

水泥土渗透系数变化规律试验研究

朱崇辉,王增红

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为了深入探讨水泥土渗透系数的变化规律,采用室内试验研究方法,对不同干密度、水泥掺量和龄期的水泥土进行了室内渗透试验研究。结果表明:水泥土渗透系数与水泥土的干密度、水泥掺量、龄期密切相关;在干密度和龄期一定条件下,渗透系数随水泥掺量增大而增大;在标准击实功干密度和龄期一定条件下,渗透系数随水泥掺量增大而减小;在标准击实功干密度和水泥掺量一定条件下,渗透系数则随龄期的延长而减小。结论不仅对水泥土的渗透理论研究具有积极的探索意义,而且对采用水泥土施工或加固的岩土工程建设也具有一定的现实意义。

关键词:水泥土;渗透系数;水泥掺量;干密度;龄期

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5485(2013)07-0059-05

水泥土是由土颗粒、水泥和水按比例拌合形成的一种水硬性复合建筑材料,压实水泥土的多种工程力学性能较素土都有显著提高,在压实性、抗压强度、抗剪强度、防渗、抗渗性能方面都显著优于素土。目前,水泥土已开始运用于基坑支护、地基加固、路基垫层、渠道防渗抗渗等方面。加强水泥土渗透性能研究,探明渗透系数变化规律,对水泥土的渗透理论研究和对采用水泥土施工或加固的岩土工程建设都具有积极的探索意义。

1 国内外研究现状

英国人阿斯谱丁(J. Aspdin)于1824年10月最先发明了波特兰水泥^[1],此后,水泥作为一种固化材料开始在许多国家展开研究,随之便逐渐产生了性能各异的水泥品种。将水泥掺入土中加水拌合压实以加固土体,增强土的力学性能的水泥土研究则始于20世纪初的美国和日本^[2]。随着经济和建筑业的发展,我国于20世纪70年代也开始了水泥土的工程性质理论和应用研究。从目前国内外水泥土的研究成果来看,主要集中在水泥土强度与含水率^[3-5]、水泥掺量^[6-8]、龄期^[9-10]的关系方面。随着电子显微镜扫描技术的发展,近10多年来,一些学者还从水泥土随时间延长的微观结构变化机理方面进行了研究^[11-14],这些研究成果正在为水泥土力学本构模型研究创造条件。水泥土渗透性方面的研究

成果目前还很少,主要问题在于研究手段有待完善。为此,课题组通过自行设计的水泥土渗透仪进行了黄土拌合的水泥土进行了渗透系数变化规律的试验研究。

2 水泥土渗透系数试验研究

2.1 水泥土渗透仪研制

普通细粒土渗透试验在许多试验规程中都有规定^[15],试验仪器、方法和步骤都较为成熟,但课题组参考规范对水泥土渗透系数的前期研究发现,采用南55渗透仪对水泥土渗透系数试验存在以下问题:水泥土渗透系数与龄期有关,土样需养护,将水泥土置于渗透仪中养护,水泥土会因水化放出热量体积膨胀,在渗透环刀侧限条件下出现开裂现象,导致水泥土渗透系数测试不准确。因此,水泥土养护必须在无侧限条件下进行。将试样推出环刀进行无侧限养护则会由于土样膨胀后无法再次无损放入环刀,削样可将试样放回环刀进行试验,但削样对试样的扰动破坏,同样会使试验结果不准确。

为此,课题组设计了专门的水泥土渗透仪,解决了水泥土因膨胀变形无法无损放入仪器中进行渗透试验的技术难题。试验仪器基本结构见图1。设计思想为:土样采用圆柱体试样,考虑到水泥土试样养护后膨胀,将试验仪器放样空间在径向上增大,满足最大膨胀后土样能无损地放入仪器中。试样与仪器

间出现的缝隙,通过宽度大于试样厚度的台阶设计,使侧向渗径大于垂直渗径,台阶部分的土样上下放置平板式环状止水环止水,上部采用内径与进水腔体内径相同的环形压力盖固定,以保证渗透水流从露空的中间部分进行渗透,渗透面积按漏空面积计算,从而解决了土样养护膨胀带来的试验难题,试验证明效果比较理想。

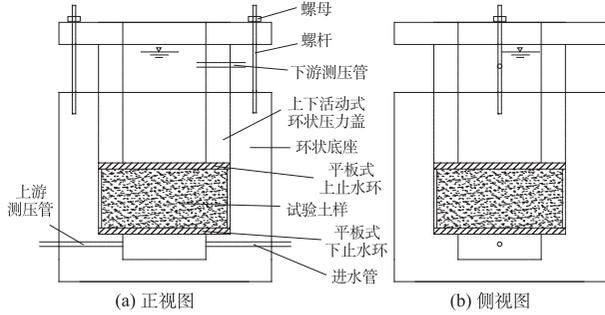


图1 水泥石透仪结构示意图

Fig.1 Structure of cement soil permeameter

2.2 试样制备

土料取自陕西省杨凌工业园区以北的崔西沟黄土峁原,参考《土工试验规程》(SL—1999)测定了土的基本物理参数:天然含水率12.8%,土粒比重2.71,液限34.5%,塑限17.7%,塑性指数16.8。根据《土工试验规程》(SL237—1999)中塑性图分类,土粒试样属低液限黏土(黄土)。水泥为陕西秦岭水泥股份有限公司生产的秦岭牌425#普通硅酸盐水泥。

按设计方案,共制样7组,每组8个试样。水泥掺量按干水泥与干土质量的百分比计算,制样含水率参考前期水泥石击实试验最优含水率,将试样所需全部水量分层喷洒入过2mm筛后的素土中闷制24h后拌匀,制样前将每个试样对应的水泥量掺入土中拌匀后立即进行制样,制样采用静压和击实2种方法进行。试样均为半径3.91cm,厚度4cm的圆柱体,静压制样法试样干密度均为定值,击样法试样采用单位轻型标准击实功分2层击样控制干密度,试样制好后放入标准养护箱中养护,温度控制在20℃,相对湿度控制在80%,各组试样最终试验参数见表1。表1中水泥掺量范围为2.5%~20%,准确掺入量分别为2.5%,5.0%,7.5%,10.0%,12.5%,15.0%,17.5%,20.0%;干密度范围为1.66~1.73g/cm³,准确值分别为1.66,1.67,1.68,1.69,1.70,1.71,1.72,1.73g/cm³;龄期范围为3~90d,准确天数分别为3,7,14,21,28,35,60,90d,含水率范围为17.0%~24.0%,准确数值分别为17.0%,18.0%,19.0%,20.0%,21.0%,22.0%,23.0%,24.0%。

表1 试样试验参数表

Table 1 Parameters of cement soil specimens for the test

组号	水泥掺量/%	制样方法	含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	龄期/d
1	10	静压	20.0	1.68	7
2	15	静压	22.0	1.68	7
3	2.5~20	静压	17.0~24.0	1.70	7
4	2.5~20	标准击实	17.0~24.0	1.66~1.73	14
5	2.5~20	标准击实	17.0~24.0	1.66~1.73	21
6	10	静压	20.0	1.71	3~90
7	2.5~20	标准击实	17.0~24.0	1.66~1.73	3~90

2.3 试验

参考《土工试验规程》(SL237—1999)中变水头渗透试验有关步骤,在试样满龄期前一天,将其放入抽气缸中抽气2h,然后用无气水浸水饱和至龄期备用。试验前,将环形平板止水圈放入渗透仪台阶上,环形止水圈上放置水泥石土样,土样上再放置一个环形止水圈,为防止渗水从渗透仪内壁渗出,在上平板止水圈上放入一个具有较高强度的有机玻璃环,形状与环形止水圈相同,然后在有机玻璃环上再放置大小与渗透仪内腔直径相同的圆环形止水圈,最后在上部通过加压环施加压力固定渗透试样,试样装好后,进行加水排气,施加水头进行变水头渗透试验,试验数据取6次平行试验平均值,试验用水为真空抽气无气水。

3 结果分析

将不同条件下渗透系数与渗透试验起始坡降、水泥掺量、水泥石龄期关系试验结果整理到图2、图3、图4所示的单对数坐标系中。图2为第1和第2组试样曲线,图3为第3至第5组试样曲线,图4为第6和第7组试样曲线。

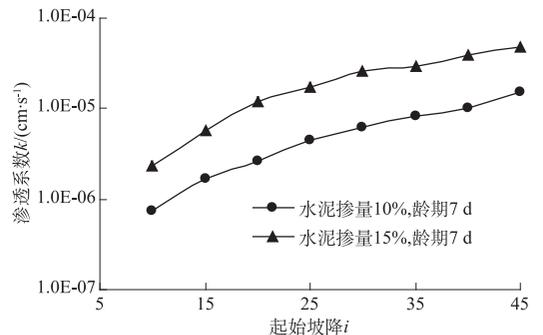


图2 渗透系数与渗透试验起始坡降关系曲线

Fig.2 Curves of permeability coefficient vs. initial gradient in the permeability test for cement soil

从图2渗透系数与渗透试验起始坡降关系曲线可见,水泥石渗透系数大小与渗透试验起始坡降有关。在水泥掺量、龄期和干密度相同情况下,水泥石

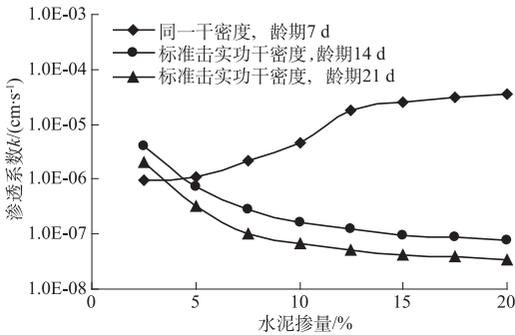


图3 渗透系数与水泥掺量关系曲线

Fig.3 Curves of permeability coefficient vs. cement content of cement soil

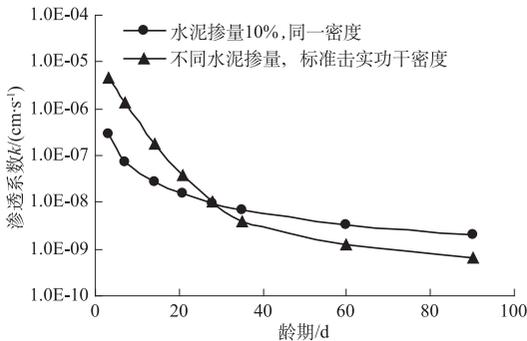


图4 渗透系数与水泥土龄期关系曲线

Fig.4 Curves of permeability coefficient vs. age of cement soil

渗透系数并非是一个定值,随着渗透起始坡降的增大,渗透系数逐渐增大,水泥掺量为10%、龄期为7 d、干密度为 1.68 g/cm^3 的水泥土,测试起始坡降从10增大到45,渗透系数则从 $7.33 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 增大到了 $1.50 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$;水泥掺量为15%、龄期也为7 d、干密度为 1.68 g/cm^3 的水泥土,测试起始坡降从10增大到45,渗透系数则从 $2.29 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 增大到了 $4.78 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,渗透系数增大程度都在10倍以上,超过了一个数量级。从图2曲线趋势上看,随着渗透起始坡降的增大,渗透系数还具有增大趋势,其它龄期的渗透试验结果也具有相同现象。为何渗透系数随初始水力坡降增大而增大,原因在于渗透水流在土样中渗透需克服土颗粒表面的薄膜水的阻碍作用,当渗透初始坡降增大后,渗透压力增高,渗流水速度加快,薄膜水层厚度减小,有效渗透水流面积增加,导致渗透系数增大。这就说明,在其它条件不变的情况下,水泥土的渗透系数大小要具有可比性,必须在某一相同渗透起始坡降下进行。

因此,本文其余全部试验的渗透系数测定都选择在固定渗透起始坡降为40的条件下进行。

从图3渗透系数与水泥掺量关系曲线图,可见,在水泥土龄期为7 d,干密度相同条件下,水泥土渗透系数随水泥掺量的增加逐渐增大,这给人一种反常印

象。其实,原因在于干密度相同所致。因为该组土样试验条件是在干密度为 1.70 g/cm^3 这一固定干密度情况下进行的,在前期水泥土的击实试验中发现,当击实功相同时,水泥土最大干密度随水泥掺量增加而增大。在水泥土击实过程中,水泥会产生固化,固化后的水泥比重较土颗粒比重稍大,好比黏性土中含砾石,水泥掺量越大,固化后含砾越多,最大干密度增加。当在相同干密度条件下,随着水泥掺量增加,水泥土相应试样的相对压实度有所降低,土粒间空隙越多,渗透系数必将增大。图2中水泥掺量为15%的曲线位于掺量为10%的曲线上方也反映这一现象。在实际施工中这种情况是不允许出现的,一般会根据不同水泥掺量对应的击实最大干密度,采用压实度控制实际施工干密度,也就是说,水泥掺量增加,对应的干密度也应相应增大。根据这种情况,又进行了按标准击实功控制试样干密度的2组不同水泥掺量渗透试验,参考混凝土强度测定龄期,渗透试验龄期分别选在了14 d和21 d,该条件下测得的渗透系数结果见图3中另2条曲线。从图中可见,同一曲线上水泥土渗透系数随水泥掺量增加,渗透系数逐渐减小,减小幅度随水泥掺量增加而变缓,龄期为21 d的不同掺量曲线均位于龄期为14 d的不同掺量曲线下方,说明相同掺量的水泥土渗透系数随龄期增加而减小。原因在于,水泥水化过程是逐渐进行的,试样成型初期速度较快,随时间延长,可参与水化的水量和水泥量都逐渐减少,水泥水化速度变得越来越慢。2条曲线都在水泥掺量约为8%~10%左右出现拐点。由此规律可得到启示,利用水泥土防渗,在渗透系数减小到符合要求的前提下,存在一个经济上合理的掺入比,一般在8%~10%较为合理。掺量超过该比例,相同水泥增量在防渗上的作用显著降低,经济上是不划算的。

图4显示,相同水泥掺量下,相同干密度和标准击实功控制干密度的水泥土,随龄期的延长,水泥土渗透系数都逐渐降低,降低幅度都随龄期增加逐渐放缓,该现象再次表明,水泥土水化速度在试样成型初期较快,随时间延长,水化速度逐渐变慢,在龄期为90 d,渗透系数还有减小趋势,表明水泥水化过程时间较长,在实际工程中,由于水泥土体积较实验室试样体积大得多,水化时间还会延长,可能会达到半年、1年、甚至数年。但是,根据图中渗透系数与龄期关系曲线趋势可以判断,水泥土水化量在试样成型初期的前2周或3周已大部分完成,前期水化结果对水泥土的渗透系数或强度起重要作用。图4还显示,标准击实功控制干密度的曲线较固定干密度曲线陡,且二者

还出现交叉现象,原因在于,标准击实功控制干密度的试样,密度是一个变值,在水泥掺量较小时干密度也较小,随水泥掺量增加干密度增大,当水泥掺量增大到一定程度后,标准击实功试样干密度已大于采用静压法控制的试样干密度,出现渗透系数小于静压法试样控制干密度的现象。从图 2 至图 4 上可看出,在水泥掺量为 10%,制样方法为静压、龄期为 7 d 的条件下,第 1 组和第 3 组水泥土的渗透系数在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ cm/s 之间,而第 6 组水泥土的渗透系数在 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s 之间,主要在于第 6 组试样干密度较大,同时,密度不同试样渗透系数曲线较相同密度试样渗透系数曲线陡,说明干密度大小对水泥土渗透系数大小起决定性控制作用。

4 结论与建议

从上述结果分析中可得出水泥土以下几点渗透系数方面的研究结论:

(1) 在水泥土水泥掺量、干密度、龄期等物理状态一定条件下,渗透系数与试验时的起始坡降有关,随起始坡降的增大而增大,渗透系数的大小测定必须在某一特定物理状态和起始坡降下才具可比性。

(2) 在水泥土水泥掺量、干密度等物理状态保持一定的条件下,水泥土渗透系数随龄期延长而减小,减小幅度逐渐变缓,试样成型初期的前 2~3 周,变化最为显著,前后期渗透系数可相差 2~3 个数量级。

(3) 干密度是影响水泥土渗透系数的最重要因素,水泥掺量、龄期的改变,从而导致水泥土渗透系数变化的直接原因都在于这些改变最终直接导致了水泥土干密度变化,干密度变化的结果引起土样中孔隙率和孔隙连通性的改变,从而宏观表现在渗透系数上的巨大变化。

本文主要从水泥掺量、龄期、干密度方面定性探讨了以黄土拌合的水泥土渗透系数的宏观变化规律,而渗透系数与上述因素间是否存在定量计算模型关系,土的种类、水泥型号、养护条件等因素影响水泥土渗透系数的作用大小,则需继续深入研究。

参考文献:

[1] 樊恒辉,高建恩,吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):141-142. (FAN Heng-hui, GAO Jian-en, WU Pu-te. Prospect of Researches on Soil Stabilizer[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2006,34(2):141-142. (in Chinese))

[2] 李彦智. 水泥土工程性能实验研究[D]. 北京:中国地质大学,2006. (LI Yan-zhi. Experimental Study of Engineering Property of Soil Cements [D]. Beijing: Press of China University of Geosciences, 2006. (in Chinese))

[3] 张家柱,程 钊,余金煌. 水泥土性能的试验研究[J]. 岩土工程技术,1999,(3):38-40. (ZHANG Jia-zhu, CHENG Zhao, YU Jin-huang. Experimental Study on Properties of Cement Soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999,(3):38-40. (in Chinese))

[4] 宫必宁,李淞泉. 软土地基水泥深层搅拌加固土物理力学特性研究[J]. 河海大学学报,2000,28(2):101-105. (GONG Bi-ning, LI Song-quan. Study on Physical and Mechanical Characteristics of Deep Jet Mixing Strengthening Soil for Soft Foundations [J]. Journal of Hohai University, 2000,28(2):101-105. (in Chinese))

[5] 林 鹏,许淑贤,许镇鸿. 软土地基水泥土的室内强度试验分析[J]. 西部探矿工程,2002,77(4):6-8. (LIN Peng, XU Shu-xian, XU Zhen-hong. Indoor Experiment on Strength of Cement-treated Soft Clay [J]. West-China Exploration Engineering, 2002,77(4):6-8. (in Chinese))

[6] GALLAVRESI F. Grouting Improvement of Foundation Soils[C]//Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics: Proceedings of the Conference Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the ASCE in Cooperation with ISSMFE, New Orleans, Louisiana, February, 25-28, 1992: 1-38.

[7] HORPUBSUK S, MIURA N, BERGADO D T. Undrained Shear Behaviour of Cement Admixed Clay at High Water Content[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004,130(10):1096-1105.

[8] LEE F H, LEE Y, CHEW S H, et al. Strength and Modulus of Marine Clay-cement Mixes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 178-186.

[9] 汤怡新,刘汉龙,朱 伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):549-554. (TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on Engineering Properties of Cement-stabilized Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(5):549-554. (in Chinese))

[10] 储诚富,洪振舜,刘松玉,等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学,2005,26(4):645-649. (CHU Cheng-fu, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, et al. Prediction of Unconfined Compressive Strength of Cemented Soils with Quasi-water-cement Ratio [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(4):645-649. (in Chinese))

[11] 王 清,陈慧娥,蔡可易. 水泥土微观结构特征的定量评价[J]. 岩土力学,2004,24(增1):12-16. (WANG Qing, CHEN Hui-e, CAI Ke-yi. Quantitative Evaluation of Microstructure Features of Soil Contained Some Cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,24(Sup. 1):12-16. (in Chinese))

[12] 王文军,朱向荣,方鹏飞. 纳米硅粉水泥土固化机理研究[J]. 浙江大学学报,2005,39(1):148-153. (WANG Wen-jun, ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei.

Analysis on Reinforcement Mechanism of Nanometer Silica Fume Reinforced Cemented Clay [J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39 (1): 148 - 153. (in Chinese))

[13] 叶观宝,陈望春,徐超,等. 水泥土添加剂的室内试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19 (5): 12 - 17. (YE Guan-bao, CHEN Wang-chun, XU Chao, *et al.* Test on Additive of Cement-soil in Laboratory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (5): 12 - 17. (in Chinese))

[14] 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))

[15] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999, 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237—1999, Specification of Soil Test [S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

(编辑:姜小兰)

Experimental Research on the Variation Regularity of Permeability Coefficient of Cement Soil

ZHU Chong-hui, WANG Zeng-hong

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the cement soil's permeability coefficient variation, we performed laboratory permeability test on cement soil of different dry densities, cement contents and ages. The test results show that cement soil's permeability coefficient is closely related with its dry density, cement content and age: when the dry density and age remain unchanged, the permeability coefficient increases with the increase of cement content; while when the dry density under standard compaction work and the age remain the same, the permeability coefficient decreases with the increase of cement content; when the dry density under standard compaction work and the cement content remain the same, the permeability coefficient decreases with the increase of age. These conclusions are helpful to explore cement soil's permeability, and are also practical for the construction and reinforcement of geotechnical engineering using cement soil.

Key words: cement soil; permeability coefficient; cement content; dry density; age



(上接第 58 页)

Advances in Research on Flood Discharge Atomization

WANG Si-ying, WANG Cai-huan, CHEN Duan

(Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Flood discharge atomization of high dam projects will have possible negative impact on the hydropower station operation, traffic safety, surrounding environment, and even the stability of the downstream bank slope. Researchers have done much work in this regard, and meanwhile there is still much work to do because of its significance and complexity. This paper presents a full scale review on current study on this issue, summarizes the cognition on its damage, the forming mechanism of the atomization, and the comparison of different experimental and numerical research results. It's proposed that two aspects should be focused on in the future study: first, advanced measuring equipment and methods should be imported and invented to obtain more particular and accurate information; second, properties of the atomization source should be paid more attention to.

Key words: flood discharge atomization; research progress; scale effect; model test; numerical forecast