

降雨浸透に伴う間隙空気の挙動と 地下水流出の応答に関する実験

○ 豊橋技術科学大学 学生員 平野 剛
豊橋技術科学大学 学生員 三輪一弘
豊橋技術科学大学 正会員 開発一郎
豊橋技術科学大学 正会員 四倉信弘

1. はじめに

降雨に対する地下水流出の早い応答機構について、毛管帯効果が指摘されている。これは、毛管帯の上端に雨水(event water) のぬれ前線が到達すると毛管帯中の古い水(pre-event water) がピストン流的に押し出されるという水分移動である。しかしこの考えには、不飽和帯中の間隙空気の影響が考慮されていない。そこで本研究ではコラムによる浸透実験を行い不飽和土中の間隙空気が降雨の浸透および地下水の流出に与える影響を究明することを目的とした。

2. コラム実験

水分移動現象を単純化するため、粒径 0.1mmのほぼ一様なガラスビーズを用いた。試料の物理特性は、飽和透水係数 6.34×10^{-3} cm/s、真比重2.46、間隙率38.2%であった。実験装置は空気圧測定装置、圧力水頭を測定するテンシオメーター、誘電式水分計、転倒マス流出計、降雨装置、コラム本体から構成される。降雨は輸血針を利用して散水させ、降雨強度の設定は高水槽の水位を調整することによって可能である。コラムの寸法は 26x26x200cmである。この装置の概要を図-1に示す。実験手順は地下水位を深度171cmに設定し、40mm/h~199mm/hの9種類の降雨強度で行い、降雨継続時間は基本的に2~3時間とした。各実験は、平衡水分状態を初期水分として行った。

3. 実験結果と考察

実験条件および流出開始時間を表-1に示す。なおコラムの外側から水分状態の目視観察、サンプリンの結果、各実験の初期の圧力水頭、水分分布の結果から、飽和毛管水帯は地下水面上約42cmまで、懸垂水帯と不飽和毛管水帯の境は水分分布より地表面下45cm~65cmにあると判断した。また、EXP.5のみ、途中から地表面は湛水し、他の実験は全て非湛水条件下である。

図-2にEXP.2(91mm/hx2h)における間隙空気圧と流出量の時間変化を示す。

表-1 実験条件と流出開始時間

EXP	R.I. (mm/h)	R.D. (h)	A.C.	S.T.D. (min)
1	40	2	ENTRAPPED	106
2	91	2	ENTRAPPED	32
3	99	2	ENTRAPPED	22
4	137	2	ENTRAPPED	16
5	199	3	ENTRAPPED	7
6	93	4	ESCAPED	65
7	89	3	ESCAPED	43
8	94	3	ENTRAPPED	22
9	97	8	ENTRAPPED	14

EXP : EXPERIMENT NUMBER
R.I. : RAINFALL INTENSITY
R.D. : RAINFALL DURATION
A.C. : AIR CONDITION
S.T.D. : STARTING TIME OF DISCHARGE

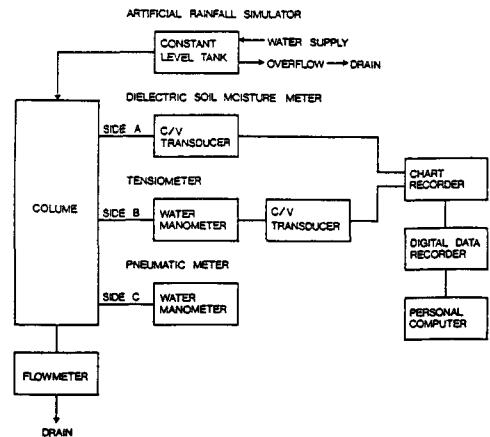


図-1 実験装置の概要

この図によれば、降雨開始と同時に各深度の空気圧は変化を始めているが深度16cmの空気圧は変化量が極端に小さかった。また、深度36cmの空気圧は深度66cm, 106cmの空気圧よりも小さかった。降雨開始1時間50分後に空気圧の減少がみられるが、それに対応して流出量の低下がみられた。さらに、降雨停止と共に空気圧が減少するのに伴って流出量も低下し、その後再び増加する現象が見られた。これらの現象はEXP.3~5でも見られた。以上のことから、地表面近くでは間隙空気と雨水が比較的スムーズに交換されていること、不飽和帯の間隙空気には不連続な点が存在すること、空気圧と流出量が時間的に対応していることが分かった。

EXP.1~5より、不飽和浸透においても空気が封入状態になったので、EXP.7では開放浸透実験を行い、EXP.8はそれと比較するためにほぼ等しい降雨強度で閉塞浸透実験を行った。その結果、開放浸透において流出量は空気の影響を

ほとんど受けず、単調な変化を示した。一方、閉塞浸透では流出量は深度36cmの空気圧と時間的に対応した。さらにぬれ前線の動きを見ると、開放浸透の方が進行速度が速かった。しかし、流出開始時間は閉塞浸透の方が早く、流出開始時のぬれ前線の位置は明らかに懸垂水帯にあることが分かった。以上のことから、閉塞浸透においては、ぬれ前線前面の圧縮された間隙空気が不飽和毛管帯の上限における圧力平衡を崩壊し、地下水の早期流出を促す、いわゆる間隙空気圧効果が存在すると考えられる。上記の間隙空気圧効果をさらに確認するために、EXP.9では青インクで色をつけたNaCl溶液降雨として用いたトレーサー実験を行った。この実験では目視によってぬれ前線の位置を的確につかむこと、流出量の電気伝導度を測定することによりevent waterとpre-event waterを分離することおよび空気圧効果によるpre-event waterの早期流出を確認することを目的とした。その結果、流出開始時のぬれ前線の位置は明らかに懸垂水帯にあることが確認され、間隙空気圧効果による早期の流出水はpre-event waterであることが証明された。

4. おわりに

今回の実験では次のようなことが分かった。①ぬれ前線が毛管帯に到達する以前に、ぬれ前線前面の圧縮された間隙空気が圧力平衡を崩壊して地下水流出が始まる。②地表に比較的近いところでは、侵入水と間隙空気の交換が比較的スムーズに行われている。③不飽和土中の間隙空気には、圧縮時、その保持形態により不連続になっている点が存在する。④降雨強が大きいほど間隙空気圧は大きくなり、流出開始時間も早い。⑤ぬれ前線前面に存在する間隙空気はぬれ前線の進行を妨げる。

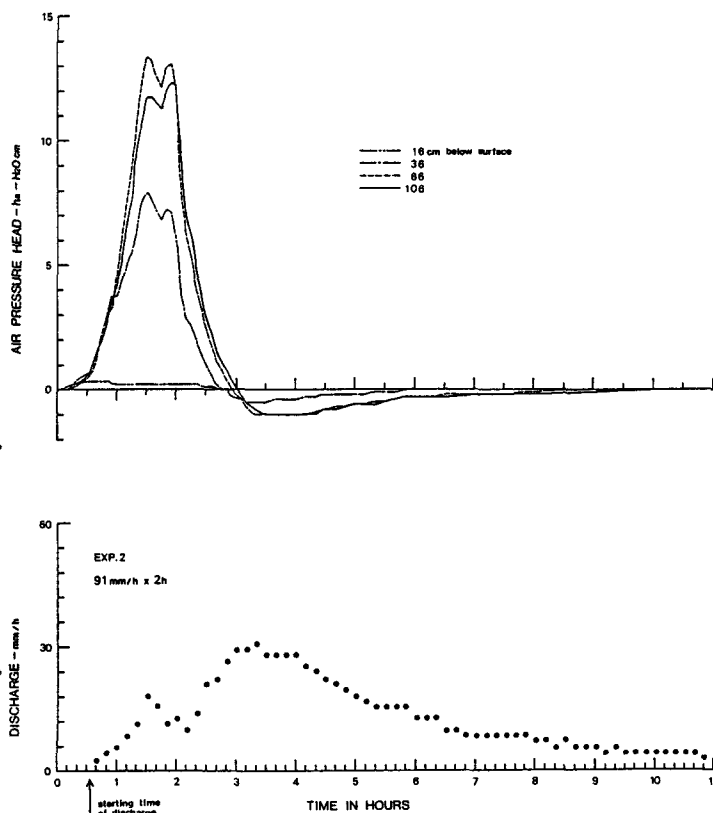


図-2 間隙空気圧と流出量の時間変化 例(EXP.2)