

II-128 降雨シミュレーターを用いた流出の基礎的実験

大阪大学工学部 正員 室田 明

同上 正員 神田 徹

大阪大学大学院 学生員 佐橋 義仁

1 まえがき

従来、雨水の流出機構について幾多の研究がなされてきたが、中間流出および地下水流出に関するかぎり、数値解析においてはダレー則に従う流れが仮定され、実験的には流域の input および output のみ観測し得る現地実験状態のものであった。そのため現地観測からは地質的、地形的要因が流出に及ぼす影響を抽出することが困難である。また、一般的には、中間流出と地下水流出はハイドログラフの低減曲線によって実証的に区別されているが、そのメカニズムは未だ明らかではない。本報告は、降雨発生装置および流域モデルを製作し、降雨条件および流域の地質的、地形的条件を種々に変化させ、これらの条件下で中間流出、地下水流出に及ぼす影響を検討したものである。

2 実験装置および実験方法

実験室内に図1-(a)のごとき降雨シミュレーターを製作し、 $4\text{m} \times 4\text{m}$ の降雨域を作った。台車上部の木槽から一定の水頭で雨水パイプに給水し、4島状に分布するノズルから水を噴出し（降雨をシミュレートする（図1-(b)）。ノズルから噴出した雨水は、流域モデル上で充分均等に散っていることが確かめられた。流域モデルは長さ 2m 、幅 0.5m 、高さ 1.7m の容器に砂または土を敷きつめたものである。片面は透明アクリル製で底面は勾配可変である。上砂層は底面に平行に積み、斜面長 0.9m である。流出量は斜面下流端で降雨遮断直後から1分間隔で測定し、また土砂層内の飽和浸透水深は、底面の中心線に沿って 20cm 間隔でマンメーターで測定した。雨水を充分供給し、飽和浸透水深の時間的変動がなくなった時刻以後を定常状態とした。

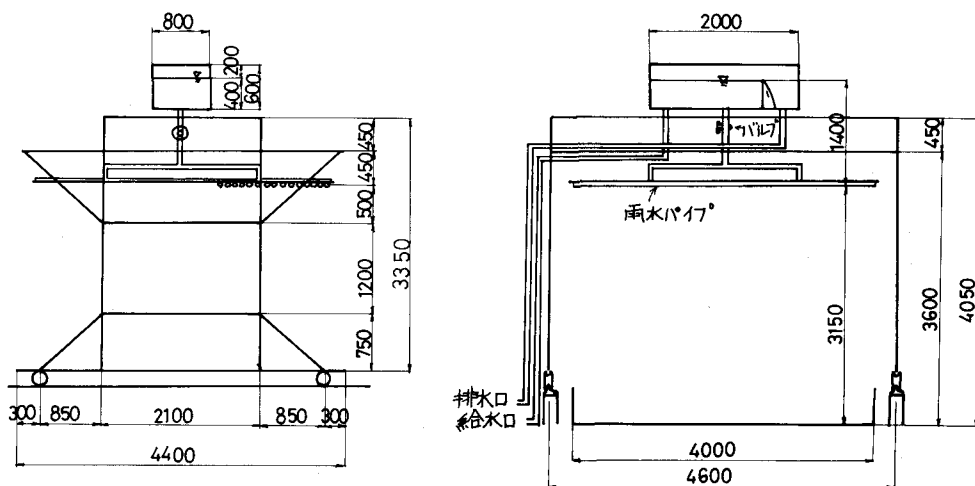


図1-(a) 降雨シミュレーター

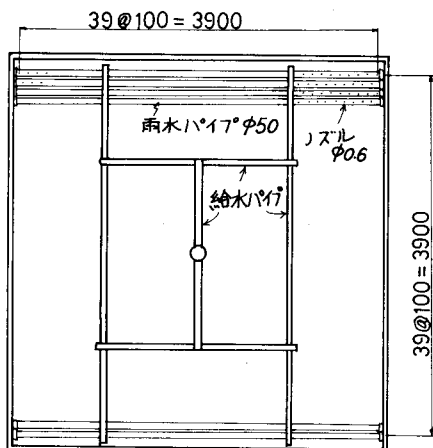


図1-(b) 雨水パイプおよびノズル

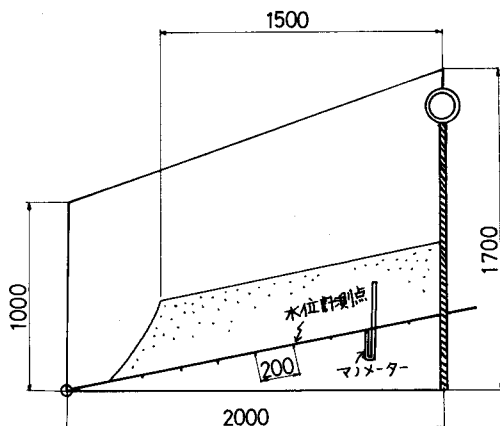


図1-(c) 流域モデル

3 実験の条件

本実験の流域構成上は $d_{50} = 0.64\text{mm}$ の砂である。流域条件および降雨条件を以下のように変化させて実験を行った。

流域条件:

ケースの底面勾配 α , 降雨強度 77 mm/hr , 各々一定の条件下で,

砂層厚 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 (cm)

ケースbの砂層厚 30 cm, 降雨強度 77 mm/hr , 各々一定の条件下で,

底面勾配 25, 5, 75, 10, 125, 15, 175, 20, 225, 25 ($\times \frac{1}{100}$)

降雨条件:

ケースcの底面勾配 α , 砂層厚 30 cm, 各々一定の条件下で,

降雨強度 77, 128, 155 (mm/hr)

4 実験結果

i) 本実験で用いた砂の透水係数 (0.259 cm/sec) は、降雨強度よりはるかに大きく、表面流出は観察されなかった。

ii) 片対数紙上にプロットしたハイドログラフ低減部は、図2のごとく2または3本の直線で折線近似できる。

iii) ケースのcに関しては、降雨遮断後30分で流出機構の特性変化を示すと思われる変曲点Pが生起する。その後砂層厚に関係なくP点以後30~40分間指数関数的に減少し、再度変曲点が生じ、低減係数のわずかに小さい次の直線になることを確認した。ii)で述べる飽和

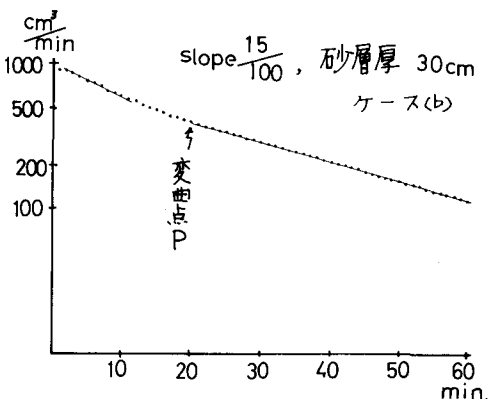


図2 ハイドログラフ低減部

浸透流が消散することを考慮し、P点以降の流出はすべてのケースで同様の流出機構をもつものと仮定し、この低減部について検討する。この低減率と砂層厚、底面勾配の関係を図3-(a)、(b)に示す。

iv) 飽和浸透流水深は、図4-(a)(b)のごとく上下流端を除きほぼ底面に平行に低減する。ケースa)に関しては、降雨遮断直後に7~8cmあったものの状況で述べた変曲点P以降は、下流側が1cm以下となり観測困難となった。それ以前に順次上流側から飽和浸透流が消散していった。このことからP点以後の直線で近似できる流出は、不飽和状態で流出しているのではないかと考えられる。またケースb)において、底面勾配の増大とともに変曲点Pの生起時刻は前方へ移動するけれども、変曲点Pの生起時刻と飽和浸透流の消散時刻はほぼ一致している。緩勾配の場合、いくぶん飽和浸透流の消散時刻の方が遅いようである。変曲点Pの生起時刻および沢の変曲点の生起時刻は、底面勾配が支配的に影響するようである。

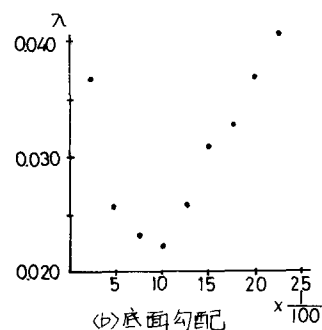
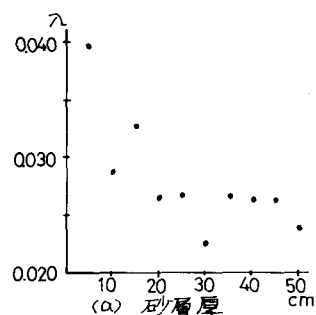


図3.ハイドログラフの低減係数

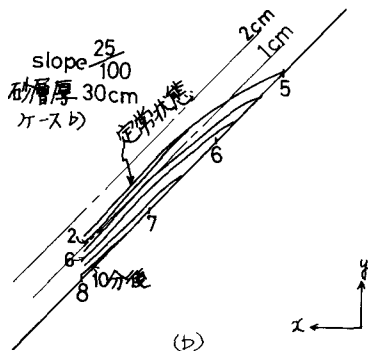
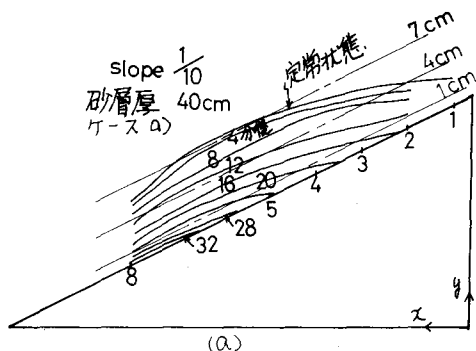


図4 降雨遮断後の砂層内浸透流水深の低減状態 (x, y 方向縮尺比: 1/5)

vi) 降雨継続中の流出に対してダルシー則の適用性を検討するため、飽和浸透流の動水勾配を用いて斜面上の各点で流出量を算出し、これを実験値と比較した。すなわち定常状態でダルシー則を仮定すれば、運動および連続方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 q &= khI & ① \\
 \frac{\partial q}{\partial x} &= r \rightarrow q = rx & ②
 \end{aligned}
 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{ここに } I: \text{動水勾配} \left(\sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ h: \text{飽和浸透流の水深} \\ r: \text{降雨強度} \\ x: \text{流域上流端からの距離} \\ \theta: \text{底面勾配} \end{array} \right.$$

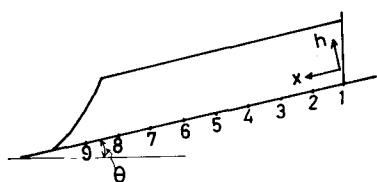


図 5

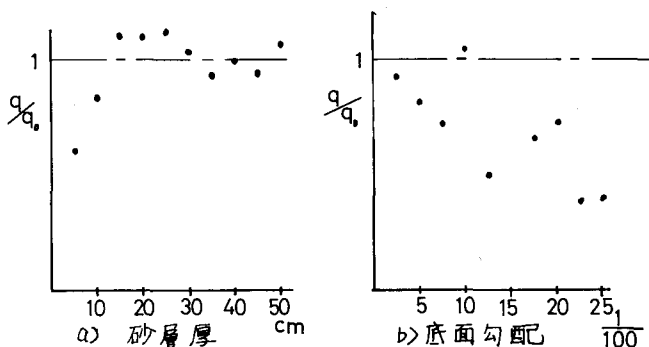


図 6 実験値と計算値との比較

②式より算出された実験値(q_0)と、実験木深りを①式に代入して得られた値(q)との比(q/q_0)は、ケースa, c)において上下流端を除き0.7~1.1の範囲にあり、ほぼダルシー則を満足する。ケースb)の急勾配の場合、上流部では飽和浸透流が現れず(図4-b),下流部では(q/q_0)は小さい値をとった。このように急勾配の場合は、ダルシー則は適用できないと思われる。緩勾配の場合、飽和浸透流水深は増大するけれども(q/q_0)は小さく、平均的な勾配(本実験では $1/10$)で(q/q_0)は1に近い値をとった。ケースa, b)の飽和浸透流水深観測点⑥における(q/q_0)を図6-a, b)に示す。

vi) 飽和浸透流が消滅した後の流出に対しては、不飽和浸透係数を導入する方法もあるが、その場合、断面積および動水勾配のとりえ方が困難である。また、変曲点Pの生起時刻以前の流出においてもこのような流出成分が存在すると仮定して、片対数紙上で直線を前方へ延長し、全流出量との差をプロットしてゆく方法も考えられる。この場合、全流出量は各流出成分の和の形で表わされる。

$$q = \sum_{i=1}^n q_{0,i} e^{-\lambda_i t} \quad n=2 \text{ or } 3 \quad (3)$$

以上の結果から、本実験における流域条件と降雨条件がハイドログラフ低減部に及ぼす影響をまとめると次の通りである。

- a) 変曲点Pの生起時刻は、砂層厚、降雨強度に関係なく勾配の増加とともに早くなる。
- b) P点以後のハイドログラフの低減係数は、降雨強度に関係なく底面勾配の増加とともに増加する。また、砂層厚の増大とともにわずかに減少するが、20~45cmの砂層厚では、ほぼ一定値をとる。

5 あとがき

今後は、降雨遮断後の非常常解析を行ってゆきたい。その中で、明確な飽和浸透流が消滅した後の流出が如何なる抵抗則に依っているかということに実験的に取り組んでゆきたい。