II-86　　都市化域の出水特性に関する2，3の考察

京都大学工学部　正員　高棹琢馬
京都大学工学部　正員　池淵周一
鹿島建設　正員　○田川寿美

1. はしがき

自然域の都市化にともなって洪水が頻発する事態に対処するには、都市化域特有の流出機構に立脚した流出解析法の確立が必要である。そのためには水文学的立場から、都市化進行を的確に示すパラメータの定式化がなされねばならない。従来、都市化域の出水特性に関しては、浸透・貯留の減少，表面粗度の減少などが主要因子であったが、流路網の整備も都市化の進展度を示す重要な因子であろう。本研究は、この流路網の整備に都市化としての重点をおき、浸透・貯留といった量的側面よりも斜面と流路の伝播速度の違いや合流効果を見るべく時間的側面に重点をおいた。したがって、対象流域としては貯留効果の減少といった低平地ではなく、丘陵地を宅地造成していった場合を考察しており、降雨は有効降雨として表現されているとし、雨水の挙動を時間－位置関係で表現するのに適した方法としてKinematic Wave法を用いている。なお、Kinematic Wave 法においては等価粗度の決定問題が重要であり、とくにさまざまの工種と大小排水路を内在した地域を一括して等価斜面とする以上、その評価は困難であるが、本研究では最遠端からの伝播時間ではなく、流域全体を万遍なく関連させる意味から、流域の全地点から最下流地点までの伝播時間を平均したものに着目し、流路網をも含めて考える場合と、全体を等価斜面とした場合の平均総伝播時間の一致性から定常状態での等価粗度を定式化した。すなわち、こうして求められた等価粗度と諸因子との関係から、丘陵地が宅地造成されていく場合の出水特性が議論できよう。

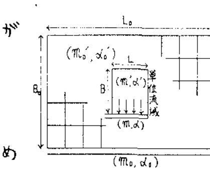


図1. 格子状流路をもつ一様流域

2 格子状流路をもつ一様流域平均総伝播時間

図－1のような流域を設定し、この流域全体（複合流域）の平均伝播時間を求めるために、単位流域において図－2の4つの伝播型に分類した。各々の平均伝播時間はKinematic Wave法により求め図に付記してあるが、これらの平均伝播時間をその伝播型の流域全体に占める個数および支配雨量（単位流域のμ，ν倍の面積をもつ流域からの雨水を集めている）とを軽重率として加重平均し、複合流域の平均総伝播時間$\overline{t}_T$を求めると次式のようになる。

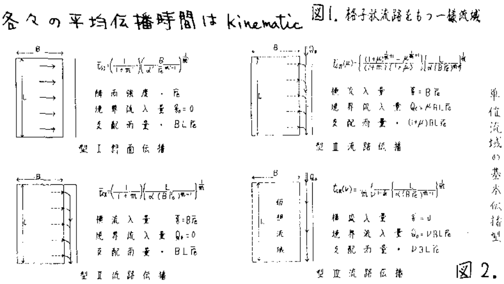


図2.

$$\overline{t}_T=\frac{C_1}{C}\left(\frac{1}{1+m'}\right)\left(\frac{B}{\alpha'\overline{r}_e^{\,m'-1}}\right)^{\frac{1}{m'}}+G\left(\frac{1}{1+m}\right)\left\{\frac{1}{\alpha(B\cdot\overline{r}_e)^{m-1}}\right\}^{\frac{1}{m}}\quad\cdots(1)$$

$$G=\left[C_2+\sum_{\mu=1}^{\infty}C_{3,\mu}\left\{(1+\mu)^{\frac{1}{m}+1}-\mu^{\frac{1}{m}+1}\right\}+\left(\frac{1+m}{m}\right)\sum_{\nu=1}^{\infty}C_{4,\nu}\cdot\nu\right]/C\quad\cdots(2)$$

$$q=\alpha'\overline{r}_e^{\,m'}\quad\cdots(3)\qquad,\qquad Q=\alpha\overline{q}^{\,m}\quad\cdots(4)$$

ここに、Cは単位流域数，$C_1, C_2, C_{3,\mu}, C_{4,\nu}$は、それぞれ型I，II，III，IV伝播数であり、$C_1=C$，$C_3=C_{3,1}+C_{3,2}+\cdots=\Sigma C_{3,\mu}$，$C_4=C_{4,1}+C_{4,2}+\cdots=\Sigma C_{4,\nu}$，$C_2+C_3=C$の関係がある。

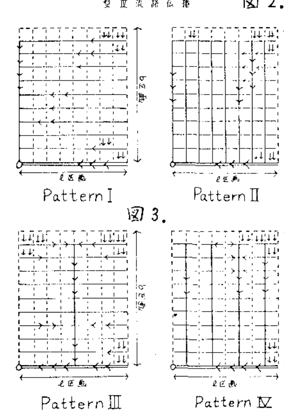


図3.

式(1)において、第1項は平均斜面伝播時間を、第2項は平均流路伝播時間を意味しており、Gで示した無次元数は流路整備状況を示す重要な指標であり、単位流域数C，複合流域形状β（等価斜面の縦横比），流路網型に関連するが、流路網型を直接数式の中へ導入することは困難であるので、図－3に示される

4つの代表的な流路網パターンを考え、回帰分析により平均化すると、

$$G = \{1.247(\log_{e}\beta)^2 + 1.683\}\, C^{0.344} \qquad \cdots (5)$$

が得られた。いま、単位流域数Cの増加を複合流域面積一定として考えると、そのことは流路整備の進捗を意味するものであり、流路整備が進むと、平均総伝播時間中に占める平均流路伝播時間の割合が増加することが理解できよう。

3 流路網平均勾配

宅地造成地においては、まず基礎地盤があってその上に宅地としての利用に適するようにかさ上げされた宅地地盤があると考えるのが適当であろう。このとき基礎地盤勾配は最大標高差や最急勾配線に関連し斜面としての道路を除いては流路網（道路側溝も含めて）勾配が支配的である。一方、宅地地盤勾配や屋根勾配さらに宅地内排水路勾配やとい勾配はまったく基礎地盤勾配に支配されず、その適用特性に応じて自由に決定される。ここに、流路伝播に占める宅地地盤内排水路や雨水といの影響を無視し、また全斜面中の道路比率が小さいと考えると、宅地域における斜面勾配はその利用に対する適合性のみに支配されると考えられるが、流路勾配は基礎地盤勾配に支配されるものと考えられる。いま、単純化して図－4に示されるような平面状の複合流域にかなり流路網が整備されたとき、その流路網の平均勾配$\bar{\lambda}$は、平均流路伝播時間の一致を条件として、

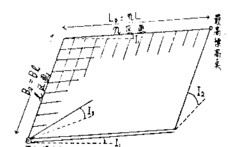


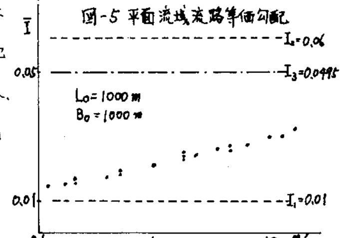
図4

$$I_0^{-0.375} = \bar{\lambda}^{-0.375} = (l^{0.375} L_0 I_1^{-0.375} + n^{0.375} B_0 I_2^{-0.375}) / (l^{0.375} L_0 + n^{0.375} B_0) \quad \cdots (6)$$

で与えられる。ここに、サフィックス0は等価斜面を意味する。

ところで、流路整備が進展した流域にKinematic Wave法を使用するとき、等価粗度と一対となって使用される等価斜面の勾配としては従来は地形全体の平均的なものが用いられたが、これはKinematic Wave法のもつ水理学上の機構の再現性にとぼしく、実際にはそれが地形特性を表現すると同時に、流出機構に忠実であることが望ましいと考えられ、この流路網平均勾配を用いるのが妥当である。したがって、この勾配を等価勾配I_0と名づけた。式(6)で求められるI_0は地形的な平均勾配I_3より小さく、さらに一般にはI_1とI_2の算術平均よりも小さくなっている。（図－5）

図-5 平面流域流路等価勾配



4 等価粗度

式(1)に式(5)を代入した一様な複合流域平均総伝播時間$\bar{t}_T$が等価斜面としたときのそれに一致するように定めた基礎式につぎの仮定を入れる。1)流出特性値はManningの抵抗則が成立するとき、斜面；$\alpha = I^{1/2}/N$, $m = 1.67$, 流路；$\alpha = 0.487\lambda^{1/2}/n$, $m = 1.33$である。ただし流路は矩形とし、等価斜面とその流路に関しても同様である。2)単位流域は正方形, $B = L$。3)流路網粗度と等価斜面の流路粗度の一致, $n = n_0$。4)降雨強度の変動による影響は小さく($\bar{r}_e^{0.15}$), $\bar{r}_e = 80\,mm/hr$として十分であろう。5)流域平面形状を示す各因子をB_0, β, Bの3因子で表現する。$C = \beta(B_0/B)^2$, $L_0 = \beta B_0$。6)等価勾配と流路網平均勾配の一致, $I_0 = \bar{\lambda}$。以上の仮定の下に、基礎式を整理すると最終的に等価粗度N_0は次式のようになる。

$$N_0^{0.6} = (B/B_0)^{0.6} \cdot (\bar{\lambda}/I)^{0.3} \cdot N^{0.6} + 0.392\left\{a\frac{\beta^{0.344} \cdot B_0^{0.088}}{B^{0.188} \cdot \bar{\lambda}^{0.075}} - \frac{\beta^{0.75} \cdot \bar{\lambda}^{0.3}}{B_0^{0.1} \cdot I^{0.375}}\right\} n^{0.75}, \quad a = 1.25(\log_{e}\beta)^2 + 1.68 \qquad \cdots (7)$$

以上により、格子状流路をもつ一様な矩形流域にKinematic Wave法を適用するとき必要な等価粗度N_0と等価勾配I_0は式(7)および式(6)で与えられる。ここに、両特性値は$N_0(B_0, B, \beta, N, n, I_1, I_2, I)$, $I_0(\beta, I_1, I_2)$なる8個の因子から決まるが、これら8個の因子は都市化と出水特性の観点から2種に分類されよう。すなわち、

1)都市化の進展を示す因子；$B, N, (n), I$　　2)複合流域全体の地形特性を示す因子；B_0, β, I_1, I_2

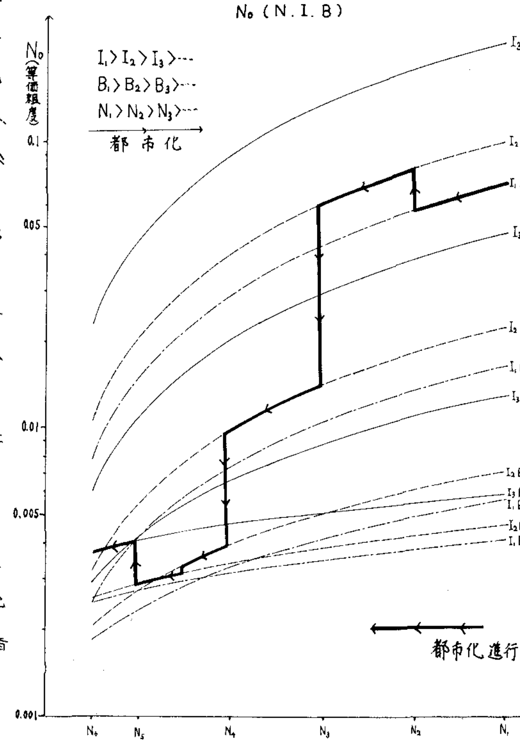
5 都市化と等価粗度

さて、都市化による出水特性の変動を、等価粗度から表現しようとすると、流路粗度nは自然河道でない限りほぼ一定と考えてよいので、単位流域での斜面粗度N，斜面長B，斜面勾配Iと等価粗度N_0の関係を把握すれば

よいことになる。この3因子のN_0に対する個々の影響は、都市化とともに3因子とも減少するが、B，NはN_0減少に、IはN_0増大に寄与し、都市化域の出水特性のうち、時間的側面はこの3因子の作用の重合的効果である。以下に、この3因子の作用を流出現象面から整理しておくと、1)Nの減少は流下速度を増大させ斜面伝播時間を短縮する。2)Bの減少は、第一に斜面長短縮によって斜面伝播時間を短縮する。第二に、流路流下長の増大と、各流路の流量細分化による流路流下速度の低下によって流路伝播時間を増大させる。しかし、一般には斜面伝播時間の短縮が流路伝播時間の増加を上回るので、Bの減少は全体として平均総伝播時間の短縮となる。3)Iの減少は、1)とは逆に流下速度を低下させ斜面伝播時間を増大する。

以上のように、都市化を平均総伝播時間$\bar{T}_t$の短縮と考えようとするとき、因子Iだけは逆に作用するが、一般には3因子が並行して変動し、B，Nの効果がIの効果を打ち消すために、$\bar{T}_t$の短縮として都市化による出水特性が表され、等価粗度N_0が減少する。図－6は3因子と等価粗度の関係から都市化進行を示す概略図である。I，B一定のとき$\bar{N}$の減少とともにN_0は一本の曲線に沿って減少する。またI，Bが減少するときには、I_1, I_2, I_3,・・・・($I_1>I_2>$・・・・)，B_1, B_2, B_3,・・・($B_1>B_2>$・・・)に関する曲線に移動するが、Iに関しては上方の、Bに関しては下方の曲線がそのときの等価粗度N_0を示す。つまり、都市化によってB，I，Nが並行して減少すると、等価粗度N_0は図上の太線のように変動して最終的には左下へ近づく。

図-6 都市化進行による等価粗度の変動 N_0 (N.I.B)



6 あとがき

丘陵地の宅地化を表す典型的な流域を、格子状流路網をもつ一様複合流域モデルとして設定するとともに、この流域の等価粗度を求める目的で単位流域における4個の伝播基本型を定め、複合流域をこれら伝播基本型の結合したものとして表現し、複合流域の平均総伝播時間を基礎にして都市化域の等価粗度，等価勾配を定式化した。得られた結果を要約すると、1)都市化の進展により、流路伝播の伝播現象全体に占める割合が斜面伝播に比較して卓越する。さらに流路整備が都市化の指標として重要である。2)時間的側面からみる限り、都市化とは表面粗度の減少，流路の整備，宅地化による斜面勾配の緩和という3つの指標の重合した状態を意味する。3)等価粗度においては、単位流域における斜面粗度N，斜面長B，斜面勾配Iの3因子が都市化と等価粗度の関係を示すパラメータとして適している。4)等価粗度は上記3因子の他にさらに5因子、流路粗度n，複合流域等価斜面長B_0，複合流域形状係数β，複合流域2辺勾配I_1, I_2が関連し、流域全体の地形特性に左右される。5)とくに、B_0が含まれることは都市化進展度が同じであっても、等価斜面として扱う流域の大きさによって等価粗度が異なることを表しており注意しなければならない。6)等価勾配は、複合流域全体の勾配とするよりも、流域内流路網等価勾配とするのが流出機構に忠実であり妥当である。このとき、等価勾配は地形形状より直接見積られるよりかなり緩やかにしなければならない。7)流域内の単位流域が非一様な場合や、粗度係数の異なる複数工種が分布している場合についても、本研究で定義した平均総伝播時間を基礎に、一様流域モデルへ変換する処理が考えられる。ただ、単位流域の斜面勾配，流路勾配も異なる場合への拡張は複雑とならざるを得ないであろう。