

土壌間隙空気の圧縮を考慮した地中への鉛直浸透

神戸大学工学部 正 員 田 中 茂

1 緒 言

筆者はかねてより水が地中へ鉛直浸透する問題を取りあげて研究を進めてきたのであるが、この場合に浸透現象そのものがかなり複雑であることから、この研究の成果を上げるためには純理論的な手法のみでは不充分であり、実験的研究をも数多く行う必要があることを痛感して、このような線に沿って研究して成果を得たので、既報に引きつづいてその一部を報告する次第である。鉛直浸透で特に問題となるのは浸透開始直前に地中の土壌間隙中に存在していた空気が湿潤前線の進行とともにその前面の空気は圧縮せられ、この前線の後方の湿潤領域 (Wetting Zone) および伝送領域 (transmission zone) 内では空気が小さな気泡の形で残存する。このような残存空気は浮力などを受けて、fingering 現象で地表面から逃げるものもある。また圧縮せられた空気はその圧力がある値以上になると、一部は下方の毛管水帯を通つて地下水面下に入り側方へ移動したり、また多くは湿潤領域および伝送領域中に通路を求めて連続した空気の流れの形で土壌間隙をおし開いて逃げるから前線の降下や進行に伴つてその下方の間隙空気圧がむやみに上昇することはないのである。このような湿潤前線の下領域の土壌間隙空気が浸透開始以後にどのように圧縮を受けるかという問題や間隙に閉じこめられた小気泡の挙動などについての研究は国内においては京大防災研究所の石原安雄教授らのもの¹⁾が筆者のもの以外に目立っているが、最近では東大農学部田淵俊雄の研究²⁾、佐賀大農学部黒田正治の研究³⁾、国外のものとしては、Wilson と Luthin 両氏の研究⁴⁾、Youngs と Pack 両氏の研究⁵⁾、Adrian と Franzini 両氏の研究⁶⁾ などがある。

筆者が現在までに上記の題目の研究に関して取り扱つた内容はつぎのようなものである。(i) 地下水面とそれに接続している毛管水帯が下方において平衡状態にある時に、新たに地表面から鉛直浸透が開始される場合、(ii) 強雨浸透が突然にやんだ後の水の運動、(iii) 強雨が突然に弱雨に変わった時の鉛直浸透、(iv) 前期降雨停止後小休止後に再降雨がある場の浸透、以上は均等質の単層の場合のものであるが、この外、(v) 上層が細粒土で下層が粗粒土の二層よりなる地層へ強雨が降る時の鉛直浸透と弱雨が降る時のそれ、(vi) 上層が細粒土で下層が粗粒土の二層よりなる地層へ強雨が降る時の鉛直浸透と弱雨が降る時のそれ、などについて間隙空気が大気圧以上に圧縮せられる大きさを水頭 h_a で表わして、これを鉛直浸透をしている水や毛管水などの運動のポテンシャル勾配を求める際に考慮して、飽和浸透および不飽和浸透のそれぞれの場合について Darcy の法則を適用して理論式を誘導し^{7),8),9),10)} つぎに、理論式中に用いた h_a の値を各種の土や降雨強度について実験的に研究を行い、得られた成果の一部については今日までに折ある毎に発表^{8),9),10)} してきたのである。今回は、その後今日までに多くの実験を行つて得た結果のうちから代表的なものの数例をあげて報告する次第である。

2 実験の説明

(1) 実験装置： 実験装置としてはつぎのようなものを使用した。(図-1 参照)

i Mariotte Flask: 内径 190 mm, 高さ 1200 mm, 肉厚 5 mm の透明アクリライト樹脂製

給水コックおよび空気泡の流入用コックおよび水注入用と空気抜き用コックつき蓋あり

ii 土柱用透明アクリライト樹脂製円筒

内径 100 mm, 長さ 2200 mm, 肉厚 5 mm, 底に 200 mesh の wire screen 水位管あり,
内径 120 mm, 長さ 2000 mm, 肉厚 5 mm, 同 上

iii 土壤水分測定装置

横河電機製電気抵抗式土壤水分測定装置

iv 受水槽

内径 130 mm, 高さ 500 mm, の亜鉛渡鉄板製, 溢流用ノッチと V 型樋つき

内径 150 mm, 高さ 500 mm, 同 上

v 間隙空気圧測定装置

土柱用円筒の諸所にとりつけた空気圧測定用ビックアップの細管と軟質可換性管で自記圧力測定装置とを連結する。自記装置は島津製作所製のブルドン管応用の圧力計で記録紙は円形でその中心のまわりに 6 時間 / 1 回転のものと 1 時間 / 1 回転のもの, 測定範囲 ± 1.0 m 水柱, 各 3 基づつ

vi 土砂詰め用装置

カム式, 5 cm の落下距離をもつもので, 土柱用円筒をのせて上下の落下をくり返すもの

vii 水量測定用目盛り入りガラス製シリンダー

viii 含水比測定用透明アクリライト短筒

内径 50 mm のものを, 長さ 10, 15, 20, 30, 50, 80 mm の各長さに輪切りにしたものを,

ビニールテープで張り合せて土柱用円筒として, 土または砂をつめて浸透実験を行うもの

(2) 実験方法: 砂や土を空気乾燥させておいたものを既報で述べた方法でほぼ均一になるように充填した。強雨浸透実験は砂面上に湛水深 h_0 を普通は一一定としたのである。弱雨浸透実験では砂または土柱の表面をガーゼで敷つて給水が表面に均等に拡がるようにし表面に湛水が生じないように注意しながら給水した。二層の場合の実験では, 湿潤前線が境界面上に達した後その上に貯溜される水位の変化を記録した。含水量の測定では電気抵抗式のもので測定するよりも正確なものを得るため, (1) viii で述べたようなものを用いて浸透実験を行い, 輪切りにして各輪のなかの砂または土の含有量を求めた。

表 - 1 実験土の条件

番号	土質条件	みかけ密度 γ_t	初期含水比 W_0	間隙率 n	初期飽和度 S_1	粒子の比重 G	表面上の水深 h_0 cm	下層土の吸水頭 h_{c2} cm
A-3	上層豊浦砂	1.48	0.020	0.451	0.060	2.64	7	
	下層真砂土	1.17	0.075	0.576	0.140	2.57		21
A-4	上層真砂土	1.40	0.035	0.459	0.106	2.50	3.5	
	下層千里砂 B	1.51	0.032	0.449	0.111	2.65		36
B-1	長尾 硅砂	1.64	0.046	0.320	0.235	2.31		
B-2	上層真砂土	1.60	0.052	0.433	0.185	2.67	5.5	
	下層長尾硅砂	1.73	0.068	0.365	0.280	2.55		30
B-3	上層 O 土	1.66	0.032	0.429	0.120	2.82	13.4	
	下層 D 土	1.57	0.034	0.462	0.116	2.83		51

3 実験結果

現在までに行つた多くの実験のうち, 表 - 1 に示すような条件の土柱について実験を行つた。実験土柱の空気圧の測定位置などは図 - 1 に示す通りである。

(1) 上層豊浦砂下層真砂土の二層の時

図 - 2 ~ 図 - 4 は前線, 毛管上昇限界, 上下両層の境界面上の貯溜水面, 空気圧, 給水量と流出量, などの時間変化

を測定したものを示している。

この場合には上下両層の境界面上には水深 60 cm. 前後の貯溜が行われている。

(2) 上層直砂 下層千里丘陵産 B 砂の場合

この時は砂柱下部は水面内に入れられておらず下面は金網を境として大気に接している。空気は底から自由に逃げられる構造であつた。上層よりも下層の方が透水係数 K の値は少し大きかつたことも条件のひとつで、下層では不飽和浸透の状態で、前線は境界面で少し不連続となり、その下では fingering 現象がみられた。

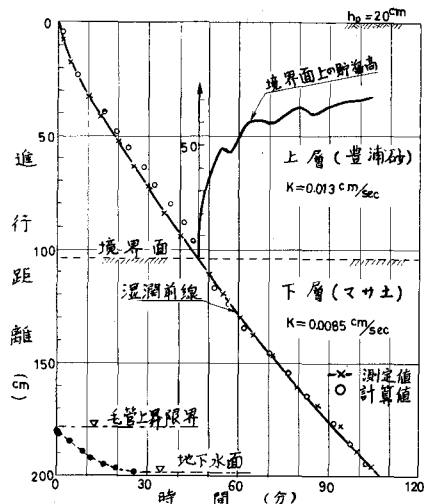


図-2 前線などの進行状態(A-3)

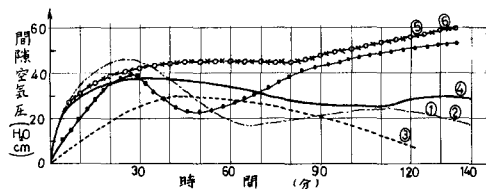


図-3 間隙空気圧の時間変化(A-3)

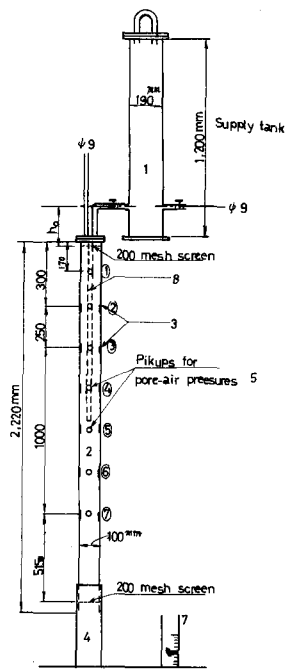


図-1 実験装置の図

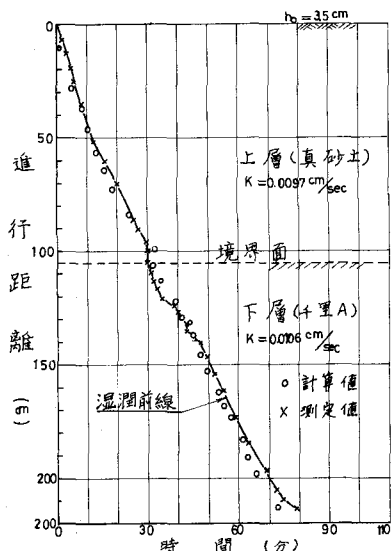


図-5 前線などの進行状態(A-4)

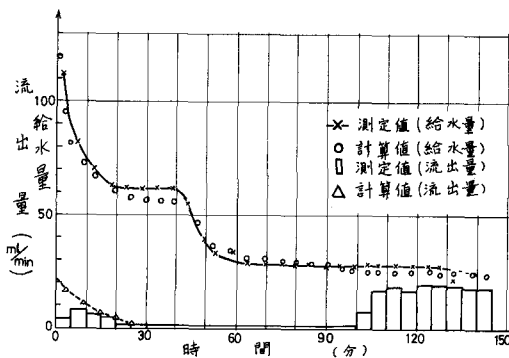


図-4 給水量, 流出量の時間変化(A-3)

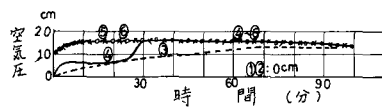


図-6 間隙空気圧の時間変化(A-4)

図-5～図-7は実験結果を示す。間隙空気が大気圧よりもわずかながら圧縮されていることは注目に値する。当然のことながら毛管水のしぼり出しはなく、給水量は底面からの流出量にはほぼ一致している。受水器内での貯溜効果はなかつたことはいうまでもない。

(3) 長尾硅砂の均一層で、降雨強度の与え方を実験中に

変化させた場合

最初は砂面上水深 $h_0 = 6 \text{ cm}$ で強雨浸透を行い、前線が地下水面に到達後約 15 分間そのまま給水して給水停止、停止時間 15 分間後に再給水して $h_0 = 1.2 \text{ cm}$ に保つた。

図-8 は前後 2 回の給水時の前線の進行状況を示す。第 2 回目の前線の進行は途中までしか把握し得なかつた。

図-9 は給水量と流出量の時間変化を示している。最初に流出したのは毛管水がしほり出されたもので、多水器の貯留効果はきわめて少い。実験開始後 25 ~ 30 分で給水したものが底から流出し始めた。流出量の hydrograph

は興味ある形

をとっている。

図-10 はこの場合の間隙空気圧の変化を示す。中休み時の値は低くなりわづか負値を示すものが多い、第 2 回目に湿潤前線が追跡不

能になつた点 図-8 前線などの進行状態 (B-1)

で、この前線が中休み中に生じた空気前線に追いついたもので

あろう。空気圧の降下や上昇に測定点による時間のおくれがよくとらえられている。

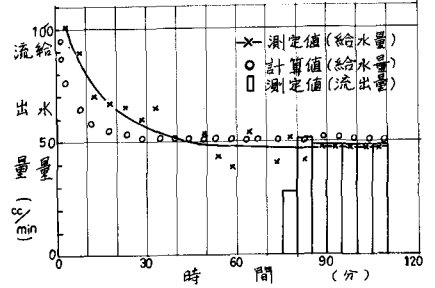


図-7 給水量、流出量の時間変化 (A-4)

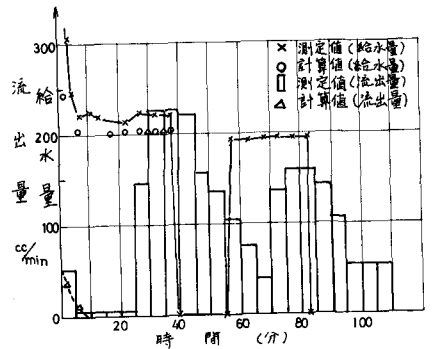


図-9 給水量、流出量の時間変化 (B-1)

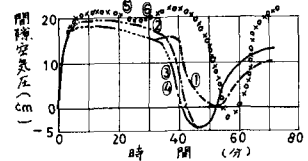


図-10 間隙空気圧の時間変化 (B-1)

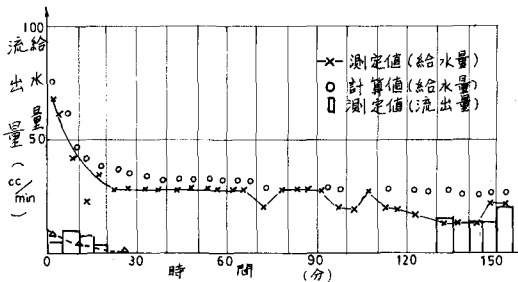


図-11 給水量、流出量の時間変化 (B-2)

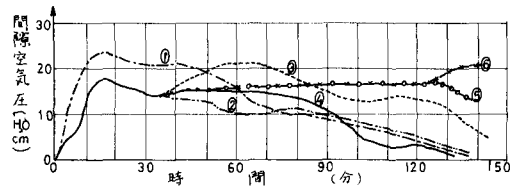


図-12 間隙空気圧の時間変化 (B-2)

(4) 上層真砂土下層長尾硅砂の二層よりなる場合

下層の方が透水係数が大きいので、ここでは不飽和浸透流となっていた。図-11は給水量と流出量の時化変化を示す。流出量の初期に出現しているものは毛管水がしほり出されたものである。砂粒の上から給水されたものが底から流出し始めたのは130分後である。図-12は間隙空気圧の時間変化を表すが、圧縮はあまり大きくはなかつた。上層の間隙空気圧が浸透進行とともに減少しているのは前線の後の領域に入つて水がピクアップに侵入したことによる。図-13は湿潤前線と毛管上昇限界の低下の時間変化を示す。この時の毛管上昇限界の低下量はわづかであつた。また、雨層境界面の上下で湿潤前線の進行速度が急に变化している。

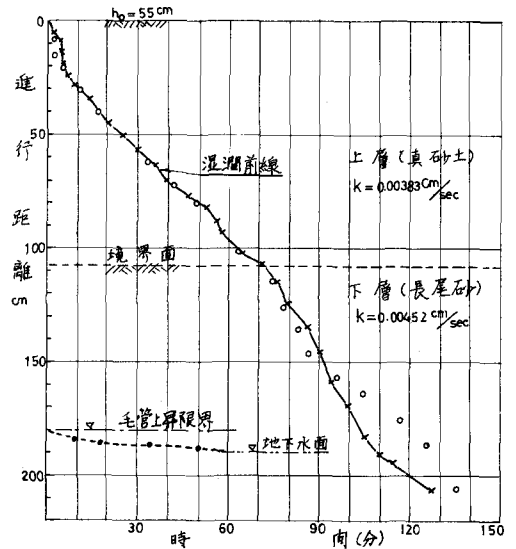


図-13 前線などの進行状態 (B-2)

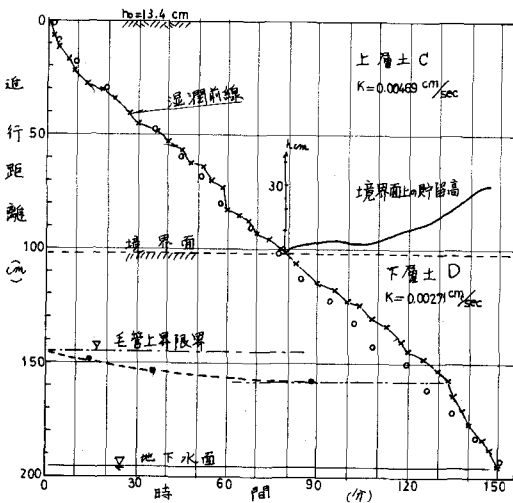


図-15 前線などの進行状態 (B-3)

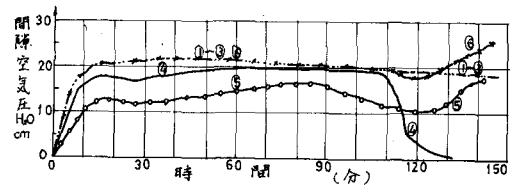


図-14 間隙空気圧の時間変化 (B-3)

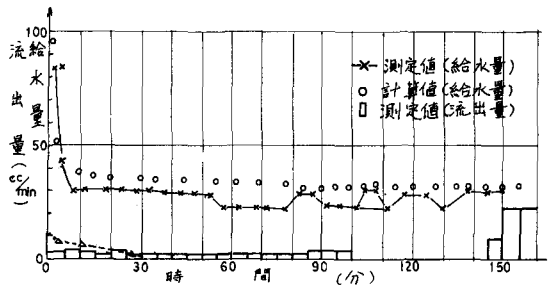


図-16 給水量、流出量の時間変化 (B-3)

(5) 神戸大学工学部の西で採取した二種の土、C、Dを上下両層に使用した場合

上層土よりも下層土の方が透水係数が小さいが、いずれも真砂土である。図-14は間隙空気圧の時間変化を表すが、圧縮される値はあまり大きくはない。図-15は湿潤前線および毛管上昇限界の時間変化を示している。また境界面上の浸透水の貯留水深の時間変化をも表している。毛管上昇限界の降下速度は小さくしかもその降下値もわづかである。境界面上の貯留水深の上昇速度も小さい。図-16は給水量と流出量の時間変化を示す曲線である。毛管水がしほり出される量も長くそれを引いている。毛管水が空気圧の上昇でおし下された後に流出量が中断されて、給水開始後約150分で給水が底から流出し始めている。

4 結 論

ここに上げられた実験例は紙面の都合で5, 6例に過ぎなかつたが, しかし長年に亘る研究の積み重ねにより, かなり多くの貴重な実験資料, とくに h_a の時間変化と, 湿潤前線と毛管上昇限界との間にはさまれた領域内の土壌間隙内の空気が圧縮せられることにより毛管水が重力水に変化してくる関係を確め得た。また, h_a の大きさの変化と毛管水がしぼり出される量が密接に相対応しているし,

透水性を異にしている上下二層の地層へ雨水が浸透してくるときは, 下層が上層より透水性が小さいと両層の境界面上に貯溜水の水位が上昇して, 下層の毛管上昇限界の上に圧縮せられた空気圧が作用し, 理論式が充分適用しうることをも確かめ得た。また下層の透水係数が上層のそれよりも大きい時は下層中是不飽和浸透となるが間隙空気が下からぬけるために間隙空気の圧縮され方は案外少く且つ毛管上昇限界の低下量が小さいことが分つた。

5 謝 辞

この研究を行うに際して終始困難な浸透実験を辛抱強く且つ情熱をわかせて行つて貴重な実験結果を得るに貢献した元神戸大学大学院学生八東正司夫君の努力に対し深甚な謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 石原安雄, 馬場洋二: 雨水の地中浸透に関する実験的研究, 昭和40年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集
- 2) 田淵俊雄: 浸潤と浸透の関係について, 土質工学会第13回土質工学シンポジウム論文集, P.P. 1 ~ 4
- 3) 黒田正治: 溶解気体による不飽和浸透の進行過程と退行過程に関する研究, 土質工学会第13回土質工学シンポジウム論文集 P.P. 5 ~ 10, 1968.
- 4) L. G. Wilson, J. N. Luthin: Effect of Air ahead of the Wetting Front on Infiltration, Soil Science Vol. 96, p.p. 136 - 143, 1963.
- 5) E. G. Youngs, A. J. Peck: Moisture Profile Development and Air Compression during Water Uptake by Bounded Porous Bodies, Soil Science Vol. 98, 1965, Vol. 99, 1965, Vol. 100, 1965.
- 6) D. D. Adrian, J. B. Franzini: Impedance to Infiltration by Pressure Build-up ahead of the Wetting front, Journal of Geophysical Research, Vol. 71, p.p. 5857 - 5862, 1962.
- 7) Shigeru Tanaka: An Approximate Theory concerning Infiltration, 神戸大学工学部研究報告 NO. 6 p.p. 73 - 84, 1960.
- 8) 田中茂, 飯田幸男: 土壌間けき空気の圧縮を伴う水の浸透速度に関する研究, 第10回水理講演会講演集, p.p. 15 - 20, 1966.
- 9) Shigeru Tanaka, Yukio Iida: Researches on Infiltration of Rainwater, NO. 9, p.p. 103 - 114, 1966.
- 10) Shigeru Tanaka, Mashio Yatsuzuka, Hirotaka Kusunoki: Researches on Infiltration of Rain Water into Stratified Soils Associated With Pore Air Compression, 建設工学研究所報告 NO. 10, p.p. 215 - 225, 1967