

土壌間げき空気の圧縮を伴う水の浸透速度に関する研究

神戸大学工学部 正会員 田 中 茂
同 正会員 飯 田 幸 男

1. 結 言

従来雨水や灌漑用水などが地中へ浸透する際における水の運動を研究した論文が数多く発表せられているが、そのほとんどは浸透が開始される直前において土壌の粒子間げき中に入っていた空気が水の浸透が行なわれるときに浸潤前線(wetting front)の進行に伴って容易に排除せられて前線に接した土壌間げき内の空気は全然大気圧以上に圧縮せられることはないことを前提条件としている。しかし実際の浸透に際しては地面の下方に毛管水帯および地下水面を境としてその下には重力水帯が存在している場合に地表面から鉛直下向きに水の浸透が行なわれることが多いが故に、どうしても上記の土壌間げき内に存在していた先行空気が多かれ少なかれ大気圧以上のある圧力にまで圧縮されることは免れない。この場合における先行土壌間げき空気が圧縮される様相やその程度などは降雨強度あるいは地表面の単位面積に給水せられる流量と土壌の浸透能との相対的大小、土壌の特性、浸透層の下部の条件などによって大きく支配せられることは容易に考えられる。田中はイリノイ大学土木教室に滞在中にこの問題を研究し、以前にその一部を発表した^{1), 2)}のであるが、空気の圧縮状態に関しては十分に究明せられるに至っていなかった。最近京大でも空気の圧縮を考えた鉛直下方への水の浸透の研究を始めてその成果^{3), 4)}を発表しているが、浸潤前線の下方へ進行する非定常浸透が行なわれているものに関してはまだはっきりしていない点がある。著者らは実験的研究を行なってこのような問題の一部を明らかにし得たのでここに発表する。この研究によって田中が先に発表した「空気の圧縮を考慮した地中への浸透に関する近似理論式」を実際に利用しうるのである。

2. 均等質土壌中を鉛直下向きに浸透が行なわれる時、浸潤前線に接する土壌間げき空気の圧縮を考慮した田中の解

田中はさきに Hansen⁵⁾ が発表した解を改良して標題のような解を示したのであるが、ここで簡単にその要点を記すとつぎのようである。この時は浸潤前線のところより下方の土壌間げき内の空気は圧縮せられ、大気圧 p_0 より少し高い圧力 p_a になったとする。前線が下方に進行する間、ある時間は一定の圧力に保たれるものと仮定すれば、これは下方への水の運動を阻止するように作用する。 p_a を水頭の大きさを表したものを h_a とすると、図-1のように前線においては soil suction を水頭で表したもの h_c とは逆に作用する。地表面上に h_0 という一定水深が保たれているとし、前線が地表面から鉛直下方に Z だけ下った時を考えると、地表面と前線との間の水の運動に関するポテンシャルの関係は図-1に示す通りである。ここに、 h_w は浸潤領域における浸潤にもとづく圧力ポテンシャル損失を水頭で表したものである。

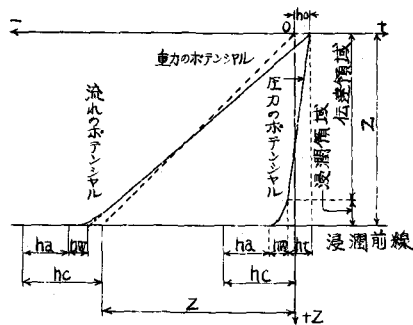


図-1 ポテンシャル関係図

いま

$$h_t = h_0 + h_c - h_0 - h_w \quad (1)$$

とし、 dt 時間に地表面の単位面積からの浸透量を dQ とすると、地表面から前線までの間の浸透流に Darcy の法則が適用しうるものとする、次式が成立する。

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot \frac{d\phi}{dZ} \quad (2)$$

ここに、 K : 透水係数, ϕ : 流れのポテンシャル

進行しつつある浸潤前線の含水量がつねに一定と仮定すればつぎの関係が成立する。

$$dQ = n \cdot s \cdot dZ \quad (3)$$

ここに、 n : 土壌の間げき率, s : 浸潤後の飽和度 s_2 から浸透直前のそれ s_1 をひいた値

(1), (2)両式から

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{K}{ns} \cdot \frac{d\phi}{dZ} \quad (4)$$

$$\text{一方, } \frac{d\phi}{dZ} = \frac{Z + h_t}{Z} = 1 + \frac{h_t}{Z} \quad (5)$$

なる関係から、式(4)はつぎのようにかける。

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{K}{ns} \left(1 + \frac{h_t}{Z} \right) \quad (6)$$

この式を変数分離して積分し、 $t = 0$ の時に $Z = 0$ という境界条件を用いると

$$t = \frac{ns}{K} \left[Z - h_t \log \left(1 + \frac{Z}{h_t} \right) \right] \quad (7)$$

他方、地下水面に接してその上に存在する毛管水帯が下方において最初平衡状態にあったが、新しく地表面から浸透が始まると、その上昇限界と上方の浸潤前線との間にはさまれた土壌間げき内の空気は圧縮を受けて P_0 から P_a に変わると毛管水帯を占めていた水の平衡が破られる結果、毛管水の一部が重力水帯内へ下降して入ることになる。もしも最初の地下水面が一定に保たれるようになっている時には毛管水が重力水に変化した分の水量は側方へ流出しなければならない。実際にはこのような側方流出は考え難いが故に地下水面の上昇ということになろう。ここでは簡単のために前者のような場合をとり上げてみる。

いま、図-2に示すように原点 O, O' 、鉛直軸 Z, Z' をとる。地表面から浸透が始まると、地下水面と毛管上昇限界との間の毛管水はいままで流れのポテンシャル勾配が0であったものが急に上昇限界から地下水面に向って流れのポテンシャル勾配が生じ、その結果その間の水は下方へ向って急に運動を始めることになる。この時毛管水の上端には重力のポテンシャルと、それに逆って作用する水頭 $h_c - h_a$ に相当するポテンシャルおよび圧縮された空気が毛管水との境の「空気前線」を通過しておしこんでくる時に前線付近で失われる水頭損失 h_s に相当するポテンシャルを合成したもの、すなわち、 $Z - [(h_c - h_a) + h_s] = Z - h_c + h_a - h_s$ に相当するものが作用し、地下水面ではポテンシャルは0となっていて、毛管水の上端と地下水面との鉛直距離 Z の間にはほぼ直線的に変化する。この変化を図-2に線-②で示した。地面からの浸透が始まると同時に水帯内のポテンシャル勾配線は同図に示した線-

②から瞬間的に線-①に変化する。 h_a は毛管水が下降しつつある間は一定と仮定すると、

$$t=t : Z=Z, \quad \frac{d\phi}{dZ} = \frac{Z-h_c+h_a-h_s}{Z} \quad (8)$$

ただし $Z \geq H_c - h_a + h_s$

毛管水帯の水の運動に Darcy の法則を適用し、その水帯の飽和度とこれに接続している上の土のそれとが時間に関らず一定、従ってその差も一定とすると、次式が成立する。

$$\frac{dZ}{dt} = -K \frac{Z-h_c+h_a-h_s}{Z} \frac{1}{n_s} \quad (9)$$

変数分離を行ない、積分をして $t=0$ の時 $Z=H_c$ という条件を用いて積分常数を決めて整理すると、

$$t = \frac{n_s}{K} [H_c - Z + (h_c - h_a + h_s) \log \frac{h_a - h_s}{Z - (h_c - h_a + h_s)}] \quad (10)$$

また

$$\frac{dQ}{dt} = K \left(1 - \frac{h_c - h_a + h_s}{Z} \right) \quad (11)$$

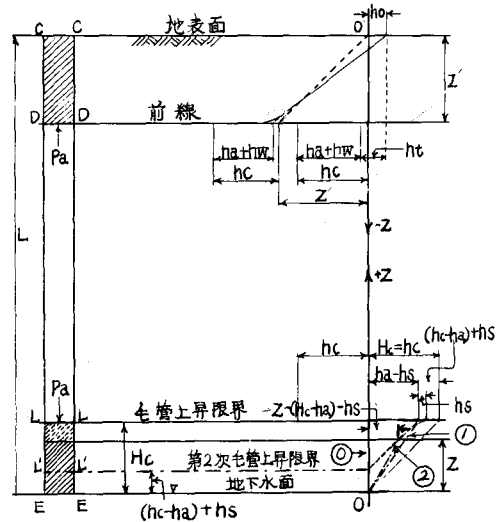


図-2 ポテンシャル関係図

地表面からの浸透水は毛管水の上の境界面を追いかけて降下するが、前者の速度が後者のそれよりもはやいので、ある時刻には追いつく。地下水面に原点をとり鉛直上方に $+Z$ 軸をとると、上から下むきの浸透に関しては次式が成立する。

$$t = \frac{n_s}{K} \left[L - Z - h_t \log \left(1 + \frac{L-Z}{h_t} \right) \right] \quad (12)$$

(10), (12) 両式から前線が毛管水の上の境界に追いつく位置が求められる。

3. 実験の説明

実験装置としてつぎのものよりなる。

- (a) Marriotte Flack 型の給水槽：内径 190mm, 高さ 1200mm, 厚 5mm, 透明合成樹脂製
- (b) 浸透土砂填充用透明合成樹脂製パイプ：内径 100mm, 高さ 2,220mm, 取外し可能蓋つき
- (c) 含水率測定用電極および装置：電極は $10 \times 10 \times 0.5$ mm のもの 2 枚ずつ 6 組を接着
- (d) 受水用容器：50×50×50cm, 一側面上部に越流用三角ノッチを有する鋼板製
- (e) 土壌間げき空気圧測定用ピックアップ並びに圧力自記装置（島津製, 測定範囲 ± 2.0 mH₂O, チャートの回転速度 1 時間 1 回転, その他）：ピックアップ 6 個, 可撓性チューブで圧力計に結ぐ
- (f) 横川製電子管式打点記録計：(c) の装置に連絡し 15cm/hr の速度で記録紙を動かす
- (g) 浸透流量測定用シリンダー（Graduated cylinder）

実験装置の全体を図-3に示す。

つぎに実験の方法などについて説明をする。

空気乾燥した砂や土を (b) のパイプにつめるのであるが、1 回に 3 kg ずつを入れて、これをカ

ム装置で1回転5cmごとの落下を25回連続的に与えることをくり返す方法を採用してパイプ全体への砂の填充を行なった。砂をつめ終ると筒全体を受水用容器に下部が約8.5cm程度水面下に漬るように保持し、十分に時間をかけて水が砂を保持している金網の目を通して毛管引力によって水面上一定の高さにまで上昇させ、容器中の水面はつねにノッチの先端にあるように工夫しておく。この後に給水槽その他と筒とを図-3のように連結して、砂柱の上面上に22~23.5cmの範囲内で一定水頭を作用させつつ浸透を行なわせる。浸透開始と同時に自記計器を作動させるは勿論、浸潤前線の位置、給水槽の水面の位置、毛管水の上面の位置、受水用容器からの流出量などを測定する。この報告では豊浦産標準砂を用いた。

4. 実験結果とその考察

(1) 土壌間げき空気の圧縮状態

図-4、図-5は実験結果の一部を自記紙から書き直したものであり、前者は前線から下の土壌間げき内の空気は2段階で圧縮された場合であり、後者は空気圧測定用のピックアップと自記圧力計を結ぶチューブ内に水が侵入した結果、空気圧が尻下りとなったものであるが、9回の実験中、これら2回のもので以外はいずれも浸透開始とともに各点の空気圧がいっせいに上昇しある一定値をとり、時間の経過中もその値を維持した。これらの結果から見ると砂の場合で、大きな給水量がその上面に一時にかかるとき、砂の先行含水量が非常に小さいと、空気圧は前線下のどの点をとってもほぼ同じで一定値が前線の進行中維持されるものと解される。しかもその値は砂の先行含水量に対応する soil suction に相当する水量を超過することはなく、表面の水溜りの水深や給水状態、下面の状態、砂の填充状態や先行含水量によって大きく影響される。

(2) 浸透水量、流出水量の関係

図-6、図-7はそれぞれ図-4、図-5の実験に対応する標記の諸水量を示したものである。これらの図ではいずれも流出水量の hyetgraph に特徴がある。上からの浸透開始とともに毛管水帯の上の土壌間げき空気が圧縮されるに応じて平衡を失って降下

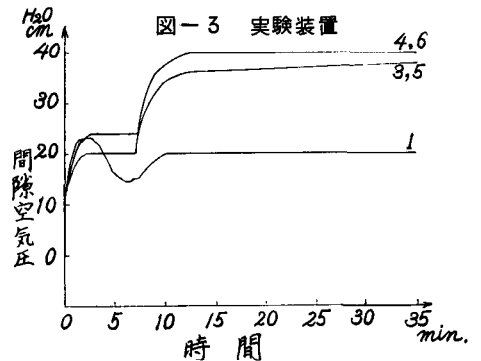
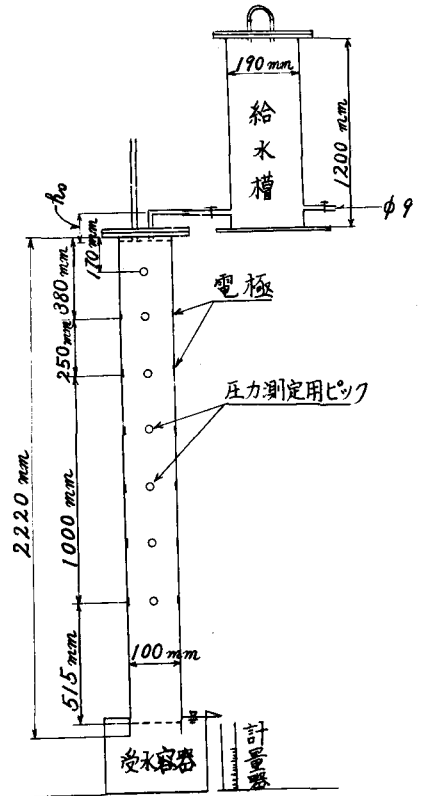


図-4 空気圧の時間変化

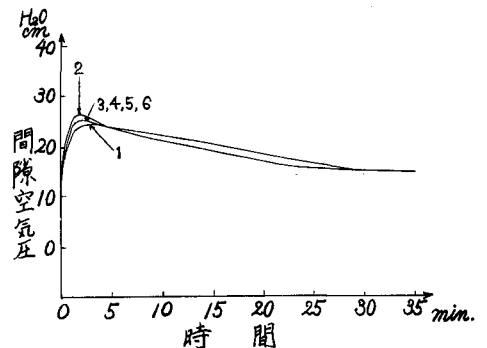


図-5 空気圧の時間変化

し始めるわけで、最初に最大流量が始まり時間の経過とともに減るわけである。図に曲線で示したものは式 (11) などを用いて求めた計算値である。ところが実験値は受水用容器内での貯溜が行なわれた結果、かなり流出量の hyetograph の方が peak がおくて裾を引いたようなものになっている。しかし流出量全体は実験値も理論値もあまり変わらないようである。図-6 の方は容器内での貯溜は比較的少なかったのに対し、図-7 の場合はかなり大きいものとなっている。また後者の場合は前者の場合に比し間げき空気の圧縮の程度が少なかった結果、

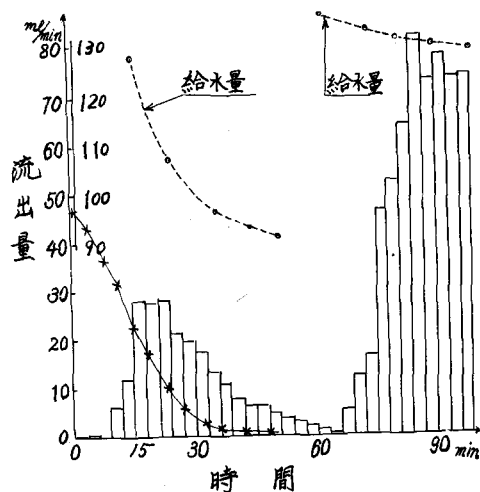


図-6 浸透量、流出量の時間変化

上からの浸透流がよりはやく毛管水の上の境界に追いつき、毛管水の流量がてい減しきっていないうちに上からの浸透流量が加わって下から流出している。上からの浸透水量は浸透開始時において理論的には無限大であるが次第に減して、一定値に漸近してくる。この砂柱表面から流入する浸透量に関しては計算値と理論値はあまり変わらない。

上からの浸透水が下の毛管水に追いついてからの砂柱底からの流出量は地表面と地下水面の間に直線的に変化する一定のポテンシャル勾配に従って流れるが故に、追いつく直前の砂柱底からの流出量と給水槽からの流量の和よりは幾分小さくなる。これらの流量の計算に際しては

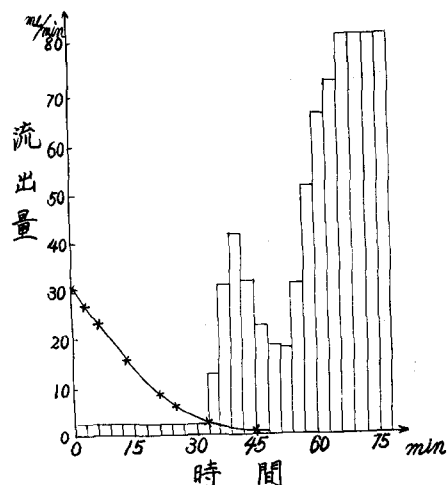


図-7 浸透量、流出量の時間変化

つぎに述べる浸潤前線の進行距離の計算に用いたと同じ data を用い、さらに h_s の値として試索的に求めたものを採用して計算を行なったのである。

(3) 浸潤前線の進行と毛管水の上の境界面の降下

浸潤前線の進行状態は空気乾燥砂の場合は透明な合成樹脂の填充用筒の外側から明らかにとらえることを得るが、先行含水量が相当存在している場合は電極を利用するか、色素を利用する方法をとった。毛管水の上の境界面が降下する状況は筒の外側からあまりよくは分らなかったが、砂の種類によってはかなりはっきりと外側から観察しうる場合もある。図-8、図-9はそれぞれ (2)、(3)、で述べた二実験のものである。前者の実験時には間げき空気圧の大きさが後者の時に比して大きかった結果浸潤前線の進行速度はやはり幾分おそい。 K の値は定常状態になった場合の浸透量から計算し、 h_c の値は空気乾燥砂柱の毛管上昇限界高を採用した。 h_a の値は実験結果を採用し、圧縮が2段階に行なわれるときはそれらの各段階と遷移区間とを適当な時間間隔に区切ってその間は圧力が一定とみな

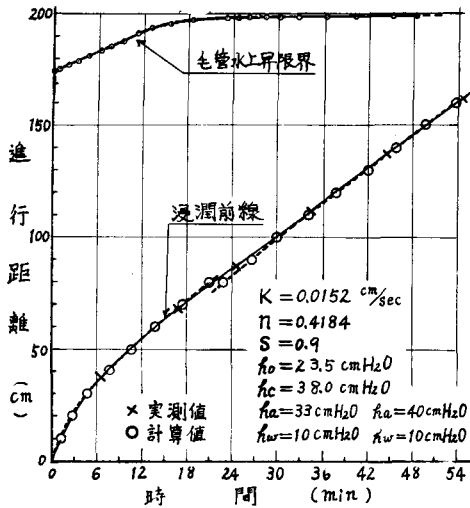


図-8 前線等の進行状態

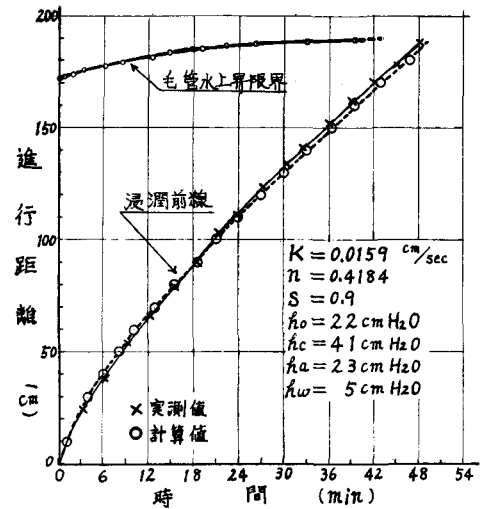


図-9 前線等の進行状態

した。 h_w および h_s の値は実験操作上これらの値を測定することは甚だ困難で、把握し得なかった
ので、試行的に数値を入れて計算し、実験値に最もよく適合する値を採用するという方法をとった。
図に記入した値を用いて得られた計算値はよく実験値と一致している。著者らが行った実験結果に
よれば h_a が大きい時には h_w , h_s も大きくなるようである。前線が毛管
水の上の境界に追いつく状況は図-8 を見れば明らかである。

(4) 浸潤前線の進行と飽和度

電気抵抗が含水量の変化に応じて変わることを利用して電極を用いて非
安常浸透時の砂の含水率すなわち飽和度を求める方法はうまくいかなかった
ので、前線の進行に伴って前線と砂の表面との間の砂柱の平均飽和度が
どのように変わるかを図-7 に対応する実験のときに、給水量と砂の間げ
き率とを用いて求めたものを図-10 に示す。最初入っていた空気はかな
り上と下とから排除されているが、小気泡は間げきに独立の形で留まっている。

5. 結 語

土壌条件、境界条件、給水条件、先行条件などを種々変えて目下実験を
行なっているが将来に亘って研究を続ける。学生谷川俊君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Shigeru Tanaka : An Approximate Theory concerning Infiltration, 神戸大学工学部研究報告 1960
- 2) 田中 茂 : 浸透並びに土砂輸送に関する研究, 浸透の部, 建設工学研究所報告 No. 2 1961
- 3) 石原藤次郎・高木不折 : 雨水の浸透に関する実験的研究, 才 20 回土木学会年次学術講演会講演概要 1965
- 4) 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

1965

- 5) V. E. Hansen : Infiltration and Soil Water Movement during Irrigation, Soil Science

Vol. 79, No. 2, 1955

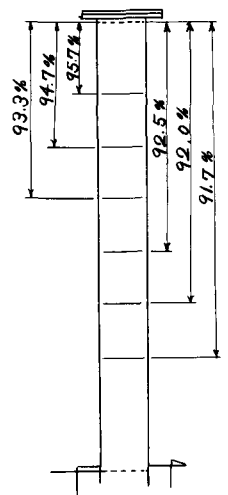


図-10 飽和度