# 室内締固め土における離水現象の解析

An analysis of water discharge from soil compacted in a mold

○古 賀　潔, 松 田　寛 之, 堀 川　丈 晴

KOGA Kiyoshi, MATSUDA Hiroyuki and HORIKAWA Takeharu

**１．はじめに**　室内締固め土に発生する過剰間隙水圧が経時的に低下する原因の一つとして離水現象があることを前報で示した。ここで離水とは土中に封入された間隙空気の高い圧力により間隙水が排水される現象を指す。本研究では離水の一次元支配方程式を誘導し解析を試みた。

**２．支配方程式の誘導**　以下を仮定する。a) 締固め供試体は柱体で上面が大気開放された排水面，底面は非排水面である。b) 間隙空気は土壌マトリクスに封入され高い圧力をもつ理想気体である。c) 間隙水と間隙空気の圧力は等しい。d) 間隙水の運動は Darcy 則に従う。e) 供試体の骨格は変形しない。f) 間隙空気は間隙水に一定速度で溶解する。また，以下の記号を用いる。$z$：鉛直上方を正にとった座標(cm)，$v$：間隙水の Darcy 流速(cm/s)，$\Delta z$：土の微小要素の高さ(cm)，断面積は 1cm$^2$，$a$：土の体積空気率（cm$^3$/cm$^3$），$n$：土の単位体積中の気体空気のモル数(mol/ cm$^3$)，$R$：ガス定数（cm$^3$･圧力単位/K/mol），$T$：絶対温度(K)，$h_P$：間隙水の圧力水頭(cm)，$h_e$：過剰間隙水圧の水頭(cm)，$h_s$：静水圧の水頭(cm)　$h_s=z_T - z$，$h_P = h_e+h_s$　ただし供試体上面の座標を $z_T$ とする，$t$：時間（sec），$k$：透水係数（cm/s）一定と仮定する。$v$，$a$，$n$，$h_P$，$h_e$ は $z$，$t$ の関数。

・<u>連続条件</u>　$\Delta t$ 秒中の要素からの正味の水の流出量は$\Delta v \cdot \Delta t$，また$\Delta t$ 秒中の要素中の空気体積の増加量は$\Delta a \cdot \Delta z$ と表わす。両者は相等しいので，以下の式が成り立つ。

$$\Delta v \cdot \Delta t = \frac{\partial v}{\partial z}\Delta z \cdot \Delta t \quad , \quad \Delta a \cdot \Delta z = \frac{\partial a}{\partial t}\Delta t \cdot \Delta z \quad , \quad \therefore \quad \boxed{\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial a}{\partial t}} \qquad \text{①連続条件}$$

・<u>透水条件</u>　$i$ を動水勾配とすると Darcy 則より，

$$v = k \cdot i = k\left(-\frac{\partial (h_P + z)}{\partial z}\right) = -k\frac{\partial (h_e + h_s + z)}{\partial z} = -k\frac{\partial (h_e + z_T - z + z)}{\partial z} \quad \therefore \quad \boxed{v = -k\frac{\partial h_e}{\partial z}} \qquad \text{②透水条件}$$

・<u>気体条件</u>　要素中の気体の絶対圧を $P$，体積を $V$ とすると，

$PV = \gamma_w h_P V = \gamma_w (h_e+h_s) V = (n \cdot \Delta z)RT$　また，$V = a \cdot \Delta z$ ゆえ，$\gamma_w (h_e+h_s)a = nRT$

ここで，空気の水への溶解を考慮して，$n$ を時間の関数として溶解速度係数 $c$ を導入し，

$$n(t) = n(0) \cdot (1 - ct) \qquad \text{すなわち，} \qquad \boxed{a = \frac{n(0)(1-ct)RT}{\gamma_w (h_e + h_s)}} \qquad \text{③気体条件}$$

・<u>支配方程式の作成</u>　②，③を①に代入し $h_s = z_T - z$ を用いて，整理すると次式が得られる。

$$\boxed{\frac{\partial h_e}{\partial t} = \frac{\gamma_w k}{n(0)RT}(h_e + z_T - z)^2 \frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2} - \frac{c(h_e + z_T - z)}{1 - ct}} \qquad \text{④支配方程式}$$

上式は過剰間隙水圧の水頭 $h_e$ を目的関数とし，$z$ と $t$ を独立変数とした支配方程式である。なお，$\gamma_w$，$k$，$R$，$T$，$z_T$，$c$ は定数である。④式は放物形偏微分方程式として知られ，差分法により数値解を求めることができる。$h_e$ の解は $h_P = h_e + z_T - z$ により圧力水頭 $h_P$ に換算できる。

離水量は③式に $h_e$ の解を適用して，供試体断面積$(78.56) \times \int_0^{z_T} [a(z,t) - a(z,0)]dz$　により計算できる。

岩手大学農学部　Faculty of Agriculture, Iwate University
ｷｰﾜｰﾄﾞ：締固め，間隙水圧，離水

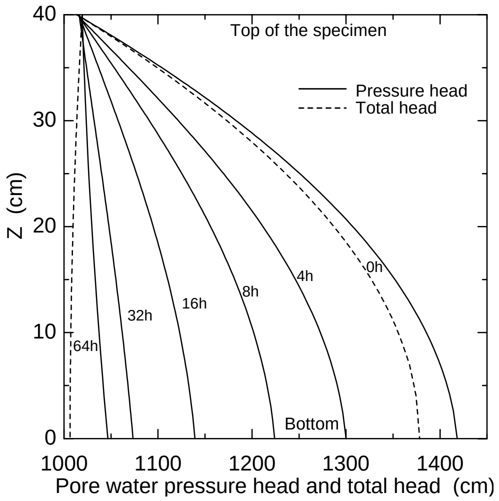


**Fig.1** Isochrone of the pressure head

**３．計算結果**　　計算は前報の Fig.2 以降（湛水有）と前報 Fig.3（湛水無）の２種類の実験を対象とし，差分法（陽解法，時間刻み 30 秒，座標刻み 2cm）によった。骨格の膨張が終了した時点を $t$=0 とし，初期条件はその時測定された供試体底面の水頭と供試体上面の水頭（実測大気圧より）を用いて底面（非排水面）の水頭勾配がゼロとなるように放物線分布を仮定した（**Fig.1** の 0h 破線）。上面の境界条件は各時間の大気圧の水頭を用いた。パラメータ $a$ は別途締固めた供試体の体積空気率，$c$ は前報 Fig.4 の初めの３日間の平均値，$k$ は湛水無の供試体を用いて離水実験終了後に実施した透水試験から求めた。

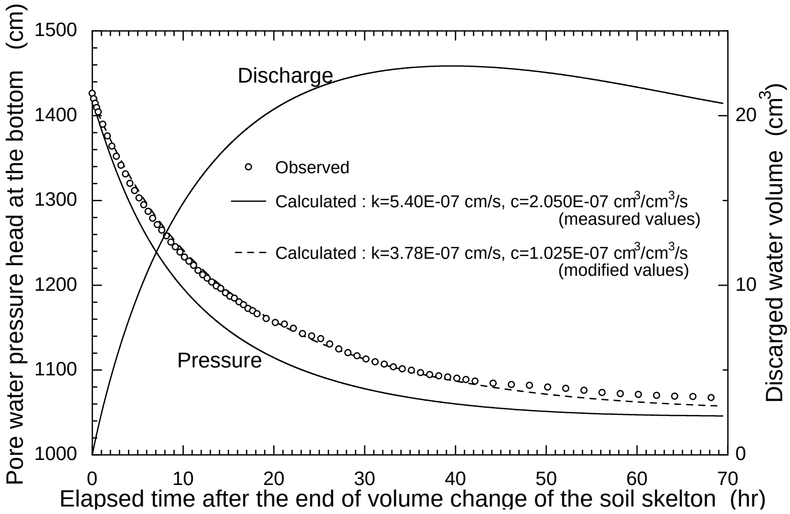


**Fig.2** Results under ponded condition

・**<u>湛水有</u>**　　計算された圧力水頭の等時曲線を **Fig.1** に示した。底面の圧力水頭と離水量の計算結果は **Fig.2** の実線で示すように測定結果の傾向と一致するものの隔たりが大きかった。良く一致したのは $k$ を 70%, $c$ を 50% に修正した破線の場合であった。

・**<u>湛水無</u>**　　結果を **Fig.3** に示した。離水量がピークに達してから以降は，湛水が無いため湛水有のような水の再侵入（破線）は起きない。また粘質土であるため空気の侵入も起きないので，ピーク以降は閉鎖系となる。そこでピーク以降は上面の動水勾配をゼロにして計算した。動水勾配をゼロにする時刻を理論によったのが実線，実験結果によったのが点線である。この供試体そのものの実測 $k$ を用いているため，圧力水頭の計算結果は実測と近くなった。離水量は実測よりやや過大に計算された。

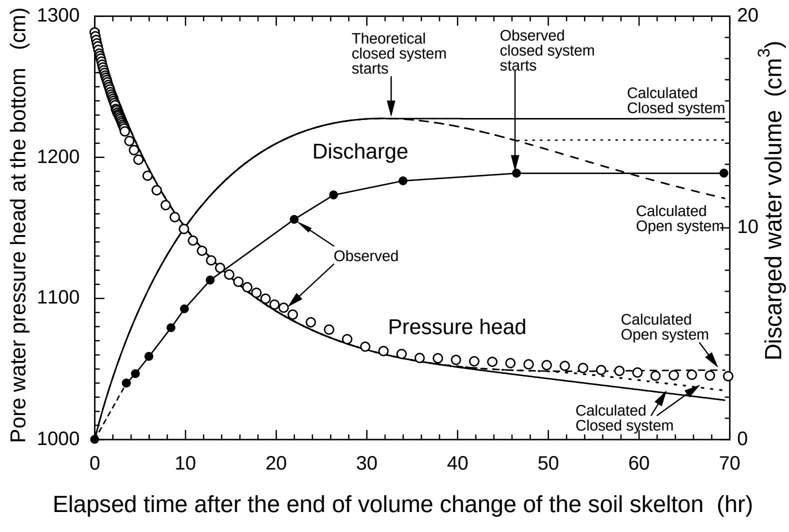


**Fig.3** Results under non-ponded condition

**４．おわりに**　　今回誘導した比較的単純な方程式により離水現象が表現できることが分かった。仮定 c) は実際とは異なるが，二つの圧力差が一定ならば問題はないと考えられる。

注)「前報」とは当大会発表の　松田，古賀，堀川「室内締固め土に発生する過剰間隙水圧の経時変化とその原因」を指す。