

鉛直砂柱内における自由水面の変動特性

○ 山口大学 正 深田三夫
山口大学 正 斎藤 隆

(1) 要約

鉛直砂柱内に自由水面をつくり、外部から正弦的な水位変動を与え、砂柱内の水圧の時間的な変化を追った。砂柱内の水圧の変動の振幅を求め、変動の減衰の様態を調べ、外部の攪乱が砂層内に伝播していく場合に毛管力の働いている領域が大きな役割を果たしていることを実験的に調べた。

(2) 概説

ほぼ水平とみなせる透水層内に自由水面が存在し(水面が大気圧と同じ)、外部から水面に攪乱を与えた時の透水層内への変動の伝播の解析には通常二次元砂層モデルを用い室内実験で調べられている。(海岸地下水の問題や、堤体内の非定常浸透流の問題)。ところが、豊浦標準砂程度の粒径が $d_{50} \sim 0.2\text{mm}$ の砂層を用いると、ある範囲の外部変動周期では、変動の内部への伝播が異常な速さで進行するという実験事実のため、⁽¹⁾⁽²⁾巨視的な意味での透水率($Q_A = kI$ で定義)が、同じ砂を用いた定水位透水実験で求まる値よりも一桁も大きい値の得られる。一方 $d_{50} = 1\text{mm}$ を越す砂層による実験ではその差異はほとんどみられない。この実験が正しいものならば次にはこの圧力の伝播の機構を明らかにする必要がある。筆者は上で述べたことの原因は、自由水面上部の毛管力作用領域にあると考え、ここでは鉛直に設置した砂柱を用い、その内部に自由表面をつくり、外部から振動を与え、周期を変えた実験を行ない圧力の時間的な変化を追った。

(3) 実験装置

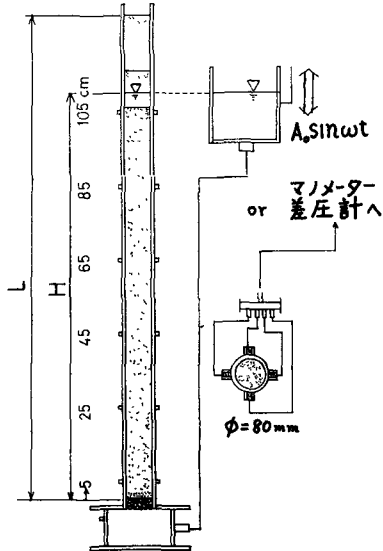
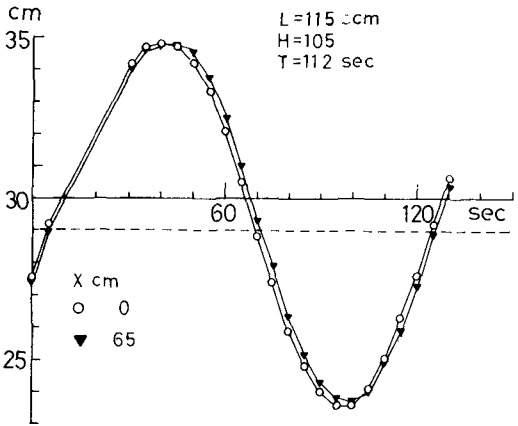
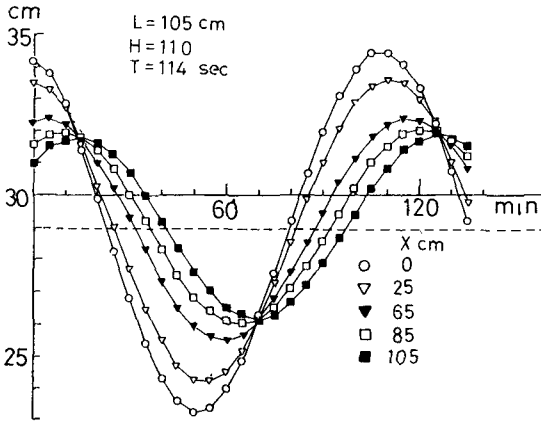


図-1 実験装置

表1 実験条件

No	水位変動中 心高さ H cm	砂層高 L cm	振幅 A_0 cm	H/L	周期 T
A	110	105	11.2	1.04	42~ 113 min
	120	117	15.0	1.03	15~60 sec
B	110	115	11.2	0.96	42~ 112 min
	109	117	15.0	0.93	15~60 sec
C	110	130	11.2	0.85	42~ 113 min
	109	130	15.1	0.84	15~60 sec

↓ 図 2(a) 図 2(b) ↓



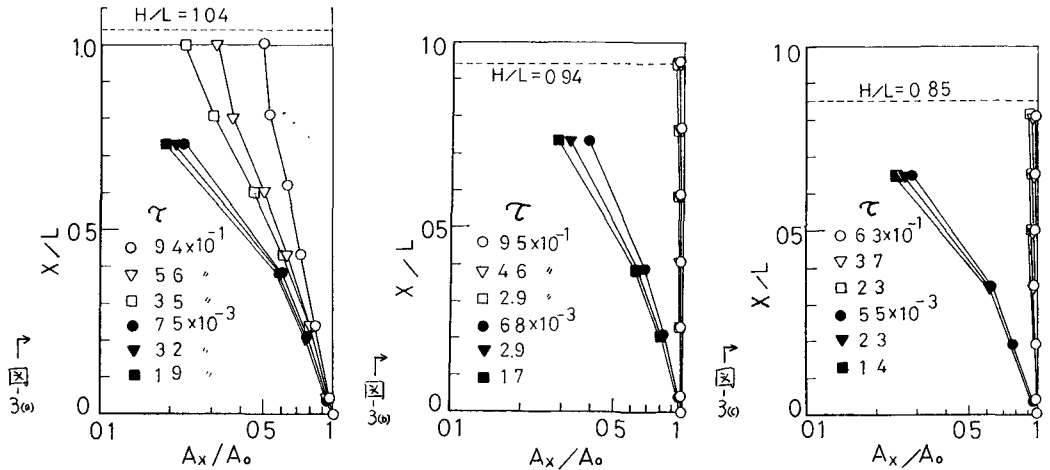


図1に示すように、内径8 cm、長さ150 cmの透明アクリルパイプを用い、下端をヘッドタンクにつなぎ、これをクランク減速機、ギヤモーターにつなぎ、ほぼ正弦的な水位変動を与えた。変動の周期は15秒～60秒、40分～120分の二通りつくることができた。パイプには25 cmおきに圧力端子を四ヶ所から取り平均を行なった。周期が短い時は差圧計に接続しレコーダーから読み、長周期の時には直接マンメーターにて圧力水頭を読みとった。用いた砂は $d_{50} = 0.33 \text{ mm}$ 、 $d_{30} = 0.40 \text{ mm}$ 、均等係数1.025の様な自然砂であり、 $\rho_s = 2.55$ 、パイプにつめこんだ状態での空隙率は0.4であった。また定水位透水実験の結果、透水性は $k = 5.6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であった。水温は(水道水)長周期の実験時には13℃、短周期の実験時には20℃であった。現象の定性的な説明のために用いる実験データを表1にまとめておく。

(4) 砂柱内の水位変動の特徴

図2aは自由表面が砂柱の上部にでた場合の水位変動を示す。この時砂柱内はほぼ飽和とみなせ、内部の流体移動はDarcyの法則に従っており、圧力変動は熱伝導型偏微分方程式に支配されている。無次元周期 $T/H/L = \tau$ (T : 周期 (sec), k : 透水性 (cm^2/sec), H : 水位変動高さ (cm), n : 空隙率, L : 砂層高さ) を導入して、砂柱が無限とみなせる状態 ($\tau \sim 0$) では、内部の圧力変動は τ を factor として位相が遅れ、また振幅は指数的に減衰していく。図2bは自由水面が砂柱内にある場合である。この時自由水面上部には毛管張力 $-P_{cc}$ の作用している領域 (C-Zone) とその上部の不飽和領域 (US-zone) が存在する。それぞれの領域で流体移動を表わす方程式は異なっている。この砂柱において C-zone の高さ h_{cc} を $h_{cc} = (0.45/d_{50})(L/\tau)^{1/2}$ によって計算すると $h_{cc} = 19 \text{ cm}$ となる。よってこの実験では砂柱内は D-zone (Darcy の法則の成立する領域) と C-zone のみということになる。一方毛管水面 ($-P_{cc}$ の作用している面) の上昇速度は Washburn 方程式などから計算することができる⁽⁴⁾。外的攪乱の変動速度 $d\epsilon/dt$ が、毛管上昇速度 $d\epsilon_{cc}/dt$ より小さい時、毛管力は D-zone の変動を増幅する方向に働き、変動の減衰はほとんどないと考えられる。図2bはその状態を示していると考えられる。

(5) 砂柱内の水位変動の振幅の特徴

(4)の後半の定性的な説明を続けるため、特徴的な振幅の減衰を表わす三組のデータを図3a, 3b, 3cにあげた。縦軸に(圧力端子位置/砂柱高さ)、横軸に振幅比を対数で表わし、無次元振動周期 τ でまとめた。図3aは(4)で説明した砂柱全体が D-zone の場合である。図3b, 3cは D-zone と C-zone とから成っているが図3cは上端付近で不飽和な状態が進んでいると考えられる。振動の周期が速くなると (τ が小さく) 砂柱内にいくら C-zone が存在していても自由水面の動きに追従しなくなる。つまり C-zone は D-zone の変動を増幅する向きには働かない。また C-zone の高さが高ければ、振幅の減衰は大きいとその差はそれほど顕著でない。

参考文献 (1) 深田, 山沢研究報告 vol 30, No 1, P.17~ (2) 武政, 農林支講演集, No 62, P.203~ (3) J Bear, *Dynamics of Fluids in Porous media* (Amsterd.) p 482
(4) J Szekeley; *J of Colloid and Interface Science* vol 35, No 2 1971, P 273~