

京都大学防災研究所 正員 下島栄一・石原安雄

1. はじめに：本文は、底面と閉じた円筒内に形成された上層が粗砂で下層が細砂の2層場への閉塞湛水浸透における擬似飽和域の発達について考察したものである。この擬似飽和域における浸透水と空隙空気との交換機構は浸透過程において非常に重要な役割を示すものである。

2. 実験結果の概要：図-1に示した種類の気乾状態の砂を用い、層境界面と砂層表面が水平となるようにして上記の円筒に全層厚が169cmの2層柱を作り、その表面に常にほぼ1cmの湛水深( $h_w$ )があるようにして行った実験の結果は既に報告したが、代表例を再記するとつぎのようである。図-2は上層厚( $L_u$ )が64cmの上層がK-6砂で下層がK-7砂の場合(K-6・K-7系と記す)の浸透強度( $q$ )と砂層底部での空気圧の変化を示す。なお図中の丁はwetting frontが層境界に達した時点を示す。図3(1),(2)はそれぞれ前図および $L_u=64$ cmでK-5・K-7系の場合の水分分布の変化を示す。以上の図などから、wetting frontが下層深く進むにつれて、(1)浸透強度、空気圧の変化割合はほぼ一定の値になる、(2)水分分布は、上層ではほぼ全域が擬似飽和域となり、下層では層境界面より下方に発達した擬似飽和域とその下方のwetting frontの移動に伴う不飽和域の2段構造になる、(3)wetting frontはほぼ一定の形状と速度で移動する、という浸透特性が認められる。

3. 考察：以下では2.で示した浸透特性が成立するような状況を対象として擬似飽和域の存在範囲を検討する。その際、現象は空隙空気の同様の外層への放出に伴って不連続となるが、これを平均的にみて連続現象とみなす。まず図-4の水分分布の模式図に示したようにx軸と浸透面と原点に重力方向を正符号にとり、上層全域および下層のある深さ( $x=L_u+x_{i1}$ )まで擬似飽和域が存在するものとする。上層と下層の同域における水と空気の運動がDarcy則的表現に従うとすると、層境界で、水の流量流速( $v$ )と空気の流量流速( $v_a$ )は連続するのをそれぞれ①、②となる。

$$v_j = k_w \left(1 - \frac{p_{aj} - p_{0j}}{\alpha_{u1}}\right) = k_i \left(1 - \frac{p_{0j} - p_{0i}}{\alpha_{i1}}\right) \quad \text{①}, \quad v_{aj} = k_{aw} \frac{p_{aj} - p_{0j}}{\alpha_{u1}} = k_{ai} \frac{p_{0j} - p_{0i}}{\alpha_{i1}} \quad \text{②}$$

$\alpha = F$ ,  $p_{0j}$ ,  $p_{0i}$ ：水と空気の圧力ポテンシャル、添字0, j, i;  $x=0$ ,  $L_u (=x_{u1})$ ,  $L_u+x_{i1}$ での値,  $k, k_a$ ：透水係数, 透気係数に対応するもの, 添字u, i; 上層, 下層での値(図4参照)。また、式①、式②はそれぞれ式③、式④で表わせる。

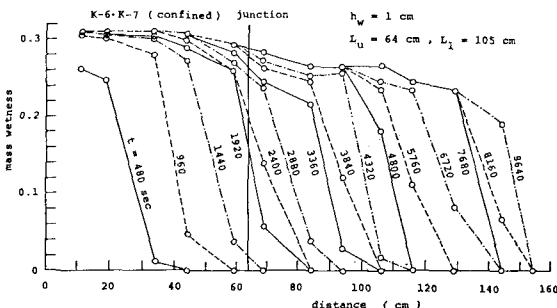


図3(1). 水分分布の時間変化 (K-6・K-7系)

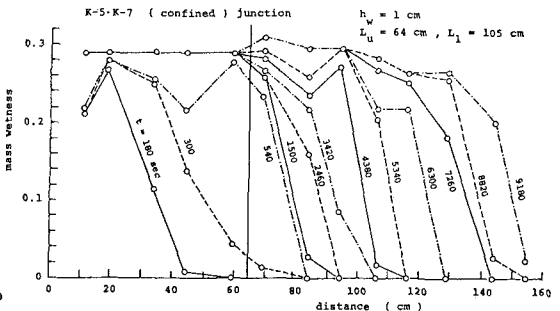


図3(2). 水分分布の時間変化 (K-5・K-7系)

$$v_j = \frac{x_{u1} + x_{l1} + p_{w0} - p_{w2}}{x_{u1}/k_u + x_{l1}/k_l} \quad \dots (3)$$

$$v_{0j} = - \frac{p_{w2} - p_{w0}}{x_{u1}/k_u + x_{l1}/k_l} \quad \dots (4)$$

== である、 $v_{0j} = -r(\alpha_r) v_j \dots (5)$ ,  $p_{w2} = p_{w2} - p_{w2} + p_{w2} = \psi_{l2} + p_{w2} \dots (6)$  とおき、式(6)を考慮して式(5)へ式(3), 式(4)を代入すると次式となる。

$$p_{w2} = (1 - \alpha_r^*) (x_{u1} + x_{l1}) - (1 - \alpha_r^*) \psi_{l2} + \alpha_r^* p_{w0} + (1 - \alpha_r^*) p_{w0} \quad \dots (7)$$

$$== \text{に、} 1/\alpha_r^* = 1 + r \frac{k_l}{k_u} \frac{x_{l1} + (k_{0l}/k_{0u}) \cdot x_{u1}}{x_{l1} + (k_l/k_u) \cdot x_{u1}} \quad \dots (8)$$

$\alpha_r^*$  とおきのように考える。単層による片側基本浸透(以下単層の場合と呼ぶ)の考察によると、(i) 擬似飽和域の体積含水比( $\theta$ ) はほぼ90%飽和の状態( $\theta = \theta_1$ )にあり、不飽和透水係数と  $k(\theta)$  と記すと  $\hat{k}$  は  $k(\theta_1)$  とほぼ代替できる、(ii) 透気係数  $k_a(\theta)$  は、

$$k_a(\theta) = k_a(\mu_w/\mu_a) \Phi(\theta) \quad \dots (9) \quad == \text{に } k_a: \text{飽和透水係数, } \mu_w, \mu_a: \text{水, 空気の粘性係数, の関係で与えられるが,}$$

$\hat{k}_a$  は  $\hat{k}_a \approx k_a(\theta_1)/3$  とほぼなる、と仮定している。そこで、飽和体積含水比と  $\theta_0$  (図1の砂はほぼ0.46) と記すと、(i) を考慮して  $\hat{k}_l/\hat{k}_u \approx k_l(\theta_1)/k_u(\theta_1) \approx k_{0l}/k_{0u} \dots (10)$  と近似する。== には、 $\theta_{u1}, k_{0u}$ ; 上層での  $\theta_1, k_0$  に対応するもの、 $\theta_{l1}, k_{0l}$ ; 下層での  $\theta_1, k_0$  に対応するもの。また、上層と下層での  $\Phi(\theta)$  がほぼ等しいと仮定して

(ii) を考慮すると、 $\hat{k}_{0l}/\hat{k}_{0u} \approx k_{0l}(\theta_{l1})/k_{0u}(\theta_{u1}) \approx k_{0l}/k_{0u} \dots (11)$  となる。式(10), 式(11)を式(8)へ代入し、 $p_{w0} \approx p_{w0} \approx p_{w0} \dots (12)$  の関係を考慮すると、 $\alpha_r^*$  は  $\alpha_r^* \approx \hat{k}_u / (\hat{k}_{0l} + r \hat{k}_l) \dots (13)$  のように単純化される。

== である対象としている段階では  $r \approx 1 \dots (14)$  とおけるので、この場合の  $\alpha_r^*$  も  $\alpha_r^* \approx \alpha_r^*$  と記す。

さて、以上の関係をあわせて  $(1 - \alpha_r^*) \psi_{l2} \approx \psi_{le}$  (下層での water entry value とほぼ対応)  $\dots (15)$  の関係を式(3)に用い、同式を  $x_{l1}$  で整理するとつぎのようになる。なお、 $f = v_j$  である。

$$x_{l1} = \frac{-L_u (f c / \alpha_r^* \hat{k}_u - 1) - \psi_{le} / (1 - \alpha_r^*)}{f c / \alpha_r^* \hat{k}_l - 1} \quad \dots (16) \quad == \text{に、} f \rightarrow f_c \equiv [k_l (1 - A_u)]_c \quad \dots (17)$$

$$A_2 = k_l / (k_l + k_{0l})$$

$[k_l (1 - A_u)]_c$  は  $k_l (1 - A_u)$  の最大値を意味し、浸透深度  $f$  の下限値と与える(実験事実(2),(3)より)。  $x_{l1} > 0$  であるので、 $f_c \geq \alpha_r^* \hat{k}_l$  で  $f_c / \alpha_r^* \hat{k}_u \leq 1 - \psi_{le} / (1 - \alpha_r^*) L_u \dots (18)$  が条件となる。k-6・k-7系の場合  $f_c \approx 3.5 \times 10^3 \text{ cm/sec}$ ,  $\alpha_r^* \approx 0.3$ ,  $\hat{k}_l \approx 5.2 \times 10^3 \text{ cm/sec}$ ,  $\hat{k}_u \approx 1.6 \times 10^2 \text{ cm/sec}$  であり、k-5・k-7系の場合も同様式(18)の上の条件を満たす。

そこで、式(16)で与えた  $x_{l1}$  の特性を調べるために同式を  $\hat{k}_u, L_u$  で偏微分すると、それぞれ式(19), 式(20)となる。

$$\frac{\partial x_{l1}}{\partial \hat{k}_u} = \frac{L_u f_c}{\alpha_r^* \hat{k}_u^2 (f_c / \alpha_r^* \hat{k}_l - 1)} \quad \dots (19)$$

$$\frac{\partial x_{l1}}{\partial L_u} = - \frac{f_c / \alpha_r^* \hat{k}_u - 1}{f_c / \alpha_r^* \hat{k}_l - 1} \quad \dots (20)$$

式(19)は前述より、 $\partial x_{l1} / \partial \hat{k}_u > 0 \dots (21)$  となる。一方式(20)が  $\hat{k}_u > \hat{k}_l$  を考慮すると  $\alpha_r^* \hat{k}_u > f_c > \alpha_r^* \hat{k}_l$  で  $\partial x_{l1} / \partial L_u > 0 \dots (22)$ ,  $\alpha_r^* \hat{k}_u [1 - \psi_{le} / (1 - \alpha_r^*) L_u] > f_c > \alpha_r^* \hat{k}_l$  で  $\partial x_{l1} / \partial L_u < 0 \dots (22)$  となる。本実験では  $\partial x_{l1} / \partial L_u > 0$  となるが、 $x_{l1} / \partial L_u < 0$  が成立するときは上・下層の砂が非常に近い場合であろう。つまり、下層の砂による単層の場合の擬似飽和域の最大の厚さ( $x_{l1}$ )は式(23)で与えることが出来るので、式(16)から同式を差引くと式(24)となる。

$$x_{l1} = - \frac{\psi_{le} / (1 - \alpha_r^*)}{f_c / \alpha_r^* \hat{k}_l - 1} \quad \dots (23)$$

$$x_{l1} - x_{l1} = L_u \frac{1 - f_c / \alpha_r^* \hat{k}_u}{f_c / \alpha_r^* \hat{k}_l - 1} \quad \dots (24)$$

式(24)より、 $\alpha_r^* \hat{k}_u > f_c$  で  $x_{l1} > x_{l1} \dots (25)_1$ ,  $\alpha_r^* \hat{k}_u [1 - \psi_{le} / (1 - \alpha_r^*) L_u] > f_c > \alpha_r^* \hat{k}_l$  で  $x_{l1} < x_{l1} \dots (25)_2$  となる。本実験では  $x_{l1} > x_{l1}$  が成立するが、 $x_{l1} < x_{l1}$  のときは式(22)が成立する場合と同様である。

最後に、図3(1),(2)の水分分布に注目する。k-6・k-7系、k-5・k-7系での式(24)の右辺の値はそれぞれ0.2  $L_u$ , 0.7  $L_u$  となるが、 $x_{l1} \approx 20 \text{ cm}$  であるので  $L_u = 64 \text{ cm}$  とすると  $x_{l1} \approx 33 \text{ cm}, 64 \text{ cm}$  となる。これらの値は図3より予想される  $x_{l1}$  より20cm程度大きいが、 $L_u$  は固定(64cm)したときk-5・k-7系はk-6・k-7系より、またk-5・k-7系は下層の単層の場合より下層の擬似飽和域はよく発達しており、上記の理論的考察の妥当性が保証されたことになる。《参考文献》1) 石塚下島: 京大農研報, 1979, 2) 石塚下島: 京大農研報, 1982, 3) 石塚下島: 京大農研報, 1977.

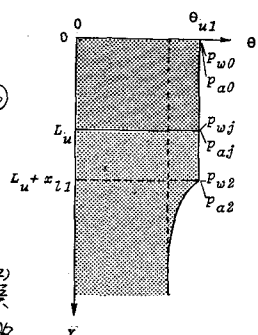


図4. 水分分布の模式図