

DOI: 10.11779/CJGE201809009

水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究

宋林辉¹, 黄强¹, 闫迪¹, 梅国雄²

(1. 南京工业大学数理科学学院, 江苏 南京 211800; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 渗透性是土体的重要工程性质之一, 其受孔隙率、颗粒粒径及流体性质等诸多因素影响, 但通常认为与水力梯度无关。现采用研制的刚性壁固结渗透装置, 对经不同固结压力固结的黏土试样, 进行先逐级施加水压、后逐级解除水压条件下的固结和渗透试验。试验结果表明, 水压加载时, 受渗透力的影响, 孔隙比和渗透系数均随水力梯度增大而减小, 理论分析验证了递增水力梯度下渗透系数测试值变化趋势的合理性。水压卸载时, 孔隙比不变, 但渗透系数随水力梯度减小而继续减小, 主要与颗粒堵塞和弱结合水相关, 水力梯度较大时弱结合水处于流动状态, 水力梯度递减后, 弱结合水处于黏滞状态, 孔隙导水能力下降, 渗透系数降低, 基于试验数据的线性拟合式显示降幅可达初始值的一半。

关键词: 水力梯度; 黏土; 孔隙比; 渗透系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)09-1635-07

作者简介: 宋林辉(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: h27991@163.com。

Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay

SONG Lin-hui¹, HUANG Qiang¹, YAN Di¹, MEI Guo-xiong²

(1. School of Physical and Mathematical Sciences, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Permeability is one of the important properties of soil, which is affected by many factors such as porosity, particle size and fluid properties. However, the permeability is generally considered to be independent of hydraulic gradient. By means of the newly developed rigid wall seepage device, the consolidation and permeability tests on clay samples subjected to different consolidation pressures are carried out under the condition of first gradually loading hydraulic pressure and then gradually unloading hydraulic pressure. The results show that the void ratio and permeability coefficient decrease with the increase of the hydraulic gradient for the loaded tests. It can be found that the effective stress of the samples increases after consolidation by seepage force. The theoretical analysis verifies the rationality of the trend of permeability coefficient under increased hydraulic gradient. For the unloaded tests, the void ratio keeps constant, while the permeability coefficient continues to decrease with the decrease of the hydraulic gradient. This phenomenon is related to particle plugging and weak bound water. The larger hydraulic gradient makes the weak bound water flow. With the decrease of the hydraulic gradient, the weak bound water is in the viscous state, which leads to the decrease of pore water conductivity and the decrease of the permeability coefficient. The linear fitting based on the test data shows that the loss in the permeability coefficient can reach half of the initial value.

Key words: hydraulic gradient; clay; void ratio; permeability coefficient

0 引言

渗透系数是描述土体渗透性的指标, 最早由 Darcy 基于粗粒土的渗透试验提出, 并被广泛接受。此后, 被认可的还有 Kozeny-Carman 公式、Terzaghi 公式、Navier-Stokes 公式等, 这些公式清楚地描述了影响渗透系数的主要因素, 不过它们更适用于砂性土, 难以准确计算黏性土的渗透系数。

国内外学者对黏性土进行了大量的渗透试验, 如

Taylor^[1]和 Mesri 等^[2]通过系列渗透试验指出重塑黏土渗透系数的对数值随孔隙比的变化呈线性关系; Nagaraj 等^[3]以各级荷载下的孔隙比与液限状态下的孔隙比之比作为归一化指标, 建立了其与渗透系数之间的关系。目前, 这种渗透系数对数与孔隙比间的

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51578164, 41472283); 江苏省博士后基金项目 (2017087B)

收稿日期: 2017-05-24

线性关系式已成为经典，这也表明黏性土渗流存在非达西现象，非达西现象的研究包括渗透时的启动水力梯度和非线性渗流模型的建立。不过，水力梯度对渗透性影响的研究成果较少，梁健伟等^[4]在进行人工和天然极细颗粒黏土的渗透试验发现水力梯度的增加将导致渗透系数的减小；王福刚等^[5]用自制设备对砂土的渗透试验发现渗透系数随水力梯度略有变化；张杨清等^[6]研究发现降压回灌的渗流也会导致黏土渗透系数降低。其他相关成果则主要是不同应力状态下岩土体的渗透特性与变形方面的^[7]。

本文基于垃圾填埋场衬垫层的防渗工程背景，研制大尺寸刚性壁固结渗透装置，对经不同固结压力固结的黏土试样，进行先逐级施加水压、后逐级卸除水压条件下的固结和渗透试验，以分析水力梯度和固结压力对黏土渗透性的影响。

1 试验方案

1.1 试验土体

试验所用土体取自某垃圾填埋场，勘察报告显示土体为黄色黏土，将土体从工程现场运至实验室进行晾干、粉碎处理后，开展土工试验，以测试和分析试验土体颗粒的粒径分布、比重以及塑性指标。表 1 所示为土体常规物理参数，图 1 所示为土体的颗分曲线。

表 1 土体物理参数

Table 1 Physical parameters of soil				
土粒相对 密度	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	
2.74	46.3	19.4	26.9	
各粒组含量/%				
>0.075 mm	0.075~0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	< 0.005 mm
6.0	4.0	46.0	17.0	27.0

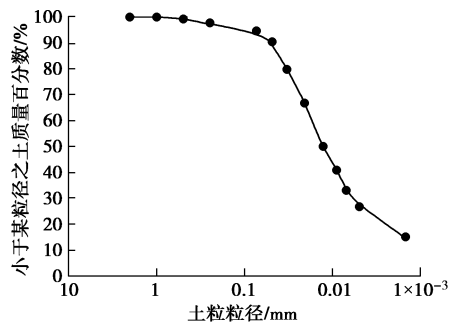


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of grain

由上述参数可判断试验土体为低液限黏土。

1.2 试验设备

因常规土工渗透仪不能提供变化的固结压力和水

力梯度，故依据本试验要求研制一套刚性壁固结渗透装置，包括渗透测试筒、固结压力施加杠杆、水压施加气泵和数据采集系统，其中的渗透测试筒是关键部件。如图 2 所示，渗透测试筒由盖板、渗流筒和底座组成，三者均由不锈钢加工而成，相互之间采用橡胶垫和螺栓连接，可装配形成密闭腔体。盖板中间设有加压杆套，加压杆通过杆套穿过盖板随杠杆上下移动来施加固结压力，加压杆上可加装位移测试板，用于放置位移计；盖板上另设两个螺纹孔，一个接水管，用来施加水压，一个接水压传感器，用来测试水压；筒体总高 600 mm、内径 203 mm，内壁经打磨光滑；底座侧边留有泄水孔，以便泄水渗流。

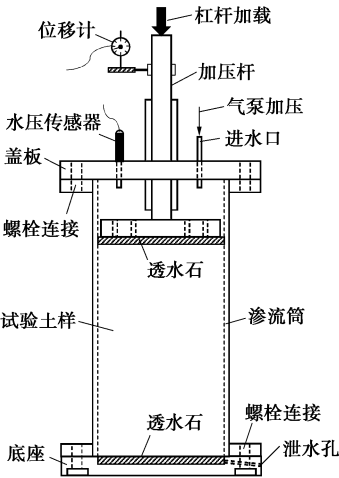


图 2 渗透测试筒

Fig. 2 Container of penetration tests

1.3 试验加载方案

渗透试验的加载方案见表 2。

表 2 试验加载方案

Table 2 Loading schemes of tests						
试验 编号	固结压力 p_c/kPa	逐级施加的水压 p_w/kPa				
		G1	G2	G3	G4	G5
TL1	100	100	200	300	400	500
TU1	100	500	400	300	200	100
TL2	200	100	200	300	400	500
TU2	200	500	400	300	200	100
TL3	300	100	200	300	400	500
TU3	300	500	400	300	200	100
TL4	400	100	200	300	400	500
TU4	400	500	400	300	200	100
TL5	500	100	200	300	400	500
TU5	500	500	400	300	200	100

注：G1~G5 表示水压施加的次序和等级。

由表 2 可知，一共进行 10 个渗透试验，可分为 5 组，每组包括在某级固结压力下进行水压逐级加载（TL 类）和逐级卸载（TU 类）两种。

1.4 试验步骤

参照试验加载方案，整个渗透试验可细分为以下

7 个步骤。

(1)准备工作:组装试验装置并进行密封性检测,确保试验过程中不漏水。

(2)土体装填:先在渗流筒内壁涂抹一层凡士林,以保证筒壁光滑且不漏水。然后采用自然沉积与加压固结相结合的方法制样,具体过程为:先在渗流筒内注水,将土样均匀填入直至略高出水面,刮平后上覆透水石,加 30 kPa 压力预压 24 h;压缩后再注水,继续均匀撒入土样并略高出水面,加压固结 24 h;重复操作将渗流筒装满土体。

(3)土体固结:土体装填完毕后,打开泄水孔,按表 2 加载方案施加固结压力(为防止一次性施加高固结压力土体被挤出,固结压力是从 100 kPa 开始、并以 100 kPa 的增幅递增至相应压力的),使用位移计监测试样的压缩变形,变形趋于稳定则视为土体固结完成。如果试样压缩量过大,则依第②步骤继续往筒中填土,保证固结后的试样高度达到 550 mm。

(4)常规土工试验:卸下加载杆,在试样上部用环刀取样,并进行密度和含水率试验,以计算试样的初始孔隙比 e_0 。

(5)定样:对环刀取样后的渗流筒内试样表面进行修整刮平,并确保试样的初始高度为 500 mm。

(6)渗透试验:重新安装加载杆,将固结压力恢复至土工试验取样前,并按表 2 所示加载方案对经步骤(3)固结好的试样施加水压,开展渗透试验,试验过程中采集水压、压缩变形和渗水量数据。渗透试验是在每级压力下试样固结完成且渗流稳定后再进行的,固结完成的判断标准是变形小于 0.01 mm/h,渗流稳定的判断标准是渗水量随时间呈线性变化,且每个渗透试验的持续时间不少于 8 h。

(7)数据处理与分析:运用采集的数据计算各级压力下的渗透系数及孔隙比,并加以对比分析。

2 渗透试验与结果分析

2.1 试验数据

依照前述试验步骤,逐个进行渗透试验。通过步骤(4)所述常规土工试验,可得到每组试样经固结压力固结后的密度和含水率,并可计算得到初始孔隙比 e_0 。鉴于渗透试验过程中水压是连续逐级加载和卸载,期间不便取样试验,故试样在不同水压下的孔隙比可依据一维压缩理论公式和试验中采集的试样压缩变形数据计算得到,如表 3 所示;同理,试样在不同水压下的含水率也可按饱和土体中含水率与孔隙比及比重的关系式计算得到,并转换成液性指数,以判断试样的稠度状态,如表 4 所示;另外,依据试验采集的渗

出水量和水压的数据,采用变水头渗透试验的公式可计算得到各个试验的渗透系数,如表 5 所示。

表 3 孔隙比试验数据

Table 3 Test data of void ratio of soil						
试验 编号	初始孔 隙比 e_0	不同水压下的孔隙比 e				
		G1	G2	G3	G4	G5
TL1	0.871	0.832	0.806	0.791	0.782	0.777
TU1	—	0.777	0.777	0.777	0.777	0.777
TL2	0.762	0.755	0.749	0.739	0.731	0.727
TU2	—	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727
TL3	0.715	0.710	0.706	0.700	0.693	0.686
TU3	—	0.686	0.686	0.686	0.686	0.686
TL4	0.672	0.670	0.666	0.662	0.657	0.651
TU4	—	0.651	0.651	0.651	0.651	0.651
TL5	0.651	0.651	0.650	0.648	0.646	0.642
TU5	—	0.642	0.642	0.642	0.642	0.642

表 4 液性指数试验数据

Table 4 Test data of liquidity index						
试验 编号	初始液 性指数	不同水压下的液性指数 I_L				
		G1	G2	G3	G4	G5
TL1	0.46	0.41	0.37	0.35	0.34	0.33
TU1	—	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
TL2	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.27
TU2	—	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
TL3	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.21
TU3	—	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
TL4	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16
TU4	—	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
TL5	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15
TU5	—	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

表 5 渗透系数试验数据

Table 5 Test data of permeability coefficient					
试验 编号	不同水压下的渗透系数 $k/(10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$				
	G1	G2	G3	G4	G5
TL1	76.48	62.58	51.47	42.57	36.14
TU1	36.14	32.85	30.42	27.97	23.06
TL2	20.26	18.67	17.92	15.68	13.70
TU2	13.70	14.12	13.30	11.19	8.99
TL3	9.90	9.21	8.88	8.41	7.59
TU3	7.59	6.82	6.05	6.00	3.95
TL4	5.66	4.79	4.21	4.08	3.47
TU4	3.47	3.13	2.55	2.40	1.89
TL5	0.92	1.43	1.91	1.92	3.42
TU5	3.42	3.09	2.51	2.35	1.85

2.2 水力梯度对孔隙比的影响分析

由表 3 可知,在水压逐级加载类(TL)的 5 个试验中,递增的水压使得水力梯度逐级增加,试样的孔隙比均呈减小趋势,如图 3 所示,表明土体被压缩,不过减小的幅值随固结压力的增加而降低。由表 3 可见,在水压逐级卸载类(TU)的 5 个试验中,孔隙比保持不变,水压卸除不引起土体的回弹变形。结合表 4 所示液性指数分析可知,可塑状态的试样较硬塑状态的试样受水力梯度的影响大。

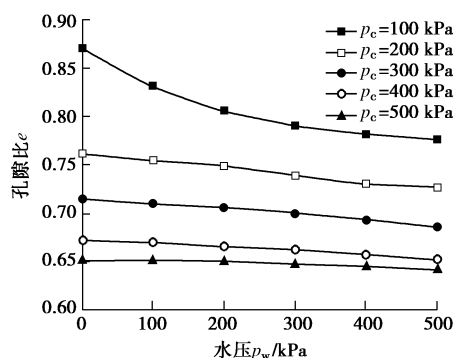


图3 水压加载时的孔隙比变化

Fig. 3 Variation of void ratio with loaded hydraulic pressure

水压施加导致试样压缩的因素是渗透力，水压在试样中形成渗流，渗透力对土骨架产生作用^[8]，称为渗水力固结，其外荷载为水压，作用产生的孔隙水压力在土体固结完成后部分转化为有效应力，剩余部分形成稳定状态下的渗流水压力^[9]。本试验试样的应力情况在忽略位置水头和自重应力时如图4所示，在水压施加瞬间的初始状态，顶部的总应力 σ_t 由前期固结压力 p_c 和刚施加的水压 p_w 组成，其中 p_c 已使土体固结完成可视为初始有效应力，水压 p_w 施加后即转化为孔隙水压力 u_0 ；同样底部的总应力 σ_b 也等于 p_w 与 p_c 之和。随着固结进行直至稳定渗流状态，因施加的荷载未变，试样的总应力和顶部的受力保持不变，但底部的孔隙水压力消散为零，有效应力增加了 σ'_a ，数值上等于水压 p_w 。这样一来，试样的孔压图由矩形变成三角形，有效应力图由矩形变成梯形，其中斜线阴影区为增加的有效应力三角形。

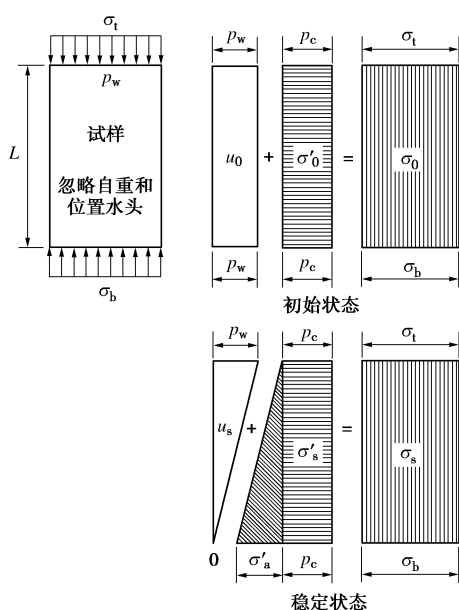


图4 试样渗透受力图

Fig. 4 Force diagram of soil seepage

对照图4可知，试样在不同水压作用下并进入稳定渗流状态后，新增的有效应力大小是顶部为零、底部为 p_w ，则上下平均为 $p_w/2$ 。因此，对于本试验中施加的100~500 kPa的五级水压，理论上增加的有效应力分别为50，100，150，200，250 kPa。此外，基于试验所得孔隙比数据，依据 $e - \lg p$ 关系式也可反推不同水压作用下试样上的有效应力大小，并得到其增量。

图5所示为表3中初始孔隙比与相应固结压力的半对数关系图，线性拟合可得试样的压缩指数 $C_c=0.316$ ，以及线性表达式 $e=1.498-0.316 \lg p_c$ 。

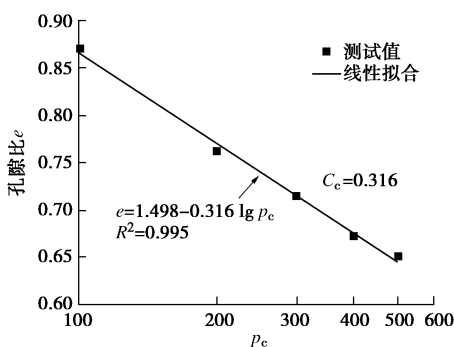


图5 $e - p_c$ 数据拟合

Fig. 5 Data fitting of $e - p_c$

现将图3中5个水压加载类(TL)试验的孔隙比数值代入拟合的线性表达式中，可计算不同水压下的有效应力 p_r ，减去初始有效应力 p_c 即可得增加的有效应力值 p_a ，计算结果如表6所示。

表6 增加的有效应力计算值

Table 6 Calculated values of increased effective stress

试验 编号	固结压 力 p_c/kPa	不同水压下的增加的有效应力 p_a/kPa				
		G1	G2	G3	G4	G5
TL1	100	28.1	54.8	72.7	84.4	91.3
TL2	200	24.5	34.6	52.3	67.4	75.3
TL3	300	11.7	20.9	35.2	52.8	71.2
TL4	400	17.1	29.4	42.1	58.6	79.0
TL5	500	8.2	12.0	19.6	27.3	43.0

表6所示有效应力增加值均小于前述理论值，且前期固结压力越大，相同水压下的有效应力增幅越小。为探讨其原因，将有效应力增加理论值减去表6中的计算值得到应力差值 p_d ，然后绘制其随水压变化的散点图，并对数据点进行线性拟合，如图6所示。

由图6可见，应力差值随水压基本呈线性变化，且拟合直线的斜率相差不大。结合试样的受力分析，可推断有效应力的实际增加值小于理论值的原因是侧壁摩阻力的作用，前述应力差值 p_d 实际是侧壁摩阻力，其大小取决于接触面法向力和摩擦系数。水压越大，引起的接触面法向力就越大，摩阻力也就越大，使得有效应力增加值就越小；而图6中拟合直线的斜率就相当于摩擦系数，变化不大，小变化的规律也是随前期固结压力的增加而增大，与实际相符。

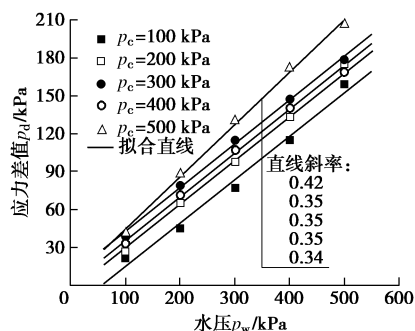


图6 应力差值随水压的变化

Fig. 6 Variation of stress difference with hydraulic pressure

水压卸载时 (TU) 孔隙比保持不变可解释为水压卸除前, 土体在已有固结压力和新增有效应力作用下完成了固结, 一旦水压卸除, 试样顶部和底部均为排水面 (由水压加载时的单面排水变为双面排水), 则土体中的孔压消散很快, 土体有效应力基本保持不变, 故试样不出现变形, 孔隙比保持不变, 即使有效应力存在少量的减小, 但持续时间短, 且此时土体处于超固结状态, 变形量很小, 达不到改变土体孔隙比的量值。因此, 水压卸除时试样孔隙比保持不变。

2.3 水力梯度对渗透系数的影响分析

为分析水力梯度对渗透系数的影响, 将表5中的数据按水压逐级加载类 (TL) 和水压逐级卸载类 (TU) 分别绘制成图7和图8。

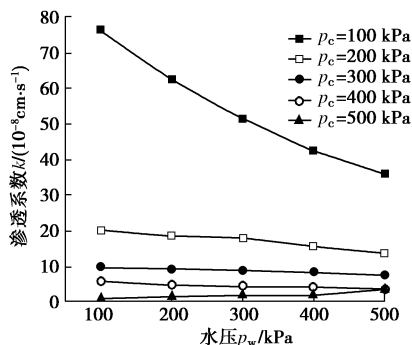


图7 水压加载时的渗透系数变化

Fig. 7 Variation of permeability coefficient with loaded hydraulic pressure

图7所示, 随着加载水压的增大, 试样的渗透系数在减小, 且与固结压力相关, 减小幅度随固结压力的增加而降低。渗透系数减小的原因主要是前述水压递增后, 渗透力会压缩土体, 使土体有效孔隙率减小, 导致土体有效导水能力减小, 渗透系数降低。因此, 水力梯度增加时, 土体渗透系数会降低。

由图8可见, 随着水压的卸载, 渗透系数总体上依然在减小, 而由表3可知水压卸载时孔隙比是保持不变的, 则有效应力不变, 水压卸除引起的总应力减小表现为孔压的减小。但渗透系数却在减小, 说明递减的水力梯度与渗透系数存在一定关系。

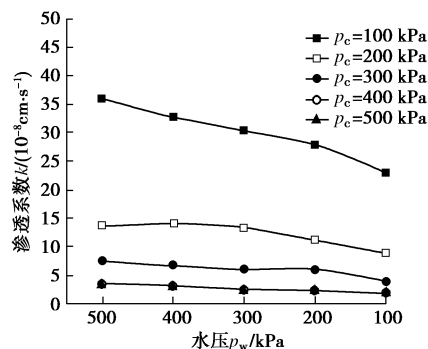


图8 水压卸载时的渗透系数变化

Fig. 8 Variation of permeability coefficient with unloaded hydraulic pressure

递减水力梯度与渗透系数间的关系可以从水力梯度作用和弱结合水两个方面进行分析。水力梯度形成的渗透力对试样有固结和土颗粒移动两种作用^[10], 移动起来的土颗粒可能堵塞流道, 也可能被水冲出而扩大流道, 研究表明只有水力梯度在200以上土颗粒才可能被冲出^[11], 因此本试验中若有移动的土颗粒, 其堵塞流道的可能性更大, 这点可从渗出水量的纯净度上得到证实, 水压降低后, 在流道中移动的土颗粒更多地沉积下来, 减少渗流通道, 最终表现为渗透系数降低。另外, 微电场效应和微尺度效应也是黏土渗透性的分析思路^[12-13], 其主要涉及颗粒扩散双电层理论中的弱结合水, 弱结合水位于强结合水外层, 具有一定的抗剪强度, 但在较大水力梯度下 (大于弱结合水的抗剪强度), 弱结合水可流动, 形成较大的导水通道。但随着水力梯度的降低, 参与流动的弱结合水层逐步减少并处于黏滞状态, 降低孔隙的导水能力, 故渗透系数减小。因此, 基于上述两种因素, 土体固结完成后, 降低水力梯度会引起渗透系数的减小。

3 水力梯度的影响分析

3.1 理论分析式

对于高度为 L 、顶端总应力和水压分别为 σ_{vt} 和 u_t 、底端总应力和水压分别为 σ_{vb} 和 u_b 的正常固结土样, 若其先期固结压力为 σ'_c 、初始渗透系数为 k_0 、水压施加前的初始有效应力为 σ'_{v0} , Kodikara^[14]推导了其在不同水力梯度下的渗透系数 k_{eq} 计算式:

$$k_{eq} = \frac{k_0(\sigma'_c)^{\frac{C_c - C_r}{C_k}} (\sigma'_{v0})^{\frac{C_r}{C_k}}}{(u_t - u_b) \left(1 - \frac{C_c}{C_k}\right)} \left[(\sigma'_c)^{1 - \frac{C_c}{C_k}} - (\sigma_{vt} - u_b)^{1 - \frac{C_c}{C_k}} \right] - \frac{k_0(\sigma'_{v0})^{\frac{C_r}{C_k}}}{(u_t - u_b) \left(1 - \frac{C_r}{C_k}\right)} \left[(\sigma'_c)^{1 - \frac{C_r}{C_k}} - (\sigma_{vt} - u_t)^{1 - \frac{C_r}{C_k}} \right], \quad (1)$$

式中, C_c 为土体的压缩指数, C_r 为土体的再压缩指数,

C_k 为土体的渗透系数指数。

3.2 对比分析

针对渗透系数 k_{eq} 计算式中的参数 C_c 、 C_r 和 C_k ，由图 5 可得试样的压缩指数 $C_c=0.316$ ，土体的再压缩指数 C_r 可取 C_c 的 0.1 倍；另外，试样的渗透系数指数 C_k 可利用表 5 中 TL 类试验在 G1 级水压下的数据通过图 9 所示 $e-k$ 数据拟合得到， $C_k=0.138$ 。

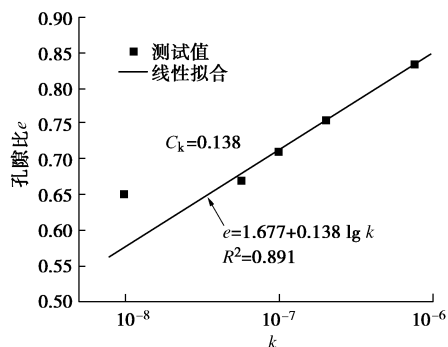


图 9 $e - \lg k$ 数据拟合

Fig. 9 Data fitting of $e - \lg k$

考虑到逐级加载水压类 (TL) 渗透试验中的试样处于正常固结状态，而逐级卸载水压类 (TU) 渗透试验中的试样处于超固结状态，依据理论分析式的适用范围，仅对图 7 中的 TL 类试验的渗透系数进行分析，此外，由图 7 可知，除固结压力 p_c 为 100 kPa 时的渗透系数与水压呈非线性关系外，其余均基本呈线性关系。因此，以下就以 TL1 和 TL2 试验为代表，将其测试值与理论值进行对比分析。

为便于对比分析，将渗透系数和水压按下式进行无量纲处理。

$$\xi = \frac{k_{eq}}{k_0} \quad (2)$$

$$i_{eq} = \frac{u_b - u_t}{L\gamma_w} = \frac{0.1p_w}{L} \quad (3)$$

将 TL1 和 TL2 试验的相关数据代入式(1)~(3)，可得渗透系数比值随水力梯度变化的理论曲线，并与试验测试值绘制成图 10，11。

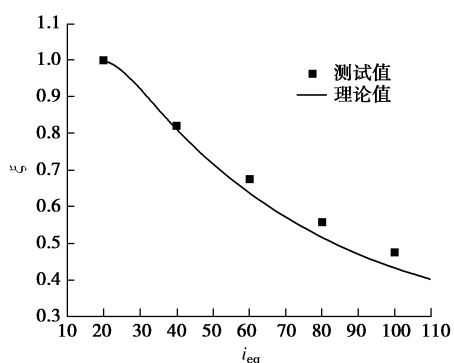


图 10 水力梯度对渗透性的影响 (TL1)

Fig. 10 Effect of hydraulic gradient on permeability in TL1

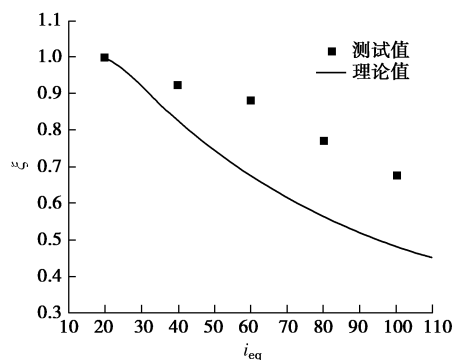


图 11 水力梯度对渗透性的影响 (TL2)

Fig. 11 Effect of hydraulic gradient on permeability in TL2

由图 10，11 可见，在水压加载试验中，随着水力梯度的增大，渗透系数的理论和测试值均呈减小趋势，两者在小固结压力下的吻合度很好，随着固结压力增加，理论值和测试值存在一定偏差，原因正是前述侧壁摩阻力的影响，不过变化趋势始终保持一致。

另外，对于不同固结压力下水压卸除类 (TU) 渗透试验，由于水压卸除时试样处于超固结状态，式(1)不再适用。现将测试渗透系数和水压按式(2)和式(3)换算成 ξ 和 i_{eq} ，并对其进行线性拟合，可得图 12 所示递减水力梯度对渗透性的影响。

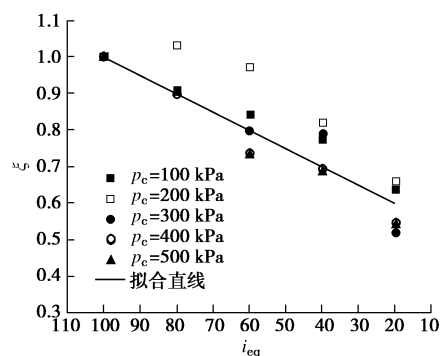


图 12 水力梯度对渗透性的影响 (TU)

Fig. 12 Effect of hydraulic gradient on permeability in TU

由前述分析可知，此影响与颗粒堵塞和弱结合水相关，涉及到黏土的细观分析，在定量上比较困难，不过，基于测试数据的拟合可得到关系式：

$$k = k_0(0.5 + 0.005i_{eq}) \quad (4)$$

考虑到本试验试样高度 $L=0.5$ m，由式(3)可知 $i_{eq}=0.2p_w$ ，另外 k_0 是水压为 $p_{w0}=500$ kPa 时的渗透系数，则可将式(4)转换为以水压为变量的关系式：

$$k = \frac{k_0}{2} \left(1 + \frac{p_w}{p_{w0}} \right) \quad (5)$$

由式(4)可知，对已完成固结的黏土，随着水力梯度递减，渗透系数大体呈线性减小，最大减幅可达初始值的一半；同样，由式(5)可知，以 p_{w0} 为基准，降压 ($p_w < p_{w0}$) 会使得渗透系数线性减小。

4 结 论

利用研制的装置对经不同固结压力固结的黏土试样,进行先逐级施加水压、后逐级卸除水压条件下的固结和渗透试验,得出如下结论:

(1) 水压施加和水压卸除引起的水力梯度变化对土体孔隙比和渗透系数的影响不同,孔隙比和渗透系数均随加压是的水力梯度增大而减小,渗透系数随卸压时的水力梯度减小也减小,但孔隙比不变。

(2) 水压加载类试验结果显示,经渗透力固结后,试样中的有效应力会增长,但实际增加值小于理论值,原因与侧壁摩阻力有关。

(3) 基于水压卸载类试验结果分析,发现递减水力梯度引起渗透系数减小与颗粒堵塞和弱结合水相关,随着水力梯度的减小,在流道中移动的颗粒逐步沉积并堵塞流道,另外,参与流动的弱结合水层逐步减少并处于黏滞状态,降低孔隙的导水能力,故渗透系数减小。

(4) 递增水力梯度下渗透系数测试值变化趋势与理论计算相符,进一步证实了递增的水力梯度会引起渗透系数的减小;另外,基于测试数据的线性拟合式显示土体固结完成后,减小水力梯度,渗透系数线性减小,且最大减幅可达初始值的一半。

参考文献:

- [1] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[J]. Soil Science, 1948, **66**(2): 161 - 169.
- [2] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. Clays and Clay Minerals, 1971, **19**(3): 151 - 158.
- [3] NAGARAJ T S, PANDIAN N S, RAJUPS R N. Stress state permeability relationships for fine-grained soils[J]. Géotechnique, 1993, **43**(2): 333 - 336.
- [4] 梁健伟, 房莹光. 极细颗粒黏土渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1222 - 1230. (LIANG Jian-wei, FANG Ying-guang. Experimental study of seepage characteristics of tiny-particle clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1222 - 1230. (in Chinese))
- [5] 王福刚, 张佳慧, 于吉祥, 等. 不同水力梯度对渗透系数影响研究[J]. 实验技术与管理, 2015, **32**(6): 25 - 28. (WANG Fu-gang, ZHANG Jia-hui, YU Ji-yang, et al. Research on influence of different hydraulic gradient on hydraulic conductivity[J]. Experimental Technology and Management, 2015, **32**(6): 25 - 28. (in Chinese))
- [6] 张扬清, 冉岸绿, 武朝军, 等. 降压回灌作用下黏土的渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 21 - 25. (ZHANG Yang-qing, RAN An-lü, WU Chao-jun, et al. Experimental study on permeability properties of soft clay in process of pumping and recharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 21 - 25. (in Chinese))
- [7] 蒋中明, 王 为, 冯树荣, 等. 应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 98 - 104. (JIANG Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, ZHONG Hui-ya, ZHAO Hai-bin. Experimental study on influence of stress state on seepage failure characteristics of coarse grained soil with cohesive particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 98 - 104. (in Chinese))
- [8] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1522 - 1528. (LI Guang-xin. On soil skeleton and seepage force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1522 - 1528. (in Chinese))
- [9] 周保中, 吴文君. 关于黏土铺盖裂缝的渗透固结变形分析[J]. 水利学报, 1984, **3**(5): 29 - 37. (ZHOU Bao-zhong, WU Wen-jun. On the seepage consolidation deformation mechanism of fractures in cohesive soil blanket[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, **3**(5): 29 - 37. (in Chinese))
- [10] FOX P J. Analysis of gradient effects for laboratory hydraulic conductivity testing[J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, **19**(2): 181 - 190.
- [11] KHILAR K C, FOGLER H S, GRAY D H. Model for piping-plugging in earthen structures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(7): 833 - 846.
- [12] 谷任国, 房莹光. 极细颗粒黏土渗流离子效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1595 - 1598. (GU Ren-guo, FANG Ying-guang. Experiment study of the ion effects on fine grained soil seepage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1595 - 1598. (in Chinese))
- [13] ACHARI G, JOSHI R C, BENTLEY L R, et al. Prediction of the hydraulic conductivity of clays using the electric double layer theory[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(5): 783 - 792.
- [14] KODIKARA J K, RAHMAN F. Effects of specimen consolidation on the laboratory hydraulic conductivity measurement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(4): 908 - 923.