

東京大学 工学部 都市工学科 学生員 原田 茂樹
 東京大学 工学部 都市工学科 正員 市川 新
 三菱信託銀行(株) 成川 順一
 川崎製鉄(株) 加古登志夫

1. 研究の目的: 都市型洪水に対処するための方策の1つとして、雨水浸透基盤が提案されている。これは透水性舗装、礫層、砂層から構成され、表面部の透水性舗装で雨水を浸透させ、表面流出量を減じるものである。浸透した雨水は礫層、砂層を通して基盤外へと排水され、透水性舗装の浸透能低減を防ぐと考えられるので、その挙動再現は、基盤設計において重要なことである。本稿では、雨水浸透基盤を模したライシメータを用い、強度の変化が大きな実降雨に対して、以下の2点の解析を行った。①ライシメータ内の水分挙動をRichardモデルで表し、下部排水量の再現性を調べた。②吸水-排水過程のヒステリシスをMualemのモデルによって表し、その影響を調べた。

2. ライシメータ実験について: 解析に用いたライシメータの形状を図1に示す。表面部には厚さ2cmの人工芝が敷かれているが、他の層は実際の雨水浸透基盤と同様であり、透水性舗装厚は10cm、礫層厚は25cm、砂層厚は5cmである。砂層の下部にはメッシュを設置し、それを通過した雨水を排水量として4分おきに計測している。他の計測項目は雨量(1分おき)、ライシメータ全体の重量(4分おき)である。計測は1986年6月から約1年間行った。

3. 基本モデルについて: ライシメータを構成する4層の内、人工芝と透水性舗装は併せて1つの層とした。また砂層はその厚さが毛管上昇高よりも小さいため、常に飽和していると考え、砂層に水分が侵入した時点で排水が起こると仮定した。そのため礫層と砂層の境界を基準点とし、基盤外に地下水面は設定していない。node幅は1cmであり、Richard式の差分化によって、各nodeの圧力ポテンシャル値と、各node間のフラックスを10秒おきに求めた。土壌特性は、 $\phi-\theta$ 関係、 $\phi-K$ 関係とも、Campbell式を用いた。計算式、諸条件、パラメータは表1に示した。パラメータの中で、 K_s 、 ϕ_e 、 θ_s については既往の研究⁽¹⁾を参照し、表2のように同定した。その後に行ったPreliminary Runにより、他の計算条件について、以下の3点を確認し、基本モデルを作成した。① $\phi-\theta$ 関係、 $\phi-K$ 関係の係数 b は、3.5として計算した際の再現性が高かった。②下部境界条件の係数 sk は、0.0001として計算した際の再現性が高かった。この値は設計値よりも過小であり、メッシュ目詰まりの影響があると思われる。③ライシメータの重量変化から求めた蒸発量を、上部境界条件でマイナス値の降雨として与えると、排水総量の再現性が高まる事が判った。グラフ1は降雨8613のシミュレーションを示している。

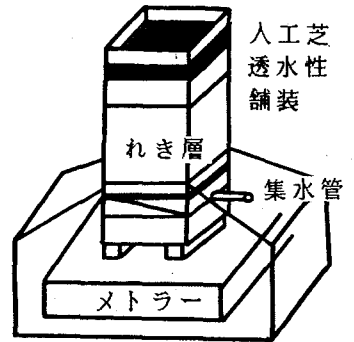


図1 ライシメータの形状

表1 計算式、諸条件、パラメータ

(基本式)	$\frac{\partial}{\partial z} (K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)) = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}$	$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta - b}{\theta_s} \right)^{(1+1/b)}$
	$k(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_e - 2\psi}{\psi_e} \right)^{2+2/b}$	$C(\psi) = - \frac{\theta_s \psi_e}{\psi_e \cdot b \psi} \left(\frac{\theta - b}{\theta_s} \right)^{(1+1/b)}$
(初期条件)	(上部境界条件)	(下部境界条件)
$\phi = z + \psi = \text{const.}$	$R = -k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right)$	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = sk \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1$
$\frac{\partial z}{\partial t}$ 空間ステップ	$k(\psi)$ 圧力ポテンシャル-透水係数関係	$\frac{\partial \psi}{\partial z}$ 圧力ポテンシャル-水分量関係
$\frac{\partial t}{\partial t}$ 時間ステップ	$C(\psi)$ 圧力ポテンシャル-排水フラックス関係	ψ 排水フラックス
ψ 圧力ポテンシャル	R 降雨フラックス	θ 含水率
z 位置ポテンシャル	q 排水フラックス	
(パラメータ)		
k_s 飽和透水係数	ψ_e エア-エントリー値	θ_s 最大含水率
b Campbellの定数	sk 下部境界条件中の定数	

表2 同定したパラメータ

	k_s (cm/s)	ψ_e (cm)	θ_s (%)
透水性舗装	0.22	-2.0	0.25
礫層	0.077	-3.0	0.35

性は、 $\phi-\theta$ 関係、 $\phi-K$ 関係とも、Campbell式を用いた。計算式、諸条件、パラメータは表1に示した。パラメータの中で、 K_s 、 ϕ_e 、 θ_s については既往の研究⁽¹⁾を参照し、表2のように同定した。その後に行ったPreliminary Runにより、他の計算条件について、以下の3点を確認し、基本モデルを作成した。① $\phi-\theta$ 関係、 $\phi-K$ 関係の係数 b は、3.5として計算した際の再現性が高かった。②下部境界条件の係数 sk は、0.0001として計算した際の再現性が高かった。この値は設計値よりも過小であり、メッシュ目詰まりの影響があると思われる。③ライシメータの重量変化から求めた蒸発量を、上部境界条件でマイナス値の降雨として与えると、排水総量の再現性が高まる事が判った。グラフ1は降雨8613のシミュレーションを示している。

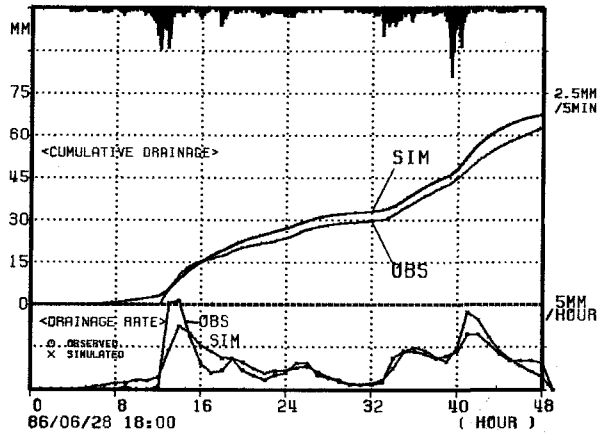
このグラフでは、全体の傾向は再現されているが、排水強度の細やかな変化の再現は十分ではない。

4. Mualemのヒステリシスモデルの導入について：Mualemのヒステリシスモデル⁽²⁾

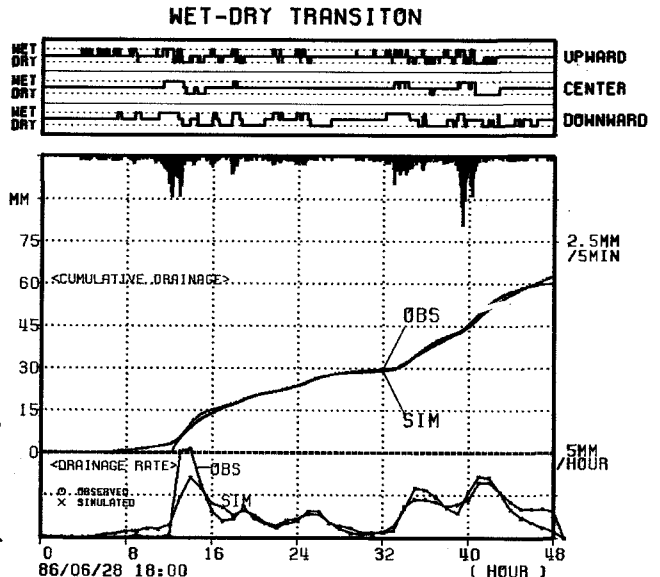
は、主吸水過程と主排水過程の2つの $\phi-\theta$ 関係を与え、吸水-排水の転換時の ϕ 値を用いて、新たな $\phi-\theta$ 関係を計算するものである。一般に $\phi-K$ 関係におけるヒステリシスも大きいことが指摘されているが、ここでは考慮せず、 $\phi-\theta$ 関係におけるヒステリシスのみを、以下の方法によって導入した。①Campbellの式において、2つの b 値を与え、それぞれ主吸水過程、主排水過程を表すとした。②各nodeにおける10秒毎の貯留量変化を計算し、その増減から各nodeが吸水、排水のどちらの過程であるかを決定した。③各nodeにおいて、吸水過程と排水過程の転換の度に、Mualemのモデルを用いて新たな $\phi-\theta$ 関係式を導いて、Richard式に代入した。グラフ2はこのモデルによる降雨8613のシミュレーションを示しているが、基本モデルよりも、排水強度の再現性が高まっていることが判る。ここで代入した b 値は、吸水過程が3.5、排水過程が7.5であり、透水係数は吸水過程の b 値のみを用いて計算している。吸水過程の b 値は基本モデルの b 値と等しいため、 $\phi-\theta$ のヒステリシスの影響のみが、2つのグラフの差であると思われる。グラフ2の上部に示した吸水-排水の遷移によれば、基盤の上方、中央、下方の各部で、吸水-排水の転換が頻繁に起こっていることが判る。グラフ3は礫層の上方と下方の2つのnodeにおいて、10秒おきに計算された ϕ 値と θ 値を全てプロットしたものであるが、下方において特にヒステリシス影響が強く表れている。

5. 結論：雨水浸透基盤内の水分挙動はRichard式にMualemのヒステリシスモデルを導入すれば、よりよく再現されることが判った。今後 $\phi-K$ 関係のヒステリシスを検討する必要がある。

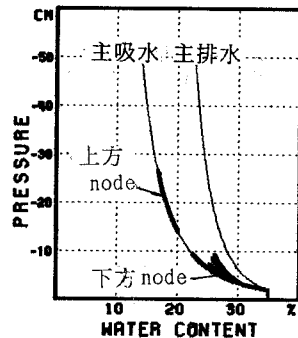
6. 参考文献（1）例えば、C.G. JEEVARAJ、「MECHANISM OF UNSATURATED SEEPAGE FLOW BY A CONSTRICTED TUBE MODEL」、東京大学土木工学科博士論文、1985（2）例えば、S. IWATA, T. TABUCHI, B.P. WARTENTIN、「SOIL-WATER INTERACTIONS」、PP33-PP63、MARCEL DEKKER INC.、1988



グラフ1 基本モデルによるシミュレーション



グラフ2 ヒステリシスモデルによるシミュレーション



グラフ3 計算された $\phi-\theta$ 値