

III-8 地中への不飽和非常浸透の研究

神大工学部 西員 工博 田 中 茂

1. 緒言 今日までに雨水や灌漑水などが地中へ浸透する問題についての多くの研究があるが、これらはいずれも最初地中の土壤空隙中に含まれていた空気が浸潤前線(wetting front)の進行とともに容易に逃げ去り、この前線の下方あるいは前方の土壤領域内の空気が何等圧縮を受けないという仮定を立てて進められてきたのである。また、土壤の浸透能より大きい強度の降雨や灌漑水が地表面に供給せられた場合の浸透がある時間継続した後急に停止したり、または急に弱い雨や少い供給量の灌漑水に変化した場合の浸透などについても従来ほとんど水理学的に研究せられたものがない状態である。そこで著者は水が地中に浸透する場合に現実によく遭遇する問題で、しかも今日までに研究がほとんど行われていなかった諸問題のうち最も重要と考えられるものを二、三とりあげて、理論的並びに実験的に研究を行って、従来あまりはつきりしなかった毛管水が重力水に変化する機構やその他注目すべき多くのことがらを明らかにし得たのでここに報告をする。

2. 理 論

(A) 下方の地下水面に接續している毛管水帯が平衡状態にある時に、新しく地表面から強雨による浸透が始まる場合の水の運動

図-1 に示すように原点 O , O' , 鉛直軸 Z , Z' をとる。地面から浸透が始まると直ちに浸潤前線と毛管水の上限界との間にはさまれた部分の土壤空隙内の空気は前線および上限界にそれぞれ毛管負圧が作用する結果圧縮される。この領域の空気の圧力 p_a を水頭で表したものを h_a とする。この時、毛管負圧の大きさを p_c , これを水頭で表したものを h_c とすると、上記内境界面に作用して水を引っぱるよう作用する負圧は結局 $p_c - p_a$ となる。

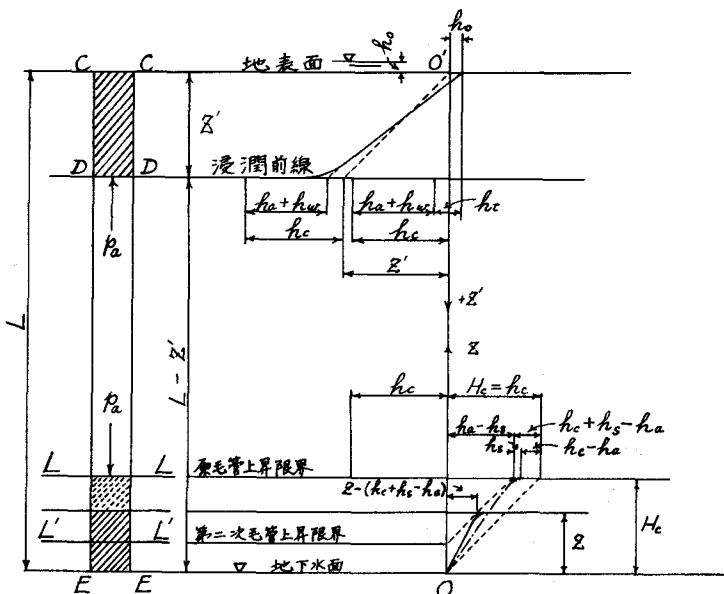


図-1 ポテンシャル線の図

著者はこれを「見掛けの毛管負圧」とよぶ。これは水頭で表すと $h_c - h_a$ となる。

地面から浸透が始まると同時に、下の毛管水帯の上限界の流れのポテンシャルは O から h_a に変化し、従って重力のポテンシャルと重力に逆って働く「みかけの毛管負圧」に相当する圧力のポテンシャル $h_c - h_a$ を合成した h_a となるが、この上限界に続く下のごく薄

い厚さの領域ではさらに空気と水との入りまじりによる損失水頭があり、他の部分では流れのポテンシャルが直線的に変化しているものと考える。毛管水帯の上の境界が下へさがってきて地下水面から高さ z という高さにきた場合を与える。なお h_a の値は時間および位置によつてほとんど変化しないものとする。

$$t = t, \quad z = z: \quad \text{ポテンシャル勾配} \quad \frac{d\Phi}{dz} = \frac{z - h_c + h_a - h_s}{z} \quad (1-1)$$

ただし $z \geq h_c - h_a + h_s$

Darcy の法則より $\frac{dQ}{dt} = -K \frac{d\Phi}{dz}$ (1-2)

毛管水帯の飽和度とそれに接續している上の領域のそれとが境界面の位置に関せず一定、従つてそれらの差 S も一定とすると、 n を土壤の間隙率として、

$$\frac{dz}{dt} = -K \frac{d\Phi}{dz} \cdot \frac{1}{nS} \quad (1-3)$$

従つて $\frac{dz}{dt} = -K \frac{z - (h_c - h_a + h_s)}{z} \cdot \frac{1}{nS}$ (1-4)

z と t とを左右両辺に分けて積分をして、 $t=0$ の時 $z=h_c$ という条件で積分常数を求めて整理すると、

$$t = \frac{nS}{K} \left\{ h_c - z + (h_c - h_a + h_s) \ln \frac{h_a - h_s}{z - (h_c - h_a + h_s)} \right\} \quad (1-5)$$

また $\frac{dQ}{dt} = K \left(1 - \frac{h_c - h_a + h_s}{z} \right)$ (1-6)

他方、地表面からの浸透水は前記毛管水帯の上境界面を追いかけ降下するが、前者の速度が後者のそれよりもはやいので、浸透開始後ある時間後には追いつくのである。

上からの前線の降下についてはつぎの式があてはまる。

$$t = \frac{nS'}{K'} \left\{ z' - h_c \ln \left(1 + \frac{z'}{h_c} \right) \right\} \quad (1-7)$$

ただし $h_c = h_0 + h_c - h_a - h_w$, h_w は浸潤領域における気水混合による水頭損失

浸透水と毛管水の座標を統一するために z' の代りに $L - z$ とおくと

$$t = \frac{nS'}{K'} \left\{ L - z - h_c \ln \left(1 + \frac{L - z}{h_c} \right) \right\} \quad (1-8)$$

式(1-5)と式(1-8)を等しいとおき、且つ $\frac{S'}{K'} = \frac{S}{K}$ とすると、

$$L - h_c = h_c \ln \left(1 + \frac{L - z}{h_c} \right) + (h_c - h_a + h_s) \ln \frac{h_a - h_s}{z - (h_c - h_a + h_s)} \quad (1-9)$$

(B) 強雨の浸透が突然に弱雨のそれに移つた場合の水の運動

強雨というのは土壤の浸透能より降雨強度の方が強い雨をさし、弱雨というのは逆に前者より後者の方が弱い雨をさす。

強雨による浸透と弱雨によるそれとの間の境界が時間とともに降下する。

いまこの境界面が図-2に示すように地下水面から高さ z の位置にある

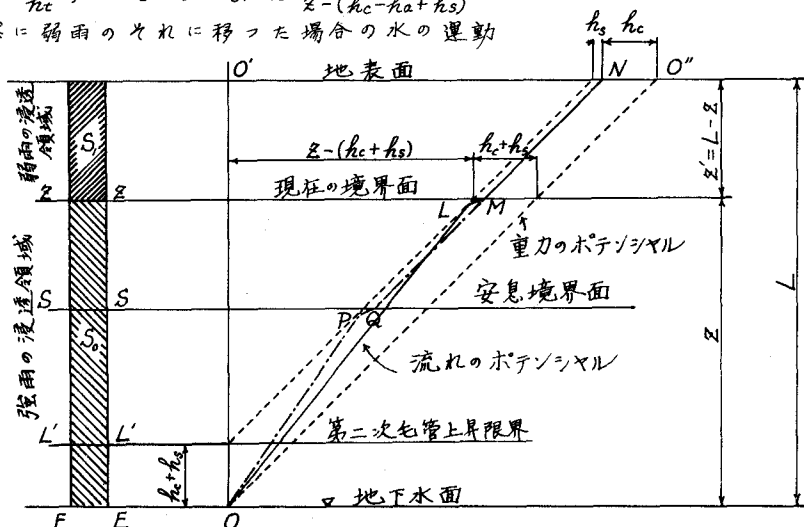


図-2 ポテンシャル線の図

時を考えると、これより上の領域に対する流れのポテンシャル勾配はこの領域における含水量がほぼ一定と考えられる故に重力のポテンシャル勾配と等しく、図-2では直線MNとなる。他方、この境界以下の領域に対しては、境界面に毛管負圧が働うき、またこの付近にエネルギー損失があるから、流れのポテンシャルの変化は図-2に示す線OLMとなる。このポテンシャル勾配は境界面が下るにつれて小さくなる。

上の領域に対する流量(単位面積、単位時間あたり)は

$$\frac{dQ_{\text{unsat}}}{dt} = K_{\text{unsat}} \quad (2-1)$$

下の領域に対する流量(単位面積、単位時間あたり)は

$$\frac{dQ}{dt} = K \left(1 - \frac{h_c + h_s}{z} \right) \quad (2-2)$$

従つてこの境界面は上記両流量が等しくなる位置まで降下して平衡を保つ。平衡を保った面を「安息境界面」と著者は名付ける。この位置を地下水面から高さ z_r とすると、

$$z_r = \frac{h_c + h_s}{1 - \frac{K_{\text{unsat}}}{K}} \quad (2-3)$$

$$\text{ただし } h_c + h_s \leq z \leq L$$

弱雨の浸透が始まつてから上記境界が安息境界面に到達するに要する時間 t_r は、

$$t_r = \frac{\pi S}{K} [L - (h_c + h_s)] \frac{K}{K - K_{\text{unsat}}} + (h_c + h_s) \ln \frac{L - (h_c + h_s)}{(h_c + h_s) K_{\text{unsat}} / (K - K_{\text{unsat}})} \quad (2-4)$$

(C) 「安息境界面」が落付いているところへ突然に強雨の浸透が始まつた場合の水の運動

強雨浸透が再び始まると同時に、各領域の水の運動に対する流れのポテンシャルは図-3の線O G H Iから瞬時的に線O J K Lに変化する。下の第1境界面が図に示す位置B-Bに到達した時に、上の第2境界面が図の位置D-Dに達したとすると、この時の各浸透領域における流れのポテンシャル線は図に示す線O

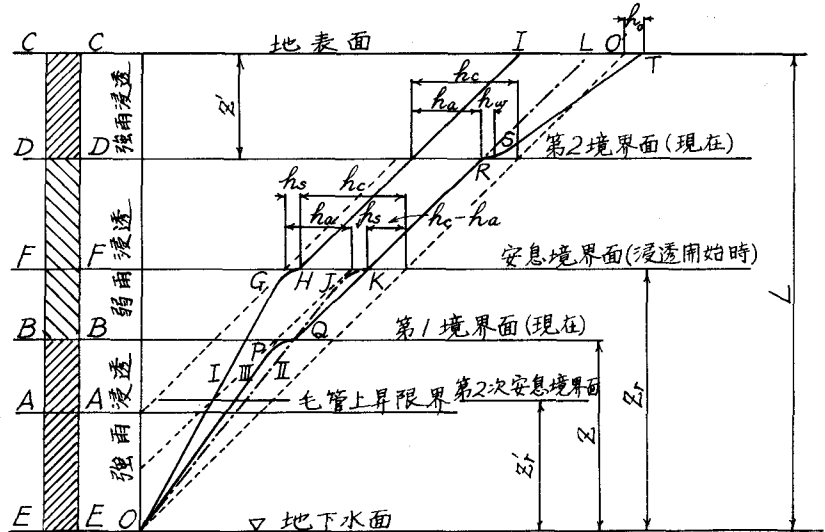


図-3 ポテンシャル線の図

P Q R S Tとなる。従つて、E~B領域、B~D領域、D~C領域の各領域内の水の下むきの運動を考えるとつぎのようになる。

E~B領域:

$$\frac{dQ}{dt} = K \left(1 - \frac{h_c + h_s - h_a}{z} \right) \quad (3-1)$$

$$\text{ただし } z_r \geq z \geq h_c + h_s - h_a$$

また

$$\left\{1 + \frac{h_c + h_s - h_a}{z(h_c + h_s - h_a)}\right\} dz = \frac{-K}{ns} dt \quad (3-2)$$

積分をして $t=0$ では $z = z_r$ という境界条件を入れて整理すると、

$$t = \frac{ns}{K} \left\{ z_r - z + (h_c + h_s - h_a) \ln \frac{z_r - (h_c + h_s - h_a)}{z - (h_c + h_s - h_a)} \right\} \quad (3-3)$$

なお、式-(3-2)の z はこの領域とこれに接する上の領域との飽和度の差である。

B ~ D 領域:

$$\frac{dQ_{unsat}}{dt} = K_{unsat} \quad (3-4)$$

D ~ C 領域:

z' の代りに $L - z$ を用いて座標を統一すると、

$$\frac{dQ}{dt} = K \left(1 + \frac{h_t}{L - z} \right) \quad (3-5)$$

$$\text{ただし } h_t = h_o + h_c - h_a - h_w$$

また

$$\left(1 - \frac{h_t}{L - z + h_t} \right) dz = \frac{-K}{ns} dt \quad (3-6)$$

積分をして $t=0$ では $z = L$ という境界条件を入れて整理すると、

$$t = \frac{ns}{K} \left\{ L - z - h_t \ln \left(1 + \frac{L - z}{h_t} \right) \right\} \quad (3-7)$$

なお、 z はこの領域とこれに接するすぐ下にある領域との飽和度の差である。

さて第2境界面の降下速度は第1境界面のそれに比してかなりはやいものと考えられる。従つて前者は後者にある位置で追いつくことになるのである。しかしこの時、地表面までの鉛直距離が充分に長く、この追いつくまでの時間がかなりかかる時は、第1境界面は下降して第2次安息境界面に至ると式-(3-1)および式-(3-2)で表わされる流量が等しくなつて停止するはずである。第1境界面が第2次安息境界面に到達する前に第2境界面に追いつかれるか、到達した後で第2境界面がおくれて到達するか、あるいは第1、第2両境界面が同時に第2次安息境界面に到達するかは条件による。因の z_r' の値は

$$z_r' = \frac{h_c + h_s - h_a}{1 - \frac{K_{unsat}}{K}} \quad (3-8)$$

$$\text{ただし } h_c + h_s - h_a \leq z_r' \leq z_r$$

第1境界面が z_r から z_r' に移るに要する時間 t' は式-(3-3)の z の値に式-(3-8)の z_r' の値を代入して求めることをうる。

3. 実験

著者はまた多くの実験を行つて2. で述べた著者の理論が妥当性を有することを確かめることができたが、これらの実験結果についておよび実験値と理論値との比較などについては講演の時に時間の許す限り述べたいと考えている。