、道路ネットワークに重点をおいた氾濫解析手法を試みる。

市街化の進んだ地域においては、対象領域は、a. 道路、b. 建造物、および c. それ以外のスペースに三分できる。このうち、道路は、交差点をノード、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。このようなネットワーク化の概念を図-1に示す。一方、建造物とそれ以外のスペース (b. と c.) を住区と呼ぶことにする。住区は、建造物、庭などの空き地、ネットワークとしては考慮されなかった細かい道路などから成る。

計算においては、リンク (交差点間の道路) においては一次元解析を行い、ノード (交差点) および住区においては連続式のみを考慮する。リンク内の一次元解析では、リンクを縦断方向に格子分割して leap-frog 的に計算を進める。リンク内の1次元解析には、リンクを長方形断面の水路とみなし、以下に示す方程式を支配方程式とする。ただし、 x 軸は始点ノードから終点ノードの向

* 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 土木工学専攻
** 正会員 工博 京都大学 防災研究所 教授 工学研究科 土木工学専攻
*** 正会員 Ph.D. 京都大学 防災研究所 助教授 工学研究科 土木工学専攻
**** 正会員 工修 五洋建設 (株)

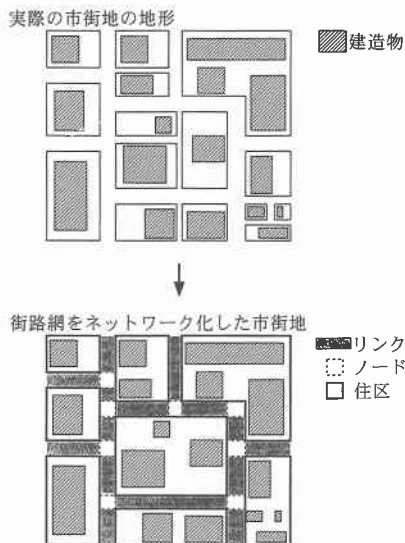


図-1 ネットワーク化の概念図

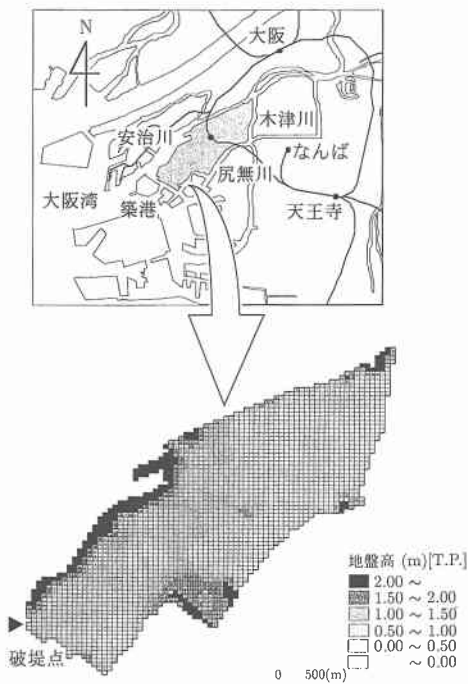


図-2 対象領域

きにとる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} \dots\dots\dots (1)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g\tau^2 |M| M}{h^3} \dots\dots\dots (2)$$

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。 q_{in} は、リンクと住区間の流量フラックスである。 q_{in} 、およびノードと住区の水深は次の連続式から計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h はノードまたは住区の水深、 A はその面積、 Q_k はノードまたは住区の辺からの流入流量、 m は辺の数である。

2.4 市街地への適用

a) 対象領域

本研究において、氾濫計算の対象とした領域は、図-2に示すように大阪市港区の大部分と西区の一部から構成される。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り、それらの堤防に囲まれた輪中の部分である。図-2には、この領域をデカルト座標系で格子分割したときの地盤高の分布もあわせて示している。

対象領域を一般曲線座標系により住区と道路格子に分類すると、図-3のようになる。道路格子の面積は1.62

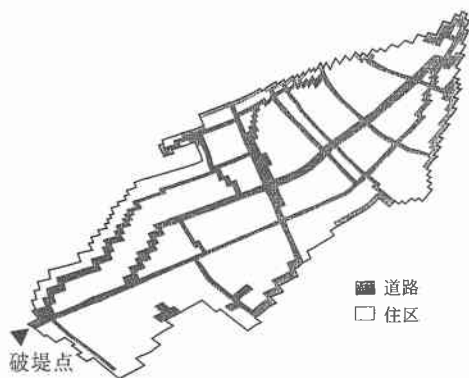


図-3 一般曲線座標系における道路格子図

km²であり、対象領域の全面積の約25%を占める。

さらに図-4は、街路ネットワークモデルにより対象領域を住区と道路(リンクとノードからなる)に分類した結果である。リンクとノードをあわせた道路格子の総面積は2.17 km²であり、対象領域の約33%を占めている。このことから、街路ネットワークモデルは、一般曲線座標系と比較してより細かい道路まで計算に取り入れられるモデルといえる。

b) 建造物と道路の影響

建造物あるいは道路が氾濫水に及ぼす影響としては、a. 非浸水性の建造物による氾濫面積の拡大、b. 建造物に

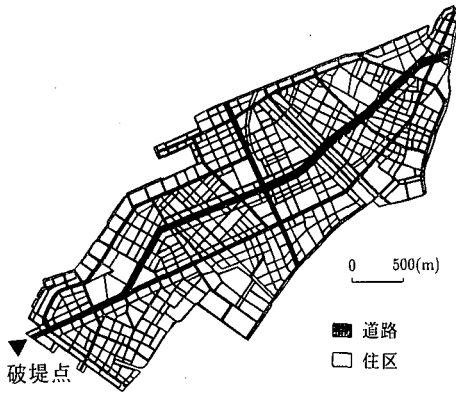


図-4 街路ネットワークモデルにおける道路格子図

よる氾濫水の遮断, c. 道路に沿った氾濫水の伝播などが考えられる。まず, a. と b. の影響を考慮するために中川(1989)による占有率 λ (住区の面積に占める建造物総面積の割合)を次のように導入する。

i) デカルト座標系・一般曲線座標系のとき

格子 (i, j) の占有率 $\lambda_{i,j}$ より通過率 $\beta_{i,j}$ を $\beta_{i,j} = \sqrt{1 - \lambda_{i,j}}$ によって定義し, 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, 格子 (i, j) と $(i+1, j)$ の間の $x(\xi)$ 方向の流量フラックス $M_{i+1/2,j}$ を次のように補正する。

$$\tilde{M}_{i+1/2,j} = \beta_{a,j} M_{i+1/2,j} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし, a の値は $M_{i+1/2,j}$ の正負に対応し, それぞれ $a=i+1$, $a=i$ とする。格子 (i, j) と $(i, j+1)$ の間の $y(\eta)$ 方向の流量フラックス $N_{i,j+1/2}$ の補正も同様である。

ii) 街路ネットワークモデルのとき

i)と同様の概念に基づき, 住区 k における占有率 λ_k を用いて通過率 β_k を $\beta_k = \sqrt{1 - \lambda_k}$ とする。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, 次のように補正する。

$$\tilde{Q}_{k,l} = \alpha Q_{k,l} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし, 住区へ浸入するときは $\alpha = \beta_k$, 住区から浸出する場合は $\alpha = 1$ とする。

(4)式または(5)式で補正した流量フラックスをそれぞれ連続式に代入して, 水深を求める。

一方, b. と c. の影響を考慮するために, 住区と道路で異なる粗度係数 n を用いることにする。

c) 計算条件

解析ケースとして, 市街化が進んでいない場合(λ (道路) $=\lambda$ (住区) $=0.0$, n (道路) $=n$ (住区) $=0.067$)と, 市街化が進んだ場合(λ (道路) $=0.0$, λ (住区) $\neq 0.0$ (値は各モデルによって若干異なる), n (道路) $=0.043$, n (住区) $=0.067$)を想定する。以上をまとめると, 計算ケースの分類は表-1のとおりになる。

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(伊勢湾台風規模, 室戸台風コース)を考える。計算では防潮扉の異常(閉鎖不能)を想定し, 想定地点(図-2, 3, 4)における破堤として取り扱う。

氾濫流入量を同一にして比較することを考えて, 境界条件には図-5に示す同一の流入流量を与える。この流入流量は, 2.1の手法で高潮計算を行った結果得られた大阪築港付近の潮位を, 一般曲線座標系における計算ケースCASE(G_1)に適用し, 想定破堤点(破堤幅62.0m)の外水位として与えて得られる氾濫流量のハイドログラフである。なお, 破堤点以外の計算領域の境界はすべて十分に高い直立壁とした。

3. 結果と考察

3.1 各計算における氾濫水の拡がり方の比較

図-6に, 全てのケースについての氾濫面積(建造物の面積も含めた氾濫総面積)の時間変化を示す。市街化が進んでいない場合のCASE(C_0), CASE(G_0), CASE(N_0)

表-1 計算ケース

	市街化が進んでいない場合	市街化が進んだ場合
デカルト座標系	C_0	C_1 道路格子: 0%
一般曲線座標系	G_0	G_1 道路格子: 25%
街路ネットワークモデル	N_0	N_1 道路格子: 33%
住区	$\lambda=0.0$ $n=0.067$	$\lambda = \begin{cases} 0.48: \text{ケース } C_1 \\ 0.64: \text{ケース } G_1 \\ 0.72: \text{ケース } N_1 \end{cases}$ $n=0.067$
道路	$\lambda=0.0$ $n=0.067$	$\lambda=0.0$ $n=0.043$

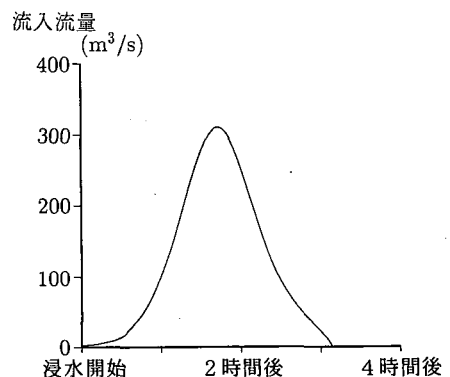


図-5 流入流量の時間変化

の間では、それほど大きな差はみられない。図-7(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。図-6、図-7(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方が速くなるものの、他のモデルと比較してその差はわずかである。つまり、市街化が進んでいない場合、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。

図-6の、市街化が進んだ場合の3ケースをみると、市街化が進んでいない場合の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(N₁)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、道路として評価される面積が大きいほど、氾濫水の拡がる速さが大きくなると考えられる。

また、平均浸水深(氾濫水量を、建造物の面積を除く正味の浸水面積で割った値)は、市街化が進んでいない場合では0.43 m、市街化が進んでいる場合では0.62 mである。このことから、市街化が進んだ場合には、氾濫水の拡がり速く、しかも平均浸水深は大きくなるといふ結果が得られる。

また、図-7(b)には、市街化が進んだ場合について、氾濫水の先端部分の比較を浸水開始1時間後、2時間後、3時間後について示す。それによると、氾濫水の先端の伝わり方はCASE(N₁)が最も速く、CASE(G₁)、CASE(C₁)の順となっており、浸水開始3時間後には、先端の位置は距離にして500 m近くの差が生じていることがわかる。また、CASE(N₁)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。

3.2 住区壁を想定した場合の氾濫水のひろがり方

市街地においては、道路と住区の境界は建造物の壁面

であることが多い。氾濫水は、この壁面を通過することはできず、その隙間の細かい道路から住区内に浸入するであろう。つまり、図-8に示すように、細かい道路が住

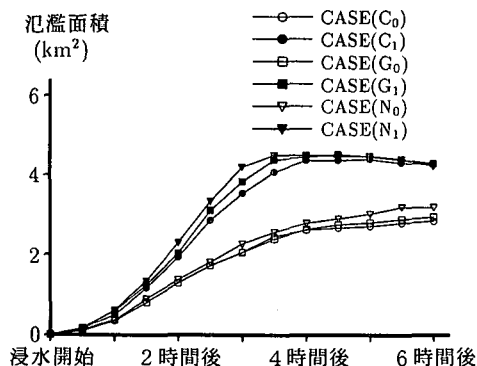
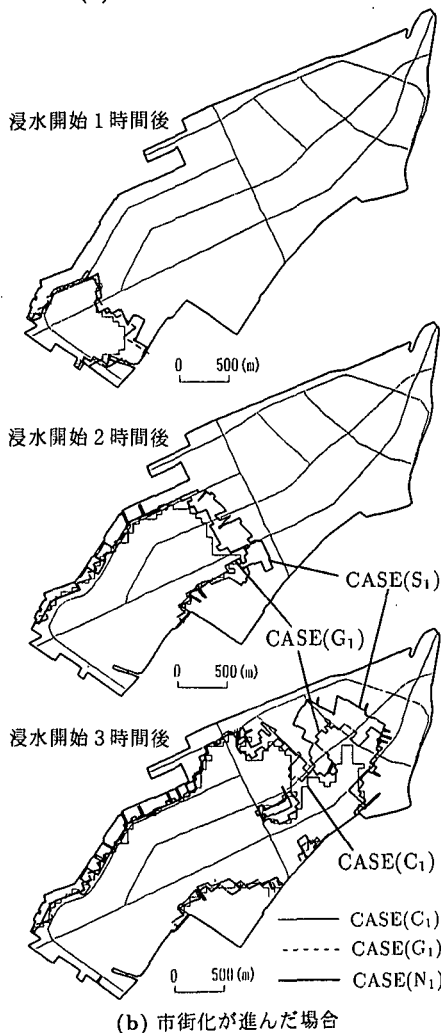
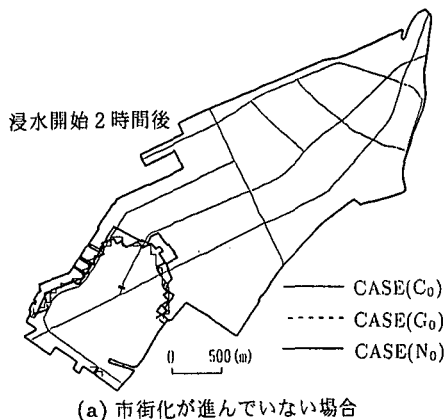


図-6 氾濫面積の時間変化 (1)

図-7 氾濫水の先端部分の比較

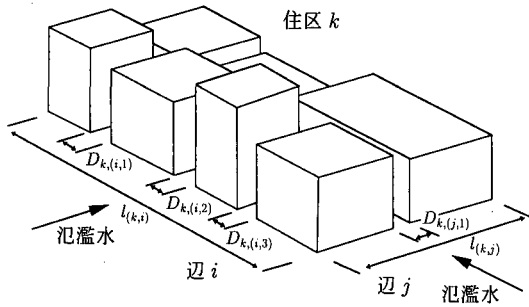


図-8 住区壁の浸水有効幅

区への浸水についての有効幅となる。先述の β は辺長に対する有効幅の比に相当するが、 β は本来、占有率 λ とは独立な量と考えられる。つまり、図-8において住区 k の辺 i については、浸水有効幅 $W_i = \sum_m D_{k(i,m)}$ の、辺長 l_i に対する割合が辺 i の通過率 β_i と考えるべきであり、そのように定義しなおして計算を試みる。なお、住区への浸入あるいは住区からの浸出のいずれの場合にも (5) 式の α は β_k とする。

ここでは β_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。3.1 の計算では $\lambda = 0.72$ を用いたが、そのときの β は 0.53 であることより、これに近い値として β に 0.6 を与えた場合を CASE (N_α) とする。また、対象領域では、もう少し浸水有効幅は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 (N_β)、CASE (N_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 (N_1) とあわせて氾濫面積の時間変化を図-9 に示す。図-9 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。

従来、通過率は占有率から求められていた。しかし、街路ネットワークモデルを用いれば、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により、通過率を占有率から独立させることができる。このような占有率と通過率を用いれば、氾濫水に対する建造物の影響を、より詳しく計算に取り入れることができると考えられ

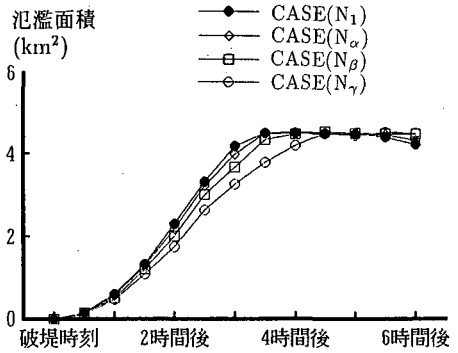


図-9 氾濫面積の時間変化 (2)

る。

4. おわりに

一般曲線座標系モデルおよび街路ネットワークモデルでは、計算格子は、道路のみで構成される道路格子と、住区格子とに分けられるので、道路格子および住区格子に異なる占有率や粗度係数を与えることができる (ただし、道路格子の占有率は常に 0 である)。本研究では、このような方法を用いることにより道路が氾濫水に及ぼす影響を、従来のデカルト座標系による方法より具体的に現実に即して考慮することができた。とくに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取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ができ、氾濫解析において市街地という特性を評価できるより有効なモデルであることが知られた。

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.
- 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.
- 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, pp. 14-15.
- 細田 尚・長田信寿・村本嘉雄 (1996): 移動一般座標による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集 No. 533 II-34, pp. 267-272.