

第二章 渗流、流土和湿化

土中通常含有水，土中含水量的变化及土体中水的流动对土特性的影响非常大。有时这种影响可能会带来灾难。水对土特性影响的直观理解为：土的含水量小时，土比较硬，土中适当含水可使散粒土颗粒粘合在一起，使其具有一定的粘结强度，但当土的含水量过大时则会变软。当水在土中流动的比较急时，有些情况下，水会带着土颗粒一起流动，发生塌方、泥石流及流土等灾害。岩土工程的很多事故均与水有关，水对土的影响是一个绝对不可忽视的问题。本章首先以地下水面以下水的流动为中心进行讨论，然后讲述从地表面到地下水面这部分水的作用。

首先，怎样理解地下水的流动呢，水是在土的孔隙中流动，本章假定土颗粒骨架形成的孔隙是固定不变的。并且认为，在孔隙中流动的水是具有粘滞性的流体。也就是说，把土中水的流动，简单地看成是粘滞性的流体在土烧制成的陶磁管似的刚体的孔隙中流动。这种思考方法，在被称为达西定律的试验中反映出来。达西定律是土中水运动规律的最重要的公式。这个公式采用了“水是从水头（总水头）高的地方流向低处”这一水流的基本原理。根据达西定律和连续方程，再考虑边界条件，一般的渗流问题都可以得到解决。即，可以求出土中水的流量（渗流量）及土中水压力的分布。

而地下水位以上的水，也就是从地表面到地下水面范围内的水是怎样运动的呢？本章简单介绍由于水表面的张力引起的毛细作用，学习非饱和土性质和土体湿化的基本概念。

2.1 达西定律

一、贝努力定律

所谓贝努力定律是指水的流动符合能量守恒原理，如果忽略不计由摩擦等引起的能量损失，则贝努力定律可以用下式表示。

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{u}{\gamma_w} = h = \text{常数} \quad (2.1)$$

式中， $v^2/2g$ 是速度水头（ v ：流速， g ：重力加速度）， z 是位置水头（从基准面到计算点的高度）， u/γ_w 是压力水头（ u ：水压， γ_w ：水的重度），三者的和称为总水头，因为土中的水的流速小，速度水头项忽略不计时

$$z + \frac{u}{\gamma_w} = h \quad (2.2)$$

所以土中水流动的时候，是从位置水头 z 与压力水头 u/γ_w 的和，即总水头（称之为势） h 高的地方向低的地方流。常说的“水从高处向低处流”，在这里不只是位置水头 z ，

还应该加上压力水头 u/γ_w ，应该理解成为水从总水头（势） h 的高处向低处流。

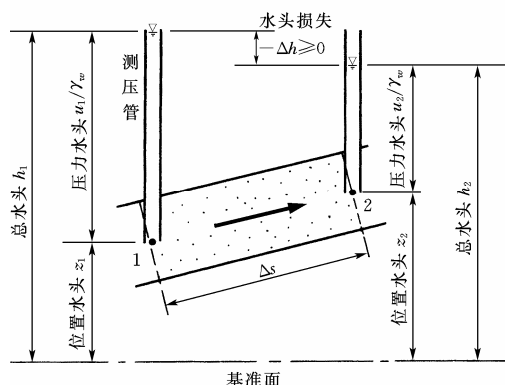


图 2.1 土中的水头和水的流动

在图 2.1 中,位置水头 $z_1 < z_2$, 可是总水头（势） $h_1 > h_2$, 所以, 水是从图中的点 1 流向点 2。图中点 1, 2 处立的管子叫做测压管, 从测压管的底部到水头的高度是压力水头, 从基准面（可以适当的确定）到计算点的高度是位置水头。压力水头可以用 u/γ_w 表示, 所以, 如果要求土中的水压力（孔隙水压） u , 可以设测压管, 根据测压管知道压力水头, 压力水头乘以水的重度 γ_w 就得到水压力。在图 2.1 中, $h_2 = h_1 + \Delta h$, 所以

$$\begin{aligned} -\Delta h &= h_1 - h_2 \\ &= (z_1 + u_1/\gamma_w) - (z_2 + u_2/\gamma_w) \end{aligned} \quad (2.3)$$

式中的 $-\Delta h (\geq 0)$ 称为水头损失, 是土中的水从点 1 流向点 2 的结果, 也是由于水与土颗粒之间的粘滞阻力产生的能量损失。

二、达西定律

在图 2.1 中, 水头损失 $-\Delta h$ 除以沿水流方向的流线长 Δs , 叫做水力坡度, 用 i 表示。

$$i = -\frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (2.4)$$

水力坡度的含义是, 土中的水沿着流线方向每前进 Δs 的距离, 就要有 $-\Delta h$ 的水头损失. 达西通过实验发现, 当水流是层流的时候, 水力坡度 i 与土中水的流速 v 之间有一定的比例关系, 这个比例系数用 k 表示, 称这个关系为达西定理。

$$v = ki = k\left(-\frac{\Delta h}{\Delta s}\right) \quad (2.5)$$

式中的 k 叫做渗透系数, 表示土中水流过的难易程度。对于渗透系数 k 值, 砂土的大, 粘土的小。

在图 2.1 中, 设与水的流动方向（流线）呈直角的试料的断面积为 A , 则单位时间的透水量由下式表示。

$$Q = vA = kiA \quad (2.6)$$

水是在土的孔隙中流动，孔隙的面积是 A_n ，实际上，有效的透水孔隙断面积比它还要小，没法确定。因此，在透水计算中，取全断面积 A ，孔隙断面积的影响已包含在渗透系数 k 中。

如前所述，式 (2.5) 是达西根据试验得出的公式，另外，斯拖克斯还把土中的孔隙简化为半径为 a 的圆管，导出了流过圆管的粘滞流体的运动方程式。下面给出该方程式

$$v = \frac{n\gamma_w a^2}{8\eta} \left(-\frac{\Delta h}{\Delta s} \right) \quad (2.7)$$

式中， n 是孔隙率， γ_w 是水的重度， η 是水的粘滞系数。式 (2.7) 与达西定律式 (2.5) 呈同一形式。

哈森根据砂的试验结果，提出了砂质土的渗透系数计算公式如下

$$k = (100 \sim 150) D_{10}^2 \quad (\text{cm/sec}) \quad (2.8)$$

式中 D_{10} 是有效半径，用 cm 表示。根据式 (2.7) 和式 (2.8)，也可以把圆管半径（空隙半径） a 与有效粒径 D_{10} 相互换算。式 (2.8) 与孔隙的大小无关，只是根据有效粒径求渗透系数，可以作为一个预测公式。

三、测定渗透系数

测定土的渗透系数的方法有，在试验室做的常水头渗透试验和变水头渗透试验，在现场做的现场抽水试验。

1. 常水头渗透试验

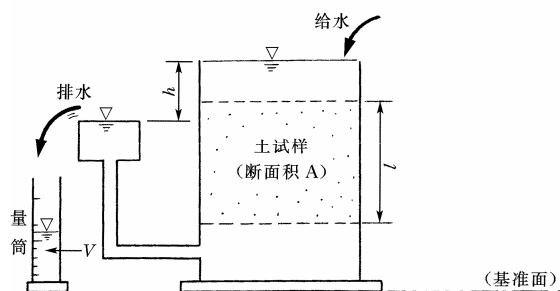


图 2.2 常水头渗透试验

该试验适用于渗透性大的粗颗粒土。试验装置如图 2.2 所示，圆柱体试料断面积为 A ，长度为 l ，保持水头差 h 不变，测定经过一定时间 t 的透水量是 V ，渗透系数 k 可根据式 (2.6) 导出如下：

$$Q = \frac{V}{t} = kiA = k \frac{h}{l} A$$

所以

$$k = \frac{V/t}{Ai} = \frac{Vl}{Aht} \quad (2.9)$$

例题 2.1 在图 2.2 所示的常水头渗透试验 ($h=45\text{cm}$, $l=25\text{cm}$) 中, 若土试样的断面积是 120cm^2 , 渗透系数是 $2.5 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$, 求 10sec 内土的透水量。

解

已知 $A=120\text{cm}^2$, $k=2.5 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$, $t=10\text{sec}$, $h=45\text{cm}$, $l=25\text{cm}$

根据常水头渗透试验透水量公式 (2.9), 得 10sec 内土的透水量为

$$V = k \frac{h}{l} At = 2.5 \times 10^{-2} \times \frac{45}{25} \times 120 \times 10 = 54 \text{ cm}^3$$

2. 变水头渗透试验

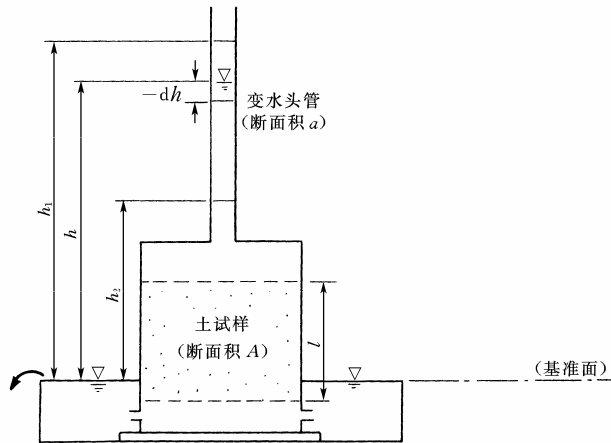


图 2.3 变水头渗透试验

该试验适用于渗透系数较小的细砂及粉砂。如图 2.3 所示, 圆柱体试样断面积为 A , 长度为 l , 在试验中测压管的水位在不断下降, 测定从时间 t_1 到 t_2 时测压管的水位 h_1 和 h_2 后, 渗透系数可以按照以下的方法求出。设在任意时刻测压管的水位为 h (变数), 水力坡降 $i=h/l$ 。在 dt 时间内, 断面积为 a 的测压管水位下降了 dh , 则

$$k \frac{h}{l} A dt = a(-dh)$$

$$k \frac{A}{l} \int_{t_1}^{t_2} dt = -a \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h}$$

$$k \frac{A}{l} (t_2 - t_1) = -a \lg \frac{h_2}{h_1} = a \lg \frac{h_1}{h_2}$$

所以

$$k = \frac{2.3al}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (2.10)$$

例题 2.2 进行变水头渗透试验，若土试样的断面积是 30cm^2 ，厚度是 5cm ，测压管的内径是 0.4cm 。试验中经过 $6\text{min}30\text{sec}$ 后，测压管中的水位从 145cm 下降到 132cm ，求该土的渗透系数 K 。

解

$$\text{已知 } A=30\text{cm}^2, l=5\text{cm}, a=3.14\times\left(\frac{0.4}{2}\right)^2=0.13\text{cm}^2, t_2-t_1=6\times 60+30=390\text{sec},$$

$$h_1=145\text{cm}, h_2=132\text{cm}.$$

根据变水头渗透试验渗透系数公式 (2.10)，得该土的渗透系数为

$$c k = \frac{2.3al}{A(t_2-t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.3\times 0.13\times 5}{30\times 390} \lg \frac{145}{132} = 5.21\times 10^{-6} \text{cm/s}$$

3. 现场抽水试验

现场抽水试验如图 2.4 所示，在现场设置一个抽水井（直径 15cm 以上）和两个以上的观测井。边抽水边观察水位情况，当单位时间从抽水井中抽出的水量稳定，并且抽水井及观测井中的水位稳定之后，根据单位时间的抽水量 Q 和抽水井及观测井的水位，可以按照以下方法求渗透系数 k 。这时，水力坡度近似地取为 $i \approx dh/dr$ ，断面积为 $A=2\pi rh$ （半径 r ，高度 h 的圆筒侧面积），由式 (2.6) 得

$$Q = k \frac{dh}{dr} (2\pi rh)$$

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi k \int_{h_1}^{h_2} h dh$$

$$Q \log_e \frac{r_2}{r_1} = \pi k (h_2^2 - h_1^2)$$

所以

$$k = \frac{2.3Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (2.11)$$

式中， h_1, h_2 分别是距抽水井距离为 r_1, r_2 的观测井的地下水位。

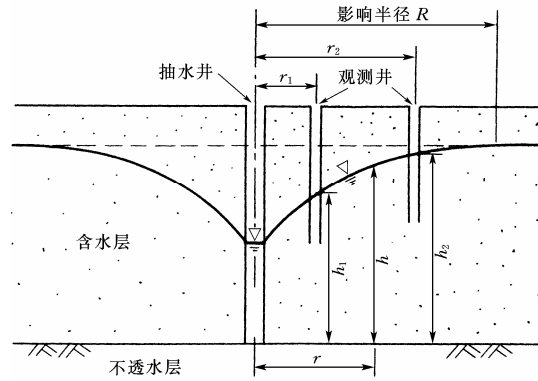


图 2.4 现场抽水试验

由图 2.4 可知，距抽水井距离越远，抽水对其地下水位的影响越小。从抽水井到地下水位不受影响位置的距离 R 叫影响半径。

对于在实验室求渗透系数的方法，由于取的土样很难和现场状态一致，或者由少量的试样很难代表现场复杂的地基状态，有时得不到可以信赖的结果，在这种情况下，有必要做现场抽水试验。

对于粘性土这样几乎不透水的土，常常采用第四章中讲的，利用压缩试验的结果间接地求出渗透系数。这是因为，从粘性土中挤出水的固结现象与粘性土中水流过的难易程度有关。

例题 2.3 某水平堆积而成的成层土的层厚自上而下分别为 H_1, H_2, \dots, H_n ，水平渗透系数分别是 $K_{x1}, K_{x2}, \dots, K_{xn}$ ，垂直渗透系数分别是 $K_{z1}, K_{z2}, \dots, K_{zn}$ ，如果上下面的总水头差是 Δh 。（1）试根据图 2.5 (a) 求水平透水时总水平渗透系数 K_x （提示：

$$i_x = i_{xi} (\Delta h = \Delta h_i), q_x = \sum_{i=1}^n q_{xi} \text{; (2) 试根据图 2.5 (b) 求垂直透水时总垂直渗透系}$$

$$\text{数 } K_z \text{ (提示: } q_z = q_{zi}, \Delta h = \sum_{i=1}^n \Delta h_i \text{);}$$

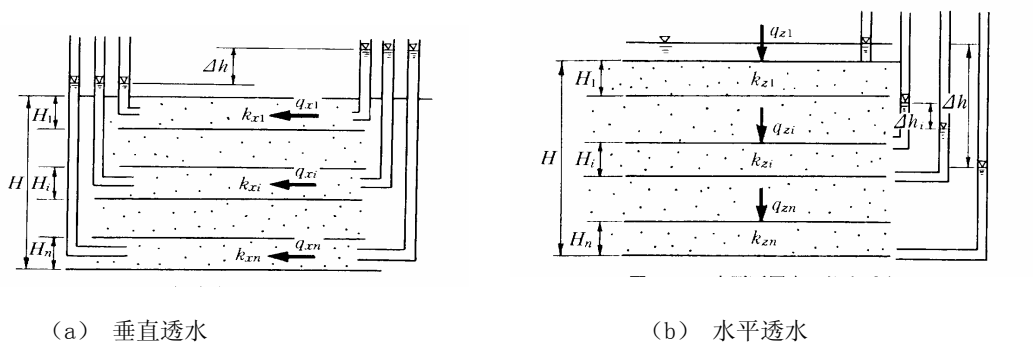


图 2.5 水在成层土中的渗流

解

(1) 水平透水时各层土的水力坡降（或水头差）相等，单位面积上的总水平透水量等于各层透水量之和，即

$$q_x = \sum_{i=1}^n q_{xi}$$

其中， $q_x = k_x i_x H$ ， $q_{xi} = k_{xi} i_{xi} H_i$

即

$$k_x i_x H = \sum_{i=1}^n k_{xi} i_{xi} H_i$$

将 $i_x = i_{xi}$ 代入，可得

$$k_x = \frac{\sum_{i=1}^n k_{xi} H_i}{H}$$

(2) 易知垂直透水时，各层土单位面积上的垂直透水量相等，有

$$q_z = q_{zi} = k_{zi} i_{zi} = k_{zi} \frac{\Delta h_i}{H_i}$$

各层水头的损失之和等于总水头差，即

$$\sum_{i=1}^n \Delta h_i = \sum_{i=1}^n q_z \frac{H_i}{k_{zi}} = \Delta h$$

即

$$q_z \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{k_{zi}} = \Delta h$$

所以

$$q_z = \frac{\Delta h}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{k_{zi}}}$$

又因为总垂直透水量为

$$q_z = k_z i_z = k_z \frac{\Delta h}{H}$$

故总垂直渗透系数为

$$k_z = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{k_{zi}}}$$

2.2 流网理论

一、拉普拉斯方程

1. 连续方程

在水力学中，设流量为 Q ，流速为 v ，断面积为 A ，得连续方程如下

$$Q = vA = \text{常数} \quad (\Delta Q = 0) \quad (2.12)$$

在图 2.6 表示的三维直角坐标系下，流量 Q 的 x ， y ， z 方向的分量分别为 Q_x ， Q_y ， Q_z ，式 (2.12) 的一般式可以表示如下

$$\Delta Q = \frac{\partial Q_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Delta z = 0 \quad (2.13)$$

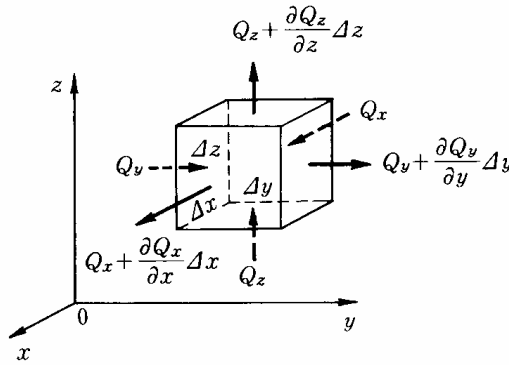


图 2.6 微元体中水的流动

如果把流速 v 的在 x ， y ， z 三个方向的分量分别用 v_x ， v_y ， v_z 表示，图 2.6 中微元体与 x 方向正交的断面积是 $\Delta y \Delta z$ ，与 y 方向正交的断面积是 $\Delta z \Delta x$ ，与 z 方向正交的断面积是 $\Delta x \Delta y$ ，则

$$Q_x = v_x \Delta y \Delta z, \quad Q_y = v_y \Delta z \Delta x, \quad Q_z = v_z \Delta x \Delta y \quad (2.14)$$

把式 (2.14) 代入到式 (2.13) 并整理得

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

这就是在三维直角坐标系下连续方程的一般式。并且，在式 (2.15) 中假定土和水都是不可压缩的。

2. 拉普拉斯方程

设 x ， y ， z 三个方向的流速分别是 v_x ， v_y ， v_z ，根据达西定律，式 (2.5) 可以写成

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.16)$$

把三维化的达西定律式 (2.16) 代入到式 (2.15) 得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.17)$$

若假定土中水的流动各向同性, ($k_x=k_y=k_z=k$) 及 k 为常数, 则式 (2.17) 可以写成

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.18)$$

这就是稳定渗流的基本方程式, 称为拉普拉斯方程。稳定渗流是指水头随时间无变化 (对时间的偏微分等于零), 式中 h 是前述的全水头。式 (2.18) 是把土的骨架作为刚体, 把孔隙水作为粘滞流体建立运动方程式得达西定律与连续方程相结合推导出的。根据式 (2.17)、(2.18) 等偏微分方程和适当的边界条件, 便可以求解地下水的流动状态。

二、等势线和流线

式 (2.18) 是三维空间中关于渗流的基本方程式, 对于 x 轴水平, z 轴垂直的 $x-z$ 平面, 可以得到下面的二维拉普拉斯方程。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.19)$$

另外, 正则函数定义如下。在复变函数 ω 的变域 S 内, 函数 $f(\omega)$ 具有与方向无关的微系数时, 称 $f(\omega)$ 关于 S 是正则的。分开实部、虚部得

$$\omega = x + iz \quad (i^2 = -1), \quad f(\omega) = \Phi(x, z) + i\Psi(x, z)$$

$f(\omega)$ 为正则的充分必要条件是, $\partial\Phi/\partial x, \partial\Phi/\partial z, \partial\Psi/\partial x, \partial\Psi/\partial z$ 都是连续的, 并且要求

$$\partial\Phi/\partial x = \partial\Psi/\partial z, \quad \partial\Phi/\partial z = -\partial\Psi/\partial x \quad (2.20)$$

成立, 把以上二式称为柯西. 利玛关系式。由式 (2.20) 得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} = 0 \\ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} &= -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

即, Φ 和 Ψ 都满足二维的拉普拉斯方程。如式 (2.19) 所示, 全水头 h 满足二维拉普拉斯方程, 所以可以取 $\Phi=h$ (或者 $\Psi=h$)。这时, 把 $\Phi=h$ 一定值的线叫做等势线。这时

$$\begin{aligned} d\Psi &= \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Psi}{\partial z} dz = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} dx + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz \\ &= -\frac{\partial h}{\partial z} dx + \frac{\partial h}{\partial x} dz = \frac{1}{k}(v_z dx - v_x dz) \end{aligned} \quad (2.22)$$

在 Ψ =常数的线上 $d\Psi=0$, 所以由式 (2.22) 得

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_{\Psi=\text{一定}} = \frac{v_z}{v_x} \quad (2.23)$$

式 (2.23) 表示 Ψ =常数线的切线向量方向与流速向量方向同方向 (与流动方向同向), 所以把 Ψ =常数的线称为流线, 把 Ψ 称之为流函数。

$$\begin{aligned}
d\Phi &= \frac{\partial\Phi}{\partial x}dx + \frac{\partial\Phi}{\partial z}dz = \frac{\partial h}{\partial x}dx + \frac{\partial h}{\partial z}dz \\
&= \frac{1}{k}(-v_x dx - v_z dz)
\end{aligned} \quad (2.24)$$

因为 $\Phi = h = \text{常数}$ 的线上 $d\Phi = 0$, 所以, 根据式 (2.24) 得

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_{\Phi=\text{一定}} = -\frac{v_x}{v_z} \quad (2.25)$$

所以, 流线切线的斜率 $(dz/dx)_{\Psi=\text{一定}}$ 与等势线切线的斜率 $(dz/dx)_{\Phi=\text{一定}}$ 相乘, 得

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_{\Psi=\text{一定}} \times \left(\frac{dz}{dx}\right)_{\Phi=\text{一定}} = \frac{v_z}{v_x} \times \left(-\frac{v_x}{v_z}\right) = -1 \quad (2.26)$$

由此证明了流线与等势线正交。所以二维拉普拉斯方程式 (2.19) 的解是两组相互正交的曲线群。一组是等势线群, 另一组是流线群 (参见式 (2.21), (2.26))。而且等势线的概念可以类似地理解为等高线。如果水从山顶上向下流, 与等高线正交的坡度最陡的方向就是水流方向。

三、流网——二维拉普拉斯方程的图解法

1. 正方形流网的性质

对于二维透水问题, 可以由式 (2.19), 再根据边界条件得到解答。可是只限于边界条件简单的情况才能获得严密解。边界条件复杂时, 可以用有限元法, 差分法等数值计算方法和模型实验等方法得到解答, 但都比较麻烦, 下面介绍一下简单的图解法。由流线和等势线组成的网格叫流网。如上节所述, 流线和等势线正交, 所以把网格在局部绘制成正方形是很方便的。这里, 所谓的正方形, 是指图 2.8 所示的那种与圆外切的方块形。为了了解这种正方形流网的性质, 如图 2.7 所示, 从流网中取出三个正方形网目 A, B, C。设 A 和 B 的内接圆直径分别是 d_1 , d_2 , 通过包含 A, B 在内的流线间的 (称为流管) 流量不变, 根据达西定律 $q=kiA$, 有

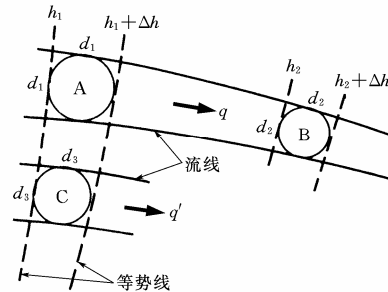


图 2.7 正方形流网的性质

$$q = k\left(-\frac{\Delta h}{d_1}\right)(d_1 \times 1) = k\left(-\frac{\Delta h'}{d_2}\right)(d_2 \times 1) \quad (2.27)$$

式中, $(d_1 \times 1)$ 和 $(d_2 \times 1)$ 表示与流线正交的断面积的单位厚度。由式 (2.27) 得 $\Delta h = \Delta h'$, 表示各正方形网格的水头损失相等 (性质 I)。这也可以理解为各等高线上水位相等。下面设 C 的内接圆直径为 d_3 , 比较通过相同的等势线中的两部分 A 和 B 的透水量

$$q = k \left(-\frac{\Delta h}{d_1} \right) (d_1 \times 1) = -k \times \Delta h$$

$$q' = k \left(-\frac{\Delta h}{d_3} \right) (d_3 \times 1) = -k \times \Delta h$$

所以

$$q = q' \quad (2.28)$$

因为 $-k \Delta h$ 相同, 所以各流管内的流量是相等的 $q = q'$ (性质 II)。

要根据流网求透水量, 设流入和流出的总水头分别为 H_1 和 H_2 , 等势线的间隔数为 N_d , 流网数 (流管数) 为 N_f 。根据性质 I 得 $\Delta h = (H_1 - H_2) / N_d$, 根据性质 II, 可求出厚度为 L 土体的全部透水量 Q 如下

$$Q = q N_f L = -k \Delta h N_f L = k (H_1 - H_2) \frac{N_f}{N_d} L \quad (2.29)$$

在上式中, 把流量 Q 表示成 N_f 与 N_d 的比值得注意, 也就是说正方形流网网格的大小可以随意画, 网格越小, N_f 和 N_d 的值越大, 网格越大, N_f 和 N_d 的值越小 (精度下降), 但是两者的比值几乎不变。

画出了流网图, 就可以求出流网中各点的孔隙水压 (水压力分布)。等势线是总水头 h 相等的线, 由性质 I 可知, 正方形网格的每一格的水头损失都相等, 所以根据全水头的边界条件就可以求出图中各点的总水头。知道了各点的总水头, 就可以知道假想的测压管的水头, 从而可以计算出压力水头 u / γ_w 。然后, 由压力水头可以求出各点的水压力。

2. 流网的绘制方法

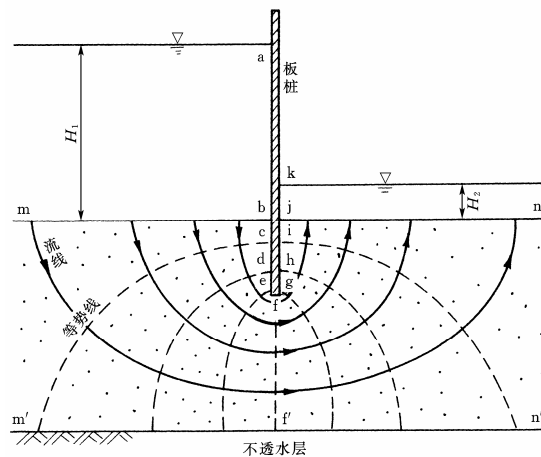


图 2.8 板桩下水的渗流

以图 2.8 所示的在渗透性地基 (砂砾层) 中打入隔水板桩为例进行说明。首先需要知

道全水头的边界条件。很明显图中的 mb 面, jn 面分别都是一条等势线。即, 如果在此处设测压管, 容易理解其压力水头分别是 H_1 , H_2 。如果设 mn 面是基准面, 则该面上的位置水头就是零, 所以, 这时压力水头和位置水头的和, 即总水头在 mb 面是 H_1 , 在 jn 面是 H_2 。并且因为 ff' 面在均质各项同性的渗透地基中是左右对称的对称面, 所以, ff' 面的全水头是 mb 面和 jn 面全水头的平均值 $(H_1+H_2)/2$ 。ff' 面也成为其中的一条等势线。另外, 如果 m' n' 面以下是不透水层, m' n' 面是一条流线, 如果板桩上没有洞, 不透水, 沿板桩的 bfj 面也是一条流线。

以上确定了等势线和流线的边界条件, 其板桩两侧的流网是左右对称的。根据这种情况绘制流网图, 在绘制过程中, 根据流线与等势线是正交的, 形成的网目是正方形的, 也就是各网目与圆外接的原则, 边绘边改。如果流线的间隔画的小, 那么等势线的间隔也必然要画小 (间隔越小精度越高), 这是因为流线与等势线形成的网格是正方形的。然而, 在板桩的底部附近和距上下游充分远的地方画不出正方形, 这是与数学的不同点。

$$Q = qN_f L = -k\Delta h N_f L = -k(h_1 - h_2) \frac{N_f}{N_d} L$$

例题 2.4 在图 2.9 中, $H_1=11\text{m}$, $H_2=2\text{m}$, 板桩的入土深度是 5m, 地基土的渗透系数是 $5 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$, 土的比重 $G_s=2.69$, 孔隙率 $n=39\%$ 。

- (1) 求图中点 A 和点 B 的孔隙水压力。
- (2) 求每 1m 板桩宽的透水量。

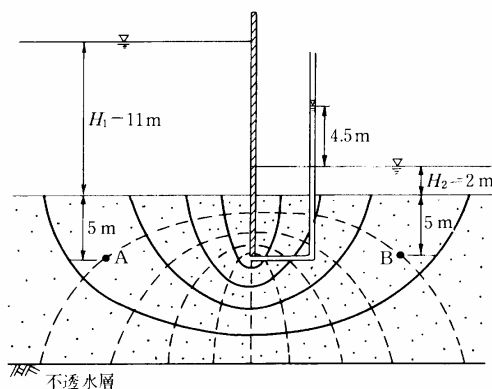


图 2.10 板桩下的流网

解

(1) 在图 2.9 中, 流网网格 $N_d=10$, $N_f=5$, 总水头 $H-H_2=11-2=9\text{m}$, 则每个网格的水头损失 $\Delta h = 9/10 = 0.9\text{m}$ 。

A、B 两点的孔隙水压力分别为:

$$u_A = (5 + 11 - 0.9) \times 9.8 = 148.0 \text{ kN/m}^2$$

$$u_B = (5 + 11 - 0.9 \times 9) \times 9.8 = 77.4 \text{ kN/m}^2$$

(2) 已知渗透系数 $k = 5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} = 0.432 \text{ m/day}$, 根据公式 (2.29) 流网可求得透水量

$$Q = k(H_1 - H_2) \frac{N_f}{N_d} L = 0.432 \times 9 \times \frac{5}{10} \times 1 = 1.944 \text{ m}^3/\text{day}$$

2.3 流土、管涌及其防治

一、渗透力

到此为止的第二章的内容中, 均把土颗粒骨架看成是刚体, 即看成是坚固不变形的。但实际上, 如下所述, 土颗粒常常可以运动, 还常常可以随水喷出。把渗流水作用于单位体积土体上的力 (体力) 叫做渗透力。

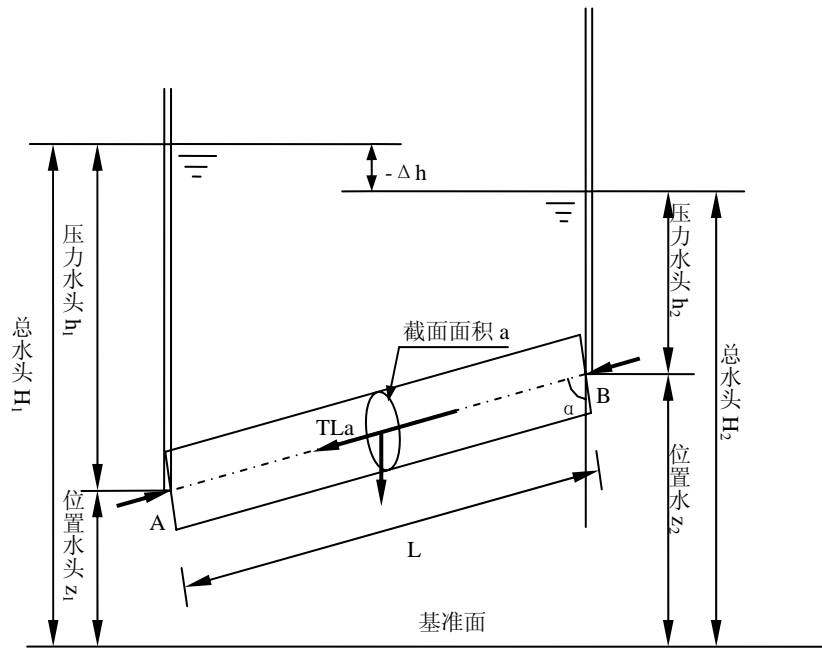


图 2.10 孔隙水压的差 Δu 和渗透力的关系

如图 2.10 所示, 渗透力来源于沿着流线的孔隙水压力的差 Δu 。设 a 为流管的横截面积, 则渗透力 (单位体积力) 推导如下:

(1) 点 A、B 两端的静水压力分别为: $h_1 \gamma_w a$ 和 $h_2 \gamma_w a$

(2) 流管中水柱自重为: $\gamma_w La$

(3) 设单位体积土对渗流水的阻力为 T , 则土骨架对渗流水的总阻力为: TLa

(4) 沿水柱方向, 列全部作用于水柱上力的平衡方程为:

$$\gamma_w h_1 a - \gamma_w a L \cdot \cos \alpha - TaL - \gamma_w h_2 a = 0 \quad (2.30)$$

在图 2.11 中, 存在以下几何关系:

$$\cos \alpha = \frac{z_2 - z_1}{L}; \quad h_1 = H_1 - z_1; \quad h_2 = H_2 - z_2 \quad (2.31)$$

将公式 (2.31) 代入到公式 (2.30), 并给公式 (2.30) 两边同除以面积 a , 得

$$T = \gamma_w \frac{H_1 - H_2}{L} = \gamma_w i \quad (2.32)$$

因为 $|T| = |j|$, 所以渗透力 j 为

$$j = \gamma_w \frac{-\Delta h}{L} = \gamma_w i \quad (2.33)$$

注意, 在图 2.11 中, 如果渗透水流出流管后, 继续垂直向上渗流, 则渗透水流对单位体积土体向上的作用力为 j , 而土颗粒垂直向单位体积的有效重量为 γ' 。当水力坡降 i 大于或等于某个特定值 i_{cr} , 正好使渗透力 j 大于或等于土的有效重量 γ' 时, 土体处于流土状态。称这个特定值 i_{cr} 为临界水力坡降。临界流土的条件为

$$j = \gamma_w i_{cr} = \gamma' \quad (2.34)$$

所以,

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (2.35)$$

由第一章得知土的浮重度为

$$\gamma' = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1 + e} \quad (2.36)$$

将公式 (2.36) 代入到公式 (2.35) 中去, 得

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2.37)$$

式中, G_s 和 e 分别为土颗粒的比重和孔隙比, 如取 $G_s = 2.7$, 当 $e = 0.5 \sim 1.0$ 时, 土的临界水力坡降 $i_{cr} = 0.85 \sim 1.13$ 。在工程估算时常近似按 $i_{cr} = 1$ 来考虑。

二、流土、管涌

在渗透力较大时, 土体内会发生流土、管涌等渗透破坏现象。介绍如下:

1. 流土

在向上的渗透水流作用下, 表面土局部范围内的土体或颗粒同时发生悬浮、移动的现象称为流土。只要渗透力, 即水力坡降达到一定的大小, 任何类型的土都会发生流土破坏。流土经常发生在堤坝下游渗流逸出处无保护的情况下。当土体中 $i > i_{cr}$ 时, 就会在下游脚处出现表面隆起, 裂缝开展, 砂粒涌出, 即流土发生。若地基为比较均匀的砂层, 当水位差较大渗透路径不太长时, 也即水力坡降较大时, 下游渗流逸出处也会有 $i > i_{cr}$ 。这时地表将普遍出现小泉眼, 冒气泡, 继而土颗粒群向上鼓起, 发生浮动、跳跃, 称为

砂沸。砂沸也是流土的一种形式。

流土发生的条件是：在自下而上的渗流逸出处，任何土，包括粘性土或无粘性土，只要满足渗透坡降大于临界水力坡降这一水力条件 $i > i_{cr}$ ，均要发生流土。

图 2.12 为发生在上海黄浦江隧道施工中流土带来的灾害。施工中发生渗水后，随后出现大量流砂涌入施工中的隧道，导致中山南路部分地面下沉，建筑倾斜。



图 2.11 流砂导致的灾害

2. 管涌

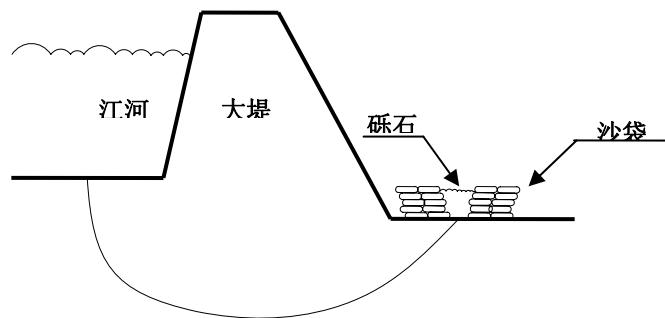
在渗透水流作用下，土中的细颗粒在粗颗粒形成的孔隙中移动，以至流失；随着土的孔隙不断扩大，渗透流速不断增加，较粗的颗粒也相继被水流逐渐带走，最终导致土体内形成贯通的渗流管道，造成土体塌陷，称这种现象为管涌。由此可见，管涌破坏一般有个时间发展过程，是一种渐进性的破坏。管涌发生在一定级配的无粘性土中，发生的部位可能在渗流逸出处，也可能在土体内部，所以也称之为渗流的潜蚀现象。

管涌发生的条件是：（1）土质条件（必要条件）：不均匀系数 $C_u > 10$ 的无粘性土；（2）水力条件（目前研究的还很不成熟）：与土的结构状态等关系密切，其水力坡降远小于 1。

图 2.12(a) 为发生在湖南望城湘江大堤最大的管涌。由于暴雨使湘江水猛长，使土体中的水力坡降增加，加之土结构的几何原因，发生了图中的管涌。图 2.12 中的沙袋用来提高逸出口水位，以降低水力坡降。此外还抛了一些大的砾石形成反滤层，如图 2.12(b) 所示。



(a) 湘江大堤



(b) 示意图

图 2.12 管涌导致的灾害

三、防治流土、管涌的基本措施

防治流土的关键在于控制渗流逸出处的水力坡降，基本措施是确保实际的逸出坡降不超过允许坡降。防止管涌一般可从下两方面采取措施：(1) 改变水力条件，降低土层内部和渗流逸出处的渗透坡降。如上游做防渗铺盖或打板桩等；(2) 改变几何条件，在渗流逸出部位铺设层间关系满足要求的反滤层，是防止管涌破坏的有效措施。

例题 2.5 在图 2.13 所示的三种试验中，砂的 $\gamma' = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。

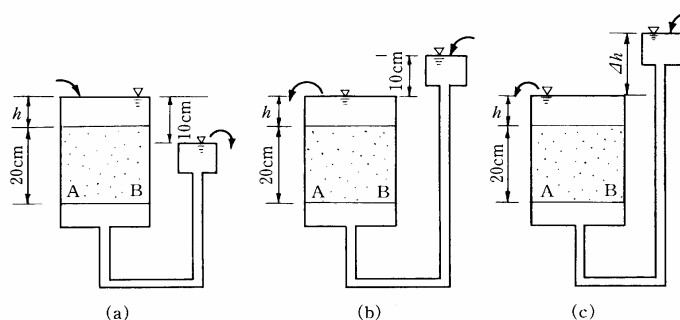


图 2.13 室内透水试验中各种不同的水位差

- (1) 试分别求图 13 (a) 和图 13 (b) 中作用于底面 AB 的应力是多少？
- (2) 在图 13 (c) 中，当 Δh 增加到多少时会产生流沙现象？

解

砂土的有效重度 $\gamma' = 9.8 \text{ kN/m}^3$ ，饱和重度 $\gamma_{sat} = 19.6 \text{ kN/m}^3$

(1) 13 图 (a) 中作用于底面 AB 的应力为

总重量－孔隙水压

$$\begin{aligned}
 &= 19.6 \times 0.20 + 9.8 \times h - 9.8 \times (0.20 + h - 0.10) \\
 &= 2.94 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

图 13 (b) 中作用于底面 AB 的应力为

总重量－孔隙水压

$$= 19.6 \times 0.20 + 9.8 \times h - 9.8 \times (0.20 + h + 0.10)$$

$$=0.98\text{kN/m}^2$$

(2) 当 (总重量 - 孔隙水压) = 0, 即

$$19.6 \times 0.20 + 9.8 \times h - 9.8 \times (0.20 + h + \Delta h) = 0$$

时, 会发生流沙现象。所以

$$\Delta h = 0.20\text{m} = 20\text{cm}$$

例题 2.6 讨论图 2.9 中板桩前发生流土现象的可能性。

解

先计算出孔隙比

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.39}{1-0.39} = 0.639$$

则土的饱和重度为

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2.69 + 0.639}{1 + 0.639} \times 9.8 = 19.9 \text{ kN/m}^3$$

板桩前底部单位面积上土的总重量为

$$19.9 \times 5 + 9.8 \times 2 = 119.1 \text{ kN/m}^2$$

此处的孔隙水压力为

$$(4.5 + 2 + 5) \times 9.8 = 112.7 \text{ kN/m}^2$$

由此可知, 土的单位面积上总重量 > 孔隙水压, 所以不会发生流土, 板桩安全。

2.4 非饱和土的湿化及其危害

一、非饱和土中的吸力

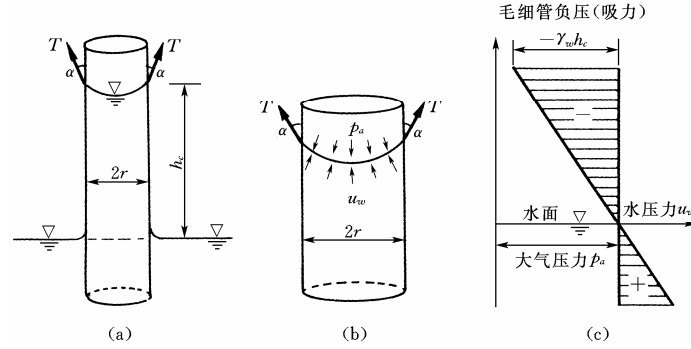
前面讨论了地下水位以下的水的流动, 下面研究一下从地表面到地下水面这部分土中的水。这部分土的孔隙中, 通常同时存在着水和空气, 呈非饱和状态。而且可以认为, 这部分水来源于地表面雨水等的渗透和由于毛细管的作用地下水对它的补充。

土中的孔隙是很复杂的, 可以说组成了无数的毛细管。把毛细管用图 2.14 (a) 所示的下部浸水的半径为 r 的圆管代替, 在这个简化的毛细管圆管中, 水可以上升到某一高度, 把他叫做毛细管作用。毛细管作用是因为水的表面张力作用而产生的现象。水的表面张力, 是因为水分子引力作用产生的沿着水表面的一种张力, 可以形象的理解为在水的表面粘有一层薄薄的橡胶膜一样的东西, 薄水膜粘在圆管的内壁上, 由于表面张力的作用, 把圆管内的水向上拉, 使水位上升。参见图 2.14(a), 单位长度的表面张力 T 的垂直方向的分力与被吸引上来的水的重量平衡, 列平衡方程得

$$T \cdot \cos\alpha(2\pi r) = \gamma_w h_c (\pi r^2)$$

所以

$$h_c = \frac{2T \cos \alpha}{\gamma_w r} \quad (2.38)$$



(a) 圆管内的毛细管上升

(b) 弯液面部分的水压，大

(c) 水压力分布

气压，表面张力的关系

图 2.14 毛细管上升和水压力分布

在 25°C 时，水的表面张力 $T=75\text{dyn/cm}$ ，水的重度 $\gamma_w=980\text{dyn/cm}^3$ 如果 $\alpha \approx 0$ ，由式 (2.38) 得水面上升高度 h_c 为

$$h_c = 0.15/r \quad (2.39)$$

式中的 h_c 和 r 都是以 cm 为单位。由上式可知，圆管半径 r 越小，水面上升高度 h_c 越大，两者呈反比例。实际上土中的孔隙并不是圆管，用与圆管半径 r 等价的孔隙比 e 和有效粒径 $D_{10}(\text{cm})$ 的积来表示，得

$$h_c = C/(eD_{10}) \quad (2.40)$$

式中的 C 是由土颗粒的粒径和表面粗糙程度等因素决定的系数， C 在 $0.1 \sim 0.5(\text{cm}^2)$ 的范围内变化。根据式 (2.40) 可以推算出土中毛细管上升高度 h_c 的大致值。如果假设粘土地基的 $D_{10} \approx 1 \mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$ ， $e \approx 1$ 时，可得 $h_c = 10\text{m}$ 。

所以，由毛细管引起的提升水的水压力比大气压力小时，水压力成为负值（参见图 (2.14(b))）。把这个由表面张力引起的大气压力 p_a 与孔隙水压力 u_w 的差 $p_a - u_w = 2T \cos \alpha / r$ 叫做吸力，用 S 表示。考虑式 (2.38) 中的毛细管上升高度 h_c 后吸力 S 可表示为

$$S = p_a - u_w = \gamma_w h_c = \frac{2T \cos \alpha}{r} \quad (2.41)$$

也就是，弯液面部分的吸力与使毛细管中水位上升到 h_c 高度的水压力相等。当土体中的气压为 u_a 时，土中的吸力则变成

$$S = u_a - u_w \quad (2.42)$$

土颗粒间的结合力，是影响土的抗剪强度的重要因素之一，特别是粘性土，含水量越小，影响程度越大。但是，因为饱和土的弯液面消失，该力也随之消失，所以由水的表面张力产生的粘着力也称为毛细粘聚力。大家都可能有这样的经验，在沙滩上堆起的砂堆中挖隧道，当砂处于饱和和完全干燥的状态时都是不可能的，只有在适当湿的砂堆中才能容

易完成。这是因为由水的表面张力即吸力产生的毛细内聚力在起作用。

二、非饱和土的湿化及其危害

土中的含水量的数值对吸力，近而对土的特性有很大的影响。在工程建设中利用在土体中产生的吸力，来方便施工的例子很多。例如在沙漠中进行人工挖土灌注桩施工时，为了不塌孔，可以预先在沙漠上浇水，并让水渗入沙漠中，当沙漠处于非饱和的状态时，即可挖土。按这种方法在塔克拉玛干挖的灌注桩的直径可达 1m, 深达到 8m。相反，因非饱和土浸水而使吸力减少，使土体产生较大的变形，土体软化，称为非饱和土湿化。非饱和土湿化造成的工程事故屡见不鲜。例如每年雨季发生在道路两旁的滑坡等灾害，就是土体浸水湿化等造成的灾害。再如城市基坑开挖中的事故大多数与浸水湿化有关。了解浸水湿化所造成的巨大灾害，在工程实践中要做好防范措施，采取疏导等办法避免雨水等渗入边坡。