

土地利用別の浸透能特性を考慮した都市流域の洪水流出解析
Flood Runoff Analysis for Urban Basin Considering Infiltration
Capacity of Various Land Use

東京大学工学部土木工学科 正員 ○安藤義久
東京大学工学部土木工学科 正員 高橋 裕
東京都 土木技術研究所 正員 和泉 清
建設省 関東地方建設局 正員 金尾健司

1 はじめに

本研究の目的は、前報¹⁾と同様に、都市流域の浸透域の土地利用別の浸透能特性を考慮した洪水流出モデルを提案し、その実流域への適用可能性について検討することにある。具体的には、冠字型浸透計による終期浸透能の実測値を指標として土地利用別に終期浸透能を設定した洪水流出モデルを用いて実流域（乞田川試験流域）の洪水流出の再現計算を行ない、その再現性から本モデルの実流域への適用可能性について検討することを目的としている。

なお、前報との主な相違点は次の3点である。

- (1) 有効降雨の分離において、浸透域の初期損失も考慮するように洪水モデルを改良した。
- (2) 土地利用別の終期浸透能のパラメータを設定する際、流出量の相対誤差を評価基準としてパラメーター値の最適化をはかるようにした。
- (3) 解析対象の洪水数を大幅に増やした。

2 土地利用別の浸透能特性を考慮した洪水流出モデル

ここでは、本研究で提案する土地利用別の浸透能特性を考慮した洪水流出モデルについて述べる。本モデルは、有効降雨の算定（洪水流出成分の分離）と洪水流出成分の流下過程から構成される。前者は土地利用別の浸透能特性を考慮したモデル化を行ない、後者は基本的にはRRL法と同一の流下モデルによっている。

2-1 有効降雨の算定

有効降雨の算定は、不浸透域と浸透域に分けて行なう。 (a) 不浸透域

(1) 不浸透域

不浸透域の損失降雨としては初期損失 L_{imp} のみを設定する。これはコンクリートやアスファルト面の初期吸水と凹地貯留である。不浸透域へ降った雨水は、図1(a)に示すように初期損失 L_{imp} を満たした後、全量が有効降雨となる。すなわち、降雨の時系列を $r(t)$ 、不浸透域における有効降雨の時系列を $r_{eimp}(t)$ とすると、

$$r_{eimp}(t) = \begin{cases} 0 & \sum r(t) \leq L_{imp} \\ r(t) & \sum r(t) > L_{imp} \end{cases} \dots\dots ①$$

となる。

初期損失量 L_{imp} の値は、TholinとKeifer²⁾により約1.6mm、山口・松原・山守³⁾により約2mmであることが示されており、本稿で対象とする多摩ニュータウン地域でも、安藤・虫明・高橋⁴⁾により約2mmであることが示されているので、本稿でもこの値を用いる。

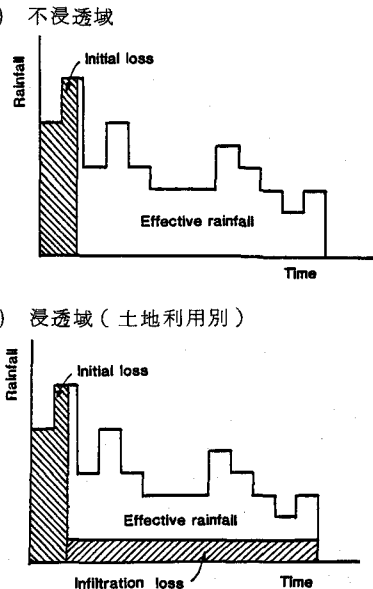


図1 有効降雨と損失降雨の分離

(2) 浸透域

浸透域の損失降雨としては、土地利用(k)ごとに初期損失 $L^{(k)}$ と終期浸透能 $i_c^{(k)}$ を設定する。具体的には、図1(b)に示すように、初期損失 $L^{(k)}$ は浸透能が終期浸透能に到達する以前の降雨初期の浸透による損失と凹地貯留による損失の和に相当し、初期損失が終了した後の降雨は終期浸透能 $i_c^{(k)}$ をこえる分が有効降雨となる。したがって、土地利用(k)における有効降雨の時系列 $r_{ep}^{(k)}(t)$ は、

$$\sum_t r(t) \leq L^{(k)} \text{ ならば} \quad r_{ep}^{(k)}(t) = 0 \quad \dots\dots\dots ②$$

$$\sum_t r(t) > L^{(k)} \text{ ならば} \quad r_{ep}^{(k)}(t) = \begin{cases} 0 & r(t) \leq i_c^{(k)} \\ r(t) - i_c^{(k)} & r(t) > i_c^{(k)} \end{cases} \quad \dots\dots\dots ③$$

と表わすことができる。

なお、本研究の特徴は、山口・松原・山守³⁾は浸透域に一樣な終期浸透能と局部的な凹地貯留を試行錯誤的な試算により設定しているのに対して、浸透域の土地利用別に終期浸透能を冠水型浸透計による終期浸透能を指標として設定している点である。土地利用別に終期浸透能を設定することにより、土地利用の混在する流域や土地利用の変化する流域に本モデルは適用可能であり、また実測終期浸透能を指標として土地利用ごとに終期浸透能を設定していることは試行錯誤による設定という作業を省いてある程度の決定論的扱いを可能にしたといえる。ここで、冠水型浸透計による終期浸透能の実測値を用いるのは、冠水型浸透計は比較的測定が容易であり、しかも盛谷・高橋・安藤⁵⁾により散水型浸透計の測定値と同程度の値を示すことが明らかにされているためである。

2-2 RRL法による雨水の流下過程

RRL法はWatkins⁶⁾により提案され、それを一部修正した修正RRL法が山口・松原・山守⁷⁾により提案された。そして、これらは下水管による雨水排水システムの整備された流域への適用性が確認されている。ここでは、これらをふまえた雨水の流下過程のモデル化について述べる。

まず、流域を計算時間単位 Δt ごとにN個の等到達時間域に分割し、この等到達時間域ごとに全流域面積に対する不浸透域面積率 a_j ($j=1\sim N$)、および土地利用(k)の浸透域の面積率 $b_j^{(k)}$ ($j=1\sim N$)を求める。次に、不浸透域からの流出 $I_{imp}(t)$ と浸透域からの流出 $I_p(t)$ を求め、その和として流入ハイドログラフ $I(t)$ を求める。すなわち、

$$I(t) = I_{imp}(t) + I_p(t) \quad \dots\dots\dots ④$$

である。不浸透域からの流出 $I_{imp}(t)$ は、

$$I_{imp}(t) = a_1 \cdot r_{imp}(t) + a_2 \cdot r_{imp}(t-1) + \dots\dots + a_N \cdot r_{imp}(t-N+1) \quad \dots\dots\dots ⑤$$

で表わされ、浸透域からの流出 $I_p(t)$ は

$$I_p(t) = \sum_k b_1^{(k)} \cdot r_{ep}^{(k)}(t) + \sum_k b_2^{(k)} \cdot r_{ep}^{(k)}(t-1) + \dots\dots + \sum_k b_N^{(k)} \cdot r_{ep}^{(k)}(t-N+1) \quad \dots\dots\dots ⑥$$

で表わされる。

最後に、貯留量-流出量曲線(以下S-Q曲線とする)を導入し、貯留現象をモデル化する。貯留量を $S(t)$ 、流出ハイドログラフを $Q(t)$ とし、実測洪水の降雨終了後の減水部より得られる⑦式に示すS-Q曲線を用いて⑧式に示す連続式を差分化して数値的に解くことにより計算ハイドログラフを算出する。

$$S(t) = K \cdot Q(t)^p \quad \dots\dots\dots ⑦$$

ただし、Kとpは定数である。

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad \dots\dots\dots ⑧$$

3. 実流域へのモデルの適用

前述した洪水流出モデルの実流域への適用可能性を検討するために乞田川試験流域を対象として洪水流出の再現計算を行なった。

3-1 乞田川試験流域の概要

乞田川試験流域は、東京都の西南部の関東ローム丘陵である多摩丘陵内に存在する。流域の概要を図2に示すが、流域は多摩ニュータウン区域内に位置し、都市化が急激に進行している地域である。流域の雨水排除は分流式下水道の雨水管と改修された乞田川本川により行なわれている。流域面積は12.81km²で、流域内の土地利用は表1に示すように主に宅地・道路・公園・学校・造成地等であり、一部に林地・畑地等の土地利用も残っている。図2には、今回解析に使用した流域内外の水文観測点の位置を示す。これらの水文観測は東京都土木技術研究所（永山観測所は住宅都市整備公団）により行なわれており、雨量と流量の記録は10分ごとのデータとして整理されている。

3-2 対象洪水

本流域の洪水流出解析において対象とした洪水は、1980年から1982年までに観測された洪水のうち、各年上位10番目程度までの雨量規模の洪水である。このうち、複数の雨量観測所間の記録に大きな相異がみられ、降雨の偏在が明らかに認められる洪水は除外し、表2に示す22洪水を解析対象とした。なお、流域平均雨量はティーンセン法により求めた。

表1 乞田川試験流域の土地利用

土 地 利 用	面積(km ²)	面積率(%)
独 立 住 宅	1.00	7.8
中 ・ 高 層 住 宅	1.50	11.7
公共施設・低層住宅	0.28	2.2
道 路	1.08	8.4
学 校	0.40	3.1
公 園 ・ 緑 地	0.27	2.1
造 成 地	6.54	51.1
畑 地 ・ 林 地	1.74	13.6
合 計	12.81	100.0

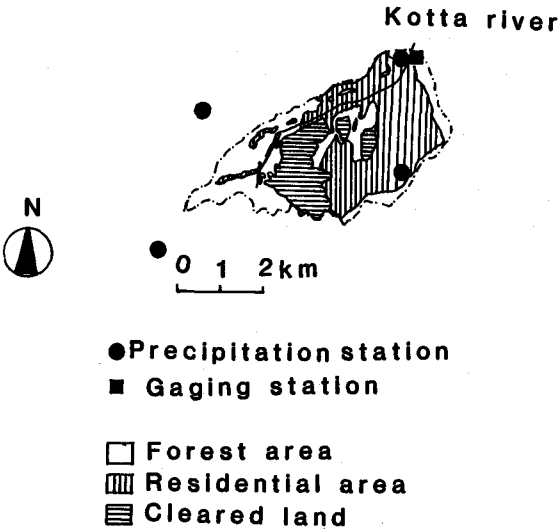


図2 乞田川試験流域の概要

表2 対象洪水

№	年 月 日	総雨量(mm)	総流出量(mm)
1	1980年 1月 28日	22.7	4.0
2	1980年 3月 29日	48.4	17.3
3	1980年 7月 30日	40.2	13.8
4	1980年 8月 26日	61.5	18.7
5	1980年 9月 10日	108.5	53.9
6	1980年 9月 26日	60.5	25.1
7	1980年 11月 21日	66.0	30.3
8	1981年 3月 14日	14.5	3.1
9	1981年 3月 15日	30.5	16.1
10	1981年 3月 21日	34.5	12.5
11	1981年 4月 19日	77.5	51.3
12	1981年 5月 7日	39.0	21.5
13	1981年 7月 30日	60.5	30.7
14	1981年 8月 22日	84.5	36.8
15	1981年 9月 19日	36.5	15.8
16	1981年 9月 25日	22.2	6.9
17	1981年 10月 22日	184.4	145.7
18	1981年 11月 2日	46.5	15.8
19	1982年 4月 15日	72.8	45.0
20	1982年 6月 3日	59.7	33.0
21	1982年 9月 11日	263.4	172.0
22	1982年 10月 7日	65.6	17.1

3-3 解析方法

ここでは、解析の際に必要な各種のパラメータの算定法および計算条件等について説明を加える。モデルの適用にあたって必要となる項目は大きく分けて次の4項目に整理できる。(1) 到達時間の算定、(2) 土地利用の区分と面積の算定、(3) 貯留量-流出量関係(S-Q曲線)の算定、(4) 土地利用別の終期浸透能および初期損失の設定。ここでは、(1)、(2)、(3)の項目について説明を加え、(4)については解析結果からのフィード・バックを必要とし、解析結果と不可分であるから次節で述べる。

(1) 到達時間の算定

分流水下道の雨水管については、マンニング式より求めた満管流速により到達時間の算定を行なった。ここで、マンニングの粗度係数はコンクリート管の代表値である0.013という値を採用した。乞田川本川についても、マンニング式により流速を求め、到達時間の算定を行なった。ここで、本川河道におけるマンニングの粗度係数は洪水時の流量観測の結果から0.026とした。以上のような到達時間の算定方法に従い、流域内の各地点から流域の出口までの到達時間を求め、図3に示すように流域を計算時間単位(10分)ごとの等到達時間域に分割した。

(2) 土地利用の区分と面積の算定

土地利用の区分は、その浸透能特性を基準として行なう。まず、雨水の浸透の可能性により不浸透域と浸透域に大分類し、浸透域についてはさらに浸透能特性に応じて分類を行なう。本流域においては、流域内の各種の土地利用について安藤・岡本・金尾・管⁸⁾により冠水型浸透計を用いて測定された終期浸透能の値の階級別に表3に示す4つに区分した。後に説明する土地利用別の終期浸透能および初期損失の設定はこの区分ごとに行なう。また、これらの土地利用の面積の算定は、地図と航空写真を用いて行なう。表4には、等到達時間域毎の各土地利用区分の面積率を示す。

(3) 貯留量-流出量関係(S-Q曲線)の算定

S-Q曲線の推定には、実測洪水の降雨終了後のハイドログラフの減水部を利用して、⑦式のK、pを求める。図4には、S-Q曲線を示すが、本流域では

$$S = 4.6 Q^{0.83} \quad \dots \textcircled{9}$$

となった。図によると実測流出高は最大1.5mm/10minであるが、これ以上の流出高にも⑨式を適用する。

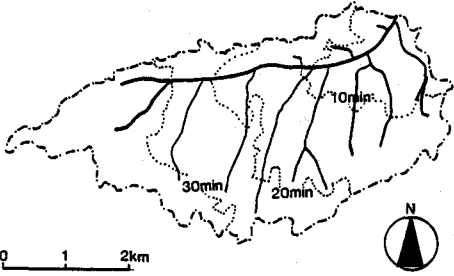


図3 10分ごとの等到達時間域図

表3 実測終期浸透能を指標とした土地利用区分

土 地 利 用	終期浸透能 (mm/hr)
不浸透域	
浸 透 域	
運動場・造成地	0 ~ 7
住宅棟間の芝生地	0 ~ 40(600)
公園内の草地	0 ~ 300
畑・林・果樹園	350 ~ 1200

表4 等到達時間域毎の各土地利用区分の面積率

到達時間(分)	0~10	10~20	20~30	30~40
土地利用				
不 浸 透 域	0.034	0.098	0.074	0.001
運動場・造成地	0.088	0.179	0.180	0.056
住宅棟間の芝生地	0.034	0.058	0.042	0.001
公園内の草地	0.001	0.011	0.005	0.0
畑・林・果樹園	0.0	0.0	0.0	0.135

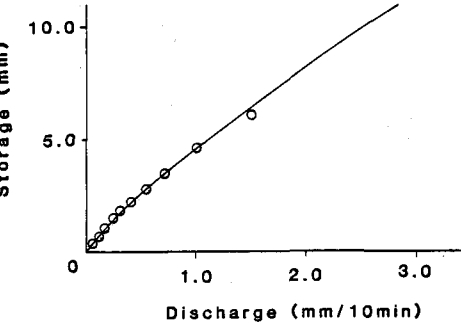


図4 貯留量-流出量関係(S-Q曲線)

3-4 解析結果と考察

ここでは、まず、土地利用別の初期損失と終期浸透能の設定方法およびその設定値の妥当性の検討について述べ、さらに、このような設定値のもとに行なった対象洪水の再現計算結果について考察を加える。

(1) 初期損失値の設定

不浸透域の初期損失 L_{imp} は、前述したように 2mm とする。浸透域の初期損失は、実測の洪水記録から推定する。この場合、流域内に占める面積率が大きく、しかも終期浸透能が降雨強度より小さいと考えられる土地利用についてのみ推定が可能であり、推定する必要があると考えられる。したがって、本流域ではこのような条件を満たす運動場・造成地のみに初期損失を設定する。実測洪水記録からの推定法は、実測洪水ハイドログラフが不浸透域からの流出から離れて立ち上がる時点を経過域からの流出開始時点として、これ以前の降雨を初期損失と仮定する方法である。これによると、初期損失量は最大で 16mm 程度であり、洪水によって異なるという結果が得られた。初期損失量は洪水前の種々の水文条件の履歴によって支配されると考えられるので、ここでは洪水ごとに前述の方法で推定された初期損失の値を設定値とした。

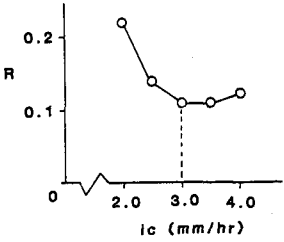
(2) 終期浸透能値の設定

終期浸透能値は、その値が小さいと考えられる土地利用区分から順次設定していく。すなわち、運動場・造成地の終期浸透能値はその実測終期浸透能値より 10mm/hr 以下と推察されるので、まず降雨強度が 10mm/hr を越えることが極めて稀な洪水を抽出し、これらの洪水について終期浸透能の設定値ごとに総流出量の実測値と計算値の相対誤差を求め、この相対誤差の平均値 R を最小とするような値を採用する。その結果、図 5 (a) に示すように、運動場・造成地の終期浸透能値は 3mm/hr と設定した。残りの洪水を対象として、運動場・造成地の浸透能値を 3mm/hr と固定して、住宅棟間の芝生地の浸透能値を相対誤差の平均値が最小となるように試算により求めたところ、図 5 (b) に示すように 16mm/hr という値が得られた。今回の対象洪水では降雨強度が 50mm/hr をこえることが極めて少なかったため、これ以上の浸透能値を有する土地利用区分の終期浸透能値については、実測終期浸透能値を指標として表 5 に示すように設定したが、検証されてはいない。

(3) 再現計算結果と考察

以上のように設定した初期損失と終期浸透能の値を用いて表 2 に示す 22 洪水を対象として洪水流出の再現計算を

(a) 造成地・運動場



(b) 住棟間の芝生地

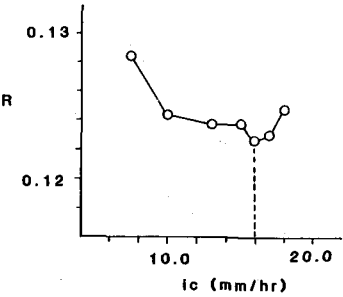


図 5 設定終期浸透能と流量の相対誤差

表 5 土地利用別の終期浸透能の設定値

土 地 利 用	終期浸透能(mm/hr)
運 動 場 ・ 造 成 地	3
住 宅 棟 間 の 芝 生 地	16
公 園 内 の 草 地	70
畑 地 ・ 林 地 ・ 果 樹 園	350

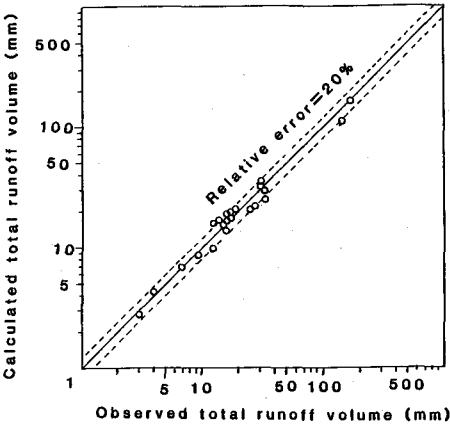


図 6 総流出量の計算値と実測値

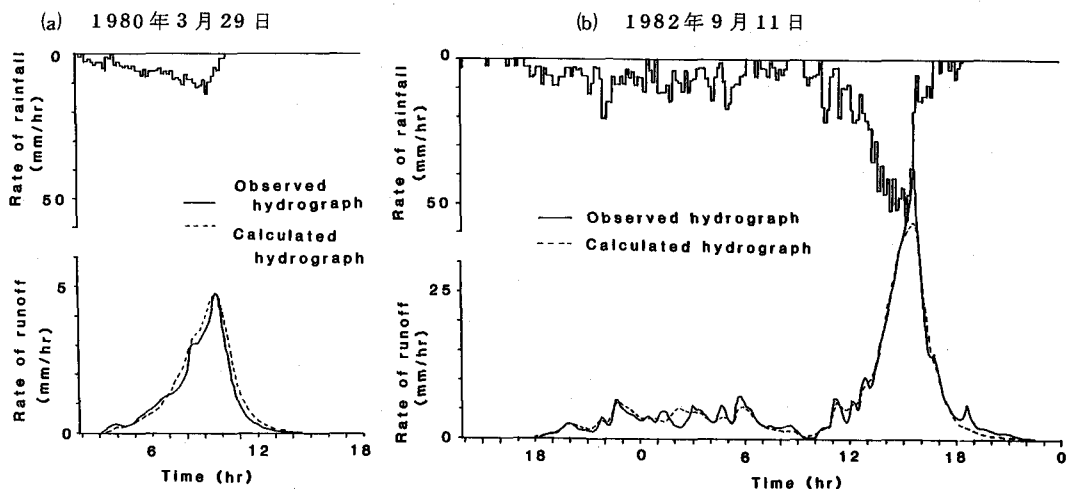


図7 ハイドログラフの計算値と実測値

行なったところ、総流出量の実測値を計算値の比較を行なうと、図6に示すように相対誤差はほぼ2割以内におさまっていることがわかる。また、ハイドログラフの計算値と実測値の比較を図7に例示するが、計算ハイドログラフは実測ハイドログラフとほぼ一致し、再現性は良好であるといえる。

4 結論と今後の課題

以上のことから、冠水型浸透計による終期浸透能の実測値を指標として土地利用別に終期浸透能を設定した洪水流出モデルが実流域へ適用可能であることが示されたといえる。

今後、終期浸透能の測定地点をふやし、終期浸透能の実測値から直接的にモデルの終期浸透能を推定する方法について検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 安藤義久・高橋裕・金尾健司・菅明芳：土地利用別の浸透能実測値を用いた都市流域の洪水流出解析，第27回水理講演会論文集，pp.49～54，1983.
- 2) Tholin, A.L., and C.J. Keifer：The hydrology of urban runoff，Trans. Am. Soc. Civil Engrs., vol.125, pp.1308～1379, 1960.
- 3) 山口高志・松原重昭・山守隆：都市流出調査—降雨損失機構の検討—，土木技術資料，vol.13, No.10, pp.11～15, 1970.
- 4) 安藤義久・虫明功臣・高橋裕：丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響，第25回水理講演会論文集，pp.197～208, 1981.
- 5) 盛谷明弘・高橋裕・安藤義久：流域地表面の浸透能の測定法の相互比較，土木学会第39回年次学術講演会概要集，第2部門，pp.25～26, 1984.
- 6) Watkins, L.H.：The design of urban sewer systems，Road Research Laboratory Paper No.55, Dept. of Scientific and Industrial Research, London, HMSO, 1962.
- 7) 山口高志・松原重昭・山守隆：都市における降雨流出調査 第2報—修正RRL法による流出推定—，土木技術資料，vol.14, No.11, pp.34～39, 1972.
- 8) 安藤義久・岡本哲夫・金尾健司・菅明芳：土地利用別の浸透能に関する現地実験と考察，第26回水理講演会論文集，pp.307～312, 1982.