

II-32 斜面流出の素過程に関する実験的研究

北海道大学 工学部 正 員 山田 正
北海道開発局 開発土木研究所 正 員 許士 達広
北海道開発局 開発土木研究所 正 員 村上 泰啓
北海道大学 工学部 学生員 岩崎 福久

1 緒言

水文学の分野では、従来数多くの流出モデルが提案され、観測データとの適用性について研究がなされてきた。しかし、降雨流出に関しては、未だ充分に明らかにされていないのが現状である。この様な観点から本研究は流出の素過程を明らかにする目的で、斜面流出実験を行い、さらに、幾つかの物理モデルについてその適用性を比較、検討したものである。

2 斜面流出実験

2. 1 実験の概要

実験装置の概要を図2-1に示す。斜面長は5m、斜面幅は0.3mでありその上部に模擬降雨の発生装置を取り付けている。斜面を構成する土質材料は、細砂、粗砂の2通りであり、その土質諸元は表2-1に示されている。人為的に変え得る実験条件は、土層厚、斜面勾配、降雨強度、下流端での境界条件の以上の5つである。実験条件の諸元は表2-2に示されている。実験の手順は、1)土層厚、斜面勾配を設定し、斜面上の降雨装置を調整し降雨強度を決定する。2)流量測定は、下流端において、メスシリンダー、および転倒ます式雨量計で計測している。3)細砂の場合のRUN6-1～8-2までは、下流端において薄い板により、浸透流、表面流の分離を行い、それぞれ流量を計測した。さらに、流出成分の分離のために塩水およびフミン質（紫外部吸光度E260）の抽出実験を行っている。4)下流端の境界条件が、流出ハイドログラフに与える影響を検討するために、a)下流端に用いた砂よりも粗いフィルターを設置した場合、b)砂とフィルター間に小ダムを置き、あらかじめ地下水面を設ける場合の2通りの境界条件を設定した。5)浸透流の流線を確認するために、過マンガン酸カリウム（赤色）を実験前に埋め込み、その流跡線を側面（透明アクリル板）を通して写真撮影している。

2. 2 実験の結果

図2-2～図2-12は、細砂、粗砂のハイエト・ハイドログラフを示したものである。図中の縦軸は流出高(mm/hr)であり、流出量を、斜面の水平投影面積で除して表す。また、これらの図より得られた諸元を表2-2に示す。トレーサー実験の結果は、E260、塩水濃度とハイドログラフと合わせて示してある(図2-13、図2-14)。また、地下水面のある場合の実験結果は、図2-15に示されている。浸透流の流線の可視化実験を撮影した写真をPh-1～Ph-3に示す。

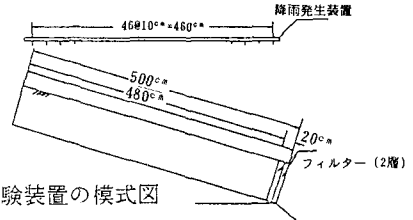


図2-1 実験装置の模式図

表2-1 砂の土質諸元

種類	透水係数 (cm/sec)	間隙率	D50 mm	Uc
細砂	0.125	0.30	0.14	1.5
粗砂	0.00333	0.34	0.74	1.7

表2-2 実験条件（地下水面無し）

Run	砂種	土層厚	勾配	降雨強度 mm/hr	降雨継続時間
1-1				10.27	
-2	粗砂	20cm	1/10	20.95	180 min
-3				53.69	
2-1				10.49	
-2	粗砂	20cm	5	21.52	180 min
-3				54.68	
3-1				10.67	
-2	粗砂	40cm	1/10	19.14	300 min
-3				47.97	
4-1				10.53	
-2	粗砂	40cm	1/5	19.27	300 min
-3				49.89	
5-1	細砂	20cm	1/10	9.88	90 min
-2				20.18	
6-1	細砂	20cm	1/5	9.29	210 min
-2				19.03	180
7-1	細砂	40cm	1/10	10.79	90 min
-2				19.44	
8-1	細砂	40cm	1/5	10.62	270 min
-2				20.86	180

表2-3 側方流についての流量の諸元

Run	実験値 cm ³ /min	計算値 cm ³ /min	透水係数 (計算値) cm/sec
6-1	100	23.98	0.01389
-2	89		0.01236
7-1	150	23.98	0.02083
-2	160		0.02222
8-1	183	47.95	0.01271
-2	180		0.01250

On the Characteristics of the Unsaturated Flow in a Laboratory-slope

by. Tadashi YAMADA, Tatsuhiro KYOSHI, Yasuhiro MURAKAMI and Yoshihisa IWASAKI

2. 3 実験結果の考察

上記の実験より以下の事が分かる。1)図2-2と図2-8より粗砂と細砂では、ハイドログラフの形状が大きく異なり、細砂では、表面流が発生する。2)図2-2～図2-7より粗砂のハイドログラフの立ち上がり部に階段状の部分が見られる。3)図2-2と図2-8より細砂の方が流出も通減も早い。4)図2-2～図2-4及び図2-7, 図2-8より降雨強度が大きくなると細砂、粗砂ともにハイドログラフの立ち上がり定常に達するまでの時間は早くなり、また細砂の場合の表面流の出現時刻も早くなる。5)図2-3, 図2-5より、勾配が大きくなると、粗砂の場合はハイドロの立ち上がり及び定常に達するまでの時間が早くなる。図2-11, 図2-12より細砂の場合は、勾配が大きくなると表面流の出現時刻は遅くなる。6)図2-3, 図2-5および図2-10, 図2-12より、土層が厚くなると、細砂、粗砂ともに、ハイドログラフの立ち上がり及び定常に達するまでの時間は遅くなり、細砂の場合は、表面流の出現時刻は遅くなる。7)図2-7と図2-15は、それぞれ最初に地下水面がある場合と無い場合である。地下水面がある場合、立ち上がりの時間は若干早くなり、さらに立ち上がり部にみられた階段状の部分がなくなる。しかし、定常に達するまでの時間は、両者とも大差はない。8)図2-14, 図2-15はトレーサーによる成分分離の結果を示している。これらの図より、ハイドログラフの立ち上がり後120分付近で、塩水濃度は急に上昇し、E260は降雨開始後から減り始め、ハイドログラフが定常に達した付近でほぼ一定値をとっていることが分かる。このことから、ハイドログラフの立ち上がり部以前に流出した水は、土が最初になら持っていた水で、古い雨水であり押し出し効果で流出してきたものと思われる。9)細砂の実験の場合、流れが定常に達したとき下流端では、全断面において飽和していると思われる。これより、浸透流がダルシー則に従っていると考え、流量は次式で表される。 $Q=B \cdot H \cdot K \cdot I$ (B:幅、H:土層厚、K:透水係数、I:動水勾配)この式より計算した流量と、実験の浸透流の定常値を、表2-3に示す。これを見ると実際の流量は、透水実験より得られた透水係数を用いた流量の4～7倍である。さらに実験の浸透流量の定常値より透水係数を求めると実際の透水係数の4～7倍でありばらついている。これらのことより、浸透流量の定常値は、表面流が生じた場合、降雨強度には関係はなく、透水係数と土層厚、斜面勾配によって決まるものと思われる。10)流れの可視化実験において、P

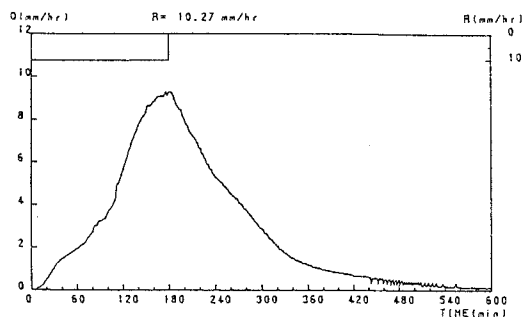


図2-2 実験のハイドログラフ Run1-1

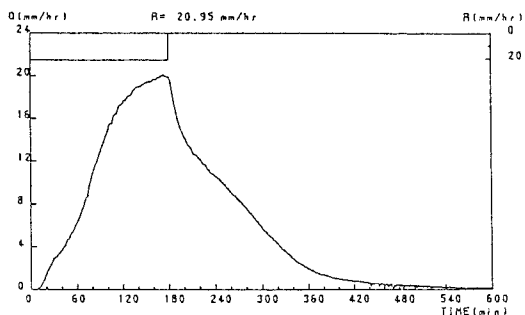


図2-3 Run1-2

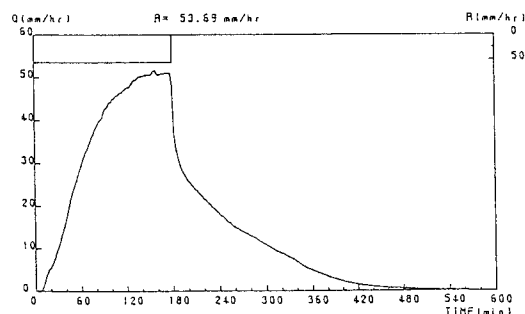


図2-4 Run1-3

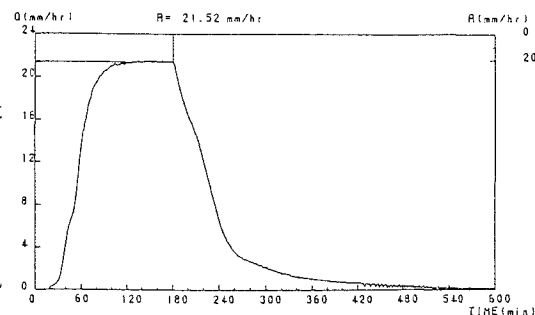


図2-5 Run2-2

h-1、Ph-2より、降雨のあるとき浸透流の流線は、斜面勾配より大きい勾配である。Ph-3より降雨が終わった後の浸透流の流線は斜面勾配とほぼ同じ勾配である。このことより、降雨があるときは、浸透流は降雨の鉛直浸透の影響を受けて、流線が下層部に集中し層の下になる程流速が早いということが分かる。またPh-3をみると、上流部で上層の浸透流の流れが早くなっているのが分かるが、これは表面流によるせん断力の影響が浸透流に及んでいるためであると思われる。

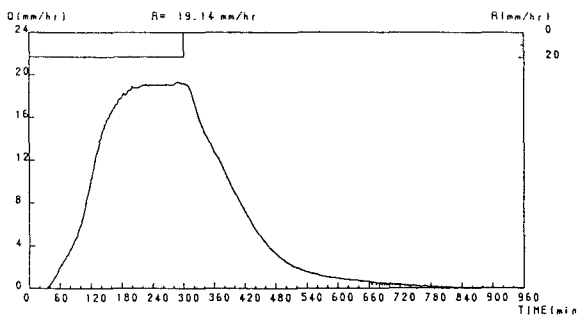


図2-6 Run3-2

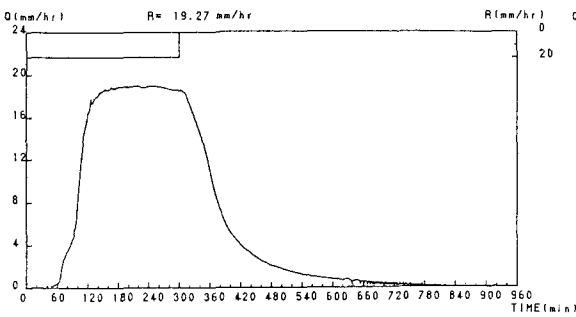


図2-7 Run4-2

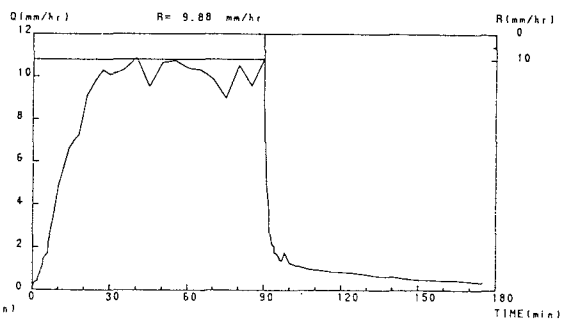


図2-8 Run5-1

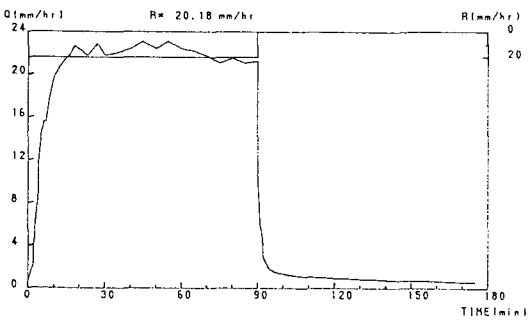


図2-9 Run5-2

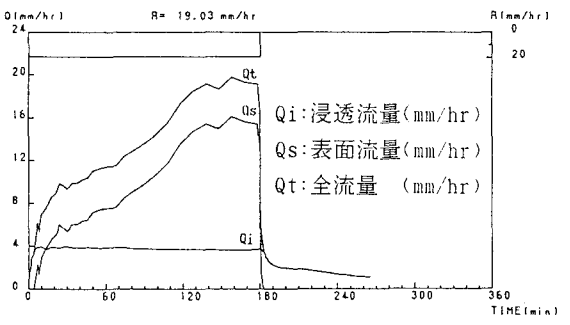


図2-10 Run6-2

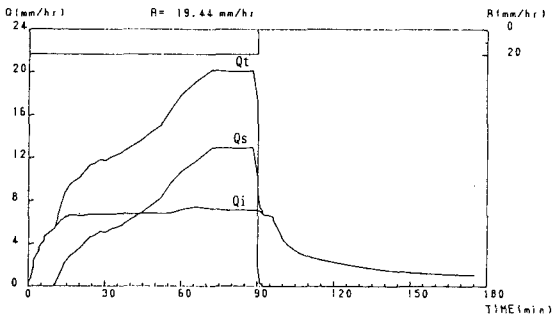


図2-11 Run7-2

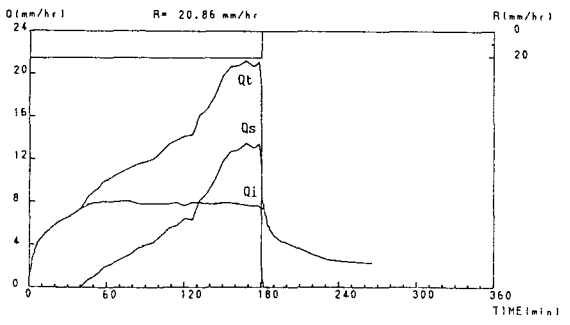


図2-12 Run8-2

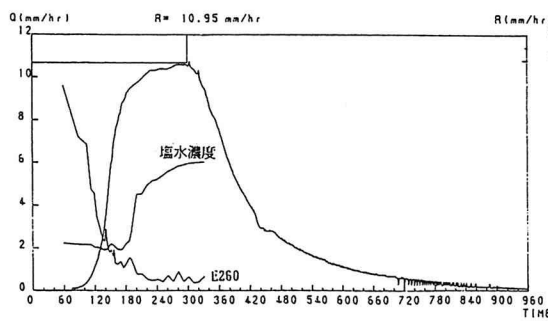


図2-13 トレーサー実験

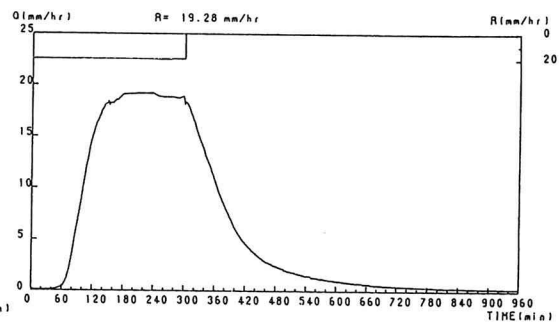
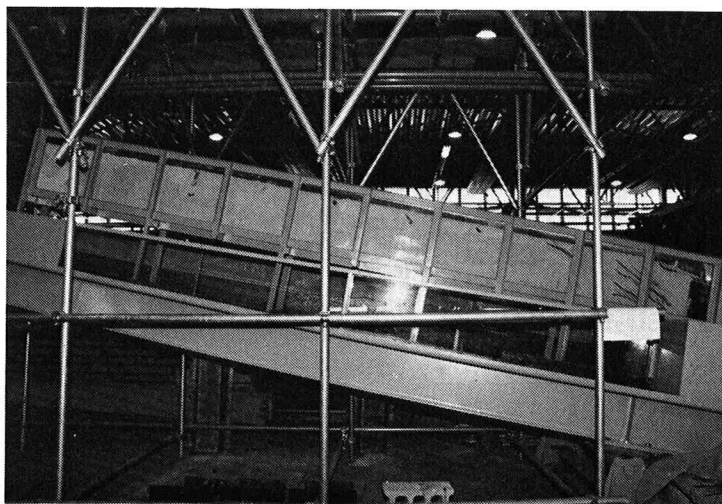
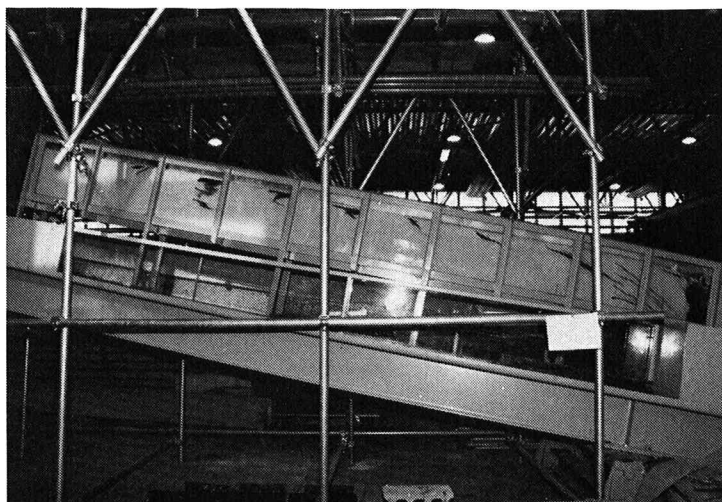


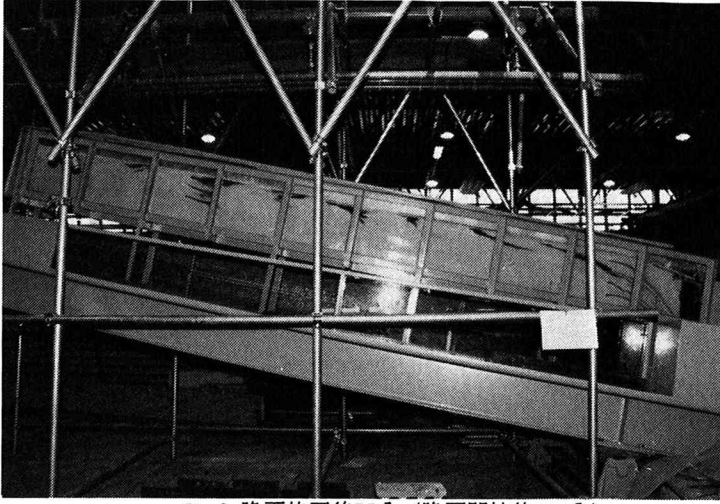
図2-14 最初に地下水面がある場合



Ph-1 降雨開始後90分



Ph-2 降雨終了前（降雨開始後180分）



Ph-3 降雨終了後75分（降雨開始後255分）

3 物理モデルと実験結果との比較

ここで用いたモデルは、1)飽和ダルシー則としての取り扱いと、2)不飽和浸透を考慮した近似式（山田（1989））である。

3-1 飽和ダルシー則に基づくKinematic Wave方程式

基礎式 斜面方向にX軸をとり、水深を鉛直方向にとると、基礎式は次式のようにになる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{Ks}{\lambda} \left\{ H \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + (\cos^2 \alpha \frac{\partial H}{\partial x} - \sin \alpha) \right\} + \frac{R}{\lambda}$$

ここでHは水深、Ksは飽和透水係数、 λ は間隙率、Rは降雨強度、 α は斜面勾配である。

想定した実験はRun2-2及びRun6-2であり、結果を図3-1, 3-2に示す。計算結果の図3-1と実験のRun2-2である図2-2を比較する。Run2-2の点線で示した部分がハイドログラフの立ち上がり部であるとして解析結果と比較すると、実験結果の方が立ち上がり部の勾配は大きく、定常に達するまでの時間も早い。次に図3-2とRun6-2の図2-10を比較する。実験では、降雨開始後すぐに立ち上がり、75分後に定常に達しているが、数値解析では立ち上がりの勾配も小さく定常にも達していないことがわかる。

3-2 不飽和浸透を考慮した近似式

基礎式は以下の様である。

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = \frac{1}{\lambda} (M+1) \beta^{\left(\frac{M}{M+1}\right)} q_*(t)^{\left(\frac{M}{M+1}\right)} \{r(t) - q_*(t)\}$$

ここで、 $q_*(t)$ は流出高、 β は斜面条件より決まる定数、Mは、定数である。

式(3-2)を基礎式として、Runge-kutta法により解析した。想定した実験は、Run2-2及びRun6-2であり、図3-3, 3-4に結果を示す。Run2-2の図2-5と図3-3を比較すると、立ち上がりから定常に達するまでの時間が解析結果の方が早く通減部の波形勾配も解析結果の方が大きい。次にRun6-2の図2-10と図3-4を比較すると、実験では立ち上がりの部分と定常に達する前に2回勾配が大きくなる部分があるのに対し、解析結果では立ち上がりの部分に1つしかない。さらに、降雨終了後の通減部の勾配が、実験では大きい解析結果は小さいことがわかる。

3-3 実験及び理論解析の比較考察

飽和ダルシーのモデルの場合は、鉛直浸透を考慮していないため、0分から立ち上がりが始まっているが、実験の場合と比較するために、実験のハイドログラフの立ち上がりと思われる部分に点線を入れてみた。こ

れで、両者を比較すると実験の方が立ち上がりが早いことがわかる。細砂では、解析結果は、実験の極めて早い立ち上がりを、再現していない。近似式においても、細砂の場合の、早い立ち上がりは、再現できなかった。粗砂においては、逆に解析結果は早い立ち上がりを、みせているが、実験では、それほど早く立ち上がっていない。実験に合わせるようにするには、透水係数を、細砂の場合は、実際の30~100倍、粗砂の場合は1/10~1/50しなければならなかった。この理由として考えられるのは、近似式では、断面内の流速を一定と考えているのに対して実際は断面内で流速分布があり、また実際には断面内で飽和度が分布しているのに式中のパラメーターの飽和度を断面平均飽和度を用いているからだと思われる。

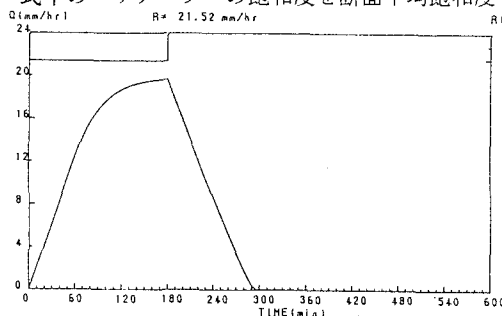


図3-1 Run2-2のシミュレーション (飽和ダルシー)

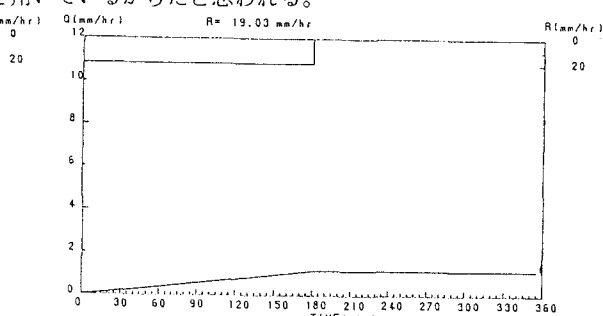


図3-2 Run6-2のシミュレーション (飽和ダルシー)

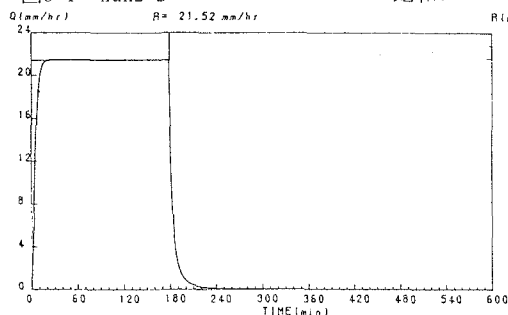


図3-3 Run2-2のシミュレーション (近似式)

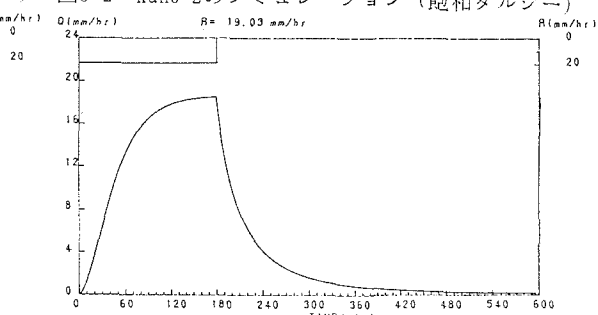


図3-4 Run6-2のシミュレーション (近似式)

4 結論

1)今まで細かい砂のほうが粗い砂よりもハイドログラフの立ち上がりが遅いと思われてきたが、実験では逆に細かい砂の方が早かった。2)さらにハイドログラフの逓減は細砂の方が粗砂よりも早いことがわかった。3)地下水面の、ある場合と、ない場合では、立ち上がり部の階段状の形状が出るか、出ないかであり、定常に達する時間には影響はないことがわかった。4)数値シミュレーションと実験結果との比較では、細砂における早い立ち上がり、および早い逓減の説明が出来ないことがわかった。

今回のシミュレーションで説明できなかった早い応答を、不飽和浸透理論で説明できないものかと現在解析を行っている。さらに、近似式における、粗度係数の評価も、行っている。

5 謝辞

本研究は重点領域研究(1)「気象解析とレーダー雨量計を補完的に組み合わせた豪雨災害の予測手法に関する研究」(代表 山田 正, 北大)の補助のもとに行われている。ここに記して感謝の意を表す。

6 参考文献

1)山田 正(1981):小流域における降雨流出機構に関する研究、東工大 博士論文、2)金丸昭治・高棹琢馬著:水文学、朝倉書店、3)日野幹男・太田猛彦・砂田恵吾・渡辺邦夫 共著:数値解析による洪水予報、森北出版、4)日野幹男・榎根 勇・尾田栄章・高山茂美・玉光弘明・塚本良則・山田 正 共訳:新しい水文学 朝倉書店。