

土的渗透性与渗流 (Permeability and Flow of Water through Soil)

3.1 概述 (Introduction)

土的骨架由土颗粒组成,颗粒之间的孔隙是相互连通的。在饱和土中,水充满整个孔隙,当不同位置的自由水存在能量差时,水将从能量高的位置向能量低的位置流动,如图 3.1 所示。水在土体孔隙中流动的现象称为渗流;土能够被水等流体通过的性质称为土的渗透性。土中水的渗流在层流条件下满足达西定律,而土的渗透性大小和土的粒径、级配、矿物成分等众多因素有关。由渗流作用产生的孔隙水对土骨架的作用力称为渗透力,渗透力会引起土体应力状态的改变,从而导致土的强度和变形特性的变化。

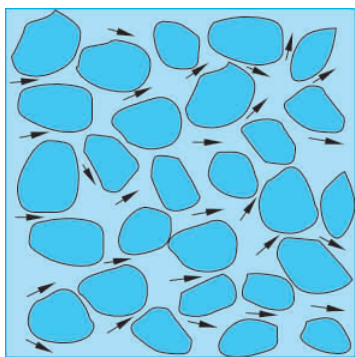


图 3.1 土的渗透特性图

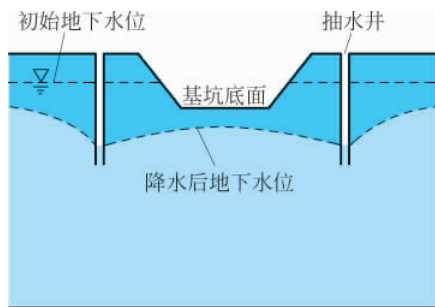


图 3.2 基坑降水示意图

在实际工程中,与渗流有关的问题非常普遍,这些问题主要可以分成两类:①渗流量问题。如基坑(图 3.2)、隧道等工程开挖过程中的降水、排水,土坝由于渗透造成水量损失等。②渗透破坏问题。渗流过程中当渗透力过大时,土颗粒间可能发生相对运动甚至土体的整体移动,使土体产生变形甚至破坏,造成边坡、堤坝或基坑的失稳破坏。因此,掌握水在土中的渗透规律具有重要的现实意义。

本章主要介绍土的渗透性和渗透规律、渗透力和渗透破坏以及二维渗流和流网等方面的内容。

3.2 土的渗透规律(Law for Flow of Water through Soil)

3.2.1 水头与水力梯度(Head and Hydraulic Gradient)

水头指单位重量的水具有的机械能,其由三部分组成:位置水头(用符号 h_z 表示)、压力水头(用符号 h_p 表示)和速度水头(用符号 h_v 表示)。位置水头为水到基准面的竖直距离($h_z=z$),代表单位质量的水从基准面算起所具有的位置势能;压力水头为水压力所能引起的自由水面的升高($h_p=u/\gamma_w$, u 为水压力),表示单位质量的水所具有的压力势能;速度水头表示单位质量的水所具有的动能($h_v=v^2/2g$)。三者之和称为总水头,用符号 h 表示:

$$h = h_z + h_p + h_v = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (3.1)$$

由于土中水的流动速度较小,速度水头通常可以忽略,此时

$$h = h_z + h_p = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (3.2)$$

如图 3.3 所示,位置水头和压力水头之和为测压管内自由水面到基准面的竖直距离,因而称为测管水头。土中水流动的时候,总是从测管水头高的地方流向测管水头低的地方。在图 3.3 中,虽然 B 点的位置水头高于 A 点的位置水头($z_B > z_A$),但 A 点的测管水头高于 B 点的测管水头($h_A > h_B$),因而水是从 A 点流向 B 点。 A 点和 B 点的水头之差为

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(z_A + \frac{u_A}{\gamma_w} \right) - \left(z_B + \frac{u_B}{\gamma_w} \right) \quad (3.3)$$

Δh 称为水头损失,其反映了水从 A 点流向 B 点过程中由于克服水与土颗粒之间的摩阻力产生的能量损失。

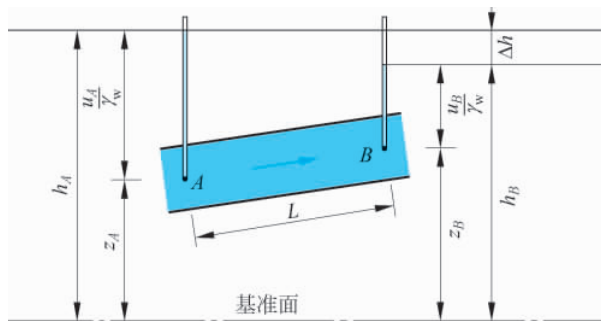


图 3.3 位置水头、压力水头和测管水头

水从 A 点流向 B 点的水头损失 Δh 与水从 A 点流向 B 点经过的渗流长度 L 之比称为水力梯度(或称水力坡降),用符号 i 表示,即

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.4)$$

水力梯度 i 没有量纲,其反映了单位渗流长度上的水头损失。

3.2.2 达西渗透定律(Darcy's Law)

为了揭示水在土体中的渗透规律,法国工程师达西(Darcy)利用如图 3.4 所示的试验装

置,对均匀的砂土进行了大量的渗透试验,表 3.1 为其在 1856 年发表的部分试验数据。达西对试验数据进行深入分析,发现水在土中的渗透速度与土样上下两端的水头差成正比,而与渗流长度成反比,提出了

$$v = k \frac{\Delta h}{L} = ki \quad (3.5)$$

和

$$q = vA = kiA \quad (3.6)$$

式中, v ——渗透速度(m/s 或 cm/s);

q ——单位时间渗出水量(m^3/s 或 cm^3/s);

A ——土样截面积(m^2 或 cm^2);

k ——反映土的透水性能的比例系数,称为渗透系数(m/s 或 cm/s),其物理意义为水力梯度 i 等于 1 时的渗透速度。

表 3.1 达西渗透试验部分数据

试验编号	试验时长/min	流量 q / (L/min)	水头差 $\Delta h/\text{m}$	$(q/\Delta h)/ (10^{-3} \text{m}^2/\text{min})$
第 1 组,砂土试样厚度 $L=0.58\text{m}$				
1	25	3.60	1.11	3.25
2	20	7.65	2.36	3.24
3	15	12.00	4.00	3.00
4	18	14.28	4.90	2.91
5	17	15.20	5.02	3.03
6	17	21.80	7.63	2.86
7	11	23.41	8.13	2.88
8	15	24.50	8.58	2.85
9	13	27.80	9.86	2.82
10	10	29.40	10.89	2.70
第 2 组,砂土试样厚度 $L=1.14\text{m}$				
1	30	2.66	2.60	1.01
2	21	4.28	4.70	0.91
3	26	6.26	7.71	0.81
4	18	8.60	10.34	0.83
5	10	8.90	10.75	0.83
6	24	10.40	12.34	0.84
第 3 组,砂土试样厚度 $L=1.71\text{m}$				
1	31	2.13	2.57	0.83
2	20	3.90	5.09	0.77
3	17	7.25	9.46	0.76
4	20	8.55	12.35	0.69

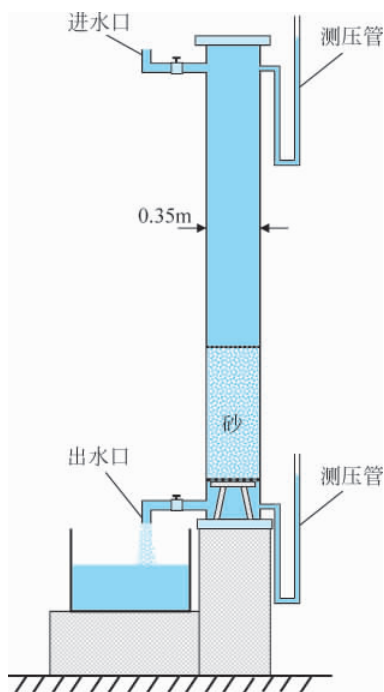


图 3.4 达西渗透试验装置

式(3.5)即为达西渗透定律。应该注意的是,式中的速度是假定水在土中的渗透是通过整个土体截面的假想速度,而实际上水仅在土颗粒之间的孔隙流动(图 3.5),所以土中孔隙水的实际平均流速 v_s 要比式(3.5)中的速度大,可推导出它们之间的关系为

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (3.7)$$

上式中 n 为土的孔隙率。由于直接测定实际平均流速很困难,为了应用上的方便,在渗流计

算中仍采用式(3.5)中的渗透速度。

达西定律表明,渗透速度 v 和水力梯度 i 呈线性关系。然而,许多学者的研究表明,达西定律只有在渗流为层流的时候适用。一般情况下,中砂、细砂、粉砂中的渗透速度较小,渗流为层流,渗流运动规律符合达西定律。对于粗砂、砾石和卵石等粗颗粒土,只有当水力梯度较小时,才符合达西定律;当水力梯度较大时,水流速度较大,水在土中的流动由层流过渡为紊流,此时渗透速度与水力梯度呈非线性关系,达西定律不再适用,如图 3.6 所示。

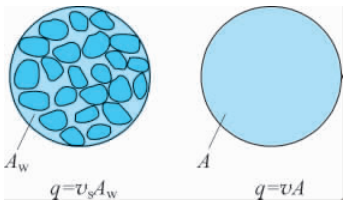


图 3.5 渗透速度的假定

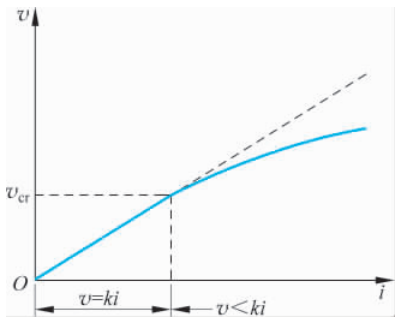


图 3.6 达西定律的适用范围

3.2.3 渗透系数的测定(Determination of the Coefficient of Permeability)

渗透系数综合反映了土体的透水能力,是土的一个重要性质指标。渗透系数的测定可以分为室内试验和现场试验两大类。室内试验根据测试的原理,可分为常水头试验和变水头试验。常水头试验适用于透水性强的无黏性土,而变水头试验适用于透水性弱的黏性土。现场试验主要包括井孔抽水试验和井孔注水试验。下面分别介绍常水头试验、变水头试验和井孔抽水试验的基本原理。

【人物简介】



达西
(1803—1858)

达西(Henry Philibert Gaspard Darcy)于 1803 年 6 月 10 日出生于法国第戎(Dijon),1821 年进入巴黎理工学校(Polytechnic School)学习,两年后转入巴黎路桥学校(School of Bridges and Roads),毕业后进入路桥公司工作。

达西的一项杰出成就就是他为家乡所设计和主持建造的供水系统。该系统全程封闭,根据地势特点将 12.7km 外的 Rosoir 泉水引至第戎市,输水量为每天约 10000m³,该系统甚至比巴黎的供水系统早了 20 年。1848 年,达西担任科多尔省(第戎为省府)的总工,之后担任巴黎的水务与道路总监。1856 年,达西在经过大量的试验后,于第戎发表了他对孔隙介质中水流的研究成果,即著名的达西定律。成果发表在《第戎市的公共喷泉》(Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon)一书中。

1. 常水头试验

常水头试验是在整个试验过程中水头保持不变,前面介绍的达西渗透试验即为常水头试验。

常水头试验装置如图 3.7 所示。试验时,饱和试样的高度即渗透长度为 L ,截面面积为 A ,试样上下截面的水头差保持不变,恒为 h 。试验过程中,用量筒和秒表测出在某一时间 t 内流经试样的水量 V ,根据达西定律有

$$V = qt = vAt = k \frac{h}{L} At \quad (3.8)$$

因此

$$k = \frac{VL}{Aht} \quad (3.9)$$

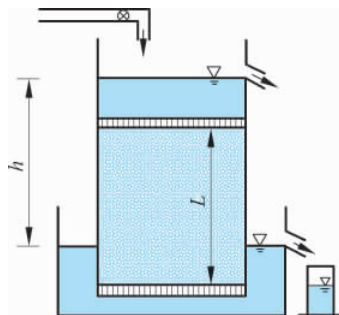


图 3.7 常水头试验装置示意图

[例题 3.1] 已知达西进行的第 1 组砂土渗透试验中(试验数据见表 3.1),砂土试样的直径 D 为 0.35m,长度 L 为 0.58m,试根据试验数据确定该砂土的渗透系数。

解: 试样的截面面积为

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.35^2 \text{ m}^2 = 0.0962 \text{ m}^2$$

根据表中各个试验测得的流量 q 和试样的截面面积 A 可计算得到相应的流速 v ($v = q/A$); 试样长度 L 为 0.58m,根据表中各个试验测得的水头差 Δh 可计算得到相应的水力梯度 i ($i = \Delta h/L$),计算结果见表 3.2。

表 3.2 达西渗透试验第 1 组数据分析

试验编号	试验时长/min	流量 q /(L/min)	水头差 Δh /m	流速 v /(cm/s)	水力梯度 i
1	25	3.60	1.11	0.062	1.91
2	20	7.65	2.36	0.132	4.07
3	15	12.00	4.00	0.207	6.90
4	18	14.28	4.90	0.247	8.45
5	17	15.20	5.02	0.263	8.66
6	17	21.80	7.63	0.377	13.16
7	11	23.41	8.13	0.405	14.02
8	15	24.50	8.58	0.424	14.79
9	13	27.80	9.86	0.481	17.00
10	10	29.40	10.89	0.509	18.78

将计算结果绘制在 $v-i$ 坐标系中,利用最小二乘法对数据进行线性拟合,并使直线过原点,拟合出的直线如图 3.8 所示,从中可得到该砂土的渗透系数 $k=0.0285\text{cm/s}$ 。

2. 变水头试验

由于黏性土的渗透系数很小,用常水头试验不易准确测定,需采用变水头试验测量。变水头试验是在整个试验过程中,水头差随时间变化的渗透试验。变水头试验装置如图 3.9 所示,饱和试样的高度即渗透长度为 L ,截面面积为 A 。试验过程中,试样下截面的

水头保持不变,而试样上截面连接的细管中的水位由于水从试样中流出而逐渐下降,因此渗流水头差随试验时间的增加而减小。设细管的内截面面积为 a ,试验开始后某一时刻 t 的水头差为 h ,经过 dt 时段后,细管中的水位下降 dh ,则在 dt 时段内由细管流入试样的水量为

$$dV_i = -a dh \quad (3.10)$$

式中,负号表示渗水量随 h 的减小而增加。

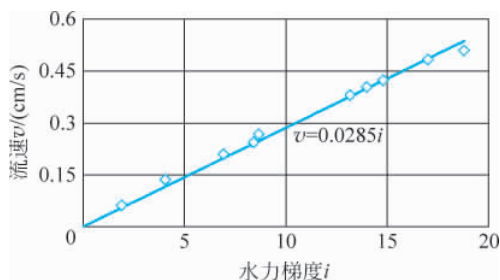


图 3.8 达西渗透试验数据的拟合

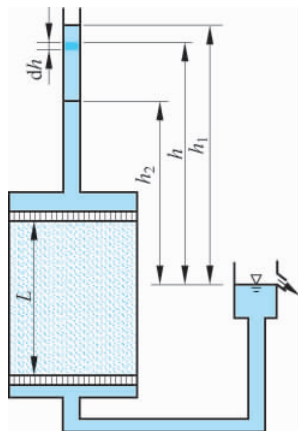


图 3.9 变水头试验装置示意图

根据达西定律,在 dt 时段内流出试样的水量为

$$dV_o = kiA dt = k \frac{h}{L} A dt \quad (3.11)$$

根据连续性条件, $dV_i = dV_o$, 有

$$dt = -\frac{aL}{kA} \frac{dh}{h} \quad (3.12)$$

将上式两边在 $t_1 \sim t_2$ 时段内积分,得

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = -\int_{h_1}^{h_2} \frac{aL}{kA} \frac{dh}{h} \quad (3.13)$$

于是可得土的渗透系数

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.14)$$

如用常对数表示,上式可写成

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (3.15)$$

式(3.15)中的 a 、 L 、 A 为已知,试验时只要测量与时刻 t_1 、 t_2 对应的水位 h_1 、 h_2 ,即可求出渗透系数。

[例题 3.2] 某变水头渗透试验中试样的截面面积为 30cm^2 ,高度为 4cm ,试样上截面连接的细管的内径为 0.4cm 。试验开始时的水头差为 130cm ,经过 500s 后水头差下降为 108cm ,试验时的水温为 20°C ,求该试样的渗透系数。

解: 已知试样的截面面积 $A = 30\text{cm}^2$,渗透路径长度 $L = 4\text{cm}$,细管的内截面面积 $a = \pi d^2/4 = 0.126\text{cm}^2$, $h_1 = 130\text{cm}$, $h_2 = 108\text{cm}$, $t_1 = 0\text{s}$, $t_2 = 500\text{s}$,所以

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \\
 &= \frac{0.126 \times 4 \text{ cm}}{30 \times (500 - 0) \text{ s}} \ln \frac{130}{108} \\
 &= 6.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}
 \end{aligned}$$

3. 现场井孔抽水试验

对于粗粒土,室内试验时取得原状土样的难度较大,用现场井孔抽水试验测出的渗透系数往往要比室内试验更可靠,但现场试验所需费用较高。

图 3.10 为一现场井孔抽水试验示意图。在现场打一口试验井,穿过要测定渗透系数的粗粒土层到达不透水层,并在距井中心不同距离处设置一个或两个观测孔。然后自井中以不变的速率连续进行抽水,抽水造成井周围的地下水位逐渐下降,形成一个以井孔为轴心的漏斗状地下水面。待出水量和井中的水位稳定一段时间后,测定单位时间自井内抽出的水量 q ,以及距井轴线的距离分别为 r_1 、 r_2 的观测孔内的水位高度 h_1 、 h_2 。

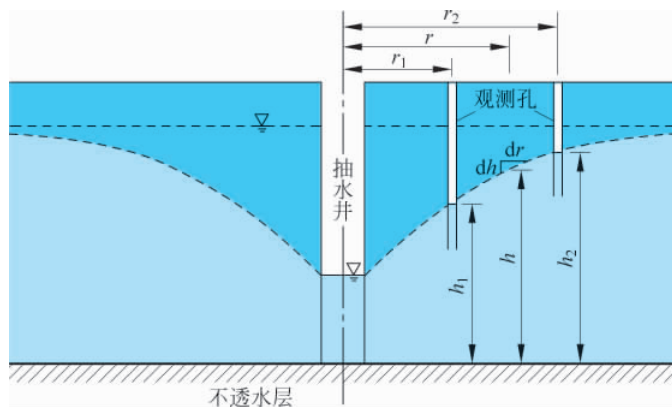


图 3.10 现场井孔抽水试验示意图

为推导渗透系数,假定:①粗粒土层分布均匀、各向同性;②渗透特性符合达西定律;③水流是水平流向抽水井;④任一半径处的水力梯度为常数,且等于该半径处地下水水位的斜率。根据假定③可知,流向水井的渗流过水断面应是一系列的同心圆柱面,现围绕井心取一过水断面,该断面距井中心距离为 r ,水面高度为 h ,则过水断面面积为

$$A = 2\pi rh \quad (3.16)$$

由假定④可知,该处的水力梯度 $i = dh/dr$ 。根据达西定律,单位时间自井内抽出的水量为

$$q = Aki = 2\pi rhk \frac{dh}{dr} \quad (3.17)$$

分离变量,得

$$q \frac{dr}{r} = 2\pi kh dh \quad (3.18)$$

等式两边同时积分,得

$$q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi k \int_{h_1}^{h_2} h dh \quad (3.19)$$

积分并整理可得

$$k = \frac{q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.20)$$

如用常对数表示,上式可写成

$$k = 2.3 \frac{q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (3.21)$$

[例题 3.3] 如图 3.11 所示,透水土层厚 18m,其下为不透水层。初始地下水位在地表下 2.1m,进行井孔抽水试验时自井内抽出的水量为 $2.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$,与抽水井距离为 16m 和 32m 的观测井中的水位分别下降了 1.8m 和 1.5m,试确定透水土层的渗透系数。

解: 根据已知条件可得

$$r_1 = 16\text{m}$$

$$r_2 = 32\text{m}$$

$$h_1 = (18 - 2.1 - 1.8)\text{m} = 14.1\text{m}$$

$$h_2 = (18 - 2.1 - 1.5)\text{m} = 14.4\text{m}$$

所以

$$k = \frac{q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} = \left[\frac{2.3 \times 10^{-2}}{\pi(14.4^2 - 14.1^2)} \ln \frac{32}{16} \right] \text{m/s} = 5.9 \times 10^{-4} \text{m/s}$$

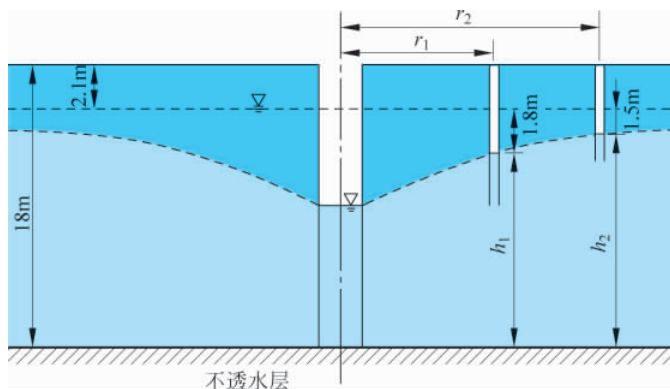


图 3.11 例题 3.3 图

3.2.4 影响渗透系数的因素 (Factors Affecting the Coefficient of Permeability)

影响土体渗透系数的因素很多,可以归纳为土的因素和水的因素两大方面,其中土的因素包括土颗粒的粒径、级配、矿物成分、孔隙比、结构和构造等,水的因素主要是水的重度和黏滞度。

土中孔隙是水流的通道,孔隙通道大小直接影响土的渗透能力。一般而言,颗粒越粗,孔隙通道就越大,透水能力就越强。表 3.3 给出了各类土渗透系数的大致范围。土的矿物成分对于砾石、砂土、粉土的渗透性影响不大,但对于黏土的渗透性有较大的影响。黏土中含有亲水性矿物或有机质时,渗透性将大大降低。含有大量有机质的淤泥几乎不透水。

表 3.3 各类土渗透系数参考值

土的种类	渗透系数/(cm/s)	渗透性
砾石、碎石、卵石	$>1 \times 10^{-1}$	高渗透性
砂土	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$	中渗透性
粉土	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$	低渗透性
粉质黏土	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	极低渗透性
黏土	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$	几乎不透水

对于同一种土,孔隙比越大,则土中过水断面越大,渗透系数也越大。渗透系数和孔隙比之间的关系是非线性的,关于渗透系数与孔隙比之间的经验公式也比较多,如泰勒(Taylor,1948)根据试验结果提出了下面的公式:

$$k = d_{50}^2 \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{C_1 e^3}{1+e} \quad (3.22)$$

式中, C_1 ——与颗粒形状有关的常数;

η ——水的动力黏滞系数(Pa·s)。

天然土体往往具有复杂的结构,结构一旦受到扰动,原有过水通道的形状、大小和分布就会发生改变,土的渗透性也就发生改变。天然土层通常不是各向同性的,在渗透性方面往往也是如此,如在黏性土层中有很薄的砂土夹层时,土在水平方向的渗透系数要比竖向的渗透系数大得多。

试验表明,渗透系数与渗透液体的重度及动力黏滞系数有关,正如式(3.22)所反映的,其与液体的重度成正比,而与动力黏滞系数成反比。当水为渗流液体时,水的温度不同, γ_w 相差不大,但动力黏滞系数变化较大。水温升高,动力黏滞系数降低,渗透系数增大。因此,测得的渗透系数应根据试验时的温度进行修正,使其成为标准温度下的渗透系数值。《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)采用20℃为标准温度,标准温度下的渗透系数按下式计算:

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (3.23)$$

式中, k_{20} ——标准温度20℃时试样的渗透系数(m/s);

k_T —— T ℃时试样的渗透系数(m/s);

η_{20} ——20℃时水的动力黏滞系数(Pa·s);

η_T —— T ℃时水的动力黏滞系数(Pa·s)。

不同温度下水的动力黏滞系数和黏滞系数比见表3.4。

表 3.4 水的动力黏滞系数和黏滞系数比

温度 /℃	动力黏滞系数 $\eta/(10^{-6} \text{ kPa}\cdot\text{s})$	黏滞 系数比 η_T/η_{20}	温度 /℃	动力黏滞系数 $\eta/(10^{-6} \text{ kPa}\cdot\text{s})$	黏滞 系数比 η_T/η_{20}	温度 /℃	动力黏滞系数 $\eta/(10^{-6} \text{ kPa}\cdot\text{s})$	黏滞 系数比 η_T/η_{20}
12	1.239	1.227	16	1.115	1.104	20	1.010	1.000
13	1.206	1.194	17	1.088	1.077	21	0.986	0.976
14	1.175	1.163	18	1.061	1.050	22	0.968	0.958
15	1.144	1.133	19	1.035	1.025	23	0.941	0.932

续表

温度 /℃	动力黏滞系数 $\eta/(10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s})$	黏滞 系数比 η_T/η_{20}	温度 /℃	动力黏滞系数 $\eta/(10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s})$	黏滞 系数比 η_T/η_{20}	温度 /℃	动力黏滞系数 $\eta/(10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s})$	黏滞 系数比 η_T/η_{20}
24	0.919	0.910	28	0.841	0.833	32	0.773	0.765
25	0.899	0.890	29	0.823	0.815	33	0.757	0.750
26	0.879	0.870	30	0.806	0.798	34	0.742	0.735
27	0.859	0.850	31	0.789	0.781	35	0.727	0.720

3.2.5 层状地基的等效渗透系数(The Equivalent Permeability of Stratified Soil)

天然场地往往由渗透性不同的多个土层所组成。对于沿与土层层面平行或垂直方向的渗流,如各土层的渗透系数和厚度已知,可求出整个土层与层面平行和垂直的等效渗透系数。

1. 与层面平行的渗流

对于如图 3.12 所示与成层土层面平行的渗流,在渗流场中截取一段渗透长度为 L 、与层面平行的渗流区域,各土层的水平向的渗透系数分别为 $k_{1x}, k_{2x}, \dots, k_{nx}$, 厚度分别为 $H_1, H_2, \dots, H_n$, 总厚度为 H 。假定通过各土层的渗流量为 $q_{1x}, q_{2x}, \dots, q_{nx}$, 则通过整个土层的总渗流量 q_x 为

$$q_x = q_{1x} + q_{2x} + \dots + q_{nx} = \sum_{i=1}^n q_{ix} \tag{3.24}$$

由于渗流只沿水平方向发生,因而通过各土层相同距离的水头损失均相等,各土层的水力梯度及整个土层的平均水力梯度亦相等,根据达西定律,有

$$q_x = k_x i H \tag{3.25}$$

$$q_{ix} = k_{ix} i H_i \tag{3.26}$$

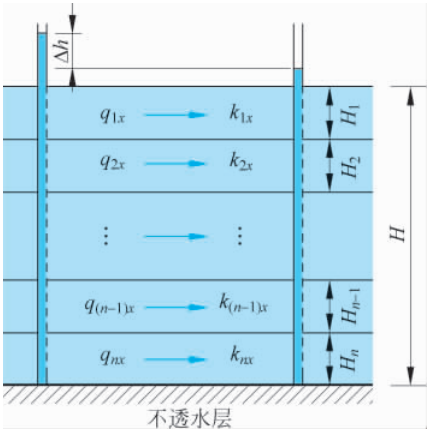


图 3.12 与层面平行的渗流