

海岸における自由地下水の流出

井 内 国 光*・柿 沼 忠 男**

1. 緒 言

海岸帯水層における自由地下水の挙動について、地下水の流出部に注目し、その流出位置や流出速度を数値解析によって考察する。海岸は地下水と海水との接点であるが、地下水流を解析する場合には境界条件として海水位を圧力水頭や水理水頭の形で与えて地下水の流動を決定する。ここでは傾斜海浜において波浪の存在によって wave set-up や wave set-down が生じ、平均海水位が場所的に変化する場合の地下水の流速や濃度の解を数値解析によって求める。海底での地下水の上向き流出は少なからず底質の移動などに影響を与えることが予想される。

2. 解析方法

この解析では、特に汀線近傍や海底面付近における地下水の流出を調べることを念頭に置いているので、その対象とする地下水を自由地下水に限定する。さらにその解析においては自由水面上の不飽和帯を考慮し、また海岸帯水層中の地下水は上流部の淡水と海岸からの海水が混合した混合流体であるとして、塩の濃度の違いによって地下水の密度が変化する分散モデルを採用し、地下水流と濃度場を同時に解く手法を用いた。今回の解析はこのような混合流体モデルによる地下水流特性の基礎的な把握を目的としており、定常解析のみを行った。したがって波浪の効果は wave set-up や wave set-down による海岸における平均海水位の空間的な変化として表現した。

2.1 基礎方程式

帯水層は均質・等方性媒体であるとして鉛直二次元定常モデルにおける飽和・不飽和帯での地下水流に関する基礎方程式と地下水中の溶質の移流分散に関する基礎方程式を以下のように仮定する (Pinder and Gray, 1977)。

a) 地下水の流れに関する方程式

地下水の流れについては次式で示されるダルシー則が成立する。

$$\mathbf{q} = -K\{\nabla h + (\rho/\rho_0)\nabla z\} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに、

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_z \end{pmatrix}, \quad \nabla = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$$

であり、 x は水平方向、 z は鉛直方向、 $\mathbf{q}$ はダルシー流速、 q_x, q_z は流速の x, z 成分、 K は透水係数、 h は圧力水頭、 ρ は淡水と海水が混ざりあった混合流体の密度、 ρ_0 は淡水の密度である。

不飽和帯においては K は一般に体積含水率 θ の関数となり、 θ は圧力水頭の関数となる (Brooks and Corey, 1966; Vauclin et al., 1979; 河野・西垣, 1981)。しかしながら、 θ と h の関係は一義的に定まらず吸水過程と排水過程では異なりヒステリシスが存在する。なお $K-\theta$ 関係においてもヒステリシスはみられるが $\theta-h$ に比べて小さいことが知られている (Vachaud and Thony, 1971)。

b) 地下水流に関する連続の式
質量保存則より次式が成立する。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

c) 移流分散方程式

飽和帯および不飽和帯の両領域において Fick の式

$$c\mathbf{q}_s = c\mathbf{q} - (\theta/n)\mathbf{D} \cdot \nabla c \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

が成立する。ここに、 c は溶質の濃度、 $\mathbf{q}_s$ は溶質の流速、 n は間隙率、 $\mathbf{D}$ は分散係数であり、次の 4 つの成分を有するテンソルで表される。

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xz} \\ D_{zx} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

この解析では分散係数として地下水の流速に依存する表現を用いた。すなわち、分散係数の個々の成分を縦分散長 a_L と横分散長 a_T を用いて次のように表した (Scheidtger, 1961)。

$$D_{xx} = a_L q_x^2 / q + a_T q_z^2 / q \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$D_{zz} = a_T q_x^2 / q + a_L q_z^2 / q \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (a_L - a_T) q_x q_z / q \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここに、 $q = (q_x^2 + q_z^2)^{1/2}$ である。

移流分散方程式は式 (3) を溶質についての連続式

$$\nabla \cdot (c\mathbf{q}_s) = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

に代入した次式で示される。

* 正会員 工修 愛媛大学助教授 地域共同研究センター
** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

$$\nabla \cdot (cq) - \nabla \cdot \{(\theta/n)D \cdot \nabla c\} = 0 \quad (8)$$

d) 密度と濃度の関係式

密度 ρ と濃度 c との間には次式が成立する (Baxter and Wallance, 1916).

$$\rho = \rho_0 + (1-E)c \quad (9)$$

ここに、 E は定数で海水程度の濃度ではその値が 0.3 である。

e) 不飽和特性

飽和帯における透水係数の値は均質・等方性媒体では一定であるが、不飽和帯においては体積含水率の値によって変化する。本解析では透水係数と体積含水率との関係を表す式として

$$K = K_0 \{(\theta - \theta_r)/(n - \theta_r)\}^m \quad (10)$$

で示される実験式 (Brooks and Corey, 1966) を用いた。ここに、 K_0 は飽和帯における透水係数、 θ_r は最小容水量である。 n の値として 0.3 を用い、指数 m の値については 3 (Irmay, 1954) を採用し、 θ_r は 10^{-3} とした。また、体積含水率と圧力水頭との関係については上述したように吸水過程と排水過程では異なるが、ここでは降雨の浸透により湿潤が進行していった場合に得られた吸水過程についての Vauclin et al. (1979) の実験式

$$\theta = na / (\alpha + |h|^n) \quad (11)$$

を用いた。ここに、 α , β は定数であり、 h を cm 単位で表すと、それぞれ $4 \cdot 10^4$ および 2.9 の値となる。

2.2 境界条件

帯水層モデルとして、図-1 に示すような台形の不圧帯水層 ABCDE を考える。境界 BC が海浜であり、地下水は境界 DE より流入し、境界 ABG から流出する。A 点を原点を選び、 x 軸の向きは内陸方向を正とし、帯水層底面からの海水面の高さを H 、上流部の地下水面高さを η_L とする。こうした帯水層モデルについて境界条件を次のように設定した。

境界 AE は不透壁であるとする。すなわち

$$q_n = 0, \quad q_{sn} = 0 \quad (12)$$

ここに、 q_n と q_{sn} は境界線上における流体と塩の外向き法線方向の流速である。

境界 GCD では、境界を横切る流れは生じないものとする。すなわち

$$q_n = 0 \quad (13)$$

境界 FCD では帯水層からの塩の流出がないものとする。すなわち

$$q_{sn} = 0 \quad (14)$$

境界 ABF における濃度は海水の濃度 c_s に等しいとする。すなわち

$$c = c_s \quad (15)$$

境界 ABF における圧力は海水中の静水圧分布とする。

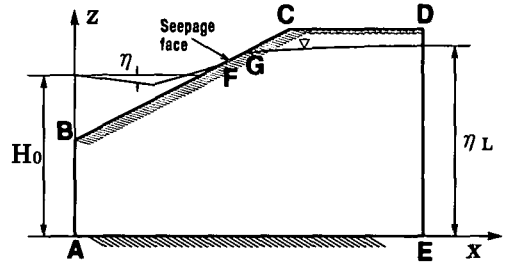


図-1 帯水層モデル

すなわち

$$h = (\rho_s/\rho_0)(H_0 + \eta - z) \quad (16)$$

ここに、 ρ_s は海水の密度、 H_0 は静水面高、 η は wave set-up 量または wave set-down 量である。

境界 FG は浸潤面であるのでそこの圧力を 0 とする。すなわち

$$h = 0 \quad (17)$$

境界 ED における圧力は淡水中の静水圧分布とし、ここの濃度は 0 とする。すなわち

$$h = \eta_L - z, \quad c = 0 \quad (18)$$

2.3 wave set-up および wave set-down 量

波浪による wave set-up や wave set-down の効果は、式 (16) で表されるように境界 BF における圧力水頭に関する境界条件としてモデルに組み込まれる。

砕波するまでの平均海水位の低下量、すなわち wave set-down 量は

$$\eta = -(1/16)H_{w0}^2 k_0 \coth^2 kh_w / (kh_w + \sinh kh_w \cdot \cosh kh_w) \quad (19)$$

によって求めた。ここに、 H_{w0} は深海波の波高、 k は波数、 h_w は水深である。

また、砕波帯内での上昇量、すなわち wave set-up 量は

$$\eta = K_w(h_{wb} - h_w) + \eta_b \quad (20)$$

によって求め、砕波水深 h_{wb} は合田 (1970) による図表から算定した。ここに、 η_b は砕波点における平均海水位の低下量であり、 $K_w = (1 + 8/(3\gamma^2))^{-1}$ 、 $\gamma = 0.73$ である。

2.4 解析手法

帯水層内の流速 q は地下水流に関する式 (1) および (2) より、また濃度 c は移流分散方程式 (8) より求められるが、流速 q は密度と濃度の関係式 (9) を介して濃度 c に依存し、一方、濃度 c は式 (8) の移流項 cq により流速 q に依存する。したがって、この方程式系は非線型であり、反復計算を必要とする。反復計算は、まず初めに密度 ρ を既知量として与えて式 (1), (2) を解き、圧力水頭 h および q を求める。得た q を用いて式 (8) を解き、濃度 c を求める。 c と ρ の関係式 (9) より新しく ρ を求める。こうして求めた ρ は近似解である

から、これを最初に仮定した ρ と置き替え、上述の手順を行えばより正確な解が求まる。以下同様の手順を解が許容範囲内に収束するまで反復する。

数値解を得る方法として、ガラーキン有限要素法を採用した。形状関数として二次のものをを用い、解析領域を8つの接点を有する多数の四角形で分割した。なお、具体的な定式化は柿沼ほか(1987)に示したとおりである。

3. 解析結果

上述の解法を用いて、帯水層の形状や透水係数および分散長などの水理定数に種々の値を与えて地下水の流速場や濃度場を求めた。考察に用いた解析条件やパラメータを以下に示す。

① 地下水流出部すなわち境界 ABF を淡水とした単一流体モデルとこの境界を海水とした混合流体モデルとの比較

② 波浪を考慮して種々の沖波波高と周期による wave set-up, wave set-down 量を用いた解析

③ 種々の分散長を用いた解析

④ 境界 DE における地下水位として種々の値を用いた解析

⑤ 種々の揚水形態による解析

3.1 波浪が存在しない場合

図-2 に波浪が存在しない場合の地下水の流速分布を示す。海浜勾配は $1/20$ 、飽和透水係数は 0.01 m/s 、海水位は 10.0 m 、地下水位は 11.0 m であり、汀線は $x=80 \text{ m}$ に位置する。(a) は縦分散長が 1 m の場合、(b) は縦分散長が 20 m の場合である。なお、横分散長は縦分散長の $1/10$ とした。また、(c) には地下水流出部が海水ではなく淡水であるとした場合の結果も示してある。これらの図から地下水の流出部が海水の場合(図-2(a), (b))の方が淡水とした場合(図-2(c))より流出速度が大きいことがわかる。また、その大きさは分散長が小さい(a)がより大きい。したがって、海岸における地下水の流出速度を見積もる際に、本解析のように淡・塩水の混合流体とした解析ではなく、簡単化のために密度が一樣な単一流体とした解析(図-2(c))がこれまでよく行われていたが、こうした解析では流出速度を過小に評価することとなる。

さらに、(a) や (b) のように混合流体とした解析での注目すべき点は循環流が形成されていることである。すなわち、帯水層下部において、海から海水が内陸へ侵入しており、侵入した海水は $x=95 \text{ m}$ 付近において上流からの地下水に阻まれ、向きを上方に転じ、最後に反転して帯水層の外に出てゆく循環流を形成している。このように混合流体とした解析では、楔状に侵入した海水があたかも地下ダムのような効果を及ぼし、その結果、上流

からの地下水は汀線付近で収れんして海に流出する。また海水が循環しているので流出成分には海から流入した海水の成分も含まれていると考えられる。一方、流出部を淡水とした解析では上述の循環流は形成されず、上流からの地下水は $x=75 \text{ m}$ 付近でどの高さにおいても同じように上方に向きを転じ、海底から流出する。

図-3 は海底面上および海浜上における地下水の流出速度の分布を示したものである。汀線は $x=80 \text{ m}$ に位置し、 $x < 80 \text{ m}$ では海底からの流出、 $x > 80 \text{ m}$ では浸潤面(seepage face)からのしみ出しを表す。実線は縦分散長が 1 m の場合、点線は流出部を淡水とした場合である。両者とも汀線 $x=80 \text{ m}$ 付近において流速が急増しており、特に海面下($x < 80 \text{ m}$)における増大は著しい。流向

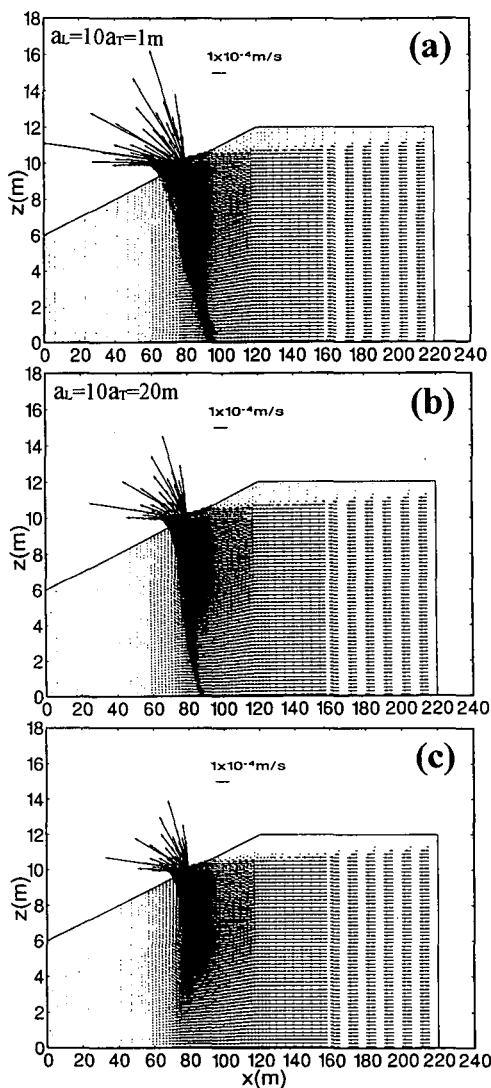


図-2 流速分布(波浪なし); (a) $a_L = 10a_T = 1 \text{ m}$, (b) $a_L = 10a_T = 20 \text{ m}$, (c) 流出部が淡水の場合

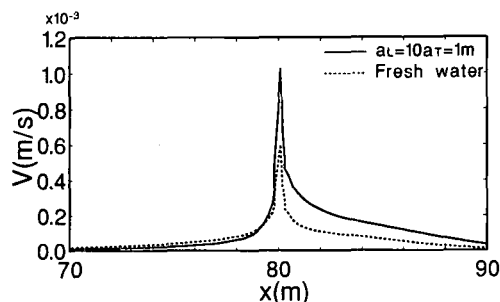


図-3 海底面上および海浜上における流速値

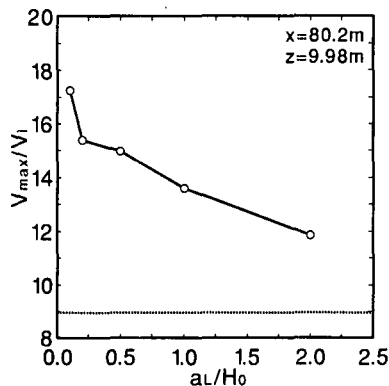


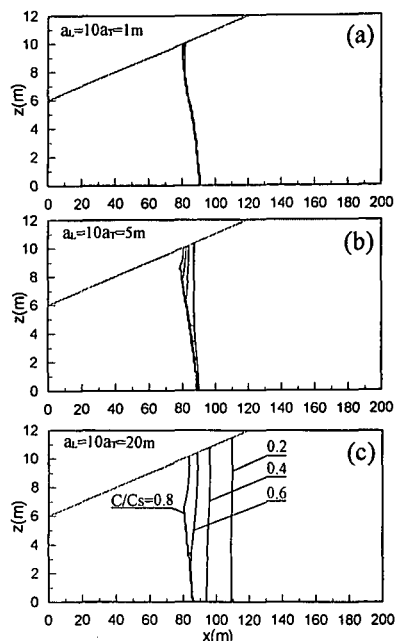
図-4 分散長と流出速度の最大値との関係

は $x < 80$ m の海面下では海底面にほぼ垂直、 $x > 80$ m の浸潤面では水平方向に向いていた。

図-4 は分散長 a_L と流出速度の最大値 $V_{\max}$ との関係を表したものであり、分散長は海水位 H_0 で無次元化を行い、最大流速 $V_{\max}$ は境界 DE における地下水流入速度 V_i で無次元化している。また、図中の点線は流出部を淡水とした場合の値である。流出部が淡水の場合には $V_{\max}/V_i$ は約 9 程度の値となっている。一方、流出部が海水の場合には分散長の減少に伴って、流出速度は増大を示し、その値は約 12 から 17 の値を取り、このことは流出速度の最大値は流入速度の約 12 から 17 倍であることを意味する。

図-5 に帯水層内の塩の濃度分布を示す。値は海水の濃度で無次元化している。(a) は縦分散長が 1 m の場合、(b) は縦分散長が 5 m の場合、(c) は縦分散長が 20 m の場合である。(a) の場合には淡水から海水への遷移領域はほとんど存在せず、境界面に近い様相を示している。また、濃度の急変する位置は図-2 (a) の循環流が反転する位置とよく対応している。一方、分散長が大きな(c) では遷移領域がみられ、各等濃度線の傾きももほぼ鉛直に近い。

揚水の効果：帯水層内の種々の位置に揚水井を想定し

図-5 濃度分布 (波浪なし) : (a) $a_L = 10a_T = 1$ m, (b) $a_L = 10a_T = 5$ m, (c) $a_L = 10a_T = 20$ m

て、揚水位置と流出速度との関連を調べた。その結果、揚水地点は海岸に近いほど地下水の流出量を減少させるのに効果が大いだが、その鉛直方向の位置には影響されない。また、海底下における揚水はほとんど地下水の流出量には影響を与えないことがわかった。

3.2 波浪による wave set-up, wave set-down を考慮した場合

図-6 に沖波波高 1.0 m, 周期 5 s として wave set-up, wave set-down を考慮した場合における地下水の流速分布を示す。砕波点は $x = 49.8$ m に位置し、平均海面はこの地点で最も低下する。この図によると、地下水の流出が 2 ヶ所、すなわち、砕波点と汀線付近でみられる。汀線における流出流速は図-2 (a) の波浪が存在しない場合に比べて小さくなる。また、 $40 \text{ m} < x < 85 \text{ m}$ においては帯水層内に冲向きの流れが生じている。

図-7 は海底面からの流出を詳しく示したものである。図の上方には wave set-up 量および wave set-down 量を合わせて示している。 $x = 49.8$ m から 85.1 m が砕波帯であるが、砕波帯内では冲向きの流速がみられ、 $50 \text{ m} < x < 70 \text{ m}$ では帯水層からの流出を示すが、 $x = 70$ m から 80 m では逆に帯水層内へ海水が流入するようである。さらに、種々の分散長について解析を行った結果、分散長を大きくすると $x = 85$ m 付近における流出速度は小さくなるが、 $x = 50$ m 付近の流出は分散長の大きさには影響されることが判明した。また、種々の上流部

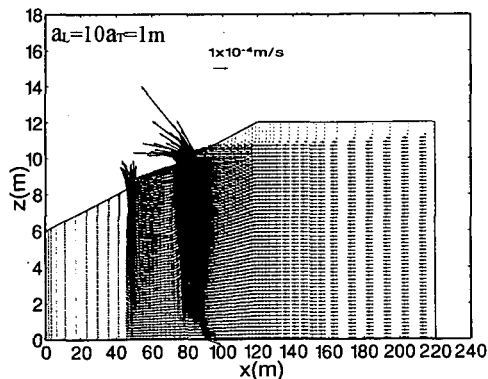
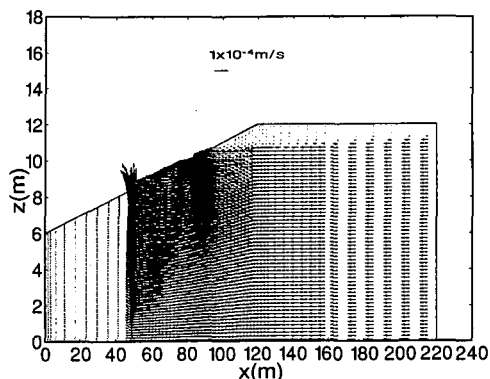
図-6 流速分布 (波浪あり, $a_L = 10a_T = 1$ m)

図-8 流速分布 (波浪あり, 流出部が淡水の場合)

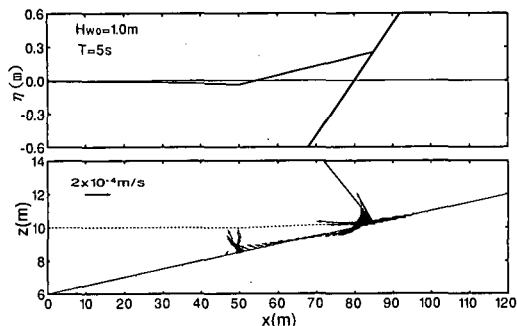


図-7 平均海面の変動と海底面上における流速分布

の地下水位を想定して解析した結果、汀線付近の流出は上流部の地下水位の変化に対応して変化するが、砕波点の下でみられる流出は地下水位の変化にはほとんど影響されないことがわかった。

図-8は図-6と同様の波浪条件で流出部が淡水の場合の解析結果である。この場合の図-6との明らかな相違は $x=85$ m 付近における流出がみられなくなっている点である。海底面近傍の流向を詳しく調べると、 $x=85$ m 付近では帯水層中へ侵入する流れが生じていた。

4. 結 語

この研究では海岸帯水層における自由地下水の挙動について、地下水の流出部に注目し、その流出位置や流出速度を数値解析によって考察した。解析では地下水の密度は塩の濃度に依存するとして、定常分散モデルを採用し、地下水流と濃度場を同時に解く手法を用いた。数値解法は有限要素法を採用して、上流の地下水位、分散長、揚水量などについて種々の値を与えて地下水の流速場や濃度場を求めた。さらに、波浪の存在によって wave set-up や wave set-down が生じ、平均海水位が場所的に変化する場合の流出特性についても考察した。その結果、汀

線付近における地下水の流出速度の最大値は分散長を小さくするほど増大し、その値は流入流速の 10 倍以上に達することを見出した。また流出部を淡水とした場合との比較を行った結果、単純化のためにこれまでよく行われていた密度が一樣な単一流体とした解析では流出速度を過小に評価することとなることを指摘した。さらに、wave set-up と wave set-down を考慮した解析では、砕波点付近に新たな地下水の流出が生じることや砕波帯内において帯水層中に冲向きの流れが存在することなどを見出した。

参 考 文 献

- 柿沼忠男・井内国光・沢 資浩 (1987): 飽和・不飽和帯における溶質輸送のモデル解析, 陸水学雑誌, 48 巻 4 号, pp. 275-285.
- 河野伊一郎・西垣 誠 (1981): 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 307 号, pp. 59-69.
- 合田良実 (1970): 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第 180 号, pp. 39-49.
- Baxter, G. P. and C. C. Wallace (1916): Changes in volume upon solution in water of the halogen salts of the alkali metals. J. Amer. Chem. Soc., 38, pp. 70-104.
- Brooks, R. H. and A. T. Corey (1966): Properties of porous media affecting fluid flow, Proc. ASCE, IR, 92, pp. 61-88.
- Irmay, S. (1954): On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Trans. AGU, 35, pp. 463-467.
- Pinder, G. F. and W. G. Gray (1977): Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology. Academic Press, London, 295p.
- Scheidegger, A. E. (1961): General theory of dispersion in porous media. J. Geophys. Res., 66, pp. 3273-3278.
- Vachaud, G. and J. L. Thony (1971): Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. Wat. Resour. Res., 7, pp. 111-127.
- Vauclin, M., D. Khanji and G. Vachaud (1979): Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional unsaturated-saturated water table recharge problem. Wat. Resour. Res., 15, pp. 1089-1101.