

浸透に伴う毛管水帯の非定常な挙動 (予報)

Preliminary Report on Transient Behavior of Capillary Zone

Due to Infiltration

梶根 勇*・A. K. アリム**

Isamu KAYANE and Abdul Khabir ALIM

I はじめに

近年、降雨流出過程における重要な問題の一つとして、浸透に伴う毛管水帯の非定常な挙動が注目されるようになった。飽和毛管水帯は完全飽和に近い状態にあり、またその下限に地下水面が存在するため、地下水面が地表面に近い場合には、降雨に対応して地下水面の上昇や地下水流出等の反応が急速に起こることが実験や野外観測で確認された。

降雨に伴う毛管水帯内部の非定常な挙動を明らかにするために、標準砂をつめた砂箱モデルと人工降雨発生装置を用いて浸透実験を行なった。

II これまでの研究

すでに浸透に関しては多数の研究が発表され、毛管水帯の挙動についても若干の研究が行なわれているが、浸潤に伴う毛管水帯の非定常な挙動に関する研究は多くはない。本報告の目的と関連のあるこれまでのおもな研究は以下のように要約される。

Smith (1967) は砂中への浸潤現象の研究で地下水流出との関連について次のように述べた。「地下水体を涵養する降雨の量は、その降雨による infiltration sheet が通過する不飽和帯中に存在する土壤水分に依存する」。飽和毛管水帯の飽和度は 1 に近いから、地下水面が浅い場合には、降雨

が毛管水帯の上限に近づくと流出量および地下水面の急速な増加と上昇が期待される。

Freeze (1974) は流域源流部における水流発生メカニズムとして次の三つの過程を考えた。すなわち、限定された面積からのホートン地表流、variable source area からの飽和地表流、および subsurface stormflow である。後者二つ、すなわち浸透に伴う地下水面の上昇によって地表面が下方から飽和された地域、つまり Dunne-Black 型の variable source area の飽和地表流と、subsurface stormflow は明らかに浸透に伴う毛管水帯の瞬時的反応と関係している。

Freeze and Cherry (1979, p. 214) は、どのような初期条件と土壌型のときに一定量の降雨が地下水涵養をひきおこすかについて検討し、(1)短期間の豪雨よりも長期間弱い雨がつづいたとき、(2)地下水面が浅いとき、(3)先行土壤水分が多いときに、いずれも地下水面の上昇が大きくなる可能性がある」と述べている。

Nestor ほか (1978) は地表の涵養域の下に形成される地下水堆の形状とその成長に果たす毛管貯留と毛管流の役割を評価し、浸透速度は両者によってきまる毛管効果の大きさに正比例すると結論した。

Sklash and Farvolden (1979) は地下水面とその上の毛管水帯が地表面の非常に近くにあるとき降雨または融雪の直後に、浸潤水が表面近くの飽

* 筑波大学地球科学系 **筑波大学・院・地球科学研究科

(1984年6月4日受理)

和毛管水帯を正圧化し地下水鏡を形成するため、その結果として地下水流出域も拡大し、水流への地下水の寄与が増大すると報告している。

また最近では Gillham (1984) が、毛管水帯が地表面まで達している場合には、ごくわずかな水の付加によっても瞬間的に地下水面が上昇することを野外実験で明らかにしている。この実験では 3 mm の水を付加しただけで 25 分以内に 30 cm の地下水面上昇が観測された。

以上の研究は降雨流出過程における毛管水帯の非定常な挙動の重要性を示唆している。本研究では、砂箱モデルと人工降雨発生装置を用いた室内実験によって、この問題への接近を試みた。

III 実験装置と方法

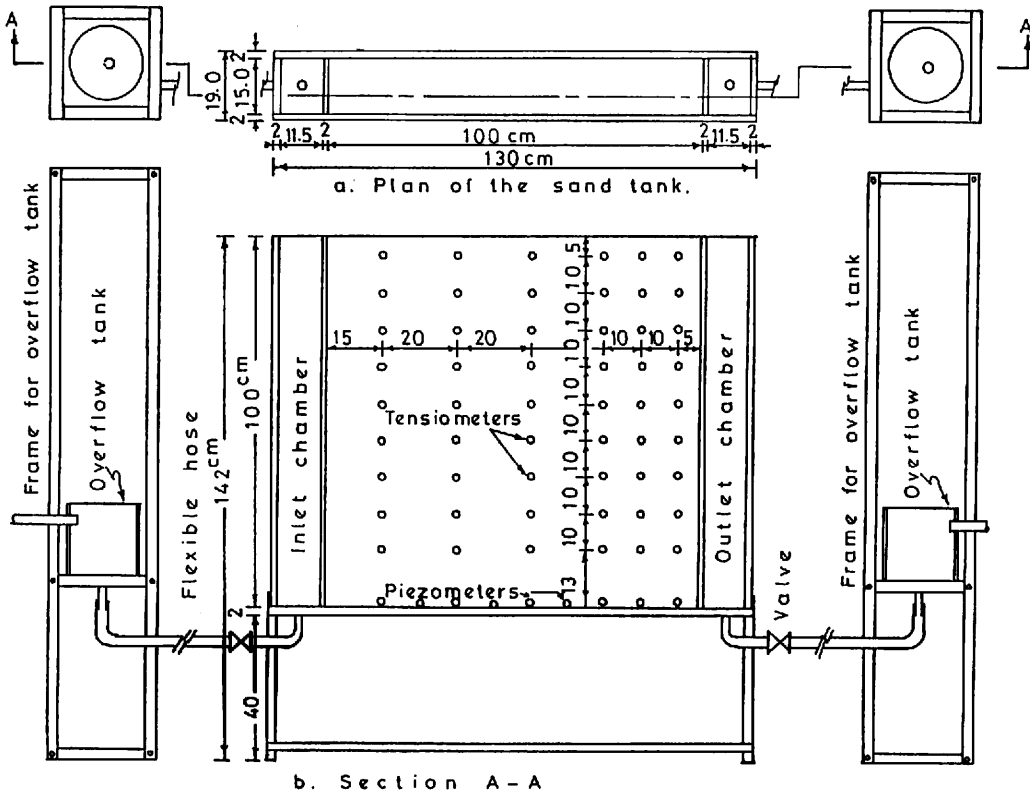
実験に用いる装置は、砂箱モデルと人工降雨発生装置からなる。

砂箱モデル 砂箱モデルは砂箱、その両側につ

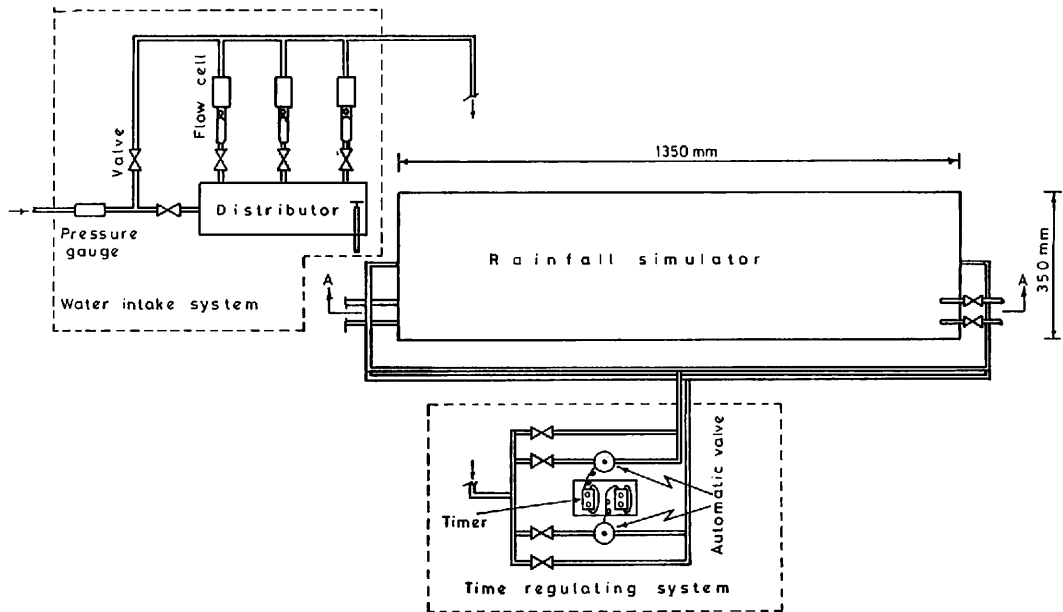
けた水位制御箱、給水タンク、およびマンメータ板からなる(第1図)。

砂箱は透明アクリル板製で、130cmL、15cmW、100cmHである。その両側に幅 11.5cm の流入・流出用箱があり、その中の水位はいずれもオーバーフロータンクで制御される。流入・流出用箱の砂箱との境の板は、間隙空気の流出を防ぐために、その上端から下方へ 50cm の区間だけ完全にシールしてある。オーバーフロータンクは直径 12.5cm、高さ 20cm の塩ビパイプ製で、底に流出パイプ、底から 15cm の高さにオーバーフローパイプがついており、砂箱とはホースで連結されている。流入箱と水位制御用オーバーフロータンクの間には、砂箱へ流入する水量を測定するための低圧フローセルが取付けてある。

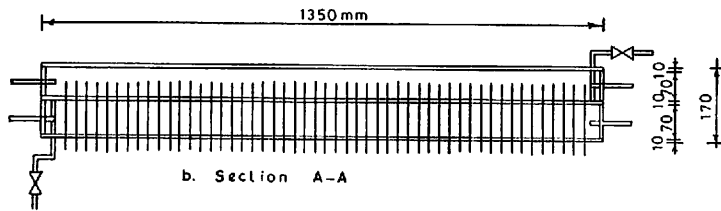
砂箱の片側には水理水頭測定用のテンシオメータが 54 本設置してあり、これらは水マンメータに接続されている。また砂箱の最下部には 9 本のピ



第1図 鉛直二次元実験用砂箱モデル



a. General diagram of the rainfall simulator.



b. Section A-A

第2図 人工降雨発生装置

エゾメータが設置してあり、これらも水マノメータに接続してある。

人工降雨発生装置 この装置は、流入水制御システム、時間自動制御システム、および降雨装置本体からなる(第2図)。

流入水制御装置は分水器、フローセル、およびバイパス管からなる。分水器は内径125mm、長さ40cmの塩ビ管で、それぞれ内径13mmの1本の流入管と3本の流出管および1本のオーバーフロー管がついている。3本の流出管はそれぞれ0.6~4、2~15、4~30 l/hの高圧フローセルに接続してあり、これによって流量0.6~49 l/hの実験を行なうことができる。

降雨装置本体は透明アクリル板製で、135cmL、35cmW、17cmHである。全体は上下2段、高さ

各7cmの二つの部屋に分かれ、内径0.7mmのステンレス針が総計663本取付けてあり、そこから雨滴が落下する。これらの針の長さは上段部屋が16cm、下段部屋が8cmで、針同志の間隔は5cmである。上段部屋と下段部屋は完全に分離されており、針は行・列ともに上段部屋からの針の隣には下段部屋からの針がくるように配列されている。これら二つの部屋に送られる水は、流入水制御システムからくる水を2本のパイプに分けたものである。

本体を二つの部屋に分けた理由は、砂箱の上に落下する雨滴を隣接した針から交互に落下させるためである。そのため各部屋へ通じるパイプには電気タイマーで作動する自動バルブが取付けてある。この装置によって、片方の部屋へ送水してい

ときにはもう一方の部屋へは送水させず、それを交互にくり返すことが可能になった。各部屋へ送水する自動バルブを通る管にはバイパス管がつけてある。

この人工降雨発生装置は鉄枠に取付けられており、四つのローラーによって砂箱モデルの上へ移動させることができる。

実験方法 砂箱へつめた砂の物理特性と充填方法については別に報告した(アリム・樺根, 1983)。

砂箱中の地下水面を測定するために、内径13mmの観測パイプを、流出端から3cm, 33cm, 66cm, 97cmの4カ所に設置した。これらのパイプの下部には小さな孔があけてある。

砂を充填してから、砂箱を飽和状態で5日間放置した。砂箱の下部に安定した地下水面を形成し、箱全体から一様に排水が行なわれるように、流入箱への入口を閉じた状態で、流出箱の水位を5cm, 20cm, 20cm, 15cm, 15cm, 10cm, 5cmの6段階に分けて低下させ、各水位低下後24時間ずつ排水させた。そして地下水面が平衡状態に達したあとで浸透実験を開始した。

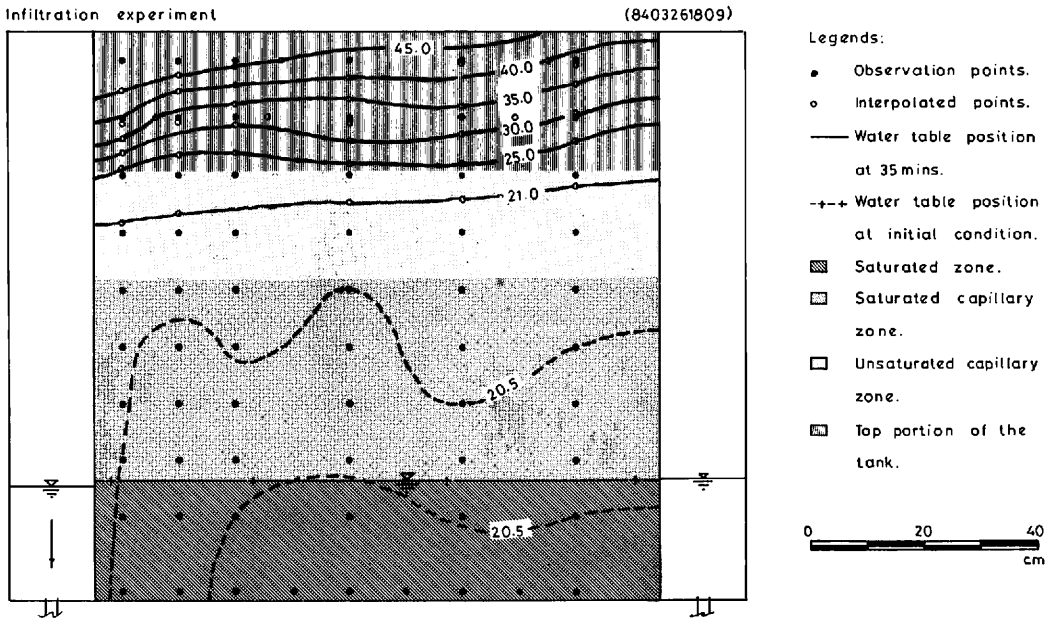
この実験では、降雨強度を 60.3 mm/h に設定

し、3時間継続して降らせた。送水用タイマーは、各部屋とも 10秒 ON, 10秒 OFF に設定した。

IV 実験結果

降雨開始後、浸潤の影響はまず砂箱中の土壌の最上部に現われた。降雨開始35分後の水理水頭分布が第3図である。ポテンシャルの基準面は砂箱の底にとってある。図から、このとき深さ約25~30cmまで浸潤の影響が及んでいることがわかる。一方、地下水面は流入境界では 2.6 cm 上昇したが、流出境界では 1 mm 低下した。

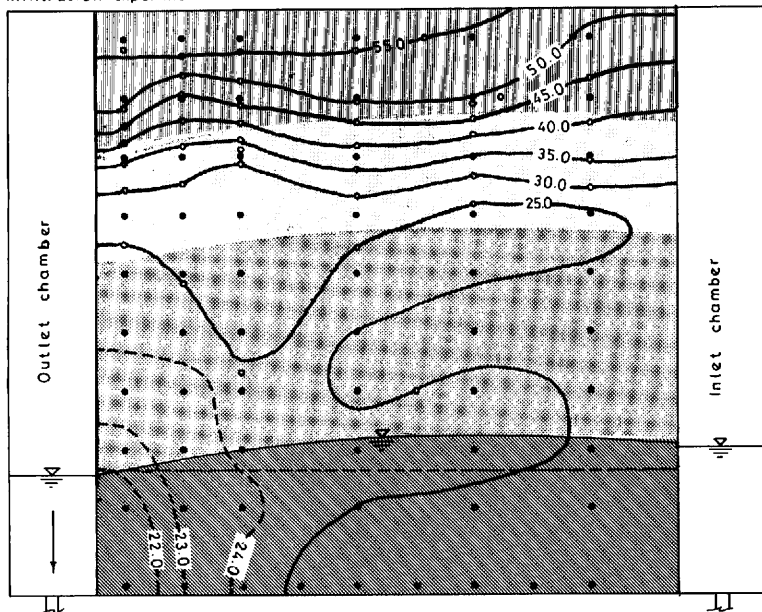
降雨開始63分後の水理水頭分布が第4図である。この場合には、水頭の急勾配部は砂の表面から35cmまで侵入している。この深さは地下水面から約35cmの高さに相当し、使用した標準砂の水分特性曲線では(アリム・樺根, 1983)、排水過程で生じた飽和毛管水帯の上限に等しい。このときまでに、地下水面は流入部で5cm上昇したが、流出部では依然として低下がつづき、低下量は3mmに達した。第9図の流出ハイドログラフで明らかのように、降雨開始63分後には流量は最大値の80%に相当する 2.0ml/sec まで急増している。ただ



第3図 人工降雨開始35分後の水理水頭分布

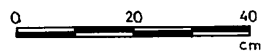
Infiltration experiment

(8403261837)



Legends:

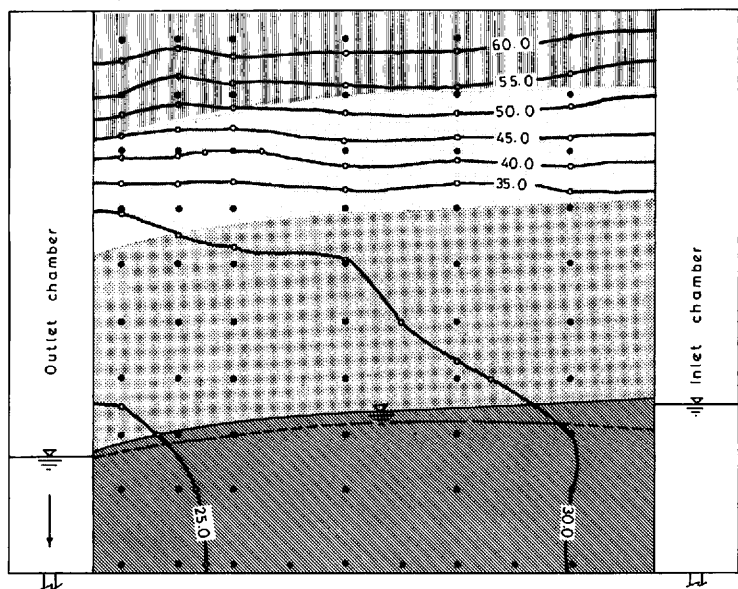
- Observation points.
- Interpolated points.
- Water table position at 63 mins.
- Water table position at 35 mins.
- ▨ Saturated zone.
- ▩ Saturated capillary zone.
- Unsaturated capillary zone.
- ▧ Top portion of the tank.



第4図 人工降雨開始63分後の水理水頭分布

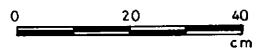
Infiltration experiment

(8403261942)



Legends:

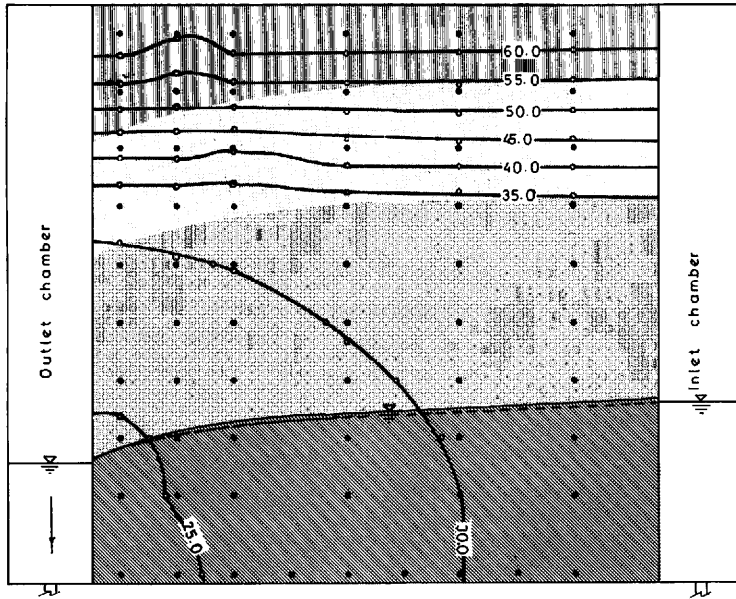
- Observation points.
- Interpolated points.
- Water table position at 128 mins.
- Water table position at 63 mins.
- ▨ Saturated zone.
- ▩ Saturated capillary zone.
- Unsaturated capillary zone.
- ▧ Top portion of the tank.



第5図 人工降雨開始128分後の水理水頭分布

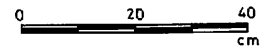
Infiltration experiment

(8403262038)



Legends:

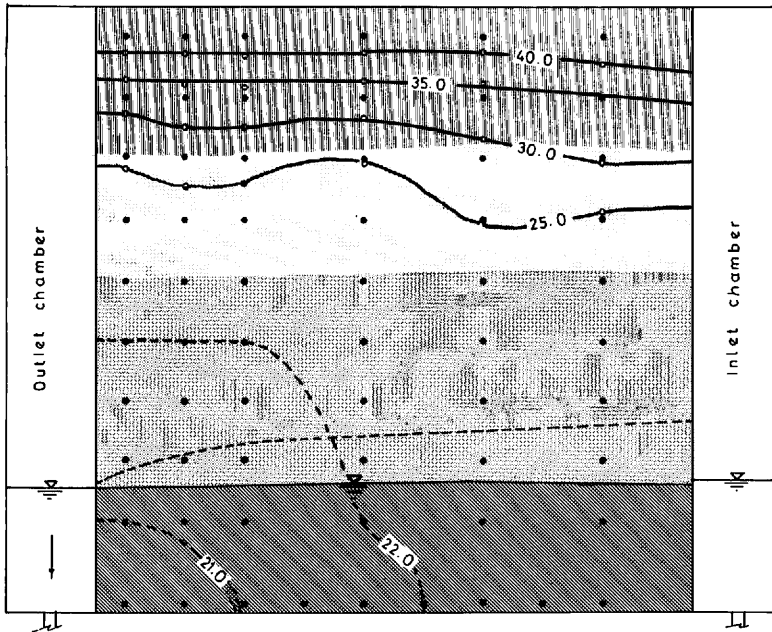
- Observation points.
- Interpolated points.
- Water table position at 184 mins.
- Water table position at 128 mins.
- ▨ Saturated zone.
- ▩ Saturated capillary zone.
- Unsaturated capillary zone.
- ▤ Top portion of the tank



第6図 人工降雨開始184分後の水理水頭分布

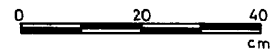
Infiltration experiment

(8403262225)

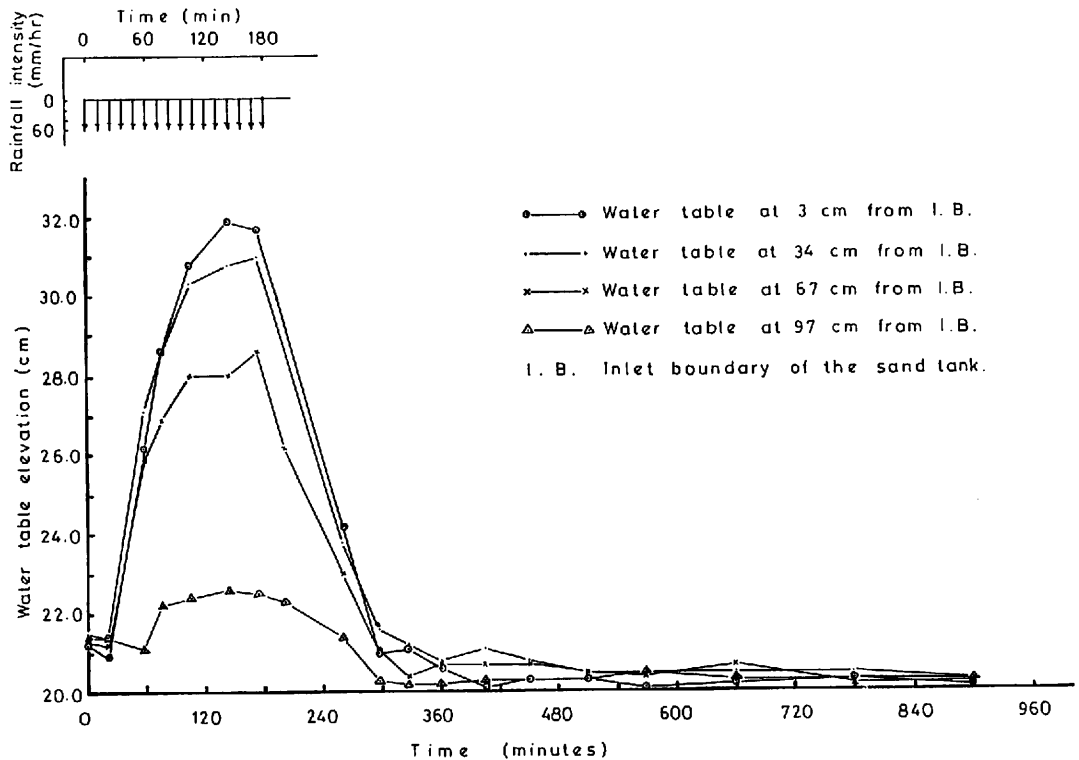


Legends:

- Observation points.
- Interpolated points.
- Water table position at 365 mins.
- Water table position at 184 mins.
- ▨ Saturated zone.
- ▩ Saturated capillary zone.
- Unsaturated capillary zone.
- ▤ Top portion of the tank.



第7図 人工降雨開始365分後の水理水頭分布



第8図 浸透実験における砂箱中4カ所の地下水位変化

しこのときには seepage face は形成されていない。

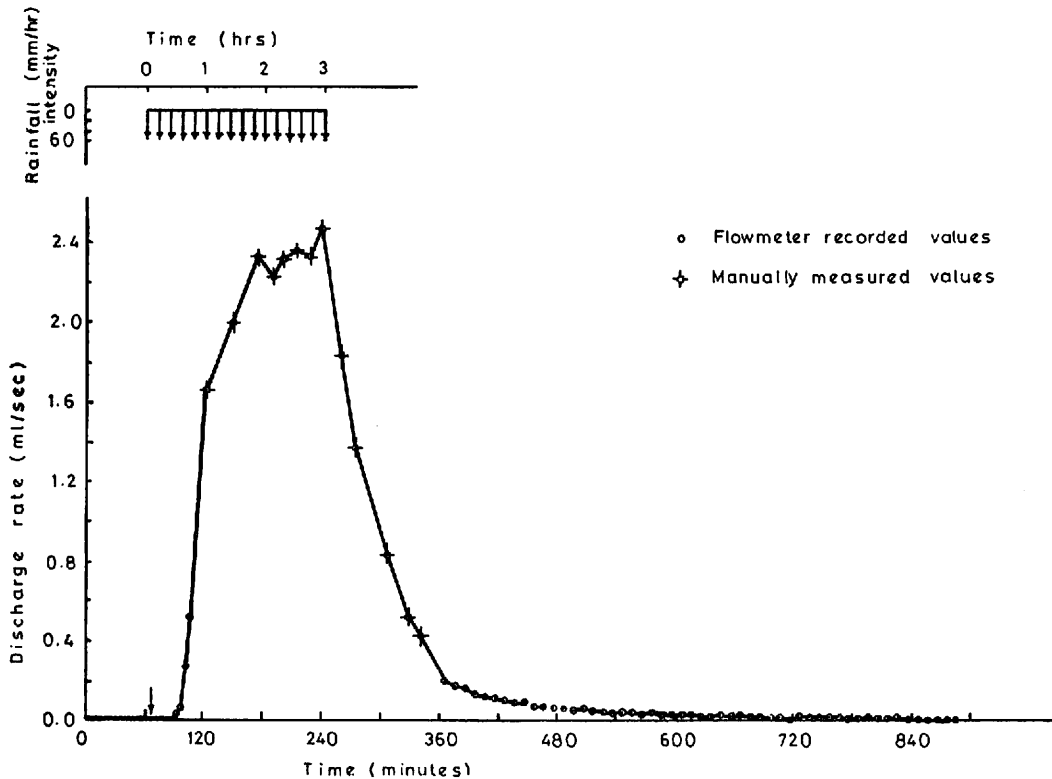
第5図は降雨開始128分後の水理水頭分布を示している。浸潤は継続していたにもかかわらず、水頭の急勾配部（浸潤帯）は第4図と同様に飽和毛管水帯の上限より下には侵入していない。飽和毛管水帯中の等水頭線の形から、地下水面が流線とはなりえず、側方浸透流（through flow）が発生していることは明らかである。このときまでに、地下水面は流入境界で10.2 cm、流出境界で1.1 cm いずれも上昇した。流出量はほぼ定常的な最高値 2.33 m/sec に達し、以後約1時間この状態がつづいた。

第6図は降雨開始184分後、降雨停止4分後の水理水頭分布図を示している。浸潤帯の深さは第5図とほとんど変化がなく、その内部の動水勾配はほぼ1である。側方浸透流が発生していること

は以前とかわりがない。地下水面は第5図と比べて流入境界で0.3 cm上昇したが、流出境界では変化がなかった。このとき流出量は降雨停止の影響を受けてすでに減少しはじめていた。

第7図は降雨開始356分後、すなわち降雨停止176分後の水理水頭分布図を示している。このときには、砂の表面付近では第6図に比べて水理水頭が約10 cm低下し、地下水面は初期条件以下まで低下した。流出量は激減したが、排水は完全には終了していない。

第8図は4カ所の地下水位観測管の水位を示したものである。地下水面の変動は流入境界で最も大きく、流出境界で最も小さい。降雨の浸潤は一樣であるから、地下水面の上昇量が小さいということは、排水量が大きいということを意味し、地下水流出にはたす側方浸透流の役割の重要性を示唆している。



第9図 浸透実験による砂箱からの流出ハイドログラフ

第9図は全過程を通じての流出ハイドログラフである。流出量は降雨開始23分後に急上昇を開始し、約90分後には2.33ml/secまで増加した。以後、降雨停止までゆるやかな増加を記録し、停止とともに急激に減少した。最大流出量は2.47 ml/secで、砂箱の面積に対して59.28mm/hの流出高に相当し、与えた人工降雨強度60.3mm/hにほぼ等しい。

浸潤帯の前面、すなわちぬれ前線が飽和毛管水帯の上限にまだ到達していない降雨開始63分後に流出量の急増が認められることから、初期の地下水流出量が降雨に起因する何らかの“押し出し”効果によっていることは明白である。

以上の実験結果は、降雨流出過程に果たす毛管水帯の非定常な挙動の重要性について多くのことを示唆しているが、この実験は降雨強度と降雨時間をいろいろに変えて、これから本格的実験に入

る予定であるので、詳細な解析の結果の報告は今後にゆずることとし、今回は予報のみにとどめた。

謝 辞

実験装置の作成にご協力いただいた水理実験センターの小島豊盛技官と工作センターの技官各位に御礼申し上げます。なお、この研究は昭和57・58年度科学研究費補助金(一般研究C)、課題番号57580153「地下水の流出機構に関する研究」(代表者 榎根 勇)を用いて行なった。

文 献

- アリム, A. K.・榎根 勇(1983): 鉛直カラムによる毛管水帯の挙動に関する実験. 筑波大学水理実験センター報告, 7号, 1-8.
Freeze, R. A.(1974): Streamflow generation. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12, 627-647.

Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979) : *Groundwater*. Prentice-Hall, 604 p.

Gillham, R. W. (1984) : The capillary fringe and its effect on water table response. *J. Hydrol.*, **67**, 307-327.

Nestor, V. O., Duke, H. R., Sunada, D. K. and McWhorter, D. B. (1978) : Artificial groundwater recharge with capillarity. *J. Irr. Drain. Div.*,

Amer. Soc. Civil Eng., **104** (IR 1), 79-93.

Sklash, M. G. and Farvolden, R. N. (1979) : The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, **43**, 45-65.

Smith, W. O. (1967) : Infiltration in sands and its relation to groundwater recharge. *Water Resour. Res.*, **3**, 539-555.