

II-337 空気閉塞を伴う雨水浸透における間隙空气の放出について

京都大学防災研究所 正員 下島栄一
京都大学防災研究所 正員 石原安雄

1. はじめに : 雨が地面に降るとその全部あるいはその一部は地中の空気と交換しつつ浸透していく。この交換機構を解明して浸透現象を理解するため、底部を閉じた円筒に気乾状態の砂柱を作り、その上部より給水することによって実験を行った。その結果、湛水浸透の場合、空気は断続的にまた連続的に外界に放出され、また浸透水は浸透面直下の飽和に近い領域（これを擬似飽和域と呼んだ）とその下層に連なる比較的水分の小さな領域とも形成しつつ下層に移動していくことが判った。そこで、本文はこの擬似飽和域の形成や空气の放出機構を知るために簡単なモデル実験を行い、その結果を砂層浸透の場合に演繹して考察した結果の報告である。

2. 実験方法 : そのモデルは内径 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0 mm の気乾状態のまっすぐなガラス管を2本選び、それぞれ小さなU字形のガラス管に挿入して高さ約 130 cm となるU字管を作り鉛直に立てた。浸透流体として赤色に着色したグリセリンを用い、また実験に際しては常にU字管上に約 4 cm の液体 (h_f) があるようにした。計測は液体の移動とU字管の底部での空気圧について行い、それぞれ写真機と半導体方式の圧力変換器によった。

3. 実験結果 : 図-1 は内径 0.5 mm と 0.8 mm のU字管による結果であらう、2. 液体の移動距離 (x_f) と空気圧 (p) の時間変化と、さらに図-2 は空气が放出されている部分の空気圧変化の詳細を示している。この場合 0.8 mm の管より空气が放出されたが、以下では空气が放出される管の内径を d_2 、他方のものを d_1 と記す。これらの図と実験中の観察より次のことが判った。すなわち、① 実験の開始と同時に両方の管に液体が浸透し、その結果空気圧は急増する。② 時間とともに、 d_1 の管の液体は下層への移動を続けるが、 d_2 の管ではその移動が一且止り、その後上層に向って移動を始める。その間の空気圧は増加率が次第に減少し、ある時点より減少を始める。③ 上層に向った液体と気体との境界面が先端に達したとき、空気圧の急減とともに気泡が管の上層に形成され始め、それがあふれだしたとき気泡が放出される。それと同時に空気圧は急増するが、 d_1 の管の液体はそれまでの緩慢な移動より不連続的に速度を増して動き出す。④ 以下、同様の過程で気泡の形成・放出が繰返されるが、最初の気泡放出に比して、以後は比較的容易に放出される。なお、図-2 で示したように、気泡が形成される時点、放出される時点の空気圧を p_a , p_b とし、最初の気泡の場合は p_a に対応して p_{a1} と記す。

図-3 は種々の実験での p_{a1} の値とその際の d_2 を変数としてとりそれを黒丸で示し、また脱水過程の土柱法と同様な方法で求めた各径の管の毛管上昇高 (h_{cf}) = h_f を加えて水柱単位に換算した値 (p_a) を白丸で示したものである。この図で d_2 を固定したとき黒丸は種々の d_1 を有するが、 d_1 はほぼ実際なく p_{a1} は一定となり、また p_{a1} はほぼ p_a の値と一致することが判る。

次に p_a , p_b の気泡の放出間隔 (τ) と $d_1 = 2.0$ mm, $d_2 = 1.0$ mm の場合、 $d_1 = 2.0$ mm, $d_2 = 0.8$ mm の場合について

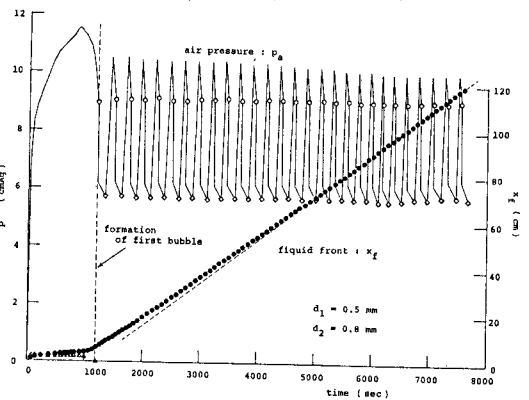


図-1. 液体の移動と空気圧の時間変化

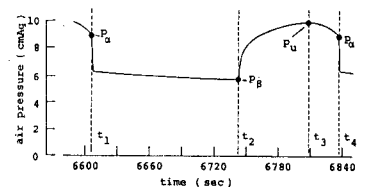


図-2. 空気圧変化の詳細図

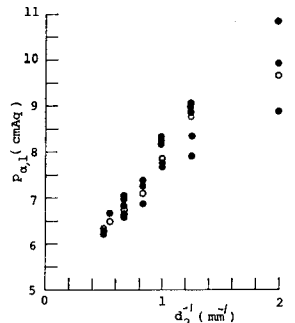


図-3. p_{a1} と d_2 の関係

て調べたのが図4、図5であり、時間原点を空気圧が p_{a1} となる点にとっている。 p_a , p_p の時間変化の形態は一般に図1、図4、図5の3つの場合に分類でき、それぞれ、(1) p_a は変化せずほぼ p_{a1} に等しく、 p_p もほぼ一定の場合、(2) p_a は時間とともに増大した後ほぼ一定値となるが、 p_p はほぼ一定の場合、(3) p_a は増大を続け、 p_p は一旦増大しその後減少する場合、である。まず管径の組合せを調べてみると、(1)の場合を黒丸で、(2)の場合を白丸で、(3)の場合を黒三角で示した図6のように、各場合の境界は必ずしも明確ではないが、(1)の場合は $d_2/d_1 \geq 1$ 、(3)の場合は $d_2/d_1 < 1$ 、(2)の場合は(1)と(3)の場合の中間的なもの、となっている。なお、図中の破線は 45° の線を示す。そこで、まず p_a について考える。(2)の場合は(1)の場合に比べ空気が放出される d_2 の管内の流体の移動が激しいために、気泡が形成され始める際の接触角は動的な影響²⁾が入ってくるためだと考えられる。一斉(3)の場合は明確ではないが、ある空気圧に対し d_2 の管の気泡の放出強度に限界があって、そのため過圧縮が続く空気圧が増大しつづけると考えられる。結局、実験結果より(1)、(2)の場合は $p_{a1} \approx p_a \approx p_p$ と考えよく、気泡の形成は静的な毛管上昇高によってほぼ決まるといってよいであろう。

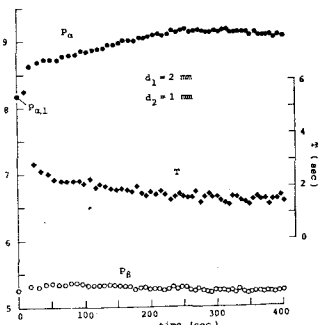


図4. p_a, p_p, p_i の時間変化

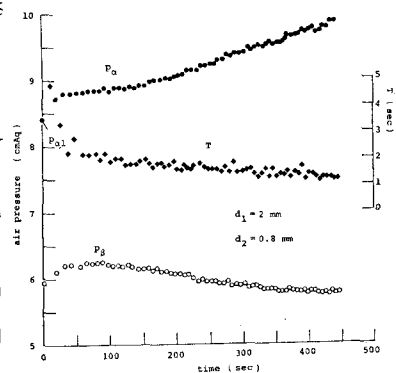


図5. p_a, p_p, p_i の時間変化

4. 結果の砂層浸透への適用：図7は、粒径が0.15mm程度のほぼ均一な砂を1.7m述べたようにして約120~170cmの砂柱を作り、その表面上に常に一定の湛水深(h_w)を作って実験を行った際の円筒下端での空気圧(p_{aL})から h_w を差し引いた値(p_{aL})の比較的浸透初期の変化を示している。これはより変化の様子は、(i)湛水深直後の急激な増大部分、(ii) p_{aL} が20~30cmHgとなつた以降の平均的にみて増加割合が小さくなる部分、(iii)(i)と(ii)の間の遷移的部分、とに区別できるが、その際の空気の放出は、(i)の場合はほとんど行なわれず、(ii)の場合は比較的活発に行われる、(iii)の場合は(iii)の場合程ではないが活発に行われる、という様子が観察されている。そこで空気圧の変化の様子を図1と比較すると、(i)は①、(ii)は④、(iii)は②に対応すると考えると、(ii)と(iii)を区別する p_{aL} の値はcapillary fringeの高さ(p_c)となるはずである。事実、村家砂の p_c の値を調べるとほぼ25cmHgとなっており、この p_{aL} の値と大略一致している。一斉、円筒の底部を大気に開放した上述と同様の湛水実験での観察

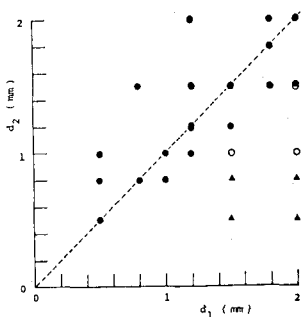


図6. p_a の形態区分図

によると、浸透初期には浸透面より空気が放出されること、また同じ砂での水分の再配分実験によると、擬似飽和域が消滅する際の p_{aL} はほぼ30cmHgになると、この領域は空気の放出に対し大きな抵抗となること、が判っている。以上のことから(iii)での空気放出の様子が理解でき、また(ii)で擬似飽和域が形成され、(ii)でこれが発達する段階であることが想定される。一旦この領域が形成された後は空気が連続的・間歇的に放出されるので、現象を連続現象として偏微分方程式を解くような場合には、擬似飽和域での空気の境界条件として(3)の場合を考える必要がなく、 p_a に対応するものとして p_c をとればよいと思われる。

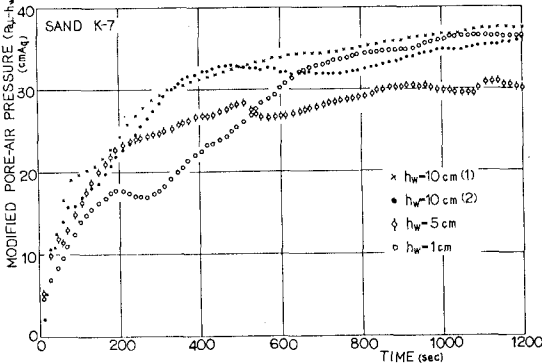


図7. 砂層湛水浸透の場合の空気圧変化

《参考文献》1) 石塚下島: 京大研報, 1979. 2) Ellis & Riddiford: J. Colloid & Interface Sci., 1967.