

京大防災研究所 正員 下島栄一, 石栗安雄, 京大大学院 学生員 時松昌則

降雨終了後の浸透水の挙動を明確にするために、下端を閉じた円筒内に、単層及び二層に砂を詰め、湛水によってある時間鉛直浸透とした後の土壌水の移動と、閉塞空気の挙動に着目して実験的に調べたものである。下端を閉じた円筒で実験を行ったのは、いわば円筒領域内で水と空気が置換するという条件が成立するからである。

1. 実験方法及び使用砂

実験に使用した砂は図1に示した3種類で、これは内径18.5cm、長さ170cmの下端を閉じた円筒に、単層または二層(上層が粗砂で下層が細砂の場合及びその逆の場合)で砂を詰めて浸透場も形成した。実験はほぼ1cmの湛水深を保ちながらある時間給水と流れて初期状態を作り(このときの給水量と以下では水深で表わして給水深: I という)、給水停止後の土壌水分及び円筒下端での空気圧の測定を行った。なお、使用砂はすべて気乾状態のものを使用した。

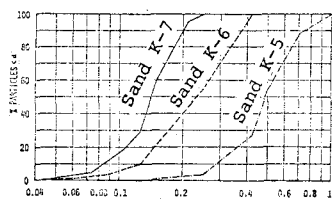


図1. 粒径分布

2. 実験結果の概要

図2から図5までは単層砂の場合の実験結果の一例で、図2は含水比分布の時間的変化の模様を示したものである。図3は脱水領域($x=0 \sim$ 約50cm)で同一含水比の

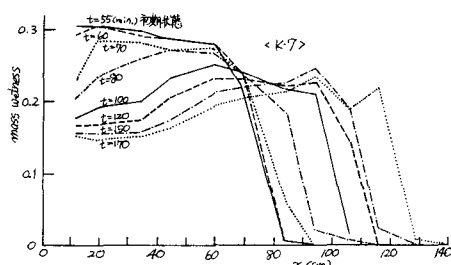


図2. 土壌水分のRedistribution

下降状況と空気圧の変化とともに図示したものであり、 $x(d:m)$ はほぼ直線的に変化している。いま ω は

$$\omega(t:m) = \omega_d(m) \cdot (t - T(m)) \dots (1)$$

suffix 'd' は脱水を意味する、と表わして $\omega_d(m)$, $T(m)$ を給水深 I を parameter とし、下端開放の場合とともに示したのが図4, 5である。

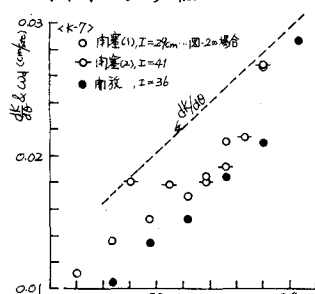


図4. $\omega_d, \theta \sim \theta$

図6, 7, 8は上層粗砂、下層細砂の場合の実験結果の一例で、それぞれ図2,

3, 4に対応している。図7に示した脱水領域は $x=0 \sim$ 約60cmの範囲を対象としたものである。

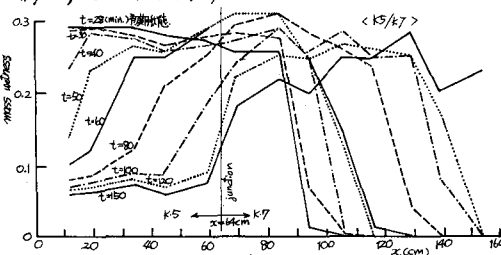


図6. 土壌水分のRedistribution

図4, 8中 ω は

した確率は、他の実験によって求めた不飽和透水係数 k から数値的に計算した $dk/d\theta$ (θ : 体積含水比) と示したもので、図4では給水深によって多少の相違はあるようであるが、 $dk/d\theta$ と $\omega_d(t)$ はほぼ同じ傾向を示しているが、図8

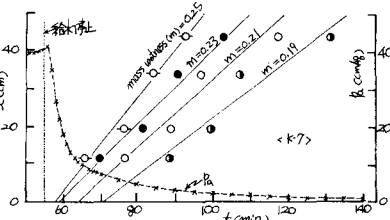


図3. 脱水の様子と空気圧の変化

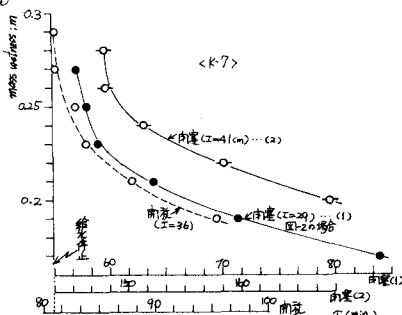


図5. $T(m) \sim m, (x=0 \sim$ 土壌水分の変化)

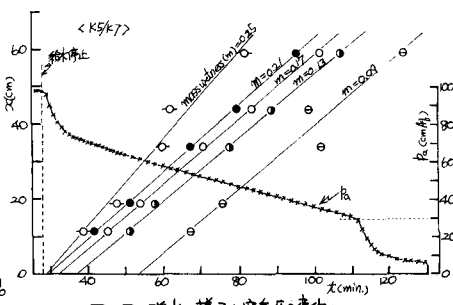


図7. 脱水の様子と空気圧の変化

では両者は全く違ふ傾向を示し、 $\omega_d(\theta)$ は含水比によってほとんど変化していない。
 図9はwetting frontの進行状況を示したもので、単層(図2の場合)、二層(図6の場合)のいずれの場合においても、給水停止後かなりの時間の間一定の速度でwetting frontが進行するという吸水状態が続く特性が見られる。

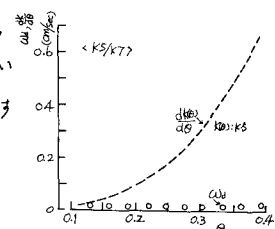


図-8. $\omega_d, \theta \sim \theta$

3. 考察

土壌水の移動の基礎式は、Darcy則及び連続式である。

$$V = -K(\theta) \cdot \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial x} + 1 + \frac{\partial \theta}{\partial x} \right\} \quad \dots \textcircled{2} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \dots \textcircled{3}$$

== 1. V : Darcy流速, θ : 体積含水比 (m に比例), K : 不飽和透水係数,
 ψ : 毛管ポテンシャル, p_a : 空隙空気圧 (ポテンシャル表示と仮定), x : 重力
 方向を正符号, t : 時間 である。 ψ も θ と吸水より脱水に移行する際の含
 水比 θ_d との関数とみえたと、②式より、④式となるが、さらに空気に対しても
 透過係数 K_a を用いてDarcy則式⑤を

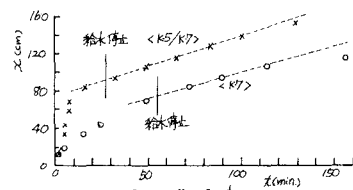


図-9. wetting frontの進行

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \left[-\frac{V}{K(\theta)} + 1 - \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] / \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} > 0 \quad \dots \textcircled{4} \quad V' = -K'(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \dots \textcircled{5}$$

仮定(重力項を無視)すると、脱水状態の θ の分布は⑥式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \geq 0 \text{ に応じて, } \frac{V}{K(\theta)} \leq \left\{ 1 - \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right\} - \frac{\partial \theta}{\partial x}, \text{ または, } \frac{V}{K(\theta)} - \frac{V'}{K'(\theta)} \leq 1 - \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \dots \textcircled{6}$$

とくに、砂層表面($x=0$)では給水停止後長時間経過すると、 $V=0$, $\frac{\partial \theta}{\partial x} \rightarrow 0$, $\frac{\partial \theta}{\partial x} \rightarrow 0$ と考えられるので、④式より⑦式の関係が与えられる。また、一般に脱水状態での θ の伝播速度 $\omega_d(\theta)$ は形式的に⑧式で表わされる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \dots \textcircled{7}, \quad \omega_d(\theta) = \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(K'(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + [\text{Hysteresisの項}] \quad \dots \textcircled{8}$$

なお、 $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$ の場合、[Hysteresisの項]=0

以上の誘導の過程では、給水停止直後にあった砂層中の水量及び空気量は、その後長時間ほぼ一定で、砂層表面を通しての水及び空気のfluxは近似的に零であるという条件が含まれていないと、及び空気圧勾配の存在、空気に対するDarcy則の適用等の仮定が入っていることも考慮しつつ、前記の実験事実について2,3考察しよう。

水と空気の置換機構: 図3と図7より、給水停止後の空気圧は単層の場合の方が速く減少し、しかも両者共に飽和に近い領域(図2では表面近傍、図6ではjunction近傍)の含水量が減少すると危険に減少していることがわかる。こうした特性は他の実験においても認められることであり、²⁾のことから、下端閉塞の砂への雨水浸透に際して、内部空気圧がかなりの上昇を示す原因が飽和に近い領域の形成にあり、また空気と水の置換に際しては、²⁾がその領域を通過する際にもっとも大きな抵抗を受けると結論づけられる。換言すると②~⑧式中の $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ の項は、上記のような飽和に近い領域では卓越するが、他ではそう大きくないと考えてよい。

脱水領域での土壌水分: I が大きければ給水停止時の空気圧は大きく、その低減速度は小さいという事実があるが、図5では I が大きき方が $\omega_d(\theta)$ が大きき値となっている。これは開放の場合と逆であるが、閉塞単層の場合は飽和に近い領域が表面付近に限られるためと考えられる。図4で脱水状態での θ の伝播速度が開放の場合とは同じであり、 $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ とOrder的に近いということは、図3から下部の高圧が比較的早く開放されているためで、⑧式よりすれば、右辺2項はほぼ零となり、開放の場合に近い状態に存在するためと考えられる。しかし、図8では単層の場合とかなり異なり、閉塞(粗砂/細砂)層の場合は、junction付近での空気置換の影響等が考えられる。

吸水領域: wetting frontの前進に伴い吸水領域が主とし、Youngsが指摘したように、frontはほぼ一定の θ で最大値を持つ(図2B V6)。

== 2. では直接に示れなかった閉塞(粗砂/細砂)層での実験結果は講演時に述べる。

<参考文献>

1) E.G. Youngs 他: WRR, Vol. 12, No. 5, 1976. 2) 石栗, 下島: 土木学会報告, 1976. 3) T.D. Biswas 他: WRR, Vol. 12, No. 3, 1966. 4) E.G. Youngs: Soil Sci., 86, 1958P.