

(3) 雨水浸透基盤内の浸透機構の考察とその流出抑制効果に関する研究

STUDY ON THE PERFORMANCE OF THE INFILTRATION STRATA BY NUMERICAL ANALYSIS

原田 茂樹* 市川 新*

Shigeki HARADA*, Arata ICHIKAWA*

ABSTRACT: Infiltration strata is an artificially devised soil structure used to reduce urban stormwater discharge. The major functions of this strata are 1) the passage of stormwater at the surface, 2) the retention of this water within the strata and 3) the exfiltration of this water into the natural base soil. We have developed a model to predict the behavior of stormwater within the strata, based on the numerical solution of Richards' Equation with appropriate soil property functions. This model was verified using the drainage data of column experiment. The predicted drainage volume was similar to that of observed one, but rapid changes in the drainage rate produced by changes in the rainfall rate were not adequately predicted. Hysteresis effect which makes the soil property functions irreversible and many-valued was introduced using the Mualem's model, and the rapid changes in the drainage rate could be well predicted. Using this model, the performance of the strata was simulated. Clearly the performance depended on the exfiltration rate into the natural base soil. The drainage infiltration strata, which has a drainage pipe at the bottom of the strata, could be effective when the rate of exfiltration into the natural soil is small.

KEYWORDS: Infiltration strata, Richards' Equation, Mualem's hysteresis model

1. 研究の目的

都市域では、都市型洪水の危険性が增大している。これは都市化の進行に伴って顕在化したものであり、被覆面積の増加と雨水排除システムの発達を主な原因とするものである。すなわち、表面流出量の増加と流達時間の短縮が同時に起こり、流出ピーク値が高められて一時的に河川の流下能力を上回ることによっている。対策としては河川改修が必須であるが、主に用地取得の点多大な時間を要し、早急な問題解決策とはならない。そのため雨水排除システムの計画の中で、流出ピーク値低減のしくみ作りを進めることが求められる。その基本的な概念は、「流出する雨水の総量削減」、および「河川へと到達する雨水の時間的分散」の2つであり、それらに基づいたユニットプロセスの開発、評価、整備を進めることが現状の課題となっている。

具体的なユニットプロセスの1つに雨水浸透基盤（以下、基盤と呼ぶ）がある。これは表面部の透水性舗装で多くの雨水を浸透させ、透水性舗装下部の礫層に貯留し、さらにその雨水を礫層下部の砂層から自然土壌（以下、下部土壌と呼ぶ）へと浸透させるものである。この方策においては、下部土壌への浸透量と降雨開始時からの基盤内貯留量の増分の合計が、流出の抑制量となる。これは上述の2つの概念の中で、特に前者の流出量削減に対して大きな効果を表すものである。そのような効果を定量化し、将来的な最適設計への知見を得るためには、基盤での雨水の挙動、すなわち基盤表面での浸透や流出、および基盤内の浸透や一時貯留などの現象を定式化することが必要である。さらにそのような現象に、降雨形態（降雨量、ピーク強度、ピーク記録時刻）や下部土壌の特性（特に透水性）が与える影響を解析しなければならない。その観点から、本研究では以下の2つの内容を検討する。

* 東京大学工学部 都市工学科 (Department of Urban Engineering, University of Tokyo)

①基盤内の雨水の挙動の定式化：雨水が基盤表面で浸透された後に、基盤内で一時貯留されながら基盤下部へと浸透する挙動を表すモデルを作成する。モデルはRichards式を差分化した数値モデルであり、ライシメータに適用して検証を行う。さらにその検証を通じてヒステリシス現象（土壌が吸水過程と排水過程の履歴によって異なった特性を示すこと）の重要性に着目し、それをMualem式で表してモデルを改善する。

②基盤の効果の定量化：①のモデルによって基盤内の縦断方向の雨水の一時貯留の状態が表されるので、そのモデルの上部境界条件に工夫を加え、基盤表面での流出と浸透を分離した上で、浸透した雨水の下方への移動を表すモデルを作成する。さらに下部境界条件によって下部土壌への浸透量を現実的な値で表す。このモデルを仮想的な大降雨へと適用し、基盤の流出抑制効果を考察する。さらに基盤の最下部に集水管を付け、浸透した雨水を基盤外へと引き抜く方策をとる場合の流出抑制効果についても検討する。

2. 雨水浸透基盤内の雨水の移動を表す数値計算モデルの開発

2. 1 モデル化の視点

基盤における水収支は、表面部での浸透や流出、基盤内での浸透や一時貯留、蒸発、および下部土壌への浸透などの現象によって構成される。これらの現象の挙動は時間的に非定常であり、したがって現象の厳密な表現を図るには、数値計算モデルを用いることが望ましいと思われる。ここではすべての雨水が表面部で浸透し、表面流出が生じない状況での解析を進めた。すなわち、降雨と蒸発の実測値を与え、雨水が基盤表面から最下部に至るまでの浸透や一時貯留の挙動を、Richards式の差分化によるモデルで表すことを図る。その際に、ヒステリシス現象の影響を考慮しないモデル（基本モデルと呼ぶ）と、ヒステリシス現象の影響を考慮するモデル（ヒステリシスモデルと呼ぶ）の作成を2段階で進め、次第にモデルを改善することを図る。2つのモデルはそれぞれライシメータに適用し、その下部排水量データで検証を行う。

2. 2 ライシメータと検証用データ

図1は基盤のミニチュアモデルであるライシメータの形状を示している⁽¹⁾。ライシメータは、人工芝（厚さ2cm）、透水性舗装（厚さ10cm）、礫層（厚さ25cm）、砂層（厚さ5cm）の4層から構成されており、最下部にメッシュと排水管をつけている。このライシメータにおいては、人工芝以外は現実の基盤と同じ材料を用いているため、表面部の透水性舗装で浸透した雨水が最下部に至るまでの挙動は、現実の雨水浸透基盤におけるものを再現していると考えられる。人工芝は透水性舗装の目詰まりを防ぐ機能を果たす可能性があるため、試験的に設置しているものである。

ライシメータにおいては、降雨量（転倒ますによって1分おきに計測）、下部排水量（転倒ますによって4分おきに計測）、ライシメータ全体の重量（秤りによって4分おきに計測）のデータをパソコンの管理下で自動的に取得している⁽²⁾。ここで下部排水量は、ライシメータ最下部に到達した雨水がメッシュを通過して、ライシメータ外へと流出する量を表している。またライシメータの重量は、降雨開始時の初期水分量と蒸発量を求めるために計測している。計測は1986年から1年以上にわたって継続され、その間に20以上の降雨事象が記録された。その中から表面流出が生じない程度の強度と量の降雨事象として、降雨8613と降雨8620の2つの降雨を選び、解析対象降雨とした。この2つの降雨は初期水分量も概ね等しいものである。2つの降雨の特性は、表1に示した。表1は、①総降雨量(mm)、②時間当たり最大降雨強度(mm/h)、③降雨開始から2日間の総下部排水量(mm)、④降雨開始から2日間の間の蒸発量

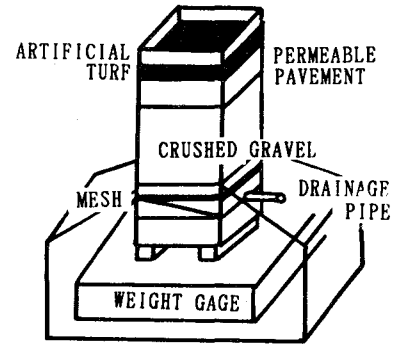


Fig.1 Infiltration strata

Tab.1 selected rainfalls

RAINFALL NO.	①	②	③	④	⑤
8613	68.7	10.5	61.2	0.0	46.8
8620	28.9	3.5	27.1	3.0	50.9

(mm)、⑤ライシメータ全体の初期水分量(mm/42cm)の各項目を整理して示したものである。

2. 3 基本モデルの作成

(1) 基本モデルの枠組み

基本モデルの枠組みを表2に示した⁽³⁾。

土壌内の水分挙動を表すRichards式は、飽和域から不飽和域へと拡張されたダルシー則と、連続の式の2つの式を連立したものであり、時間 t 、場所 z 、および圧力ポテンシャル ψ を変数とする式である。圧力ポテンシャル ψ は、土壌が不飽和の状態では負の値をとり、土壌内水分量の増加とともに値を増す。土壌の圧力ポテンシャルがエアークエンリー値 ψ_e に等しいときは土壌が飽和に近い状態であり、また正の値を記録するときは地下水面下の土壌のように完全に水で満たされた状態である。Richards式においては、 $C(\psi)$ と $k(\psi)$ の2つの土壌水分特性を与えなければならない。 $C(\psi)$ は圧力ポテンシャル ψ と含水率 θ の関係(以下 $\psi-\theta$ 関係と呼ぶ)を、 $\partial\theta/\partial\psi$ のように ψ で微分した物である。また $k(\psi)$ は圧力ポテンシャル ψ と透水係数 k の関係(以下 $\psi-k$ 関係と呼ぶ)を表している。ここでは表2に示すように、両者ともCampbell式によって一義的に与えた(ヒステリシス現象の影響による多義的な特性は2.4節で検討する)。

図2は数値計算の計算格子を示している。

計算格子には厚さ1cmの上部境界層、厚さ5cmの下部境界層を設定し、残りの部分は各1cmのNODEとした。ここで、ライシメータは4層によって構成されているが、人工芝と透水性舗装は併せて1つの層とし、砂層全体とメッシュを併せて下部境界層として扱っている。計算において与えた初期条件と境界条件は、表2に示した⁽³⁾。それらの条件、及び各個に層境界で与えた条件の説明を以下に示す。

◆上部境界条件：2つの解析対象降雨は、いずれも降雨強度が透水性舗装や礫層の飽和透水係数よりも低く、かつ降雨の総量も基盤の全空隙を下回る量であるので、表面流出は生じずすべての雨水が上部境界層に浸透するとした。

◆下部境界条件：ライシメータ最下部のメッシュの近傍は、大気と接している。したがって下部境界層の最下部は大気圧となり、

Tab.2 Scheme of computation

(GOVERNING EQUATIONS)			$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}$ (RICHARDS' EQ.)
$k(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_e - \psi}{\psi_e} \right)^{2+2/b}$ (CAMPBELL'S EQ.)	$C(\psi) = - \frac{\theta_s}{\psi_e} \left(\frac{\psi_e - \psi}{\psi_e} \right)^{1+1/b}$ (CAMPBELL'S EQ.)		
(CONDITIONS)			
(INITIAL)	(UPPER BOUNDARY)	(LOWER BOUNDARY)	
$z + \psi = 0$	$R = -k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)$	$q = sk \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)$	
(VARIABLES)			
t	TIME	z VERTICAL AXIS OF COORDINATES	
$k(\psi)$	RELATION BETWEEN NEGATIVE PRESSURE POTENTIAL AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY		
$C(\psi)$	RELATION BETWEEN NEGATIVE PRESSURE POTENTIAL AND VOLUMETRIC WATER CONTENT		
ψ	NEGATIVE PRESSURE POTENTIAL		
R	FLUX OF RAINFALL		
q	FLUX OF DRAINAGE		
θ	VOLUMETRIC WATER CONTENT		
(PARAMETER)			
k_s	SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY		
ψ_e	AIR ENTRY VALUE		
θ_s	MAXIMUM VOLUMETRIC WATER CONTENT		
b	CAMPBELL'S CONSTANT		
sk	CONSTANT (HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF BOUNDARY LAYER)		

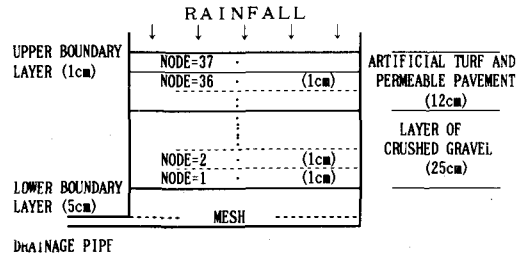


Fig.2 Computational grid

それよりも上部では負圧となる。ここで、下部境界層（砂層とメッシュ）の厚さは、砂層のエアエントリー値よりも小さいので、下部境界層は飽和に近い状態となっており、下部境界層に浸入した雨水と同量の雨水が基盤外へと同時に流出して排水されると考えられる。その時の排水フラックスの大きさは、下部境界層と礫層が接する点の圧力ポテンシャル（計算で求める値）と下部境界層最下部の圧力ポテンシャル（大気圧なので0）との差、下部境界層の厚さ、及びパラメータ sk を用いてダルシー則で計算した。 sk は下部境界層（砂とメッシュ）全体の透水係数にあたるものである。

◆初期条件：解析対象降雨とした2つの降雨の初期には、ライシメータにおいて下部排水が無かったので、初期では、ライシメータ内の各部で全水理ポテンシャルが釣り合っている（圧力ポテンシャル ψ と位置ポテンシャル z の和が0）とした。基準点はライシメータ最下部のメッシュの地点であり、その点では圧力ポテンシャル ψ は大気圧に等しく0であり、かつ位置ポテンシャル z も0であるとした。

◆層境界の条件：ライシメータ内の透水性舗装と礫層の間に層境界があるが、そこでは圧力ポテンシャル ψ は連続して分布し、含水率 θ は各層の土壌水分特性に依存して不連続に分布するとした。また層境界での透水係数は、2つの層の透水係数の平均値をとった。

Richards式の差分化は陰解法によって行い、10秒おきに各計算格子の圧力ポテンシャル ψ と各格子間を移動する雨水のフラックスおよび下部排水される雨水のフラックスを求めた。

(2) 基本モデルのパラメータおよび計算条件の同定

基本モデルの中には、表2に示したように、ライシメータを構成する各層に対してそれぞれ ks （飽和透水係数）、 ψ_e （エアエントリー値）、 θ_s （飽和含水率）、 b （Campbell式の定数）という4つのパラメータがあり、また下部境界層に対して sk という1つのパラメータが含まれる。ここでは、それぞれ各層の ks 、 ψ_e 、 θ_s については、基本モデルのテストランの前に、既往の研究や実測値を参照して表3のように決定した⁽⁴⁾。その後テストランを行って、その他のパラメータや条件について以下のような結論を得た⁽¹⁾⁽²⁾。

◆パラメータ b は、透水性舗装に対して3.0、礫層に対して3.5を与えたときに下部排水量の計算値が実測値とよく一致する。

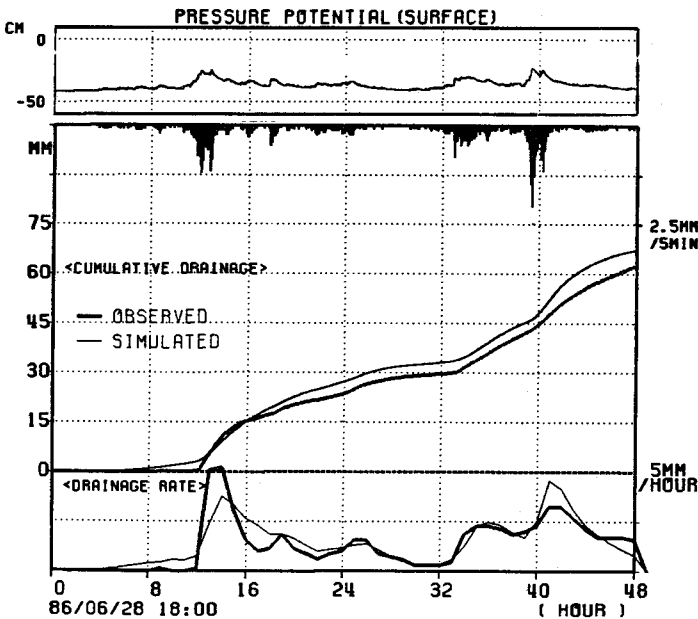
◆下部境界条件に含まれるパラメータ sk の値は、0.0001cm/secとしたときに、下部排水量の計算値が実測値とよく一致する。この値は一般的に言われる砂の透水係数よりも小さい値であり、メッシュの目詰まりが起きていると考えられる。

◆降雨8620においては、降雨の休止の後に素早く蒸発が生起しているがその値を上部境界層で上向きのフラックスで与えた場合に、下部排水量の総量が実測値によく一致する。

(3) 基本モデルの結果について

Tab.3 Specified parameters

	ks (cm/s)	ψ_e (cm)	θ_s
PERMEABLE PAVEMENT	0.22	-2.0	0.25
CRUSHED GRAVEL	0.077	-3.0	0.35



Graph.1 Observed and simulated drainage profile (Rainfall 8613)

同定した条件とパラメータのもとで基本モデルを2つの降雨に適用した結果を、グラフ1（降雨8613）、およびグラフ2（降雨8620）に示す。個々のグラフでは、時間当りの下部排水強度と累積排水量を、それぞれ実測値と計算値で比較している。それぞれのグラフでは、下部排水強度と累積排水量の両者とも、観測値と計算値はある程度類似しているが、降雨強度の変化に伴う微妙な下部排水強度の変化は再現しきれていない。特に降雨が弱まったり降雨が休止したりした場合の下部排水強度の低減部分においては、計算値が実測値を上回っていることが多い。これは、基本モデルでは、土壌が吸水過程－排水過程の遷移を繰り返す時の土壌水分特性のヒステリシス現象を考慮

していないので、吸水過程の土壌水分特性はある程度反映されているものの、排水過程での土壌水分特性が反映されていないためと思われる。また各グラフの最上段には透水性舗装表面における圧力ポテンシャルの時間変化を示した。両者において表面部の圧力ポテンシャルは降雨強度の変化に連れて値が増減されているが、常に負の値をとっており、表面部が完全に飽和することはなかったことがわかる。

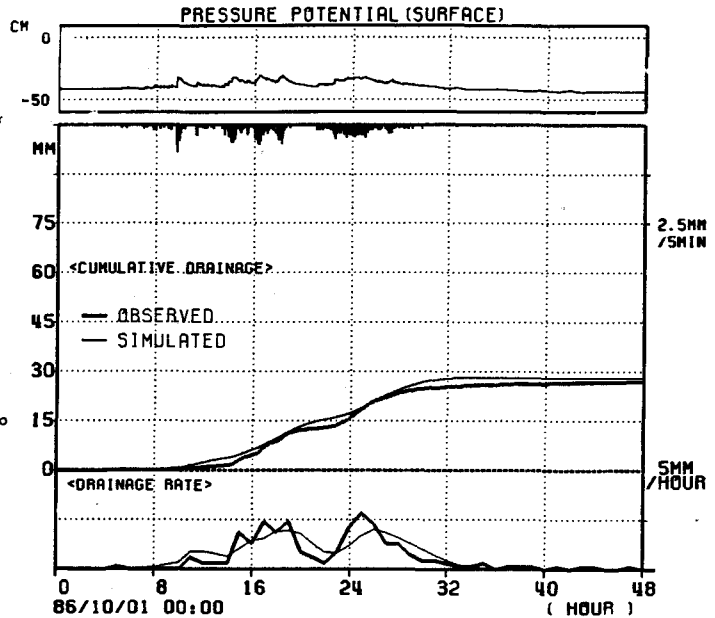
2. 4 ヒステリシスモデルの開発

(1) ヒステリシスモデルの枠組み

土壌水分特性のヒステリシスとは、土壌が吸水－排水の状態を繰り返す際に、前述した $\psi-\theta$ 関係、および $\psi-k$ 関係の2つの土壌水分特性の関係式が多義の関数となることである⁽⁵⁾。ここでは、礫層の $\psi-\theta$ 関係のヒステリシスをMualemのモデルによって表し、前述の基本モデルに導入することを試みた。

図3はヒステリシスを考慮した際の多義的な $\psi-\theta$ 関係の概念図を示したものである⁽⁶⁾。ヒステリシス

現象の特徴の1つは、排水過程と吸水過程で土壌水分特性が異なることである。また特徴のもう1つは、ある時点での土壌水分特性が、それ以前に記録された吸水－排水の遷移の履歴に依存していることである。これらは、土壌内の細孔の複雑な分布によって起こるものであり、そこでの水と空気の水と空気のメニスカス形成やメニスカスと土壌の接触角などが、2つの過程で異なったり、その遷移の履歴によって異なるためであるといわれており、そのメカニズムは、土壌内の細孔を模式化したインクビンモデルなどで説明される⁽⁷⁾。



Graph. 2 Observed and simulated drainage profile (Rainfall 8620)

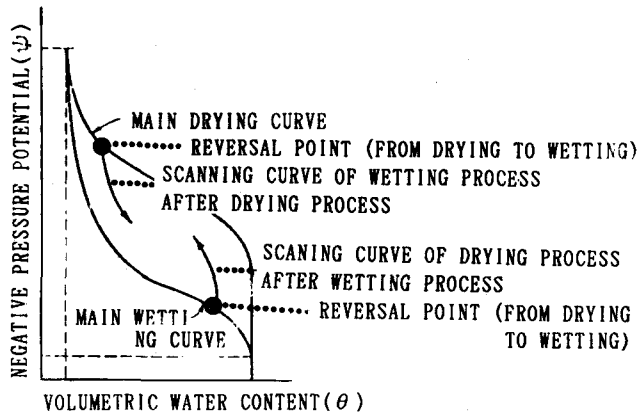


Fig. 3 Concept of hysteresis

Mualemのモデルは⁽⁶⁾⁽⁷⁾、上述したようなヒステリシス現象の特徴をふまえ、吸水-排水の転換が起こる度に、新しい ψ - θ 関係(図3中に示したスキニングカーブと言われるもの)を、計算するものである。その方法は表4に示した。表4の2つの式は、それぞれ一連の吸水-排水の履歴の後の、吸水過程を表すスキニングカーブと排水過程を表すスキニングカーブを求めるものである。2つの式には、主吸水過程と主排水過程の2つの ψ - θ 関係が、その土壤に固有な土壤水分特性として各土壤に与えられており、その2つの特性を組合せることによって、新しいスキニングカーブが求められる。その時に、過去に記録された一連の吸-排水の転換時の圧力ポテンシャル値によって、過去のスキニングカーブの特性を保存しながら2つの特性を組み合わせる工夫がなされている。ここでは、基本モデルの枠組みの中に、以下の方法でMualemのモデルを導入し、ヒ

ステリシスモデルとした⁽¹⁾⁽²⁾。

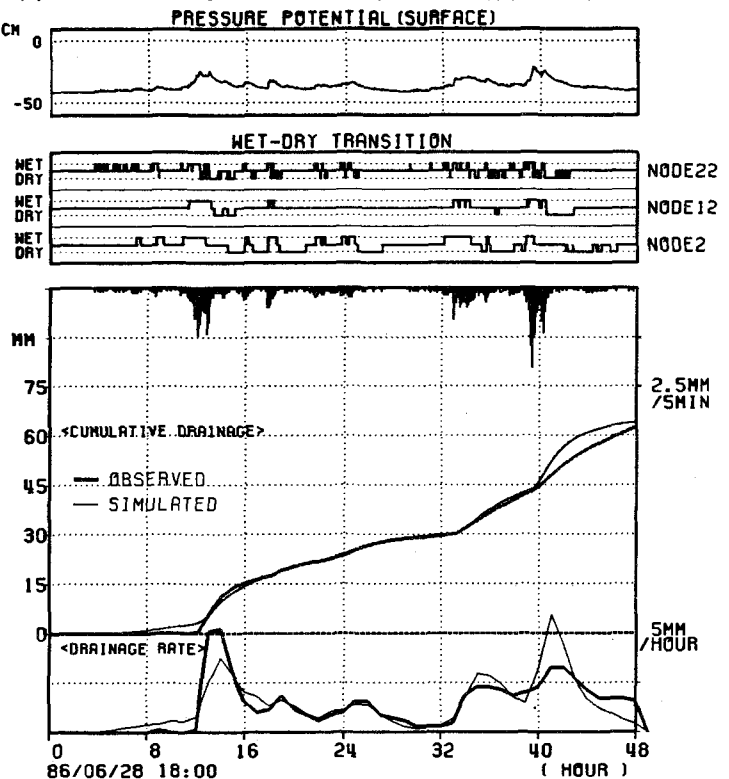
◆主吸水過程と主排水過程の2つの特性は、それぞれCampbell式に異なる b 値(3.5と7.5)を与えることによって表した。ここで与えた2つの b 値の内、3.5は基本モデルで与えたものであり、それは主吸水過程の特性を表すと考えた。7.5は、主排水過程の特性を示すために新たに与えたものであるが、排水過程の b 値は吸水過程の b 値よりも大きくなるので、3.5以上という条件の基で、試行錯誤的に決定したものである。

◆各計算ステップ(10秒おき)の中で、各NODEの貯留量変化を計算し、その増減から各NODEが吸水と排水のどちらの過程であるかを判断した。

◆各NODEにおいて、吸水と排水の転換点が記録されるたびに、Mualemのモデルを用いて ψ - θ 関係のスキニングカーブを計算し、次の計算ス

Tab.4 Mualem's hysteresis model

SCANNING CURVE FOR THE WETTING PROCESS AFTER A HISTORY OF WETTING AND DRYING	
$\theta(\psi) = \theta_w(\psi) + \frac{\{\theta_w(\psi_{n-1}) - \theta_w(\psi)\} * \{\theta_d(\psi_n) - \theta_w(\psi_n)\}}{\{\theta_s - \theta_w(\psi_n)\}} + \sum_{i=1}^{(n/2)-1} \frac{\{\theta_w(\psi_{2i-1}) - \theta_w(\psi_{2i+1})\} * \{\theta_d(\psi_{2i}) - \theta_w(\psi_{2i})\}}{\{\theta_s - \theta_w(\psi_{2i})\}}$	
SCANNING CURVE FOR THE DRYING PROCESS AFTER A HISTORY OF WETTING AND DRYING	
$\theta(\psi) = \theta_w(\psi) + \frac{\{\theta_w(\psi_n) - \theta_w(\psi)\} * \{\theta_d(\psi) - \theta_w(\psi)\}}{\{\theta_s - \theta_w(\psi)\}} + \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \frac{\{\theta_w(\psi_{2i-1}) - \theta_w(\psi_{2i+1})\} * \{\theta_d(\psi_{2i}) - \theta_w(\psi_{2i})\}}{\{\theta_s - \theta_w(\psi_{2i})\}}$	
ψ : NEGATIVE PRESSURE POTENTIAL θ_w : FUNCTION OF THE MAIN WETTING CURVE θ_d : FUNCTION OF THE MAIN DRYING CURVE ψ_n : VALUE OF THE NEGATIVE PRESSURE POTENTIAL CORRESPONDING TO THE n TH REVERSAL POINT n : SUBSCRIPT WHICH REFERS TO THE ORDERS OF RECORDED REVERSAL POINTS	



Graph.3 Observed and simulated drainage profile taking into account hysteresis(Rainfall 8613)

テップの中でRichards式に代入した。
(2) ヒステリシスモデルのシンの
結果

グラフ3 (降雨8613)、およびグラフ4 (降雨8620) の結果をそれぞれヒステリシスを含まないもの(グラフ1とグラフ2)と比較すると、累積排水量の再現性が高まっていることがわかる。また下部排水強度の低減部分の再現性も高まっていることがわかる。また各グラフでは、礫層内の上方、中央、下方の3つのNODEでの吸-排水の転換の様子を示しているが、それぞれ降雨強度の変化に伴って転換点を記録しており、特に上方で頻繁に転換点を記録していることがわかる。グラフ5は、降雨8613における礫層内の上部と下部のNODEにおいて、実際に8640回の計算ステップ(10秒おきに2日分)の中で与えられた $\psi-\theta$ 関係をプロットした物である。ここでは上方のNODEでは転換点が多くても $\psi-\theta$ 関係の変化幅は小さくほぼ吸水過程の

曲線上にあり、一方で下方のNODEでは転換点が少なくても $\psi-\theta$ 関係の変化幅が大きいことが示されている。ヒステリシスの影響は、土壌内の飽和に近い部分で大きいといわれており⁽⁸⁾、グラフ5の結果はその記述に合致していると考えられる。

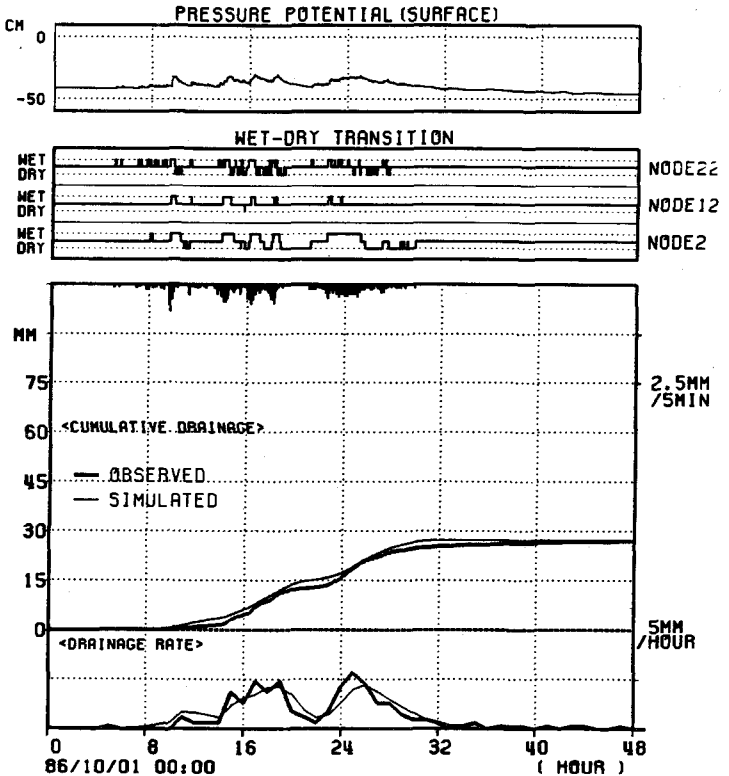
3. 表面流出モデルの作成と、仮想的な大降雨への適用

3. 1 表面流出量モデルの作成

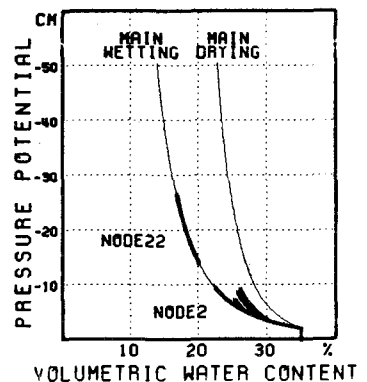
基盤からの表面流出量は、降雨強度と基盤表面での浸透強度との大小関係によって決定される。また、基盤表面での浸透強度は、基盤内のその時点での水分貯留状態に影響を受けると考えられる。ここでは前項で示したヒステリシスモデルによって、基盤の表面から最下部に至るまでの、雨水の浸透と一時貯留の挙動がほぼ再現されたと考え、そのモデルの上部境界条件に工夫を加え表面流出量を表すことを考えた。また、下部境界条件中の定数skにいくつかの値を与え、雨水が基盤から下部土壌へ浸透される強度を現実的な値で設定することを図った。

(1) 表面流出量の表現

基盤全体が雨水で満たされていない場合には、透水性舗装から下方への雨水の移動が速やかに行われ、基盤表面での浸透強度は、透水性舗装の飽和透水係数よりも、大きな強度を維持していると考えられる。一方で、基盤全体が雨水で満たされた場合には、透水性舗装より下部の層での雨水の移動が透水性舗装か



Graph.4 Observed and simulated drainage profile taking into account hysteresis(Rainfall 8620)



Graph.5 Calculated negative pressure potential and volumetric water content

ら下方への雨水の移動を影響し、基盤表面での浸透強度は透水性舗装の透水係数よりも小さな値をとると考えられる。

したがって、基盤表面での表面流出は、降雨強度と透水性舗装の透水係数との代数的な比較だけでは捉えきれず、各時点での基盤内の雨水の縦断方向の一時貯留状態を考慮して決定しなければならないと考えられる。ここでは、基盤がどのように満たされても、表面部での圧力ポテンシャルが0以上にならないという条件を用いて、表面流出量を計算することを図った（実際には表面部に薄膜状に湛水が発達するので、0よりも僅かに大きい値をとるといわれている⁽³⁾が、ここではそれを無視した）。すなわち数値計算モデルの10秒おきの計算ステップにおいて、降雨フラックスがすべて上部境界層に浸透すると仮定して計算を行った後、表面部での圧力ポテンシャルが正の値を示した場合には、降雨フラックスを僅かに減らしてもう一度同じ計算ステップを行うというループを加えたのである。このループは上部境界層の圧力ポテンシャルが0以下になるまで繰り返され、最終的に与えられた降雨フラックスと現実の降雨フラックスの差が、表面流出量として計算される。

(2) 下部浸透量の表現

現実の雨水浸透基盤では、基盤の最下部は下部土壌と接している。この場合の下部土壌への浸透フラックスは、基本モデル及びヒステリシスモデルでの下部排水量と同様に、下部境界層が礫層と接する点の圧力ポテンシャルと下部境界層が下部土壌と接する点の圧力ポテンシャルとの差、下部境界層の厚さ、およびその場での透水係数によって、ダルシー則で求めることができる⁽³⁾。したがって、下部土壌への浸透強度を厳密に再現するためには、下部境界層と下部土壌が接する点の圧力ポテンシャルを計算することが必要であり、それは下部土壌の土壌水分特性や地下水面の位置などの情報が適切に与えられれば、既に述べたヒステリシスモデルを下部土壌まで拡張して求めることができる。しかし、その場合には下部土壌のかなり深部にまで計算を行わなければならないこと、さらに地下水面の挙動が複雑であること、また下部土壌内での浸透の挙動を1次元とみなせない場合があることなどの新たな問題点が生じる。

ここでは、下部土壌への浸透の挙動を簡略化し、ヒステリシスモデルで用いた下部境界条件と同様に、下部境界層と礫層が接する点の圧力ポテンシャルと、パラメータ sk によって表すことを試みた。この状態では下部境界層と下部土壌が接する点の圧力ポテンシャル変化を考慮していないので、現実の下部土壌への浸透の挙動とは異なる点があるが、パラメータ sk によって礫層から下部土壌へと移動する雨水のフラックスの大きさを表すことができるので、下部土壌への浸透強度の最大値を設定することができる。すなわち下部土壌への浸透強度の最大値は、基盤が完全に満たされたときに、以下の式(1)で表される。

$$q_{\max} = \{(\text{下部境界層より上方の土柱厚} + \text{下部境界層厚}) / \text{下部境界層厚}\} * sk \cdots \cdots \text{式(1)}$$

ここで用いた方式では、基盤が雨水で満たされている間は、下部土壌への浸透強度は継続的に $q_{\max}$ とされる。一方で、現実の下部土壌においても、基盤が雨水が満たされている間には、下部土壌への湛水浸透状態が生起されるので、時間と共に浸透強度は飽和透水係数に近づき⁽⁸⁾、そのため次項で行うシミュレーションにおいては、 sk によって式(1)のように $q_{\max}$ を設定すれば、それが現実の下部土壌における浸透強度を、ある程度代表し得ると考えた。

3. 2大降雨への適用

(1) 解析対象降雨

雨水浸透基盤の効果を解析するための解析対象降雨は、量もピーク強度も大きいものである必要があるが、特にピーク降雨が降雨の終期にある場合の浸透の挙動を知ることが重要である。そこでそのような条件を満たす2つの仮想的な降雨を、以下のように作成した。

降雨1：総降雨量270mm、時間最大強度50mm、5分間最大強度4.2mm

降雨2：総降雨量330mm、時間最大強度55mm、5分間最大強度8.5mm

降雨1は、終期にピークが来るように独自に作成したものである。また降雨2は実際に1986年の8月4日に記録された降雨をもとに、1分おきの観測強度を常に2倍にして作成したものであり、終期に同程度のピークが2つあるという特徴がある。2つの降雨は共に非常に大きな降雨であり、現実の都市型洪水に対処するための流出抑制効果を図るのに適切であると考えられる。

(2) シミュレーション結果

下部土壌の q_{max} と降雨を以下のように変えてシミュレーションを行った。

シミュレーション1： $q_{max}=2.6\text{mm/hour}$ ($sk=0.00001\text{cm/sec}$)、降雨1に適用したもの

シミュレーション2： $q_{max}=2.6\text{mm/hour}$ ($sk=0.00001\text{cm/sec}$)、降雨2に適用したもの

シミュレーション3： $q_{max}=13\text{mm/hour}$ ($sk=0.00005\text{cm/sec}$)、降雨1に適用したもの

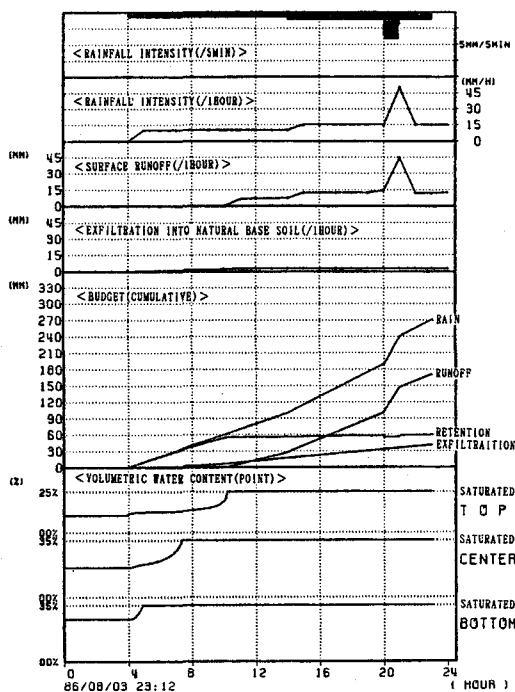
シミュレーション4： $q_{max}=26\text{mm/hour}$ ($sk=0.00010\text{cm/sec}$)、降雨2に適用したもの

シミュレーション5： $q_{max}=52\text{mm/hour}$ ($sk=0.00020\text{cm/sec}$)、降雨1に適用したもの

シミュレーション6： $q_{max}=52\text{mm/hour}$ ($sk=0.00020\text{cm/sec}$)、降雨2に適用したもの

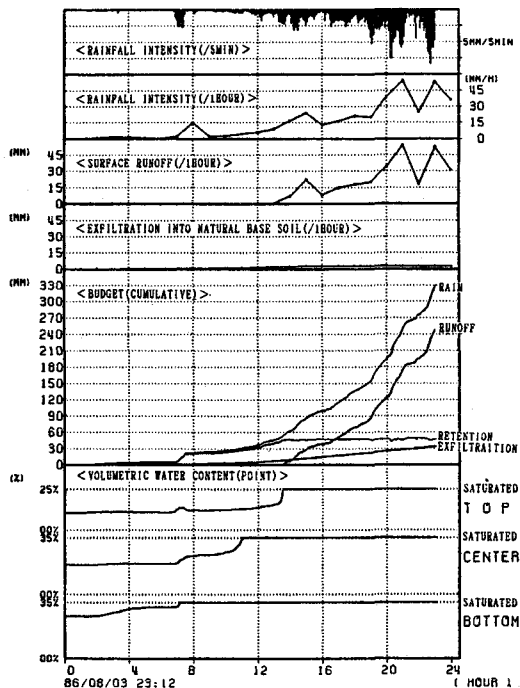
それぞれのシミュレーションの結果は、順にグラフ6からグラフ11に示した。各グラフには、1段目に5分間当りの降雨強度、2段目に1時間当りの降雨強度、3段目に1時間当りの表面流出の強度、4段目に1時間当りの下部浸透の強度、5段目に降雨、表面流出、下部浸透、降雨開始からの貯留の増分および蒸発（相対的に小さいのでプロットはしていない）から構成される水収支、6段目には透水性舗装表面、礫層中央部、礫層最下部の各点の含水率の時間変化を示している。

グラフ6と7は、下部土壌にあまり浸透されない場合の結果であり、この場合には両方のグラフにおいて、早い段階で表面流出が発生している。最下段に示した基盤の各部の含水率変化を見ると、基盤の下部から上部に向けて徐々に飽和されている様子が示されている。表面流出が起こっているのは、基盤の最上

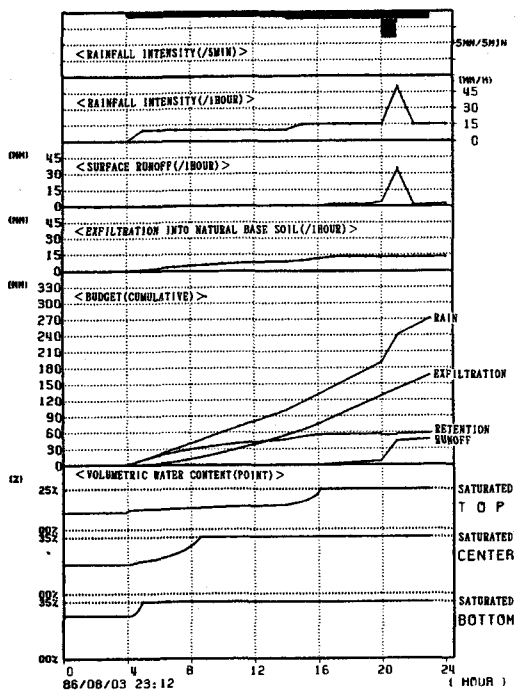


Graph.6 Simulation 1

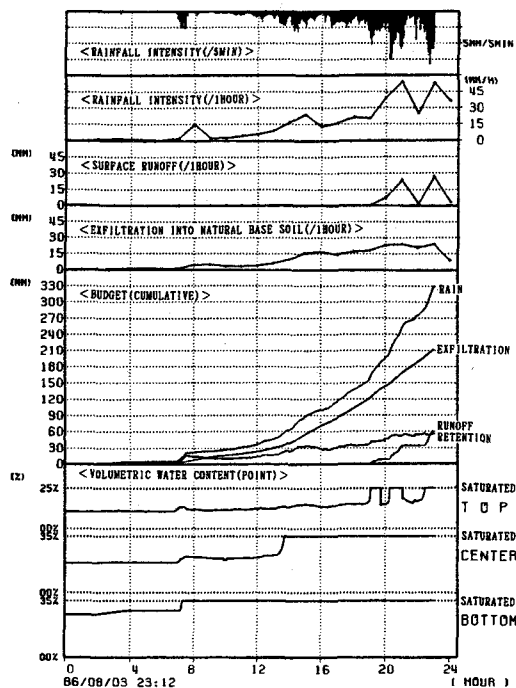
(Maximum exfiltration rate=2.6mm/h, Rainfall 1)



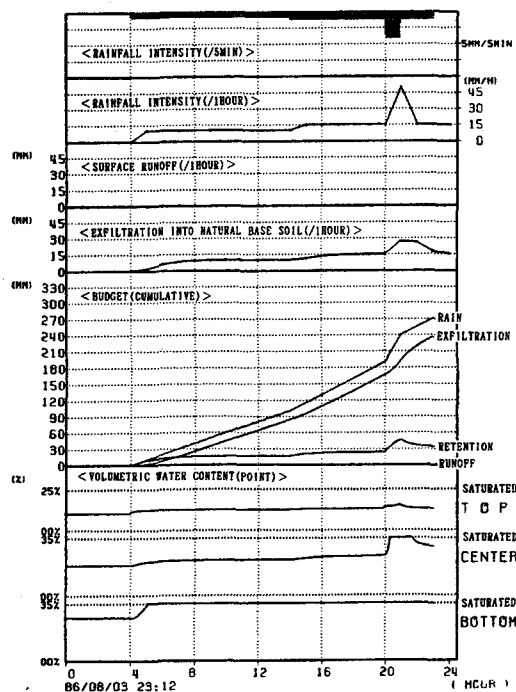
Graph.7 Simulation 2



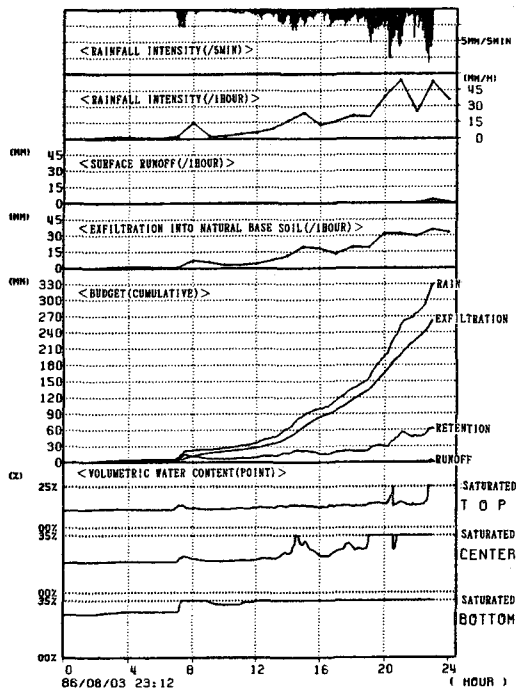
Graph.8 Simulation 3
(Maximum exfiltration rate=13mm/h, Rainfall 1)



Graph.9 Simulation 4
(Maximum exfiltration rate=26mm/h, Rainfall 2)



Graph.10 Simulation 5
(Maximum exfiltration rate=52mm/h, Rainfall 1)



Graph.11 Simulation 6
(Maximum exfiltration rate=52mm/h, Rainfall 2)

部が飽和されたときであり、その後は下部土壌への浸透量に応じた流出抑制が行われるが、後半のほとんどの降雨は表面流出となっていることがわかる。

グラフ8と9は、前の2つのグラフでの土壌よりも下部土壌に多く浸透される場合のものであり、グラフ9で用いた q_{max} は東大構内で採取された自然土壌の飽和透水係数にほぼ等しい場合のものである。この2つのグラフにおいても、基盤の下部から飽和が始まり、最上部が飽和された時点で表面流出が発生している。しかし、グラフ6や7と比較すると表面流出が起り始める時期は遅い。また、表面流出が生じた後の、下部土壌への浸透量に応じた量の流出抑制量は、グラフ6や7に比較して大きく、降雨終期のピーク部においては、グラフ8で約13mm、グラフ9で約26mmの流出抑制が果たされている。グラフ9の流出抑制値は降雨ピークの半分程度であり、この場合には雨水浸透基盤の効果は大きいと思われる。

グラフ10と11は、下部土壌によく浸透する場合のものであり、両者とも降雨期間中を通じて基盤の全体が満たされることは少なく、結果としてほとんどの雨水を浸透させている。しかしグラフ11の後半部においては、2つ目のピークの際に僅かに表面流出が見られ、このような降雨の場合には隙層を厚くするなど、基盤の貯留容量を増す必要性も示されている。

3. 3集水管によって雨水を排除する場合の流出抑制効果

グラフ6や7に示したように、下部土壌への浸透強度が小さい場合には、終期に記録されるピーク降雨のほとんどが流出するので、その場合には基盤の構造そのものを改善しなければならない。その1つの方策として、基盤最下部に集水管を付け、雨水を高い強度で排除する方法が考えられる。この場合には、集水管による排除量は流出抑制量とならないが、降雨の初期から高い強度で雨水を排除することによって基盤が満たされることを防ぎ、その結果、ピーク降雨の表面流出がなくなるという効果が期待できる。ここで、集水の強度が降雨強度よりも低減されていれば、既に述べた流出抑制の2つの概念の内の後者、すなわち「流出量の時間的分散」が果たされることとなる。

前項のグラフ10と11の下部浸透量を、集水管によって排除した量と考えると、既に示したように、2つのグラフにおいて表面流出はほとんどなく、また時間あたりの最大集水強度は降雨ピークに比べて、それぞれ20mm/hour程度少ない値となっている。これは雨水が基盤を通過することによって、雨水の下方への移動が平均化されたものと考えられ、必ずしも下部土壌への浸透によって雨水流出の量的な削減をしなくても、流出抑制がなされる可能性を示している。

東京大学野球場では、外野部を用いて、集水管を付けた場合の雨水浸透基盤の効果に関するフルスケール実験を行っている。図4は、東京大学野球場に設置しているZ2基盤の形状を示している。そのデータの解析は現在進行中であるが、これまでの解析において、集水管の設置によって多くの雨水が基盤内に浸透、貯留されること、および集水管から流出する雨水の強度は平均化されて降雨強度よりも小さくなり、流出量の時間的な分散のための有効な施設として整備できる可能性が示されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

4. 結論

本研究の結論として以下の3つが挙げられる。

① 雨水浸透基盤内の浸透の挙動は、Richards式の差分化による数値計算モデルによって、再現できることが判った。

さらに、 $\psi-\theta$ 関係のヒステリシスをMualemのモデルで表し、数値計算モデルに導入すると、浸透の挙動の再現性は

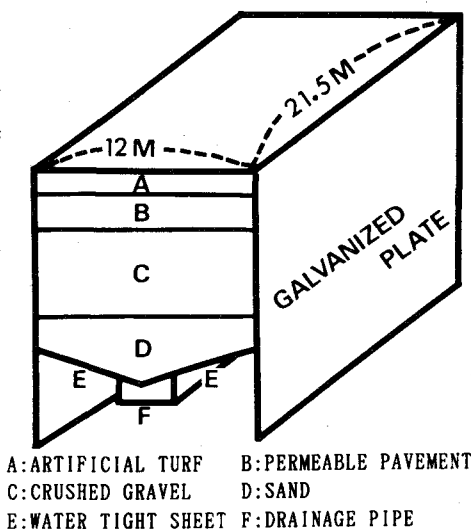


Fig.4 Drainage infiltration strata

さらに高まることが示された。

②雨水浸透基盤における表面流出量モデルにおいて、下部土壌への浸透強度を変化させてシミュレーションを行った結果、雨水浸透基盤の流出抑制効果はその浸透強度に大きく依存することが判った。また、その浸透強度が降雨期間を通じて30mm/hour程度以上あれば、終期にピークのある大降雨の際にも、基盤による流出抑制が期待できることが判った。

③下部土壌の透水性が低い場合の雨水浸透基盤の構造改善の1つの方法として、基盤の最下部に集水管を付けて浸透した雨水を降雨の初期から引き抜いた場合には、その量が流出量となるので、流出する雨水の量的な削減はできないが、流出強度を平準化させる効果があることが示された。

5. 今後の課題

本研究の今後の課題として以下の2つが挙げられる。

①表面流出量モデルにおいて、下部土壌への浸透量の表現は簡略化したものを用いたが、地下水位の影響や、下部土壌内の2次元流れを再現した計算を行うことも検討しなければならない。

②集水管を付けた場合の基盤の効果を考察において、下部全面から雨水を引き抜く方法での効果を解析したが、現実的にはある部分を土壌へ浸透させる方式をとることになると思われるので、その場合の効果についてさらに検討をしなければならない。

参考文献

- (1) 原田, 市川, 「雨水浸透基盤における浸透挙動に関する研究」,
土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第2部, pp164-165, 1990年
- (2) 原田, 市川, 「土壌内の雨水浸透のシミュレーションに関する研究」,
水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集, pp172-175, 1990年
- (3) FREEZE, R. A., 「THE MECHANISM OF NATURAL GROUND-WATER RECHARGE AND DISCHARGE
1. DIMENSIONAL, VERTICAL, UNSTEADY, UNSATURATED FLOW ABOVE A RICHARGING OR DISCHARGING
GROUND-WATER FLOW SYSTEM」, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 5, NO. 1, pp. 153-170, 1969
- (4) JEEVARAJ, C. G., 「MECHANISM OF UNSATURATED SEEPAGE FLOW BY A CONSTRICTED TUBE MODEL」,
東京大学土木工学科博士論文, 1985
- (5) 盛谷, 安藤, 高橋, 「ヒステリシスを考慮した雨水の不飽和浸透による地下水かん養機構に関する
研究」, 水文・水資源学会誌第3巻第1号, pp37-42, 1990
- (6) MUALEM, Y., 「A CONCEPTUAL MODEL OF HYSTERESIS」,
WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 10, NO. 3, pp514-520, 1984
- (7) IWATA, S. and TABAUCHI, T., 「SOIL WATER INTERACTION」, pp33-63,
MARCEL DECKER INC., 1988
- (8) SKAGGS, R. W. and KHALEEL, R., 「INFILTRATION」, CHAP. 4 OF "HYDROLOGIC MODELING OF SMALL
WATERSHEDS", pp. 121-162, EDITED BY HAAN, C. T., JOHNSON, H. P. and BRANKENSIEK, D. L., 1982
- (9) 市川, 原田, 「集水管付き雨水浸透基盤の効果に関する研究」,
土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, pp20-21, 1989年
- (10) 市川, 原田, 「集水管付き雨水浸透基盤による雨水流出抑制効果」,
第27回下水道研究発表講演集, pp27-29, 1990年
- (11) ICHIKAWA, A. and HARADA, S., 「MITIGATING PEAK DISCHARGE OF THE OVERLAND SURFACE
RUNOFF USING THE DRAINAGE INFILTRATION STRATA」,
PROC. of the 5th INTER. CONF. on URBAN STORM DRAINAGE, VOL2, pp821-826, 1990