

土坝心墙原状土的三轴渗透试验

朱建华

(水利水电科学研究院, 北京)

提 要

本文通过对土坝心墙原状土的三轴应力控制式渗透试验, 研究了前人很少涉及的土坝心墙的渗透性和渗透各向异性随其所受的应力条件而变化的关系, 认为土坝心墙填土渗透性随有效应力增加而降低; 考虑层状土的渗透各向异性时要同时考虑土层的应力状态。因此, 用三轴应力控制式渗透试验确定碾压式土坝心墙填土的渗透系数可能比常规渗透试验更适宜。

一、引 言

土坝心墙的渗透性, 是涉及土坝防渗及保证安全的几个重要性质之一。长期以来, 室内测定土坝心墙填土的渗透系数一直是利用控制试样周边不变形的常规渗透仪测定, 这种方法对于测定原状土的渗透系数有一定局限性: ①土坝心墙土样在取出以前, 土体都受有比较复杂的应力作用, 很显然, 不考虑土体应力状态的常规渗透仪难以反映实际情况; ②用该种仪器进行原状土的渗透试验, 容易发生沿仪器边壁的渗漏, 从而使结果偏差较大。就当前的研究水平来说, 消除上述两缺陷的有效对策就是利用三轴仪进行应力控制式渗透试验, 即在施加渗水压力的同时, 对试样施加固结压力, 使其在受压固结的条件下发生渗流。

加拿大的张和肯尼(Chan and Kenney)在1973年首先利用三轴仪对新立斯克特(New Liskeard)土进行了渗透试验^[1]。试样为边长等于6.4cm的立方体, 先将试样层面呈水平方向放在三轴受压室中, 测定垂直层面方向的渗透系数 k_v , 然后将试样转过来, 测定平行层面方向的渗透系数 k_p 。一个试样的试验基本重复两次, 求出渗透比率 $r(=k_p/k_v)$ 。他们只是求出试验用土料的渗透比率 r 值, 而没有考虑应力条件的变化对土的渗透性和渗透各向异性的影响, 而且用一个试样反复做试验, 土体经历了加荷卸荷作用, 这会影响到试验成果的精确性。

1986年美国的卡彭特和斯蒂芬森(Carpenter and Stephenson)报道了他们的研究成果^[2]。他们先在直径为101.6mm的固结盒里振动压实土样, 然后从中切取不同尺寸的试样, 在三轴仪中进行变水头渗透试验, 研究了试样尺寸、水力比降、试验历时和渗流出口有效应力等对土的渗透性的影响, 得出了一些有益的结果。但同张和肯尼一样, 他们也没有考虑应力状态对土的渗透各向异性的影响。

针对前人工作的不足, 并结合工程实际情况, 笔者用辽宁柴河土坝粘土心墙探井内的原状样进行了室内试验研究, 试图阐明应力等因素对土坝心墙渗透性的影响。

二、试验研究

(一)试验条件

1. 试验用土样, 取自柴河土坝粘土心墙探井内的原状样。原状样距心墙顶深度为 9—17 m 不等, 用 $27 \times 27 \times 12$ cm 的方形铁盒采取。该土样的特征是从探井取出后, 沿水平方向呈薄层状, 有的间隔还不到 1 cm, 据分析是碾压过程中因含水量偏高超压造成的^[3]。另外, 沿垂直层面方向也有少数竖直缝。土样的物性指标如表 1 所示。

表1 土 样 的 物 性 指 标

土号	桩号	取土深 (m)	液 限 $w_L(\%)$	塑 限 $w_P(\%)$	塑性指数 $I_P(\%)$	比重 G	颗粒组成(%)				
							2—0.5 mm	0.5—0.1 mm	0.1—0.05 mm	0.05—0.005 mm	<0.005 mm
1-8	0+250	9.615	35.8	19.0	16.8	2.72	1	2	24	37	36
1-12	0+250	13.615	36.1	20.8	15.3	2.72	0	2	22	38	38
2-15	0+825	16.99	39.4	21.9	17.5	2.71	0	2	21	40	37

2. 试验设备及试验方法

试验设备由一台普通三轴压力室及供压系统组成, 如图 1 所示。先将原状土仔细切削成直径为 6.2 cm 具有一定高度的圆柱体试样, 同时测定试样的含水量和干容重, 然后将试样安放在三轴压力室底座上, 为了使水流均匀, 在试样上下端垫放了透水石和滤纸。试样放好后, 再套上橡皮膜, 并在试样帽和仪器底座处扎紧。然后通过图 1 所示的 7 号压力水管向试样施加室压力 σ_3 , 同时通过 6 号压力水管从试样底部施加渗水压力, 在 14 号量水管中测读渗水量。为了保证沿试样边壁不漏水, 施加的渗水压力总是小于室压力。由于在渗流初期固结排水作用同时发生, 因此在试验中注意控制了排水固结时间, 一般在每级室压力加上后约 12 h 才测读流量, 测读过程中如发现连续两次测读的数值相差较大, 则让试样继续固结, 以保证得到稳定渗流条件下的渗透系数值。为了研究渗透系数随应力条件而变化的情况, 在获得前一级室压力(或渗透压力)下的渗透系数值以后, 再抬高下一级室压力(或渗透压力), 测定各级压力下的渗透系数值。

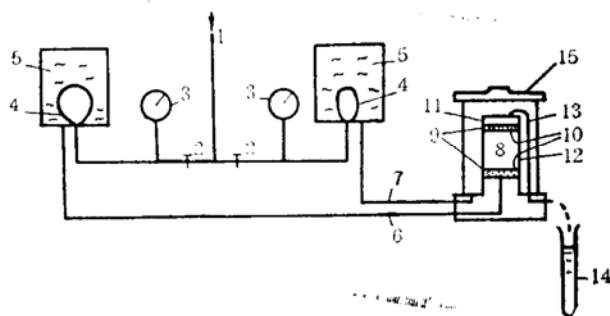


图 1 三轴渗透试验设备示意图

1. 恒压供气系统; 2. 调压阀; 3. 压力表; 4. 充气球; 5. 压力水; 6. 渗水压力水管; 7. 室压力水管; 8. 试样; 9. 透水石; 10. 滤纸; 11. 试样帽; 12. 橡皮膜; 13. 出水管; 14. 量水管; 15. 三轴压力室

3. 试验过程中试样有效应力的分布

试验过程中试样有效应力分布如图2所示。设三轴压力室内的室压力为 σ_3 , 渗水压力为 p , 则渗流入口处试样受到的有效应力为 $\sigma_i' = \sigma_3 - p$, 渗流出口处的有效应力为 $\sigma_e' = \sigma_3$ 。由此可见, 当 σ_3 为定值时, 施加渗水压力会减小入口处的有效应力, 而对出口处的有效应力没什么影响。

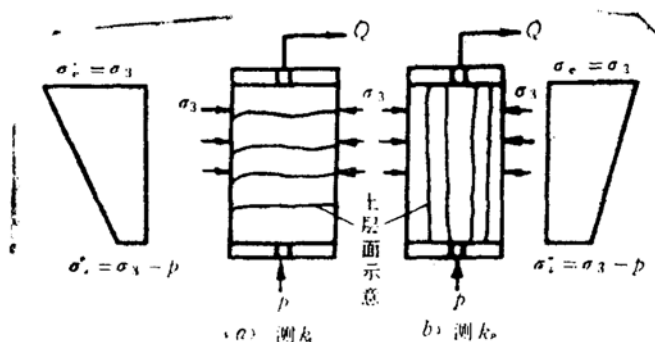


图2 试样内有效应力分布

4. 试样的渗透系数 k

试样在某一级渗水压力下的渗透系数 k 值按下式计算

$$k = \frac{QL}{pAt} \text{ (cm/s)} \quad (1)$$

式中 Q 为渗水量, cm^3 ; p 为以水柱高表示的渗水压力, cm ; L 为试样高度, cm ; $L = L_0 + dL$, A 为试样过水面积, cm^2 ; $A = A_0 + dA$; t 为渗流时间, s 。上式 L_0 , A_0 分别为试样的初始高度和初始面积, dL , dA 分别为试验过程中试样高度和面积的变化值, 在本次试验中取

$$L \approx L_0; A \approx A_0;$$

为便于分析, k 值按规范^[4]统一换算为 10°C 的渗透系数 k_{10} 值。

(二) 试验成果及分析

1. 渗流出口有效应力 σ_e' 对渗透系数 k_{10} 的影响

以渗流出口有效应力 σ_e' 为参数, 绘制 σ_e' 与渗透系数 k_{10} 的关系曲线, 如图3所示。从图中可知土的渗透系数一般随 σ_e' 的增加而减小。这是因为 σ_e' 越大, 试样所承受的固结压力一般也较大, 这会使土体原先存在的裂缝面趋于闭合, 土体趋于密实, 从而降低土的渗透性。对本试验土来说, 当 σ_e' 从 6.5kPa 增加到 250kPa 时, k_{10} 值可降低96倍多, 如图3中1线所示。

从图中还可看到, 在某一压力前, k_{10} 降低非常明显, σ_e' - k_{10} 关系曲线较陡; 在这压力附近, k_{10} 降低不怎么明显, σ_e' - k_{10} 关系线近似水平段; 而超过这一压力后, k_{10} 又降低较明显, σ_e' - k_{10} 线又变陡。这可能是土中先存裂缝面和先期固结压力的影响。因为原填筑于心墙内部土体周围都作用有应力, 取出后应力解除, 土体会发生回胀, 特别是原先存在于心墙内部的闭合着的裂缝会张开, 当 σ_e' 较小时, 主要是这部分变形被压缩, 因此 k_{10} 随 σ_e' 增大而降低较明显; 而当 σ_e' 达某一压力范围时, 推测可能是在先期固结压力附近, 试样基本恢复到原状, k_{10} 随 σ_e' 无甚变化; 而当 σ_e' 超过这个压力范围时, 试样密度恢复到原始状态后进一步

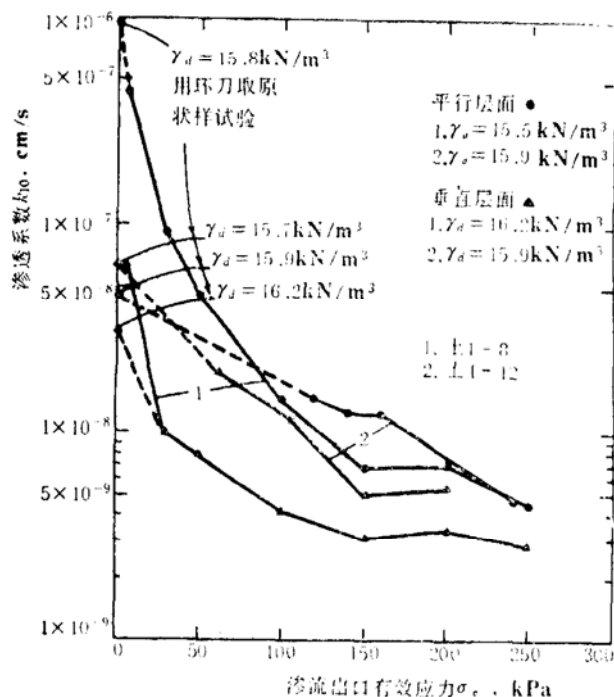
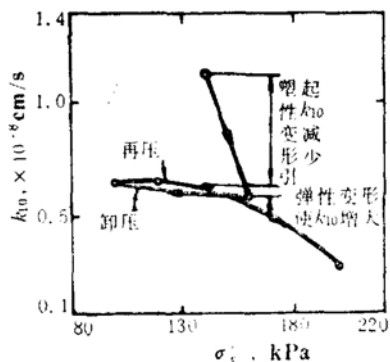


图3 渗流出口有效应力与渗透系数的关系

图4 加压卸压对 k_{10} 的影响

被压密, k_{10} 又随 σ_e' 增大而降低。图4所示的结果说明加压卸压对 k_{10} 的影响。它表明当 σ_e' 略微减少或增加时, k_{10} 也相应地略微变大和降低,当 σ_e' 增大到超过先期固结压力(160kPa)时, k_{10} 降低非常明显。图4所示的曲线形状与压缩试验中 $e-\log p$ 曲线很相似,这是很显然的,因为大量的资料^[15,61]都证实土的渗透系数与孔隙比是密切相关的。

位于图3纵坐标上的四个实心点是用原状样进行常规渗透试验的结果。它表明常规渗透试验结果相当于 $\sigma_e' = 0$ 的三轴渗透试验值。由此可知,对原先受有应力作用的层状土,若室内试验时不考虑它所受的应力条件,则所得的渗透系数将大于工程实际土体的渗透系数;土体中的应力愈大,其值相差也愈大。

2. 土层面对渗透性的影响

碾压式土坝心墙,因为是分层填筑压实的,一般都有明显的水平层面。如果上坝土料含水量过高,设计干容重又较大,土料经反复碾压后,就很容易形成类似千层饼式的水平剪切面,这种土在现场因其上部荷重作用,诸多水平面一般都是密合着的。如本次试验挖坑取土时,在坑壁见不到土呈层状,在将土取出以后才见有较明显的水平成层现象,间隔1cm左右。因此考虑这种土的渗透各向异性时,必须同时考虑它所受的应力条件。由图3中1-8号土的试验结果,可以看到土的渗透各向异性随它所受的应力条件而变化:当 σ_e' 较小时,流向垂直层面的渗透系数 k_v 比流向平行层面的渗透系数 k_p 小得多;当 σ_e' 较大时,两者比较接近。

值得一提的是, σ_e' 较大时的 k_p 要小于较小 σ_e' 时的 k_v 值,如图3所示,对1-8号土来说,当 $\sigma_e' = 150$ kPa时, $k_p = 6.8 \times 10^{-9}$ cm/s;而当 σ_e' 为50kPa和29.5kPa时, k_v 分别为 7.8×10^{-9} cm/s和 9.7×10^{-9} cm/s。实际工程中,某一点土体的垂直应力总比水平应力大,相应的水平渗透系数和垂直渗透系数的关系也要发生变化,所以还不能笼统地讲土石坝防渗体中的水平渗透系数一定会大于垂直渗透系数。

3. 先存裂缝面对土的渗透性的影响

当土坝心墙中的大小主应力差足够地大时,心墙内填土会发生剪切破坏,由此而形成的剪切缝,因缝面上作用有压应力,在心墙内一般都是密合着的。如柴河土坝心墙探井内就发现有沿上下游方向呈八字型的密合着的剪切裂缝面^[3]。还有施工时反复碾压过程中形成的水平剪切缝,其上也作用有压应力,在心墙内部实际也是密闭的。还有水力劈裂缝,当水压力较高时,裂缝张开,而当水压力较低时,裂缝闭合。对于这类存在于土坝心墙压应力场中的闭合裂缝,人们所关心的是它究竟能对土坝心墙的防渗性能削弱多少。为此将试样劈成两半(如图5所示)以形成贯通的裂缝,再并拢起来置于压应力场中进行渗透试验。图6是该试样的渗透系数随时间而变化的关系曲线。从图中可看到,当 $\sigma_e' = 20\text{kPa}$ 时,渗透系数 k_{10} 值在试验5h后就基本趋于稳定,以后 k_{10} 值的变化与其它试样没有什么区别。由此可知,若土坝防渗体中存在着压应力作用下的闭合裂缝,防渗体的防渗性并不因此受到很大影响。

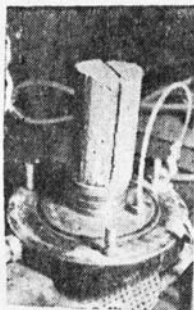
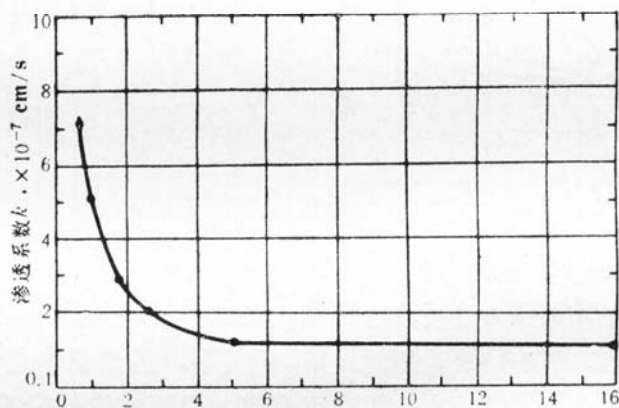


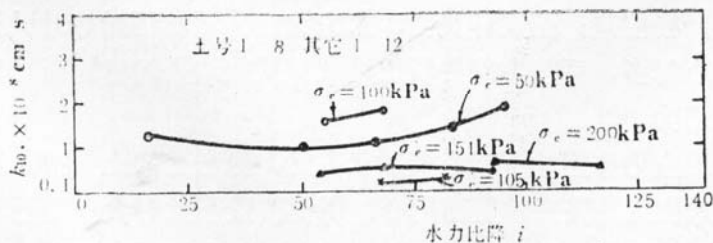
图5 裂缝土照片

图6 裂缝土在侧压力下 $k-t$ 关系($\sigma_e' = 20\text{kPa}$, 土样No.4)

4. 水力比降 i 对 k_{10} 的影响

图7是当 σ_e' 为定值时渗透系数 k_{10} 随水力比降 i 而变化的关系曲线。图中结果表明 k_{10} 随 i 变化不大。这是因为试样渗流出口有效应力 σ_e' 不随 i 变化所致。

卡彭特报道^[2]说,渗透系数随比降增大而降低,并将此归咎于较大的水力比降引起渗流出口有效应力增加,这显然与事实不符。因为根据本文开头的分析,当室压力 σ_3 为定值时,渗流出口处的有效应力与 i 无关,而渗流进口处的有效应力随 i 增大而降低,不存在使渗透系数减小的因素。

图7 水力比降 i 与渗透系数 k_{10} 的关系

上述渗透试验所得 $i-k_{10}$ 关系与我们以前进行的常规渗透试验所得结果是不同的^[7]。文献[7]的结果是 k_{10} 随 i 增大而减小,这是因为在文献[7]所述的试验过程中,试样的侧向变形

被限制, 而侧向应力随渗水压力而增大, 试样在渗水压力下趋于压密挤紧。

5. 试样长度 L 对 k_{10} 影响

不同长度的试样, 在渗流出口处的有效应力都为 $\sigma_e' = \sigma_3$, 因此试样长度对 k_{10} 的影响不会太大。图8中的结果就说明, 当 L 相差一倍以上时, k_{10} 的系数值相差不大于2, 忽略这种影响对解决工程问题是无妨的。

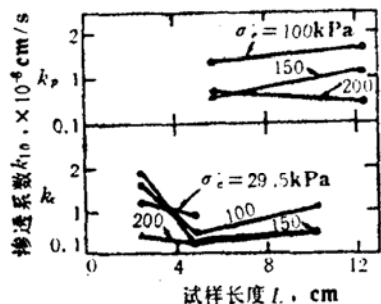


图8 试样长度对渗透性的影响

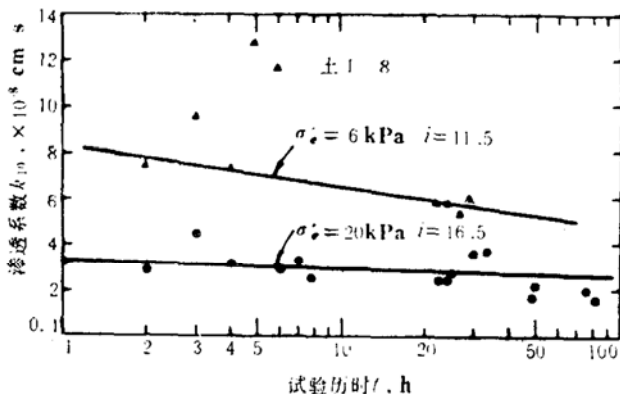


图9 试验历时对渗透系数的影响

6. 试验历时 t 对 k_{10} 的影响

为验证前面所得渗透系数是否确实是稳定渗流条件下的渗透系数值, 专门观察了 k_{10} 随试验历时的变化。图9是试验历时 t 与 k_{10} 的关系。虽然图中点子有些散乱, 但总的看来是 k_{10} 随 t 延长而略有减小, 但减小的幅度很有限, 只要在取值时遵守前面所述的原则, 在解决实际问题时忽略 t 对 k_{10} 的影响也是可以的。

三、结 语

尽管在应力场中对土坝心墙原状土的渗透试验研究得还很不够, 但根据本文所述的试验研究成果, 仍可对此作如下讨论和小结:

1. 欲较准确测定原先受有应力作用的土坝心墙原状土的渗透系数, 可考虑在三轴压力室内进行应力控制式渗透试验。它不但可以有效地防止常规渗透试验中难以克服的边壁渗漏, 而且可以较方便地模拟土体的各种应力状态。本研究结果表明, 有效应力对试样渗透性有较大影响, 在试验中应严格控制; 而试样长度、水力比降、试验历时等对试样渗透性的影响相对有效应力来说要小得多, 可以本着能较快地获得试验结果的目的而选用, 但要控制渗水压力必须小于三轴室压力。

2. 当采取原先受压应力作用的土坝心墙原状土时, 原密合的土层面会因应力解除而张开, 常规渗透试验很难使这些张开的层面闭合, 所得渗透系数偏大; 而三轴渗透试验结果表明, 在压应力作用下, 土层面和缝面极易闭合, 闭合后的土层面和缝面的渗透系数极低。柴河土坝心墙探井检查实际也表明, 虽然8 m水头作用长达23个月, 在19 m深的探井底距上游2.5 m厚的井壁上, 仍未发现渗水或含水量明显增大的部位。据此反推求井底壁的 k_p 值, 约在 10^{-9} cm/s的量级。

3. 既然土坝心墙的渗透性随它所受的应力条件而变化, 则土坝心墙的渗透系数应该根据它所受的应力状态而确定。一般来说, 有效应力愈大, 填土的渗透系数愈小。特别是由于土坝心墙内任一点的铅直应力一般都大于水平应力, 因此在考虑它们的渗透各向异性时, 要同时考虑相应的应力条件。

4. 由于土坝心墙内的有效应力一般随深度而增加, 在其它条件基本相同时, 土坝心墙的渗透性则应随深度而降低, 这会使坝身浸润线抬高。在有些土坝中发现实测测压管水位高于计算值的现象, 笔者推测可能与此有关。

参 考 文 献

- [1] Chen, H. T., Kenney T.C., Laboratory Investigation of Permeability Ratio of New Liskead Varved Soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol.10, No.3, 1973.
- [2] Carpenter, G.W., Stephenson, R.W., Permeability Testing in the Triaxial Cell, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.9, No.1, March, 1986.
- [3] 刘杰、朱建华, 柴河土坝心墙质量分析, 水利水电科学研究院, 1986年。
- [4] 中华人民共和国水利电力部, 土工试验规程, 水利出版社, 1980年。
- [5] Michaels, A. S., Lin, C.S., Permeability of Kaolinite, Flow through Porous Media, Industrial and Engineering Chemistry, 1954.
- [6] Lambe, T. W., Whitman, N. V., Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., 1969.
- [7] 朱建华, 心墙压实土的水力劈裂研究, 水利水电科学研究院研究生毕业论文, 1984年。

Triaxial Permeability Test on Undisturbed Soils of Earth Dam Core

Zhu Jianhua

(Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing)

Abstract

In this paper, the relation between anisotropic permeability of earth dam core and its stress condition is investigated by means of the stress controlled tests conducted in the triaxial cell. It is shown that the permeability of earth dam core decreases with the increase of effective stress, and the permeability anisotropy of layered soil varies with its stress state. It is therefore suggested that the stress controlled triaxial permeability test may be more useful than ordinary test to determine accurately the permeability coefficient of undisturbed samples taken from a rolled earth dam core.