

丘陵地斜面における macropores と雨水浸透

岡 太 郎

RAINFALL INFILTRATION AND MACROPORES IN A HILLSIDE SLOPE

By Taro OKA

Synopsis

The presence of large continuous openings (macropores) close to the surface of the soil is very important in the process of infiltration of rainfall. The influence of macropores on infiltration is discussed on the basis of both field infiltration tests and theoretical studies.

The results of infiltration tests using artificial rainfall equipment and of soil surveys in the slope of Tanida research basin, disclosed that the final infiltration rate is too large for the prevailing soil character and that a large number of cracks and holes has been formed in the soil layer by the shrinking of the clay layer and rotting of roots.

Based on these observations, a simulation model for predicting infiltration into soil with macropores is developed. In this model, the flow in macropores and the clay soil is calculated using Richards equation and iterative Galerkin-type finite element method. The calculated results agree well with the infiltration curves obtained from field tests.

1. ま え が き

自然丘陵地斜面における雨水浸透現象は洪水流出のみならず斜面崩壊などと密接に関係しており、その解明は水害対策上きわめて重要である。しかし、雨水浸透は、地質・土質・植生及び土壌水分の消長などと複雑に関係しており、その機構は十分解明されているとはいえない。われわれはこれまで京都市周辺の丘陵地斜面において浸透能試験を行うとともに不飽和浸透流理論に基づいて土壌水流動の一・二次元解析を行い基礎的な検討を行ってきた^{1,2)}。これまでの浸透能試験と現地調査の結果より、自然丘陵地斜面の浸透能は現地の土壌特性から判断して過大な値を示し、またそれが土壌中に存在する大間隙に起因する現象であるということを明らかにしている。しかし、大間隙の規模とその分布及びそれへの雨水浸入機構については、定性的な議論しか行っておらず、不明な点を多く残している。

本研究では、自然丘陵地斜面において新たに浸透能試験を実施するとともに、地層の間隙調査・土壌物理試験を行い雨水浸透現象の実態を明らかにすることを試みた。加えて、これらの現地調査結果に基づいて、土層中に大間隙がある場合の雨水浸透解析モデルについて基礎的な検討を行った。

2. 調査流域の概要

調査対象流域は京都市西部の谷田川試験流域である。Fig. 1 に示されるように、谷田川流域は西芳寺(苔寺)の南 500 m にあり、水位計設置地点までの流域面積は 0.45 km² である。なお、谷田川は洛西幹線利用水路、寺戸川、西羽東師川を経て桂川に注いでいる。

この流域の植生は、一部に落葉樹が見られるが、ほとんどが竹林である。この竹林は昭和45年頃までは、竹の子生産のため手入れが施されてきたが、その後宅地開発のため買収され、手は加えられていない。

地質はボーリング調査資料が得られていないので判断としないが、隣接の下狩川流域の地質と大差ないものとする、古生層・丹波層群に属し、砂岩・頁岩の薄層を含んでいるものとみなせる³⁾。なお、古生層は崖錐性堆積物・河床堆積物で被覆されている。

3. 浸透能試験

3.1 浸透能試験装置と試験法

浸透能試験法としては、いくつかの方法が提案されているが、なるべく自然に近い状態で試験を行いたいと考え、Fig. 2 に示す人工降雨形式の装置を用いた。試験装置と方法については文献(4)に詳しく述べてあるので、ここでは省略する。

3.2 試験結果

浸透能試験は Fig. 1 のA地点で、斜面長 1.2 m (水平距離 1.06 m)、幅 0.315 m、勾配 0.52 の小区画について行った。この地点は竹林中にあり、試験区の表面には竹の枯葉と腐食土が薄く (1-2 cm) 堆積していた。

1984年12月に実施した浸透能試験結果を Fig. 3 に示す。同図より、浸透量は、降雨開始後急速に減少して、短時間に一定値に漸近しているのがわかる。この値は試験区内の土壌が粘土系であることを考慮すると過大であるといわざるを得ない。この原因を明らかにするために、試験終了後、枯葉層を除去したところ根腐れによると思われる大孔隙を見出した。これらの結果より、地表面に到達した雨水の大部分がこの大孔隙に浸入し、大孔隙が浸透能を過大にする要因になっているものと考えられる。

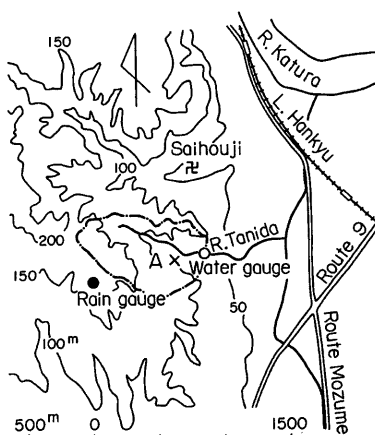


Fig. 1 Physiographical map of Tanida research basin.

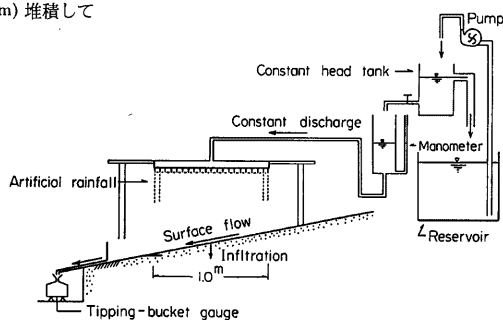


Fig. 2 Schematic illustration of the infiltration test equipment.

4. 土壌間隙調査と土壌物理試験

4.1 Macropores⁵⁾ の調査

(1) 土壌間隙の分類

土壌中に存在する間隙の分類とその名称については、多くの土壌物理学者によって議論されている⁶⁾が、統一の見解が得られるには至っていない。ここでは、土壌中の間隙を、土粒子の接触に基づく土壌固有の間隙 (matrix pores) と小動物・根腐れ・亀裂・侵食等によって形成される大間隙 (macropores) とに大別する⁷⁾。また大間隙を、目視観測によってその形状・分布が測定可能な coarse-macropores と目視観測では計測が不可能な fine-macropores とに分類する。なお、直径による区分については議論があるが、ここではとりあえず直径 5 mm 以上を coarse-macropores、それ以下を fine-macropores と呼ぶことにする。

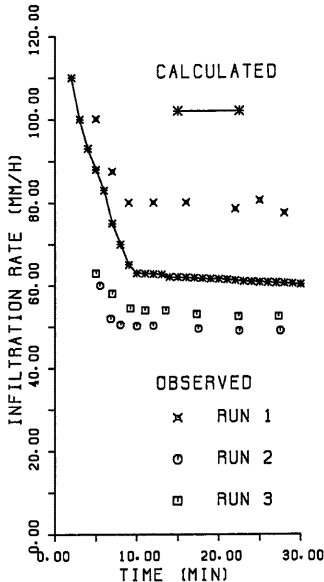


Fig. 3 Infiltration rates measured at plot A in Fig. 1.

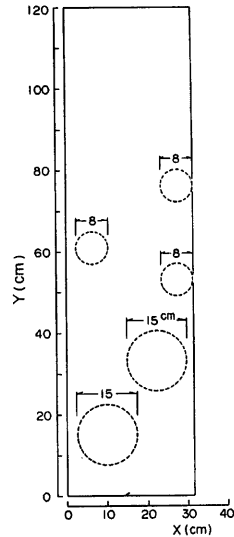


Fig. 4 The horizontal distribution of coarse-macropores in the infiltration test plot.

(2) Coarse-macropores の調査

(a) 調査法

Macropores の調査法には、色素・石膏注入法⁸⁾、RI 法、特殊な方法として CT 法⁹⁾ (Computed Tomography) などがある。本調査においても、はじめ色素注入法と RI を用いる一種の非破壊試験法により macropores の分布を測定しようとした。しかし、地表面には枯葉・腐食土が堆積しており、それらを取り除く際に土壌構造が破壊されるため、色素の注入は思うようには進まず良い結果は得られなかった。一方、一片 30 cm の土塊を採取し、これをスライスすることを試みたが、根・地下茎が複雑に交差しており、それらを切断する際に土塊がくずれるなどの障害が生じ、非破壊試験により macropores の分布を測定するまでには至っていない。このように自然丘陵地での macropores の調査には多くの難問が残されており、これらは今後の課題である。

そこで、本調査では次のような目視観測により、coarse-macropores の水平・鉛直分布を測定することにした。水平分布は、まず地表面に堆積している枯葉層と腐食土を丁寧に除去した後、地表面に透明なプラスチック板を置き、coarse-macropores の位置と大きさをトレースして測定した。また、鉛直分布は、スコップで穴を掘り、その壁面の macropores をスケッチして測定した。

(b) 調査結果

(i) 水平分布：浸透能試験終了後、試験区内で測定した結果を Fig. 4 に示す。同図には直径が約 8 cm 以上の大孔隙しか示されていないが、それ以下の孔隙は枯葉層を除去する際、地表面が乱されたため測定することができなかった。なお、これらの大孔隙は主として竹の根腐れによるものであり、全部が枯葉もしくは腐食土で充填されていた。このように、大孔隙が異物で詰った状態にある場合には、これを macropores と呼ぶことは適当でないかもしれない。しかし、ここでは形成時には空洞であったものと判断して、macropores

に含めることにする。

この浸透能試験区の大孔隙は、試験前に予想していたものより規模が大きく、特殊な場合であるとも考えられたので、大孔隙の分布を更に明らかにするために、試験区の周辺で同様な調査を行った。Fig. 5(a) に浸透能試験区周辺について得られた coarse-macropores の水平分布を示してある。この場合には、腐食土などが詰っていない新しい穴も含まれているが、その深さは 180 cm に及ぶものも見られた。また、これらの coarse-macropores の面積比は測定場所・領域の大きさによっても異なるが、10-20%であった。

(ii) 鉛直分布：浸透能試験区及びその周辺で、測定を試みたが、土壤断面を取り出すのが水平分布の測定の場合より困難であり、なかなか良い結果が得られなかった。いくつかの試みより、Fig. 5(b) に鉛直分布の測定結果を例示する。同図に示すように、大孔隙は鉛直断面に口を開けている場合も認められ、macropores は三次元的に分布していた。なお、これらの大孔隙の多くは腐食土で充滿していた。

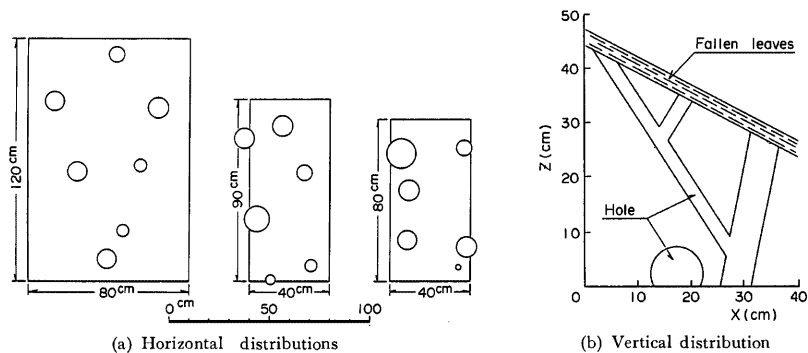


Fig. 5 Distributions of coarse-macropores.

(3) Fine-macropores の調査

(a) 調査方法

自然丘陵地斜面において fine-macropores の分布・大きさを測定することは容易ではない。ここでは、次のように、大きさの異なるサンプラーを用いて間隙率を測定し、それらの差より fine-macropores を巨視的に表すことを試みた。

まず、目視観測によって macropores の認められない土壤に内径 4.3 cm、深さ 5 cm の小サンプラーを打込み採土して、間隙率を測定する。この間隙率は matrix pores のみによって構成されているとみなす。

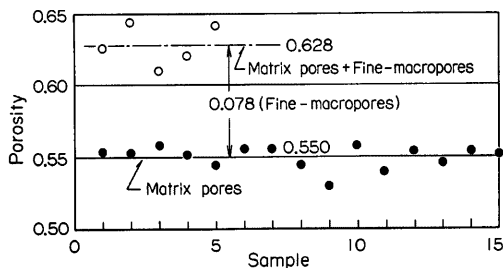


Fig. 6 Porosities measured in Tanida research basin.

次に、coarse-macropores が存在しない直径 30 cm、深さ 20 cm の領域より採土して、間隙率を測定する。当然、この領域の土壤中には fine-macropores が含まれる。なお、現地で間隙率を測定するためには、体積測定が不可欠であるが、ここでは試料を掘り出した部分に単位体積重量が既知な砂を充填し、その重量から試料の体積を算出する砂置換法（突き砂法）を用いて測定した。

(b) 調査結果

Fig. 6 にこのようにして得た間隙率の測定結果を示してある。小サンプラーによって得られた間隙率は 0.550, 大領域の間隙率は 0.628 であった。両者の差より, fine-macropores は全体積の 7.8% ということになる。

4.2 土壌物理試験

(1) 比重試験と粒度分析

浸透能試験区付近の表層土について比重試験を行ったところ, この土壌の比重は 2.666 であることがわかった。

また, 6.78 mm のふるいで, 礫と植物の根等を除去したのち, 6.78-0.074 mm の範囲についてふるいわけ試験を行った。その結果より, この土壌の構成は礫 19%, 砂 37%, 及びシルト・粘土 44% であり, 粒度分布による土の分類では粘土ロームもしくは砂質粘土ロームに属するといえる。

(2) 土壌水分特性曲線の測定

未攪乱土壌の土壌水分特性曲線を得ることが望ましいが, 不攪乱状態の土壌を採取することは容易ではない。ここでは, 間隙率を自然に近づけるように充填して, 土柱法により測定した。**Fig. 7** に間隙率が 0.54 の試料について得た土壌水分特性曲線を示す。

(3) 不飽和透水係数の測定

不飽和透水係数の測定法にはいくつかの方法が提案されているが, ここでは浸潤法により土壌水分拡散係数を測定したのち **Fig. 7** の土壌水分特性曲線を用いて不飽和透水係数を求めた。実験は多数行ったがその中より間隙率が 0.54-0.55 の範囲にある実験結果を **Fig. 7** に示す。なお, **Fig. 7** は間隙率より判断して, matrix-pores のみの土壌の特性を表しているものとみなすことができる。

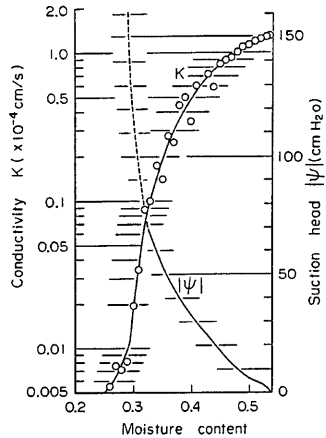


Fig. 7 Soil moisture characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivities of the surface soil in Tanida research basin.

5. 雨水浸透の解析

5.1 Fine-macropores を有する土壌への雨水浸透解析

(1) 解析モデルと基礎方程式

(a) 解析モデル

現地調査より, 谷田川流域の表層土には体積比で 7.8% の fine-macropores が存在することが明らかになった。しかし, これらの分布・形状は未定であるので, ここでは, **Fig. 8(a, b)** に示すように深さ 5 cm, 幅 1 mm の亀裂が 1.5 cm 間隔で平行・交互に分布していると仮定する。また fine-macropores 中の流れを厳密な形で取扱うことは困難であるので, これを不飽和流とみなし周辺土壌と一体として解析することにする。

このようにモデル化を行った場合 fine-macropores の土壌水分特性曲線と不飽和透水係数を既知とする必要があるが, ここでは次のようにして推定した。まず, fine-macropores 中の雨水流を直径 1 mm の毛細管の粘性流とみなし, 飽和透水係数を Hagen-Poiseuille の法則により誘導される (1) 式を用いて求める。

$$K_{sat} = \frac{\rho g r^2}{8 \mu} \dots \dots \dots (1)$$

また, 毛管上昇高を (2) 式を用いて計算する。

$$h_t = 2\sigma \cos \alpha / \rho g r \dots \dots \dots (2)$$

ここで, K_{sat} : 飽和透水係数, μ : 粘性係数, h_t : 毛管上昇高 ($r = 0.5 \text{ mm}$ のとき $h_t = 2.98 \text{ cm}$), σ : 表面

張力 (73.05 dynes/cm, 18°C), α : 接触角 ($\alpha=0$)。

次に, fine-macropores の土壌水分特性曲線と不飽和透水係数を(3), (4)式を用いて近似する¹⁰⁾。

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_0 - \theta_r} = \left[\frac{a}{a + c(-\psi)^b} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{K}{K_{sat}} = \left[\frac{a}{a + c(-\psi)^b} \right]^N \dots\dots\dots (4)$$

ここで, $a=30.0$, $b=2.0$, $c=0.01$, $\theta_0=1.0$, $\theta_r=0.0$, $N=2$, $K_{sat}=27.8$ cm/s を採用した。

(b) 基礎方程式

このモデルでは fine-macropores と土壌中の雨水流動を区別せずに解析するが, この場合の基礎式として Richards の式(5)を用いる。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, ψ : 圧力, 飽和領域では $\psi > 0$, 不飽和領域では $\psi < 0$, $K(\theta)$: 透水係数, x : 水平座標, z : 上向き
の鉛直座標, t : 時間, $c(\psi)$: 比水分容量。

(2) 解析条件と計算法

(a) 解析領域と要素分割

解析領域を, 浸透流の対称性を考慮して Fig. 8(a) の AA 断面に取り, 深さ 12 cm の範囲とした。なお, 地表面には厚さ 1 cm の枯葉層が堆積しているものとして解析

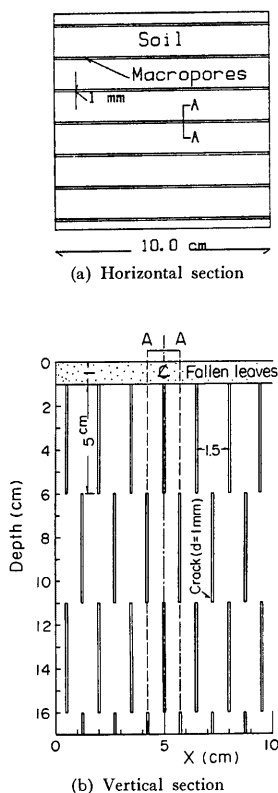


Fig. 8 The distribution model of fine-macropore.

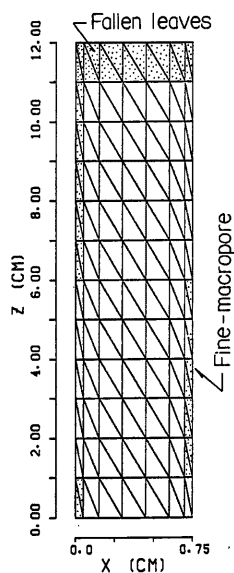


Fig. 9 Finite element methes used to calculate the soil water movement in fine-macropores and soil.

を進めた。Fig. 9 に、解析に用いた解析領域と要素分割を示してある。この場合の要素数は168, 節点数は104であった。

(b) 境界条件

(i) 地表面：地表面では、降雨もしくは蒸発量が与えられるので、(6)式が成立する。

$$q_z = -R \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 q_z ：地表面よりの流入量、 R ：正のとき降雨量、負のとき蒸発量、しかし、降雨時には地表面が飽和状態に達すると(7)式となる。

$$\psi = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

(ii) その他の境界：不透面や対称面などでは、それらを横切る流れは存在しないので、(8)式が成立する。

$$q_\eta = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 η ：境界面の法線成分。

(c) 初期条件

初期条件としては各節点に圧力水頭値を与える。

(d) 計算法

(5)式を重み付き残差法のうちガラーキン法を用いて離散化し、繰返し計算を行って精度を確保しつつ、時間ステップを進める計算法を用いた¹¹⁾。なお、本計算では、時間増分 $\Delta t = 0.001$ sec, 打ち切り誤差 $\epsilon = 0.0001$ とした。

(3) 計算結果

Fine-macropores の土壌水分特性曲線と不飽和透水係数には(3)、(4)式で計算される値を用い、土壌の係数には Fig. 7, また枯葉堆積層の係数には Fig. 13 の ψ_s , K_s を用いて解析を進めた。初期条件 $\psi = -100$ cm H₂O, 降雨条件 $R = 100$ mm/hr について得た $t = 10$ sec, 20 sec の流速ベクトルと圧力分布を Fig. 10

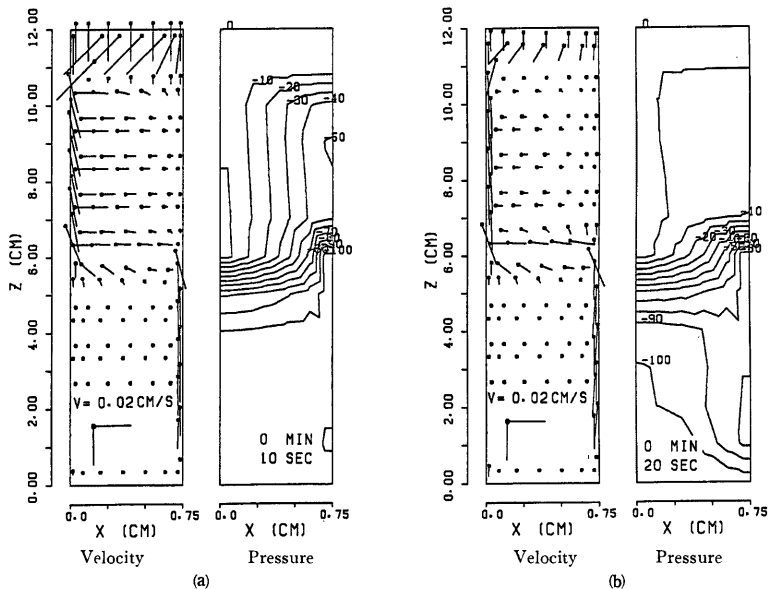


Fig. 10 Velocity vector and pressure head in fine-macropores and soil.

に例示する。なお、Fig. 10 の流速は、 $V_x = V_z > 0.02 \text{ cm/sec}$ 以上を $V_x = V_z = 0.02 \text{ cm/sec}$ として表示してある。この計算では、最上部の fine-macropores の底部が 9 sec に飽和し、17 sec に全体が充満した。

Fig. 10 より、地表面に到達した雨水は、枯葉層を通過したのち、左側の亀裂に浸入し、高速度で降下する、また亀裂より周辺土壌への浸透も活発であることが認められる。これは亀裂の下部が雨水で充満し、亀裂壁に正の圧力が作用したためである。

また、20 sec 後には、地表面より深さ 6 cm の領域がほぼ飽和状態に達し流速は小さくなっているが、2 段目の亀裂への雨水の流入は盛んであり、雨水が亀裂—土壌—亀裂という経路を通過して降下している様子がよくわかる。このように fine-macropores は雨水浸透を速める効果を有するといえる。

(4) 一次元解析結果との比較

ここで提示した解析モデルは fine-macropores を含む土壌の雨水浸透をかなりうまく表すことができる。しかし、この解析法は計算量が膨大であり、計算コストより必ずしも実用的であるとは言えない。そこで、ここでは不飽和透水係数を変更して一次元解析を行い二次元モデルによる解析結果の近似と、解析の簡単化の可能性について検討する。

Fig. 11 に二次元解析結果を x 方向に平均して得た土壌水分分布 (F. Macropores) 及び Fig. 7 の不飽和透水係数を 1 倍 (K), 5 倍 ($K \times 5$), 10 倍 ($K \times 10$) して行った一次元解析結果を示す。これらは降雨開始 10 秒後の土壌水分分布である。まず、2 次元解析結果 (F. Macropores) と Fig. 7 の係数を用いて行った計算結果 (K) を比較すると、fine-macropores を考慮した解析では wetting front は 6 cm に達しており、見かけ上の雨水浸透速度はかなり大きい、一次元解析では雨水浸透速度は小さく、wetting front は 2 cm に達しているに過ぎない。このように両者には大差が認められる。

次に、不飽和透数係数を変更して行った 1 次元解析結果について見ると、 $K \times 5$ の場合の、wetting front は 4 cm, $K \times 10$ の場合には 5 cm に達している。また、 $K \times 10$ の土壌水分分布は 2 次元解析結果をかなり良く近似している。これらより、不飽和透水係数を 1 桁程度大きく見積ることにより一次元解析でもかなり良い近似解が得られるということがわかる。

5.2 Coarse-macropores を有する土壌への雨水浸透解析

(1) 解析モデル

自然丘陵地斜面では fine-macropores と coarse-macropores が混在しているので、両者を考慮して雨水浸透を解析することが望まれる。しかし、fine-macropores を含む土壌への雨水浸透は Fig. 9 に示されるように微細な場で解析されねばならない。一方、coarse-macropores を含む場はかなり大きい。したがって、要素分割を例に取って考えてみても、fine- と coarse-macropores を同じ場で取扱うことはきわめて困難であるといえる。

ここではこれまでの検討結果を考慮して、fine-macropores を含む土壌をその不飽和透水係数を 5~10 倍に取るとともに一様・均一であるとみなし単純化する。次に、coarse-macropores は、パイプ状に存在し、その分布は三次元的であるが、これを面積比が等しくなるように配置するとともに、二次元的に取扱う。なお、coarse-macropores は空洞の場合もあるが、ここでは枯葉堆積層と同質の腐食土で満たされているものとみなす。

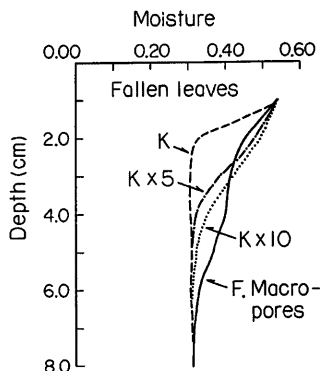


Fig. 11 Comparisons of soil moisture distributions calculated by the two dimensional finite element model (F. Macropores) and one-dimensional models (K, $K \times 5$, $K \times 10$).

このように丘陵地斜面を枯葉堆積層—coarse-macropores—土壌系として単純化するとともに、これらを透水係数の異なる不均質な透水層と考え、雨水流動を Richards 式を適用して解析する。

(2) 解析条件

(a) 解析領域と要素分割

Fig. 5(b) の分布を参考にして、モデル化した解析領域を **Fig. 12** に示す。この解析領域では、枯葉堆積層の下に三本の coarse-macropores が存在し、その面積比（水平）は10%である。また、**Fig. 12** に解析に用いた要素分割を併示してある。なお、この場合の要素数は171、節点数は105であった。

(b) 土壌水分特性曲線と不飽和透水係数

計算に用いた枯葉堆積層の土壌水分特性曲線と不飽和透水係数を **Fig. 13** ($|\psi_a|$, K_a) に示す。これらの曲線は城陽市青谷の砂質土で測定されたものであるが¹²⁾、透水係数より判断して腐食土の係数と大きくは異なっていないと考えている。

Fine-macropores を含む土壌の透水係数については、当初 **Fig. 7** に示す曲線を10倍したものをを用いたが浸透能が過大に計算されたので最終的には5倍したものをを用いた (**Fig. 13** (K_b))。なお、fine-macropores は土壌水分特性曲線には大きく影響しないものと考え変更していない (**Fig. 13** $|\psi_b|$)。

(c) 境界・初期条件

境界条件は前述の fine-macropores の場合と同じである。ただ、今回は地表面が傾斜しているので、枯葉堆積層の下端を浸潤面として取扱った。初期条件としては、解析領域の全節点に吸引圧—100 cm H_2O を与えた。

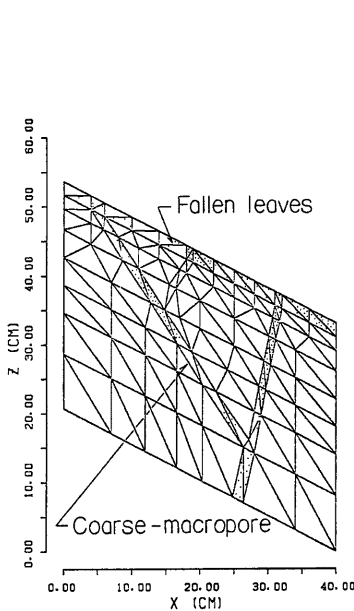


Fig. 12 Finite element methes used to calculate the soil water movement in the coarse-macropores and soil.

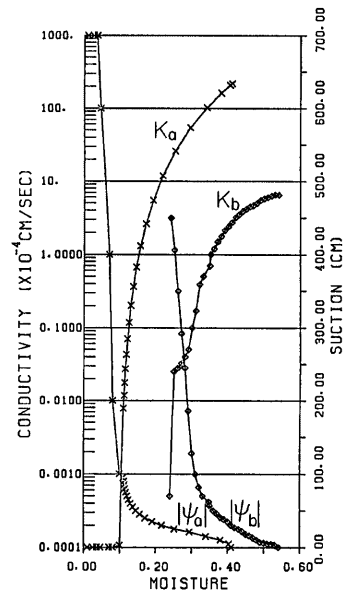


Fig. 13 Soil moisture characteristic curves and unsaturated hydraulic conductivities used in the coarse-macropores and soil model.

(3) 計算結果

降雨強度 100 mm/hr, 時間増分 10 sec, 打ち切り誤差 0.0001 として行った計算結果より降雨開始 5 分, 10 分後の流速ベクトル・圧力分布を Fig. 14(a, b) に示す。また, Fig. 3 には, 計算結果より得られた浸透能曲線を併示してある。

Fig. 14 の流速分布について見ると, 地表面に到達した雨水は, 枯葉層を下流方向に浸透するが, coarse-macropore の上部ではそれに向かって流入し, また枯葉層の下では, coarse-macropores 中を高速で降下するとともに, その壁面より土壤中に浸透しているのが明らかになる。

Fig. 3 より, 計算結果は浸透能試験結果をかなり良く再現しているのが認められる。また, 浸透能の低減は降雨初期は急であるが, それ以後は緩やかになっている。これは, 10 分ごろに coarse-macropores への雨水浸入速度がほぼ一定となり, その後は土壤中への浸透量が緩やかに減少するためである。

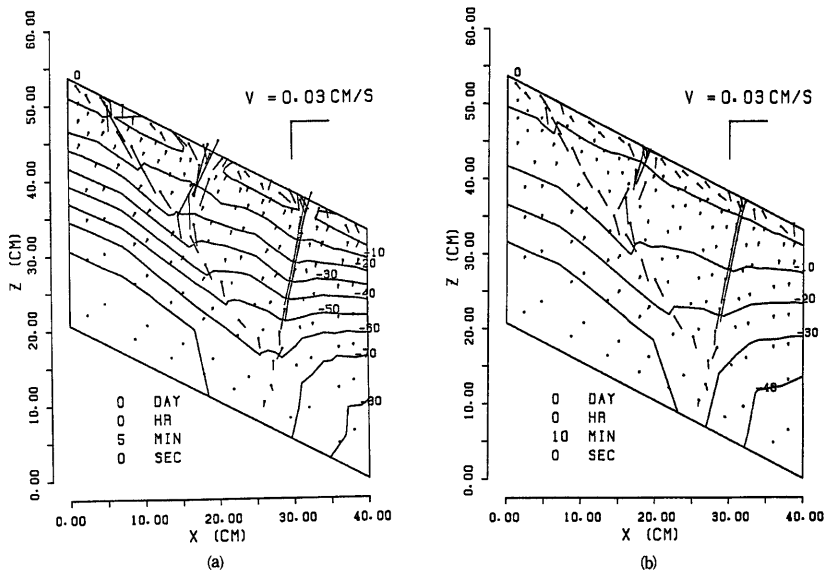


Fig. 14 Velocity vector and pressure head in coarse-macropores and soil.

6. あとがき

自然丘陵地斜面の雨水浸透機構を明らかにするため, 浸透能試験・土壌調査・土壌物理実験及び雨水浸透解析を実施した。自然丘陵地の土壌形態はきわめて複雑であり, 今後に残された問題点は少なくないが, 自然斜面の雨水浸透メカニズムがかなり明らかになったと考えている。ここで得られた結果をまとめると次のようである。

- (i) 自然丘陵地の雨水浸透能は土壌特性より判断して, 過大な値を示す。
- (ii) 自然丘陵地には土壌固有の間隙 (matrix pores) の他に根腐れ・亀裂・小動物などによって形成される大間隙 (macropores) が存在する。ここでは, この macropores を fine- と coarse-macropores に分類して取扱ったが, 谷田川流域では, fine-macropores は全体積の 7.8%, coarse-macropores は表面積の 10~20% に達

するところもある。

(iii) Fine-macropores がある土壌への雨水浸透解析モデルを提示した。その解析結果より、雨水の多くは fine-macropores (鉛直)―土壌 (水平)―fine-macropores (鉛直) という経路を通して流れ、全体的にみると雨水浸透は fine-macropores によって高速化される。

(iv) Fine-macropores のある土壌の雨水浸透は、不飽和透水係数を 5～10 倍に取ることににより、一次元解析でかなり近似することができる。

(v) Coarse-macropores がある斜面では、地表面に到達した雨水の大部分は coarse-macropores に流入し、高速度で降下する。その際、coarse-macropores の壁面より土壌中に浸透するが、これらにより斜面中の土壌水分流動速度が速められる。

(vi) Coarse-macropores を考慮した雨水浸透の計算結果は、現地で得られた浸透能曲線をかなり良く再現した。したがって、ここで提示した丘陵地斜面の雨水浸透解析法は有用であると言える。

最後に、数値計算には、京都大学大型計算機センター FACOM M-382, 化学研究所 FACOM M-380Q を使用したこと、本研究は昭和 59・60 年度文部省科学研究費一般研究 (A) による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 岡 太郎・角屋 睦：丘陵地斜面域における雨水の浸入・流出過程，京大防災研年報，第18号 B，1975，pp. 469-482.
- 2) 岡 太郎：自然丘陵地における土壌水流動一観測と解析一，京大防災研年報，第26号 B-2，1983，pp. 213-224.
- 3) 西部都市開発株式会社・サンコーコンサルタント株式会社：洛西グリーンハイツ弾性波探査・地質調査報告書，1980.
- 4) 岡 太郎・角屋 睦・野口美具：宅地域の雨水浸透と流出特性，京大防災研年報，第23号 B-2，1980，pp. 227-238.
- 5) Beven, K. and P. Germann : Macropores and Water Flow in Soils, Water Resources Research, Vol. 18, No. 5, 1982, pp. 1311-1325.
- 6) 例えば, Luxmoore, R. J : Micro-, Meso-, and Macroporosity of Soil, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 45, 1981, pp. 671-672.
- 7) Skopp, J : Comment on "Micro-, Meso-, and Macroporosity of Soil, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 45, 1981, pp. 1246.
- 8) Bouma, J., C. F. M. Belmans, and L. W. Dekker : Water Infiltration and Redistribution in a Silt Loam Subsoil with Vertical Worm Channels, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 46, 1982, pp. 917-921.
- 9) Petrovic, A. M., J. E. Siebert, and P. E. Rieke : Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 46, 1982, pp. 445-450.
- 10) Pikul, M. F., R. L. Street and I. Remson : A Numerical Method Based on Coupled One-Dimensional Richards and Boussinesq Equations, Water Resources Research, Vol. 10, No. 2, 1974, pp. 295-302.
- 11) 例えば, Neumann, S. P : Saturated-Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc. of ASCE. Vol. 99, HY 12, 1973, pp. 2233-2250.
- 12) 岡 太郎・野口美具：不飽和浸透流の拡散係数と透水係数の測定，水理講演会論文集，No. 24，1980，pp. 363-368.