

地表条件の違いに応じた土中浸透量の評価

Estimation of Infiltration Rate Due to the Difference of Ground Conditions

長崎大学工学部 野口正人 M. Noguchi

水資源開発公団 米倉広幸 H. Yonekura

1. はじめに

著者らは、ここ数年都市域での低平地流出解析を行い、豪雨時における水防災のための避難情報の作成を試みているが、^{1,2)} そのためにも背後地からの流出量を正しく評価することが必要である。ところで、しばしば実用に供される概念的流出解析法では、パラメーターを同定するために、既往の雨に対する降雨量・流出量のデータを必要としたが、実際には水文資料が十分に整っていない地域でも流出解析をせねばならぬのが現状である。この種の解析法の一つとして、表面流を Kinematic wave 法で、また、中間流をタンクからの流出量として算定する変形雨水流法を既に提案している³⁾。本手法で流出量の予測精度を高めるためには、地表条件の違いに対応した土中浸透量を見積もることが不可欠である。

上述されたことから、本論では、地表付近の水文学的条件、とくに地被状態・土質状態の違いによる土中浸透量の評価法を示し、流出解析の精度に及ぼす影響について若干の考察を行った。

2. 土中浸透流の3次元数値解析モデル

空間的に不均質な地表条件の違いによる土中浸透流を模擬するためには、3次元モデルに依らなければならない。以下では、不飽和域における雨水流を対象として、3次元有限要素法を用いた数値シミュレーションを行い、土中水の挙動について調べるとともに、雨水の中間流への寄与について検討した。

不飽和域における体積含水率は、よく知られている次式で表現される⁴⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[D_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial X_j} + K_{ij} \frac{\partial Z}{\partial X_j} \right] \quad (1)$$

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

ここに、 θ ：体積含水率、 ϕ ：圧力水頭、 K_{ij} ：透水係数、 D_{ij} ：拡散係数、 Z ：鉛直上向き座標である。

上式を Galerkin 法を用いて離散化すれば、形状関数を $N\alpha$ として、次式を得る。

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

ここに、

$$\begin{aligned} A_{mn} &= \iiint_{V_e} N_m N_n dV & B_{mn} &= \iiint_{V_e} \frac{\partial N_m}{\partial X_i} D_{ij} \frac{\partial N_n}{\partial X_j} dV \\ C_m &= \iiint_{V_e} \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{ij} dV \\ Q_m &= - \iint_{S_e} N_m \left\{ D_{ij} \frac{\partial (N_n \theta_n)}{\partial X_j} + K_{ij} \right\} \cos(n^*, X_i) dS \end{aligned} \quad (4)$$

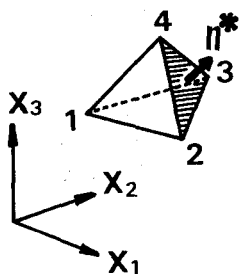


図-1 四面体要素

式中の添字 i, j は軸方向を表しており、 m, n は要素 V_e 内の節点番号を示している。また、 n^* は境界面 S_e の外向き単位法線である。

いま、3次元問題を解くために図-1に示された4節点四面体要素を取り上げれば、方程式の各係数は以下のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} A_{mn} &= \frac{1}{10} V_e \quad (m=n) \quad , \quad = \frac{1}{20} V_e \quad (m \neq n) \\ B_{mn} &= D_{ij} a_{i+1,m} a_{j+1,n} V_e \\ C_m &= K_{i3} a_{i+1,m} V_e \\ Q_m &= \sum_{S_e} \frac{V}{3} S_e (1 - \delta_{m1}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

なお、式中の a_{mn} は次式のように置かれた。

$$a_{mn} = (1, X_{1n}, X_{2n}, X_{3n})^{-1} \quad (6)$$

(5) 式中の Q_m は、四面体表面からの流出量による各節点への寄与を表しており、計算領域の境界面では、通常、流出量ないしは体積含水率が既知として与えられる。

上述された境界値問題を解くためには、予め ϕ (圧力ヘッド) - θ (体積含水率)、 K (透水係数) - θ (体積含水率) の関係を求めておく必要がある。この種の方法によって土中含水量の妥当な解を得るにあたっては、このほかにも幾つかの問題が存在する。もちろん、その一つは数値解法に関するものであるが、流出解析を行う立場から言えば、水みちの存在等による巨視的な透水係数の把握が重要になる⁵⁾。そのため、各種の地表条件に対応した土中浸透水の挙動を、境界値問題の3次元の数値解との比較においても調べられなければならない。

3. 地表条件が不均質な場での土中浸透流

通常、地表面での被覆状態や地質・土質条件は様々であり、土中への浸透流は複雑な挙動を呈する。また、都市化に伴う流出量の増加量を算定するため、しばしば、散水型浸透実験や冠水型浸透実験が行われる⁶⁾。これらの実験で得られた結果を正しく理解するためにも、土中における浸透流の定量的評価は欠かせない。上述されたことから、本節では、図-2に示された簡略的な流域モデルを取り上げ、地表条件の違いに応じた土中浸透流について調べた。

計算に用いた流域モデルは、鉛直方向に10層の99節点 240要素からなる4本の四角柱領域であり、まず、地表面での被覆状態を変化させて計算を行った。入力として使用された降雨は、昭和60年10月11日に兵底試験流域で観測された豪雨であり、最大時間雨量は58.0mm、日雨量は95.5mmであった。このときの30分間降雨強度は、図-3に示されている。なお、図中に示された浸透能は、Hortonの式を用いて計算された。すなわち、降雨強度： r 、浸透能： f^* とすれば、地表面での浸透フラックスは次式で与えられる。

$$f = \begin{cases} r & (r < f^*) \\ f^* & (f \geq f^*) \end{cases} \quad (7)$$

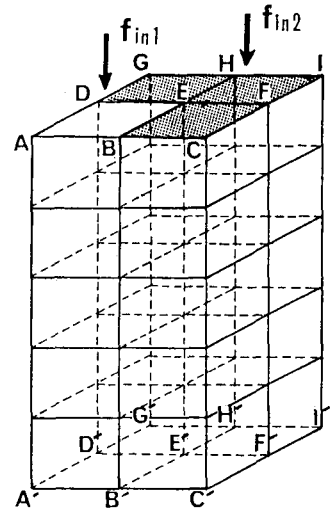


図-2 流域モデル

図-4、5は、地表条件が一方方向に変化している場合の、体積含水率の時間的変化を示したものである。この図より明らかなように、降雨初期には、体積含水率の鉛直分布は、空間的に大きく異なり、地表付近の浸透特性の違いによる影響が顕著である(図-4)。しかしながら、時間の経過とともに含水量の違いによって生ずる側方流が卓越し、体積含水率は横方向に一様化する傾向にある。このことは、たとえ都市化に伴い地表面が不透水面で覆われても、その地域の降雨が単純にすべて表面流に変換される訳ではないことを意味している。すなわち、浸透域のみに着目すれば、不透透域を隣接することにより土中浸透量が増加し、貯水効果の低減を遅らせている。

前述されたことを詳しく検討するため、ABDE面のみが良透水性で、周りが難透水性表面である場合の計算結果を図-6に示した。含水率の時間的・空間的変化の様子は上と同様であり、定性的傾向は、容易に予想されるところである。図-7は、ABDE面にわたる平均的な含水率の分布を、1次元的に計算された分布と比較したものである。地表面での水分の流入フラックスは両者とも同じにしたが、難浸透域が隣接したときの3次元計算により求められた含水率は、地表面を含め、後者のものより小さくなっている。ところで、水平方向の水分フラックスは、形状関数： $N\alpha$ を用いて次式で表される。

$$v_i = -D_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = -D_{ij} a_{j+1,n} \theta_n \quad (8)$$

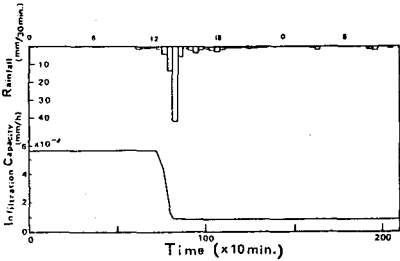


図-3 降雨強度と浸透能

本論では、基礎方程式の離散化にあたって4節点四面体要素を用いているため、上式は各要素で一定となる。したがって、各面でのフラックスは、隣接要素の値の加重平均で計算される。このようにして、降雨が激しくなり始めた14時のDE面に対する水平方向の水分フラックスを計算すれば、表層付近の深度2.5cm、7.5cmのところでそれぞれ 0.198×10^{-3} 、 0.156×10^{-4} cm/sであった。ここで取り上げた事例も2次元のものであり、当然のことながら側方流の方向は各深度で一定になる。上の両者でも、その方向はほぼ等しく、DE方向からの傾きは約33度であり、計算精度の確かことが分かる。

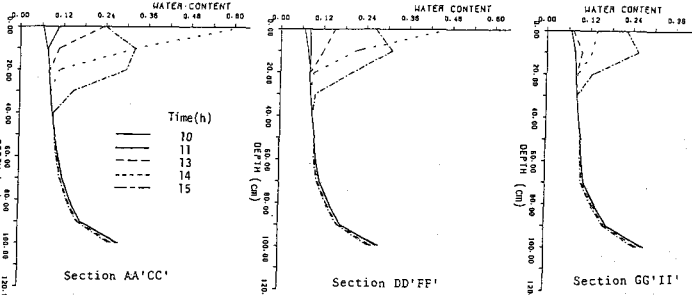


図-4 体積含水率の鉛直分布(降雨初期)

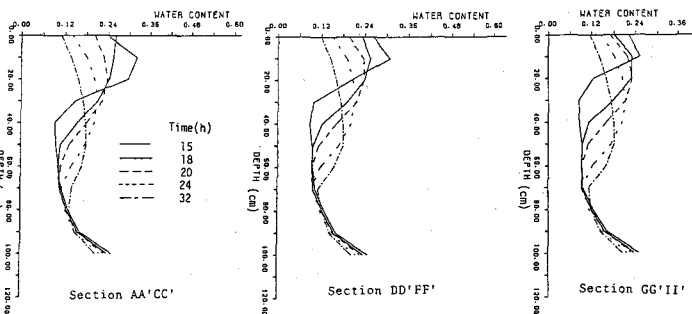


図-5 体積含水率の鉛直分布(降雨終期)

上述の計算では、難浸透域・良浸透域として、それぞれ、裸地ならびに緑地を想定し、終期浸透能は、安藤らの観測結果を参考にして⁷⁾、それぞれ、3 mm/h、200 mm/hとした。もちろん、流出量を予測する観点からは、流域の水みちの存在を考慮した平均的な透水係数を用いて計算すべきことは言うまでもなく、浸透能についても、表層の各種の条件に対応した値が求められなければならない。なお、本論で示された計算プログラムの妥当性を調べるため、ここでは述べられなかったが、鉛直1次元問題を解き、計算精度の検討を行った。

その結果、計算領域の各境界面を通過する流入フラックスを各節点に配分する、(4)式の Q_m の計算が、離散化誤差に大きく影響することが分かった。そのため、境界面（基本的には三角形）の形状に応じて、配分割合を入力し、計算精度の向上を図った。一般の広領域を対象とした計算では、この種の計算誤差は一見したところ明らかにされないが、正しく計算をするためには十分注意されねばならない。

4. 土中浸透量の評価法

前節では、簡単なモデルを取り上げて、土中への浸透流について検討した。本節では、流出解析を行う際の前段階として、実際に観測された含水率を計算により求められた値と比較する。

本節で用いられた資料が得られた水文観測については、前報で述べられているので説明を省略する⁹⁾。図-8に、計算に用いられた地表面要素のみを示した。昭和60年9月～11月に実施された水文観測では、兵底試験流域の数ヶ所で土中の含水量が測定されたが、以下では図-8のSt.6の結果を用いて考察する。ただ、隣接測点での含水量の鉛直分布が無い場合、側方流を直接求めることができない。St.6の深度10cm、20cmの含水量から側方流の影響が無視できるとして、地表面の流入フラックスが求められた（図-9）。しかし、実際上は側方流が存在し、とくに無降雨時においては、側方流動に伴うフラックスが大半を占めるものと思われる。一方、前述された数値モデルを用いて計算された水理水頭の分布を観測値と比較すれば、図-10のようである。目下のところ、両者は必ずしも合致していない。その理由としてはいくつかのものが考えられるが、 $\phi-\theta$ 関係や、水みちを考慮した見掛け上の透水係数の評価が十分にされていないこと、或い

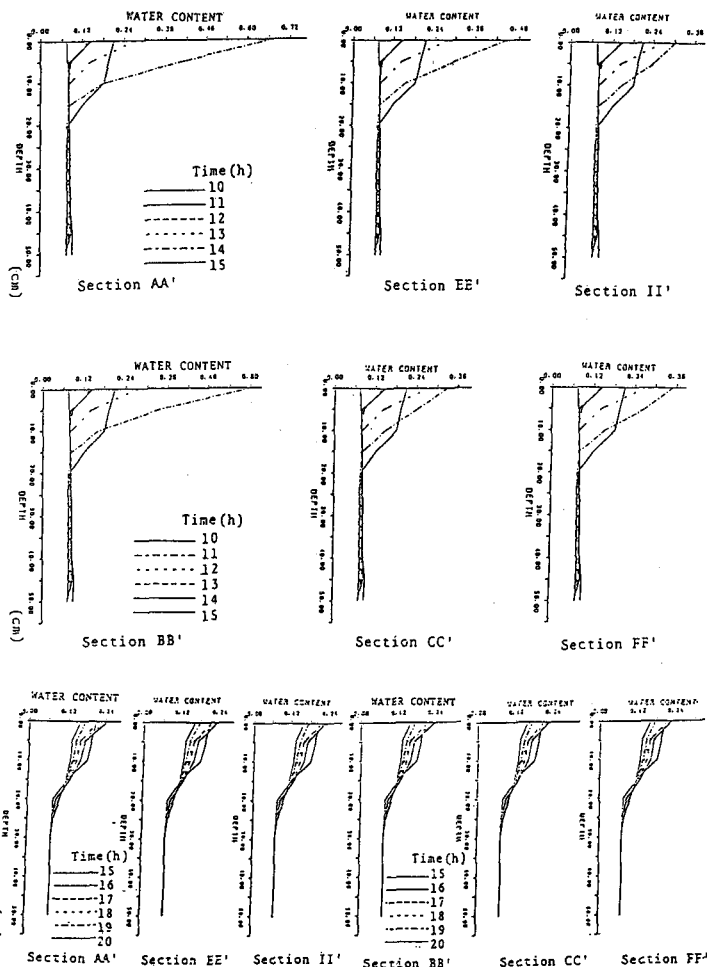


図-6 体積含水率の鉛直分布

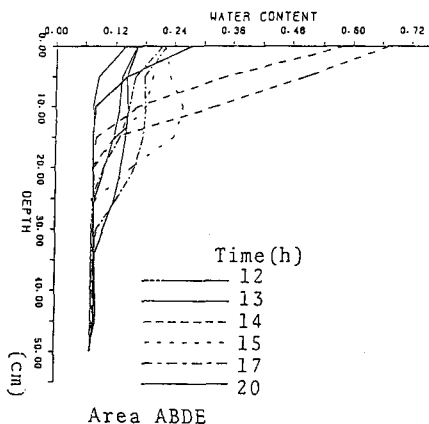


図-7 地表条件が一樣な場合との比較

は、水文観測が最高精度でされていないこと等に起因するものと思われる。しかし、定性的には両者は同傾向を示しており、前述された諸点を更に検討することにより、地表条件の違いに応じた土中浸透量の評価を行うことができる。

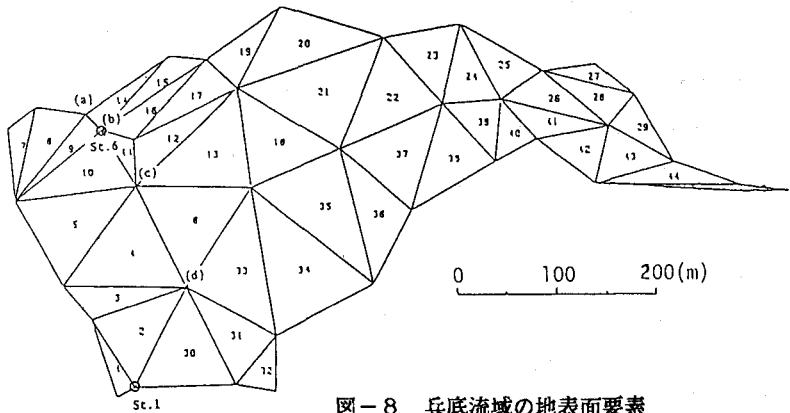


図-8 兵底流域の地表面要素

5. まとめ

物理モデルによる流出解析を行う際の土中浸透量について、3次元数値解析モデルを用いて検討した。その結果、概念モデルに用いられる流出率の算定においても、各種の地表条件が考慮されべきことが明らかにされた。とくに、地表条件が不均質な場合には、

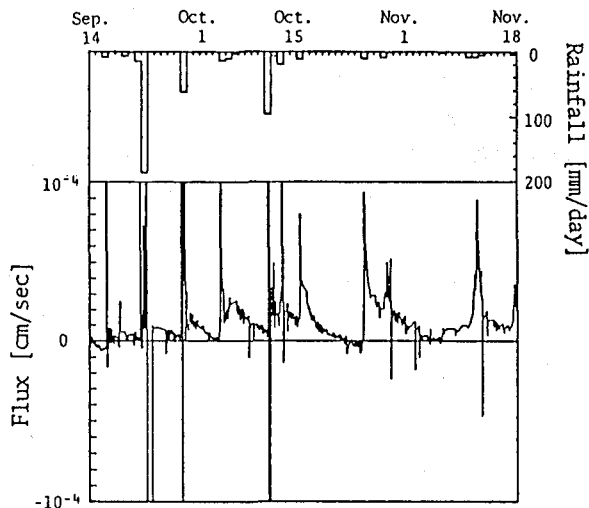


図-9 地表面の流入フラックス

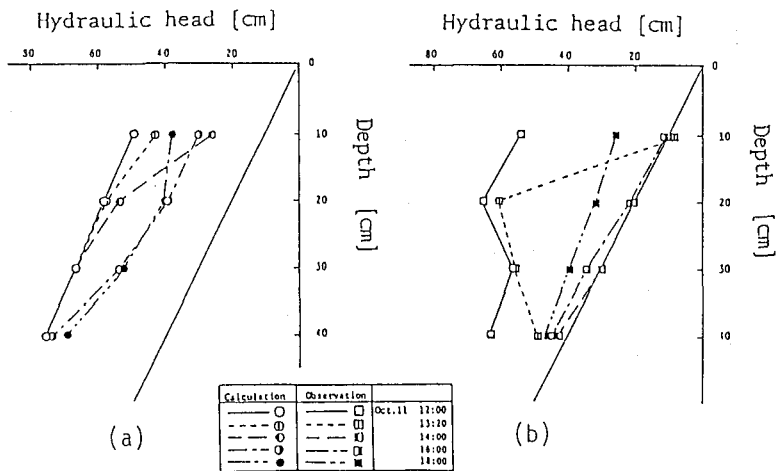


図-10 水理水頭の比較

地表面がたとえ不浸透な領域であっても、側方流の存在で保水機能はあり、その多寡は、土壌中の水みちや先行降雨による土中含水量の変化に伴う浸透能の絶対値などとの関連で考察されるべきことが示された。

最後に、本論で取り上げられた数値計算に協力された長崎大学学生の市川義隆・尾長谷孝之の両君に謝意を表します。また、本研究は、豪雨時における低平地の耐水性向上に関する研究の一環としてなされたものであり、昭和62年度文部省重点領域研究（代表：野口正人）の補助を受けたことを記し、関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) Iwasa, Y., K. Inoue, M. Noguchi and T. Nakamura: Simulation of Flush Flows Due to Heavy Rainfalls in Nagasaki, Urban Drainage Modelling (Ed. C. Maksimović et. al.) , Pergamon Press, 1986
- 2) Iwasa, Y., M. Noguchi and T. Nakamura: Simulation of Urban Storm Drainage Involving River and Overland Flows, Proc. 22nd IAHR Congress & 4ICUD, Lausanne, 1987
- 3) 野口正人・米倉広幸・菅浩一：水文資料が乏しい地域における流出解析法、第29回水理講演会論文集、1985
- 4) Eagleson, P.S. : Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, 1970
- 5) 土木学会水理委員会流出現象の物理機構に関する研究小委員会：物理水文学における最近の進歩、土木学会論文集、第387号Ⅱ-8、1987
- 6) 守田優：都市流域の表層浸透特性、東京都土木技術研究所年報、1987
- 7) 安藤義久・高橋裕・和泉清・金尾健司：土地利用別浸透能特性を考慮した都市流域の洪水流出解析、第29回水理講演会論文集、1985
- 8) 野口正人・米倉広幸・森尾宣紀：強雨時における土中浸透量の評価に関する研究、第30回水理講演会論文集、1986