

水路網密度が流出波形に及ぼす影響について

On the Effects of Channel Densities to Runoff Patterns

国立防災科学技術センター 正員 ○木下 武雄
土木研究所 正員 益倉 克成
国立防災科学技術センター 福岡 輝旗

1. はじめに

近年、防災上の観点から流域の都市化による雨水流出波形の変化が注目されている。特に洪水到達時間が短くなることは各方面で言われるようになった。都市化が雨水流出波形に及ぼす主要因の一つに下水路等の整備に伴う排水路網密度の変化がある。水路網密度の変化は盛土斜面等の侵食溝の発達という形にもあらわれるし、自然地形においても谷密度の違いによる流出の違い等にもみられる。

本研究は、これら諸現象の解明として、基本的な水路網密度の変化が流出波形に及ぼす影響を解明することを目的として、単純化した流域模型によって実験を行なうと共に、不定流解析を用いて流出波形の数値シミュレーションを行ない、結果の検討・解析を行なった。

2. 実験

自然の流域における観測結果では、流域自体の持つ要素・降雨波形等の条件が複雑である上に、数種の要素が同時に変化するために、各要素の意味を解明する直接的なデータを得ることは困難である。そのために、まず、より単純化された状況で実験研究を行ない、基礎的な現象を解明し、その結果を現場に適用できるように検討していくことは有力な手法である。

2-1 実験模型

模型の製作にあたっては、後記の不定流解析も考慮して、①浸透損失はない、②流域は斜面・従水路（道路及び側溝）・集水路で構成される、③都市を想定して従水路の面積率を最高20%とする、④各流路は水理学的になるべく単純な構造とする、こととした。このようにして、国立防災科学技術センター大型降雨実験施設内に、側方及び最下流端に集水路を持つ幅15.1m、長さ40mの長方形のモルタル張り流域斜面（勾配1/1000）を土木研究所が製作した。この斜面に自然状態から最高に都市化された状態の水路網を想定して、従水路（勾配1/300）を0, 2, 4, 8本の4段階に設置し、比較・解析した。詳細は図1に示す。又、従水路及び集水路の勾配を1/1000とし、従水路から斜面上まで氾濫した場合の影響を検討する模型も製作し、実験した。

2-2 実験方法

模型への散水は国立防災科学技術センター大型降雨装置を使用した。この装置は、高さ16mの地点からノズルにて最大72m×44mの実験区画内に15～200mm/hの任意の雨を降らせることが出来るものである。この装置を使って、流出波形の立ち上り、低減特性を検討するためのステップ波（継続時間の長い矩形波）、流出ピークを検討するためのパルス波（短い矩形波）を基本降雨波形として、2者の合わさった複合波、その他の波形で20～200mm/hの雨を降らせ、比較・検討した。

降雨強度の測定には模型内に3台の転倒マス型雨量計を設置した。しかし、数分～数十分の現象に対しての雨量計の応答速度および降雨装置のノズル散水方法から来る問題点のために、必ずしも有効なデータとはなり得なかった。

流出量の測定は、集水路末端で直角三角ゼキを用いて行なった。セキ水位は触針式水位計（本体測定精度

0.1 mm) で測定した。流出が単時間に起こるためにセキ内の貯留が流出波形を変形させる割合が大きいので、その補正を行なう必要があった。

2-3 実験結果及び考察

(ア) 降雨強度による違い：図3に、水路0本の模型に20, 50, 100, 150, 200 mm/hのステップ波を予定して散水した例を示す。上の図で横軸は時間、縦軸は流出量である。下の図の縦軸は流出が平衡になった時の流出量に対する各時点の流出量の割合で示してある。降雨強度により波形が異なるのは流出の非線形性を表わしている。降雨強度が強い程、立ち上り、低減共に急で、つまり急激に増水し、減水する。これは雨水流が等速度でないことに起因する。流れをもしマニング則と仮定すると、流速は水深のほぼ $2/3$ 乗に比例する。一般に、降雨強度が強い程流域内各点の水深は深くなるから、流速は速くなる。このために、降雨強度が大なる程流出は急激に増大し、減水する。

(イ) 立ち上り時間：図4に各模型にステップ波を加えた場合の流出の立ち上り部において、平衡状態の流出量に対して10%から90%まで上昇するに要した時間を示す。一般に使われている洪水の到達時間とは異なるが、平衡状態の時刻の判定には数分近い個人差が出るのでこの方法によった。なお、横軸はそれぞれ平衡時の流出量である。降雨強度が大なる程立ち上り時間は短い。この傾向はいずれの水路網密度でも同様な傾向を示す。水路本数が多い程、すなわち水路網密度が高い程立ち上り時間は短い。これは低減部においても同様であった。水路網密度が増すことは斜面上の距離が短くなることを意味する。この短くなった分に対応して水路内の流下距離は長くなるが、勾配・水深により水路は斜面よりもはるかに流速が速いので、この流速の差により立ち上り時間が短くなる。図4中の実線・破線等は平衡状態でマニングの等流を仮定して、斜面・水路の90%遠点から10%遠点まで流下するに要する時間を計算したものである。計算の前提が異なるため、実験値と計算値は一致しないが、その傾向は同様である。

(ウ) パルス降雨の流出：図5に50, 100, 200 mm/hのパルス波を加えた場合のハイドログラフの比較を示す。ただし、この例では降雨装置の応答の限界付近なので、時間に関しては若干の誤差を含んでいる。水路網密度が増すとピーク流量が高くなり、ピーク発生時刻が早くなる。到達時間の短縮と共に、従水路からの洪水流が集水路にて重ね合わされるために起こるものである。降雨ピークから流出ピークまでの時間を2倍して洪水到達時間とし、合理式でピーク流出を求めると図5右に示したような流出高になり、いくらか実験ピークより低くなる。実験で与えた波形が極端な集中形(3分間以外は雨量0というような)であるために、平均を求める合理式よりは大きくなったものであろう。

(エ) 氾濫の影響：図6に水路勾配1/1000、従水路2本で斜面から従水路底までの高さのみが異なる2種の模型で、ステップ波を加えた場合の立ち上り時間の比較を示す。20, 50 mm/hでは両者にほとんど差はないが、100 mm/h以上では明瞭な差が出ている。斜面上から従水路底までの比高の小さい模型では、100 mm/h以上の雨量を加えると従水路から斜面上まで顕著に氾濫するために、斜面上の貯留量が多くなり、立ち上りが遅れるためである。これは古くより洪水時に定性的に指摘されていることで、今の場合には都市内氾濫が下流の洪水波形へ及ぼす影響の定量的説明として評価されよう。

3. 不定流解析

本研究の目的である水路網密度の影響を評価するには物理的意味の明確な数式モデルを利用して流出現象を理解することにより、実験結果を現場へ適用することができる。この意味で、ここでは水理学的に導かれ、各パラメーターの物理的意味がある程度明確である不定流解析法を使用して流出現象の理解を試みた。

3-1 基礎式

不定流解析に使用される基礎式は連続の式として、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial x} = q \quad (1)$$

運動の式として、

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S + \frac{n^2 |u| u}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

である。ここに、 A ：流れ断面積、 Q ：流量、 q ：単位長当りの横流入量、 u ：流速、 g ：重力加速度、 h ：水深、 S ：河床勾配、 n ：粗度係数、 R ：径深である。

ここで使用した差分解法では、近年、電算システムの発達により計算労力から見るとたいして差はないが、一般に項が増える程初期条件・境界条件が複雑となり計算はやりにくくなる。ここでは、現場への適用も考慮して斜面上の流れは4項、5項のみ、すなわち、

$$-S + \frac{n^2 |u| u}{R^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

とし、水路内の流れは(2)式をそのまま使用することにした。

(1)と(2)又は(3)式の解法には差分法を用いた。差分の取り方には種々の方法があるが、実際の物理現象、基礎式の適用限界、計算の安定性等を考慮して、次式のように差分化した。(参考：木下：第24回年講、Ⅱ-23)

(1)式は、

$$\frac{{}_{i+1}A_j}{\Delta t} + \frac{{}_iQ_j - {}_iQ_{j-1}}{\Delta x} - {}_iQ_j = 0 \quad (1)'$$

(2)式は

$$\frac{{}_i u_j - {}_{i-1} u_j}{g \Delta t} + \frac{{}_i u_{j+1}^2 - {}_i u_j^2}{2g \Delta x} + \frac{{}_i h_{j+1} - {}_i h_j}{\Delta x} - S + \frac{n^2 |{}_i u_j| {}_i u_j}{{}_i R_j^{4/3}} = 0 \quad (2)'$$

(3)式は

$$-S + \frac{n^2 |{}_i u_j| {}_i u_j}{{}_i R_j^{4/3}} = 0 \quad (3)'$$

斜面上の流れは(1)'と(3)', 水路内の流れは(1)'と(2)'を連立させて解いた。

3-2 計算結果及び考察

差分方程式は微分方程式の近似式であるために、この実験のような矩形波が入力となる場合には差分式の応答の悪さにより差が表われてくる。従って、 Δt 、 Δx の取り方により流出波形に幾分差が生じてくる。特にパルス波の場合はピーク直後でその差が顕著である。ただし、これは斜面の流出波形で、斜面からの流入が入力となる水路では流出波形にはほとんど差を生じない。種々の Δt 、 Δx で計算を行なってみたが、実験結果と比較的よく一致する $\Delta t = 1 \text{ sec}$ 、 $\Delta x = 2^m$ (斜面)、 1.51 m (従水路)を取った。

粗度係数 n は一般にモルタル張り水路では $n = 0.011 \sim 0.015$ と言われているが、今回の実験では横流入がある所以この値にはならない。平衡状態の実験結果を背水計算で検討してみると、水路末端部付近を除き $n = 0.023$ が

図7に示すように、最も水面勾配と適合性が良い。しかし、流出波形にきてくるのは流域内の貯留量であり、流出のシミュレートをするためには、水位よりも流域内の貯留量が合うように決めるべきであると考え、 $n = 0.015$ に取った。

降雨入力波形は、雨量計の測定誤差、セキの測定誤差及び若干の損失があるために、平衡時にセキで測定された流出量を降雨強度とし、それが、矩形的に降ったと仮定した。実際、雨量計の測定値をそのまま降雨入力とすると、パルス波はもちろんステップ波の平衡状態の値も実験値との間にかんりの違いが生ずる。

水路の境界条件は上流端で流量 $Q = 0$ ，流速 $u = 0$ ，下流端で流速 $u = K\sqrt{2gh}$ ととった。

図8に、水路0本、ステップ波20、50、100、150、200 mm/h の場合のこのようにして得られた計算値と実験値の比較を示してある。計算値と実験値の適合は良い。

4. 結 論

この実験の例ではまだ不十分であるが、降雨強度の増加による到達時間の短縮、水路網密度の増加による洪水波形の先鋭化等が実験的に明らかになり、これを数値的にシミュレートするときの問題も明らかになった。水路網密度を例えば2倍にしたらピーク流量は何倍になるかは斜面と水路との流速の比のようなもので決まるわけで、水路の流速が大きいほど倍率は2に近づくわけである。これを基にして今後、実際に起こっている洪水先鋭化について解析を進め、その実用的な推算法を明らかにしたい。

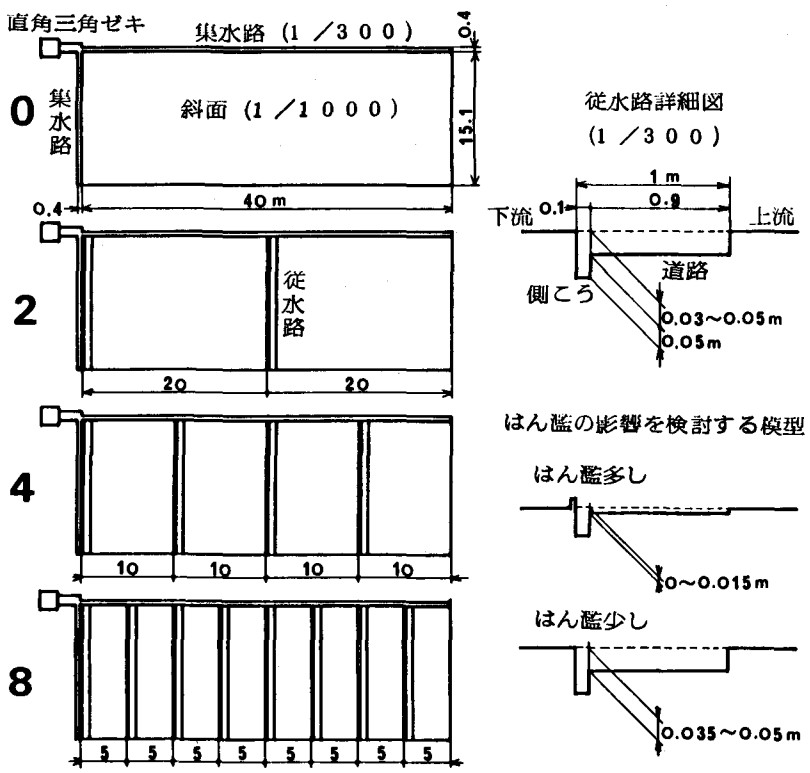
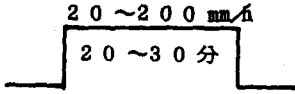
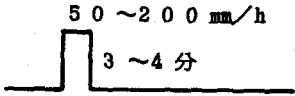


図1. 実験模型

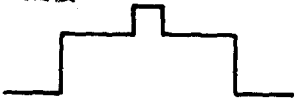
ステップ波



パルス波



複合波



その他

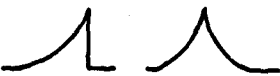


図2. 降雨波形

水路本数 0

降雨強度

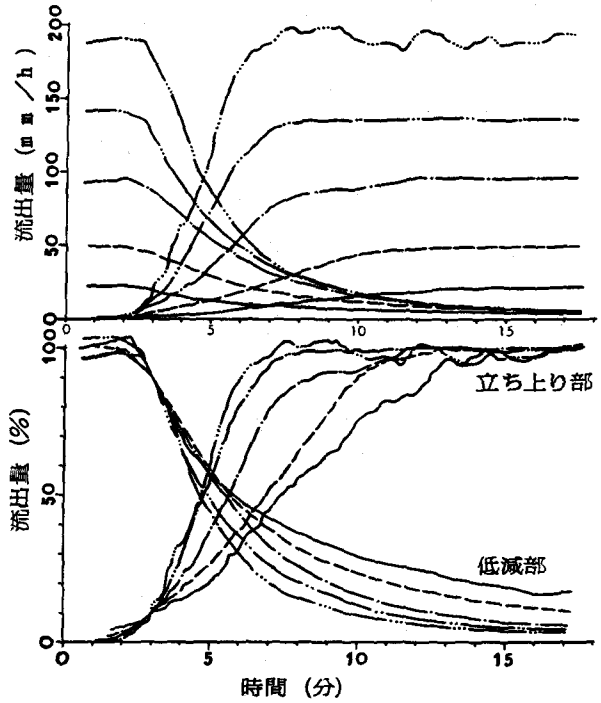
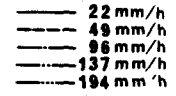


図3. ステップ波に対する立ち上がり低減特性

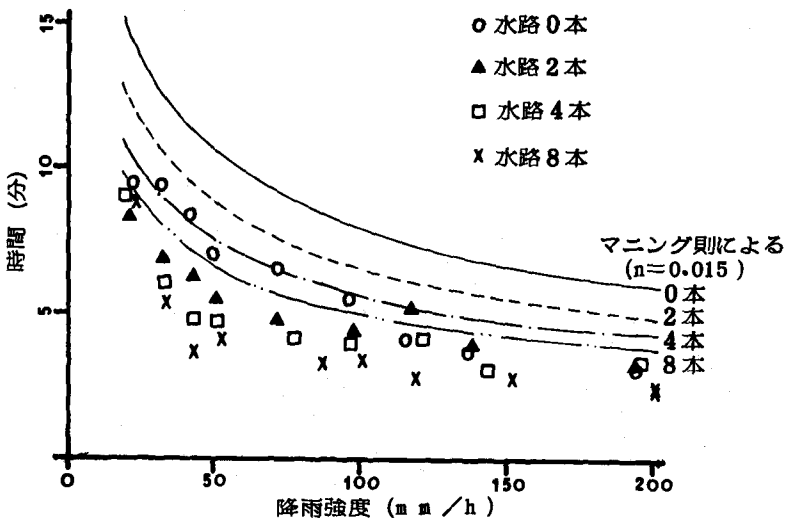


図4. 10 ~ 90%の立ち上がり時間

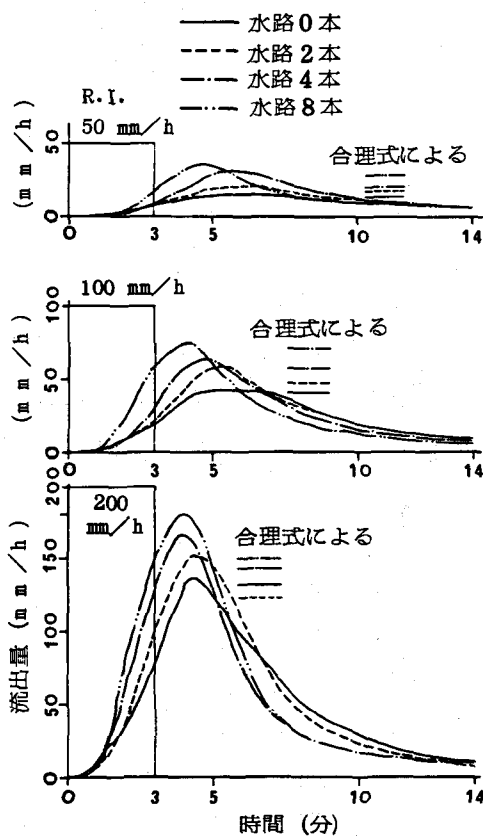


図5. パルス降雨の流出

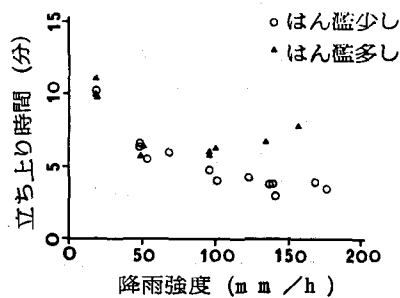


図6. はん濫の影響

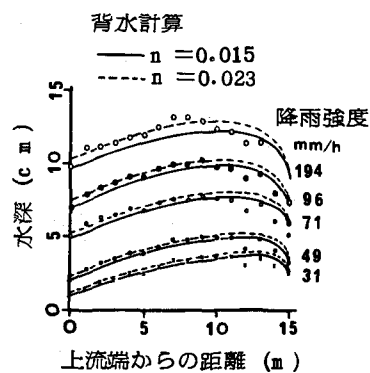


図7. 集水路水深

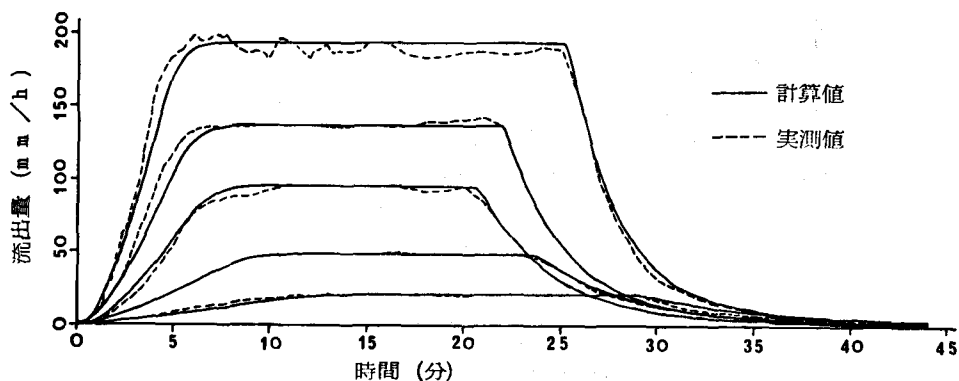


図8. シミュレーション結果