

文章编号: 1001-4888(2010)03-0353-06

渗透固结试验装置的改进^{*}

孙丽云¹, 乐金朝¹, 刘忠玉², 纠永志²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 450001; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 450001)

摘要: 针对传统固结仪不能进行渗透试验的不足, 对固结仪进行了改装。改装后的固结仪不仅可以交叉进行固结、渗透试验, 以研究不同荷载作用下土样的渗透特性, 而且可以通过三通阀控制排水条件, 进行双面排水固结试验, 或在单面排水条件下量测固结过程中试样不排水面处的孔隙水压力, 也可通过串联固结仪分别研究试样不同截面处孔隙水压力的消散规律。新仪器具有构造简单, 密封性能好的特点。通过与常规固结、渗透试验的结果对比, 验证了采用改装固结仪测定固结模型参数的可靠性。另外, 通过单面排水固结试验发现了孔压滞后现象。

关键词: 土力学; 固结仪; 渗透; 固结; 孔隙水压力

中图分类号: TU431

文献标识码: A

0 引言

传统的固结计算是以 Terzaghi 一维固结理论为基础的, 即一般认为在固结过程中土体的压缩系数和渗透系数为常数, 因此这些参数一般可通过常规的室内试验即单独进行固结试验或渗透试验而获得。实际上在该过程中因土体孔隙比的减小必将引起其压缩性和渗透性的变化, 因此仅通过常规室内试验研究固结过程中渗透参数的变化规律将变得十分困难。另外, 如果能直接量测固结试验中孔隙水压力的变化, 将对深入研究饱和粘性土渗透固结的本质很有帮助。而传统的固结试验一般是不能直接量测孔隙水压力的。因此有学者^[1-5]采用三轴仪或引进国外的 GDS 高级固结仪^[6]来进行上述试验研究。但是引进国外先进的设备价格昂贵, 因此国内有不少学者致力于传统固结仪的改造^[5, 7-10], 其中大多能够基本满足相关试验的要求, 但是也存在着设备密封不严导致漏水或因加压活塞与固结室之间的摩擦不易消除而导致加载不足或孔压误差过大等缺点。为了更好地研究饱和粘土的渗透固结特性, 笔者在前人的基础上对固结仪进行了新的改装, 试用结果良好。

1 试验装置的研制

新试验装置主要由加荷系统、渗透固结容器、测流与测压系统等三部分组成, 图 1 为其示意图。

1.1 加荷系统

由去掉原固结容器部分的 WG 型高压固结仪作为加荷系统。该加荷系统为常规杠杆式, 特点为加荷稳定且出力大。其荷载比可选用为 20 : 1 或 24 : 1; 当试样面积为 30cm³ 时, 其荷载压力范围为 12.5kPa~4000kPa。

1.2 渗透固结容器

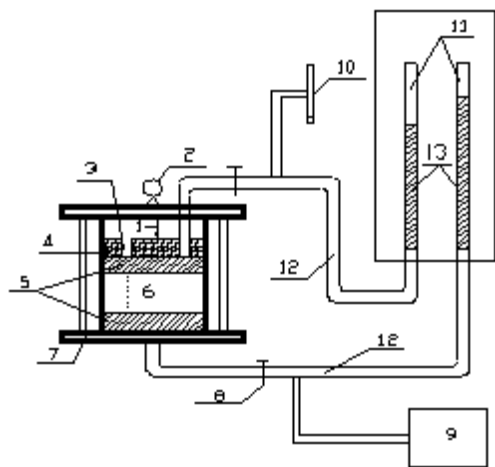
渗透固结容器要同时满足固结试验和渗透试验的要求, 这样就要求该容器具有足够的刚度和良好

^{*} 收稿日期: 2009-12-11; 修订日期: 2010-02-01

基金项目: 河南高速公路发展有限责任公司科技项目(2007GF009); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010B560015)

通讯作者: 孙丽云(1969—), 女, 博士生, 副教授, 主要从事岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: liyunjia@zzu.edu.cn

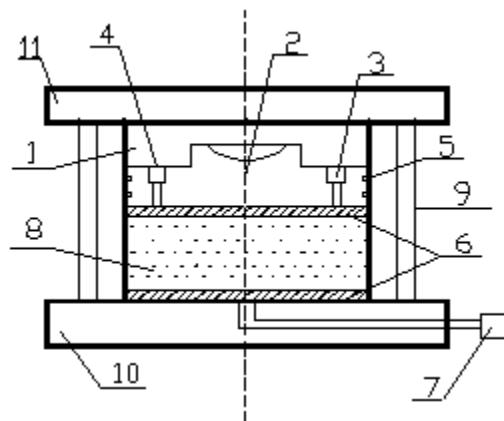
的密封性,且方便安装拆卸。因此,整个容器主要由固结筒、紧固螺杆、加压活塞、固结仪底座及其它配件组成,如图 2 所示。考虑到试验中土样、水可能有腐蚀性,所用材料均为黄铜或不锈钢。



1—加荷系统; 2—量表; 3—排气孔;
4—加压活塞; 5—透水石; 6—土样;
7—盛放土样容器; 8—三通;
9—压力传感器; 10—连接收集水系统;
11—测流管; 12—胶皮管; 13—水

图 1 改进的渗透固结试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of modified osmotic oedometer



1—固结筒; 2—加压活塞; 3—排气孔;
4—排水孔; 5—O 型密封圈; 6—透水石;
7—连接三通阀; 8—土样; 9—螺杆;
10—固结仪底座; 11—固结仪顶盖

图 2 渗透固结容器示意图

Fig. 2 Sketch of oedometer container

(1) 固结筒:整体由耐腐蚀且具有足够刚度的黄铜制做,外径为 82mm,内径为 61.8mm,截面积为 30cm^2 ,高度为 69mm,为容器盛土样与活塞运动部分。这里选用较厚的筒壁,是为了满足固结试验中完全侧限的要求。

(2) 活塞:传统固结仪的活塞与固结室内壁之间存在一定的缝隙,以方便试验时压力无障碍地传达到土样内,且土样中孔隙水可自由排出。但渗透试验需要整个系统是密封的,传统固结仪的活塞就无法满足要求。因此我们对活塞部分进行了改进,即取其外径为 61.8mm,高度为 20mm,顶部传压凹座两侧各有 1 个排水孔和排气孔,土样装好后用 1 个螺母封闭排气孔。活塞壁上有 2 道 U 型槽,用来放置 O 型密封圈。活塞底部有 2 道环形压槽以及中心“十”字形压槽,以便更好地通过活塞顶部排水、排气。由于活塞与容器壁有一定的摩阻力,会影响对土样施加压力的数值,为此在每次装土样前,可先测出每级荷载下摩擦阻力值。方法如下:先把固结仪内筒置于杠杆加压系统下,打开固结仪底部“三通”,使它底部进水,将整个固结筒充满水。每级加载后量测固结筒内水的压力,其与加载量之差即为摩擦力。例如:加砝码 200kPa,此时底部孔压传感器显示 194kPa,在砝码一端吊杆孔上吊一个塑料袋,徐徐向内加入少量干砂,直至底部孔压传感器也显示为 200kPa,正好与砝码平衡,此时摩擦阻力被中和掉。取下砂袋,为以后试验备用,砂袋重量即为加压 200kPa 时活塞的摩擦阻力 f 。同理,可测得 50kPa, 100kPa, 300kPa, … 等每级荷载时的摩擦阻力 f 。

(3) 紧固螺杆:用于固定固结仪顶盖与底座的装置。

(4) 固结仪底座:直径 130mm,高 19mm。底座有 1 个螺栓孔。如开启该孔,可实现双面排水固结试验,或连接渗流水管进行渗透试验;如封闭该孔,则为单面排水固结试验,此时也可通过“三通”连接孔压传感器量测试样不排水面的孔隙水压力。在底座开有 1 道环形压槽,并放置了 O 型橡胶密封圈,目的是防止从底部漏水。另外在底部中心也设置了“十字形”压槽,以方便底部排水或排气。同时量表支架座也设置其上。

(5) 顶盖:外径 125mm,高 12mm。上有三个螺栓孔,由螺杆使它与固结筒、底座相连。

1.3 测流系统和渗透系统

测流系统的功能是在较短的观测时间内能够量测到粘性土中极微小的渗流速度。测流管是关键部分,要求能够在短时间内准确反映出水量体积的微弱变化,并便于清洗,因此,参照文献[8]的做法,选择了刻度为 0.05ml 的滴定管作为测流管。该滴定管壁厚,均匀程度高,可灵敏反映液体体积变化。

渗透试验可参考常规的常水头试验和变水头试验。对于饱和粘土,一般选用变水头试验,且所选用的变水头设备应满足《规范》^[11]的要求。因此,我们采用内径 4mm 的厚壁玻璃管作为测压管,安装位置应尽量靠近固结仪,以消除管路阻力对渗透压力的影响。

1.4 孔压和变形测量

孔隙水压力量测采用与孔压传感器相连的 TYC-1 型孔压数字仪,同时土样变形量测采用百分表或位移传感器。

2 土样的制备与安装

试验前一般用高度为 20mm,直径 61.8mm 的环刀制样,并使其饱和。

试验时先把固结筒、底座及顶盖用螺杆连接,放入透水石和滤纸。打开与底座相连的三通阀向固结筒内注满无气水。然后将带有土样的环刀放在固结筒上方,使土样下表面与固结筒的水面接触。然后打开底座“三通”阀门,均匀压放于土样上方的透水石,将环刀中的试样轻轻推入固结仪内筒。此时,内筒中原来无气水所占据的空间被土样所代替,同时排出了底座三通阀门中的空气。压入土样时,用力应缓慢、均匀以减少对试样的扰动。

2.1 固结仪系统排气

试验准备过程中的排气主要包括两方面:一是排出底部三通阀门内部空气,这部分空气已经在试样安装过程中排出;二是预压排气。在装土样前,将加压活塞上面的排气孔的密封螺母打开。在装好土样后,给土样加上一个很小的压力预压。预压时,打开底部三通阀,使固结仪底部进水,同时打开活塞上面与排水孔相连的“三通”阀,直到顶部排气孔只有水溢出没有气泡时,将排气孔的密封螺母拧紧并封闭。这样加压活塞的底部与透水石之间的残余空气被排出。

2.2 固结仪系统的密封

要想保证土工试验的精度,就应该尽量减小误差。对于有可能漏气、漏水的地方,我们采取了以下措施来解决:

(1) 对于测流管与加压活塞连接处,我们设计用 2 段医用乳胶管分别引出来,作为导管,连接两段导管的是一小段紫铜管,试验表明,可以保证在此处不漏气,不漏水。

(2) 土样与固结仪内筒的密闭容易解决。因为土样受到外加垂直荷载时,将产生垂直变形与侧向变形。由于侧向变形受到限制,侧向压力增加,使得土样与内筒壁将产生密切贴合。整个试验过程中,土样一直处于受力状态,故土样与内筒壁能够一直保持密切贴合,实现不漏水、漏气,还能准确量测土样底部孔压。

(3) 关于活塞与固结筒的密封很难解决,因为一要保证活塞与筒之间的摩擦力尽可能小,又要保证密封,而活塞同时是一个运动体,受到外荷时,会随土样压缩而位移。参照文献[8]的方法,一是采用变公差设计,二是适当增加活塞高度,并加上两道 O 型密封圈,三是在活塞外侧和固结筒内壁涂抹硅脂来代替常用的凡士林、黄油来润滑。试验表明,侧壁阻力(占施加压力的百分数)小于 10%。这样可以在很大程度上减小了活塞壁与内筒之间的摩阻力,还可以很好地解决漏水问题。

3 试验装置的检定

土样装好后,若打开与固结仪底座三通阀相连的排水管,可以进行常规的双面排水固结试验;如关闭该排水管,则可进行单面排水固结试验,此时连接上孔压力量测系统,可同时量测固结过程中土样底部的孔隙水压力,如活塞上部的排水阀连接测流管,则可以进行排水量的测定;若关闭孔压阀门,同时打开固结仪上下两个三通就可进行渗透试验。图 3 为渗透固结试验装置的照片。



图 3 渗透固结仪器照片

Fig. 3 Photo of modified osmotic oedometer

样的基本物理指标为:比重 2.72,天然含水量 3.57%,初始孔隙比为 0.86,天然容重为 15.1kN/m³,液限为 23.8%,塑限为 12.5%。试验结果表明,该渗透固结装置用于固结试验效果良好。

新的渗透固结试验装置可以交叉进行固结渗透试验,即对土样逐级加荷并使其固结稳定后,接通测流系统,便可进行变水头渗透试验。表 2 是新装置与南 55 渗透仪对同一种土样所做的对比试验结果。这表明新装置在渗透试验方面具有明显的适用性。

表 1 渗透固结试验装置与杠杆式固结仪试验结果比较

Tab. 1 The comparison between osmotic oedometer and traditional oedometer

使用仪器	压力(kPa)	孔隙比	固结系数(10 ⁻⁹ m ² · s ⁻¹)
标准固结仪	50	0.825	2.80
	100	0.776	2.35
	200	0.717	2.10
	400	0.664	1.94
	600	0.638	1.74
	800	0.616	1.50
改装新仪器	50	0.828	2.92
	100	0.790	2.55
	200	0.733	2.26
	400	0.680	1.99
	600	0.655	1.76
	800	0.632	1.66

表 2 渗透固结试验装置与南 55 渗透仪试验结果比较

Tab. 2 The comparison between osmotic oedometer and Nan-55 osmoscope

使用仪器	取样深度(m)	施加压力(kPa)	渗透系数(cm · s ⁻¹)
南 55 渗透仪	2.0	0	3.24×10 ⁻³
改装新仪器	2.0	0	2.5×10 ⁻³
	2.0	50	1.72×10 ⁻³
	2.0	100	1.15×10 ⁻³
	2.0	200	0.16×10 ⁻³

3.2 孔隙水压力的量测

在单面排水固结试验中,如在固结仪底部的排水孔上连接三通阀,并联接一个压力传感器及孔压数

如果想研究试样中间断面处孔隙水压力的消散规律,可采用串联固结仪的方法,即参照文献[10]的做法,用细紫铜管将一个固结仪的底部与另一固结仪顶部的排水孔连接,第二个固结仪底部不排水。此时,两个固结仪应施加相同的荷载,并于两个固结仪底部分别量测孔隙水压力。为了减小紫铜管的刚度对串联试样变形的影响,可将其做成螺旋状。

3.1 固结试验和渗透试验与常规试验的对比

为了考核新设计的渗透固结装置的可靠性,我们分别采用新装置与传统杠杆固结仪对同一种原状土进行固结试验,试验结果见表 1。所用土

字仪,可随时测出土样底部孔压的大小。图 4 和图 5 为某饱和土样分别在固结压力 50kPa、100kPa 作用下,孔隙水压力 u 随时间 t 变化的试验曲线。由此可以看出,荷载施加结束后,土样中的底部孔压没有立即上升到所施加的固结压力增量,而是孔压上升到峰值有一滞后过程(表 3),且峰值低于固结压力增量,当孔压达到峰值后,才进入消散阶段。文献[9]也发现了类似现象,并用土样与侧壁之间存在摩擦力和土样饱和不充分等进行了初步解释。对比本文和文献[9]的试验结果,可以发现,利用本文改装设备测得的孔压峰值要明显大于文献[9]的结果。

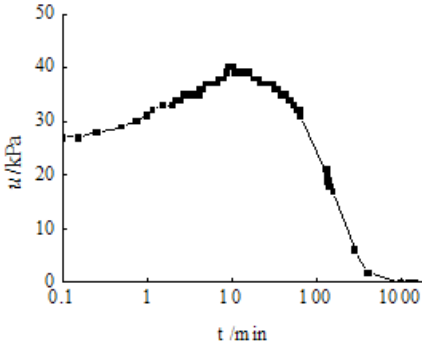


图 4 底部孔压与时间关系曲线(0~50kPa)
Fig. 4 Pore water pressure at bottom
versus time (0~50kPa)

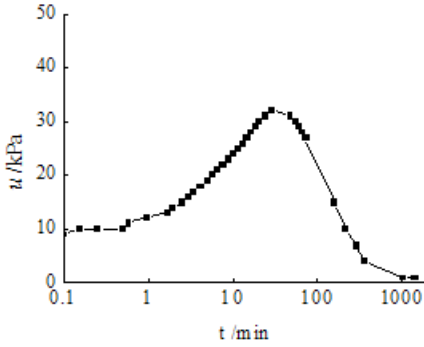


图 5 底部孔压与时间关系曲线(50~100kPa)
Fig. 5 Pore water pressure at bottom
versus time(50~100kPa)

表 3 底部孔压峰值及滞后时间

Tab. 3 Peak value and lag time of pore water pressure on the botom of specimen

固结压力(kPa)	底部孔压峰值(kPa)	滞后时间(min)
0~50	40	9
50~100	32	28.3

4 结语

改进的渗透固结试验装置性能良好,用途较广,能满足饱和粘土的多项试验要求,且具有以下主要优点:

(1) 改装后的渗透固结装置,不仅可以单独进行常、变水头渗透试验和固结试验,而且可以交叉进行渗透、固结试验。

(2) 仪器的密封性好,不漏水。测流、测压均不受蒸发的影响,能在较低水力梯度试验中获得稳定可靠的试验成果。

(3) 对同一块土样可进行不同的试验,可取得多个参数。如通过仪器底部三通阀,既可进行单、双面排水固结试验,又可通过量测单面排水固结过程中土样底部的孔隙水压力来研究其消散规律。

(4) 在单面排水固结试验过程中,和文献[9]一样,也发现了孔压滞后现象。

致谢: 作者感谢南京土壤仪器厂有限公司的有关专家在设备研制和制作过程中提供的技术指导。

参考文献:

[1] Bishop A W, Donald I B. The experimental study of partly saturated soils in the triaxial apparatus [C]//In: Proc. 5th. Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. , Paris: [s. n.], 1961, 13-21.

[2] 殷建华. 新双室三轴仪用于非饱和土体积变化的连续测量和三轴压缩试验[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 552-555 (YIN Jianhua. A new double cell triaxial system for continuous measurement of volume changes of an unsaturated or saturated soil specimen in triaxial test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (5): 552-555 (in Chinese))

- [3] 陈正汉,卢再华,蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387—392 (CHEN Zhenghan, LU Zaihua, PU Yibin. The matching of computerized to mograph with triaxial test apparatus for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 387—392 (in Chinese))
- [4] 曹文炳,李克文,刘若兰. 研究粘土释水和渗透特性的的多用途固结试验装置[J]. 水文地质工程地质, 1986, (4): 44—47 (CAO Wenbing, LI Kewen, LIU Ruolan. Studing on water release and permeability characteristics of the multi-use osmotic oedometer [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1986, (4): 44—47 (in Chinese))
- [5] 王秀艳,刘长礼. 对粘性土孔隙水渗流规律本质的新认识[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 91—95 (WANG Xiuyan, LIU Changli. New understanding of the regularity of water seepage in cohesive soil [J]. Acta Geoscientica, 2003, 24(1): 91—95 (in Chinese))
- [6] 齐添,谢康和,胡安峰,等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 2007, 41(6): 1023—1028 (QI Tian, XIE Kanghe, HU Anfeng, et al. Laboratorial study on non-darcy seepage in Xiaoshan clay [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(6): 1023—1028 (in Chinese))
- [7] 杜延龄,李春华,徐家海. 研究饱和粘土渗透特性的试验装置[J]. 水利学报, 1980, (4): 71—75 (DU Yangling, LI Chunhua, XU Jiahai. Test apparatus on seepage characteristics of the saturated clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980, (4): 71—75 (in Chinese))
- [8] 师旭超,汪稔,胡元育,等. 渗透固结试验装置的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3891—3895 (SHI Xuzhao, WANG Ren, HU Yuanyu, et al. Development of osmotic oedometer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3891—3895 (in Chinese))
- [9] 问延煦,施建勇. 孔压滞后现象及其对固结系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 357—363 (WEN Yanxu, SHI Jianyong. Delay of pore pressure in oedometer and its effet on determination of coefficient of consolidation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 357—363 (in Chinese))
- [10] Imai G, Tang Y X. A constitutive equation of one-dimension derived from inter-connected tests [J]. Soils And Foundations, 1992, 32(2): 83—96.
- [11] 中华人民共和国国家标准 GB/T 50123—1999. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999 (The Nationnall Standards Compile Group of People's Republic of china, GB/T 50123—1999. The standard method for soil test [S]. Beijing: China Planning Press, 1999 (in Chinese))

The Improvement of Osmotic Oedometer

SUN Li-yun¹, YUE Jin-chao¹, LIU Zhong-yu², JIU Yong-zhi²

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Henan 450001, China;

2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Henan 450001, China)

Abstract: Traditional oedometer was improved due to its shortage (permeability test can't be carried out on it). After improvement, the consolidation tests and permeability tests can be successively carried out to study the permeability characterics of the soil specimen under different loads. By controlling the drainage through a three-way valve, both double drainage test and single drainage test can be conducted, and not only pore water pressure at the bottom of soil specimen can be measured, but also pore water pressure on the different section can be measured respectively by the inter-connected consolidation apparatus. The improved apparatus has some merits, such as simple conformation and good watertight behavior. Comparing with traditional consolidation test and permeability test, its application to some tests gives more reasonable results. In addition, a phenomenon was found by he single drainage test, that the pore pressure from the bottom of specimen often delays.

Keywords: soil mechanics; oedometer; permeability; consolidation; pore water pressure