

埋管浸透法による出水抑制

Urban Storm-runoff Control by Pipe Infiltration Method

京都大学 防災研究所 正会員 岡 太郎

1. まえがき

近年、都市近郊の丘陵地や農地の宅地化に伴って雨水流出は尖鋭化し、下流域の水害危険度を増加させている。これに対し、昨今の用地事情・建設費用の面から河川の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、とくに低平地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。

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るいわゆる地下浸透法が検討されている。^{(1)~(5)}この地下浸透法には(1)埋管浸透法(浸透地下トレンチ法)、(2)浸透溝法、(3)浸透樹法、(4)浸透性舗装法などが提案されているが、これらの浸透能力の調査法・評価法及び周辺環境に及ぼす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により浸透機構及び埋管浸透量の低減特性について基礎的検討を行なうとともに、宇治市北部の北御蔵山住宅団地に埋管を設置するものと想定して解析を行ない、その実用性を具体的に検討した結果について述べる。

2. 浸透実験

a. 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。ここで土壌槽は長さとし深さが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のスチロール製のフィルターが取り付けられている。なお、この種の浸透現象は、埋管の鉛直中心線を軸として左右対称であるので、有孔管の1/2を図1に示す位置に埋設して実験を行なった。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。給水部は低水槽-ポンプ-流量定値制御弁(V_p)-定水頭タンク-制御バルブ-有孔管、及び低水槽-ポンプ-流量定値制御弁(V_r)-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、埋管水位、埋管よりの浸透量、表面流出量、土壌水分、吸引圧力である。ここで埋管よりの浸透量は、流量定値制御弁で供給量を一定に保ち、余水を転倒樹形流量計で測定し、それらの差で表わした。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

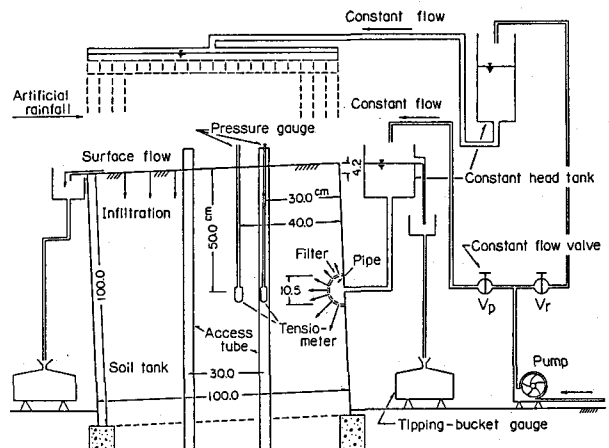


図1 実験装置の概要

鉛直に埋設しておき、中性子水分計プローブ [^{252}Cf (30 μCi) 内蔵・挿入型] を 5cm/min の速度で上下して、測定した。吸引圧力は上流側より 30cm・40cm、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に取り出し測定した。

実験土壌は京都府城陽市青谷の砂質土であり、比重は 2.62、充填後の間隙率は 0.416 であった。間隙率が 0.41-0.42 のもとで得られた毛管水分曲線 [$\psi(\theta)$]、不飽和透水係数 [$K(\theta)$] を図 2 に示す。

b. 実験結果

降雨条件・埋管水位及び初期土壌吸引圧力（土壌水分量）を変えて行なった実験結果より、埋管よりの浸透流量を図 3 に示す。なお、図中の初期吸引圧力水頭 (ψ_i) はテンシオメータによる二箇所の測定値の平均値であり、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。無降雨、 $\psi_i = -53$ cm、 $H_p = 170$ cm の実験結果より土壌水分分布及びテンシオメータによる測定結果をそれぞれ図 4・5 に示す。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。

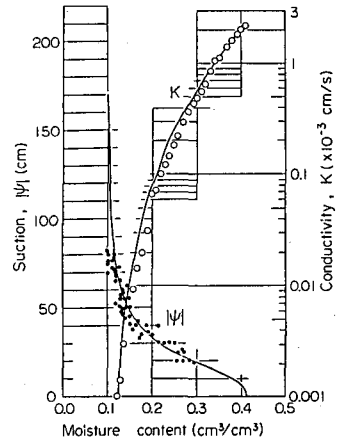
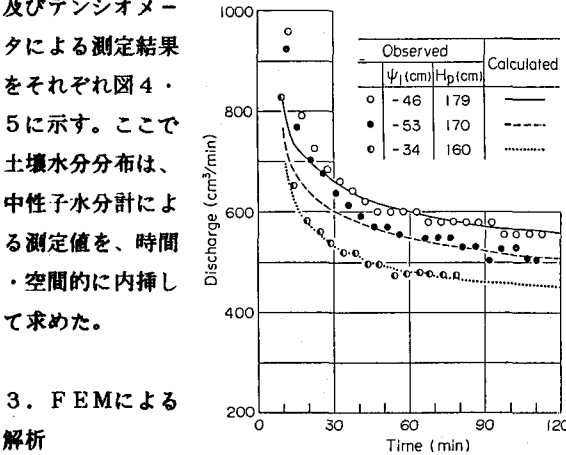
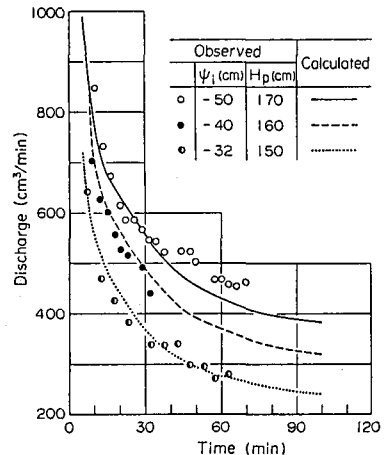


図 2 実験土壌の物理特性



(a) 無降雨



(b) 降雨

図 3 埋管浸透量（半円、L=50cm）

3. FEMによる解析

a. 基礎式、初期

・境界条件及び計算法

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。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 ψ : 圧力、 $K(\psi)$: 透水係数、 $C(\psi)$: 比水分容量。なお、(1) 式では土壌と水の圧縮性を無視してある。

初期条件としては、全領域の土壌水分量が一律であるとみなし、各節点にそれに見合う圧力値を与えた。境界条件としては地表面に降雨、埋管壁に水圧、その他の境界には不透壁の条件を与えた。

ここでは (1) 式をガラキン法を用いて離散化し、Neuman が提案した手法により計算を進めた。

b. 計算結果

図 6 に示す解析領域と要素分割を用い、土壌物理特性を図 2

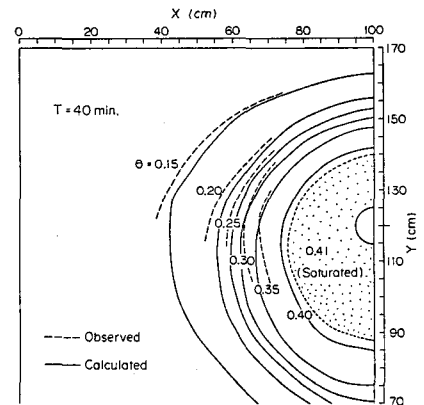


図 4 土壌水分分布

の実線で近似して計算を行なった。
 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にとり底面条
 件が計算結果に影響しないようにし
 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3-5に併示する。

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

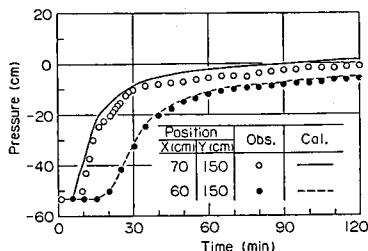


図5 吸引圧力の変化

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大きく受ける。また、埋管浸透量は埋管水位(Hp)によって大きく変化するが、初期吸引圧(ψ)の影響はあまり受けないことなどが明らかになる。

4. 埋管浸透量の低減特性

埋管浸透量の低減特性及び降雨浸透の影響を明確にするため初期吸引圧(ψ)を-100cm、埋管水位(Hp)を170, 150, 130cmの3段階に変えて、無降雨及び降雨(150mm/hr)の場合について計算を行なった。他の計算条件は前述のものと変わらない。これらの計算結果より得られた埋管浸透流量を図7に、Hp=170cmの計算結果よりt=60分の流速ベクトルを図8に示す。なお埋管浸透量曲線がPhilipの浸透能曲線²⁾によく似ていることを考慮して図7の横軸には $t^{\frac{1}{2}}$ を採用した。

図7の無降雨条件のもとで得られた埋管浸透量についてみると、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、初期の $t^{\frac{1}{2}}$ に比例しない期間(I期)と $t^{\frac{1}{2}}$ に比例する期間(II期)に分けることができる。ここでII期の埋管浸透量は(2)式で近似できる。

$$Q = a \cdot t^{\frac{1}{2}} + b \quad \text{----- (2)}$$

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、無降雨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

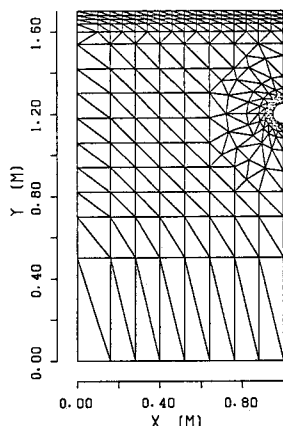


図6 解析領域と要素分割

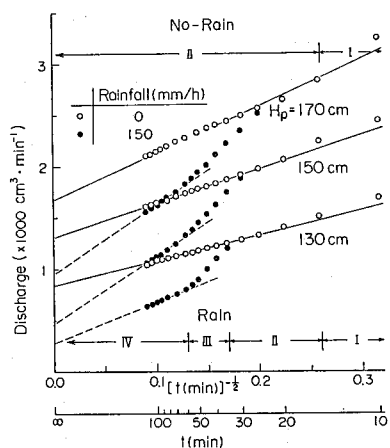


図7 埋管浸透量の低減(全円、L=1m)

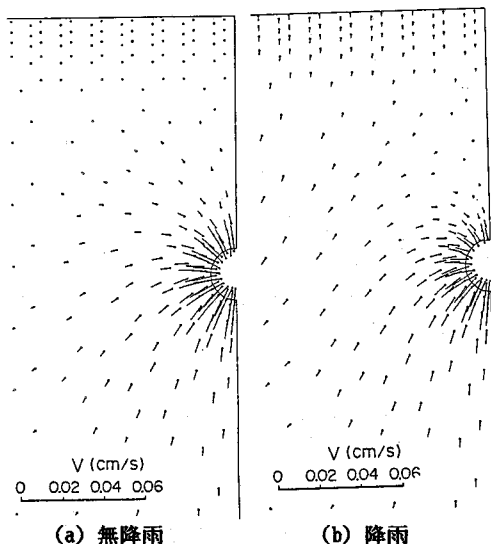
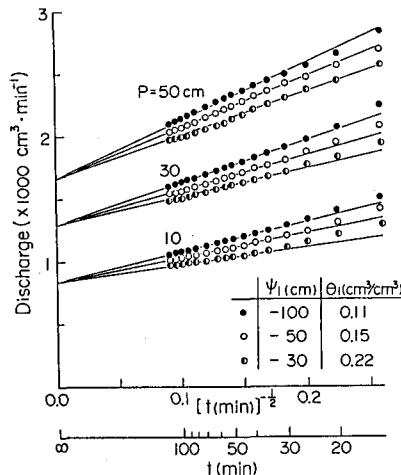
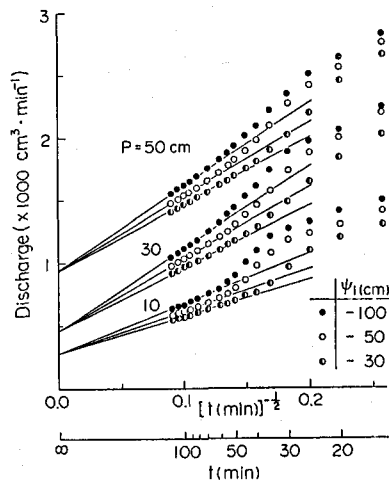


図8 流速ベクトル

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流出しているが、降雨の場合には埋管上部の流出が雨水浸透により抑圧されているのがわかる。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、III・IV期は降雨が埋管付近に



(a) 無降雨



(b) 降雨

図9 埋管浸透量と $\psi_1 \cdot P$ との関係

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影響あって複雑にな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、(2)式が成立しているということは注目すべき事項である。

次に、初期吸引圧力 ψ_1 を-100, -50, -30cm, 埋管水圧 P を50, 30, 10cm に変えて、無降雨・降雨(150mm/hr)の場合について数値解析を行ない(2)式の係数 a , b と $\psi_1 \cdot P$ との関係を調べる。ここで P は埋管中心の圧力水頭であり、図6の場合には $P=50, 30, 10$ cmは埋管水位 $H_p=170, 150, 130$ cmに相当する。図9に計算結果より得られた埋管浸透量を示してあるが埋管浸透量は埋管水圧が大きいほど、また初期土壌水分量が小さいほど大きい。しかし、初期土壌水分量は、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が明らかになる。図9の低減部に(2)式をあてはめ、係数 a と b を求めた結果を図10・11に示す。図10より、係数 a は P が大きく、 ψ_1 が小さいほど大きい。また無降雨条件下で得られた a は $\psi_1 \cdot P$ にほぼ比例しているが、降雨条件下では ψ_1 にほぼ比例しているものの、 P には比例せず、 P が30cm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_1 の影響をほとんど受けず、 P にほぼ比例して増加することなどが明らかになる。このような係数 a , b の特徴は埋管浸透量の実用的表示式を検討する際に有用になるものと考えられる。

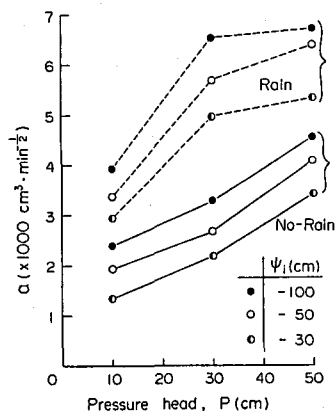


図10 (2)式の a と

$\psi_1 \cdot P$ との関係

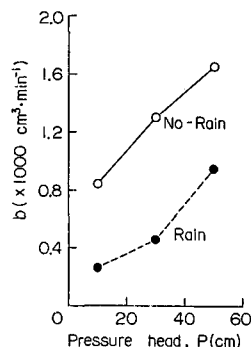


図11 (2)式の b と

$\psi_1 \cdot P$ との関係

5. 北御蔵山住宅団地への適用

a. 流域の概要

北御蔵山流域の概要を図12に示す。この流域は、若干の茶畑が残っているが、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・下水はコンクリート排水路により排水される。表層土壌はれきまじり粘土でありその透水係数は 10^{-5} cm/secのオーダーである。図13に、この流域で雨水浸透解析のために推定された土壌物理特性を示してある。

b. 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した。まず、全土壌層が図13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14・Case Aに示す。なお、図14では埋管浸透量を、100㎡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。図14より、Case Aの場合には埋管設置効果はほとんど望めないことがわかる。

次に、表層部(0-0.3m)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/sec のオーダーであると仮定して解析を行なった。すなわち、不飽和透水係数に図13の10倍の値を用いた。この場合の埋管浸透量(高)を図14・Case Bに示してある。Case Bでは60分後でも埋管浸透高は0.9-2.2mm/10minの範囲にあり埋管設置効果がかなり認められる。

c. Kinematic runoff modelによる流出解析

(1) 有効降雨 解析対象を1976年6月10日朝の降雨、土層をCase B及び100㎡の宅地に延20mの埋管を設置するものと仮定して解析を進めた。まず、一次元不飽和浸透流解析を行な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時の土壤水分状態を既知とした。次に、これを初期条件に用いて前述の方法で埋管浸透高を算出した。図15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(seepage)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(3)式を用いて求めた。

$$R_E = R_I \frac{A_I}{A} + R_P \frac{A_P}{A} - Q \quad \text{----- (3)}$$

ここでRe: 各支流域の有効降雨、Ri: 不浸透域の有効雨量 (= 観測雨量)、Rp: 浸透域の非浸透量、Q: 埋管よりの浸透高、A, Ai, Ap: それぞれ、支流域の面積、不浸透域面積、浸透域面積。

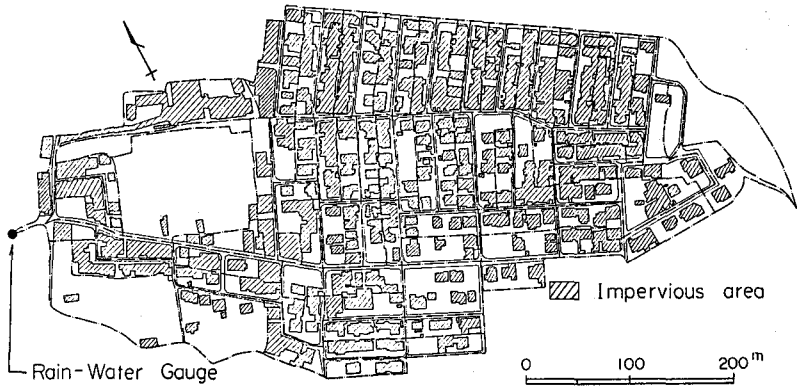


図12 北御蔵山住宅団地流域の概要

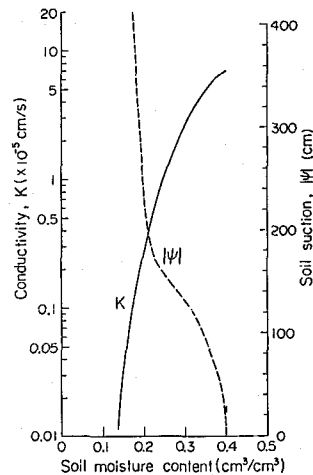


図13 北御蔵山住宅団地流域の土壌物理特性

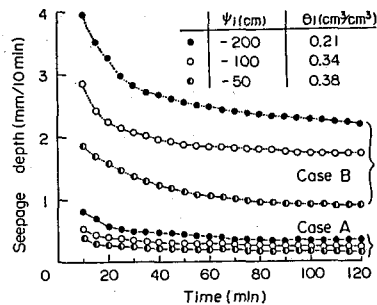


図14 埋管浸透量

(2) 雨水追跡 kinematic runoff modelを用いて流出解析を行なう場合、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。なお、等価粗度は0.03、排水路の粗度係数は0.01とした。

図15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、 $3.3\text{m}^3/\text{sec}$ のピーク流量を埋管設置により $2.4\text{m}^3/\text{sec}$ 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 $10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$ 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。

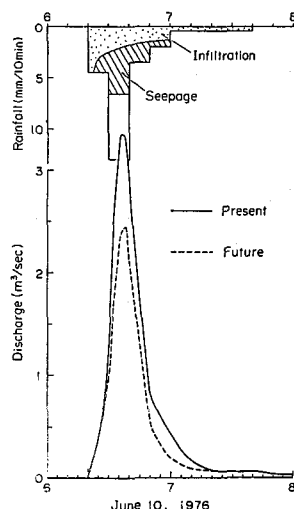


図15 流出解析結果

6. 結論

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、埋管をできるだけ深く設置し、圧力をかけると効果的である。

3) 埋管浸透量は(2)式で表わされる。(2)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) 埋管浸透法は透水係数が $10^{-5}\text{cm}/\text{sec}$ 以下の地盤では効果が少ない。

本研究は、文部省科学研究費自然災害特別研究(2)による研究成果の一部であること、実験・観測資料の整理及び計算に、京都大学化学研究所のFACOM M160-AD及び大型計算機センターのFACOM M382を使用したことを付記する。

参考文献

- 1)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、土研資料第1767号、1982。
- 2) 同上：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、土研資料第2126号、1984。
- 3)虫明など：現地土壌特性の評価に基づく雨水浸透施設の浸透解析、第20回水論文集、1984, PP.459-464。
- 4)山本など：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.26-1, 1984。
- 5)吉野：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.26-11, 1982。
- 6)Neuman, S.P.: Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., A.S.C.E., vol.99, HY-12, 1973, pp.2233-2250。
- 7)岡：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, 1983, PP.213-224。
- 8) Philip, J.R.: The Theory of Infiltration, 1, 2, Soil Sci., vol.83, 1957, pp.345-357, pp.435-448。
- 9)岡・角屋・野口：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, 1980, PP.227-238。