

II-338

二次元地表流－三次元地下浸透流結合モデルの
浸透トレンチへの適用

芝浦工業大学工学部

正会員 守田 優

東京工業大学大学院情報理工学研究科 学生会員 西川 麗

1. はじめに

排水区域の浸透現象をモデル化するために、さまざまな数値解析モデルが開発されてきた。しかし、その多くは地表流と浸透流の相互作用を考慮せず、双方を経験式で関係づけているのが現状である。そのため両者の相互作用を理論的に扱うことができず、降雨初期損失など基本的な問題についても水理学的な検討ができない状況にある。本研究では、不飽和土壌において地表流と浸透流の相互作用を理論的に規定し、二次元地表流と三次元地下浸透流の結合モデルを定式化した。そしてこれをトレンチを含めた排水区域に適用し、計算結果の検討と分析を行い、モデルの妥当性と適用性を検証した。

2. 排水区域と解析手法

対象とする排水区域を図1のように設定する。地表流は区域の上部、下部、左端を閉鎖条件とし（太線で示す）右端のみトレンチに接続している。浸透流は上の条件の他、

①初期条件 飽和度 $S=0.2$ ($t=0, 0<z<1\text{m}$)②境界条件 飽和度 $S=1.0$ ($t>0, z=1\text{m}$)

なお、地表面の境界条件はモデル内で計算する。

空間増分： $\Delta x = \Delta y = 0.5(\text{m})$, $\Delta z = 0.01(\text{m})$

数値解析手法は差分法を用いることとし、比較的計算が速くかつ安定しているADE(Alternating-Direction-Explicit)法を選定した。

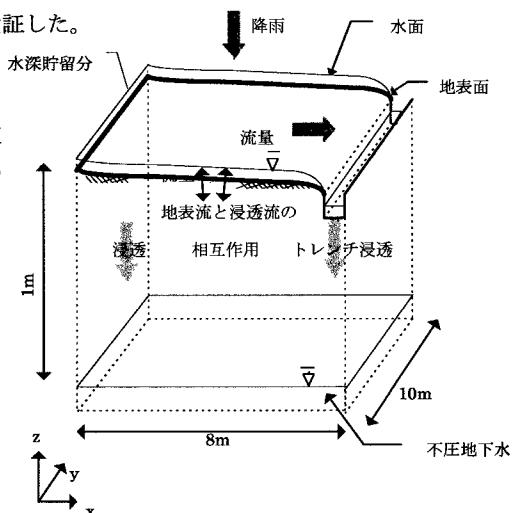


図1 排水区域への結合モデルの適用

3. 地表流と浸透流の方程式

<二次元非定常地表流>

地表流の基礎方程式は、Saint-Venantの式を簡略化した非慣性モデル(non-inertia model)を適用する。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial H}{\partial y} + r - i \quad (1)$$

H : 水面高度 K_x, K_y : Reynolds数とDarcy-Weisbachによる係数 r : 降雨強度 i : 浸透度

<三次元非定常不飽和地下浸透流>

浸透流の基礎方程式は、Richardsの式を修正したものを適用する。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \alpha_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \alpha_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \alpha_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} + i \quad \alpha_i(\theta) = K_{si} K_r / (\partial \theta / \partial P) \quad (2)$$

H : ピエゾ水頭 K_{sx}, K_{sy}, K_{sz} : x, y, z 方向の飽和透水係数 K_r : 相対透水係数 P : 毛管圧

θ : 体積含水率 ($\theta = nS$ n : 空隙率 S : 飽和度)。ピエゾ水頭 H と毛管圧 P の間に、 $H = P + Z$ (Z : 底面高度)の関係がある。両者共に熱伝導方程式の形式であるため、上記の数値解析手法の適用が可能になる。

4. 結合部の理論と解析手順

結合モデルを考えるにあたって、式(1)の r と i の関係を考慮し、以下のように解析を進めていく。

① 式(3)により、浸透能 I_p を計算する。

$$I_p = -0.5(K_s + K_1)(H_1 - Y) / \Delta Z \quad (3)$$

（初期の値は土壌の初期状態により異なる）

K_1, H_1 : z 方向の第一番目の点の不飽和透水係数, ピエゾ水頭

Y : 地表面からの水深 ($Y=y+r\Delta t$)

② 供給能 R_p を計算する。

$$R_p = Y / \Delta t = r + y / \Delta t \quad (4)$$

③ I_p と R_p を比較する。

④ もし $I_p > R_p$ ならば, (5)式により地表面の境界条件を計算する。

$$H_0 = H_1 + (R_p \Delta Z) / \{0.5(K_s + K_1)\} \quad (5)$$

$R_p \Delta Z$: 空間増分 ΔZ 当り供給される降雨強度

⑤ もし $I_p < R_p$ ならば, 地表面の境界条件を(6)式のようにおく。

$$H_0 = Y \quad (6)$$

⑥ ④と⑤のいずれかの境界条件を用いて(2)式を計算し, ピエゾ水頭 H を求める。

⑦ ①へ戻り, I_p と R_p の比較をくり返す。水深が生じているとき ($Y > 0$) は, (1)式を用いて水面高度 H を求め, 新しい水深 y とする。

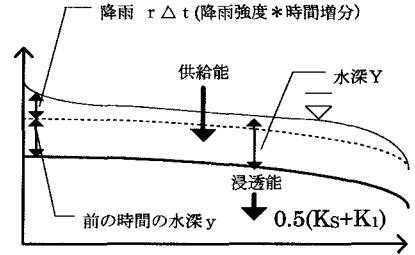


図2 結合流概念図

5. 計算結果とまとめ

結果の一部を図3, 4に示す。降雨強度を図のように2種類与えることで浸透の様子を観察する。ともに計算時間は20分, 時間増分は $\Delta t = 1.0$ (sec)として行った。(図に示したトレンチ浸透度は比較のために排水区域当たりに換算している。)

図3は降雨強度一定の時のハイドログラフを示したものである。地表面浸透度が減少するにつれ流量が増加し, トレンチ内部の水深も適当な増加傾向を示している。トレンチ浸透度には極端な増加傾向は見られない。図4は降雨強度が変化するハイドログラフの計算例である。2分30秒ごろまでの急激な地表面浸透度の増加からわかるように, 従来のモデルでは確認できなかった降雨の初期損失が明確に現れた。これ以降, 地表面浸透度は減少, 流量は増加し, 6分近くでピーク流量が生じる。10分の時点で降雨が生じなくなると, 急激に地表面浸透度・流量は減少し0に近づき, トレンチ水深もゆるやかに減少する。

水収支的には, 一定降雨では安定状態で, 変動降雨ではピーク流量時に「流量と地表面浸透度の和が降雨強度に等しい」ことが成立つ必要があるが, この関係も満たされている。

このように一定降雨と変動降雨のどちらを与えても矛盾のないことから, 結合モデルの妥当性と適用性が検証できた。

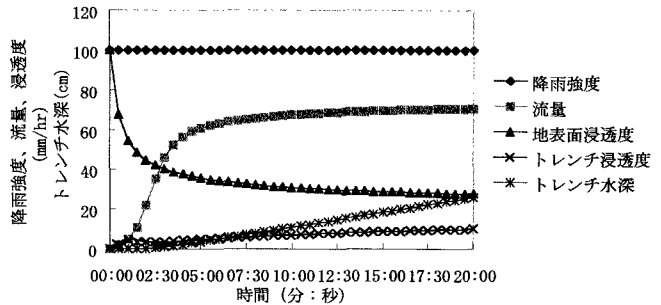


図3 ハイドログラフ（一定降雨時）

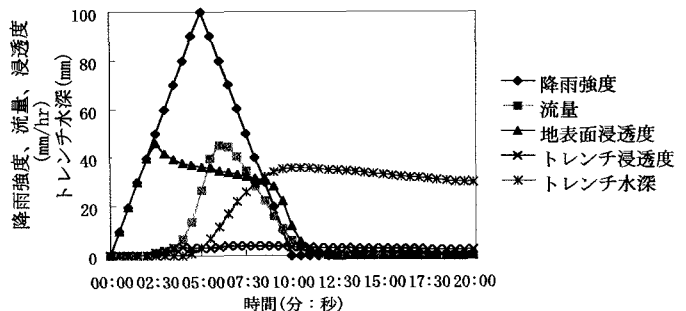


図4 ハイドログラフ（変動降雨時）