

京都大学防災研究所

正員

○下島 肇一・石塚 安雄

日本工営 K.K.

正員

古谷 博司

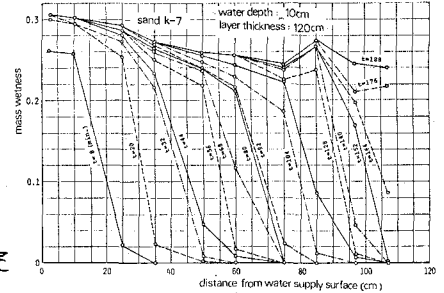
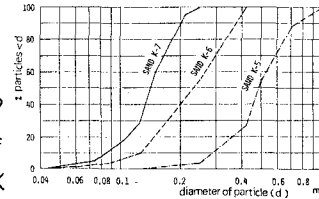
1. まえがき

下端が閉塞された有限の単一層に雨水が湛水浸透するとき、浸透が進むにつれ間隙空気は浸透水と自由に交換される(これを「閉塞浸透」とよび、そうでない場合を「開放浸透」とよぶ)。浸透面より空気が間歇的に放出される。この様ないわば不連続現象とそのまを解析することは難しいので、土壌水及び間隙空気の挙動を平均的にみて、この事実を連続現象として取扱えるが、また、この際水と空気の運動機構などの様に考えればよいかも水分の分布形状の変化過程に注目して検討する。

2. 実験結果の概要

図-1に示した3種類の気乾状態の砂を底部を密閉した円筒に一樣になす様に充填して単層砂柱を作り湛水浸透実験を行ったが、その概要は次の様である。即ち、浸透が進行するに従って、① wetting front はほぼ一定の水分分布形を保ち、かつほぼ一定の速度(u_w)をもって伝播し、従って wetting front の水分の最大値(θ_w)もほぼ一定に保持される。② こうした状態での浸透強度はほぼ一定となる。③ また、円筒下端での空気圧の時間的変化割合もほぼ一定かつ正符号である。次に水分分布形は④ 砂層表面付近に於て、水分の非常に大きな領域(これを「擬似飽和領域」とよぶ)と、それに続く遷移的領域の下層に水分量は比較的少ないがほぼ一樣な領域とが連なりなっている(図-2 参照)。

図-1. 粒度分布



以下では、基本式(1)(2)(3)は代り近似的に式(1)(11)を用いるが解析の便利のため、独立変数 θ ($B\theta$)に変換した式(14)(15)を用いる。

$$-\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [D \frac{\partial \theta}{\partial x} - K(1 - \frac{\partial \theta}{\partial x})] \quad \dots (14), \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = -A D / k \frac{\partial \theta}{\partial x} + A(1 - \epsilon) + (1 - A) \frac{\theta}{B} \quad \dots (15)$$

b. 近似解: ここで用いる解法は、開放浸透を対象とした開発された Barlange の方法の拡張である。即ち、まず Barlange に従って式(14)に注目し、 M と $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ を含んだ形で $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ の関係を求め、そこで $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ を式(15)に代入して、例えば後述の式(16)の様な水分分布 $\theta(B\theta, M)$ を求めると言う方法である。ここで才2次近似解(式(16)(17))のみを示すが、詳細は参考文献3)4)を参照されたい。

$$x = x_1 - \int_0^{\theta} \frac{D(1-A) \cdot d\theta}{K(1-A) - \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + (M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x}) I} \quad \dots (16), \quad -\frac{dM}{dt} = \int_0^{\theta} \frac{D(1-A) \cdot d\theta}{K(1-A) - \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + (M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x}) I} \quad \dots (17)$$

$$= \dots, \quad I = \int_0^{\theta} \frac{D(1-A) \cdot d\theta}{K(1-A) - \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + (M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x}) I}, \quad w_2 = D(1-A) / \{M + K(1-A)\}^2, \quad B_2(B) = B_2(B; M) = \int_0^{\theta} D(1-A) \cdot d\theta$$

$$B_2(B) = B_2(B; M) = \int_0^{\theta} \frac{D(1-A) \cdot d\theta}{K(1-A) - \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + (M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x}) I}, \quad Y = \{K(1-A) - \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + (M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x}) I\}^2$$

式(16)には本来 $G, B_2(B)$ の項が含まれるが、本実験の範囲では Y の項が無視出来る。すなわち、式(17)は式(16)が水の連続性を満足するための拘束条件となっており、ここで Barlange の方法の改良である Cisler の方法に従っている。

4. 才2次近似解の性質及びその解と実験値との比較

近似解に含まれる $A, K(1-A)$ と θ との関係は7秒について調べたものが図3である。

この図より、 $K(1-A)$ は $\theta = 0.36$ で最大値をもつことが判る。また、水分分布は $\theta < 0$ の状態にあるので式(1)から浸透強度(M)は、式(18)を満たすことが要求される。

$$-M > K(1-A) \quad \dots (18)$$

そこで、 $-M$ が減少する場合の水分の伝播特性を調べる。即ち、式(16)を t で偏微分して式(17)を考慮すると、伝播速度は式(19)となる。

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial x}{\partial t} + \theta \frac{\partial x}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{D(1-A)}{Y} \frac{\partial \theta}{\partial t} \left(\frac{B_2(B)}{B_2(B)} - \frac{\theta}{B_2(B)} \right) - \left\{ M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} \frac{\partial \theta}{\partial t} \left(\frac{B_2(B)}{B_2(B)} - \frac{\theta}{B_2(B)} \right) \quad \dots (19)$$

そこで本実験で測定された $\frac{\partial \theta}{\partial t} (=const)$ の値を式(19)に代入して計算したものが図4である。

この図より大略 θ_{lc} を境にして $\frac{\partial x}{\partial t}$ は2つの極限值に漸近し、wetting front の速度は $9.2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ となっていることが判る。この結果は実験事実①と説明するものであり、 $\theta_{lc} \approx 0.35, \theta_{lc} \approx 8.9 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ となっているので計算値とのほぼ一致をみることも判る。

なお、この極限值は式(19)より近似的に式(20)で与えられ、式(20)中の θ_{lc} は式(16)で $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$ となる θ の値であり、これは式(21)の関係を満たすものである。

$$\theta < \theta_{lc}; \quad \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{B_2(B) - \theta}{B_2(B)} \frac{\partial \theta}{\partial t} + 2 \frac{B_2(B)}{B_2(B)} \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial x} \rightarrow \theta_{lc} \approx 0.35, \quad \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{K(1-A)}{B_2(B)} \dots (20)$$

$$\theta > \theta_{lc}; \quad \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots (20)_2, \quad -M \approx (B_2(B) - \theta_{lc}) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{B_2(B)}{B_2(B)} K(1-A) \dots (21)$$

図5は式(16)に $\frac{\partial \theta}{\partial t} = const.$ とし、 $-M$ をパラメータとして水分分布の変化の様子を示したものである。この図より飽和領域に於てはほぼ一定のwetting front が形成されるという特性も判るが、図2と比較した場合、計算は実験値とよく表現していることが判る。なお、上述の極限状態での水分分布形は式(16)より近似的に求まり、 $\theta < \theta_{lc}$ の場合は式(22)で示される。本実験では $\theta_{lc} \approx 0.35, A \ll 1$ と考えられるので、式(22)はこの関係と式(21)を考慮した水分分布形は、すでに報告した実験事実①とほぼ一致する。

条件より導かれる水分分布形と一致し、かつその計算は実験での水分分布形とほぼ一致する。

$$x = x_1 - \int_0^{\theta} \frac{D(1-A) \cdot d\theta}{K(1-A) - \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + (M + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x}) I} \quad \dots (22)$$

<参考文献> 1) 石塚下島: 土木研究所報, 1976. 2) 石塚下島 谷; 土木研究所報, 1978. 3) Barlange: J. Soil & Water, vol. 113, 1972. 4) 石塚下島: 土木研究所報, 1978. 5) Cisler: Soil Sci., vol. 117, 1974. 6) Du Weist: Flow through porous media, 1961.

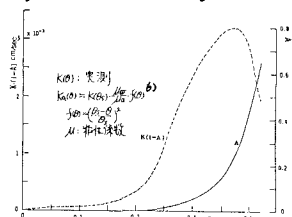


図3. $A, K(1-A)$ と θ の関係

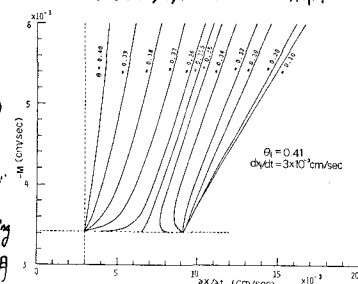


図4. $(\frac{dx}{dt})$ と $-M$ の関係

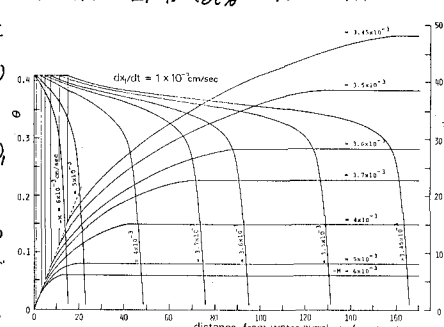


図5. 計算による水分分布形の変化(7秒毎)