

都市河川流域における雨水浸透施設による 洪水流出制御の検討

INVESTIGATION OF FLOOD CONTROL BY RAINWATER INFILTRATION FACILITIES IN URBANIZED WATERSHED

花木俊幸¹・Agus SUHARYANTO²・杉尾 哲³
Toshiyuki HANAKI, Agus SUHARYANTO, Satoru SUGIO,
出口近士⁴・今山 清⁵
Chikashi DEGUCHI and Kiyoshi IMA YAMA

¹ 正会員 工修 宮崎大学大学院研究生 工学研究科(〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

² 正会員 博士 Brawijaya University Lecturer, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering
(Jl. MT. Haryono, 167 Malang, 65145, INDONESIA)

³ 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科(〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

⁴ 正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科(〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

⁵ 正会員 宮崎大学大学院博士後期課程 工学研究科(〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

The runoff discharge model developed for an urbanized watershed is extensively applied to examine the usefulness of the rainwater infiltration facilities to control the water level during flooding. The rainwater infiltration facilities examined are the permeable pavement and the house infiltration system. From the simulated results the followings are clarified. Reinforcement of permeability covering the pervious ground surface with the permeable pavement is ineffective to lower the water level. The peak water level is reduced by replacing the impermeable pavement with the permeable one in the parking lots. And multiple use of the rainwater infiltration facilities is effective for decreasing the occurrence of inundation by lowering the water level and is effective to delay the time of peak water level.

Key Words : rainwater infiltration facilities, percentage of impervious area, urbanized watershed, analysis of infiltration, rainfall excess, flood routing, peak water level

1. はじめに

わが国においては、今世紀後半以降の都市への人口集中に伴う急速な都市域の拡大によって、都市河川流域においては不浸透性地表面が増加して、降雨時に河川に流出する雨水の割合が急速に増大している。このような都市河川での洪水を防止するために、河川改修を進めるとともに、降雨時の雨水が河川や下水道に短時間に一挙に流出しないように、雨水を一時貯留または雨水浸透させる雨水流出抑制が進められるようになった¹⁾。

宮崎市の中心部を流れる小松川は、大雨のたびに洪水浸水を繰り返し、流域住民に甚大な被害をもたらしてきた。そこで、この都市河川の流域を対象として洪水流出数値モデルを構築し、各戸雨水貯留施設と公共雨水貯留施設による洪水流出制御効果について検討した²⁾。その結果、雨水貯留施設の導入による洪水時の河川水位の低下によって、浸水の発生を減少させる効果をもつことが

分かったが、浸水深の低下にはそれほど効果がなく、水位のピーク時間を遅らせることができないことが検討課題として残った。

本論文では、この課題を検討するために、既に構築した洪水流出数値モデルを拡張適用して、雨水浸透施設(透水性舗装、浸透ます、浸透埋管)³⁾を設置した場合の洪水流出制御効果について検討した。

雨水浸透施設による流出抑制の効果については、既に多くの研究が行なわれている^{4),5)}。しかし、これらの多くは雨水浸透施設導入後の降雨損失の変化を現地での実測に基づく浸透能と関係づけて扱っていて、地表流出と降雨浸透の相互作用を理論的に扱った研究は少なく、水理学的な検討ができていないようである⁶⁾。本論文で用いた洪水流出数値モデルは、表面流出の有効降雨の算定において、飽和—不飽和の浸透解析を行なうことと不浸透面積率を用いることに特徴があり、これを雨水浸透施設を設置した場合の降雨強度の解析に適用して、雨水浸透施設の流出抑制効果を検討している。

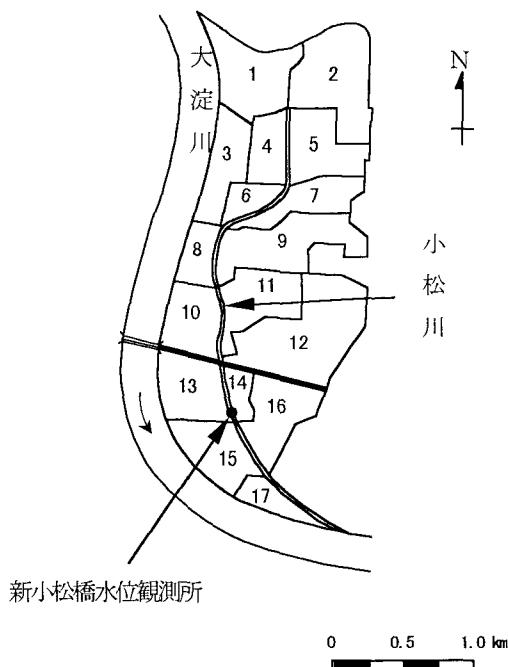


図-1 小松川流域概要図

2. 流出解析の概要

(1) 解析対象流域

宮崎市の中心部を流れている小松川は、大淀川の河口から 4.2km 地点で左岸側から合流する一次支川で、密集市街地を北から南へ流れている。流域面積は 4.99km² であったが、上流域の一部が流域変更されて 3.54km² であり、流路延長は 3.85km で、河床勾配は 1/700 程度の緩勾配である。通常時には、環境維持用水を大淀川から揚水して流さなければならないほど流量の少ない典型的な都市河川である。河道は掘込河道であり、兩岸とも堤防はなく、道路に面している。右岸側は全体的に左岸側より低い地盤標高となっており、たびたび浸水被害を受けてきたが、現在では放水路等が整備されている。

本論文では、放水路整備直前の河川を対象とし、洪水流出数値モデルでは、雨水排水系を参照して、この流域を図-1 のように 17 ブロックに分割している。

(2) 不浸透面積率

不浸透面積率とは、解析対象流域の地表面を不浸透性地表面と浸透性地表面に区別し、ブロック毎に不浸透性地表面の占める面積割合を示したものである⁷⁾。本論文では、測定に 1995 年 1 月撮影のカラー航空写真(1/5000)を用い、地表面状態の目視判読を行なって作成した白黒マップ⁸⁾をイメージスキャナで判読処理して、表-1 に示したブロック毎の不浸透面積率を求めた。ここで、表-1 の (a) はブロック内の建築物・道路・舗装駐車場等が占める不浸透面積率であり、(b) は建築物と道路が占

表-1 流域内の不浸透面積率

ブロック	(a)	(b)	ブロック	(a)	(b)
1	0.611	0.370	10	0.722	0.439
2	0.695	0.379	11	0.700	0.445
3	0.514	0.321	12	0.748	0.456
4	0.733	0.423	13	0.770	0.506
5	0.634	0.309	14	0.787	0.487
6	0.722	0.405	15	0.733	0.506
7	0.582	0.339	16	0.804	0.475
8	0.549	0.248	17	0.767	0.457
9	0.640	0.336			

める不浸透面積率を示している。したがって、(a) - (b) が舗装駐車場等の宅地内の舗装された地表面の不浸透面積率に相当する。

(3) 流出解析モデルと基礎方程式

流出解析に用いた洪水流出数値モデルは、表面流出を対象としていて、a)有効降雨モデル、b)斜面モデル、c)河道モデルの 3 つのサブモデルから構成されている²⁾。

a) 有効降雨モデル

降雨時間中の降雨損失の大部分を地表面からの浸透による損失とみなし、浸透性地表面からの浸透強度 i を飽和-不飽和浸透理論を適用して算定する。算定結果の浸透強度と降雨強度を比較し、降雨強度が大きい時に両者の差が表面流出成分になるとして、浸透性地表面での有効降雨強度 Rs を求める。その基礎方程式を式(1)に示す。

$$C(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[Ku(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial Z} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$i = -Ku(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial Z} + Ku(\varphi)$$

ここに、 φ : サクション(cm)、 $C(\varphi)$: 比水分容量、 Ku : 不飽和透水係数(cm/s) である。

解析対象流域には、公園の芝生面を利用した公共貯留施設が設けられている。この貯留施設容量 V とブロック毎の不浸透面積率 D を用いると、ブロック毎の有効降雨強度 Re は式(2)より算定される。

$V > S$ のとき

$$Re = \alpha DR + \alpha \cdot Rs \frac{Ab(1-D) - As}{Ab} \quad (2)$$

$V \leq S$ のとき

$$Re = \alpha DR + \alpha(1-D) \cdot Rs$$

ここに、 R : 10 分間降雨強度(mm/10min)、 S : 貯留施設内の降雨の蓄積貯留量、 α : 蒸発や窪地貯留などの浸透以外の降雨損失による係数(=0.85)、 Ab : ブロックの面積、 As : 公共貯留施設の面積 である。

表-2 浸透性地表面の不飽和浸透特性

	地表土壌		透水性舗装 各戸浸透施設
	上流域	下流域	
残留体積含水率	0.3	0.0001	0.0
飽和体積含水率	0.418	0.353	0.15
a	0.090	0.076	0.015
b	5.90	5.70	1.68
飽和透水係数 (cm/s)	1.7×10^{-4}	1.7×10^{-4}	0.6

浸透性地表面の不飽和浸透特性は、式(3)の Van Genuchten 式を用いて表すこととし、流域内での浸透量の原位置試験結果から同定⁹⁾した地表土壌の浸透特性と、既存の資料から想定した透水性舗装の浸透特性¹⁰⁾を、表-2に示している。

$$Se = \frac{1}{\left\{1 + (a|\phi|)^b\right\}^m}$$

$$kr = Se^{1/2} \left[1 - (1 - Se^{1/m})^m\right]^2 \quad (3)$$

$$kr = \frac{Ku}{Ks}, \quad Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{b}$$

ここに、 θ : 体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 Ks : 飽和透水係数 である。

b) 斜面モデル

流域の地表面は 8/1000 程度の勾配で小松川に向かって傾斜しており、雨水排水施設は不十分な部分が多いため、強い降雨の時には雨水が道路面を流下して河道に流入している状況にある。そこで、有効降雨モデルで求めた表面流出成分が斜面を流下して河道へ自由流入する雨水流を、ブロックを長方形に仮定して、Kinematic Wave を用いて計算する。その基礎方程式を式(4)に示す。

$$h = \left(\frac{N}{\sqrt{i_0}} \right)^{0.6} q^{0.6} \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Re$$

ここに、 N : 等価粗度係数、 i_0 : 斜面勾配、 q : 単位幅当たりの流量 である。

また、等価粗度係数は不浸透面積率 D の関数として次式で表現できるものと仮定している。

$$N = 1.1 \times 10^{-2} 4^D \quad (5)$$

なお、右岸側の一部では斜面末端に浸水が生じることから、雨水流の下流端境界条件が時間的、場所的に変化することになるが、浸水継続時間が短いことから、本解析では浸水による境界条件の変化は考慮していない。

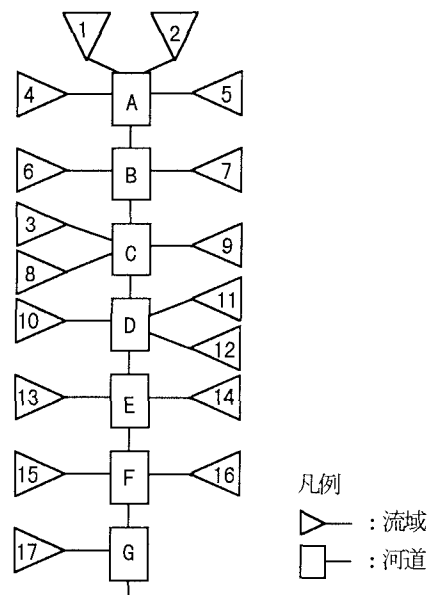


図-2 小松川流域モデル図

c) 河道モデル

流域を図-2のようにモデル化し、斜面からの横流入量を与えて、河道内を流れる流量・水深の変化を Dynamic Wave を用いて計算する。その基礎方程式を式(6)に示す。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g \left(i_0 - \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

ここに、 v : 流速、 h : 水深、 R : 径深、 i_0 : 河床勾配、 A : 流積、 Q : 流量、 n : マニングの粗度係数、 q : 斜面からの単位幅当たりの横流入量 である。

なお、浸水の発生に伴って水位の上昇が抑制されるので、計算水位が右岸側の地盤標高より高くなった場合には、右岸側川沿いの 10m 幅の部分に流水が貯水されると仮定して水深を換算している²⁾。

(4) 流出解析モデルの検証

小松川流域には雨水浸透施設が設置されていないので、雨水浸透施設による雨水流出抑制を含めた流出解析モデルの検証はできない。1993 年の地表面状況までの流出解析モデルの適応性は検証されているので²⁾、1995 年 9 月 30 日に発生した降雨について再現計算を行なうことによって、流出解析モデルを再検証することとした。この降雨においては、図-3に示した 8 時間目～9 時間目の降雨時にブロック 1 とブロック 2 に、流域変更で流域から外された上流域部分から地表水が流入したことが観察されている。したがって、この時間帯だけブロック 1 とブロック 2 の上流域部分を流域に加えて解析している¹¹⁾。

図-3 は、新小松橋水位観測所における 1 時間毎の観測値と 1995 年当時の地表面状況についての解析結果を

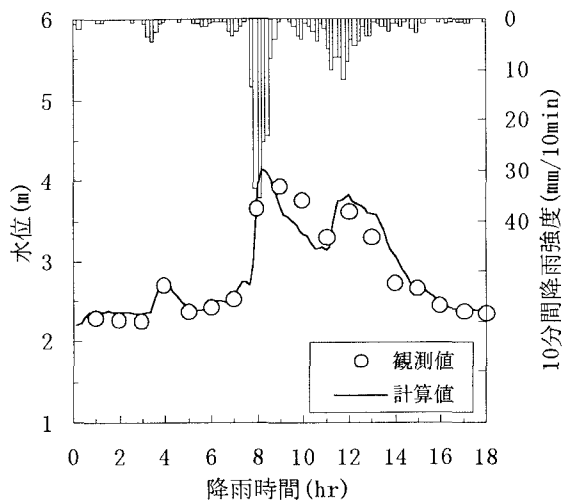


図-3 1995年9月30日降雨の水位応答

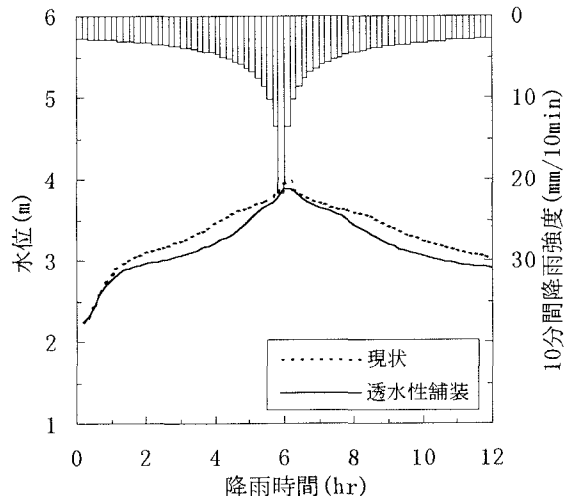


図-4 浸透性地表面の透水性舗装による水位応答

表-3 10年確率降雨(宮崎市)

降雨強度式 (t:min)	$\frac{893.46}{\sqrt{t+3.7}}$
最大10分間降雨強度 (mm/10min)	21.7
降雨継続時間 (hr)	12.0

比較したものである。その図を見ると、9時間目～10時間目の異常降雨(再現期間 1000 年超)後の低減期に観測値と計算値が一致していないが、この時間帯を除けば観測値と計算値が一致していることが分かる。この解析結果から、1995年の地表面状況での通常降雨に対する洪水流出数値モデルの妥当性が再確認できたものとする。

(5) 確率降雨

宮崎地方気象台において観測された 1924 年から 1996 年までの年最大 10 分間降雨記録をもとに、岩井法から確率水文量を求め、特性係数法による石黒形の降雨強度式を用いて確率降雨強度式を算定した²⁰⁾。小松川は、密集市街地を流れているため、河道改修の計画規模は 10 年確率程度とし、放水路や貯留施設などの整備によって 50 年確率に安全度を高める計画となっている。そこで、表-3 に示した 10 年確率降雨強度式を用いて計画降雨を求め、以下の解析の降雨データとして用いた。

3. 透水性舗装による洪水流出の制御効果

まず、雨水浸透施設として透水性舗装に着目し、その洪水流出の制御効果を評価するために、次の 2 ケースを検討した。①流域内に残っている浸透性地表面をすべて透水性舗装に置き換えた場合と、②さらに不浸透性地表面の内の舗装駐車場等の宅地内の舗装面もすべて透水性

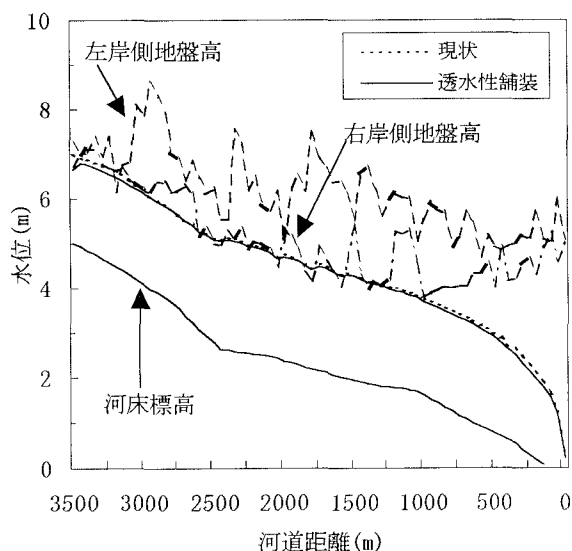


図-5 浸透性地表面の透水性舗装による水位縦断面図

舗装に置き換えた場合である。図-4, 6 は、図-1 に示す新小松橋水位観測所の位置における水位応答を示し、図-5, 7 は最高水位時の水位縦断面図を示したものである。

図-4, 5 は、ケース①の計算結果を現状と比較して示し、図-6, 7 は、ケース②の計算結果を現状および宅地内の舗装面を除去して浸透性地表面に戻した場合と比較して示したものである。なお、透水性舗装の厚さは 0.2m とした。

図-4 を見ると、浸透性地表面を透水性舗装に置換しても、最高水位は 0.07m しか低下していない。これは、図-5 の水位縦断面図に示すように、上流から中流にかけて河道内水位が右岸地盤高を越えて最大で 0.25m の浸水が発生していることから分かるように、透水性舗装に置換した後も、流域からの表面流出を十分に制御できていないためである。この結果から、ケース①では流出制御効果が現れないことが分かる。

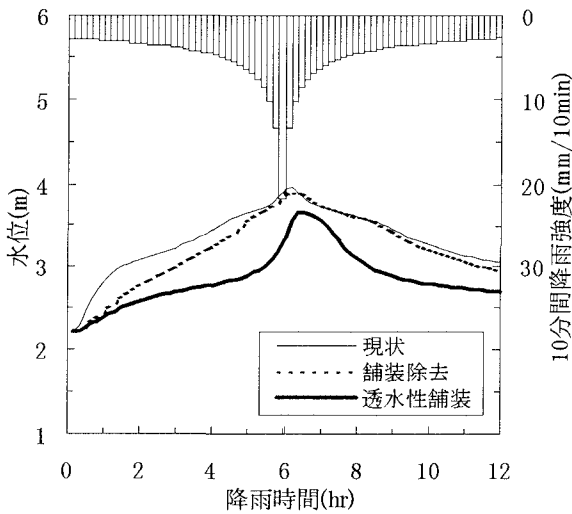


図-6 宅地内舗装面の透水性舗装による水位応答

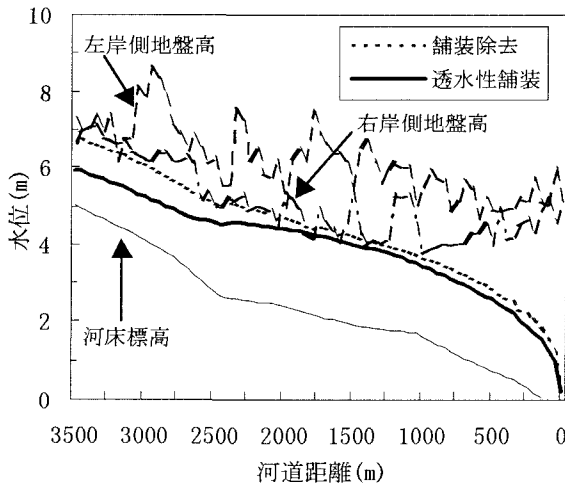


図-7 宅地内舗装面の透水性舗装による水位縦断面図

次に、図-6 を見ると、宅地内の舗装面を浸透性地表面に戻しただけでは現状とあまり変わらないが、浸透性地表面と宅地内の舗装面を透水性舗装に置換することによって、最高水位は0.24m低下し、最高水位時刻が20分遅くなった。5時間目付近では、水位が0.7m低下し、最高水位時刻を過ぎた後でも、水位が急速に低下して、最大で0.6m低下している。また、図-7では、中流域において、浸透性地表面に戻しただけでは最大で0.29mの浸水が発生するが、透水性舗装に置換することによって0.09mの浸水に減少している。そこで、透水性舗装の厚さと地表土壌の残留体積含水率を種々変えて計算してみたが変化はなかった。この結果から、浸透性地表面と宅地内の舗装面を透水性舗装に置換することによって、ようやくある程度の流出制御効果が現れたが、これだけでは右岸側の浸水を完全になくすることができないことが分かった。

表-4 各戸浸透施設の寸法

	幅(cm)	高さ(cm)	長さ(cm)
浸透ます	80	80	80
浸透埋管	60	60	500

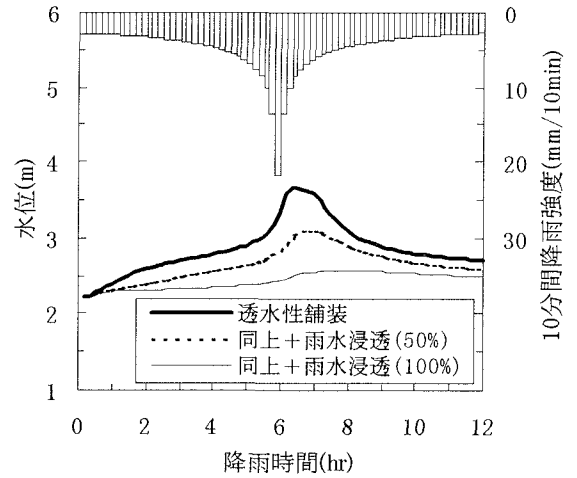


図-8 各戸浸透施設による水位応答

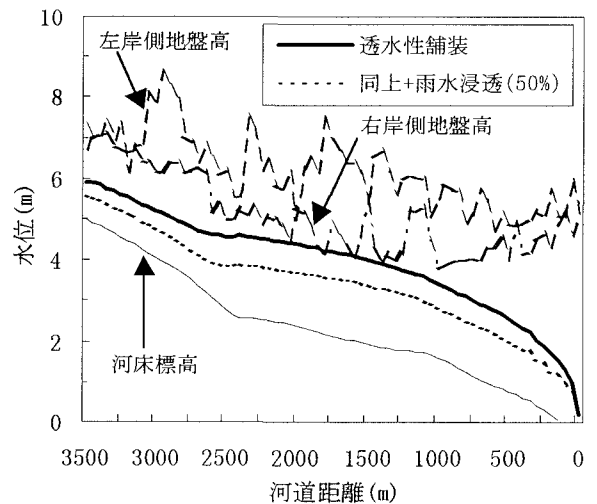


図-9 各戸浸透施設による水位縦断面図

4. 各戸浸透施設による洪水流出の制御効果

次に、図-6 の水位をさらに低下させるために、雨水浸透施設を併用して、洪水流出の制御効果を検討した。各戸浸透施設については、一戸当たりの家屋に表-4 のような浸透ます2個と浸透埋管3本を設置することとする。各戸浸透施設は、屋根で受けた降雨を浸透ますと浸透埋管を覆う砂利層で一時貯留して地盤に浸透させる仕組みになっている。このことから、各戸浸透施設は不透性地表面の一部である屋根部分を浸透性地表面に変換させる装置であると考えることができる。そこで、本論

文においては、各戸浸透施設をそれ自身と同じ体積と屋根部分と同じ面積を持つ浸透性地表面にモデル化して解析することとした。なお、表-4 に示した各戸浸透施設の一戸当たりの全体積と、小松川流域で測定した一戸当たりの平均屋根面積(138m²)を用いると、各戸浸透施設は厚さ 5cm の浸透性地表面に置き換えられた。また、各戸浸透施設を変換した浸透性地表面の不飽和浸透特性パラメータは表-2 の透水性舗装と同じと考えた。

図-8 は、各戸浸透施設が流域内の 50%、100%の家屋に普及した場合の計算結果を、図-6 の透水性舗装に置き換えた場合と比較して示している。ここに、表-1 の(b)で示した不浸透性地表面の中の建築物と道路の構成割合は、ブロック 10 について求めた結果、建築物が不浸透性地表面の約 70%を占めていたことから、すべてのブロックで表-1 の(b)の 70%を家屋の面積とした。

その結果では、各戸浸透施設の普及に伴って、最高水位発生時間が遅くなり、透水性舗装に置き換えた場合よりも 50%普及で 20 分、100%普及では 90 分遅くなった。また、最高水位も各戸浸透施設の普及に伴って低下し、透水性舗装に置き換えた場合に比べて、50%普及で 0.56 m、100%普及では 1.17mの顕著な低下がみられた。また、図-9 の水位縦断面図からも分かるように、透水性舗装に置き換えた場合においては、中流域で 0.09mの浸水がみられたが、50%普及で発生しなくなる結果となった。

以上のように、本解析で対象とした都市河川流域においては、浸透性地表面と宅地内舗装面を透水性舗装面に置き換え、さらに家屋に雨水浸透施設を設けることによって、ようやく降雨の流出を遅らせ、河川水位を低下させて浸水を防止することができることとなった。このことから、種々の流出抑制対策を複合的に活用することの重要性が分かる。

なお、図-8,9 の結果は、各戸浸透施設をそれ自身と同じ体積と屋根部分と同じ面積を持つ浸透性地表面にモデル化した場合の解析結果であり、モデル化によって水位低下量は変化する。モデル化の内容については、さらに検討を要するが、各戸浸透施設からの 3 次元浸透を 1 次元浸透に近似することによって、各戸浸透施設設置後の地表流出と降雨浸透の相互作用を理論的に扱う一手法を提示できたと考えている。

5. まとめ

宮崎市内の都市河川流域を対象として、洪水流出数値モデルを拡張適用して、雨水貯留施設(公共施設 3 カ所)と雨水浸透施設(透水性舗装、浸透ます、浸透埋管)を併用したときの表面流出の変化を推定した。以下に、その結果を整理している。

(1) 流域内に残っている浸透性地表面の全てを透水性舗装で覆って浸透性を増強しても、河川水位はほとんど

ど低下せず、流出制御効果は現れない。

(2) 舗装駐車場等の宅地内の舗装面を透水性舗装に置き換え、かつ浸透性地表面にも透水性舗装を用いると、最高水位が低下し、洪水継続時間が短縮するが、流域内の浸水を完全になくすることはできなかった。

(3) 浸透性地表面と宅地内舗装面を透水性舗装に置き換え、さらに流域内の家屋の 50%に雨水浸透施設を設置すると、最高水位発生時間が遅くなり、浸水が発生しなくなって、ようやく流出制御効果が現れることとなった。このことから、種々の流出抑制対策を複合的に活用することの重要性が分かる。

謝辞：最後になりましたが、本研究を実施するに当たり、建設省宮崎工事事務所および宮崎県土木部から貴重な資料を提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡 太郎, 菅原正孝: 都市の水環境の新展開, 技報堂出版, pp. 61—97, 1994. 11.
- 2) Suharyanto, A., Sugio, S., Deguchi, C. and Kunitake, M.: Simulation of flood control by rainwater storage facilities in urbanized watershed, Jour. of Hydraulic, Coastal and Envir. Eng., JSCE, No. 572/ II -40, pp. 95-104, 1997.8.
- 3) (社) 雨水貯留浸透技術協会編: 雨水浸透施設技術指針(案) 調査・計画編, (社) 雨水貯留浸透技術協会, pp. 3—5, 1995. 9.
- 4) 藤村和正, 安藤義久: 都市流域における雨水浸透施設による流出抑制効果に関するシミュレーション, 水文・水資源学会誌, 第 11 巻第 4 号, pp. 360—370, 1998. 7.
- 5) 弘中貞之, H. Srikantha, 虫明功臣: 流域水循環に対する雨水浸透システムの性能評価, 水文・水資源学会 1992 年研究発表会要旨集, pp. 142—145, 1992. 8.
- 6) 守田 優, 西川 麗: 二次元地表流—三次元地下浸透流結合モデルの浸透トレンチへの適用, 土木学会第 51 回年次学術講演概要集第 2 部, pp. 676—677, 1996. 9.
- 7) 出口近士, 杉尾哲: 衛星画像を利用した都市域の不浸透面積率の推定, 日本地下水学会誌, 第 35 巻第 1 号, pp. 1-10, 1993. 2.
- 8) 新井 正, 新藤静夫, 市川 新, 吉越昭久: 都市の水文環境, 共立出版, pp. 6—17, 1986. 11.
- 9) 杉尾 哲, 岡林 巧: 原位置におけるしらすの不飽和浸透特性とその測定法の検討, 土木学会論文集, No. 503/ II -29, pp. 39-47, 1994. 11.
- 10) 建設省中国地方建設局中国技術事務所: ポーラスコンクリートの紹介, WEB版中技ニュース, 1997. 10.
- 11) 花木俊幸, Agus Suharyanto, 杉尾 哲, 出口近士: 1995 年 9 月 30 日異常降雨時の都市河川流出状況の推算, 土木学会第 51 回年次学術講演概要集第 2 部, pp. 684—685, 1996. 9.
- 12) 岩井重久, 石黒政儀: 応用水文統計学, 森北出版, pp. 64—177, 1970.

(1998. 9. 30 受付)