

斜面モデル内の水みち形成に関する基礎的研究

Fundamental study on some properties of soil pipe formed in idealized slope

埼玉大学 工学部 正 会 員 渡 辺 邦 夫

“ “ 学生会員 今井 久

は じ め に

從來から流出現象には、表土層内に形成される“パイプ”など透水係数の大きな特定の水みちが、重要な役割りを果していると考えられている。^{1), 2)} 水みちは、野外で一般的に観察することができる。たとえば、山地・丘陵で表土や崖錐の下部から局所的に地下水が浸み出し、その部分がかずれ、穴があいている状態になっていることがよくみられる。したがって、斜面内には多かれ少なかれ地下水の流れ易い部分があり、それが降雨流出に多大な影響を与えていると考えることができる。最近でも、この水みちに注目した研究は多くたとえば新藤ら³⁾は、野外にみられるパイプからの流出量変化を詳細に測定し、そういった水みちが降雨流出特性に大きく寄与していることを報告している。また、Barcelo ら⁴⁾は、室内実験と準3次元解析とによって、パイプが存在する場での流出特性を調べている。こういった研究があるものの、水みちの流出に与える影響についてはまだわかっていないことが多い。さらに、水みちがどのような形状を持ち、どのように形成されるかについては、まだ可能性の指摘にとどまっている現状である。そのため、今後降雨流出現象をより物理的に把えてゆくためには、水みちの影響とその形成や形状についてより詳しく調べておく必要がある。性質を調べるにあたって、斜面内流れは飽和 — 不飽和両状態にわたっていることと、水みちが局所的であり、流れの3次元性が強くなることを十分考慮しておくことが重要である。

今回の研究は、以上の問題点をふまえ、モデル的な斜面内の3次元数値解析と室内実験によって、水みちの地下水流れに与える影響とその形成について基礎的な検討を加えたものである。

1 3次元数値解析による水みちの影響評価

1-1 考え方と解析モデル

水みち形成を考えるため、まず基礎となる、水みちがある場合の地下水流れの特徴を調べた。このため、局所的に透水係数の大きい部分を持つモデル的な斜面を想定し、その中の飽和 — 不飽和状態の流れを有限要素法を用いて 3 次元的に解析した。解析に用いた基礎式は Richards, Klute ら^{5), 6)} の考えに基づくものであり、透水異方性がない場合以下で示される。

$$C(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_s(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial v} (k_s(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial v}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_s(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z}) + q \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C(\theta)$ は比水分容量、 θ は飽和度、 ϕ はポテンシャルであり位置水頭 z と圧力水頭 ψ の和である。 $k_s(\theta)$ は不飽和透水係数、また q は水の発生・消滅率である。解析は、(1)式をガラーキン法により、20節点を持つ6面体アイソパラメトリック要素を用いて行った。

解析に用いた斜面モデルを図-1に示す。斜面は下方急勾配になることを仮定しており、不透水性岩盤の上に表土が重なっていることを想定している。図中

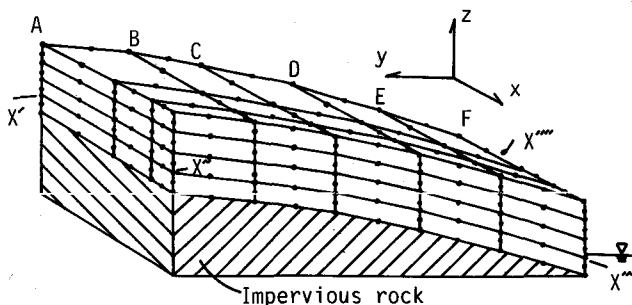


図-1 斜面モデルと要素分割 (60 要素 406 節点)

あわせて要素分割，計算節点の配置を示す。全体で 60 要素 406 節点である。座標軸を図に示すようにとり，以下， y 軸に直交する解析断面を斜面上部より A, B, C, D, E, F 面とする。また，図中 X' , X'' , X''' , X'''' を結ぶ面，つまり最下部要素上面により作られる面を X 面と表記する。これらの面は，計算結果を表示する時に適宜用いられる。

斜面モデルの $x-z$, $y-z$ 平面内にみられる要素分割状態を図-2(a), (b) にそれぞれ示す。斜面の y 方向長さは 250 cm である。これは実際の斜面に比べて短い，地下水流れの特性を調べることはできよう。

各要素の y , z 方向の大きさはそれぞれ 50 cm, 10 cm で一定である。 x 方向については図に示すように，60 cm, 30 cm, 15 cm と要素によって異っている。

つぎに斜面内各要素の透水係数を変え，水みちを設定する。今回設定した水みちパターンは図-3 に示す 3 種類であり，それらを P-1, P-2

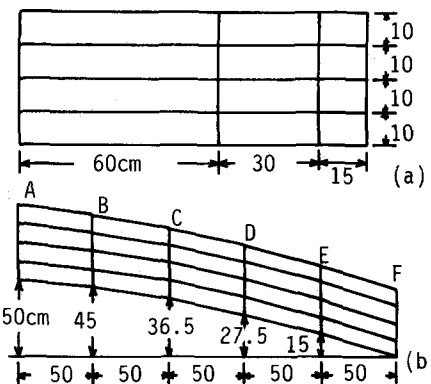


図-2 要素の 2 次元形状

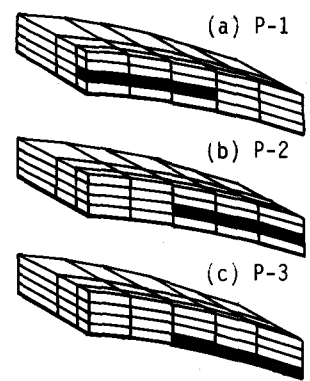


図-3 水みちパターン

P-3 と書く。P-1 は

斜面上部より斜面途中まで水みちがある場合で，P-2, P-3 は斜面途中より下部まで水みちが分布する場合である。P-1, P-2 は，水みちが下から 2 番目の要素としているが，P-3 では不透水性岩盤上にあるとしている。いずれの場合も水みち部要素の x 方向大きさは最小のものである。したがって，A ~ F 断面のいずれか 4 断面内に水みちがみられ，各断面面積の $1/28$ を水みち部が占めることとなる。

飽和 — 不飽和浸透流解析を行う場合，飽和度 θ と毛管圧力水頭 C_h , θ と不飽和透水係数 k_s の飽和透水係数 k_0 に対する比 k_s/k_0 の関係（これらを以下透水関数と表記する）を与える必要がある。これについて，今回図-4 のように仮定した。とくに $\theta \sim k_s/k_0$ については，図中示すように，P-A, P-B の 2 種類の関係考えた。実際の計算においては，飽和度約 45% 以上の領域を対象とするようにした。その領域においては，与えた透水関数は，妥当と考えた。

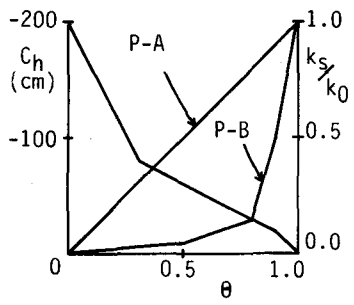


図-4 仮定した透水関数

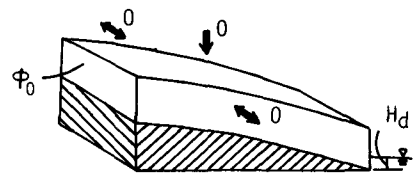


図-5 設定した境界条件

計算境界条件を図-5 に示す。

まず斜面モデル下流側 F 断面内に H_d の一定水位を与え，それを 12 cm とした。F 断面上の，水位より上部は浸出面の条件を与えた。これは，断面上節点の飽和度が 100 % となった時，圧力水頭 ϕ を 0 とおくものである⁷⁾。降雨と流出との関係を見るため

表-1 計算条件

計算ケース	水みち形状	透水関数	透水係数	
			水みち	地 山
Run-1	-	P-A	-	$5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
Run-2	P-1	P-A	$5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$	*
Run-3	P-2	P-A	*	*
Run-4	P-2	P-B	*	*
Run-5	P-3	P-A	*	*

には、上方から降雨浸透量を与えねばならない。しかし今回とくに水みちの、斜面内地下水流れに対する影響を調べることもあって、降雨0と考え、斜面最上部A断面上に一定ポテンシャル ϕ_0 を設定し、流れの状態をみた。 ϕ_0 としては40cmに設定した。つぎに初期条件である。今回は流れのない状態、つまり計算領域内ポテンシャルが H_d で一定に設定した。したがって、計算は流れのない状態から境界ポテンシャル ϕ_0 が与えられその後の非定常地下水流れを調べることになる。

今回報告する計算ケースを表-1に示す。計算ケースはRun-1～Run-5までの5ケースである。このうちRun-1は水みちのない条件、つまり各要素の飽和透水係数が一定としたものである。他はすべて水みちの存在を仮定している。表中、水みち位置と透水関数パターンは図-3、図-4に示したものである。なお、水みち部の飽和透水係数は他の部分の10倍であるものと仮定した。

1-2 計算結果と考察

図-6は、Run-1～Run-5までの流出流量の非定常変化を5時間半まで調べたものである。Run-1,-2,-3,-5はほぼ定常に達していると考えられるが、Run-4ではまだ流量が増加している。Run-4では、透水関数として図-3中のP-Bを用いているため、飽和度の低下に対して不飽和透水係数の低下が大きく、そのため、全体的に水の流れが遅くなり、非定常時間が長くなったものと考えられる。流量の増加が最も大きく定常的な流量が最大となるのは、水みちを不透水性岩盤直上に想定したRun-5である。ほぼ定常時である5時間半後の流量は水みちがない場合の約6割増となっている。一般に、下方ほど飽和度が高く、透水係数も大きくなる。そのため、下方に水みちがある場合の方が、流出流量は大きくなると考えられる。Run-1,-2,-3を比較すると、水みちのないRun-1の初期の流出量増加が、Run-2,-3に比べて遅くなる。これは当然予想されるものである。Run-2とRun-3を比べると、斜面上部に水みちのあるRun-2の方が、定常時流量が約2割大きくなっている。しかし全体的にみて、Run-1, Run-2, Run-3はよく似た流出量の非定常変化を示している。したがって、この程度の大きさの水みちがあっても、全体の流出量とその非定常変化にはあまり大きく影響しないといえる。

図-7は、ほぼ定常となる5時間半後の、図-1に示したX面内のy方向流速 $|v_y|$ の分布をRun-2, Run-3について示したものである。いずれの場合も水みち部の流速が他の部分に比べてかなり大きいことがわか

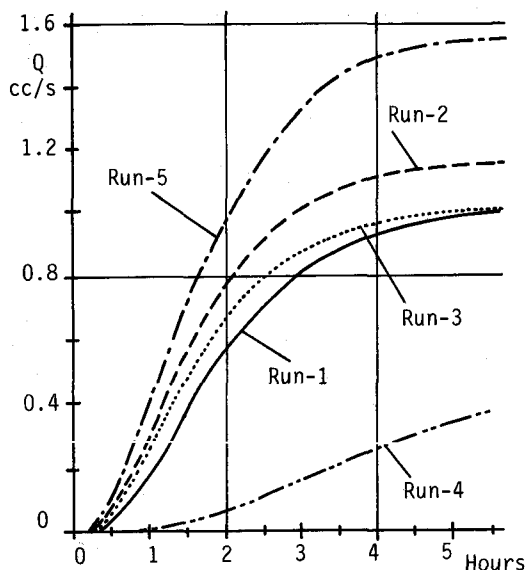


図-6 各ケースの流量の非定常変化

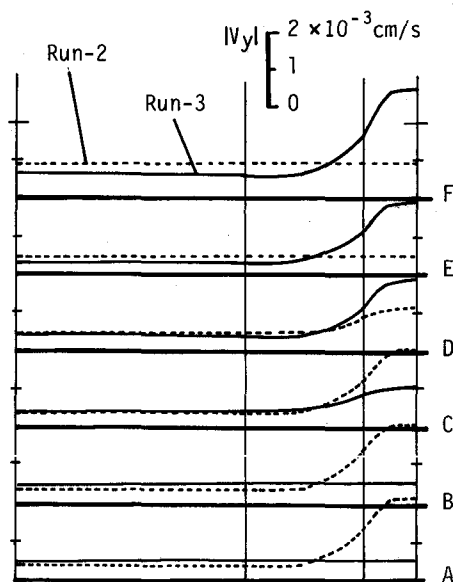


図-7 X面内のy方向流速分布(5時間半後)

る。A～F各断面とX面との交線上でみると、この流速差はほぼ透水係数の差に近い。しかし各々のケース共に、水みちの端面から上下方向に外れた部分（たとえばRun-2のE、F面とX面の交線上）ではほぼ様な流速分布となり、上、下方に水みちのある影響はほとんど認められないことがわかる。このことから、野外において、たまたま観測面付近に水みちがあった場合には水みちが認識しうるものの、観測面から離れていた場合には、水みちの発見が大変難しいことがわかる。通常水みちは斜面下部に認められるが、たとえ斜面途中にあったとしても発見が

大変難しいわけである。また観測される水みち部と他の部分との流出量差は、流出面近傍のみの透水係数差を強く反映したものである可能性が強いといえる。つまり、長く連続した水みちがなくともかなり大きな場所的流出量差が生じるわけである。

つぎに図-8は、Run-2、Run-3においてそれぞれB、C、D、E面内の5時間半後のポテンシャル分布を示したものである。各図共、等ポテンシャル線の間隔は0.2 cmに設定してある。図-8から、各ケース共に水みち端面付近（Run-2のD断面、Run-3のC断面）で強い同心円状のポテンシャル分布を示す。しかし他の断面では、水平方向のポテンシャル変化は、水みちがある断面（Run-2のB、C Run-3のD、E）においても小さい。したがって、これら断面に垂直方向のy方向流速 $|v_y|$ の場所的な差は、図-7に示されるようにほぼ透水係数の差に等しくなるわけである。

図-9はRun-2、Run-3において5時間半後の、D断面内飽和度分布を示したものである。図から、Run-2の飽和度がRun-3よりかなり高いことが認められる。これは、Run-2の方が、斜面上方から伸びた水みちにより、多くの水分が運ばれ易いことを示している。

以上示したように、3次元飽和—不飽和浸透流解析により、モデル的な斜面内の水みちの影響がかなり良く把握しえた。3次元解析は、従来よく行なわれている2次元解析に比べて、水みちのような局所的に透水係数の変った部分を持つ流れに対しては大変秀れているといえる。

つぎの問題は、今回設定したような、透水係数の大きい水みち部がどのように形成されるかである。この点について、室内実験により基礎的に検討することを試みた。

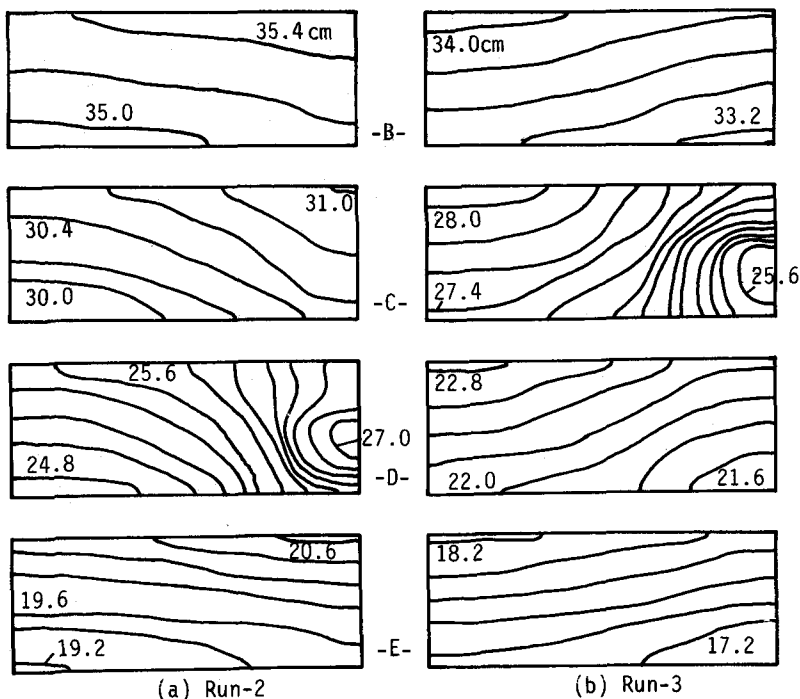


図-8 Run-2、Run-3における5時間半後のポテンシャル分布

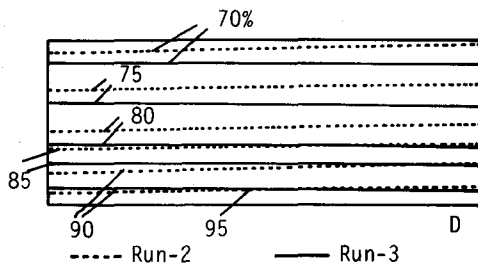


図-9 Run-2、Run-3における5時間半後のD断面内飽和度分布

2 室内実験

2-1 考え方と実験装置

水みちの形成については、大別すれば外的、内的2種類の要因が考えられてきた。^{1),2)} 外的要因としては、土中の木根系、小動物の巣穴などがあげられている。一方、内的要因とは、長時間地下水が流れることにより局所的に土質が変化することである。具体的には、局所的な細粒物質の洗い流しや、目づまりの場所的な不均質性などが考えられる。今回は内的要因に注目し、斜面モデルを製作して長期流出実験を行ったものである。用いた実験装置の概略図を図-10に示す。実験装置は図に示すように、基本的には傾斜した土槽より成る。土槽上方に一定水位 H_u を与え、下方に浸出面を通じて流出させる。土槽の上下は金網（目間隔は約0.55mm）がはられ、水や細粒物質は自由に通過する。また場所的な流出量の経時変化を調べるため、図に示すように、斜面下方に23個の流出口を設け、各流出口の流量 Q_i を測定する。局所的な透水係数の変化が生ずれば Q_i の分布に変化が起ることが期待され、その変化により逆に、透水性の分布を考える。今回特に、どの程度の変化が生ずるかを基礎的に調べることに主目的をおいた。

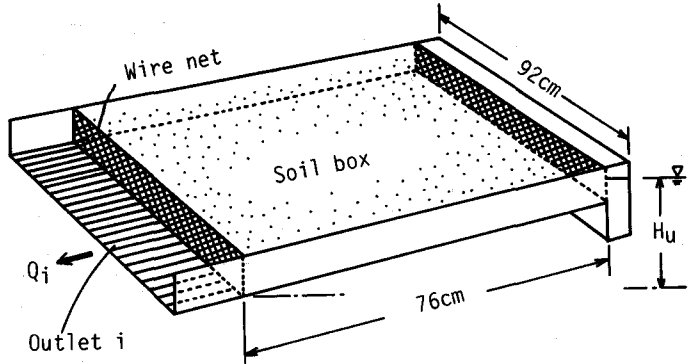


図-10 実験装置概略図

2-2 実験条件と実験結果

まず実験に用いた材料について説明する。実験に用いた材料は、川砂、ろか砂、微粉末セリサイトである。セリサイトは風化花崗岩中などに一般的にみられる粘土鉱物である。川砂の粒径分布を図-11に示す。ろか砂は2種類あり、平均径0.42mm（以下細ろか砂と記す）と1.7mm（粗ろか砂と記す）である。これらを用いて種々の表土層状態をつくった。今回報告する代表的な3ケースの実験条件を表-2に示す。まずExp-1は、川砂を約9cmの厚さにつめたもので、図-10の水位 H_u としては20cmに設定した。Exp-2は、約5cmの厚さの粗ろか砂層の上に、約3cmのセリサイト層を載せた2層モデルである。これは長期浸透中に、上方より細粒物が供給される条件を考えてものである。 H_u は13.8cmとした。一方、Exp-3は、細ろか砂とセリサイトを重量比10:1で混合した材料をつめたものであり、粒径の大きい砂粒子の間に細粒の粘土鉱物が充填している状態を考えている。 H_u は、11cmに設定した。なお、表中示すように、Exp-2、Exp-3については、途中供給する水の中にセリサイト粘土を混入した。これは急速な目づまりの効果を調べることを目的としたものである。

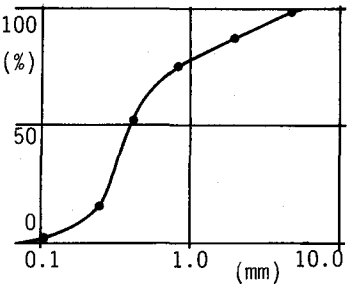


図-11 川砂の粒径加積曲線

つぎに、実験結果を示す。まず図-12は総流出量の経時変化をみたものである。Exp-1については、目づまりによる急速な流量低下を示し、約100時間後から一定流量となった。

表-2 実験条件

実験条件	モデル	地 層	H_u (cm)	特 徴
Exp-1	単層モデル	川砂	20.0	
Exp-2	2層モデル	粗ろか砂、セリサイト	13.8	セリサイト投入
Exp-3	単層モデル	細ろか砂、セリサイト 混合比10:1	11.0	セリサイト投入

Exp-2では、

やはり約20時間までは急速に目づまりによる流量減少がみられ、その後はほぼ一定

流量となった。

しかし図中の

矢印で示すセリサイト投入後、再び目づまりの進行がみられた。一方、Exp-3では、図中破線で示す時点までは、ろか砂の間のセリサイトの洗い流しによると思われる流量の増加が認められた。その後、目づまりによる流量の低下が認められ、セリサイト投入後はその傾向が加速された。このように、セリサイトである程度充填されたろか層においても、目づまりによると思われる流量の減少が認められた。

しかし、その程度は、Exp-1，2に比べて小さいといえる。

図-13はExp-1,2,3における各流出口流量 Q_i の分布の経時変化をみたものである。各流出口流量 Q_i の平均流量 $\bar{Q}$ に対する比である。ただし Q_i は測定流量そのものではなく、隣り合う3個の流出量の移動平均値であり、以下の式で定義される。

$$Q_i = (Q_{i-1} + Q_i + Q_{i+1}) / 3 \quad (2)$$

移動平均をとった理由は、流出口に接続する土槽最下端の影響を少なくし、平均的に流量分布を調べるためである。

まず、図-13(a)のExp-1の結果をみてみる。実線で示される浸透開始後0.5時間後においては、各流出口流量 Q_i の平均流量 $\bar{Q}$ に対する比がほぼ1.0であり、かなり様な流れであることを示している。時間が経過するにつれ、9～13番目の流出口流量比が増加し、2.0程度の値になることがわかる。このことは土槽内に透水係数の不均一性が生じたことを示している。この結果と、図-12に示されたExp-1の総流量変化とをあわせて考えると、その透水性の不均質性は、目づまり過程によって形成されたことが推定される。

つぎに、図-13(b)はExp-2の結果である。(a)と同様、浸透開始後3時間ではほぼ様な流量分布を示

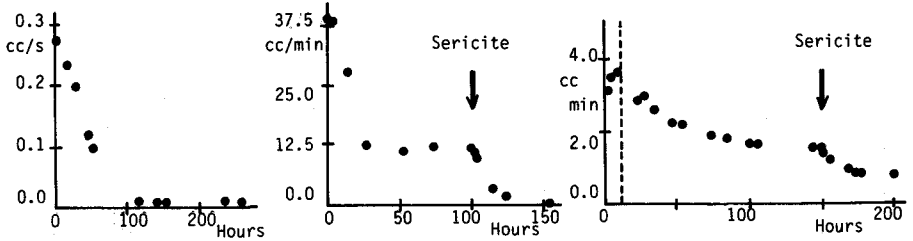


図-12 総流量の経時変化 (図中矢印はセリサイト投入時点を示す)

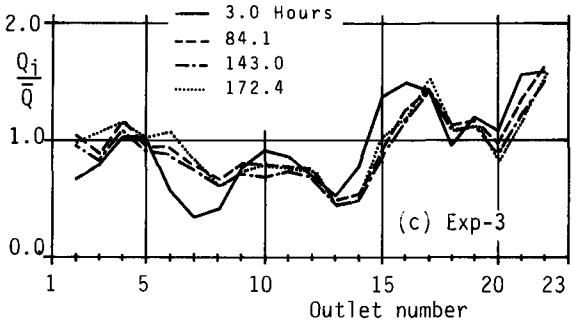
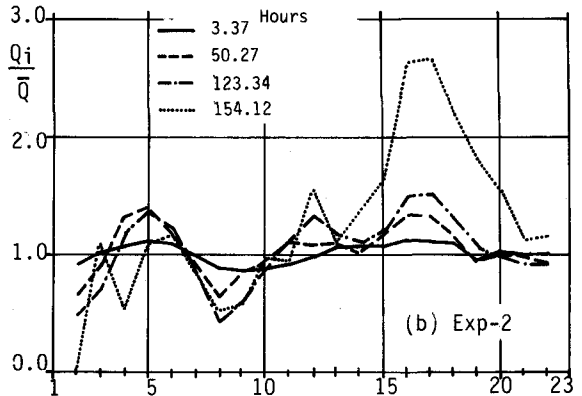
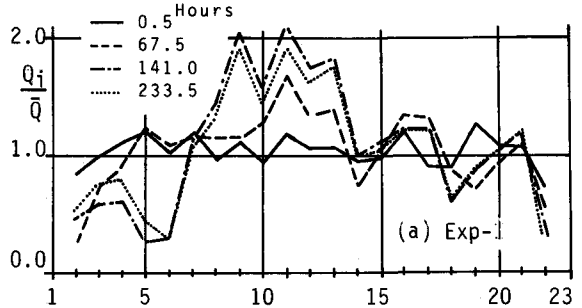


図-13 各流出口流量の経時変化 (Q_i は隣り合う3個の流出口流量の移動平均値)

している。しかし時間の経過と共にいくつかの流出口からの流量比が増えている。これは、図-12 (b) とあわせて考えると、目づまりの進行に対応している。とくに、セリサイト投入後の 204.4 時間では、流出口 17, 18 の流量比が 2.7 程度に達している。Exp-1, 2 の結果から、目づまりの進行がモデル内の透水性の不均質を増大させたといえるわけである。

一方、図-13 (c) の Exp-3 の結果はやや異った傾向を示している。まず、浸透開始後約 3 時間ですでに場所的な流量比の違いがみられている。時間が経過しても初期の流量比分布からあまり変化はみられない。この傾向は、セリサイト投入後も同様である。Exp-3 では、浸透の継続時間が 172 時間程度とやや短かく、断定的に結論を述べることは難しいが、初期に細粒物で充填された地層においては、透水性の不均一性の発達が悪く思われる。

以上示したように、今回の実験では目づまりが、場所的な透水性の不均一性を増加させる一つの要因であることが認められた。数値計算の結果、場所的な流出量の差は斜面下部の透水性状にかなり影響されることが明らかとなっており、今回の結果がすぐに一般的な、水みちの形成につながるものではない。しかし、目づまりという内的な要因によっても、場所的な透水性状の差が助成される傾向は確かといえよう。

3 結論と今後の問題

今回、まず 3 次元有限要素法を用いて斜面モデル中の水みちの地下水流れに与える影響を調べた。つぎに室内実験によって水みち形成につながると思われる透水性の場所的な不均一性の発達状態を調べた。数値計算の結果、地下水流れに与える透水関数の影響、水みちの存在場所による影響がある程度評価できた。とくに野外でみられるような場所的な流出量差は、観察場所付近の透水性の不均一性に強く影響され、必ずしも斜面下方に長く伸びたような水みちを考えなくとも説明しうることを明らかにした。つぎに、室内実験によって、斜面中の透水性の不均一性が目づまりによって形成・発達する傾向を指摘した。しかしながら、今回の研究は、斜面モデルについてのみ行われたものであり、今後、野外実測との対応が必要であろう。また、今回の実験では、地層内の細粒物の洗い流しによる水みち形成は観察されなかったが、このメカニズムについても検討してゆく必要がある。今後こういった点についてさらに研究をすすめ、斜面内の水みち形成とそれが降雨流出に与える影響についてより深く調べてゆくつもりである。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、いろいろと御教示、御支援いただいた東京大学教授玉井信行先生に心より感謝いたします。また、野外で観察される実際の水みちの性質について御教示いただいたダイヤコンタクト 株式会社 吉田亘弘氏に心よりお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Jones, A., Soil piping and stream channel initiation, Water Resour. Res., vol. 7, pp. 602-610, 1971.
- 2) Kirkby, M. J., Whipkey, R. Z., Flow within the soil, Hill slope hydrology, John Wiley, pp. 121-144, 1978.
- 3) 新藤静夫, 谷頭部斜面に発達する崩壊と地中水の挙動, 文部省科学研究費報告, pp. 1-93, 1983.
- 4) Barcelo, M. D., Nieber, J. L., Simulation of the hydrology of natural pipes in soil profile, Paper No. 81-2028, A. S. A. E. pp. 1-23, 1981.
- 5) Bear, J., Hydraulics of Groundwater Flow, McGraw-Hill, pp. 190-224, 1979.
- 6) 八幡敏雄, 土壌の物理, 東京大学出版会, pp. 86-108, 1975.
- 7) Akai, K., Ohnishi, Y., Finite element analysis of three dimensional flows in saturated-unsaturated soils, 3 Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, pp. 157-169, 1979.