

JAERI-M
87-142

浅地層の浸透流解析における土壌物性の役割

1987年9月

戸早 孝幸* 若林 徳映・和達 嘉樹

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

浅地層の浸透流解析における土壌物性の役割

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

戸早 孝幸*・若林 徳映・和達 嘉樹

(1987年8月20日受理)

浅地層の土壌物性値(飽和領域及び不飽和領域の透水係数, 水分保持曲線, 間隙率等)が, 自由水面位置の変化及び地下水流速度の変化に与える影響を解明し, さらに非定常な降雨条件において, 低レベル廃棄物処分施設が設置される地層周辺での地下水流の挙動を把握することを目的として, 仮想的なモデル地盤について2次元の有限要素法による解析モデルをもちいて浸透流解析を行なった。

その結果, 定常解析での飽和層の発達には飽和透水係数と不飽和領域での透水係数が重要な役割を果し, 特に地表面に接している最上層と自由水面近辺の層の飽和透水係数の値が顕著な影響を与えることが明かとなった。また, 自由水面の変化について重回帰分析を行なった結果, 入力パラメータとして必要な土壌物性値のうち, 不飽和領域の飽和度と圧力水頭の関係, 自由水面と地表面の距離, 自由水面直上の飽和透水係数の順で, 飽和領域の発達に影響を与える程度が大きいことが明かとなった。

Role of Soil Characteristics on Analysis of Water Flow in Shallow Land

Takayuki TOHAYA*, Noriaki WAKABAYASHI and Yoshiki WADACHI

Department of Environmental Safety Research

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Ibaraki-ken

(Received August 20, 1987)

Analysis of water flow on posutulated model grounds has been carried out by using 2-dimensional finite element analytical model, to clarify the effects of soil characteristics (hydraulic conductivities in saturated and unsaturated zones, moisture content - water head relationship, porosity, etc.) of a shallow land layer on variations in water tables and water flow rates.

Results thus obtained indicate that hydraulic conductivities in saturated and unsaturated zones play an important role in governing the development of a water table, especially the hydraulic conductivity of the top layer and of the layers near the water table give significant effect on the water table development. It was found through multiple regression analyses of the variation of the water table that among soil characteristics following parameters give pronounced effect on the development of the water table in the order; the relationship between moisture content of the unsaturated zone and pressure head, the distance between the water table and ground surface, and the saturated hydraulic conductivity of the layer immediately above the water table.

Keywords: Ground Water Analysis, Finite Element Method, Soil Characteristics, Steady State Analysis, Transition State Analysis, Regression Analysis, Numerical Simulation, Shallow Land Disposal

* TOBISHIMA Corporation

目 次

1. 結 言	1
2. 有限要素法による浸透流解析モデル	1
2.1 浸透流の支配方程式	1
2.2 初期条件と境界条件	2
2.3 有限要素法による定式化	3
2.4 時 間 項	4
3. 解析方法	5
3.1 モデル地盤	5
3.2 解析条件	6
4. 解析結果	6
4.1 定常解析結果	6
4.2 非定常解析結果	7
5. 重回帰分析	8
6. 考 察	9
6.1 定常解析	9
6.2 非定常解析	10
7. ま と め	11
謝 辞	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical Model for Water Flow by Finite Element Method	1
2.1 Governing Equation of Water Flow	1
2.2 Initial and Boundary Conditions	2
2.3 Application of Finite Element Method to Governing Equation	3
2.4 Time Difference	4
3. Analytical Method	5
3.1 Model of Soil Layers	5
3.2 Analytical Conditions	6
4. Results of Analyses	6
4.1 Results of Steady Analyses	6
4.2 Results of Transient Analyses	7
5. Multi-regression Analysis	8
6. Discussion	9
6.1 Steady Analyses	9
6.2 Transient Analyses	10
7. Concluding Remarks	11
Acknowledgement	11
References	12

1. 緒 言

低レベル放射性廃棄物を浅地層に処分する場合、その安全性の評価を、廃棄物パッケージ、処分施設等の人工バリア及び処分施設周辺の地層から成る天然バリアの両面から総合的に検討する必要がある¹⁾。人工バリアを考慮するに当たっては、ドラム缶容器の腐食に伴い廃棄体から漏出した放射性核種が、処分施設コンクリート壁の破損部より施設内に浸透した水に運ばれ充填材中を移行する形態を明らかにする必要がある。天然バリアに関しては、処分施設から漏洩した放射性核種が、降雨による地盤への浸透水や地下水によって人間の生活環境まで輸送される機構を把握しなければならない²⁾。このように、放射性核種の移行は、核種が何等かの原因で水と接触し、水を媒体として充填材やコンクリート中または地層中を輸送されるという概念から成り立っている。したがって、その移行挙動を解明するためには、放射性核種に依存する特性³⁾（イオン交換吸着、コロイド拡散、崩壊）を知ると同時に、水の動きも的確に把握することが重要である。

天然の地層中では、水は複雑な挙動を示し、飽和領域と不飽和領域で異なる動きをすることが知られている⁴⁾。飽和領域の流れは、飽和透水係数と重力・圧力ポテンシャルで定義され、不飽和領域流れは、地盤の間隙を占める水分率の変化に支配される割合が大きい。特定の地盤について浸透水の挙動を把握するには、水の動きを支配する飽和土の特性（透水係数、間隙率、貯留係数）や水分率の変化に依存する不飽和土の特性（水分保持曲線、不飽和透水係数）がどれほど実際の地層を反映しているかが重要な問題となる⁵⁾。

本報告では、実地盤との対応を検討する前段階として、これらの土壌物性値が数値解析において占める役割、すなわち、土壌物性値の変化が地層中の水の挙動、特に飽和領域の発達過程に与える影響を検討した。解析の対象となる地盤には計算機で作成したモデル地盤を用いている。地層中の浸透水や核種移行の解析には、これまでも差分法⁶⁾、有限要素法⁷⁾、及びモンテカルロ法⁸⁾等を用いた解析手法がそれぞれの特徴を生かして利用されてきた。ここでは、複雑な地層への対応が容易なこと、さらに境界条件の導入が比較的容易であることを勘案して有限要素法（2次元）を選択し、解析コードにはオークリッジ国立研究所で開発されたFECWATER^{9), 10)}を使用した。

2. 有限要素法による浸透流解析モデル

浸透流の数学的取り扱い、更に有限要素法による定式化方法を、ここで用いた解析コードが採用しているモデルに準じて述べる。

2.1 浸透流の支配方程式

飽和・不飽和多孔質媒体中を移動する浸透水の支配方程式は、質量保存則及びダルシー則より

次式のように表わされる。

$$F \partial h / \partial t - \nabla \cdot K \nabla H = 0 \quad (1)$$

$$\text{ここに, } K = K^s \cdot K_r(\theta) \quad (2)$$

$$F = \alpha \theta / n_e + \beta \theta + d\theta / dh \quad (3)$$

$$H = h + z \quad (4)$$

K	: 透水係数
K^s	: 飽和透水係数
$K_r(\theta)$: 相対透水係数, $K_r(1) = 1$
θ	: 体積水分率
n_e	: 有効間隙率
α	: 媒体の補正鉛直圧縮率
β	: 水の圧縮率
H	: 全水頭
h	: 圧力水頭
z	: 位置水頭

式(3)において、第1項は媒体である土の鉛直方向の構造変化(圧密)の影響、第2項は水の体積変化(圧縮性)の影響、第3項は土の間隙の排水の影響をそれぞれ表している。飽和領域では、水分率、 $\theta = 1$ で一定のため、Fは貯留係数($\alpha / n_e + \beta$)のみで表され、透水係数は飽和透水係数、 $K = K^s$ となる。不飽和領域に対しては、Fは貯留係数に θ を乗じた値と比水分容量($d\theta / dh$)の和で表され、透水係数は飽和透水係数と相対透水係数の積で表される。式(1)を2次元の直交座標系($x-z$)で書き、透水係数をテンソル表示すると2次元の浸透流支配方程式が次式のように得られる。

$$F \partial h / \partial t - [\partial / \partial x (K_{xx} \partial H / \partial x + K_{xz} \partial H / \partial z) + \partial / \partial z (K_{zx} \partial H / \partial x + K_{zz} \partial H / \partial z)] = 0 \quad (5)$$

2.2 初期条件と境界条件

式(5)を解くに当たり、初期条件と境界条件を設定する必要がある。この計算コードでは、境界条件として圧力水頭が既知の境界(Dranchilet境界)、流量が既知の境界(Neumann境界)、及び、圧力水頭と流量の関連で既知量に変化する境界(Variable境界)の3種類が用意されている。

$$\text{【初期条件】} \quad h = h_0(x, z, 0) \quad (6)$$

【境界条件】 Dirichlet 境界

$$h = h_0(x, z, t) \quad (7)$$

Neumann 境界

$$\begin{aligned} & - [(K_{xx} \partial h / \partial x + K_{xz} \partial h / \partial z + K_{zx}) n_x \\ & + (K_{zx} \partial h / \partial x + K_{zz} \partial h / \partial z + K_{zz}) n_z] = q_N \end{aligned} \quad (8)$$

Variable 境界

$$h = h_v(x, z, t) \text{ または,} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & - [(K_{xx} \partial h / \partial x + K_{xz} \partial h / \partial z + K_{zx}) n_x \\ & + (K_{zx} \partial h / \partial x + K_{zz} \partial h / \partial z + K_{zz}) n_z] = q_v \end{aligned} \quad (10)$$

n_x と n_z は、境界面からの垂直ベクトルである。

2.3 有限要素法による定式化

式(1)または式(5)で示される浸透流の支配方程式を、Galerkin 法による重み付き残差法で定式化する。有限要素法では、未知量 h を求めるために支配方程式の成立する領域(R)内で、未知量 h を離散化する。そのため、領域を小さな要素(有限要素)に分割し、その要素の節点での量で未知量 h で置き換える。未知量は、時間 t と座標 x, z の関数 $h(x, z, t)$ であるため、この h を座標のみで定義される補間関数 $N_j(x, z)$ と時間のみの関数 $h_j(t)$ に分け、両者の積で近似する。

$$h \approx \bar{h} = \sum_{j=1}^N h_j(t) \cdot N_j(x, z) \quad (11)$$

ここで N は節点数を示す。式(11)の \bar{h} を式(1)の h に代入する。 \bar{h} は近似解であるため式(1)は完全には満足されず、右辺に残差 R_r が生じる。

$$F \partial \bar{h} / \partial t - \nabla [K(\nabla \bar{h} + \nabla z)] = R_r \quad (12)$$

\bar{h} が h に近づくに伴い、上式の R_r は全領域内で 0 に近づく。重み付き残差法では、式(12)に重み関数 W_i をかけ、支配方程式の成立する領域(R)に対して積分した結果を 0 と置いた次式を解くことで最良の近似解 \bar{h} を求めている。

$$\int_R W_i [F \partial \bar{h} / \partial t - \nabla [K(\nabla \bar{h} + \nabla z)]] dR = 0 \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

この式(13)を式(1)に対する重み付き残差方程式とよぶ。Galerkin 法では、重み関数に式(11)で用いた補間関数を用いているため、

$$W_i(x, z) = N_i(x, z) \quad (14)$$

重み付き残差方程式は次式で表わされる。

$$\int_R N_i [F\theta / \partial t (N_j h_j) - \nabla \{K(\nabla(N_j h_j) + \nabla z)\}] dR = 0 \quad (15)$$

式(15)の第2項をGreen-Gaussの定理を用いて展開すると次式が得られ、

$$\begin{aligned} & (\int_R N_i F N_j dR) \theta h_j / \partial t + (\int_R (\nabla N_i) K (\nabla N_j) dR) h_j \\ & = - \int_R (\nabla N_i) K (\nabla z) dR + \oint n K (\nabla h + \nabla z) N_i d\Gamma \end{aligned} \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

さらに、式(16)をマトリックス表示すると、次のようになる。

$$[A] dh/dt + [B] \{h\} = [D] + \{Q\} \quad (17)$$

上記のマトリックス及びベクトルの各要素は、それぞれ次のように表わされる。

$$A_{ij} = \int_R N_i F N_j dR = \sum \int_{Re} N_i F N_j dRe = \sum \int_{Re} N \alpha F N \beta dRe \quad (18)$$

$$\begin{aligned} B_{ij} &= \int_R (\nabla N_i) K (\nabla N_j) dR = \sum \int_{Re} (\nabla N_i) K (\nabla N_j) dRe \\ &= \sum \int_{Re} (\nabla N \alpha) K (\nabla N \beta) dRe \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} D_i &= - \int_R (\nabla N_i) K (\nabla z) dR = - \sum \int_{Re} (\nabla N_i) K (\nabla z) dRe \\ &= - \sum \int_{Re} (\nabla N \alpha) K (\nabla z) dRe \end{aligned} \quad (20)$$

$$Q_i = \oint n K (\nabla h + \nabla z) N_i d\Gamma \quad (21)$$

ここに、 R_e は全体座標系 $i-j$ に対応し、局所座標系 $\alpha-\beta$ を持つ要素である。

2.4 時間項

式(17)は、ある特定な時間における式(1)の近似式である。したがって、解に時間変化を考慮するには、初期条件から始まり逐次計算を行って全時間にわたる解を求めなければならない。このコードでは、時間項の計算に際し中央差分、後退差分、Mid 差分の3種類の選択肢を用意している。以下に、各方法の漸化式を示す。

【中央差分】

$$\begin{aligned} & (1/\Delta t [A] + 1/2 [B]) h(t + \Delta t) \\ & = [D] + [Q] + (1/\Delta t [A] - 1/2 [B]) h(t) \end{aligned} \quad (22)$$

【後退差分】

$$\begin{aligned} & (1/\Delta t [A] + [B]) h(t + \Delta t) \\ & = [D] + [Q] + 1/\Delta t [A] h(t) \end{aligned} \quad (23)$$

【Mid 差分】

$$\begin{aligned} & (2/\Delta t [A] + [B]) h(t + \Delta t / 2) \\ & = [D] + [Q] + 2/\Delta t [A] h(t) \end{aligned} \quad (24)$$

上記のうち、今回の計算には後退差分を用いた。

3. 解析方法

式(1)または式(5)で示される浸透流方程式を有限要素法で定式化し、地層中の非定常な水位、水流速を解析するには、次に示すパラメータが必要となる。

- a) 地盤の有限間隙率
- b) 飽和領域での透水係数、貯留係数（地盤、水の圧縮係数）
- c) 不飽和領域での水の挙動を規定する土壌特性（水分保持曲線、不飽和透水係数）
- d) 初期状態での水頭値
- e) 解析領域の境界条件

本報では、上記パラメータのうち、a)～c)の土壌物性値の変化が地層中の水の挙動に与える影響を検討するため、a)～c)の物性値に乱数を発生させて数値を仮定したモデル地盤を作成し、作成した32個のモデル地盤を解析した。なお、d)の初期条件には定常な降雨条件下での定常解析結果を使用し、e)の境界条件はこのパラメータによる影響を排除するため、全モデル地盤で同様の条件を仮定した。

3.1 モデル地盤

前述のように、本報告では土壌物性値の変化が解に与える影響を検討することを目的とするため、地層の構造には比解的簡単な仮定を置いている。以下に、モデル地盤作成に関する基本的条件を列記する。

- ・地層は5種類の土質で層構造をなし、各層は平行成層とする。横方向には100 mの地盤とす

る。(図1参照)

- 有効間隙率, 飽和透水係数は, 各層ごとに平均値と標準偏差を与え正規乱数を発生させて設定する。各層の層厚には, 2.0 m ~ 8.0 mの範囲で一様乱数を発生させる。(表1参照)
- 不飽和領域の土壌特性(相対透水係数と圧力水頭の関係, 体積含水率と圧力水頭の関係)は, 土壌の透水性・保水性を変えて典型的な3種類の曲線を仮定する。この3種類の曲線から任意に1つを選択し, モデル地盤で共通な特性とする。層ごとの土壌特性の変化は考えない。(図2, 図3参照)

3.2 解析条件

始めに, 作成したモデル地盤を定常状態で解析する。その定常解析の結果を初期条件とし, 非定常な降雨条件を与えて30日間の水の動きを解析した。以下に, 定常及び非定常の解析条件を示す。

【定常解析】

- 外水位を第4層と第5層の境界面の左端に設定する。(図1参照)
- 境界条件は, 地盤上部を降雨浸透境界(Variable境界), 外水位部分を水頭既知境界(Dranchlet境界), 地盤底部及び右側面を不透水境界とする。
- 降雨は2 mm/dayを仮定し, 境界面が飽和される(圧力水頭=0)まで地盤内への浸透を許す。

【非定常解析】

- 初期条件には, 定常解析結果を用いる。
- 境界条件については, 定常解析と同種類の境界を同位置に配置する。
- 降雨条件は, 降雨の強度を変化させて2ケース設定する。
 - Case - 1 50 mm/dayの降雨が2日間続き, その後28日間降雨なし。
 - Case - 2 50 mm/dayの降雨が7日間続き, その後23日間降雨なし。
- 降雨による浸透は, 定常解析と同様に境界面が飽和されるまで続く。

4. 解析結果

4.1 定常解析結果

図4に, 3.2の条件でモデル地盤を定常解析した際の, 水流速方向と自由水面(飽和領域と不飽和領域の境界)の発達状態を略図にして示す。自由水面は左端の外水位部分から始まり, 右方向に行くにつれ次第に高位に位置してくる。地表面より浸透した水は, 不飽和領域を鉛直下方に流れ飽和領域に達し, その後, 飽和領域中を外水面に向けて横方向に流れる。流速は, 不飽和透水係数と飽和透水係数の関係より, 不飽和領域では飽和領域と比べると1/10程度の値となる。モデル地盤ごとに層厚, 土壌物性値が異なるため, 浸透水の流速や自由水面の広がり幅は地盤ごと

に様々な値を示す。そこで、モデル地盤の中央、50 m地点での自由水面の上昇量を各地盤ごとに集計し、図5に頻度分布図にして示した。図6には、50 m地点の3層、4層の境界面における水流速（水平方向）の頻度分布を示す。図5より、自由水面は10～11 mを中心として正規分布的に広がり、その範囲は±3 m程度である。32個のモデル地盤に対する解析結果のうち最大と最小の上昇量には約2倍近くの差が生じている。水流速も、5.0 mm/dayを中心に、2.5～8.0 mm/dayの範囲に分布している。

4.2 非定常解析結果

図7と図8に3.2の解析条件で非定常解析を行った結果を示す。図7は比較的降雨量の少ないCase-1に対する結果で、30日間の自由水面の経時変化を示している。評価地点は、図5の場合と同様にモデル地盤の中央とした。図8は、Case-2の条件で解析した際の自由水面の経時変化である。

Case-1の50 mm/dayの降雨が2日間続いた条件（合計雨量100 mm）での解析結果を見ると、自由水面は変化の著しい地盤では約60 cm、変化の少ない地盤では20 cm前後の上昇が確認される。自由水面の上昇量が合計雨量100 mmより多くなる理由として、土壌の空隙率が当然のこと乍ら1以下であることと、上流部（モデル地盤右側）で降った雨が、時間経過に伴い飽和領域を拡張させながら地盤中央に移動してくるの双方が考えられる。また、曲線の形状を見ると、

- ① 3日目前後から急激に上昇し10日付近でピークに達する地盤、
- ② 7日目前後から緩やかに上昇し20日付近でピークに達する地盤、
- ③ 10日目前後まで自由水面は下降もしくは不変の状態が続き、その後徐々に上昇を始め、30日経過後も微量の上昇が継続する地盤、

の3種類に大別できる。自由水面の上昇量という観点からは、①のような変化をする地盤の上昇量が最も大きく、③のような変化をする地盤での変動は少ない。このように、自由水面の上昇開始時間や上昇量に差異が生じるのは、初期状態での地盤内の水分分布にも影響されるが、不飽和領域の土壌特性値から生じる浸透性・保水性の違いに起因するところが大きい。特に、不飽和領域の浸透性が低い地盤では、降雨による浸透水が自由水面に達する前に、自由水面下の地下水が横方向の外水面に流出し、降雨にもかかわらず解析初期において自由水面が下降する現象も見られる。

Case-2では降雨量が多い（50 mm/day × 7日間）ため、図8に示す解析結果には、地盤によっては2.0 m近く水位が上昇するケースも見られる。曲線の形状に関しては、自由水面の上昇過程においてはCase-1と同様な傾向が読み取れる。ただし、降雨量が多いため、Case-1に見られるように、解析期間の後半に自由水面が初期水位に漸近する傾向は薄れ、30日経過後でも上昇傾向にある地盤が多数見られる。自由水面の位置も初期状態より1.0 m程度高位に存在している。

5. 重回帰分析

4.節で得られた解析結果（自由水面の上昇，水流速）に与える地盤の土壌物性値の影響を定量的に評価するために，本報では重回帰分析を使用した。重回帰分析とは，ある目的関数とその性質を説明する有限個の説明変数（独立変数）で線形近似し，最小二乗法により目的関数に対する最良の予測式（重回帰式）を与え，予測式の係数より，各説明変数の影響度評価及び予測式の有意性を検討するものである。以下に，重回帰分析の概略を示す。

目的関数 y を， k 個の独立なる説明変数（ x_1, x_2, \dots, x_k ）で重回帰する場合を考える。目的関数の予測値 \hat{y} を次式のように説明変数の線形和で近似する。

$$\hat{y} = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (25)$$

式(25)が目的関数 y の最良の予測式となるためには，予測値 \hat{y} と目的関数 y との差の二乗和

$$\begin{aligned} D &= \sum (y - \hat{y})^2 \\ &= \sum \{ y - (a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k) \}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

の値が最小となるように，係数 a, b_1, b_2, \dots, b_k の値を定めればよい。すなわち， D を各係数 a, b_1, b_2, \dots, b_k で偏微分したものを 0 と置き連立方程式を解くと予測値 \hat{y} が得られる。求まった予測式 \hat{y} に対して，重相関係数と標準化偏回帰係数を計算することにより，予測式の精度，及び，各説明変数が目的関数に与える影響度を把握することができる。

【重相関係数】

予測式と説明変数 x_1, x_2, \dots, x_k の関連の程度を表す指標であり，この値が大きいほど予測式の精度（回帰性）が良い。

$$\sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (27)$$

y_i : 目的関数
 \hat{y}_i : 予測値
 \bar{y} : 目的関数の平均値

【標準化偏回帰係数】

予測式に与える説明変数の影響度を表す指標である。予測式が精度良く目的関数を再現している場合は，目的関数に対する影響度を評価しているとも言える。予測式で各説明変数に乘じられている係数（偏回帰係数） b_1, b_2, \dots, b_k を，説明変数間の偏りを排除し同レベルで比較するため，説明変数の標準偏差で標準化した係数である。したがって，この係数値が大きい程その説明変数が目的関数に関与する割合が大きい。

$$b_j \cdot S_j / S_y \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (28)$$

b_j : 偏回帰係数 ($j = 1, 2, \dots, k$)

S_j : 説明変数 x_j の標準偏差

$$S_j = \Sigma (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

S_y : 目的関数 y の標準偏差

$$S_y = \Sigma (y_i - \bar{y})^2 / n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

6. 考 察

6.1 定常解析

定常解析結果に与える土壌物性値の影響を評価するため、4.1で示した自由水面の上昇量(図5)及び水流速(図6)を目的関数とし、説明変数に相対透水係数～圧力水頭の関係と第1層から第5層までの飽和透水係数を選択して重回帰分析を行った。相対透水係数～圧力水頭の関係は、3種類の曲線に対し透水性の良い方から順に、③, ②, ①の番号を付し(図2)数値として評価している。

表2に標準化偏回帰係数及び重相関係数を示す。重相関係数の値より、この6個の説明変数で自由水面の上昇量及び水流速は9割弱表現していると言える。数式からも理解されるように、定常解析では、式(1)で与えられる浸透流の支配方程式のうち $\partial h / \partial t$ の項が0になるため、透水係数が解に対して支配的要因となる。飽和透水係数の標準化偏回帰係数の値を見ると、透水係数は自由水面の上昇量に対して各層とも負の相関性を示し、その影響度は第1層、第4層、第3層の順に大きい。透水係数が小さければ飽和領域が広範囲に分布するのは当然の結果と言えるが、その影響度について、第1層が大きいのは、この層の透水係数が他の層の透水係数と比べて大きいこと(表1参照)、さらに、最上部に位置し降雨境界から地盤内への浸透量を決定しているためと考えられる。一方、第4層と第3層が大きいのは、両層の近辺に自由水面が形成され、第3層は自由水面直上からの流入量を、第4層は自由水面直下の水の動きを規定するためである。また、自由水面の上昇量に関しては、相対透水係数～圧力水頭の関係が最大の標準化偏回帰係数を示している。相対透水係数の設定方法にも影響されると思われるが、今回の解析結果では、飽和領域の発達に対し相対透水係数によって規定される不飽和領域での浸透特性、すなわち自由水面から数mまで(図2では0～3.0mまで)の特性が重要な役割を果たしていると判断される。

水流速に関しては、第3層と第4層の飽和透水係数の回帰係数値が大きい。目的関数とした水流速は、第3層と第4層の境界面の値であり、さらに、ダルシー則は、

$$(\text{流速}) = (\text{透水係数}) \times (\text{動水勾配})$$

で水流速を計算することを考慮すると、この水流速に第3層と第4層の飽和透水係数が支配的に

作用することが理解される。

6.2 非定常解析

表3、表4にそれぞれCase-1、Case-2の非定常解析結果(図7、図8)に対して重回帰分析を行った結果を示す。目的関数には、3~5日間隔の自由水面の上昇量を取り、説明変数には、相対透水係数~圧力水頭の関係、飽和度~圧力水頭の関係、自由水面直上の飽和透水係数、自由水面直下の飽和透水係数、自由水面直上の有効間隙率、及び、初期状態の自由水面から地表面までの距離の6個の要因を選んだ。また、相対透水係数~圧力水頭の関係及び飽和度~圧力水頭の関係を表す3種類の曲線に対しては、6.1節と同様に①、②、③の番号を付し数値化している。数字が大きくなるに伴い地盤の透水性は高くなり(図2)、水分の保持能力も高くなる(図3)。

Case-1、Case-2の重相関係数を見ると、10日過ぎから両表の値に差が生じる。Case-1では10日をピークとしてその後は減少するが、Case-2では10日後も増加し30日でピークに達する。この動きは、図7、図8の自由水面の経時変化と同様な傾向を示している。重相関係数の値としては必ずしも十分なものとは言えないが、自由水面と同じ傾向で経時変化することを考慮に入れ、この6個の説明変数で水由水面の経時変化をある程度評価することが可能であると判断した。

両Caseとも5日目まで、また、Case-1の30日の重相関係数が小さいのは、この期間には降雨浸透水が自由水面の変化に影響を与えるまでに時間の遅れがあるため、自由水面の変化が特に少なく、ここで選択した説明変数以外の要因(例えば、初期状態の水分率分布)の影響が上昇量に反映されているためと考えられる。

標準化偏回帰係数の値は、時間経過と共に変動は見られるが、飽和度~圧力水頭の関係、地表面までの距離、自由水面直上の飽和透水係数、相対透水係数~圧力水頭の関係の順に大きく、他の要因の影響はこの4つの要因と比較すると小さい。

飽和度~圧力水頭の関係を見ると、両Caseとも標準化偏回帰係数の値は大きく、また重相関係数の値と同様な傾向で変動している。つまり、この要因は時間を問わず、自由水面の変化に最も強く影響している。

地表面までの距離の標準化偏回帰係数は、降雨量によらず10日前後で最大値となる。この係数値の変化から、本モデル地盤では降雨開始後約10日間で降雨浸透水が自由水面に達するものと想定される。地表面までの距離は、降雨浸透水が自由水面に達した直後における自由水面の変化には強く影響を及ぼすが、その後の変化に対しては影響度が減少している。

自由水面直上の飽和透水係数と相対透水係数~圧力水頭の関係は、自由水面直上の透水性を規定するものである。直上の飽和透水係数の標準化偏回帰係数は解析初期において大きな値を示し、相対透水係数の係数値は10日前後で最大となる。したがって、自由水面直上の飽和透水係数は、降雨浸透水が自由水面に達する以前、初期状態で地盤が持っている水分状態から自由水面に流入する水の量を規定し、相対透水係数は、降雨浸透水が自由水面近辺に達してからの流入量に与える影響が強いと言える。

自由水面直下の飽和透水係数の影響度が小さいのは、この値はある地点から外水面方向に移動する地下水の量を決定するが、その移動量と同程度の水が上流より流入してくるため、この値の変化が自由水面の変動に反映されないためである。

7. ま と め

2次元の有限要素法を使用してモデル地盤を解析し、各パラメータが解析結果、特に飽和領域の発達過程に与える影響を考察した。本解析によって、定常状態での地盤内の浸透水分布を求め、さらに異なる降雨条件下で、30日間にわたる自由水面の挙動を把握した。また、解析結果の影響度評価には重回帰分析を使用した。以下に、本研究で得られた結果をまとめて示す。

(1) 定常解析での飽和領域の発達には、飽和透水係数の値のみでなく、不飽和領域の相対透水係数の値が重要な役割を果たす。

(2) 飽和透水係数の中では、地表面に接している最上層と自由水面近辺の層の値が飽和領域の発達に強く影響する。

(3) 30日間にわたる自由水面の挙動は、不飽和領域の浸透性、保水性の違いにより、上昇開始時間、最大上昇量出現時間、自由水面の下降時間が異なり様々な形状を示した。最大上昇量は、最小値と最大値が得られた地盤間で3倍程度の違いが見られた。

(4) この自由水面の変化を重回帰分析した結果、入力パラメータとして必要な土壌物性値のうち、不飽和領域の飽和度～圧力水頭の関係、自由水面と地表面の距離、自由水面直上の飽和透水係数、の順で自由水面の上昇量、すなわち飽和領域の発達に関与する割合が大きい。

(5) (4)の3つの要因のうち、不飽和領域の飽和度～圧力水頭の関係は、30日間全期間にわたり強く影響を及ぼし、自由水面と地表面の距離は、降雨浸透水が自由水面に到達すると想定される降雨開始後の10日間前後の上昇量に影響してくる。また、自由水面直上の飽和透水係数は、降雨浸透水が自由水面に達する以前の初期上昇量に影響を与える。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御指導をいただいた飛鳥建設株式会社野沢俊彌氏ならびに、環境安全研究部松鶴秀夫氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 和達嘉樹, 山本忠利, 武部慎一, 大貫敏彦, 鷲尾方一, 原田芳金, 斎藤和明; 低レベル放射性廃棄物の陸地処分に関する安全性研究, 日本原子力学会誌, Vol. 24, 182~187, (1982).
- 2) 和達嘉樹, 大貫敏彦, 松永 武, 甲斐倫明; 低レベル放射性廃棄物の安全性評価, 日本原子力学会誌, Vol. 25, 979~985, (1983).
- 3) 大貫敏彦, 大塚芳郎, 小川弘道, 山本忠利, 鷲尾方一, 和達嘉樹; 帯水砂層中における放射性核種 (^{60}Co , ^{85}Sr 及び ^{137}Cs) の移動, 保健物理, 19, 13~18, (1984).
- 4) 地下水ハンドブック編集委員会編; 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, 1979.
- 5) 西垣 誠; 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2.3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol. 23, 167~177, (1983).
- 6) 例えば, 大貫敏彦; カラム内土壌層中における放射性核種の移動予測コード (MIGSTEM-2D), 私信, (1984).
- 7) 例えば, 赤井浩一, 大西有三, 西垣 誠; 有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析, 土木学会論文報告集, 第264号, 87~96, (1977).
- 8) 例えば, J. F. Washburn, F. E. Kaszeta, C. S. Simmons, C. R. Cole; Multicomponent mass transport model: A model for simulating migration of radionuclides in ground water, PNL-2939, (1980).
- 9) M. Reeves, J. O. Duguid; Water movement through saturated-unsaturated porous media; A finite-element Galerkin model, ORNL-4927, (1975).
- 10) G. T. Yeh, R. H. Strand; FEOWATER: User's manual of a finite-element code for simulating water flow through saturated-unsaturated porous media, ORNL/TM-7316, (1982).
- 11) B. W. Bolch, C. J. Huang, 中村慶一(訳); 応用多変量解析, 森北出版, 1975.

表1 有効間隙率、飽和透水係数、及び、層厚

作成方法	有効間隙率		飽和透水係数 (cm/sec)		層厚 (m)	
	正規乱数		正規乱数		ランダム乱数	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	下限値	上限値
第1層	0.30	0.05	1.0E-3	5.0E-4	2.0	8.0
第2層	0.20	0.05	5.0E-4	2.0E-4		
第3層	0.18	0.05	1.0E-4	5.0E-5		
第4層	0.15	0.03	1.0E-4	2.0E-5		
第5層	0.05	0.02	1.0E-6	1.0E-7		

表2 定常解析結果に対する標準化偏回帰係数と重相関係数

目的関数		自由水面の上昇	水流速
説明変数	相対透水係数と 圧力水頭の関係	-0.504	-0.185
	第1層の飽和透水係数	-0.419	-0.421
	第2層の飽和透水係数	-0.200	-0.229
	第3層の飽和透水係数	-0.325	0.689
	第4層の飽和透水係数	-0.397	0.441
	第5層の飽和透水係数	-0.129	-0.185
重相関係数		0.876	0.853

表3 非定常解析結果に対する標準化偏回帰係数と重相関係数
目的関数 自由水面の上昇量 (Case-1, 50mm/day×2日間)

		3日	5日	7日	10日	15日	20日	30日
観	相対透水係数と 圧力水頭の関係	-0.01	0.08	0.11	0.12	0.08	0.03	-0.07
	飽和度と 圧力水頭の関係	-0.33	-0.50	-0.55	-0.60	-0.62	-0.60	0.46
明	自由水面直上の 飽和透水係数	0.40	0.37	0.33	0.29	0.24	0.21	0.16
実	自由水面直上の 有効孔隙率	-0.03	-0.10	-0.11	-0.11	-0.10	-0.07	0.03
数	自由水面直下の 飽和透水係数	-0.17	-0.08	-0.05	-0.04	-0.05	-0.07	-0.13
	自由水面から地 表面までの距離	-0.22	-0.32	-0.36	-0.38	-0.37	-0.34	-0.25
重相関係数		0.51	0.66	0.71	0.75	0.74	0.70	0.51

表4 非定常解析結果に対する標準化偏回帰係数と重相関係数
目的関数 自由水面の上昇量 (Case-2, 50mm/day×7日間)

		3日	5日	7日	10日	15日	20日	30日
観	相対透水係数と 圧力水頭の関係	0.06	0.29	0.31	0.27	0.24	0.21	0.19
	飽和度と 圧力水頭の関係	-0.32	-0.44	-0.51	-0.62	-0.69	-0.73	0.75
明	自由水面直上の 飽和透水係数	0.39	0.32	0.25	0.17	0.12	0.09	0.05
実	自由水面直上の 有効孔隙率	-0.07	-0.21	-0.22	-0.20	-0.22	-0.23	-0.23
数	自由水面直下の 飽和透水係数	-0.18	-0.09	-0.02	0.04	0.05	0.04	0.02
	自由水面から地 表面までの距離	-0.26	-0.46	-0.49	-0.45	-0.42	-0.40	-0.37
重相関係数		0.51	0.70	0.77	0.83	0.88	0.90	0.90

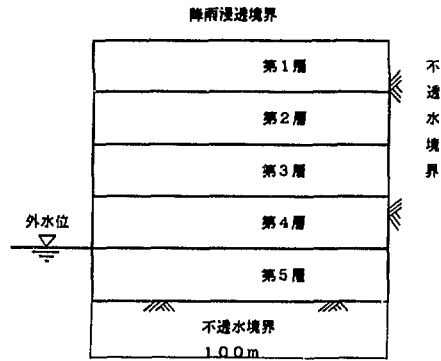


図1 モデル地盤の概略

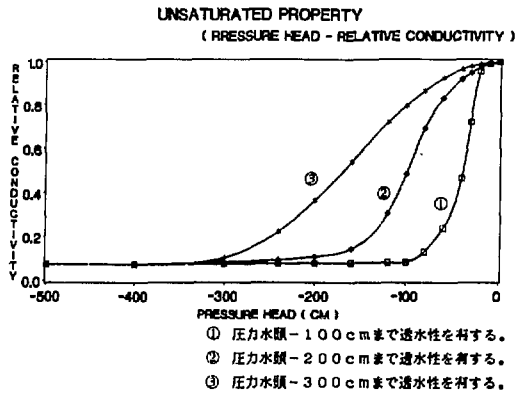


図2 相対透水係数～圧力水頭の関係

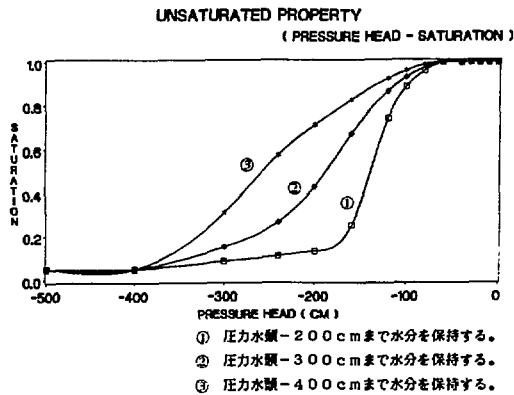


図3 飽和度～圧力水頭の関係

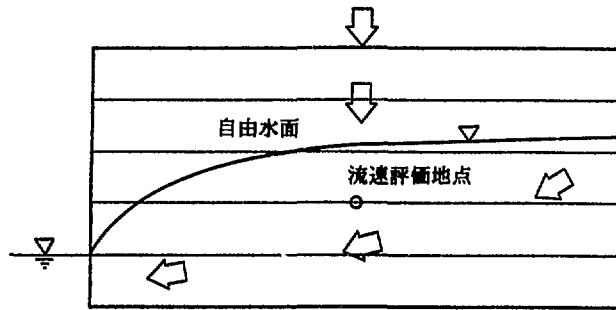


図4 定常解析結果の略図

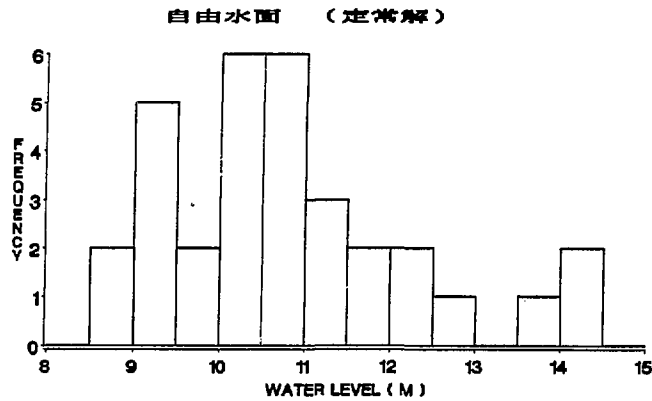


図5 自由水面の上昇量の頻度分布

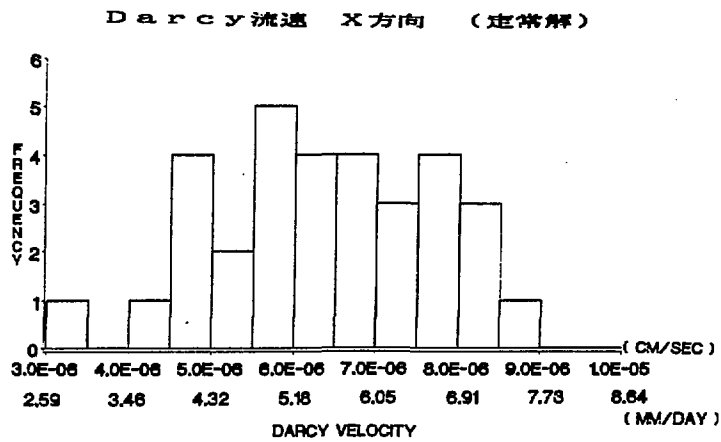


図6 横方向の水流速の頻度分布

Case-1 50mm/day, 2日

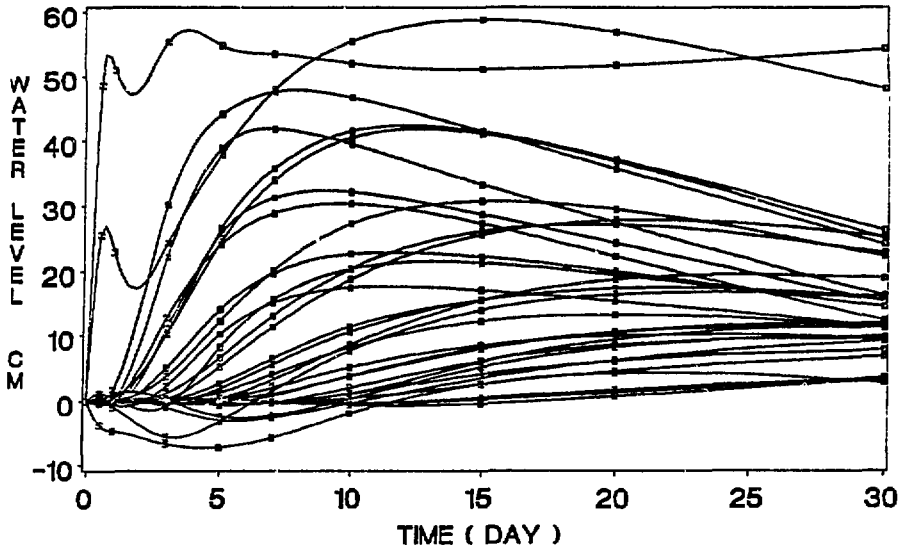


図7 自由水面の経時変化 (Case-1)

Case-2 50mm/day, 7日

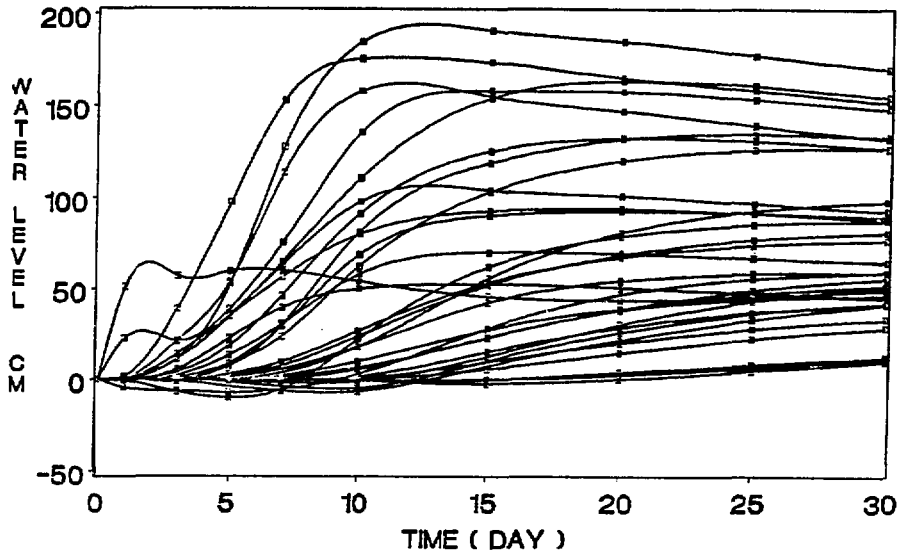


図8 自由水面の経時変化 (Case-2)