論文

埋管浸透法による出水抑制

岡 太 郎*

Urban Storm-Runoff Control by Pipe Infiltration Method

Taro Ока*

Abstract

An increase in surface rainfall-runoff following urbanization of hilly regions augments the flood danger in the downstream basin. In order to cope with this problem, storm-runoff control should be considered as regards the entire urbanized district.

In this study, a storm-runoff control method, which makes part of the rainfall infiltate the soil with the aid of buried porous pipe, is examined. The mechanisms of rainfall infiltration from the pipe, especially the relationships between infiltration quantity, water pressure in the pipe, rainfall infiltration from the earth surface and initial soil moisture content, are clarified by means of experiments and numerical analysis. Next, the numerical calculations for 4 kinds of soil are carried out to clarify the relationship between permeability of soil and the infiltration quantity from the porous pipe. In addition, an equation for the infiltration quantity from the porous pipe is presented. Finally, assuming a case where porous pipes are installed in the hilly residential area in the northern district of Uji city, a rainfall-runoff analysis is conducted and the storm-runoff effect is concretely presented.

キーワード:都市化、洪水、埋管浸透法、出水抑制、土壌水分

1. まえがき

近年,都市近郊の丘陵地や農地の宅地化は,雨 水流出量を増大させるとともにその速度を速め, 下流域の水害危険度を高めている。これに対し, 昨今の用地事情・建設費用の面から河川改修を行 って流下能力の向上を早急に計ることは困難にな りつつあり,とくに下流域全体に市街地が発達し ている地域では,開発地域全体として出水抑制を 伴う防災対策を早急に考える必要がある。また, 都市化に伴う不浸透域の増大は,雨水浸透量を減 少させるので,地下水位低下,平常時の河川流量

* 京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University の減少ひいては水質の悪化をもたらすことになり, これらについても十分な対策を考えねばならない。

この対策として、開発に伴って増大する雨水流 出の一部を強制的に地中に浸透させて出水を抑制 しようとする地下浸透法や遊水池や貯水槽などを 設けて雨水を一時的に流域内に貯留する方法など が検討されている¹⁾²⁾これらのうち、地下浸透法 には、(1)埋管浸透法(浸透地下トレンチ法)、(2) 浸透溝法、(3)浸透桝法、(4)浸透性舗装法などが あり、それぞれについて理論的・実験的研究が進め られるとともに³⁾現地試験なども行われている⁴⁻⁶⁾ それらの結果、地下浸透法が洪水流出を抑制する ために有用であることは認められてきているが.

雨水浸透機構が複雑であるうえ,浸透能力は土質 ・土壌水分・地下水位・埋管形状などの多くの要 素と関連しており,その評価法及び周辺部への影 響などについては未解明な問題が多く残されてい る。

本文では、地下浸透法のうち埋管浸透法を対象 として、浸透実験と理論解析を行い、浸透機構及 び埋管浸透量の低減特性を吟味したのち、埋管浸 透量の簡易推定法について基礎的な検討を行う。 さらに、宇治市北部の北御蔵山住宅団地に埋管を 設置することを想定して解析を行い、その実用性 を具体的に検討する。

2. 浸透実験

2.1 実験装置と充填土壌

実験装置は、図-1に示すように、土壌槽、有 孔埋管、降雨発生装置、給水部及び計測記録部よ りなる。

土壌槽は長さと深さが1m,奥行き0.5mの無 底の鉄製槽であり,前面には透明アクリル板がは めこまれている。

有孔管は,外径 10.5cm,長さ 50cm の塩化ビニ

ール管であり,円周上には直径 5mmの穴が 2cm 間隔で一様にあけられ,その外周には厚さ約1cm のステラシート製のフィルターが取り付けられて いる。

降雨発生装置は縦横の長さが100cm, 高さが 3cm のジュラルミン・透明塩化ビニール製の容器 であり,底面に注射針状のノズルが5cm 間隔に 埋め込まれている。なお,この降雨発生容器中の 圧力は,定水頭タンクを下げることによって負圧 になり,30mm/h以上の均一な降雨が得られる ように工夫されている。

給水部は,低水槽-ポンプ-流量定値制御弁 (Vp)-定水頭タンク-制御バルブ-有孔埋管, 及び低水槽-ポンプ-流量定値制御弁(Vr)-定 水頭タンク-降雨発生装置の2系統よりなる。こ こで流量定値制御弁は,流量調節と流量を一定に 保つ機能を有している。

計測項目は,雨量,表面流出量,埋管よりの浸 透量,埋管水位,土壌水分,吸引圧力である。こ こで,雨量は,流量定値制御弁で調節と計測を行 うとともに,転倒ます型雨量計を用いて測定した。 また,表面流出量は,土壌面の下流端で表面流を



図-1 実験装置の概要

集水した後,転倒ます型流量計を用いて測定した。 したがって,地表面よりの浸透量は降雨量と表面 流出量との差で算出し得る。

埋管よりの浸透量は,直接測定が困難であるの で,供給量を一定に保つとともに,余水を転倒ま す型流量計で測定し,両者の差で算出した。また, 埋管水位は,マノメータを用いて測定した。

土壌水分量は、あらかじめアクセスチューブを 上流側より 30cm と 60cm の位置に鉛直に埋設し ておき、 $^{252}C_f(30 \mu C_i)$ 内蔵の挿入型中性子水分 計プローブを 5 cm/min の速度で上下して測定し た。ただし、プローブの昇降機が、降雨を遮断す るため、降雨条件下では土壌水分の測定は行わな かった。土壌の吸引圧力は上流側より 30cm、40 cm、深さ 50cm の位置にテンシオメータを埋設し、 吸引圧力を圧力変換器で電圧に変換して測定した。

実験土壌は京都府城陽市青谷の砂質土であり砂 が 95 %, シルト・粘土が 5 %である。なお、比重 は 2.62, 飽和透水係数は 10^{-3} cm/s のオーダで あり、充塡後の間隙率は 0.42 であった。この土壌 については、これまでに繰り返し土壌水分特性曲 線 [$\psi(\theta)$],水分拡散係数 [$D(\theta)$],及び不







図-3 埋管浸透量(半円,長さ:50cm)

25

飽和透水係数 [$K(\theta)$] の測定が行われている? これらのうちから、間隙率が 0.41 ~ 0.42 のもとで 得られた $\psi(\theta)$, $K(\theta)$ を図 – 2 に示す。なお、 $\psi(\theta)$ は土柱法、 $K(\theta)$ は浸潤法を用いて測定 された $D(\theta) \ge \psi(\theta)$ より算出されたものであ る。

2.2 実験結果

無降雨及び降雨条件下で、埋管水位 [H_p]を 179~150cm,初期土壌水分吸引圧力水頭 [ψ_i] を-32~-53cmの範囲について行った実験より、 埋管よりの浸透量を図-3に示す。ここで、この 浸透量は、長さが50cmの半円の埋管について得 られたものであり、埋管水位 [H_p]は図-6の座 標系の基準点よりの高さである。したがって、 H_p =179~150cmは、埋管中心の圧力水頭 [P] で表すと59~30cmになる。また、 ψ_i はテンシ オメータによる2箇所の測定値の平均である。な お、降雨条件下での実験では、降雨強度を100~ 125mm/hに取り、短時間に表面流を発生させて 地表面よりの浸透条件をできるだけ統一するよう に配慮した。

無降雨, $\psi_i = -53$ cm, $H_p = 170$ cm の実験より, 実験開始 40 分後の土壌水分分布を図-4 に示



図-4 土壌水分分布 (T= 40min)

す。ここで土壌水分分布は、中性子水分計による 測定値を時間・空間的に内挿して求めたものであ る。

3. 浸透流解析

基礎式に飽和・不飽和浸透流現象が同時に取り 扱える Richards の式(1)を用いる。

$$\left\{ C(\psi) + \alpha S_{s} \right\} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_{x}(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ K_{y}(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right) \right\} \dots \dots (1)$$

ここで、 ψ : 圧力、飽和領域では $\psi >= 0$,不飽 和領域では $\psi < 0$, $K_x(\psi)$, $K_y(\psi)$: それぞれ x, y方向の不飽和透水係数, x: 水平座標, y: 上向き正の鉛直座標, t:時間, S_s :飽和領域の比 貯留係数, α : 係数,飽和領域では1,不飽和領 域では0。なお、飽和領域において圧力変化によ る土壌と水の圧縮性が無視できるならば $S_s = 0.0$ である。 $C(\psi)$ は比水分容量であり、(2)式で表 される。

θ:体積含水率表示の土壌水分量。

初期条件としては,全領域の土壌水分量が一様 であるとみなし,各節点にそれに見合う圧力値を 与える。

境界条件は次のようになる。

(1) 埋管円周: この境界では, 圧力が既知である ので(3) 式が成立する。

$$\psi = \psi_0$$
: 既知 ······(3)

(2) 地表面: 地表面では降雨量が与えられるので(4) 式が成立する。

 $q_{\mathbf{y}} = -R \qquad \qquad \cdots \cdots \cdots (4)$

ここで、 q_y :地表面よりの流入量、R:正のとき 降雨量、負のとき蒸発量。しかし、降雨時に地表 面が飽和状態に達すると、(4)式は成立せず、(5) 式となる。

ψ = 0.0
 ······(5)

 (3) その他の境界: 不透水層や対称軸などでは、

それらを横切る流れは存在しないので(6)式が成 立する。

ここで, η:境界面の法線成分

3.2 計算法

(1) ガラーキン法による離散化

(1) 式を有限要素法を適用して数値的に解析す ることにする。有限要素法ではいくつかの離散化 法があるが、ここでは重み付き残差法を採用し、 ガラーキン法により定式化を行う。ガラーキン法 については多くの成書⁸⁾に詳しく紹介されている ので、ここではその結果のみを示すにとどめる。

(1)式をガラーキン法を用いて離散化し, Green-Gauss の定理を用いると, (7)式を得る。

$$[\mathsf{T}]\{\psi\} + [\mathsf{P}]\{\frac{d\psi}{dt}\} + \{\mathsf{F}\} = 0 \dots (7)$$

ここで、[T], [P]及び {F}の各成分は(8)~
(12)式で表される。

 $P_{ij} = \iint_D SV_i \ V_j \ dxdy \qquad \dots \dots \qquad (9)$

ここで、V: 形状関数, D: i番目の形状関数が定 義されるすべての要素からなる領域, $S = \{ C(\psi) + \alpha S_s \}$ 。本解析では三角形要素を用いることに するが,(8)~(12)式の積分は多くの成書に紹介 されているので省略する。ただし,(9)式につい ては,直接積分した形では収束性が悪かったので, Neuman が提案したものと同形の(13)式を用い ることにする⁹⁾

$$i = j : P_{ij} = \Delta / 3 \cdot \overline{S}$$

$$i \neq j : P_{ij} = 0.0$$
(13)

ここで, ⊿:三角形要素の面積。

(2)時間項の処理

(7)式の時間項を(14)式で差分近似し, これを (7)式に代入すると(15)式を得る。

$$\frac{\{\psi\}_{t} - \{\psi\}_{t} - \{\psi\}_{t} - \Delta t}{\Delta t}$$

$$= \frac{1}{2} \{ \left(\frac{d\psi}{dt}\right)_{t} - \Delta t + \left(\frac{d\psi}{dt}\right)_{t} \} \dots (14)$$

$$\{ [T] + \frac{2}{\Delta t} [P] \} \{\psi\}_{t}$$

$$= [P] [\left\{\frac{d\psi}{dt}\right\}_{t} - \Delta t + \frac{2}{\Delta t} \{\psi\}_{t} - \Delta t]$$

$$- \{F\}_{t} \dots (15)$$

(15) 式より,時間 $t - \Delta t$ における { ψ } と { $d\psi/dt$ } の値がわかれば, { ψ }_t を求めるこ とができる¹⁰⁾ ただし,基礎方程式は非線形である ので,反復計算を行い十分収束した解を得たのち 時間ステップを進める必要がある。

(3) 境界条件の導入

地表面の降雨・蒸発条件は次のようにして導入し得る¹¹⁾

まず,各要素の流速を(16)式を用いて求める。

$$\left\{ \begin{array}{c} V_{x} \\ V_{y} \end{array} \right\} = - \begin{bmatrix} K_{x} & 0 \\ 0 & K_{y} \end{bmatrix} \frac{1}{2 \Delta} \begin{bmatrix} b_{j} & b_{j} & b_{m} \\ c_{i} & c_{j} & c_{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{j} \\ \phi_{j} \\ \phi_{m} \end{bmatrix}$$
(16)

ここで、 $\phi = \psi + y$, $b_i = y_i - y_m$, $c_i = x_m - x_j$ 。なお、 ϕ :全ポテンシャル、 $x_i \sim_m$, $y_i \sim_m$:節点座標。

次に、 $\psi_m^{k-1} = 0.0$ (飽和)ならば、(17)式 を用いて、降下浸透量と降雨量との大小を比較する (図-5参照)。



図-5 地表面付近の要素と雨水浸透

ここで,(17)式が成立しておれば, $\psi_m^{\ k} = 0.0$, 不成立のときは $q_y = -R$ とする。なお,k:反 復計算回数, l_1 , l_2 :要素 e_1 , e_2 の地表面の水平 距離, V_{1y} , V_{2y} :z方向の流速。

他の境界条件の導入については、Neuman の方 法と同等である。

(4) 計算手順

計算条件に、初期・境界条件の他に、 $C(\psi)$ 、 $K(\psi)$ 曲線が与えられているものとする。第0近 似値に Δt 前の値を用いることにすると、計算手 順は次のようになる。

(i) $\psi^{k+1/2} \geq (18)$, (19) 式を用いて全要素 の K, S の平均値 \overline{K} , \overline{S} を求める。

ここで, p, q, r: 三角形要素の節点番号。 (\parallel) 境界条件を考慮して連立方程式を解き,各 節点の ψ^{k+1} を求める。

(III)(20)式を用いて収束の判定を行う。

3

$$|\psi_i^{k+1} - \psi_i^k| < \epsilon$$
(20)

ここで, €:収束判定用の微小値であり,計算を 始める前に与えておく。

各節点で(20)式が成立しておれば、反復計算 を止め、時間ステップを Δt 進める。もし(20)式 が成立していなければ、(21)式を用いて $\psi_i^{k+1/2}$ を求め、(1)~(III)の計算を繰り返す。

3.3 計算結果

実験土槽に合わせて解析領域を図-6のように 取るとともに、同図に併示してあるように要素分 割を行って解析を進めた。なお、実験土壌槽が無 底であるので解析領域を深さ1.7 mとし、底面条 件が上部領域に影響しないように配慮してある。 この場合の節点数は232、要素数は394 である。 また、 $\Delta t = 30$ s、 $\epsilon = 0.01$ cm、 $S_s = 0.0$ とし て計算を行った。 $K(\psi)$ 、 $C(\psi)$ については、図 $-2 \circ K(\theta)$ 、 $\psi(\theta)$ を実線で近似した後、 θ を ψ に変換して計算に用いた。他の計算条件は実 験条件に一致させてある。このようにして得た計 算結果を図-3~4 に併示してある。



これらの図より,実験結果と計算結果はよく一 致しており,埋管よりの浸透流を不飽和浸透流理 論とくに Richards の式を用いて解析することの 有用性が認められる。

図-3の埋管浸透量についてみると、その低減 は無降雨条件下では、初期に急であるが、時間と ともに緩になり、120分後には一定値に近づく。 一方、降雨条件下では、無降雨の場合に比較して 全般的に急であり、100分後でもかなりの低減を 示している。これらより埋管浸透量は降雨浸透の 影響を強く受けることが明らかになる。

4. 埋管浸透量の低減特性

4.1 埋管浸透量の低減と降雨浸透との関係

埋管浸透量と埋管圧力・初期土壌水分量・降雨 条件との関係を明確にするため、 $\psi_i \ge H_p$ を **表-1**のように取り、それぞれの組合わせについ て数値解析を実施した。なお、埋管の直径は10 cm,降雨がある場合の計算では降雨強度[R] を150mm/h,他の計算条件は前述のものと変ら ない。

埋管圧力		初期条件	
埋管水位 $H_p(cm)$	中心圧力水頭 P(cm H ₂ O)	吸引圧力水頭 $-\psi_i(ext{cm})$	土壤水分量 $\theta_i(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$
170	5 0	-100	0.11
150	30	-50	0.15
130	10	-30	0.22

表-1 計算条件

 ψ_i が-100cmの条件で得られた長さが1m, 全円周よりの埋管浸透流量を図-7に示す。なお, 浸透量曲線が Philip の浸透能曲線¹²⁾にきわめて 類似していることを考慮して図-7の横軸には $t^{-1/2}$ を採用した。また, 60分後の圧力分布と流 速ベクトルを図-8に示す。なお,図-8の流速 ベクトル表示では,ベクトルの始点を丸印,それ より流速の方向と大きさを線分で示してある。

図-7の無降雨条件のもとで得られた埋管浸透



図-7 埋管浸透量の低減曲線 ($\psi_i = 100$ cm)

量についてみると、その低減ははじめ 急であるが、徐々に緩やかになり、15 分頃より直線になる。すなわち、この 場合の低減を、 $t^{-1/2}$ に比例しない期 間(【期)と $t^{-1/2}$ に比例する期間 (【期)に分けることができる。ここ で、【期の埋管浸透量は(22)式で近似 できることになる。

 $Q = at^{-1/2} + b$ (22)

Q: 埋管浸透量, a, b: 定数, t : 時

間。

一方,降雨条件下では,初期には無降雨の場合の低減曲線と同一であるが(Ⅰ,Ⅱ期),25分頃より浸透量は急減を始め,無降量の低減曲線より外れる(Ⅲ期)。さらに時間が経過すると直線となる(Ⅳ期)。

この状況は地表面よりの降雨の浸潤を考慮する とうまく説明できる。すなわち,図-8(a)と(b) を比較すると、無降雨の場合には埋管壁全体から浸





図-8 流速ベクトルと圧力分布

出しているが、降雨の場合には埋管上部の浸出が 雨水浸透により抑圧されている。したがって、Ⅰ ・Ⅱ期は、埋管浸透量に降雨浸透の影響が現われ ない時期であり、Ⅱ・Ⅳ期は降雨が埋管付近に到 達し、埋管浸透量に影響を及ぼす時期であるとい える。ここで、Ⅳ期の浸透現象は降雨浸透と埋管 よりの浸透が、複雑に影響しあっているにもかか わらず、埋管浸透量曲線が図-7上で直線を呈し ており、(22)式が成立しているということは注目 すべき事項である。

4.2 係数*a*,*b*と初期吸引圧力・埋管圧力との 関係

埋管浸透量の表示式として、かなりの時間帯に おいて(22)式が有効であることが明らかになった。 しかし、(22)式の係数 *a*, *b* は初期土壌水分量もし くは初期吸引圧力・埋管圧力などの影響を受けてお り、埋管浸透量が簡単に算定できるとは限らない。 ここでは、これまでの計算結果を用いて、係数a, $b \geq \psi_i$, $P \geq o$ 関係を調べることにする。

図-9に、 $Q \ge \psi_i$ 、 $P \ge 0$ 関係を示す。図-9より、Qは、Pが大きいほど、また ψ_i が小さいほど大きい。しかし、 ψ_i は、低減部を外挿して得られる埋管浸透量の最終値には影響を及ぼさないことなどが明らかになる。

図-9の低減部に(22)式を当てはめて係数 a, bを求めた結果を図-10と11 に示す。図-10より, 係数 a は Pが大きく, ψ_i が小さいほど大きい。 また,降雨条件下で得られた a は ψ_i , P にほぼ 比例しているが,降雨条件下では ψ_i にほぼ比例 しているものの, Pには比例せず, Pが 30 cm 以 下では急に小さくなっているのがわかる。一方, 図-11 より,係数 b は ψ_i の影響を受けず, Pに ほぼ比例している。



図-9 埋管浸透量と ψ_i とPとの関係



図-10 係数 $a \ge \psi_i \cdot P \ge 0$ 関係

4.3 係数 a, bと飽和透水係数との関係

ここでは, **表-2**・図-12に示す土壌特性の異 なる4種類の土壌(Aodani, Rubicon¹³⁾Guelph¹⁴⁾



図-11 係数 $b \geq \psi_i \cdot P \geq 0$ 関係

Yolo¹⁵⁾) について、無降雨条件下で数値実験を行い、土壌特性とくに飽和透水係数 [K] と(22) 式の $a \ge b$ との関係を明らかにするとともに埋管浸透

量の簡易推定法について検討を加える。

数値実験では、図-6の解析領域と要素分割を 用い、表-1のように条件をかえて計算を進めた。 ただし、表-1の θ_i は青谷砂質土のものであり、 他の土壌については適用できない。計算結果を整 理して得られた係数 a 及びb と飽和透水係数との 関係を図-13(a)、(b)に示す。図-13より係数 abは、飽和透水係数 [K] と両対数紙上で直線関 係にあり、係数 a は P が大きく ψ_i が小さいほ ど大きく、b は ψ_i の影響をほとんど受けず、P

表-2 数値実験で用いた土壌の飽和透水係数と間隙率

土壤	飽和透水係数(cm/s)	間隙率
Aodani silty sand	0.0022	0.415
Rubicon sandy loam	0.00050	0.38
Geary silty loam	0.00097	0.46
Guelph loam soil	0.0000667	0.434
Yolo light clay	0.0000123	0.495



図-12 数値実験で用いた土壌の物理特性

にのみ依存していることなどが分かる。

以上の検討結果より、無降雨条件下における直径 10cm の埋管浸透量を次のようにして推定できる。まず、対象土壌の飽和透水係数 K を測定する。次に、図-13より希望する $P \ge \psi_i$ に対応する係数 a, b の値を読み取る。もし、これらの値が直接読み取れない場合には最寄りの値を用いて比例配分により <math>a, b を求める。最後に、(22)式にこれ らの値を代入して Q を計算する。

 $\boxtimes -14$ i Geary silty loam ($\psi_i = -100$ cm)

について得た(22)式による推定値と FEM による計算値を示してあるが、 両者は良く一致しており、この簡易推 定法の有用性が認められる。なお、 Geary silty loam の土壌物理特性は**表**

-2, 図-12に併示してある。

ただし、図-13は無降雨条件下,直径 10cmの埋管浸透量を推定するためのものであり、他のケースについては、数値実験を行い図-13を整備・拡張する必要がある。

5. 北御蔵山住宅団地への適用

5.1 流域の概要

北御蔵山流域の概要を図-15 に示 す。この流域は、若干の茶畑が残って はいるが、ほとんどが人工的に造成さ れた丘陵宅地域であり、水位・雨量計 設置地点の流域面積は17ha, このう ち不浸透域は8.2ha 浸透域は8.8haで ある。流域内に自然河川は存在せず、 雨水はコンクリート排水路により排水 される。表層土壌は礫混じり粘土であ り、その透水係数は10⁻⁵ cm/sのオーダ である。図-16に、表層土の土壌物理 特性を示してある。

5.2 埋管浸透量の算出

この地に,直径 20cm の有孔管を深 さ1mに埋設するとともに,埋管水位 を地表面に保つものと仮定し,2種類 の土層状態について埋管浸透量を算出



図-13 (a) 係数 a と飽和透水係数との関係



図-13 (b) 係数 b と飽和透水係数との関係

した。まず全土壌層が図-16の物理特性を有する 一様な土壌よりなるものとして得た埋管浸透量を 図-17・Case A に示す。なお、図-17では埋管 浸透量を、100m²の宅地に長さ10mの埋管を設置 した場合の単位面積当たりの浸透高に換算して表 示してある。この場合には埋管設置効果はほとん ど望めない。

次に、表層部(0-0.3 m)の土層はそのまま として深度 0.3 - 3.4mの土層の飽和透水係数が 10^{-4} cm/s のオーダであると仮定して解析を行っ た。この場合の埋管浸透量(高)を図-17・Case Bに示してある。Case Bでは60 分後でも埋管浸 透高は 0.9 - 2.2 mm/10 min の範囲にあり埋管設 置効果がかなり認められる。



図-14 埋管浸透量の(22)式による推定値と 計算値との比較



図-15 北御蔵山住宅団地流域の概要

Japan Society for Natural Disaster Science

34



図-17 埋管浸透量



まず,一次元不飽和浸透流解析を行い浸透域の 降雨を表面流出成分と浸透成分とに分離するとと もに,6月10日6時の土壌水分状態を既知とした。 次に,これを初期条件に用いて埋管浸透高を算出 した。図-18 にこのようにして得た地表面よりの 浸透量(infiltration)と埋管よりの浸透高(seepape)を示してある。

各支流域の有効雨量は,不浸透域からは全降雨 が,浸透域からは不飽和浸透流解析で得られた非 浸透成分が流出するものとし,埋管浸透量を考慮 して(23)式を用いて求めた。

ここで R_i :各支流域の有効降雨, R_i : 不浸透域 の有効雨量(=観測雨量), R_p :浸透域の非浸透 量,Q:埋管よりの浸透高,A, A_i , A_p :それ ぞれ,支流域の面積,不浸透域面積,浸透域面積。 (2)雨水追跡 kinematic runoff model を用い て流出解析を行う場合,流域分割とそのモデル化 が必要であるが,ここでは対象領域を12の支流域



と2河道ブロックに分割して,流域モデルを作成 した¹⁶⁾なお,等価粗度は0.03,排水路の粗度係 数は0.01とした。

図-18 に kinematic runoff model による流出 解析結果を示してある。なお図中の present は 現状, future は埋管設置後を意味している。この 計算では、 3.3 m^3 sのピーク流量を埋管設置によ り、 2.4 m^3 s に抑制することができた。

これらの計算結果より,透水係数が10⁻⁴ cm/s 以上の宅地地盤では埋管浸透法がかなり有効であ ることがわかる。

6. 結 論

都市化域の出水抑制法の一つである埋管浸透法 について,実験的・理論的にその有用性と適応性 を吟味するとともに,埋管浸透流量の表示式につ いて検討を加えた。これまでの研究で得られた知 見をまとめると次のとおりである。

(1) 浸透実験結果と Richards の式を適用した計 算結果とは良く一致した。土壌物理特性を明確に できるならば、ここで提示した浸透解析により埋 管効果を定量的に検討し得る。

(2) 埋管浸透量は土壌水分状態よりも埋管中の水 圧によって大きく左右される。したがって、埋管 浸透量が地下水の影響を受けない範囲において、 埋管をできるだけ深く設置し、圧力を加えると効 果的である。

(3) 埋管浸透量は(22)式で表される。(22)式の
 係数 *a* は初期吸引圧力と埋管水位によって変わるが、*b* は初期吸引圧力によってはほとんど変化せず、
 埋管圧力に比例する傾向を有している。

(4) 無降雨条件下, 直径 10cm の埋管浸透量の簡 易推定法を提示し,有用性を確かめた。

(5) 埋管浸透法は透水係数が 10⁻⁴ cm/s 以上の 地盤で有効である。

最後に,数値計算には,京都大学大型計算機センター FACOM M-382,化学研究所 FACOM M-380Q を使用したこと,本研究は昭和58年度 文部省科学研究費(自然災害特別研究)による研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 建設省土木研究所:地下浸透を考慮した流出抑制 法の開発実験に関する報告書,土木研究所資料,第 1767号,1982.
- 2)建設省土木研究所:浸透型流出抑制施設の浸透能 力把握手法に関する調査報告書,土木研究所資料, 第 2126 号, 1984.
- 3)例えば、虫明功臣:現地土壌特性の評価に基づく 雨水浸透施設の浸透解析、水理講演会論文集、No. 28, pp. 459 - 464, 1984.
- 4) 山本晃一・斎藤松美:現地実験による浸透型流出 抑制施設の浸透機能に関する検討,土木技術資料, Vol. 26, No. 1, pp. 23 - 28, 1984.
- 5) 吉野文雄:浸透型貯水槽からの浸透流の解析と流 出抑制効果の評価,土木技術資料, Vol. 24, No. 11, pp. 21 – 26, 1982.
- 6) 菅原正孝・林 新太郎:トレンチ型雨水浸透施設の浸透能に関する研究,土木学会関西支部創立60周 年記念都市防災シンポジウム講演集,pp.31-36, 1987.
- 7) 岡 太郎・野口美具:不飽和浸透流の拡散係数と 透水係数の測定,水理講演会論文集,No.24, pp. 363 - 368, 1980.
- 8) 例えば Pinder G. F. and W. G. Gray: Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press, 1977.
- Neuman, S.P.: Saturated -Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., A.S.C.E., vol. 99, HY-12, pp. 2233– 2250, 1973.
- 10) Zienkiewicz, O. C. and Y. K. Cheung, 吉識雅夫監 訳:マトリックス有限要素法, 培風館, pp. 181-184, 1970.
- 11) 岡 太郎:自然丘陵地における土壌水流動,京大 防災研年報,第26号B-2, pp.213 - 224, 1983.
- 12) Philip, J. R.: The Theory of Infiltration, 2, Soil Sci., vol. 83, pp. 435–448, 1957.
- 13) Topp, G. C.: Soil-Water Hysteresis Measured in a Sandy Loam and Compared with the Hysteretic Domain Model, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 33, pp. 645–651, 1969.
- 14) Elrick, D. W. and D. H. Bowman: Note on an Improved Apparatus for Soil Moisture Flow Measurements, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 28, pp. 450–453, 1964.
- Van Der Ploeg, R. R.: Simulation of Moisture Transfer in Soils: One-Dimensional Infiltration, Soil Science, vol. 118, No. 6, pp. 349–357, 1974.
- 16) 岡 太郎・角屋 睦・野口美具:宅地域の雨水浸 透と流出特性,京大防災研年報,第23号B-2, pp. 227 - 238, 1980.

(原稿受理 昭和63年6月 3日) 訂正受理 昭和63年8月30日)