

# 黏性土渗透系数测定的影响因素分析

李珊珊, 李大勇, 史 萍

(山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**土的渗透性是土力学研究的基本问题,渗透系数是反映土体渗透性的重要参数,准确测定土体的渗透系数有重要的理论与工程应用价值。通过变水头试验,分析了变水头管横截面面积、起始水头高度、记录水头高度变化的时间间隔、温度等因素对测定渗透系数的影响,并得到渗透系数随孔隙比和干密度的变化规律。结果表明:试验前应对变水头管的横截面面积进行校订以减小误差;当起始水头高度为 110、120、140 cm 时,渗透系数随着记录水头高度变化的时间间隔增大而减小,且曲线形式相似,当起始水头高度为 100 cm 时,渗透系数随时间间隔的增加变化不大,因此,建议起始水头高度设置在 100 cm;为降低变水头管内水分蒸发对渗透系数的影响,建议记录水头高度变化的时间间隔宜小于 150 min;渗透系数与初始孔隙比和干密度的拟合关系均符合二次型函数。

**关键词:**变水头试验;渗透系数;影响因素;压实吹填黏土

中图分类号: TU476

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)03-0046-07

## Influencing Factors on Hydraulic Conductivity of Clay

LI Shanshan, LI Dayong, SHI Ping

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Soil permeability is a fundamental problem in soil mechanics, and hydraulic conductivity is one of the essential parameters reflecting soil permeability. Thus, to accurately determine the hydraulic conductivity of soils is of great theoretical and practical significance in engineering. A series of falling-head tests were conducted to investigate the behaviors of hydraulic conductivity. Some factors affecting hydraulic conductivity were explored, such as the cross-sectional area of the standpipe, change in the initial head and the time interval of reading the head and the temperature and the law of hydraulic conductivity changing with void ratio and dry density was obtained. The results show that the cross-sectional area of standpipe affected hydraulic conductivity significantly, which should be calibrated before testing. When the initial head is 110, 120 and 140 cm, the hydraulic conductivity decreases with the increase of the time interval of the head change, and the hydraulic conductivity versus the time interval curves is similar, while when the head is 100 cm, the hydraulic conductivity changes little with the increase of the time interval. Therefore, it is recommended that the initial head should be set to 100 cm and the time interval of the head change should be less than 150 min to reduce the impact of evaporation on hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity agrees well with void ratio and dry density and both their relationships can be stated with a quadratic function.

**Key words:** falling-head test; hydraulic conductivity; influence factors; compacted dredged clay

收稿日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379118); 山东科技大学科研创新团队资助项目(2015KYTD104)

作者简介: 李珊珊(1989—), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事岩土工程理论与应用研究。

E-mail: shanshan3709@163.com

李大勇(1971—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋岩土工程等方面的研究工作, 本文通信作者。

E-mail: ldy@sdust.edu.cn

土的渗透性是土力学研究的基本问题,而渗透系数是反映土体渗透性的重要参数,在土体固结理论、渗流作用下的有效应力等土力学计算理论中有重要作用<sup>[1-2]</sup>,并应用于工程降水<sup>[3]</sup>、坝堤防渗稳定<sup>[4]</sup>、桶形基础吸力沉贯<sup>[5]</sup>等实际工程分析中。因此准确确定渗透系数有重要的理论及工程意义,也是理论研究和解决工程问题的关键。

测定渗透系数的方法分为直接法和间接法。直接法是通过室内试验直接测定,包括常水头试验和变水头试验,其中,砂性土的渗透性高,通常采用常水头法测定渗透系数,试验操作相对简单,而黏性土的渗透系数通过变水头试验测定,其渗透性低,试验时间长,受周围环境因素影响大。间接法则是根据一维固结理论,通过压缩系数和固结系数间接算出,而由于固结系数的影响,使计算出的渗透系数存在较大偏差。

国内外学者试图建立土的渗透系数与易于使用的物理参数之间的关系<sup>[6]</sup>,著名的公式如适合砂性土的 Hazen 公式:  $k = CD_{10}^2$ , 式中  $C$  为 Hazen 经验系数,取值范围为 0.4~1.5,  $D_{10}$  为有效粒径,虽然 Hazen 公式使用简单,但  $C$  值范围较大,因此求解渗透系数很粗糙。之后,为了减少参数  $C$  取值的影响,Chapuis 等<sup>[7-10]</sup>提出估算砂土渗透系数的新公式

$$k = 2.4622 \left( D_{10} \frac{e^3}{1+e} \right)^{0.7825} \quad (1)$$

式中  $e$  为砂土孔隙比,其余符号的含义同前。然而,这些经验公式仅供估算时参考,不能绝对化的采用,也不能用于替代渗透试验。

国内,王媛等<sup>[11]</sup>对南京黏性土进行了 5~45 °C 下的渗透试验,发现:温度越高,渗透性越大;试样密度越小,渗透系数随温度变化率越低。曹胜飞等<sup>[12]</sup>根据膨润土的物理化学特性、变水头渗透原理和试验环境条件分析了渗透系数测量的准确性及误差产生的原因,提出常规 2 m 变水头试验装置对渗透系数极低的膨润土不适合,可采用改进的或密闭系统的试验装置。顾正维等<sup>[13]</sup>进行了原状、重塑和固化黏土进行饱和和渗透试验,认为:原状黏土的渗透系数随时间的延长而逐渐减小;重塑黏土的孔隙比对渗透系数的影响关系曲线可用幂函数拟合。朱熹文等<sup>[14]</sup>讨论了淤泥质饱和土渗透系数的试验方法,并依据浙江乐清北巷区吹填土样、上海闵行河道土样的渗透试验结果提出涵盖高含水率情况的淤泥质饱和土的渗透系数经验公式,该公式适用于粒径范围为  $d_5 \leq 2 \mu\text{m} \leq d_{90}$ , 孔隙比范围为  $0.8 \leq e \leq 4.0$ 。张明等<sup>[15]</sup>对深圳前湾吹填淤泥进行了固结渗透联合试验,认为吹填淤泥的渗透系数随固结压力的增加呈非线性变化,渗透系数与孔隙比之间为幂函数关系。

综上所述,渗透性研究的土类涉及砂土、膨润土、黏性土、淤泥及淤泥质黏土。其中,淤泥质黏土在我国东部沿海有较多分布,将吹填淤泥用于围海造地已成为缓解土地资源紧张的一种方法。同时,青岛正大力推进西海岸建设,而西海岸吹填土多为海底淤泥质软黏土,可将吹填海底软土用于围海造地的方法推广应用,以此为工程背景,对压实后的吹填淤泥质软黏土的渗透性进行了测试。然而,在黏土渗透系数的测定过程中,发现我国土工试验方法标准<sup>[16]</sup>中的某些规定比较模糊,实际操作时存在困难,如:“变水头管内径应均匀”、“水头高度根据试样结构的疏松程度确定,一般不大于 2 m”、“按预定时间间隔测记水头和时间的变化”等。本文旨在研究影响淤泥质软黏土渗透系数精确测定的因素,期望对规范中变水头试验部分进行相应的补充或明确,便于指导实际操作。

## 1 试验

1) 试验装置:试验采用 STS-55 型渗透仪,由上盖、底座、套座、螺杆、环刀(内径 61.8 mm、高 40 mm)、透水石(渗透系数大于  $10^{-3}$  cm/s)、变水头装置组成。其中,变水头装置由渗透容器、变水头管、供水瓶、进水管等组成,变水头管内径标注为 6 mm、长度为 1.7 m,管外壁刻度尺精度为 1 mm。

2) 试验用土:试验用土取自青岛黄岛压实吹填淤泥质软黏土,土质较均匀,呈灰黑色,其基本物理参量汇于表 1 中,而轻型击实试验得出的压实曲线如图 1 所示,得到土样的最大干密度为  $1.82 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为 17.2%。

表 1 土的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of soil

含水率/%	孔隙比	比重	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	液限	塑限	塑性指数
47.95	1.13	2.70	1.86	37.2	17.1	20.1

3) 土样制备: ①将土样烘干、碾碎, 过 0.1 mm 孔径筛, 称取过筛土, 按最优含水率(以最优含水率配制试样, 其最易压实)计算用水量, 分层洒水并充分搅拌, 用保鲜膜密封保存一段时间, 使土样内水分均匀分布, 复测土样含水率, 若土样含水率偏离最优含水率较大, 重新调配土样; ②采用轻型击实仪制备试样, 分 3 层压实, 每层击 25 次, 用推土器将土筒内土推出, 再用涂有凡士林的标准环刀切取试样, 放入饱和器内, 在真空缸中抽气饱和 6 h, 水中静置 10 h, 使试样充分饱和, 当饱和度低于 95% 时, 继续抽气 1 h 左右。

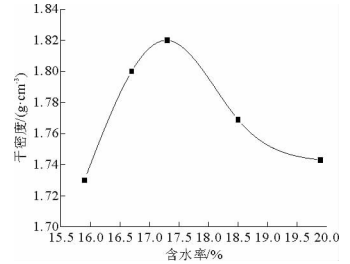


图 1 击实试验

Fig. 1 Compaction tests

## 2 渗透系数的影响因素分析

通过讨论影响黏性土渗透系数精确测定可能存在的因素, 研究了变水头管的截面面积、水头高度、记录水头高度变化的时间间隔以及水分蒸发对其测定的影响。此外, 在上述研究的基础上, 探讨了黏性土的渗透系数随土样初始孔隙比及干密度的变化规律。

### 2.1 变水头管截面面积的影响

变水头试验中渗透系数的计算公式为

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

其中:  $a$  为变水头管的截面面积;  $A$  为试样的截面面积;  $L$  为试样高度;  $H_1$  为起始水头高度;  $H_2$  为终止水头高度;  $t_2, t_1$  分别对应  $H_2$  和  $H_1$  的记录时刻;  $(t_2 - t_1)$  为记录变水头管内水头高度变化的时间间隔。从公式(2)可看出, 变水头管的截面面积是影响渗透系数测定的一个因素, 而变水头管的截面面积由其内径值决定。测定变水头管内径值的具体方法为: 将变水头管内注满纯水, 管内水位每下降 20 cm 称量一次出水的质量, 再由式(3)计算变水头管的截面面积, 并通过式(4)反算出变水头管的内径值, 重复三次取平均值。

$$m = \rho \cdot a \cdot h; \quad (3)$$

$$a = \pi/4 \cdot d^2. \quad (4)$$

式中:  $m$  为出水质量, g;  $\rho$  为纯水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $a$  为变水头管的截面面积, cm<sup>2</sup>;  $h$  为水位下降高度, cm;  $d$  为变水头管内径值, cm。

测定结果表明: 变水头管内径的平均值为 5.86 mm, 小于厂家标注的 6 mm。若直接采用厂家提供的内径数据, 按式(1)计算渗透系数将产生 5% 的计算误差。然而, 变水头管内径的均匀性及其实际值均与产品质量有关, 因此, 试验前应对变水头管内径进行复核测定。

### 2.2 记录水头高度变化时间间隔的影响

国内外规范<sup>[16-17]</sup>未对试验过程中的起始水头高度及记录水头高度变化的时间间隔进行规定或提出建议, 这给实际操作带来了困难, 本节分析了在不同起始水头高度下, 渗透系数与时间间隔的变化关系, 试验工况及结果如表 2 所示。

由表 2 得到渗透系数-时间间隔关系曲线(图 2)。由图 2 分析知: 当起始水头高度为 110、120、140 cm 时, 渗透系数-时间间隔关系曲线形式基本一致, 即渗透系数随时间间隔的增大而减小, 这是因为起始阶段土体的孔隙比相对较大, 随着时间的增长试样的内部结构发生轻微的变化, 渗流力使得试样有效应力增大, 土体发生固结; 当起始水头高度为 100 cm 时, 渗透系数随时间间隔增加, 其数值变化不大。从图中还可看出, 大约在 150 min 后渗透系数数值出现增大的趋势, 这是因为变水头管内水分蒸发引起的水头损失使得渗透系

数的计算结果偏大。

渗透系数测量计算时的水头损失包括两部分：一部分是渗透引起的，一部分是管内水分蒸发引起的。而理论渗透系数计算时只考虑了前者，试验进行时间越长，测量渗透系数与理论渗透系数的偏差越大，如淤泥质软黏土的渗透性较低，试验耗时较长，变水头管内水分蒸发对渗透系数的精确测定产生影响。另外，蒸发与温度、湿度等因素有关且随时发生变化，蒸发引起的渗透系数测量误差大小不能定量的得出，只能定性的去分析，但可间接的从记录水头高度变化的时间间隔上进行控制。

表 2 试验工况及结果

Tab. 2 Test cases and results

$H_0/cm$	参数	时间/min						
		30	60	90	120	150	180	210
100	$\omega_0/\%$	17.3	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.2
	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.911	1.930	1.910	1.945	1.921	1.900	1.925
	$T/^\circ C$	23	24	23	24	25	25	25
	温度修正系数	0.932	0.910	0.932	0.910	0.890	0.890	0.890
	$k_T/(10^{-7} cm \cdot s^{-1})$	1.53	1.54	1.52	1.53	1.52	1.53	1.54
	110	$\omega_0/\%$	17.0	17.2	16.9	17.3	17.1	16.9
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$		1.920	1.910	1.894	1.898	1.900	1.897	1.893
$T/^\circ C$		24	24	25	25	25.5	23	24
温度修正系数		0.910	0.910	0.890	0.890	0.880	0.932	0.910
$k_T/(10^{-7} cm \cdot s^{-1})$		1.64	1.62	1.58	1.55	1.55	1.55	1.56
120		$\omega_0/\%$	17.0	17.1	17.1	17.2	17.3	17.2
	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.900	1.896	1.888	1.895	1.883	1.900	1.885
	$T/^\circ C$	25	25	26	25	25.5	26	27
	温度修正系数	0.890	0.890	0.870	0.890	0.880	0.870	0.850
	$k_T/(10^{-7} cm \cdot s^{-1})$	1.80	1.69	1.62	1.61	1.58	1.59	1.62
	140	$\omega_0/\%$	16.8	17.0	17.1	17.0	17.2	16.9
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$		1.873	1.880	1.877	1.900	1.910	1.893	1.888
$T/^\circ C$		26	25	27	27	26	27.5	27
温度修正系数		0.870	0.890	0.850	0.850	0.870	0.842	0.850
$k_T/(10^{-7} cm \cdot s^{-1})$		1.81	1.74	1.67	1.64	1.61	1.63	1.64

表中： $H$ 为变水头管内的初始水头高度；修正系数参考 GB/T 50123—1999 土工试验方法标准<sup>[16]</sup>； $\omega_0$ 为试样的初始含水率； $\rho$ 为试样的密度； $k_T$ 为渗透系数；时间为记录水头高度变化的时间间隔。

综上所述，对软黏土进行变水头渗透试验时，建议变水头管内起始水头的高度可设置在 100 cm 左右，且记录起始水头和终止水头高度变化的时间间隔不宜过长，宜控制在 150 min 以内。

### 2.3 渗透系数与孔隙比、干密度的关系

制备了 8 组初始孔隙比、干密度不同的试样，并采用上述建议进行试验，试验中需随时测定渗透仪出水管口处的水温，对试验的渗透系数进行温度修正，以 20 °C 为标准温度，标准温度下的渗透系数公式为

$$k_{20} = (\eta_T / \eta_{20}) \cdot k_T \quad (5)$$

式中： $k_{20}$ 为标准温度下的渗透系数， $cm \cdot s^{-1}$ ； $\eta_T$ 为温度  $T$  时水的动力粘滞系数， $kPa \cdot s$ ； $\eta_{20}$ 为 20 °C 时水的动力粘滞系数，可查文献<sup>[16]</sup>中表 13.1.3，试验结果如表 3 所示。

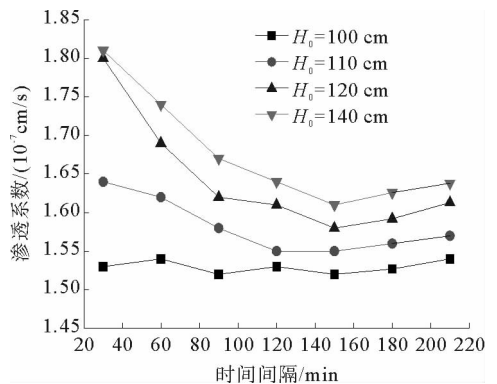


图 2 渗透系数-时间间隔关系曲线

Fig. 2 Hydraulic conductivity vs. time interval

表 3 试样的渗透系数

Tab. 3 Permeability coefficient of samples

试样编号	含水率/%	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	初始孔隙比	渗透系数/(10 <sup>-7</sup> cm/s)	温度/℃	修正系数	最终值/(10 <sup>-7</sup> cm/s)	误差/%
1	17.3	1.73	0.547	0.51	18.0	1.050	0.53	3.9
2	17.5	1.69	0.588	0.81	18.0	1.050	0.85	4.9
3	17.4	1.66	0.610	1.49	19.5	1.012	1.51	1.3
4	17.4	1.60	0.677	2.22	19.0	1.025	2.27	2.3
5	17.0	1.55	0.739	5.37	26.0	0.870	4.67	-13.2
6	17.4	1.51	0.777	6.56	28.0	0.833	5.46	-16.8
7	17.3	1.44	0.851	8.42	27.0	0.850	7.16	-14.9
8	17.2	1.38	0.928	11.68	28.0	0.833	9.73	-17.9

图 3 为压实吹填黏土渗透系数-初始孔隙比关系曲线,由图可知:渗透系数随初始孔隙比增加逐渐增大。其中:当初始孔隙比为 0.55~0.61 时,增长趋势较为平缓;而当初始孔隙比大于 0.61,曲线呈现明显增长趋势;试样渗透系数与初始孔隙比的关系符合二次型函数(如式(6)所示),相关系数达 0.97,拟合结果理想。

图 4 为渗透系数-干密度关系曲线,可以发现:渗透系数随干密度增大呈逐渐减小趋势。其中,当干密度为 1.38~1.60 g/cm<sup>3</sup> 时,曲线较陡,渗透系数减小幅度大,而当干密度大于 1.60 g/cm<sup>3</sup>,曲线变缓,渗透系数减小趋势减弱;曲线拟合结果表明:二次型函数拟合的效果最好,其相关系数达 0.98,表达式如式(7)所示。

$$k = 22.43e_0^2 - 8.35e_0 - 1.80; \quad (6)$$

$$k = 33.94\rho_d^2 - 132.2\rho_d + 127. \quad (7)$$

式中: $k$  为修正后的渗透系数,其数量级为 10<sup>-7</sup> cm · s<sup>-1</sup>;  $e_0$  为试样的初始孔隙比;  $\rho_d$  为试样的干密度, g · cm<sup>-3</sup>。

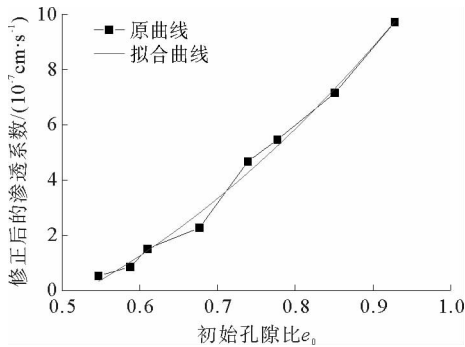


图 3 渗透系数-初始孔隙比关系曲线

Fig. 3 Hydraulic conductivity vs. initial void ratio

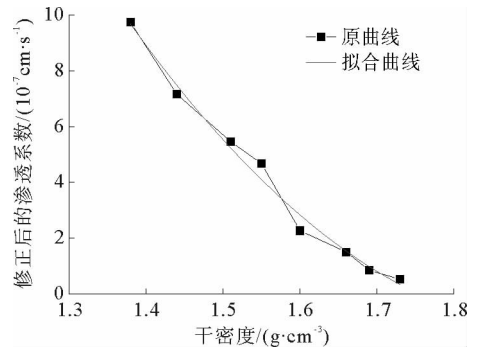


图 4 渗透系数-干密度关系曲线

Fig. 4 Hydraulic conductivity vs. dry density

此外,试验中发现试样的初始孔隙比不同,渗透仪出水管口处初次溢出水的时间差别较大(表 4),试样初次溢水时间-初始孔隙比关系曲线如图 5 所示。结果表明:当初始孔隙比在 0.547~0.610 时,溢水时间约为 48 h;当初始孔隙比在 0.677~0.777 时,溢水时间约 14 h;当初始孔隙比大于 0.851 时,时间为 2 h 左右,因此,试样初始孔隙比不同,出水管口处溢出水的时间差别很大。当初始孔隙比较小时,需要等待很长时间,试样才会渗透溢水,并进行相关试验数据的记录,因此试验进行得很慢,需要试验人员随时观察并且

表 4 试样初次溢水时间

Tab. 4 The first time of spilling water of sample

$e_0$	0.547	0.588	0.610	0.677	0.739	0.777	0.851	0.928
$t/h$	48	46	43	20	14	9	2.5	1

要有耐心。

### 3 结论

为保证试验结果具有可重复性、可靠性,每个试验工况至少重复3次,最大值与最小值误差不超过3%,否则重新进行试验,最后结果取其平均值。由于试验工况较多,本次试验历时近4个月,得到如下研究成果,为《土工试验方法标准》中变水头试验有关条文的执行提供参考。

1) 试验前应重新标定变水头管的内径值,以降低变水头管截面面积对精确测定黏性土渗透系数的影响。

2) 当初始水头高度为110、120、140 cm时,渗透系数随时间间隔的增大而减小,且曲线的变化规律相似;而当起始水头高度为100 cm时,渗透系数随时间间隔增加其变化不大。因此,对淤泥质软土进行变水头渗透试验时,建议将起始水头高度设置在100 cm。

3) 为降低变水头管内水分蒸发对渗透系数的影响,建议记录水头高度变化的时间间隔宜小于150 min。

4) 重塑压实淤泥质软土的渗透系数随初始孔隙比增大呈正相关性,而随干密度增大呈负相关性,且均以二次型函数关系的拟合效果最好。

5) 试样初次渗透溢水的时间受试样初始孔隙比的影响较大,尤其当压实程度较好、孔隙比较低时,试样的初次渗透出水时间非常长,一般为40 h以上,试验人员需要耐心等待。

### 参考文献:

[1] DAS B, Sobhan K. Principles of geotechnical engineering[M]. 7th ed. New York: Cengage Learning, 2010.

[2] DOLINAR B. Predicting the hydraulic conductivity of saturated clays using plasticity-value correlations[J]. Applied Clay Science, 2009, 45(1/2): 90-94.

[3] 李玉岐. 考虑渗流影响的基坑工程性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[4] 吴世余, 宋新江. 不透水地基上坝坝渗透计算的理理解[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1695-1702.

WU Shiyu, SONG Xinjiang. Analytic solution of seepage calculation for dams and levees on impervious strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1695-1702.

[5] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 中粗砂中吸力锚的负压沉贯模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2277-2283.

LI Dayong, ZHANG Yukun, GAO Yufeng, et al. Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2277-2283.

[6] ISHIBASHI I, HAZARIKA H. Soil mechanics and applications[M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2015.

[7] CHAPUIS P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio[J]. Geotechnical Journal, 2004, 41(5): 787-795.

[8] DAS B, SONNAN K. Principles of geotechnical engineering[M]. 8th ed. New York: Cengage Learning, 2014.

[9] CARRIEER D. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 40: 260-261.

[10] SAMARASINGHE M, HUANG Y, DREEVICH P. Permeability and consolidation of normally consolidated soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(6): 835-850.

[11] 王媛, 施斌. 黏性土的渗透性温度效应试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 351-357.

WANG Yuan, SHI Bin. Laboratory tests for temperature effects of clayey soil permeability[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 351-357.

[12] 曹胜飞, 乔兰, 刘月妙, 等. 膨润土渗透试验误差分析和可行性探究[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, 29(增2): 4202-4206.

CAO Shengfei, QIAO Lan, LIU Yuemiao, et al. Error analysis and feasibility research on permeability experiment of bentonite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4202-4206.

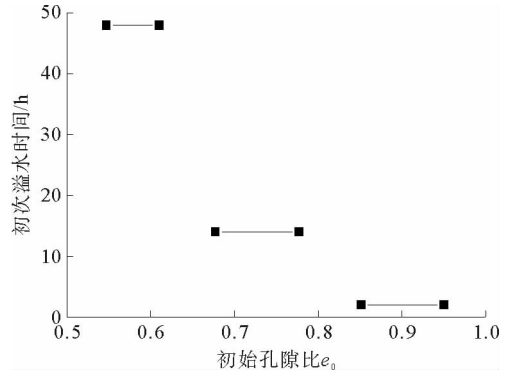


图5 初次溢水时间-初始孔隙比关系曲线

Fig. 5 First time of spilling water vs. initial void ratio

- [13] 顾正维, 孙炳楠, 等. 粘土的原状土、重塑土和固化土渗透性试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(3): 505-508.  
GU Zhengwei, SUN Bingnan, et al. Testing study of permeability of the original clay, recomposed clay and improved clay with stabilizer ZDYT-1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 505-508.
- [14] 朱熹文, 严建明, 王贤奔, 等. 淤泥质饱和土渗透系数的室内实验研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(9): 107-111.  
ZHU Xiwen, YAN Jianming, WANG Xianben, et al. Laboratory investigation of the permeability of saturated muddy clays [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2014, 45(9): 107-111.
- [15] 张明, 蒋敏敏, 赵有朋. 基于 GDS 固结仪的吹填淤泥非线性渗透性及参数测定[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 625-632.  
ZHANG Ming, JIANG Minmin, ZHAO Youpeng. Nonlinear permeability and parameter determination of dredged based on GDS consolidation apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 625-632.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准[S].
- [17] ASTM D4491-99a. Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity[S].

(责任编辑: 吕海亮)

---

(上接第 45 页)

- [9] PALMER A C, NEILSON A, SIVADASAN S. Impact resistance of pipelines and the loss-of-containment limit state[J]. Journal of Pipeline Integrity, 2003, 2(4): 231-240.
- [10] NISHIDA M, TANAKA K. Experimental study of perforation and cracking of water filled aluminum tubes impacted by steel spheres[J]. International Journal of Impact Engineering 2006, 32(12): 2000-2016.
- [11] QASIM H, SHAH. Experimental and numerical study on the orthogonal and oblique impact on water filled pipes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(4): 330-338.
- [12] LU G Y, ZHANG S Y, LEI J P, et al. Dynamic responses and damages of water-filled pre-pressurized metal tube impacted by mass[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(8): 1594-1601.
- [13] 路国运, 雷建平, 武勇忠, 等. 多跨薄壁压力管道侧向冲击破坏的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 454-459.  
LU Guoyun, LEI Jianping, WU Yongzhong, et al. Experimental research on failure of multi-span thin-walled pressure pipelines impacted by projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 454-459.

(责任编辑: 吕海亮)