

防衛大学校(学)○日比野 忠史

同 上 (正) 山 口 晴幸

1. はじめに

降雨による斜面の崩壊、土中の毛管水の凍結による地盤の凍上、河川堤防やダム等の土構造物等で発生するパイピングやクイックサンド等はいずれも土と水との両者が密接に関連した代表的現象である。この様な現象を考察するために、著者らは、一連の報告^{1), 2), 3), 4)}に於て、サクシオン及び重力が毛管浸透現象に及ぼす影響について考察を加えた。本報告では不飽和土に関する水平方向及び鉛直方向についての解析式を誘導し、不飽和浸透係数・サクシオン力の推定を試みた。

2. 不飽和浸透方程式

土の浸透において不飽和透水係数は水の浸透状況を予測する重要な係数であるか、その値の測定は困難であり、その推定法も確立していない。そこで、著者らは透水係数に相当し、比較的容易に推定でき、簡単な毛管試験により測定できる浸透係数(K)という概念を提案した。また、この浸透係数を使った次の2種類の浸透方程式を導出した⁴⁾

(1) 一次元降下浸透方程式(重力による浸透方程式)

$$w(t, z) = w_0 - (w_0 - w_i) \exp(-nK\mu t) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \mu^k}{k!(k+1)!} z^k \quad (1)$$

ここで、 $w(t, z)$; 任意の時間(t), 位置(z)における含水比、 w_0 ; 飽和含水比、 w_i ; 初期含水比、 n ; 間隙率、 K ; 不飽和浸透係数、 μ ; 実験係数

(2) 一次元水平浸透方程式(サクシオンによる浸透方程式)

$$w(t, x) = w_0 - (w_0 - w_i) \exp(\nu x^2 / 4 - a \nu t) \quad (2)$$

ここで、
$$a = \frac{4nf_0K}{w_0^2(1-n)g\rho_s} \quad (\text{cm}^2/\text{sec}) \quad (3)$$

$w(t, x)$; 任意の時間(t), 位置(x)における含水比、 ν ; 実験係数、 f_0 ; 最大サクシオン力、 g ; 重力定数、 ρ_s ; 土粒子の密度
なお、上の2つの式は次に示す基礎方程式から求められた。(1)式は(4)式を(2)式は(5)式を各々解いたものである。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = nK \left\{ 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) + z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -a(w_0 - w)^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + (w_0 - w) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right\} \quad (5)$$

3. 不飽和浸透係数及びサクシオン力の推定

不飽和浸透係数(K)の推定は、(1)式と浸透先端の浸透距離の経時変化曲線とのマッチングにより求めることができる。また、(2)式が境界条件(浸透先端での含水比は初期含水比)を満足する関係は、

$$F(t, x) = x^2 - at = 0 \quad (6)$$

であり、この関係と実験値とをマッチングする事により不飽和浸透係数(K)と最大サクシオン力(f_0)との関係が求められる。ここに於て(1)式と(2)式から求められる不飽和浸透係数の値が等しいと考えると、(2)式からもとまる $K \sim f_0$ 関係より最大サクシオン力(f_0)が計算される。また、サクシオン力(f)は含水比(w)が飽和含水比(w_0)で、0、乾燥状態($w=0\%$)で、 f_0 と考えられるので、

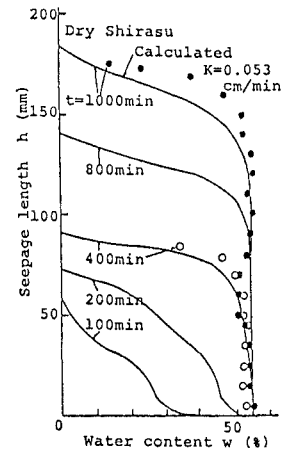


図1 含水比分布の経時変化
(鉛直下降毛管試験)

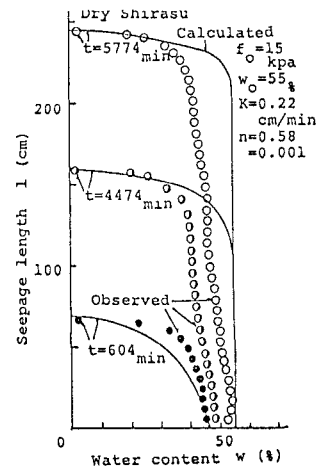


図2 含水比分布の経時変化
(水平毛管試験)

サクシオン式は、次式で表示することができる。

$$f = -f_0 \left\{ (w_0 - w) / w_0 \right\}^2 \quad (7)$$

4. 実験値との検証

図1, 2は重力方向及び水平方向への一次元浸透状況を(1)式からの計算値と実験値とを比較したものである。計算値は実験値の傾向を比較的良く現している。ここに示す実験値は、420 μm 以下に粒度調整した気乾燥しらす ($e=1.359 \sim 1.128$) を試料に用いた零水頭下での一次元鉛直下降毛管試験及び一次元水平毛管試験から得られた結果⁴⁾である。図1から気乾燥しらす (S_r = 約3%) の不飽和浸透係数 (K) の値は図3の実験値と(1)式から $K = 0.053$ (cm/min) と計算される。また、一次元水平浸透での浸透状況においては、(1)式から求められた K 値と図4から求めた a 値を (3)式に代入することにより最大サクシオン力 f_0 を計算すると $f_0 = 60$ (kpa) となる。この f_0 値と図4から各々の初期含水比 (w_i) に対する不飽和浸透係数 K は、図5の様に求まる。 K 値は w_i の増加に伴い増加する傾向を示し、飽和状態では実測された飽和透水係数の値 (●印) に収束して行くのがわかる。また、(7)式からサクシオン～含水比曲線を示すと図6のようになる。土の含水比状態が乾燥と飽和状態以外の状態でのサクシオン力と含水比の関係を浸透・毛管試験から直接的に測定することは困難である。サクシオン力をより具体的に測定するためには、不飽和土に対する強度試験が望まれよう。すなわち、サクシオンによる浸透あるいはサクシオンによる土の強度変化について考察することによりサクシオンをより具体的に推定することができるであろう。今後は、これらの点についてさらに研究を重ねたい。

参考文献

- 1) 山口晴幸・池永均:土の毛管特性,第22回土質工学研究発表会講演集,pp.181-184,1987.
- 2) 山口晴幸・日比野忠史・池永均:土の毛管特性(第2報),土木学会第42回年次学術講演会講演概要集,III-3,pp.410-411,1987.
- 3) 木暮敬二・山口晴幸・日比野忠史:毛管水による土の強度低下について,第17回日本道路会議論文集, No.232,1987.
- 4) 山口晴幸・日比野忠史:毛管水を含んだ土の土質工学的性質,不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム講演論文集,pp.207-216,1987

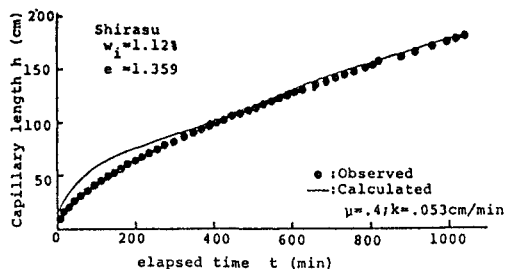


図3 毛管長と経過時間関係 (鉛直下降毛管試験)

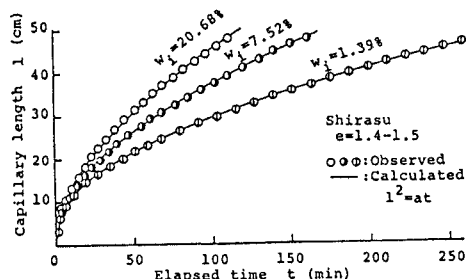


図4 毛管長と経過時間関係 (水平毛管試験)

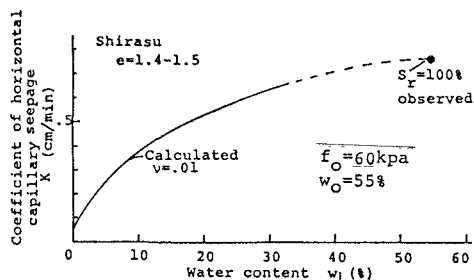


図5 浸透係数と含水比の関係

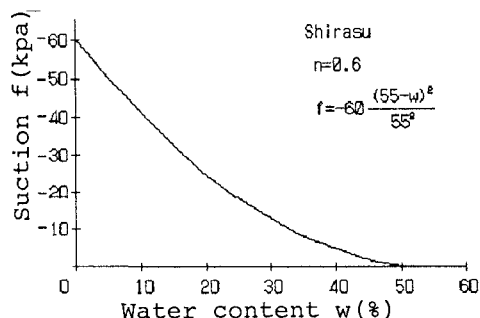


図6 サクシオン・含水比曲線