表面流出に及ぼす排水路の影響について－水理実験と数値実験－

著者	福囿 輝旗
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	26
ページ	63-72
発行年	1981-11
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000850

国立防災科学技術センター研究報告　第26号　1981年11月

556　556.16:626.862.4

表面流出に及ぼす排水路の影響について
— 水理実験と数値実験 —

福　囿　輝　旗*

国立防災科学技術センター

On the Effect of Channel Density on Surface Runoff
–Hydraulic Experiment and Computer Simulation–

By

Teruki Fukuzono

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Through recent development of land use both in rural and urban areas, drainage channel networks have increased considerably. Drainage density and changes in it affect the runoff process, especially surface runoff. It has been found that the development of drainage systems results in a shorter time of concentration and larger peak discharge of flood runoff than before. In order to confirm these effects, large-scale hydraulic experiments and computer simulations by using hydraulic equations of open channels are very useful, and do not have such drawbacks of observations that would require a certain amount of investment and a considerable duration for obtaining adequate data.

An experimental plot, 40 m in length, 15.1 m in width, and 1/1000 in gradient, was constructed of mortar. On the plot, the number of channels (i.e. channel density) is variable and time distributions of artifitial rainfall can be controlled (Fig. 1).

A summary of the results follows.

Heavier rainfall induces a shorter rising time for runoff (Fig. 2).

The more channels there are, the shorter is the rising time for runoff (Fig. 3).

The more channels there are, the higher is the peak and the shorter is the time of concentration of runoff (Fig. 4).

These results are confirmed also by computer simulation (Fig. 3).

Unsteady flow analysis is found to be useful for examining the effects of channels (Figs. 6 & 7). Some detailed procedures related to this computation are discussed (Figs. 8–15).

A further development of this theme is expected, judged from the close agreement of the results of computer simulation with those of hydraulic experiment.

1. はじめに

最近，流域の都市化による流出パターンの変化，特に洪水到達時間の短縮等が指摘され（高村ら，1977），防災上，重要な問題として注目されている．流出パターンの変化に関する水

＊ 第3研究部　降雨実験室

文学上の主要因として不浸透域の増大・表面粗度の減少・湛水域の減少・河道粗度の減少等が挙げられる（木下，1972）が，下水道や道路側溝等の排水路網の発達もその一つである．排水路は平面的に拡がった雨水を集中流下させる機能を持つ．そのため，排水路網が発達するにつれ雨水流の流下速度が増すことになり，洪水の到達時間が短縮し，洪水ピークが先鋭化するわけである（木下，1967）．排水路の影響は自然流域においても，小は切土・盛土斜面等の侵食溝から大は流域の谷密度の違いによる流出波形の違い等に見られる普遍的な現象である．

このような水文現象の解明は実際の流域での観測からなされるべきであろうが，実流域での観測は多大の労力を要する上に，流域形状や浸透・貯留・水路網等の諸要因及び入力降雨波形が複雑であるために，個々の要因の作用を評価出来る程の有用な観測値を得るまでには長い期間が必要となる．そのため，要素を単純化した解析しやすい形の流域形状を作り，任意の降雨波形で実験を行ない，基本的な現象を理解した上で，実験結果の現地への適用を図りつつ，実流域の解析・検討を行なうことは有力な研究手法である．この意味で，ここでは複雑な流域の相似模型ではなく，排水路の影響を検討しやすい形に要素を単純化し，しかも，比較的大縮尺で数アールの面積を持つ流域模型による水理実験を行ない，基本的な現象を検討した．

そして，結果を現地へ適用するのに相似律ではなく，数値実験を介して行なうことにした．そのための数式モデルとして，水理学的に導かれ物理的意味が比較的明確であることと，洪水流出が連続物体としての流体の運動であることを考慮して，不定流解析法を用いることにした．この方法は河川の洪水流の追跡（木下，1955）等に主として用いられており，本研究のような水路内の流れが問題となる場合には適したモデルであると考えられる．ただし，実流域への適用に当っては流域形状・傾斜・起伏等をどのように単純化するか等解決すべき問題点は多い．

ここでは，まずその第一段階として，水理実験で用いた模型流域への適用性と適用上の問題点等を検討した．なお，水理実験は建設省土木研究所と共同で行なったものであり，その結果は木下・益倉・福囿(1979)，木下ら（1980）に詳述されているので，ここでは概略を述べるにとどめ，数値実験結果を主として報告する．

2. 水理実験

2.1 実験概略

流域形状・浸透・貯留・粗度・排水路等の要因が複雑に影響しあっている現実の流域を基本的な特性を失なうことなく解析しやすい形で単純化し，排水路の影響を強調する模型流域は次の4点を基本方針として製作した．①浸透損失は生じない（全面モルタル張りとした）．②流域は斜面・従水路（道路及び側溝）・集水路で構成される（斜面へ降った雨水は従水路

に流れ込み，さらに集水路で集中流下するようにした．なお，各流路の定義は図1による）．③各流路は水理的に解析しやすい構造とする（矩形断面とした）．④最高に都市化された流域を想定して，従水路（道路及び側溝）の面積率を最高20％とする．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，縮尺1／4程度のものを念頭において幅15.1m・長さ40m・勾配1／1000の流域模型を土木研究所が製作した．図1に示すように側方及び下流端に40cm幅の集水路・準集水路（勾配1／300・1／220）を設置した．この流域に自然状態から最高に都市化された状態までの排水路網の発達をモデル化して勾配1／300の従水路を横方向に0・2・4・8本の4段階で設置し排水路の影響を検討した（図1）．

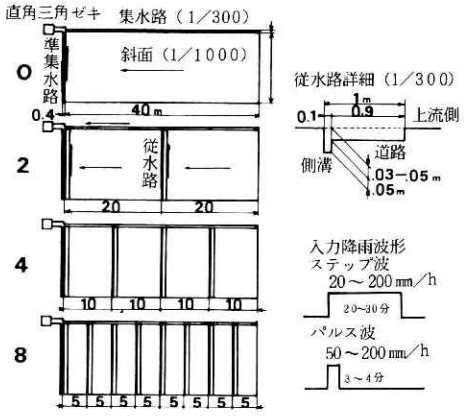


図 1　水理実験模型と入力降雨波形

Fig. 1　Hydraulic experimental plots and input rainfall patterns.

入力降雨波形は流出波形の立ち上り・低減特性を検討するための継続時間の長い矩形波（ステップ波，20～30分），流出ピークを検討するための短い矩形波（パルス波，3～4分）を基本として，20～200mm／h の降雨強度で実験をした．

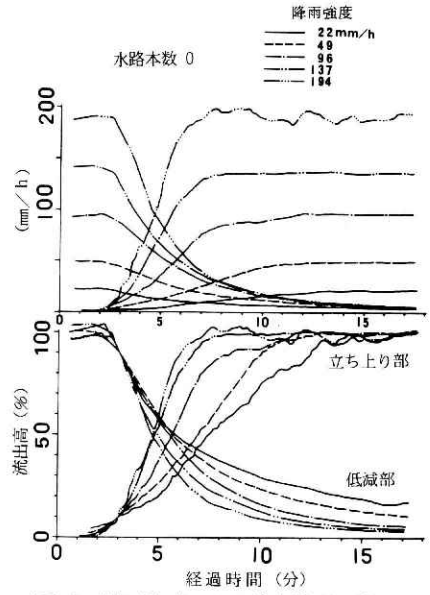


図 2　降雨強度による流出波形の違い（ステップ波）

Fig. 2　Comparison of hydrographs induced by different rainfall intensities.

2.2　実験結果

①降雨強度による違い：図2に水路0本の模型にステップ波を加えた場合の流出波形を示す．横軸は時間，縦軸は上の図が降雨強度と同じ次元（mm／h）で表わした流出高，下の図が平衡時の流出高に対する割合（%）で示してある．下の図において，降雨強度が大なる程，立ち上り・低減共に急で，つまり急激に増水し，減水することがわかる．これは流速が水深（降雨強度が大なる程水深は大きい）の関数であるからであり，降雨入力に対して流出が非線形に応答することを示している．このことは水路2・4・8本の模型でも同じである．

②立ち上り時間：ステップ波を加えた場合の立ち上り部において，平衡時流出量の10％を

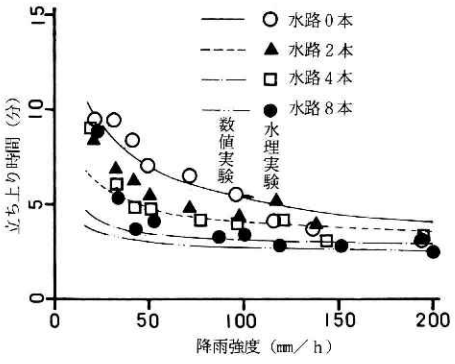


図 3　立ち上り時間

Fig. 3　Rising times of hydrographs corresponding to different rainfall intensities and channel densities.

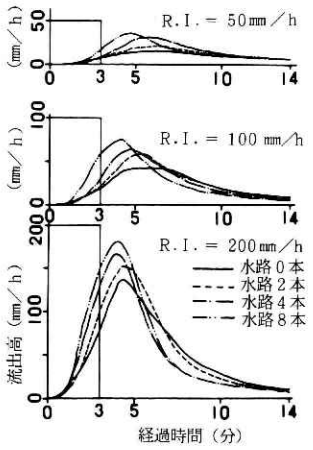


図 4　水路本数による流出波形の違い

Fig. 4　Comparison of hydrographs corresponding to different channel densities.

示した時から同90%まで上昇するに要した時間を立ち上り時間と定義して図3に示す．①の結果に関連して，降雨強度が大なる程立ち上り時間は短い．また，従水路本数が多くなれば立ち上り時間が短くなる．このことは洪水の到達時間が短くなることを意味する．図3中の曲線は後記数値実験で求めた立ち上り時間である．両実験とも上記結果をよく表わしている．

③パルス降雨の流出：図4にパルス波を加えた場合の流出波形の比較を示す．従水路本数が多い程，ピーク発現時刻が早く，ピーク流量が高い．3～4分のパルス波は大型降雨装置の応答限界付近なので，時間・降雨強度等に幾分かの誤差を含むが，明らかに，従水路本数が増えると洪水の到達時間が短くなり，ピーク流量が増大することが確認された．

以上，水理実験で得られた主な結果を述べた．降雨強度が大なる程到達時間が短いこと，水路本数が増すと洪水の到達時間が短くなり，ピークが高く先鋭化すること等が明らかとなった．

3. 数値実験

3.1 基礎式

前記のごとく，不定流解析法により数値実験を行なった．使用する基礎式は開水路の水理現象に関する運動の式として，

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

連続の式として

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}-q=0 \qquad (2)$$

である．

ここに，g：重力加速度，u：断面内の平均流速，h：水深，S：流路勾配，n：マニングの粗度係数，R：径深，A：流れ断面積，Q：流量，x：上流から下流への位置座標である．

(1)式の各項はそれぞれ第1項から慣性項・場の加速度項・水圧項・流路勾配・抵抗項である．(2)式は流れのある微小区間をとると，第1項が断面積の増分，第2項が流出，第3項が流入を表わしている．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．また，現実の流路は複雑な形状を有し，流れ自体も(1)式の導出時に仮定された流れとは異なるから，式自体の近似度を上げても必ずしも現実の近似度の向上とはならない．そのため流路の状況とそれぞれの項の重要度を検討して，重要度の少ない項は省いて計算するのが一般的である．ここでは，従水路・準集水路・集水路上の流れは(1)式をそのまま使用することにした．次に，現実の流出現象においては，流域上の流れをマクロに見た場合に(1)式がそのまま適用出来るとは思われない．むしろもっと簡単な形で適用性を考慮した方がよい．その意味で斜面上の流れは4項・5項のみとした．すなわち等流である．

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

(1)～(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，(2)，(1)，(3)式をそれぞれ(4)，(5)，(6)式のように差分化した．

$$\frac{{}_{i+1}A_j-{}_iA_j}{\Delta t}+\frac{{}_iQ_j-{}_iQ_{j-1}}{\Delta x}-{}_iq_j=0 \tag{4}$$

$$\frac{{}_iu_j-{}_{i-1}u_j}{g\cdot\Delta t}+\frac{{}_iu^2{}_{j+1}-{}_iu^2{}_j}{2g\cdot\Delta x}+\frac{{}_ih_{j+1}-{}_ih_j}{\Delta x}-S+\frac{n^2|{}_iu_j|{}_iu_j}{{}_iR_j{}^{4/3}}=0 \tag{5}$$

$$-S+\frac{n^2|{}_iu_j|{}_iu_j}{{}_iR_j{}^{4/3}}=0 \tag{6}$$

ただし，添字 i：t 方向の差分の番号，j：x 方向の差分の番号である．これらの詳細は伊藤剛編（1971）を参照の事．

斜面上の流れは(4)と(6)（等流計算と呼ぶ），従水路・準集水路・集水路の流れは(4)と(5)（不定流計算と呼ぶ）で計算した．

3.2 計算結果

計算を行なうに必要な係数・条件は水理実験と対応させて次の①～⑧のようにした．

①差分間隔（Δx・Δt）：本実験のような矩形波入力のもとではΔxの取り方により差分式

の応答の悪さが表われて流出波形に幾分差が生じる．これについては次節に詳述するが，Δt ＝0.5 秒，Δx ＝10等分（斜面）・1.51 m（従水路・準集水路）・2.5 m（集水路）に取った．

②境界条件：各流路とも上流端で流量 Q ＝0，流速 U ＝0，下流端でマニングの式が成り立つと仮定して流速 $U=(1/n)R^{2/3}S^{1/2}$ とした．

③初期条件：各実験の開始時の流量に相当するだけの微小降雨があり，等流で流れていると仮定し，その時の各点の水位・流速を逆算して初期値とした．この方法では，計算初期にわずかの乱れが生ずるがすぐに安定し，好結果を得た．

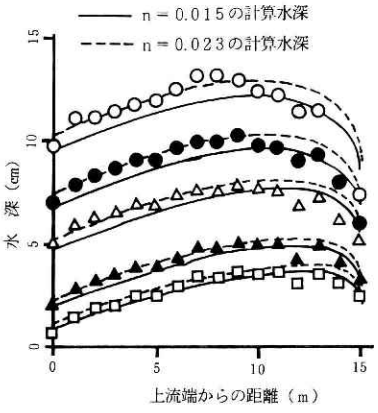


図 5　準集水路水深

Fig. 5　Comparison of the computed and measured water depths at sub-collecting channel.

④粗度係数：図5に水路0本の実験で平衡時の準集水路の水深と背水計算で求めた計算水深を示す．下流端付近を除いて最もよく適合する n ＝0.023 を従水路・準集水路・集水路では採用した．この値は一般にいわれているモルタル張り水路の粗度係数（0.011～0.015）の2倍程度の値である．本実験では横流入が流量に比して大きな割合を占めており，この分の損失により見掛け上粗度係数が大きくなるものと思われる．斜面上の流れは等流で計算するために，この値では不適当である．粗度係数は流域を単純化する際の誤差が集積されるわけであり，試行錯誤的に決められる面を持っている．斜面上の流れが最も強く影響する水路0本の模型で良く適合する n ＝0.015 を採用した．なお，この値は図5に示すように，背水計算を行なって求めた準集水路内の貯留量と水理実験での貯留量とがほぼ等しくなる値である．

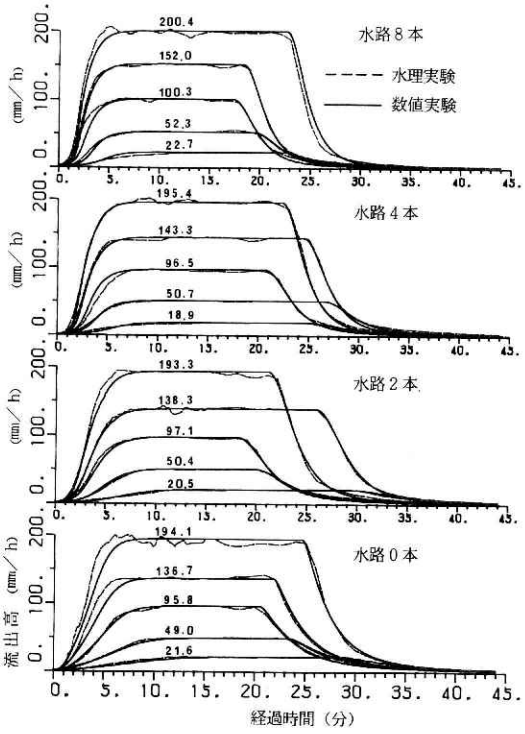


図 6　水理実験と数値実験の比較（ステップ波）

Fig. 6　Comparison between experimentally obtained and computer hydrographs (step rainfalls).

⑤入力降雨波形：実験中は3台の転倒マス型雨量計で降雨強度を測定したが，その測定値を入力降雨波形とすると，雨量計の測定誤差・セキの流出量測定誤差・境界からの流出入・降雨装置のノズル散水方法から生ずる問題点等のために，パルス波はもちろんステップ波の平衡時の値もセキによる実測値との間にかなりの違いが生ずる．そのために，ステップ波の場合の平衡時にセキで測定された流出高を降雨強度とし，それが矩形波として降ったとしてこれを入力波形と決めた．

⑥従水路の流れ：図1に示すように従水路は側溝と道路の複断面である．水理実験では斜面からの雨水は，流量の少ない間はまず道路へ流入しある程度流下した後側溝へ流入し流下する．流量が多くなると道路上の流下が主となる．しかし，数値実験では現象を単純化して従水路の形状は側溝のない幅1mの矩形断面の単断面水路と見なして計算した．これは次節に詳述する．

以上のような係数・条件のもとにステップ波の場合を数値実験した結果と水理実験結果との比較を図6に示す．

水路0本の場合：立ち上り部は水理実験の方が幾分急である．特に，降雨強度が大きい場合（136.7mm／h，194.1mm／h）に差が大であるが，散水初期は降雨装置の応答性能が大きく影響する所である．また，立ち上りが急になると，流量を測定しているセキの貯留効果の影響が大きくなるために実流量の測定誤差が大きくなる．これは水路2本193.3mm／h，水路8本200.4mm／h も同様である．低減部は降雨強度大の場合に良く一致し，小さい場合には水理実験の方が幾分急である．模型斜面は入念に施工されてはいるが，やはり幾分かの凹凸があり，特に斜面中央付近は相対的に低く，降雨強度が小さい時はその部分に集中して流下していた．このために立ち上り・低減が急になったものと思われる．

水路2・4・8本の場合：降雨強度大すなわち流量大の時両者はよく一致するが，流量が少ない時は水理実験の方が立ち上り・低減共にゆるやかである．流量が多ければ従水路全体で流下するが，少ない時は斜面からの流入水が道路を斜めに横断して側溝を流下するために，数値実験の仮定と異なる流れとなりゆるやかになるものと思われる．また，水路2本97.1mm／h ・水路4本96.5mm／h・水路8本100.3・152.3・200.3mm／h等は立ち上り部で波形に数十秒のずれがある．これは，ステップ入力を加える時の大型降雨装置自体の応答性能と散水開始時刻の取り方

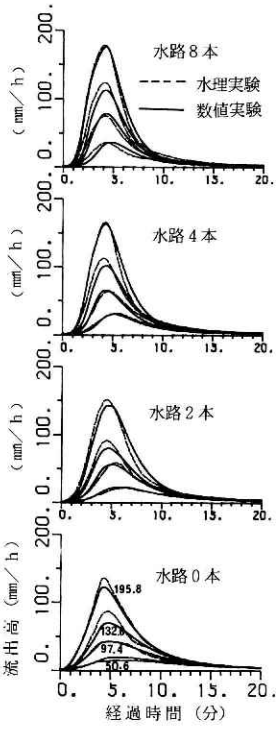


図 7　水理実験と数値実験の比較（パルス波）

Fig. 7
Comparison between experimentally obtained and computed hydrographs (impulsive rainfalls).

により生ずる差と思われる．

図7にパルス波の場合の比較を示す．降雨装置の応答性能のため3～4分の完全なパルス降雨を作るのは困難であり，時間・強度共にかなりの誤差を含んでいる．それを考慮すると両者はかなり良く一致する．

前記図3に立ち上り時間を示す．水路0本の場合は数値実験の方が長めで，水路2・4・8本の場合は短めであるが，水路本数が多くなればなる程立ち上り時間が短くなることが表わされている．なお，水路2・4・8本の場合が短めであることは特に降雨強度が小さい時に著しく，従水路内の流れの影響と思われる．

以上，こまかく見るとまだ問題点は残されているが，全体的には不定流解析法による数値実験は水理実験結果をよく表現出来ることがわかった．今後，現実の流域への適用を図りたい．

3.3　数値実験上の諸問題

この節では，数値実験を行なう時に筆者が問題と考え検討した点について，主題と直接の関係がない点もあるが，今後，実流域へ適用する際に問題となると思われるので略述する．なお，使用した模型はことわらない限り水路0本の斜面（幅15.1m×長さ40m）であり，等流計算の場合である．

①差分間隔（$\Delta t \cdot \Delta x$）の取り方：差分方程式（(4)～(6)式）は微分方程式（(1)～(3)式）の近似式であるために，本実験のような矩形波が入力となる場合には，差分間隔の取り方により流出波形に違いが生ずる．こまかく取れば取る程微分方程式の解に近づくことが予想されるが計算の不安定性と計算時間の増大という制約がある（木下，1955）．

図8にΔt＝0.1・0.5・1秒に取って計算した結果を示す．この範囲ではほとんど差はない．

図9にΔx＝1・2・4・8m（40・20・10・5分割）に取った時の計算結果を示す．立ち上り部から平衡状態に移行する付近でΔxが長くなると応答の悪さが現われ

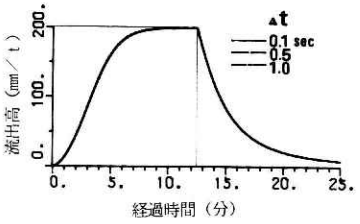


図 8　Δtの取り方による流出波形の違い

Fig. 8　Comparison of hydrographs computed for different values of Δt.

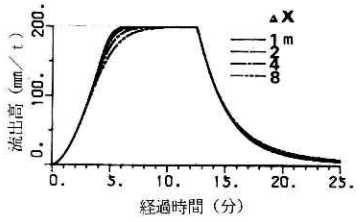


図 9　Δxの取り方による流出波形の違い（ステップ波）

Fig. 9　Comparison of hydrographs computed for different values of Δx (step rainfall).

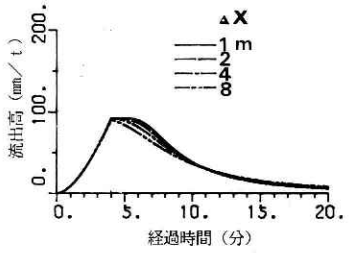


図 10　Δxの取り方による流出波形の違い（パルス波）

Fig. 10　Comparison of hydrographs computed for different values of Δx (impulsive rainfall).

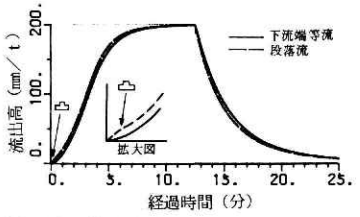


図 11　境界条件の取り方による流出波形の違い

Fig. 11　Comparison of hydrographs computed for different boundary conditions.

ている．図10にパルス波の場合を示す．斜面が長く降雨の継続時間が短い場合には，降雨停止後暫時一定流量が続く現象があり，これは，図７の水路０本５0.6 mm／h と 97.4 mm／h に見られるように水理実験でも確認される現象であって Δx をこまかく取ればこのような現象をよく表わすことになる．不定流計算した場合も Δx を大きく取ると同様に差分式の応答性が悪くなる．しかし，水路では斜面からの流出が主要な入力であるから条件はゆるやかになり，Δx の取り方による差はほとんどない．

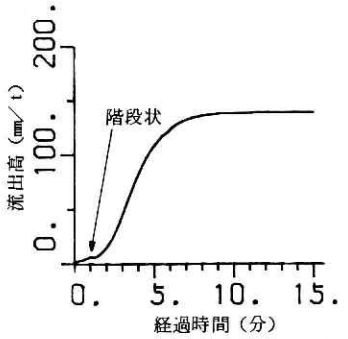


図 12　複断面水路として計算した場合の流出波形

Fig. 12　Computed hydrograph in a compound section channel.

②境界条件の取り方：不定流計算の時，はじめ下流端を段落水流と考えて境界条件を流速 $u=K\sqrt{g}\,h$（K＝0.999）とした．しかし，図11に示すように，立ち上り部に凸部が生じて実際と違った波形になる．これは，最下流端の Δx が流れでなく貯留槽のような作用をするからである．したがって，ここでは最下流端のみ等流で流れるものと仮定して計算した．こうすると，図11に示すように滑らかになる．

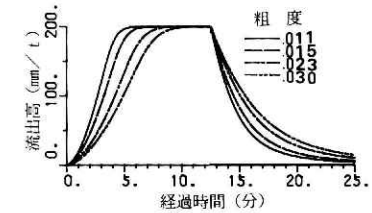


図 13　粗度係数の取り方による流出波形の違い

Fig. 13　Comparison of hydrographs computed for different coefficients of roughness.

③複断面の水路について：従水路は道路が側溝の９倍の広さを有する複断面である．雨水が側溝から道路へ拡がった瞬間に計算上径深が急減し，流量が急減する．拡大の度合が小さい場合には見掛上さほどの影響はないが，今回のように10倍にも及ぶ場合には流出波形にこの影響が現われる．図12に一例を示す．曲線が階段状になる．水理実験ではこのような現象は認められない．この影響をなくするために流れを側溝と道路の二つに分けて計算する方法もあるが，計算が複雑になる．ここでは，前節で述べたように主要な流れが道路面上であると考えて側溝がないものと仮定して計算した．

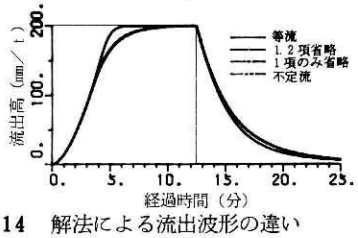


図 14　解法による流出波形の違い

Fig. 14　Comparison of hydrographs computed by different hydraulic formulas.

④粗度係数による違い：実流域への適用に当っては，粗度係数の見積りが重要な仕事である．粗度が大きくなれば流れに対する抵抗が大きくなり，水位が上昇し，貯留が増えるために流出波形はなだらかになる．図13にその度合を示す．

⑤解法による違い：図14に解法の違い（(1)式で３項まで省略，２項まで省略，１項のみ省略，全項使用の４解法）による流出波形の違いを示す．３項まで省略（等流計算）した場合は，下流の水位が上流部の流れへ影響を与えない式であるために他の３法と大きく異なり，

流出が速やかになる．また，等流計算以外ではほとんど差はない．１・２項は計算の安定性を増す方向に働くようであり，いたずらに項を増して条件を複雑にする必要はないが，近年，電算システムが発達してきたから，無理して項を削る必要もないようである．なお，準集水路では，パルス波において，項を増すと慣性力がきいてくるために，曲線がなめらかになり水理実験の流出波形に近くなるようである．この意味で，水路は全項を含んだ式，すなわち(5)式を用いた．

4. おわりに

表面流出に及ぼす排水路の影響を明らかにするために大縮尺の流域模型による水理実験と不定流解析法による数値実験を行なった．水理実験はかなり単純化した仮定のもとに行なったものであり，まだ検討すべき点は多いが，降雨強度が大なる程洪水到達時間が短いこと，排水路が密に入る程洪水ピークが先鋭化し，発現時刻が早くなること等が明らかになった．また，不定流解析法による数値実験は水理実験結果をよく表現出来ることが明らかとなり，その際の問題点等も明らかとなった．しかし，これらの結果は単純化された模型流域でのものであり，実流域への適用に当っては解決しなければならない多くの問題点が残っている．今後，これらの結果を基にして，実流域での検討を行ない，洪水防止対策に必要な実用的な洪水流出の推算法を明らかにしたい．

本報文をまとめるに当って，第１研究部木下武雄部長に適切な御助言を頂いた，末尾ながら御礼申し上げます．なお，数値実験に際しては当センターの電子計算機ＡＣＯＳ－７００を利用した．

参考文献

1) 伊藤剛編（１９７１）：数値計算の応用と基礎（水理学を中心として）．第1版，アテネ出版，143～175
2) 高村博ら（１９７７）：１９７６年９月台風第１７号による長良川地域水害調査．国立防災科学技術センター主要災害調査，No.12
3) 木下武雄（１９５５）：洪水流についての一考察．総理府資源調査会事務局，水144，河川７．
4) ―― （１９６７）：都市化による流出の変化．土木技術資料，９巻，９号，11～15
5) ―― （１９７２）：都市開発に伴う流出の変化に関する研究．防災科学技術総合研究報告，No.29，3～14
6) 木下・益倉・福囿（１９７９）：水路網密度が流出波形に及ぼす影響について．水理講演会論文集，No.24，411～416
7) 木下武雄ら（１９８０）：表面流出に関する研究（その3）．国立防災科学技術センター研究報告，No.24，87～100

（１９８１年６月８日　原稿受理）