

雨水の鉛直不飽和浸透による地下水面上昇のモデル化

Modeling of Groundwater Table Rising Process by Vertical Unsaturated Seepage

建設省土木研究所 盛谷明弘 A. Moritani

東京都立大学工学部 安藤義久 Y. Ando

芝浦工業大学工学部 高橋 裕 Y. Takahashi

1 はじめに

雨水の不飽和浸透による地下水涵養の過程は、Freeze¹⁾の研究等によって数値計算モデルを用いてシミュレーションを行うことが可能となっている。また、不飽和浸透過程の数値計算モデルを作成するには、土中水の吸引圧と体積含水率の関係等の土壌水分特性のモデル化が必要となり、こうした物理特性を数値計算モデルにいかに関与させるかが現象の再現性に大きく影響してくることになる。特に、土中の物理量の分布と地下水涵養量・地下水面上昇とを同時に再現するためには、土壌水分特性のモデルへの正確な組み込みが重要である。

ここで、土壌水分特性のモデル化の際に問題となるのが、吸引圧～体積含水率の関係が一義的ではなくヒステリシスを有することである。この関係を無視して土壌水分特性のモデル化を行えば、土中の物理量の分布は再現しえないこととなる。筆者ら²⁾は、既に土壌水分特性のヒステリシスを考慮した不飽和浸透モデルにより、砂柱に散水した際の砂柱内の吸引圧分布及び砂柱下端からの排水量を再現できることを示している。本稿では、上記のモデルを用いて砂柱内の地下水面上昇と吸引圧分布との室内実験の結果の再現を試みた結果について述べる。

2 散水実験の概要

2-1 実験装置

実験装置は図1に示すように内径30cmの亚克力製円筒カラムと散水器よりなる。カラムの側面には、下端より10cm～90cmの所に20cmおきにテンシオメーター挿入用の穴が開けてある。実験に用いた材料は豊浦標準砂である。砂柱の高さは100cmとした。カラムへは、乾燥した豊浦標準砂を少量入れてはカラム側面をたたき、十分に締め固まるようにして詰め込んだ。また、模擬降雨を与える散水器は、ポンプにより供給される水を注射針を用いた64本のノズルより、バイブレーターによって振動を与えながら、約50cm×50cmの範囲に散水するものである。カラム内の吸引圧の測定には自記式テンシオメーターを使用した。

2-2 実験方法

砂柱内の水面を下端に設定し、散水を開始する。カラム内の水面は1分ごとにマンノメーターにより目視で読み取る。散水を所定の時間継続した後、水面の上昇が止まった時点で測定を終了する。その後、水面が元のカラム下端に下がるまで排水する。この時の砂柱からの排水量を測定し、散水時間と排水量から最終的な散水強度を求める。

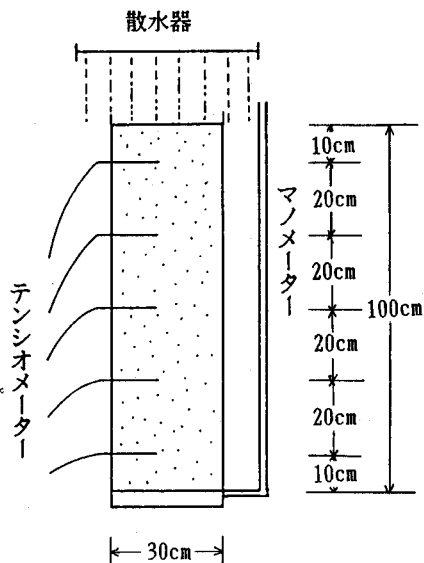


図1 実験装置の概要

3 数値計算モデルの概要

3-1 基本式と $\psi-\theta$ 関係のモデル化

数値計算の基本式には鉛直1次元のRichardsの式(1)を用いた。

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

ψ : 吸引圧 $C = \partial \theta / \partial \psi$: 比水分容量 θ : 体積含水率

ψ - θ 関係については多くの研究がなされており、いくつかのモデル式も提案されている。1で述べたように、 ψ - θ 関係のモデル化ではヒステリシスの存在が問題となる。 ψ - θ 関係のモデルにヒステリシスを組み込むには、ループを形成する吸水過程と排水過程をモデル化するだけではなく、ループ内の ψ - θ 関係(ここではscanning curveと呼ぶ)のモデルも求める必要がある。そこで ψ - θ 関係を実測し、その結果を用いてヒステリシスを組み込んだ ψ - θ 関係のモデル化を行うこととする。

ここでは、吸水過程と排水過程のメインループのモデルにはBrooks and Corey³⁾の提案した式(2)を用いることとする。

$$\frac{\psi}{\psi_0} = \left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\min}} \right)^{-b}$$

ψ_0 : 限界吸引圧 θ_{sat} : 飽和体積含水率

$\theta_{\min}$: 最小体積含水率 b : 定数

ここで $\theta_{\min}$ は、土粒子と強く結合し、移動しない水分に相当する含水率である。

式(2)に含まれる3つの定数 θ_{sat} 、 $\theta_{\min}$ 、 b を決定するために、吸水過程と排水過程の ψ - θ 関係を実測した。吸水過程の測定には土柱法と吸引法を、排水過程の測定には吸引法をそれぞれ用いた。

ψ - θ 関係のメインループの実測値と式(2)に当てはめた結果とを比較すると図2のようになった。ここで用いた定数の値を表1に示す。本研究で解析の対象としているのは $\psi = -100\text{cm} \sim 0\text{cm}$ の範囲であり、この範囲内で式(2)が実測値と良く一致していることがわかる。また、吸水過程と排水過程で同一の θ に対する ψ の差が大きく、ヒステリシスの影響を考慮することが必要であると認められる。

3-2 scanning curveのモデル化

scanning curveはメインループ内における ψ - θ 関係を表

す曲線である。その決定法には、実験的に求められたものの他に、Mualem⁴⁾によって考案されたメインループから推定するモデルがある。吸引法を用いて排水→吸水及び吸水→排水の2つのプロセスについて測定したscanning curveと、Mualemのモデルを用いて求めた曲線とを比較すると図3のようになる。排水→吸水、吸水→排水の両プロセスともに測定値とモデルとは十分に一致しているとはいえない。そこで、実験式として式(3)、

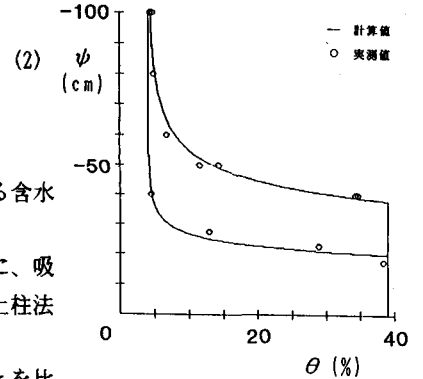
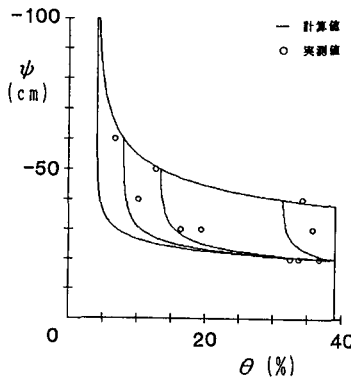


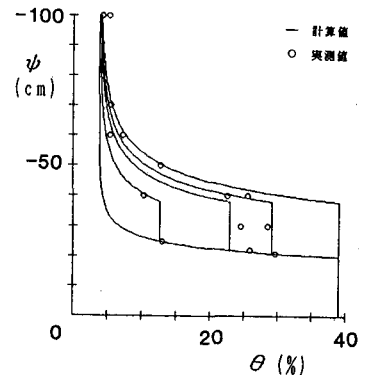
図2 ψ - θ 関係(メインループ)

表1 式(1)の定数の値

	θ_{sat}	$\theta_{\min}$	ψ_0	b
吸水過程			-19.9	0.164
	39.0	4.1		
排水過程			-38.0	0.208



(a) 排水→吸水



(b) 吸水→排水

図3 Mualemのモデルによるscanning curve

(4)を考えることとする。

$\psi_{\max} (\theta = \theta_{\text{sat}}) \rightarrow \psi_1 \rightarrow \psi$: 排水→吸水のプロセス

$$\theta(\psi) = \theta_s(\psi_1) + [\theta_{\text{sat}} - \theta_s(\psi_1)] \left(\frac{\psi}{\psi_s} \right)^{-3.0} \quad (3)$$

ただし、

$$\theta_s(\psi) = \frac{\theta_d(\psi) - \theta_{\text{sat}}(\psi/\psi_{\text{ow}})^{-3.0}}{1 - (\psi/\psi_{\text{ow}})^{-3.0}}$$

$\psi_{\min} (\theta = \theta_{\min}) \rightarrow \psi_1 \rightarrow \psi$: 吸水→排水のプロセス

$$\theta(\psi) = \theta_w(\psi_1) - 10.0 + 10.0 \exp \left[- \left(\frac{\psi_1 - \psi}{23.0} \right)^{3.0} \right] \quad (4)$$

式(3)、(4)をそれぞれ排水→吸水、吸水→排水のプロセスに当てはめて比較すると図4のようになり、実験式として十分な再現性を持つと考えられる。よって、本稿ではscanning curveのモデル式として式(3)、(4)を用いることとする。

3-3 不飽和透水係数のモデル化

不飽和透水係数を直接測定し、精度の良いデータを得ることは困難である。このため、従来より測定

の容易な ψ または θ から不飽和透水係数 K を求める方法が提案されている。Childs⁵⁾によれば $K-\theta$ 関係のヒステリシスは小さいので、本研究では $K-\theta$ 関係を不飽和透水係数のモデルに用いることとする。なお、カラムの飽和透水係数はカラム自体を用いて測定し、 $1.23 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ という値を得た。

Brooks and Corey³⁾は、 K の推定式として式(5)を提案している。

$$\frac{K}{K_{\text{sat}}} = \left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\min}} \right)^{2b+3} \quad (5)$$

また、Campbell⁶⁾は K と θ との関係式として式(6)を提案している。ここで、 p は1前後の値の補正係数である。

$$\frac{K}{K_{\text{sat}}} = \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{sat}}} \right)^{2b+2+p} \quad (6)$$

そこで、本研究では式(5)及び(6)に基づき、次のように $K-\theta$ 関係をモデル化する。

$$\frac{K}{K_{\text{sat}}} = \left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\min}} \right)^{2b+2+p} \quad (7)$$

b には吸水過程の値を使用することとし、 p は0～1の範囲から実験結果のシミュレーションを行う際に再現性の良い値として0.5を用いることとする。

3-4 差分化及びメッシュの設定

ここでは、解析モデルに陰解法を用いる。100cmの砂柱を2cm間隔に50等分し、境界条件を設定するための砂柱の下のもとあわせて、51個のメッシュを設定する。座標軸は、砂柱下端を0として上向きを正とする。メッシュ番号は、下から順番につける。ノードは各メッシュの中央に設定し、各メッシュの ψ や θ

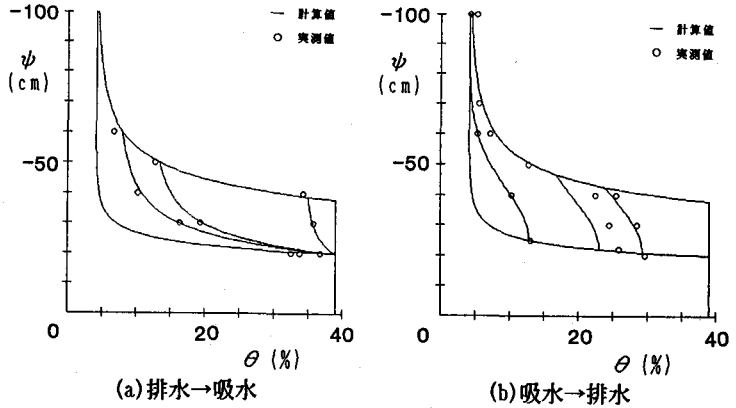


図4 実験式によるscanning curve

の値は、ノード位置の値を代表値として用いる。計算時間間隔は0.02min とする。

3-5 その他の計算条件

数値計算モデルによる地下水面の位置は、 ψ が0の点とする。

砂柱全体が平衡に達した状態を初期条件とし、初めに地下水面は $z=0$ に設定するので、 ψ の初期値は次式のようになる。

$$\psi = -z \quad (8)$$

また、 θ の初期値は、 ψ の初期値から $\psi-\theta$ 関係の排水過程のメインループを用いて与える。

砂柱上端での境界条件としては、蒸発は無視することとし、散水中は散水強度の、散水終了後は0の下向きのフラックスを与える。砂柱下端の境界条件としては、次のように考える。砂柱下端を通過するフラックスは0であり、-1の動水勾配を与える。また地下水面の高さを h とすると砂柱下端では $\psi = h$ となる。

4 数値計算結果と実験結果との比較

4-1 水面位置及び ψ 分布の比較

数値計算モデルによる水面位置の計算結果と実測値とを比較した例が図5である。水面上昇の開始時間を比較すると、計算値が実測値よりも早い傾向がみられる。その後の水面の上昇は、上昇開始後しばらくは実測値と同様の傾向を示すが、上昇の停止が実測値よりも早く、最終的な水面の位置は実測値よりも低くなっている。

また、砂柱内の ψ 分布の計算値と実測値とを比較した例を図6に示す。水面の上昇開始までは、 ψ 分布は計算値と実測値とは良く一致している。しかし水面の上昇開始後は、地下水面の位置が砂柱の下端における境界条件となるので、水面の位置の差によって ψ 分布の差が生じてくる。一方、不飽和領域の ψ 分布を比較すると傾向は良く一致している。

図6に示したように、水面上昇開始までの吸引圧分布が良好に再現されている

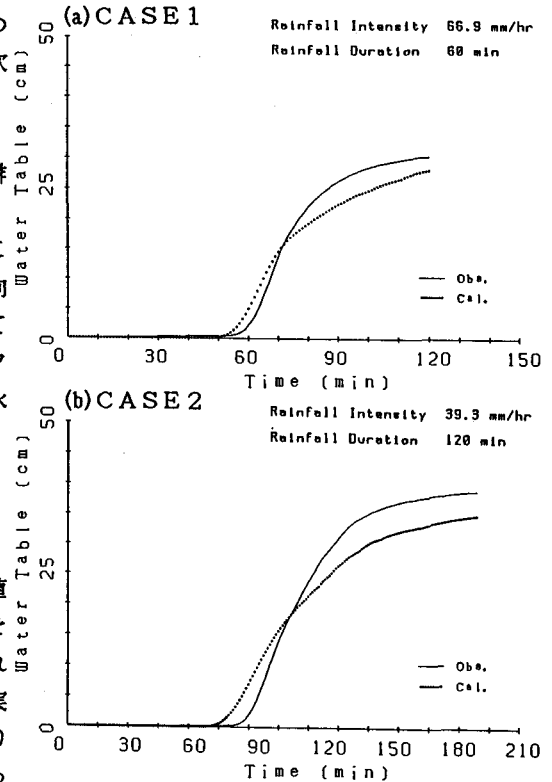


図5 水面位置の計算例

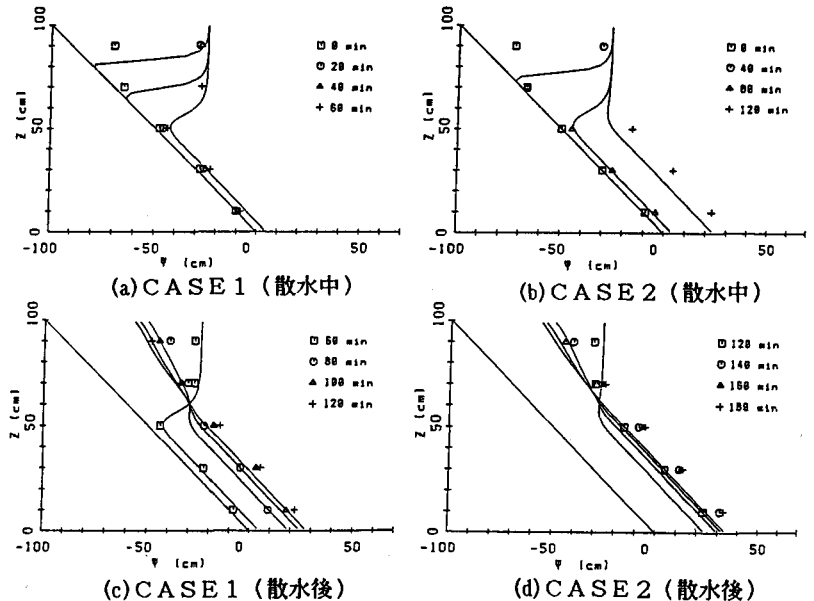


図6 ψ 分布の計算例

ことから、 ψ - θ 関係のモデルが豊浦標準砂の土壤水分特性を良く表現しているものと考えられる。しかし、地下水面の最終的な位置が数値計算モデルでは再現できないことから、その細部についてはさらに検討する必要がある。なお、散水終了後の砂柱内の ψ 分布は実測値と計算値とで差があるが、これは下端での境界条件となる水面位置の差によるものと考えられる。

4-2 ψ - θ 関係の及ぼす影響に関する検討

本稿では ψ - θ 関係を吸引法及び土柱法を用いた実測値より定式化している。この測定には100cc サンプラーを用いている。100cc サンプラーは、高さが約5cmで容積が100ccとなる円筒である。よって、 ψ はサンプラーの上下で5cmの幅があり、サンプラーの中央に設定した ψ に対して前後2.5cmの範囲の θ を平均した値を測定することになるが、図2より明らかなように、吸水過程では ψ 。近傍において ψ に対する θ の変化は非常に大きい。このため、ここで設定した吸水過程の ψ 。は誤差を含んでいるものと考えられる。一方、Freeze and Banner⁷⁾は、砂柱を用いた実験の水面の変動を数値計算モデルで再現する際に、 ψ - θ 関係の微小な変化が計算結果に大きく影響したと述べている。

以上から、 ψ - θ 関係において、地下水面の変動について最も支配的であり、かつ誤差を含んでいると思われるパラメータは吸水過程の ψ 。であると考えられる。そこで、吸水過程の ψ 。を ± 2.0 cm 変化させて実験のシミュレーションを行い、その結果と実測値とを比較した。

図7は、 ψ 。 $+2.0$ cmとした場合の水面位置の計算結果と実測値とを比較した図である。図5と比較すると、水面の上昇の再現性は良くなっている。一方、水面の上昇開始は K - θ 関係を変えていないので変化はみられない。同様に、 ψ 分布も図8に示すように下端の境界条件である地下水面の位置の再現性が改善されたことによって、計算値と実測値とが良好一致をみるようになっている。一方、 ψ 。 -2.0 cmとした場合には計算による水面上昇が逆に小

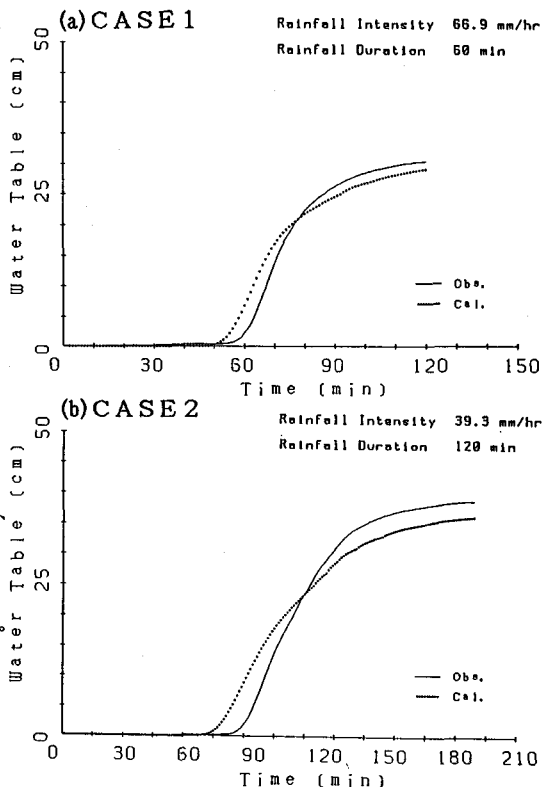


図7 水面位置の計算例
(吸水過程の ψ 。 $\rightarrow \psi$ 。 $+2.0$ cm)

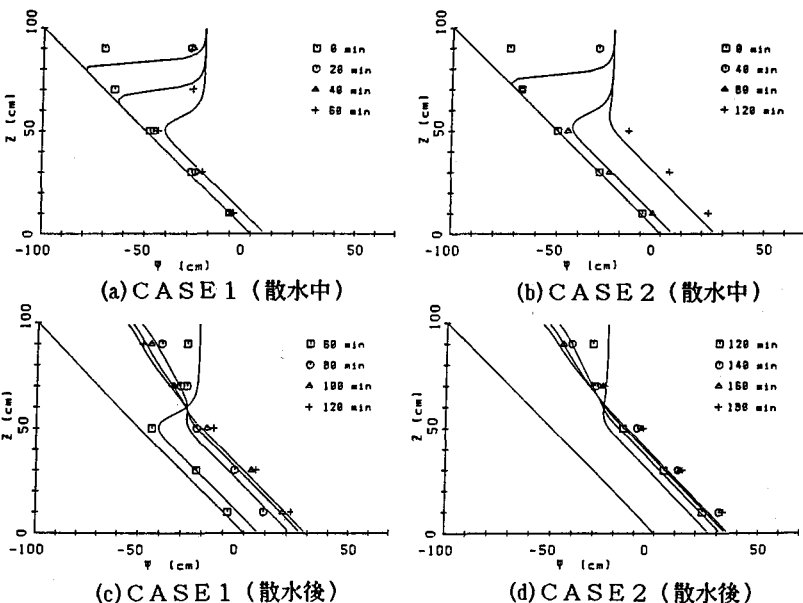


図8 ψ 分布の計算例 (吸水過程の ψ 。 $\rightarrow \psi$ 。 $+2.0$ cm)

さくなり、水面の位置・ ψ 分布ともに再現性は悪化している。

以上で述べたように、吸水過程の ψ - θ 関係に修正を加えることによって、砂柱内の水面上昇・ ψ 分布のいずれとも再現性を向上させることができた。このことは、地下水面上昇のモデル化に際しては ψ - θ 関係のヒステリシスのメインループの形状を精度良く把握し、さらにscanning curveをモデル化する必要があることを示していると考えられる。

5 まとめ

本研究では、雨水の鉛直不飽和浸透による地下水面上昇過程のモデル化を試みた。その結果は以下の通りである。

まず豊浦標準砂を用いて ψ - θ 関係を測定し、定式化に当たってはヒステリシスを考慮する必要があることを確認した。そこでメインループにはBrooks and Coreyの式を当てはめ、ループ内のscanning curveには実測値に合うように定式化した。そしてこの関係を組み込んで、Richardsの式を基本式とするモデルを作成した。

一方、高さ100cmの豊浦標準砂を詰めたカラムを用いて散水実験を行い、水面上昇及び ψ 分布の変化を測定した。上記のモデルによりこの実験結果の再現計算を行ったところ、水面上昇及び砂柱内の ψ 分布を再現できることが示された。さらに、 ψ - θ 関係の吸水過程がモデルの計算結果に与える影響についても検討を加えた。

参考文献

- 1) Freeze, R.A. : The mechanism of natural ground-water recharge and discharge 1. one-dimensional, vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging ground-water flow system, Water Resources Research, Vol.5, pp.153-171, 1969.
- 2) 高橋裕・安藤義久・浦上将人・盛谷明弘：雨水の鉛直不飽和浸透による地下水涵養のモデル化，水利科学，第30巻，第6号，pp.11-23，1987.
- 3) Brooks, R.H. and Corey, A.T. : Properties of porous media affecting fluid flow, Proceedings of ASCE, Vol.92, IR2, pp.61-88, 1966.
- 4) Mualem, Y. : A conceptual model of hysteresis, Water Resources Research, Vol.10, pp.514-520, 1974.
- 5) Childs, E.C. : An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena, Willey-Interscience, New-York, p.190, 1969.
- 6) Campbell, G.S. : A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Science, Vol.117, pp.311-314, 1974.
- 7) Freeze, R.A. and Banner, J. : The mechanism of natural ground-water recharge and discharge 2. laboratory column experiment and field measurements, Water Resources Research, Vol.6, pp.138-155, 1970.