

神戸大学工学部 正員 神田 徹
大阪大学大学院 学生員 佐橋 義仁

1. まえがき

流出現象, 特に流域表層内を表層底部に沿って浸透するいわゆる中間流出の非定常挙動を解明するために, 筆者等は, 降雨シミュレーターを用いた実験を行い, 降雨遮断後の中間流出依減部の特性, 伝播特性等に関して考察を行ってきた。本報告では, 基礎方程式の卓越項の時間的遷移とハイドログラフ依減部の折曲点の生起との間に関係があることを示し, 折曲点の生起時刻およびその時の水深が, 流域, 降雨条件といかに関係しているかを調べるため実験を行った結果を述べる。また, 不飽和鉛直浸透および伝播にともなうハイドログラフの変形から, 表層内雨水流動の物理的メカニズムを考察する。

2. 実験装置および方法

流域モデルは高さ 50cm, 幅 20cm, 長さ 380cm の水槽に土砂を敷いたものである。流域構成土砂層は $d_{50} = 0.64\text{mm}$ ($d_e = 0.32\text{mm}$) 透水係数 0.26 cm/sec の粗砂を用い, 一層流域を設定した。降雨密度は 60 mm/hr ~ 150 mm/hr の間で行った。流出量は流域下流端で, 飽和水深はマンメーターで斜面方向 20cm 間隔で, それぞれ 2 分毎に測定した。

3. 実験ケース

1) 降雨域を全流域としたもの ($L = 380\text{cm}$)

$Tr_e > 90$, $Re = 110$, $D = 30$ で $S = 0.1, 0.125, 0.15, 0.175$

$Tr_e > 90$, $Re = 80$, $S = 0.1$ で $D = 20, 30, 40$

$D = 30$, $Re = 110$, $S = 0.1$ で $Tr_e > 90$, $Tr_e = 20, 40$

2) 降雨域を上流側半分としたもの ($L = 180\text{cm}$)

$Tr_e > 90$, $D = 30$, $S = 0.1$ で $Re = 60, 80, 110, 140, 150$ >ここに D : 砂層厚 (cm), Re : 降雨強度 (mm/hr)

$Tr_e > 90$, $Re = 80$, $S = 0.1$ で $D = 20, 25, 30, 35, 40$ S : 底面勾配, Tr_e : 降雨継続時間 (min)

図1のごとく降雨域を上流側半分とした流域モデルを使用したのは, A-B においてハイドログラフの伝播にともなう変形を観測するためであり, また流量観測点として下流端 C 点以外の A, B 点を選んだのは, 流量観測点における水深を必要としたためである。 $Tr_e = 90$ はハイドログラフの立ち上がり部が定常になる時間である。

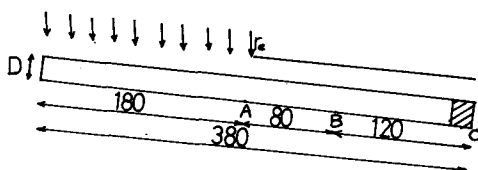


図.1 流域モデル

4. 実験結果および考察

4-1 不飽和鉛直浸透

降雨遮断後も層内に保水された雨水は, 飽和浸透流への水供給源であり, また飽和浸透流消滅後は, 不飽和流出成分として長期流出の主体となる。表層内飽和浸透流の基礎方程式は,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) + \sin \theta \frac{\partial H}{\partial z} - H \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{Re(t)}{K}$$

である。ここに, 左辺一項目: 水位の時間的変動の項, 二項目: 輸送項, 三項目: 拡散項, 右辺: 飽和浸透流への供給項。 $Re(t)$ は降雨継続中は一定であり, 降雨遮断後も長期間供給が続ける。不飽和鉛直浸透流速度が $\frac{\partial H}{\partial z}$ より大きい場合は, 上式において $Re(t) > 0$ (供給) であり, $\frac{\partial H}{\partial z}$ より小さい場合は $Re(t) < 0$ で, 不飽和保水量が増えることになる。即ち, 飽和水面が低下した部分に不飽和流出成分が残る。計算の結果, $\frac{\partial H}{\partial z}$ の大きい流域中間

点A点では、 $re(t)$ は水深消失直前まで負を続ける。即ち、A点では飽和浸透流通過後、不飽和浸透流が続くものと考えられる。下流側B点では、輸送項卓越部で $re(t)$ が負から正になり、以後不飽和流出成分の供給を受けながら流出していると考えられる。 $re(t)=0$ のときの $\frac{\partial H}{\partial x}$ がその時の水面勾配の不飽和浸透流の鉛直成分である。

4-2 ハイドログラフ低減部の折曲点

ハイドログラフ低減部は片対数表示すると数本の直線で近似でき、数個の折曲点が生じる。3-2の実験では、A点で1個、B点で2個、C点で3個の折曲点が生じた。一層モデルでこのような折曲点が生じることは、この折曲点が浸透流の物理的メカニズムの変化する点であることを意味する。折曲点の生起する理由の一つに、基礎方程式中の卓越成分が、拡散項から輸送項に変わったことが考えられる。B点において、基礎方程式の各項の大きさを時間方向に比較してみると図2のごとくなる。 $\frac{\partial H}{\partial x}$ は常に負で、絶対値は急速に減少している。 $\sin \theta \frac{\partial H}{\partial x}$ は降雨遮断後しばらく負であるが、水面が解水的になるにつれて正の値をとるようになり、以後増大する。 $-H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ は降雨遮断後しばらく正であるが、減少し負の値をとるようになる。 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ は上記の3項から計算したものである。図2において T_E におけるような物理量の遷移特性を性質Ⅰとし、 T_{II} におけるような物理量の遷移特性を性質Ⅱとする。即ち $\frac{\partial Q}{\partial x} = \sin \theta \frac{\partial H}{\partial x} - H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ において、 T_E 以前は $\frac{\partial Q}{\partial x} = -H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ 、 T_E 以降は $\frac{\partial Q}{\partial x} = \sin \theta \frac{\partial H}{\partial x}$ である。計算結果によれば、A点ではすべての時間で輸送項が卓越するので生起する折曲点は図2のⅡの性質を持ち、B点で生起する2個の折曲点はそれぞれⅠ、Ⅱの性質を持つ。

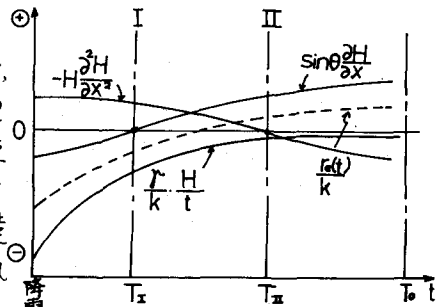


図2 基礎方程式の各項の比較(B点)

図2において T_E におけるような物理量の遷移特性を性質Ⅰとし、 T_{II} におけるような物理量の遷移特性を性質Ⅱとする。即ち $\frac{\partial Q}{\partial x} = \sin \theta \frac{\partial H}{\partial x} - H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ において、 T_E 以前は $\frac{\partial Q}{\partial x} = -H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ 、 T_E 以降は $\frac{\partial Q}{\partial x} = \sin \theta \frac{\partial H}{\partial x}$ である。計算結果によれば、A点ではすべての時間で輸送項が卓越するので生起する折曲点は図2のⅡの性質を持ち、B点で生起する2個の折曲点はそれぞれⅠ、Ⅱの性質を持つ。

A、B点のハイドログラフの折曲点生起時刻 T_{A1} 、 T_{B1} 、 T_{B2} の水深 H_{A1} 、 H_{B1} 、 H_{B2} は3-2)のすべてのケースでそれぞれ同様の値をとった。これらの水深を規定するものとしては流域、降雨条件の他に、これらの水深が生管力の影響する領域であることから、流れが生管力の影響を受けて変化することも考えられる。また、不飽和鉛直浸透成分の影響もあると思われる。

下流端のハイドログラフに生じる3つの折曲点以降、不飽和成分の流出と考えられるため、この時刻 T_0 をもって中間流出の終了時刻とする。

4-3 ハイドログラフの特性を表わす時間

ハイドログラフには、流出メカニズムの遷移を規定する上で有意な時間特徴がある。これらの時間特徴は、降雨条件とどのように対応するか調べることは興味深いことである。ここでは注目すべき時間として次の様なものを挙げる事ができる。

T_a : 流出の始まる時刻(または、降雨強度変化時)から下流端流量が定常になるまでの時間。

T_H : 流出の始まる時刻(または、降雨強度変化時)から流域全体の飽和水面形が定常になるまでの時間。

T_E : 降雨遮断時(または、降雨強度変化時)から第1番目の折曲点 re, Q が生じるまでの時間。

T_0 : 降雨遮断時(または、降雨強度変化時)から中間流出終了までの時間。

先ず、 $(T_E) < T_a < T_H$ であり、 $t = T_a \sim T_H$ における現象は、各断面で流量一定で水深は増大、動水勾配は減少の傾向で状態が変化している。また、図3のごとく降雨強度を段階的に低減させた場合、 $T_{a1} < T_{a2} < T_{a3}$ であり、 $\frac{T_{a1}}{T_{a3}} < \frac{1}{3}$ となる。これはある流量以上(あ

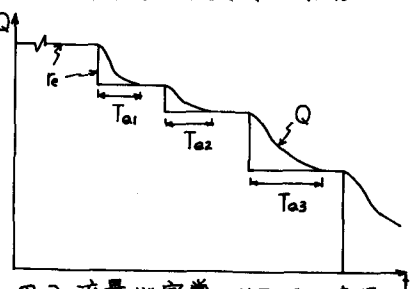


図3 流量が定常になるまでの時間

る水深以上)の流れでは拡散的伝達が卓越し、以後水深の減少と共に輸送的伝達が卓越してくることを示すものである。

次に、 T_L は降雨流域条件($Re, T_R, D, L, S, k, \text{etc.}$)と密接に関係していると思われる。しかし現在、 T_L, T_R との間にはそれぞれ正の相関が認められるが、その他の条件との関係は検討中である。

4-4 伝播にともなう変形

4-2でも述べたごとく本実験は拡散効果の大きい現象が現われている。この場合、降雨強度変化の下流端流量への影響、水面形の変化等において、拡散項を無視した場合の解析結果と大きく異なっている。図4は降雨域が流域上流側半分で $\frac{T_{R0}}{T_0} = 0.44$ の場合のA, B, C点のハイドログラフを比較したものである。この図から下流への伝播と共に、ハイドログラフのピークが減少し、その低減率が減少している様子がわかる。拡散項を無視した場合、ハイドログラフ上にはピーク流量部で平坦な部分が存在するはずであるが、本実験の場合、下流端ハイドログラフが降雨遮断後4分で低減を開始している。このことは上記の拡散項による伝達の速さを示している。

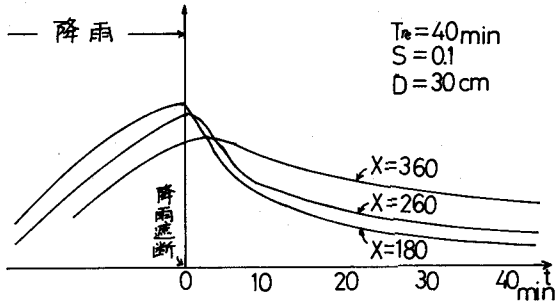


図4 ハイドログラフの伝播にともなう変形

5. まとめ

現在、ハイドログラフ低減部の折曲点生起の指標として水深を考えているが、今後は、生起可能な折曲点の性質を物理的、時間的に明確にし、その生起条件を流域条件、降雨条件から明らかにし、表層内流れを分類してみたい。このことは計測可能な条件から、ハイドログラフの形および中間流終時間を推測する基礎となり得ると思う。

謝辞) 本研究にあたり、適切な御指導をいただいた大阪大学室田明教授にじから謝意を表します。

- 参考文献 1) 室田・神田・佐橋; 降雨シミュレーターを用いた流出の基礎的実験; 第27回年次学術講演会講演概要集 昭47.10
2) 神田・佐橋; 降雨シミュレーターを用いた流出の基礎的実験(第2報); 昭和48年度関西支部年次学術講演会講演概要集, 昭48.6