



第2章 土的击实性及渗透性

【学习要点及目标】

- ◆ 学会土的击实试验方法，绘制击实曲线，确定最优含水率和最大干密度。
- ◆ 掌握黏性土、无黏性土的击实机理。
- ◆ 掌握达西定律的含义、适用范围。
- ◆ 掌握渗透系数测定方法。
- ◆ 了解影响土的渗透性的因素。
- ◆ 了解各种渗透变形破坏的类型。
- ◆ 掌握渗透力的计算公式。

【核心概念】

最优含水率、最大干密度、渗透系数、渗透力、流土、管涌、临界水力坡降等。

【引导案例】

在填土工程中，为了提高填土的强度、增加土的密实度、减小压缩性和渗透性，一般都要经过压实，需要确定土的最优含水率和最大干密度，以指导施工；为了计算地基的渗漏量，防止发生渗透变形破坏，需要确定土的渗透系数。本章主要介绍土的击实性和渗透性等内容。

2.1 土的击实性

在工程建设中,常用土料填筑土堤、土坝、路基和地基等,为了提高填土的强度,增加土的密实度,减小压缩性和渗透性,一般都要经过压实。压实的方法很多,可归结为碾压、夯实和振动三类。大量的实践证明,在对黏性土进行压实时,土太湿或太干都不能被较好压实,只有当含水率控制为某一适宜值时,压实效果才能达到最佳。黏性土在一定的压实功能下达到的最密实的含水率称为最优含水率,用 ω_{op} 表示;与其对应的干密度则称为最大干密度,用 ρ_{dmax} 表示。因此,为了既经济又可靠地对土体进行碾压或夯实,必须要研究土的这种压实特性,即土的击实性。

2.1.1 击实试验

室内击实试验是把某一含水率的试样分三层放入击实筒内,每放一层用击实锤击打至一定击数,对每一层土所做的击实功为锤体重量、锤体落距和击打次数三者的乘积,将土层分层击实至满筒后(试验时,使击实土稍超出筒高,然后将多余部分削去),测定击实后土的含水率和湿密度,计算出干密度。用同样的方法将5个以上不同含水率的土样击实,每一土样均可得到击实后的含水率与干密度,以含水率为横坐标、干密度为纵坐标绘出这些数据点,连接各点绘出的曲线,即为土的击实曲线,如图2-1所示。

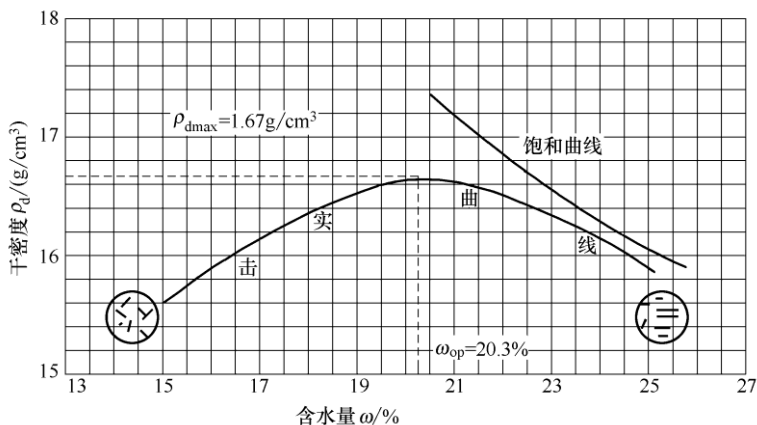


图 2-1 土的击实曲线

2.1.2 黏性土的击实特性

由图2-1可知,当含水率较低时,土的干密度较小,随着含水率的增加,土的干密度也逐渐增大,表明压实效果逐步提高;当含水率超过某一限量 ω_{op} 时,干密度则随着含水率的增大而减小,即压密效果下降。这说明土的压实效果随着含水率而变化,并在击实曲线上





出现一个峰值，与这个峰值对应的含水率就是最优含水率。据研究，黏性土的最优含水率与塑限有关，大致为 $\omega_{op} = \omega_p \pm 2\%$ 。

小贴士：

对于大型工程或重要工程，土的最优含水率应根据击实试验确定，对于小型工程或者粗估土的最优含水率时，可根据经验判别，用八个字描述即“手握成团、落地开花”，将一把土握在手中能成团，摔在地上散开，基本上为土的最优含水率。

黏性土的击实机理：当含水率较小时，土中水主要是强结合水，土粒周围的水膜很薄，颗粒间具有很大的分子引力，阻止颗粒移动，受到外力作用时不易改变原来位置，因此压实就比较困难。当含水率适当增大时，土中结合水膜变厚，土粒间的连接力减弱而使土粒易于移动，压实效果就变好。但当含水率继续增大时，土中水膜变厚，以致土中出现了自由水，击实时由于土样受力时间较短，孔隙中过多的水分不易立即排出，势必阻止土粒的靠拢，所以击实效果下降。

2.1.3 无黏性土的击实特性

无黏性土颗粒较粗，颗粒之间没有或只有很小的黏聚力，不具有可塑性，多呈单粒结构，压缩性小、透水性高、抗剪强度较大，且含水率的变化对它的性质影响不显著。因此，无黏性土的击实特性与黏性土相比有显著差异。

用无黏性土的击实试验数据绘出的击实曲线如图 2-2 所示。由图可以看出，在风干和饱和状态下，击实都能得出较好的效果。其机理是在这两种状态时不存在假黏聚力。在这两种状态之间时，受假黏聚力的影响，击实效果最差。

工程实践证明，对于无黏性土的压实，应该有一定静荷载与动荷载联合作用，才能达到较好的压实度。所以，对于不同性质的无黏性土，振动碾是最为理想的压实工具。

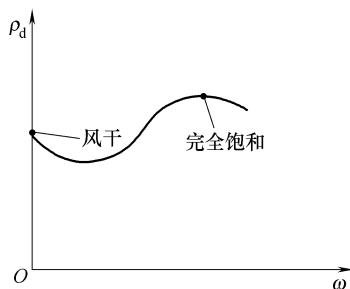


图 2-2 无黏性土的击实曲线

2.1.4 影响土的击实效果的因素

影响土的击实效果的因素有很多，但最重要的是含水率、击实功能和土的性质。

1. 含水率

由前可知，土太湿或太干都不能被较好压实，只有当含水率控制为某一适宜值即最优含水率时，土才能得到充分压实，得到土的最大干密度。实践表明，当压实土达到最大干密度时，其强度并非最大，当含水率小于最优含水率时，土的抗剪强度均比最优含水率高，但将其浸水饱和后，则强度损失很大，只有在最优含水率时浸水饱和后的强度损失最小，压实土的稳定性最好。



2. 击实功能

夯击的击实功能与夯锤的质量、落高、夯击次数等有关。碾压的压实功能则与碾压机具的质量、接触面积、碾压遍数等有关。对于同一土料，击实功能小，则所能达到的最大干密度也小；击实功能大，所能达到的最大干密度也大。而最优含水率正好相反，即击实功能小，最优含水率大；击实功能大，则最优含水率小。但是应当指出，击实效果增大的幅度是随着击实功能的增大而降低的。企图单纯用增大击实功能的办法来提高土的干密度是不经济的。

3. 土粒级配和土的分类

在相同的击实功能条件下，级配不同的土，击实效果也不同。一般来说，粗粒含量多、级配良好的土，最大干密度较大，最优含水率较小。砂土的击实性与黏性土不同，一般在完全干燥或充分洒水饱和的状态下，容易击实到较大的干密度；而在潮湿状态下，由于毛细水的作用，填土不易击实。所以，粗粒土一般不做击实试验，在压实时，只要对其充分洒水使土料接近饱和，就可得到较大的干密度。

2.1.5 土的压实度

在工程实践中，常用土的压实度来直接控制填土的工程质量。压实度的定义是：工地压实时要求达到的干密度 ρ_d 与室内击实试验所得到的最大干密度 ρ_{dmax} 的比值，即

$$\lambda = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \quad (2-1)$$

可见， λ 值越接近 1，表示对压实质量的要求越高。在建筑、公路等填方工程中，一般要求 $\lambda > 0.95$ ；对于一些次要工程， λ 值可适当取小些。

【例 2-1】某土料场的土料为粉质黏土，天然含水率 $\omega = 21\%$ ，土粒比重 $G_s = 2.70$ ，室内标准击实试验得到最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.85\text{g/cm}^3$ 。设计时取压实度 $\lambda = 0.95$ ，并要求压实后土的饱和度 $S_r \leq 90\%$ ，问土料的天然含水率是否适于填筑？碾压时土料应控制为多大的含水率？

解 (1) 求压实后土的孔隙体积。

填土的干密度 $\rho_d = \rho_{dmax} \lambda = 1.85 \times 0.95 = 1.76\text{g/cm}^3$ ，绘制土的三相图(见图 2-3)，并设 $V_s = 1\text{cm}^3$ 。

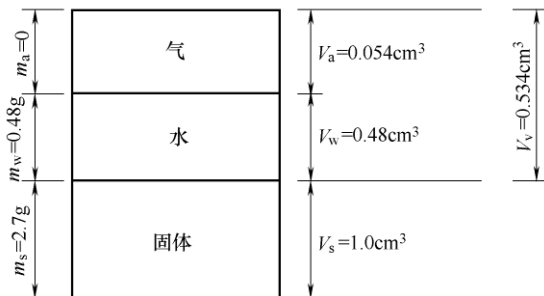


图 2-3 例 2-1 三相图



由 $G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w}$ ，得到 $m_s = G_s V_s \rho_w = 2.70 \times 1 \times 1 = 2.7(\text{g})$ 。

由 $\rho_d = \frac{m_s}{V}$ ，则 $V = \frac{m_s}{\rho_d} = \frac{2.7}{1.76} = 1.534(\text{cm}^3)$ ， $V_v = V - V_s = 1.534 - 1 = 0.534(\text{cm}^3)$ 。

(2) 求压实时的含水率。

根据题意，按饱和度 $S_r = 0.9$ 控制含水率，则由 $S_r = \frac{V_w}{V_v}$ ， $V_w = S_r V_v = 0.9 \times 0.534 = 0.48(\text{cm}^3)$ ， $m_w = \rho_w V_w = 0.48\text{g}$ ，得压实时的含水率为

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{0.48}{2.70} \times 100\% = 17.8\% < 21\%$$

即碾压时的含水率应控制在 18% 左右，而料场土料的含水率为 21%，高出 3%，不适于直接填筑，应进行翻晒处理。

2.2 土的渗透性

土是一种松散的固体颗粒集合体，土体内具有相互连通的孔隙。在水头差作用下，水会从水位高的一侧流向水位低的一侧，这种现象就是水在土体中的渗流现象，而土允许水透过的性能称为土的渗透性。

渗流将引起渗漏和渗透变形两方面的问题。渗漏造成水量损失，如挡水土坝的坝体和坝基的渗水、闸基的渗漏等，直接影响闸坝蓄水的工程效益；渗透变形将引起土体内部应力状态发生变化，从而改变其稳定条件，使土体产生变形破坏，甚至危及建筑物的安全稳定。例如，在 2003 年 7 月上海的地铁事故中，施工中的上海轨道交通 4 号线(浦东南路—南浦大桥)区间隧道浦西联络通道发生渗水，随后出现大量流沙涌入，引起地面大幅沉降，地面建筑物中山南路 847 号 8 层楼房发生倾斜，其主楼裙房部分倒塌；2004 年 1 月 21 日农历除夕，位于新疆生产建设兵团的八一水库发生了管涌事故，管涌直径超过 8m，估计流量为 $80\text{m}^3/\text{s}$ ，事故受灾人口接近 2 万；在 1998 年的大洪水中，长江大堤的多处险情也都是由于渗流造成的。因此，工程中必须研究土的渗透性及渗流的运动规律，为工程的设计、施工提供必要的资料和依据。根据我国和其他国家的调查资料表明，由于渗流冲刷破坏失事的土坝高达 40%，而与渗流密切相关的滑坡破坏也占 15% 左右。由此可见，渗流对建筑物的影响作用很大。

2.2.1 达西定律

由于土体中孔隙的形状和大小极不规则，因而水在其中的渗透是一种十分复杂的水流现象。人们用与真实水流属于同一流体的、充满整个含水层(包括全部的孔隙和土颗粒所占据的空间)的假想水流代替在孔隙中流动的真实水流来研究水的渗透规律，这种假想水流具有以下性质。

(1) 它通过任意断面的流量与真实水流通过同一断面的流量相等。

(2) 它在某一断面上的水头应等于真实水流的水头(注：可将水头理解为以液柱高度表示的单位质量液体的机械能)。



(3) 它在土体体积内所受到的阻力应等于真实水流所受到的阻力。

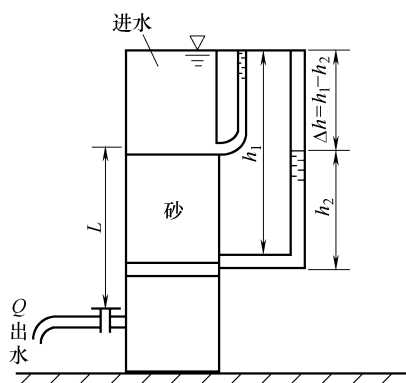


图 2-4 达西渗透试验装置

1856 年, 法国工程师达西(Darcy)利用图 2-4 所示的试验装置对均质砂土进行了大量的试验研究, 得出了层流条件下的渗透规律: 水在土中的渗透速度与试样两端面间的水头损失成正比, 而与渗径长度成反比, 即

$$V = \frac{q}{A} = Ki = K \frac{\Delta h}{L} \quad (2-2)$$

式中: V 为断面平均渗透流速(cm/s); q 为单位时间的渗水量(cm^3/s); A 为垂直于渗流方向试样的截面积(cm^2); K 为反映土的渗透性大小的比例常数, 称为土的渗透系数(cm/s); i 为水力梯度或水力坡降, 表示沿渗流方向单位长度上的水头损失, 无量纲; Δh 为试样上、下两断面间的水头损失(cm); L 为渗径长度

(cm)。

2.2.2 渗透系数的测定

渗透系数是反映土的透水性能强弱的一个重要指标, 常用它来计算堤坝和地基的渗流量, 分析堤防和基坑开挖边坡逸出点的渗透稳定, 以及作为透水性能强弱的标准和选择坝体填筑土料的依据。渗透系数只能通过试验直接测定。试验可在实验室或现场进行。一般来说, 现场试验比室内试验得到的结果要准确些。因此, 对于重要工程常需进行现场测定。

实验室常用的方法有常水头法和变水头法, 前者适用于粗粒土(砂质土), 后者适用于细粒土(黏质土和粉质土)。

1. 常水头法

常水头法是在整个试验过程中, 使水头保持不变, 其试验装置如图 2-4 所示。设试样的厚度即渗径长度为 L , 截面积为 A , 试验时的水头差为 Δh , 这三者在试验前可以直接量出或控制。试验中只要用量筒和秒表测出在某一时段 t 内流经试样的水量 Q , 即可求出该时段单位时间内通过土体的流量 q , 将 q 代入达西公式(2-2)中, 可得到土的渗透系数, 即

$$K = \frac{QL}{A\Delta ht} \quad (2-3)$$

2. 变水头法

黏性土由于渗透系数很小, 流经试样的水量很少, 难以直接准确量测, 因此采用变水头法。此法是指在整個试验过程中, 水头是随着时间而变化的, 其试验装置如图 2-5 所示。试样的一端与玻璃管相连, 在试验过程中测出某一时段 t 内($t=t_2-t_1$)细玻璃管中水位的变化, 便可根据达西定律求出土的渗透系数, 即

$$K = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (2-4)$$

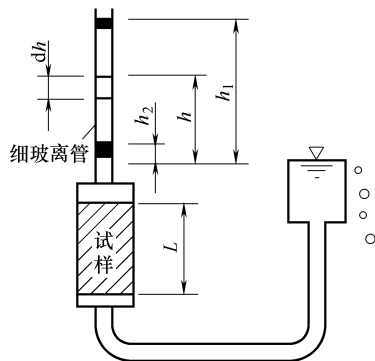


图 2-5 变水头法的试验装置



式中： a 为细玻璃管内部的截面积； h_1 、 h_2 为时刻 t_1 、 t_2 对应的水头差。

试验时只需测出某一时段 t 两端点对应的水位即可求出渗透系数。

3. 现场抽水试验

对于粗粒土或成层土，室内试验时不易取到原状样，或者土样不能反映天然土层的层次或土颗粒的排列情况，这时现场试验得到的渗透系数将比室内试验准确。具体的试验原理和方法参阅水文地质方面的有关书籍。

小贴士：

工程上经常会遇到成层土的渗透系数计算，需要计算水平向流动、垂直向流动的渗透系数。

1. 水平向流动

(1) 水流沿着水平方向流动，则水平向平均渗透系数为

$$K_{xm} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{xi} h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

(2) 如果各土层的厚度大致相近，而渗透性却相差悬殊时，与层面平行的平均渗透系数 K_{xm} 将取决于最透水土层的厚度和渗透性，并可近似地表示为

$$K_{xm} = \frac{K'H'}{H}$$

式中： K' 、 H' 分别为最透水土层的渗透系数和厚度； H 为土层总厚度， $H = \sum_{i=1}^n h_i$ 。

2. 垂直向流动

如水流沿着垂直方向流动，垂直向平均渗透系数为

$$K_{zm} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{K_{zi}}}$$

与层面垂直的平均渗透系数 K_{zm} 将取决于最不水土层的厚度和渗透性，并可近似地表示为

$$K_{zm} = \frac{K''H''}{H''}$$

式中： K'' 、 H'' 分别为最不水土层的渗透系数和厚度。

成层土与层面平行的平均渗透系数 K_{xm} 总是大于与层面垂直的平均渗透系数 K_{zm} ， K_{xm} 主要由透水性强的土层控制， K_{zm} 主要由透水性弱的土层控制。

2.2.3 影响土的渗透性的因素

影响土体渗透性的因素很多，主要有土的粒度成分及矿物成分、土的结构构造和土中气体等。

1. 土的粒度成分及矿物成分的影响

土的颗粒大小、形状及级配影响土中孔隙大小及其形状，因而影响土的渗透性。土粒



越细、越浑圆、越均匀时,渗透性就越大。砂土中含有较多粉土或黏性土颗粒时,其渗透性就会大大降低。土中含有亲水性较大的黏土矿物或有机质时,因为结合水膜厚度较厚,会阻塞土的孔隙,土的渗透性降低。土的渗透性还和水中交换阳离子的性质有关系。

2. 土的结构构造的影响

天然土层通常不是各向同性的,因此不同方向土的渗透性也不同。例如,黄土具有竖向大孔隙,所以竖向渗透系数要比水平向大得多。在黏性土中,如果夹有薄的粉砂层,它在水平方向的渗透系数要比竖向大得多。

3. 土中气体的影响

当土中孔隙存在密闭气泡时,会阻塞水的渗流,从而降低土的渗透性。这种密闭气泡有时是由于溶解于水中的气体分离出来而形成的,故水的含气量也影响土的渗透性。

4. 水的温度

水温对土的渗透性也有影响,水温越高,水的动力黏滞系数 η 越小,渗透系数 K 值越大。试验时某一温度下测定的渗透系数,应按式(2-5)换算为标准温度 20°C 下的渗透系数,即

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (2-5)$$

式中: K_T 、 K_{20} 分别为 $T^{\circ}\text{C}$ 和 20°C 时土的渗透系数; η_T 、 η_{20} 分别为 $T^{\circ}\text{C}$ 和 20°C 时水的动力黏滞系数,见《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)。

总之,对于粗粒土,主要因素是颗粒大小、级配、密度、孔隙比以及土中封闭气泡的存在;对于黏性土,则更为复杂。黏性土中所含矿物、有机质以及黏土颗粒的形状、排列方式等都影响其渗透性。几种土的渗透系数如表 2-1 所示。

表 2-1 不同土的渗透系数变化范围

土的类别	渗透系数 K		土的类别	渗透系数 K	
	m/d	cm/s		m/d	cm/s
黏土	<0.005	< 6×10^{-6}	细 砂	1.0~5	$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$
粉质黏土	0.05~0.1	$6 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	中 砂	5~20	$6 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$
粉土	0.1~0.5	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	粗 砂	20~50	$2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
黄土	0.25~0.5	$3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	圆 砾	50~100	$6 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$
粉砂	0.5~1.0	$6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	卵 石	100~500	$1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$

【例 2-2】变水头渗透试验的黏土试样的截面积 A 为 30cm^2 ,厚度为 4cm ,渗透仪细玻璃管的内径为 0.4cm ,试验开始时的水头差为 165cm ,经过时段 $5\text{min } 25\text{s}$ 观察的水头差为 150cm ,试验时的水温为 20°C ,试求试样的渗透系数。

解 细玻璃管的截面积 $a = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times 0.4^2}{4} = 0.1256(\text{cm}^2)$, $A=30\text{cm}^2$, $L=4\text{cm}$,
 $t=5 \times 60+25=325(\text{s})$, $h_1=165\text{cm}$, $h_2=150\text{cm}$,将以上数据代入式(2-4)中,得

$$K = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} = 2.3 \times \frac{0.1256 \times 4}{30 \times 325} \times \lg \frac{165}{150} = 4.91 \times 10^{-6} (\text{cm/s})$$



所以试样在 20°C 时的渗透系数为 $4.91 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

2.2.4 渗透力与渗透变形破坏

水在土体中的渗流将引起土体内部应力状态的变化,从而改变水工建筑物地基或土坝的稳定条件。因此,对于水工建筑物来讲,如何确保在有渗流作用时的稳定性是一个非常重要的课题。

渗流所引起的稳定问题一般可归结为两类。一类是土体的局部稳定问题。这是由渗透水流将土体中的细颗粒冲出、带走或局部土体产生移动,导致土体变形而引起的。因此,这类问题常称为渗透变形问题。此类问题如不及时加以纠正,同样会酿成整个建筑物的破坏。另一类是整体稳定问题。这是在渗流作用下,整个土体发生滑动或坍塌。土坝(堤)在水位降落时引起的滑动、雨后的山体滑坡、泥石流是这类破坏的典型案列。

1. 渗透力

由前面的渗流试验可知,水在土体中流动时会引起水头损失。这表明水在土中流动会引起能量的损失,这是由于水在土体孔隙中流动时,力图带动土颗粒而引起的能量消耗。根据作用力与反作用力,土颗粒阻碍水流流动,给水流以作用力,那么水流也必然给土颗粒以某种拖曳力,通常将渗透水流施加于单位土体内土粒上的拖曳力称为渗透力。

为了验证渗透力的存在,首先观察以下现象:

图 2-6 中圆筒形容器的滤网上装有均匀的砂土,其厚度为 L ,面积为 A ,土样两端各安装一测压管,其测压管水头相对于 0—0 基准面分别为 h_1 、 h_2 。当 $h_1 = h_2$,即当左边的储水器如图中实线所示时,土中的水处于静止状态,无渗流发生。若将左边的储水器逐渐提升,使 $h_1 > h_2$,则由于水头差的存在,土中将产生向上的渗流。当储水器提升到某一高度时,可以看到砂面出现沸腾的现象,这种现象称为流土。

上述现象的发生,说明水在土体孔隙中流动时,确有促使土粒沿水流方向移动的拖曳力存在,这就是渗透力,以符号 j 表示。当两个测压管的水面高差为 Δh 时,

表示水从进口面流过 L 厚度的土样到流出水面时,必须克服整个土样内土粒骨架对水流的阻力。若以消耗的水头损失 Δh 表示其阻力,那么土粒骨架对水流的阻力应为 $F = \gamma_w \Delta h A$ 。

由于土中渗流速度一般极小,流动水体的惯性力可以忽略不计,此时根据土粒骨架受力的平衡条件,渗流作用于土样的总渗透力 J 应和土样中土粒骨架对水流的阻力 F 大小相等而方向相反,即 $J = F = \gamma_w \Delta h A$,而渗流作用于土骨架上单位体积的力,即渗透力为

$$j = \frac{J}{V} = \frac{\gamma_w \Delta h A}{AL} = \gamma_w \frac{\Delta h}{L} = \gamma_w i \quad (2-6)$$

由式(2-6)可知,渗透力的大小与水力坡降成正比,其作用方向与渗流(或流线)方向一致,是一种体积力,常以 kN/m^3 计。

由上述分析可知,在有渗流的情况下,由于渗透力的存在,将使土体内部受力情况(包

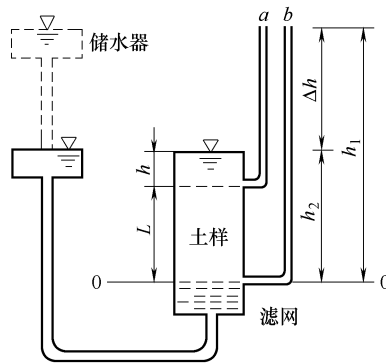


图 2-6 流土试验示意图



括大小和方向)发生变化。一般来说,这种变化对土体的整体稳定是不利的。但是,对于渗流中的具体部位应作具体分析。由于渗透力的方向与渗流作用方向一致,它对土体的稳定性有很大的影响。

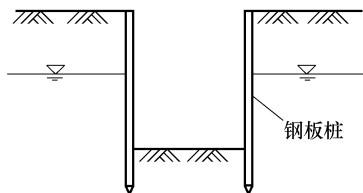


图 2-7 基坑支护板桩截水

如图 2-7 所示的基坑支护板桩,在两侧水头差的作用下,地下水从高处向低处流动,在土体内产生渗透力。在渗流进口处(基坑外),渗流自上而下,渗透力与土重方向一致,渗透力起增大重力作用,对土体稳定有利;在渗流的逸出口(基坑内),渗透力方向自下而上,与土重方向相反,渗透力起减轻土的有效重力的作用,土体极可能失去稳定,

发生渗透破坏,这就是引起渗透变形的根本原因。渗透力越大,渗流对土体稳定性的影响就越大。因此,在闸坝地基、土坝和基坑开挖过程中,必须考虑渗透力的影响。

2. 渗透变形破坏形式

从前面对渗流的分析可知,地基或某些结构物(如土坝等)的土体中发生渗流后,土中的应力状态将发生变化,建筑物的稳定条件也将发生变化。由渗流作用而引起的变形破坏形式,根据土的颗粒级配和特性、水力条件、水流方向和地质情况等因素,通常包括流土、管涌、接触流失和接触冲刷四种形式。流土和管涌发生在同一土层中,接触流失和接触冲刷发生在成层土中。

1) 流土

正常情况下,土体中各个颗粒之间都是相互紧密结合的,并具有较强的制约力。但在向上渗流作用下,局部土体表面会隆起或颗粒群同时发生移动而流失,这种现象称为流土。它主要发生在地基或土坝下游渗流逸出处,而不发生于土体内部。基坑或渠道开挖时所出现的流沙现象是流土的一种常见形式,流土常发生在颗粒级配均匀的细砂、粉砂和粉土等土层中,在饱和的低塑性黏性土中,当受到扰动时也会发生流土。

如图 2-8(a)所示,由于细砂层的承压水作用,当基坑开挖至细砂层时,在渗透力作用下,细砂向上涌出,出现大量流土,引起房屋地基不均匀变形,上部结构开裂,影响了正常使用。图 2-8(b)所示为河堤覆盖层下流沙涌出的现象,由于覆盖层下有一强透水砂层,当堤内外水头差较大时,弱透水层薄弱处则被冲溃,大量砂土涌出,危及河堤的安全。

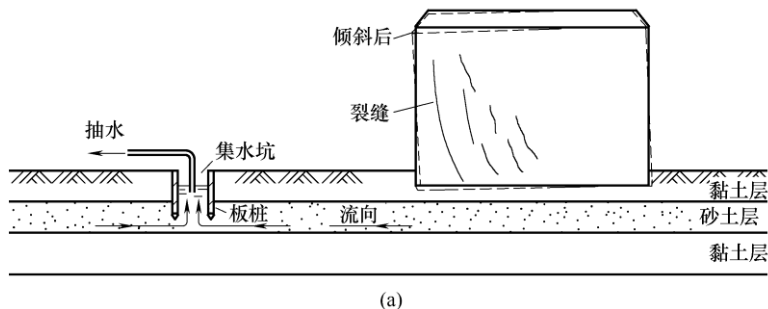


图 2-8 流土危害

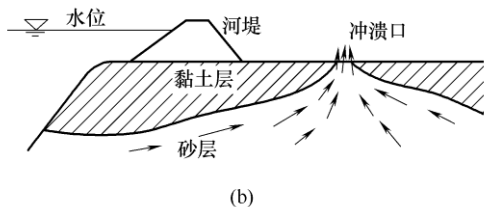


图 2-8 流土危害(续)

由流土的定义可知,流土多发生在向上的渗流情况下,而此时渗透力的方向与渗流方向一致。由受力分析可知,一旦 $j > \gamma'$, 流土就会发生。而 $j = \gamma'$, 土体处于流土的临界状态,此时的水力坡降定义为临界水力坡降,以 i_{cr} 表示。

竖直向上的渗透力 $j = \gamma_w i$, 单位土体本身的有效重量 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$, 当土体处于临界状态时, $j = \gamma'$, 则由以上条件可得

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1 \quad (2-7)$$

根据土的物理性质指标的关系,式(2-7)可表示为

$$i_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2-8)$$

流土一般发生在渗流的逸出处,因此,只要将渗流逸出处的水力坡降即逸出坡降 i 求出,就可判别流土的可能性:当 $i < i_{cr}$ 时,土处于稳定状态;当 $i = i_{cr}$ 时,土处于临界状态;当 $i > i_{cr}$, 土处于流土状态。在设计时,为保证建筑物的安全,通常将逸出坡降限制在允许坡降 $[i]$ 之内,即

$$i < [i] = \frac{i_{cr}}{F_s} \quad (2-9)$$

式中: F_s 为安全系数,常取 1.5~2.0。

2) 管涌

在渗流力的作用下,土中的细颗粒在粗颗粒形成的孔隙中被移去并被带出,在土体内形成贯通的渗流管道,这种现象称为管涌。开始土体中的细颗粒沿渗流方向移动并不断流失,继而较粗颗粒发生移动,从而在土体内部形成管状通道,带走大量砂粒,最后堤坝被破坏。管涌发生的部位可以在渗流逸出处,也可以在土体内部。它主要发生在沙砾中,必须具备两个条件:一个条件是几何条件,土中粗颗粒所形成的孔隙必须大于细颗粒的直径,一般不均匀系数 $C_u > 10$ 的土才会发生管涌,这是必要条件;另一个条件是水力条件,渗流力大到能够带动细颗粒在粗颗粒形成的孔隙中运动,可用管涌的临界水力坡降来表示,它标志着土体中的细粒开始流失,表明水工建筑物或地基某处出现了薄弱环节。

3) 接触流失

渗流垂直于渗透系数相差较大的两层土的接触面流动时,把其中一层的颗粒带出,并通过另一层土孔隙冲走的现象称为接触流失。例如,土石坝黏性土的防渗体与保护层的接触面上发生黏性土的湿化崩解、剥离,从而在渗流作用下通过保护层的较大孔隙而发生接触流失。这是因为保护层的粒径与防渗体层的粒径相差悬殊,保护层的粒径很粗,则与防渗体土层接触处必然有孔径相当大的孔隙,孔隙下的土层不受压重作用,渗流进入这种孔隙时,剩余水头就会全部消失,于是在接触面上水力坡度加大,其结果就造成渗流破坏——接触流失。所



以土坝防渗体的土料、反滤层的土料以及坝壳的土料质量都必须满足工程技术要求。

4) 接触冲刷

渗流沿着两种不同介质的接触面流动时,把其中颗粒层的细粒带走,这种现象称为接触冲刷。这里所指的接触面,其方向是任意的。接触冲刷现象常发生在闸坝地下轮廓线与地基土的接触面上、管道与周围介质的接触面或刚性与柔性介质的界面上。

【例 2-3】在图 2-6 所示装置中,已知水头差为 15cm,试样长度为 30cm,试求试样所受的渗透力是多少?若已知试样的 $G_s = 2.75$, $e = 0.63$,试问该试样是否会发生流土现象?

解 水力坡降 $i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{15}{30} = 0.5$, 渗透力 $j = \gamma_w i = 10 \times 0.5 = 5.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$, 由式(2-8)可得该

试样的临界水力坡降 $i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{2.75 - 1}{1 + 0.63} = 1.07$, $i < i_{cr}$, 所以试样不会发生流土现象。

思考题与习题

2-1 简述土的击实试验的原理,如何确定土的最优含水率?

2-2 简述影响土的压实因素。

2-3 什么叫压实系数?如何控制填土压实质量?

2-4 什么是达西定律?其表达式如何?它的适用条件是什么?

2-5 什么是土的渗透系数?影响土的渗透系数的因素是什么?

2-6 常水头和变水头渗透试验方法有何区别?各适用于什么情况?

2-7 渗透变形有哪些形式?各自有什么特征?

2-8 渗透变形的防治都有哪些工程措施?

2-9 什么叫渗透力?其大小、方向如何确定?

2-10 渗透力对土的稳定性有何影响?为什么说渗透力是体积力?

2-11 对某原状土样进行变水头试验,试样高 4cm,横截面面积为 30cm^2 ,变水头管的内截面面积为 30cm^2 ,试验开始时总水头差为 195cm,20min 后降至 185cm,水的温度为 15°C 。求该土样的渗透系数 K_{20} 。

2-12 对某细砂进行常水头渗透试验。土样的长度为 10cm,土样的横截面面积为 86cm^2 ,水位差为 8.0cm,经测试在 120s 内渗透的水量为 300cm^3 ,试验时水温为 15°C 。试求水温为 20°C 时该土的渗透系数 K_{20} 和渗透速度。

2-13 某试样长 30cm,其横截面面积为 103cm^2 ,作用于试样两端的固定水头差为 90cm,此时通过试样流出的水量为 $120\text{cm}^3/\text{min}$,问该试样的渗透系数是多少?