

3次元浸透流の数値シミュレーション

長崎大学大学院 学生員 ○米倉 広幸

長崎大学工学部 正 員 野口 正人

1. まえがき

最近では、都市の拡大により、河川流域の変貌が著しい。河川管理の観点からみると、山間部の森林伐採、住宅化、そして、道路の舗装化等により、これまで、流域に備わっていた雨水の貯水作用の低下が著しい。このように、刻々と変貌する都市に対する認識が必要であり、また、その変化に応じた管理を行わなければならない。そのため、流域をLumped systemとして、取扱った従来の流出解析手法では、不十分であり、雨水流を追跡していく必要がある。そのため、昭和59年度より、蒲上川上流域の谷底に試験流域を設けて、水文観測を行っている。

以上のことから、流域水の挙動をより忠実に表現する手法として、前々報、前報において、変形雨水流法の提案と、その応用について述べてきた。²⁾ この変形雨水流法では、実用化を考慮して、中間流を表現するためタンクモデルを用いていたので、流出量の予測の精度は、浸透量の評価の妥当性に依存していた。そこで、本報では、土中浸透量に対する土中水の挙動について、三次元有限要素法を用いた数値解析を行い、その結果について若干の考察を試みた。

2. 浸透流に関する基礎方程式の離散化

土中を運動する水に対する支配方程式は、質量保存則とDarcyの方程式より導くことができる。³⁾

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} + K_{ij} \frac{\partial Z^*}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$D_{ij} = K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (2)$$

ここに、 θ : 体積含水率、 ψ : 圧力ポテンシアル、 D_{ij} : 拡散係数、 K_{ij} : 透水係数、 Z^* : 基準面からの高さ、である。なお便宜上、上式では総和規約が用いられている。

上式を、境界条件のもとで有限要素法により解く。このとき、 x_3 軸が鉛直上向きの直交座標系をとりGalerkin法を適用して、図-1(a)に示す4節点四面体要素に対する方程式に離散化する。形状関数を N_n とすると、次のような式を得る。

$$A_{mn} \frac{\partial \theta_n}{\partial t} + B_{mn} \theta_n = -Q_m - C_m \quad (3)$$

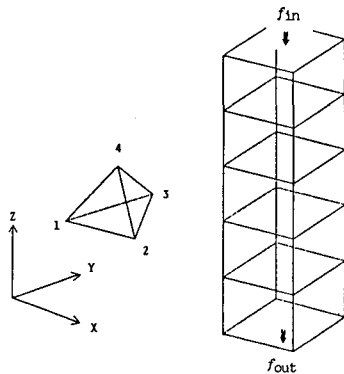
ここに、

$$A_{mn} = \iiint_{\tau_e} N_m N_n \, dv$$

$$B_{mn} = \iiint_{\tau_e} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} D_{ij} \frac{\partial N_n}{\partial x_j} \, dv$$

$$C_m = \iiint_{\tau_e} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} K_{i3} \, dv$$

$$Q_m = - \int_S N_m \left\{ D_{ij} \frac{\partial (N_n \theta_n)}{\partial x_j} + K_{i3} \right\} \cos(x_i, n) \, ds$$



(a) 四面体要素 (b) 領域モデル

図-1

ただし、添字 i, j は軸方向($i, j = 1, 2, 3$)を表しており、 m, n は要素 τ_e 内の節点番号($m, n = 1, 2, 3, 4$)である。また、 n は境界面 S の外向き法線ベクトルを表している。

3. 数値計算

実際に数値計算を行う場合、非定常項の処理、初期・境界条件が必要である。時間項については、差分法を用いて漸化式となし逐次計算を行う。この他、体積含水率 θ と圧力ポテンシャル ψ との関係や、飽和透水係数 K を求める必要がある。ここでは、 K - θ 関係、 K - ψ 関係は、 θ - ψ 関係より導かれるG. S. Campbellの理論を適用した⁴⁾。このとき飽和透水係数は次のように表せる。

$$\begin{cases} \theta - \psi \text{ 関係} & \psi = \psi_e (\theta / \theta_s)^{1/b} \\ K - \theta(\psi) \text{ 関係} & K = K_s (\theta / \theta_s)^{2b+2} = K_s (\psi_e / \psi)^{2+2/b} \end{cases}$$

ここに、 ψ_e : 空気侵入ポテンシャル、 θ_s : 飽和体積含水率、 K_s : 飽和透水係数、 b : 定数、である。

上述の関係を用いて、図-1(b)に示されるような64節点、90要素からなる四角柱領域に対して計算を試みた。表面の境界条件には、水文観測より計算された流入フラックスを用い、底面境界では、連続の条件より、流入フラックスから領域内の水分の時間増分を差し引いた量を用いた。この表面の流入フラックスは、図-2に示されている。 θ - ψ 関係、飽和透水係数等には、昨年度⁵⁾の室内実験により推定された値を適用した。

このようにして計算された体積含水率を、圧力水頭(吸引圧)に変換した値が図-3に示されている。また、この図には観測により得られた値も併記されている。これを見る限りでは、降雨に対する吸引圧の変動の傾向としてはよく特徴をとらえている。しかし、観測値と比較すると、無降雨状態が続いたとき、表層付近では解析値の方が大きく下回っている。これは、表面での蒸発散を考慮していないことによる。また細かいところでは、強降雨時の直後に吸引圧の急増が目につく。この原因には、流入フラックスの急減と、解析において今回は側方気は無視したことがあげられる。参考までに、10月11日~12日の解析結果の水理水頭の空間分佈の変化を図-4に示した。

4. あとがき

本報では、土中水の挙動を把握するため、3次元有限要素法を適用して検討を行った。この結果、 θ - ψ 関係、 K - $\theta(\psi)$ 関係、蒸発散等の影響を十分考慮すれば、ある程度の土中水の挙動はつかめると思われる。今回、降雨資料を提供して下さった長崎海洋気象台、長崎土木事務所の方々に感謝致します。

(参考文献)

- 1) 野口・米倉・菅; 流出解析における流域特性量の評価に関する一考察, 土木学会西部支部講演会報告集, 1984
- 2) 野口・米倉; 水文資料が乏しい地域での流出解析について, 1985
- 3) Eagleson, P.S.; Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, 1970
- 4) G.S. Campbell; A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Science, 1974
- 5) 野口・米倉・森尾; 水文観測による土中浸透量の評価, 土木学会西部支部講演会報告集, 1985

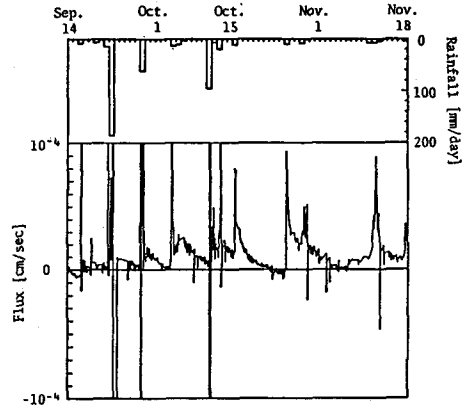
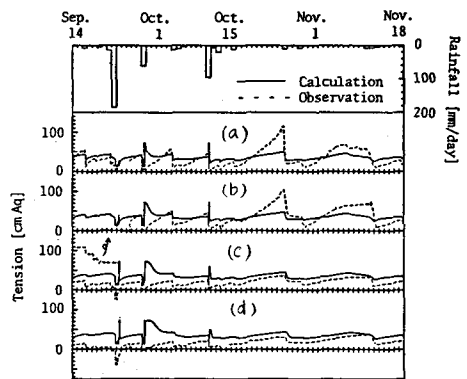


図-2 流入フラックス



深度: (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 40 (cm)

図-3 吸引圧の時間変化

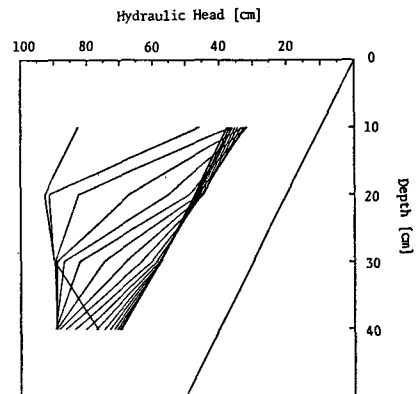


図-4 10月11日~12日の

水理水頭の空間的变化