

水泥土渗透系数随围压变化的试验研究

袁荣宏^{1,2}, 白杰³, 吴桂芬⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 南京市水利建筑工程检测中心, 江苏 南京 210036; 4. 中国华电工程(集团)有限公司, 北京 100035)

摘要: 利用改进的常规三轴仪压力室作为柔性壁式渗透仪,进行了渗透系数最低有效围压的试验研究. 结果显示,低有效围压情况下,试样侧壁必须涂凡士林才能保证试验精度;柔性壁式渗透仪试验的最低有效围压大致为3 kPa. 为了研究水泥土渗透系数随压力的变化规律,利用该渗透仪对取自长江某段干堤应急加固工程的防渗墙水泥土进行有压条件下的渗透试验,试验结果表明:当围压较低时,水泥土渗透系数较大,随着围压的增大,渗透系数迅速减小. 渗透系数随围压的变化关系可以用幂函数表示.

关键词: 水泥土; 三轴仪; 渗透系数; 围压

中图分类号: TV443+.9; TU411.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2012)05-0013-05

渗透系数是黏性土的重要参数,也是综合反映土体渗透能力的指标. 准确测定防渗材料的渗透系数对设计的合理性至关重要,在土坝、垃圾填埋场、深基坑帷幕及大江大河堤防等防渗工程中,常采用水泥土搅拌桩防渗墙或者塑性混凝土连续墙作为防渗体^[1],均要求具有较小的渗透系数. 所以,水泥土渗透系数是水泥土防渗墙设计和质量控制的关键性指标,必须准确测定. 另一方面,水泥土是具有一定强度的岩土体,强度介于土体与混凝土之间,其结构特性与黏性土存在本质差别,且渗透系数较小,一般在 $k = 1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 之间^[2]. 若仍沿用土的现有室内渗透试验的方法,很难解决刚性密封止水方法带来的侧壁渗漏问题,而柔性壁式渗透仪采用橡皮膜加周围水压力这种柔性密封止水的方法,可以达到很好的效果^[3].

土体或水泥土等渗透系数的测定常采用柔性壁式渗透仪. 目前,水泥土抗渗方面的研究比较多^[4-9],但有压条件下的渗透研究相对较少,而很多实际情况是,水泥土结构是在有应力条件下用来作为防渗体的^[10-11],因此,有必要对水泥土渗透系数随压力的变化关系进行研究. 本文将常规三轴仪压力室改进为柔性壁式渗透仪,验证了柔性壁式渗透仪采用橡皮膜加周围水压力这种柔性密封止水方法的可行性,其次通过对长江某段干堤应急加固工程的防渗墙水泥土样进行不同围压下的渗透试验,探讨了水泥土渗透系数随压力的变化关系.

1 最低有效围压试验

改进了常规三轴仪压力室(见图1),将三轴仪试样底部连接一根带刻度的玻璃管(也可连接围压控制器),向玻璃管中充水,并保证水位高于试样1.5 m左右,从而在试样内产生自试样底部向顶部的渗流. 试样顶部再接一根柔性导管将渗流水引出,并使导管固定,导管出口高程可略低于试样底部. 同时,试样需套上橡皮膜且上下端放置透水石后与试样帽及底座扎紧,试样装样与《土木试验规程》^[12](SL 237-1999)中的三轴压缩试验一致,且试样侧壁须涂抹少量凡士林,装样完备,安装压力室罩. 试验时必须将试样饱和,观察出口渗水连

收稿日期: 2012-02-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50825901);高等学校硕博点专项科研基金资助项目(20110094110002)

作者简介: 袁荣宏(1988-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事道路与堤坝工程研究. E-mail: yuanronghong@126.com

续时,表示试样已经饱和.这种柔性壁式渗透仪的原理和南55型变水头渗透仪^[12]相同,即在试验装置中测出渗流量和不同点的水头高度,从而计算出渗流速度和水力梯度,再代入 $v = ki$ 计算出渗透系数.

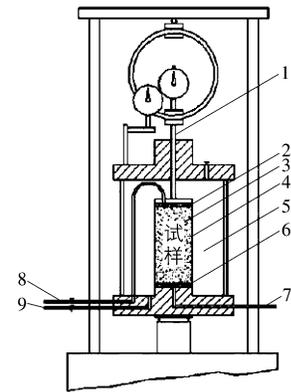
试验1:用一圆柱体铁块(高40 mm,直径50 mm)作为试样进行了试验,铁块表面不涂抹凡士林,玻璃管中初始水头高度为1.5 m,直径为2.5 mm,有效围压分别为50,100,200和400 kPa.测得侧壁漏水的渗透系数分别为 53.3×10^{-5} , 9.7×10^{-5} , 1.6×10^{-5} 和 0.014×10^{-5} cm/s,可见侧壁漏水情况随围压的增大而有所缓解.

试验2:试验所用铁块同试验1,玻璃管直径2.5 mm,将铁块表面涂抹少量凡士林,初始水头高度也为1.5 m.结果表明,在有效围压为50,100,200和400 kPa时,玻璃管中水位每24 h下降速度均小于0.5 cm,故侧壁漏水渗透系数均小于 1×10^{-9} cm/s.比较试验1和试验2的结果,可见试样侧壁若不涂抹少量凡士林,则侧壁漏水远远达不到本文水泥石土试样测试精度要求.

试验3:将少许黏土颗粒先用水吸附在铁块表面,再涂抹凡士林,模拟水泥石土的侧表面.研究较低有效围压情况下,最低多大反压才能保证侧壁止水不影响本文试验精度.本文水泥石土试验低围压下要求侧壁渗透系数 $k < 1 \times 10^{-8}$ cm/s,较高围压则要求 $k < 1 \times 10^{-9}$ cm/s.首先将一注有水的玻璃管(水位可控制)连接围压压力进口,以精确控制围压数值.在满足精度 $k < 1 \times 10^{-8}$ cm/s的情况下,有效围压和最高渗透水头的关系曲线如图2所示,从图2可见,有效围压在11~15 kPa时,两者的关系近乎为直线,且不过原点,与X轴的交点在3 kPa左右,故该柔性壁式渗透仪试验的最低有效围压为3 kPa左右.

试验4:铁块表面情况同试验3,研究了较高围压下有效围压与反压两者之间的关系,部分试验数据见表1.从表1数据可见,反压须小于围压20~50 kPa,才可满足本文水泥石土试验测试精度,且围压越大,试样侧壁漏水影响越小.

常规室内渗透仪采用环刀直接切取试样,试验时将试样与环刀一起安装到试验仪器上,这种刚性密封止水的方法容易在试样与环刀壁之间发生渗漏.柔性壁式渗透仪采用橡皮膜加周围水压力这种柔性密封止水的方法,和传统渗透仪相比主要优势是可以达到很好的侧壁止水效果和提供较高的渗透坡降(渗透水压力须低于围压值20~50 kPa),这样可以大大提高测试精度和效率,特别适用于渗透系数较小的水泥石土.



1-轴向偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$; 2-上圆形透水石; 3-水泥石试样; 4-橡皮膜; 5-压力室围压力 σ_3 ; 6-下圆形透水石; 7-反压力(渗透水压力) σ_b 进口; 8-渗水出口连接体变管; 9-围压压力进口

图1 渗透仪器示意图

Fig.1 Schematic diagram of permeability apparatus

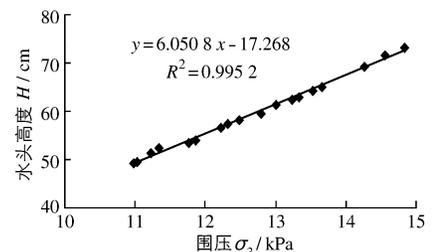


图2 有效围压和最高渗透水头关系曲线
Fig.2 Relationship curves between effective confining pressure and the highest seepage head

表1 侧壁渗透系数

Tab.1 The side wall permeability coefficients

有效围压(kPa)	50	50	50	100	100	100	200	200	400	400
反压(kPa)	30	40	50	60	80	100	150	200	350	400
渗透系数 $k(10^{-9}$ cm/s)	20.8	59.4	104	12.7	12.8	963	2.41	39.8	0.71	0.99

2 有压条件下水泥石土渗透系数试验及结果分析

2.1 试验材料

长江某段干堤应急加固工程采用多头小直径深层水泥石土搅拌桩防渗处理.该工程水泥石土搅拌桩的位置位于堤防偏迎水侧,距堤顶前沿2 m,桩顶高程11.0 m,桩底高程5.5 m,搅拌桩桩径0.5 m,间距0.4 m套打,形成0.3 m厚的防渗墙,设计水泥掺量为15%.素土基本物理力学指标见表2.

表2 素土基本物理力学指标
Tab.2 Basic physico-mechanical indexes of pure soil

ω / %	γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	G_s	e	St / %	γ_d / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	ω_L / %	ω_p / %	I_p	I_L	α_v / MPa^{-1}
29.0	19.1	2.73	0.847	93.9	14.9	37.6	22.0	15.6	0.40	0.320
E_s / MPa	C_q / kPa	φ_q / °	C_c / kPa	φ_c / °	C_s / kPa	φ_s / °	k_h / ($10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	k_v / ($10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	标贯击数/ (击/30cm)	修正标贯击数/ (击/30cm)
6.27	28.9	11.8	25.2	20.0	13.6	25.6	18.24	12.34	6.0	5.8

注: C_q, φ_q 为快剪指标; C_c, φ_c 为固结快剪指标; C_s, φ_s 为慢剪指标.

本文试验的试样为搅拌桩墙体施工完成 28 d 后的钻探取芯样, 取样部位为钻孔的中部和底部. 取得的芯样在试验室里经切割、上下端面打磨, 成为高 40 mm, 直径 50 mm 的试样. 共制备了 8 个试样, 且来自不同的钻孔, 分别编号为 186, 433, 444, 576, 694, 1000, 1251 和 2130. 为了研究水泥土渗透系数与小主应力的变化关系, 对上述水泥土样进行了固结完成 (10 h 左右) 后的有压渗透试验, 顶部阀门关闭, 底部连接的导管水位不再上升即认为固结已完成, 其中围压分别为 50, 100, 200 和 400 kPa, 且水泥土样侧壁须涂抹少量凡士林.

2.2 试验结果及分析

采用柔性壁式渗透仪对上述 8 个试样进行不同围压下的渗透系数测定, 并按照规范进行温度校正, 校正后的渗透系数见表 3. 由于这 8 个试样取自不同钻孔, 且各试样的渗透系数差异较大. 因此, 只能对各个试样的渗透系数随围压的变化规律进行分析, 还难以进一步分析素土性质差异对水泥土渗透系数的影响规律.

表3 水泥土样不同围压下的渗透系数
Tab.3 Permeability coefficients of soil-cement under various confining pressures (10^{-7}cm/s)

水泥土样 编号	不同围压下渗透系数				水泥土样 编号	不同围压下渗透系数			
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa		50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
186	26	7.1	2.9	0.34	694	567	487	144	12
433	5.1	0.91	0.53	0.38	1000	55	21	12	9.2
444	123	51	33	27	1251	1.1	0.43	0.2	0.13
576	4	0.51	0.049	0.051	2130	0.95	0.25	0.077	0.051

为了更清楚地分析渗透系数随压力的变化关系, 将表 3 数据整理成渗透系数与围压的关系曲线 (见图 3). 这里仅给出了 444, 1000, 1251 和 2130 号水泥土样的渗透系数与围压关系的曲线, 186, 433, 576 和 694 号的与图 3 中曲线相似, 不一一列出. 由图 3 可见, 在低围压时 (低于 100 kPa), 渗透系数随围压的增大而减小的速率较大, 随着围压的增大, 逐渐趋于平缓, 说明增加压力来降低渗透系数是可行的. 水泥土在切割打磨的过程中难免会产生微裂缝, 低围压下未闭合, 这可能是低围压下渗透系数偏大的主要原因.

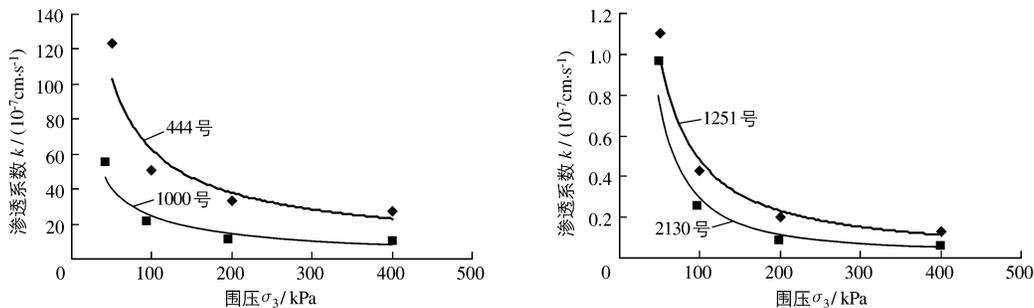


图3 水泥土样渗透系数与围压关系曲线

Fig.3 Relationship curves of $k-\sigma_3$ for soil-cement

从渗透系数 k 与周围压力 σ_3 关系曲线可以看出, 周围压力对渗透系数的影响比较大, 水泥土样的渗透系数都随压力的增大而减小. 进一步研究发现, 如果将渗透系数与围压在双对数坐标中画出时, 有较好的线

性关系. 这里仅给出了 444 和 1000 号水泥石样的渗透系数与围压关系的双对数曲线. 考虑到量纲方便, 可采用下式拟合:

$$\ln k = A + B \ln \frac{\sigma_3}{p_a} \quad (1)$$

式中: A, B 为线性回归系数. 因此, 整理可得:

$$k = 10^{-7} \alpha \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\beta = k_0 \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\beta \quad (2)$$

式中: k 为渗透系数; σ_3 为小主应力; p_a 为大气压力; α, β 均为试验参数, k_0 为小主应力等于大气压时的渗透系数, 且 $\alpha = 10^7 e^A, \beta = B, k_0 = 10^{-7} \alpha$. 对应的 $k-\sigma_3$ 拟合幂函数曲线为 $y = 0.719 1x + 4.133 3 (R^2 = 0.913 4, 444$ 号土样); $y = 0.854 7x + 3.235 2 (R^2 = 0.934 9, 1000$ 号土样).

将 8 个试样的试验结果分别利用式(1)进行拟合, 可整理得到参数 α, β , 并列于表 4 中. 从表 4 可以看出, 不同试验所得到的参数 α 的数值差异较大, 这主要是由于不同土样渗透系数差异较大的缘故, 而 β 的数值差异不是很大, 在 $-2.22 \sim -0.71$ 之间, 说明各试样的 $k-\sigma_3$ 曲线弯曲程度大体相似.

由于本文的原始资料有限, 还难以分析参数 α, β 与水泥土含量、密度、原素土指标之间的关系. 另外, 式(2)存在一个与实际情况不相符合的地方, 即 σ_3 趋近于 0 时, 渗透系数 k 为无穷大. 因此, 该式不适合计算较低围压(小于 50 kPa)的渗透系数.

实际上, 渗透系数与小主应力的关系是由于固结后土样孔隙比减小所致^[13], 但由于试样数量和资料有限, 还很难进行这方面研究, 如需研究渗透系数与孔隙比的变化关系和素土性质对水泥土渗透系数的影响规律, 必须对更多类型的水泥土进行试验研究. 本文仅初步总结了水泥土的渗透系数随小主应力的变化可以用幂函数表示, 其他问题还有待进一步深入研究.

表 4 渗透系数与围压关系的拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of permeability coefficient-various confining pressures

水泥石样编号	186	433	444	576	694	1000	1251	2130
α (cm/s)	7.362	1.491	62.38	0.578	280.0	25.41	0.476	0.287
β	-2.00	-1.20	-0.71	-2.22	-1.84	-0.85	-1.03	-1.43

3 结 语

(1) 采用改进型常规三轴仪作为柔性壁式渗透仪测定水泥石样渗透系数的方法, 试验验证了用橡皮膜加周围水压力这种柔性止水的方法, 可有效解决刚性密封止水效果差的问题.

(2) 对所试验的水泥土, 当围压较低(低于 100 kPa)时, 渗透系数随围压的增大而减小的速率较大, 但随着围压的增大, 逐渐趋于平缓, 所以增加压力来降低渗透系数是可行的.

(3) 通过对试验数据的分析, 总结出了水泥土渗透系数 k 与围压 σ_3 的幂函数关系式. 由于试样数量有限, 该公式存在一些不完善的地方, 还有待进一步研究.

参 考 文 献:

- [1] 田堪良, 张慧莉, 罗璧玉. 新型渗透变形仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊): 3441-3444. (TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, LUO Bi-yu. Development of a new-type apparatus for measuring seepage deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl): 3441-3444. (in Chinese))
- [2] 宋新江. 基于常规三轴仪测定水泥土渗透系数方法研究[J]. 江淮水利科技, 2010(6): 19-21. (SONG Xin-jiang. Research on the way to test permeability of soil-cement measured with triaxial apparatus[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2010(6): 19-21. (in Chinese))
- [3] 靖向党, 于波, 谢俊革. 柔壁渗透仪的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻探工程), 2008(9): 28-31. (JING Xiang-dang, YU Bo, XIE Jun-ge. Test research of permeameter with flexible wall[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008(9): 28-31. (in Chinese))
- [4] 张雷, 王晓雪, 叶勇, 等. 水泥土抗渗性能室内试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增2): 1192-1196. (ZHANG Lei,

- WANG Xiao-xue, YE Yong, et al. Study on anti-permeability performance of soil-cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Suppl2): 1192-1196. (in Chinese))
- [5] 侯永峰, 龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. 浙江大学学报, 2000, 34(2): 189-193. (HOU Yong-feng, GONG Xiao-nan. The permeability of cement-treated soil[J]. Journal of Zhejiang University, 2000, 34(2): 189-193. (in Chinese))
- [6] 郑刚. 水泥土抗渗性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (ZHENG Gang. Study on the anti-permeability performance of soil cement[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [7] 董邑宁. 水泥土强度及渗透特性试验研究[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2000, 18(6): 13-16. (DONG Yi-ning. Experimental research of strength and permeability of cement-treated soil[J]. Journal of Qinghai University (Natural Sciences), 2000, 18(6): 13-16. (in Chinese))
- [8] 朱乔生, 方子帆, 姜平, 等. 水泥土渗透及渗透变形试验的研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2001, 23(6): 495-498. (ZHU Qiao-sheng, FANG Zi-fan, JIANG Ping, et al. Test research on infiltration and seepage deformation of cement-soil [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2001, 23(6): 495-498. (in Chinese))
- [9] 徐海波, 席文勇. 水泥土渗透特性与强度特性研究综述[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 13-16. (XU Hai-bo, XI Wen-yong. Research status of seepage behavior and strength property of soil-cement [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(8): 13-16. (in Chinese))
- [10] 邓永峰, 刘松玉, 洪振舜. 水泥土搅拌桩施工扰动评价的一种方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 717-720. (DENG Yong-feng, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun. Disturbance degree of surrounding soil induced by deep mixing column installation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 717-720. (in Chinese))
- [11] 孙建, 庞新周, 朱鹏翔. 水泥土深层搅拌桩止水幕墙在基坑工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2011(6): 199-201. (SUN Jian, PANG Xin-zhou, ZHU Peng-xiang. The application of stopping water curtain wall of the deep-mixing concrete stack in foundation pit project[J]. West-China Exploration Engineering, 2011(6): 199-201. (in Chinese))
- [12] SL 237—1999, 土工试验规程[S]. (SL 237—1999, Specification of soil test[S]. (in Chinese))
- [13] 肖红宇, 黄英, 孙宏波. 土体孔隙分析模型及其与土体渗透性关系的研究[J]. 云南水力发电, 2005, 21(6): 21-24. (XIAO Hong-yu, HUANG Ying, SUN Hong-bo. Study of soil mass pore fractal model and its relation to soil mass permeability [J]. Yunnan Water Power, 2005, 21(6): 21-24. (in Chinese))

Test study on soil-cement permeability coefficient change with confining pressure of a flexible wall permeameter

YUAN Rong-hong^{1,2}, BAI Jie³, WU Gui-fen⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Water Conservancy Construction Engineering Detecting Centre, Nanjing 210036, China; 4. China Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing 100035, China)

Abstract: Experimental study on permeability coefficient and minimum effective confining pressure has been done by using improved triaxial apparatus as a flexible wall permeameter. The research results show that it is necessary to smear vaseline to enhance the examination precision of the test in the condition of the lower effective confining pressure. At that time, the minimum effective confining pressure of the flexible wall permeameter test is about 3 kPa. In order to study the relationships between permeability coefficients and confining pressures, the permeability coefficients under various confining pressures are measured in the seepage tests of cutoff wall soil-cement of the Changjiang dike emergency reinforcement project, of which the results indicate that when the confining pressures are lower, the permeability coefficients are higher; however, the permeability coefficients decrease rapidly as the confining pressures increase. The relationships between permeability coefficients and confining pressures can be represented by a power function.

Key words: soil-cement; triaxial apparatus; permeability coefficient; confining pressure