【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

玄武岩纤维水泥土的抗渗性能研究

陈峰^{1,2}, 童生豪², 任健华³, 简文彬²

1) 福建江夏学院工程学院, 福建福州 350108; 2) 福州大学环境与资源学院, 福建福州 350116;
3) 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建福州 350001

摘要: 为分析玄武岩纤维对水泥土抗渗性能的影响, 在水泥土中掺入质量分数分别为 0、0.5%、1.0% 和 1.5% 的玄武岩纤维, 通过渗透性试验和抗氯离子渗透性试验得到玄武岩纤维水泥土的渗透系数和电通量值, 获得最优的玄武岩纤维掺量值。试验结果表明, 掺入玄武岩纤维对水泥土的抗渗性能有较明显的增强作用, 随着掺量增多, 水泥土的渗透系数和电通量值都会降低, 但降幅随着掺量的增加呈减小趋势, 玄武岩纤维的最优质量分数为 1.5%。结合扫描电镜测试, 发现玄武岩纤维的掺入能有效联结土颗粒, 使纤维、土颗粒和水泥形成一个更稳定的整体。

关键词: 岩土工程; 水泥土; 玄武岩纤维; 抗渗性能; 渗透性试验; 电通量; 微观结构
中图分类号: TU 411 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.02157

Impermeability of basalt fiber soil-cement

CHEN Feng^{1, 2}, TONG Shenghao², REN Jianhua³, and JIAN Wenbin²

1) College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, Fujian Province, P. R. China
2) College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian Province, P. R. China
3) Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co. Ltd., Fuzhou 350001, Fujian Province, P. R. China

Abstract: The influence of basalt fiber on the impermeability of soil-cement is studied by the tests of permeability, anti-chloride ion resistance and scanning electron microscope. The mixing basalt fiber mass fractions for different tests are 0, 0.5%, 1.0%, and 1.5%, respectively. The permeability coefficients and electric fluxes of basalt fiber soil-cements are obtained. Results show that the addition of basalt fiber can obviously enhance the impermeability of soil-cement. With the increase of basalt fiber content, both the permeability coefficient and the value of electric flux decrease. The optimal mass fraction of basalt fiber is 1.5%. The incorporation of basalt fibers can effectively connect the discrete soil particles and make the basalt fibers, soil particles and cement form a more stable whole.

Key words: geotechnical engineering; soil-cement; basalt fiber; impermeability; permeability test; electric flux; microstructure

近年来, 水泥土凭借低渗透性的特点, 在止水防渗方面的运用越来越广泛^[1-2]。不仅可以应用于小型的水利工程中, 还可以用于大坝及大型渠道,

在用地紧张、环保要求严格的地区更是被广泛选用^[3]。水泥土的渗透性与强度性能一样, 是评价水泥土工程性能的重要指标^[4-6]。目前, 对于水泥土

Received: 2020-03-15; **Accepted:** 2020-05-19

Foundation: National Natural Science Foundation of China (41861134011); Natural Science Foundation of Fujian Province (2019J01883)

Corresponding author: Professor CHEN Feng. E-mail: cfxh@fzu.edu.cn

Citation: CHEN Feng, TONG Shenghao, REN Jianhua, et al. Impermeability of basalt fiber soil-cement [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 157-162. (in Chinese)

抗渗性能的研究较多的集中在水泥掺量和养护龄期这两个方面^[7-8]。张雷等^[9-11]利用回归分析的方法得到了水泥土渗透系数与水泥掺量、养护龄期的关系式。但在实际工程中,还要考虑周边环境的影响。焦德才等^[12]考虑了侵蚀环境对水泥土渗透性的影响。陈四利等^[13-14]模拟了污水环境对水泥土渗透性的影响,并通过改变环境温度得到海洋环境和清水环境下渗透系数随温度变化的回归曲线方程。随着科技的进步,越来越多的学者开始运用数值模拟软件^[15]和微观试验^[16]对水泥土的渗透性能做更深入的研究。如 KUNITO 等^[17]通过微观试验研究了水泥土的渗透性与土体结构致密性的关系。郑晓培^[18]从微观结构的角度出发,建立水泥土孔径分布与渗透系数的分析模型,并利用数值模拟进一步讨论渗透系数的影响因素。

随着水利工程的大规模建设,水泥土在土体加固及止水防渗方面发挥着不可替代的作用。水泥土作为止水防渗帷幕应用于工程时,常处于地下水或侵蚀离子丰富的环境中,不可避免地会遭受到环境的侵蚀,甚至会影响抗渗性能。对水泥土抗渗性能影响最大的是氯离子,它可以通过渗透作用、毛细作用和电化学转移等方式侵入到水泥土的内部,造成水泥土性质的改变,严重影响水泥土的抗渗性能及安全性能,降低使用年限。为了满足工程建设的需求,进一步提高水泥土的抗渗性能,玄武岩纤维凭借优良的工程性能被作为增强材料掺入到水泥土中^[19-21]。文献[22-23]研究表明,在水泥土中掺入一定量的玄武岩纤维,能提高其抗拉性能,从而减少裂缝的产生,进而能提高水泥土的抗渗性能,但玄武岩纤维的掺入降低了水泥土的和易性,影响水泥土的成型质量和抗渗性能。因此,需要对玄武岩纤维掺量对水泥土抗渗性能的影响做深入的研究,确定较优的玄武岩纤维掺量值,使水泥土的抗渗性能得到提高,对工程实践提供指导。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用土料取自中国福州市火车站琴亭高架桥附近的某安置房项目基坑内的淤泥质土,取土深度约为 8.40~13.20 m,天然含水率(质量分数)为 57.5%,密度为 15.52 g/cm³,孔隙比为 1.72,液限指数为 1.43,塑限指数为 21.72,压缩系数为 1.58 MPa⁻¹,黏聚力为 9.69 kPa,内摩擦角为

6.69°。试验采用福建炼石牌 P42.5 级的普通硅酸盐水泥,所用玄武岩纤维为浙江石金玄武岩纤维有限公司生产的短切纤维^[20]。试验用水为福州自来水经纯水机提纯后的纯水。

1.2 试验方法

本研究采用渗透性试验、抗氯离子渗透性试验和扫描电镜测试,通过宏观结合微细观的方法,研究玄武岩纤维对水泥土抗渗性能的增强效果。根据《JGJT 233—2011 水泥土配合比设计规程》,采用 TJSS-25 型水泥土渗透试验装置进行渗透性试验;采用型号为 BSJ 的全自动饱盐饱水机和型号为 RCM-DTL 的多功能氯离子测定仪进行抗氯离子渗透性试验;采用 QUANTA 250 型多功能扫描电子显微镜进行扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)测试。

按原状土的含水率(质量分数)57.5%配制试验用土。水泥土的质量分数为 15%;水泥浆的水灰比(质量比)为 0.5;玄武岩纤维的质量分数分别为 0、0.5%、1.0%和 1.5%,对应的水泥土编号分别为 A、B、C 和 D。每个配合比均制作 3 个试样,成型后标准养护 90 d 再进行平行试验,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 渗透性试验

本研究按水压力法确定玄武岩纤维水泥土的渗透系数 k (单位: cm/s),即

$$k = \frac{100Q\gamma_w h}{pSt} \quad (1)$$

其中, t 为时间间隔(单位: s); Q 为 t 时间段内的渗水量(单位: cm³); S 为试样中部的截面积(单位: cm²); p 为渗透压力(单位: MPa); h 为试样高度(单位: cm); γ_w 为水的重度,本研究取 0.009 8 N/cm³。

利用式(1),可得到各玄武岩纤维掺量下水泥土的渗透系数,如图 1。

由图 1 可知,随着玄武岩纤维质量分数的增加,水泥土的渗透系数逐渐降低,抗渗性能逐渐增强。当玄武岩纤维质量分数分别为 0.5%、1.0%和 1.5%时,水泥土的渗透系数相对未掺玄武岩纤维的渗透系数分别降低了 23.88%、38.69%和 48.6%。而玄武岩纤维质量分数从 0 增至 0.5%时,

图1 渗透系数随玄武岩纤维质量分数的变化

Fig. 1 Permeability coefficient versus the mass fraction of basalt fiber

水泥土的渗透系数降低了23.88%；从0.5%增至1.0%时，渗透系数降低了19.48%；从1.0%增至1.5%时，渗透系数降低了16.17%。这表明随着纤维质量分数的增加，水泥土渗透系数的下降呈减缓趋势。

由于玄武岩纤维的掺入会降低水泥土早期的收缩量，而后期的硬化干缩量也会因为纤维的保水性而减少，因此，掺入玄武岩纤维后水泥土的内部裂缝减少，孔隙率降低，提高了水泥土的密实度。不仅如此，玄武岩纤维还能阻挡裂缝的扩展，避免形成连通的裂缝，减少渗流通道的形成，同时纤维能阻隔基体内部水的流动。由此表明，玄武岩纤维能够提高水泥土的抗渗性能。然而，水泥土中掺入玄武岩纤维也存在不利的影响因素：①若纤维掺量较大，其暴露在试样外的可能性就大，不利于水泥土的抗渗性能；②随着玄武岩纤维掺量的增加，纤维与土颗粒的接触面增大，易产生孔隙，同时纤维增多有可能发生结团现象，使水泥土产生更多的孔隙或裂隙，降低了纤维与水泥土间的黏聚力，从而使纤维对水泥土抗渗性能的增强作用有所减弱。

综上所述，随着玄武岩纤维掺量增加，水泥土的渗透系数降低，即水泥土的抗渗性能增强。结合文献[22-25]对玄武岩纤维水泥土力学性能的研究，力学性能并不会无限增强，增强幅度会随着质量分数的增加而持续降低，当纤维质量分数大于1.0%时，性能增长幅度将明显降低，力学性能较优的玄武岩纤维质量分数介于1.0%~1.5%之间。本研究玄武岩纤维的较优质量分数取1.5%。

2.2 抗氯离子渗透性试验

本研究采用快速法中的电通量法对水泥土进行抗氯离子渗透性试验。由于玄武岩纤维具有耐高温、耐腐蚀和绝缘性好的特性，故氯离子对纤维的影响可以忽略不计。本试验所用仪器为全自动的电通量测定仪，试样电通量值的计算以及换算都由仪器自动完成。电通量值随玄武岩纤维质量分数的变化如图2。

图2 电通量值随玄武岩纤维质量分数的变化

Fig. 2 Electric flux versus the content of basalt fiber

由图2可见，随着玄武岩纤维质量分数的增加，水泥土的电通量值不断减小。因此，玄武岩纤维对水泥土的抗渗性能具有增强作用。当玄武岩纤维质量分数分别为0.5%、1.0%和1.5%时，水泥土的电通量值相对未掺玄武岩纤维的电通量值分别减少了10.15%、17.71%和23.06%。而当玄武岩纤维质量分数从0增至0.5%时，电通量值降低了10.15%；从0.5%增至1.0%时，电通量值降低了8.42%；从1.0%增至1.5%时，电通量值降低了6.50%。由此表明，随着纤维质量分数的增大，水泥土的电通量值的下降幅度减小，即水泥土抗渗性能的增强效果有所减缓。

综上所述，抗氯离子渗透性试验中玄武岩纤维对水泥土渗透性的影响效果与水压力法试验结果基本一致。

2.3 扫描电镜测试

微观形貌分析是研究水泥土的重要方法，通过水泥土的扫描电镜试验，不仅能实现以宏观和微观相结合的方式来说明试验现象，而且能从本质出发，提出对改善玄武岩纤维水泥土抗渗性能更加有利的方法。本研究通过扫描电镜，观察不同玄武岩

纤维掺量水泥土颗粒的孔隙大小、数量、连通性以及纤维与颗粒间的胶结情况,从微观形貌及孔隙特征的角度对玄武岩纤维水泥土的强度及渗透性能进行定性分析.不同试样的扫描电镜形貌图如图 3,其中亮色为颗粒,黑色为孔隙.

从图 3 可以看出,随着玄武岩纤维质量分数的增加,水泥土颗粒间的孔隙直径和数量都减小.玄武岩纤维增强水泥土抗渗性能的原因主要有:

1) 玄武岩纤维的掺入填充了部分土颗粒间的孔隙,使水泥土的孔隙减少,结构变得更致密,起到阻断液体渗流途径的作用,提高了水泥土的抗渗

性能.

2) 玄武岩纤维具有良好韧性,而水泥的结晶物会将纤维表面包裹,犹如在纤维外形成了一层坚硬的外壳,提高了纤维的刚度,使纤维能够起到传递力的作用,从而达到增强水泥土性能的效果.

3) 水泥的水化晶体具有较高的黏结力,它不仅能将玄武岩纤维与土颗粒很好的联结起来,提高了筋-土接触面间的黏结力,而且纤维表面的晶体与孔隙中的晶体也会相互联结起来,使玄武岩纤维、水泥和土颗粒形成一个稳定的整体.

图 3 试样的扫描电镜图片

Fig. 3 Scanning electron microscope pictures of samples

3 结 论

1) 随着玄武岩纤维质量分数的增加,水泥土的渗透系数降低,水泥土的抗渗性能增强,但同时纤维的增多也会导致纤维与土颗粒间的孔隙增多,

且纤维可能会发生结团现象,使得水泥土中的原生裂缝增多.因此水泥土的抗渗性能不会随着纤维的增加而无限增强,而是会呈现出减缓的趋势.

2) 随着玄武岩纤维质量分数的增加,通过水泥土的总电通量值降低,说明水泥土的抗氯离子渗透性能增强,但是增强的幅度会随着质量分数的增

加而有所减弱。

3) 通过扫描电镜测试发现,玄武岩纤维的掺入不仅会使得水泥土的孔隙减少,结构变得更致密,还能将离散的土颗粒有效地联结起来,增强了纤维与土颗粒间的黏结力,使得玄武岩纤维、土颗粒和水泥形成一个更稳定的整体。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41861134011);福建省自然科学基金资助项目(2019J01883)

作者简介:陈 峰(1980—),福建江夏学院教授。研究方向:混凝土性能。E-mail: cfxfh@fzu.edu.cn

引 文:陈 峰,童生豪,任健华,等.玄武岩纤维水泥土的抗渗性能研究[J].深圳大学学报理工版,2021,38(2):157-162.

参考文献 / References:

- [1] 陶高梁,吴小康,杨秀华,等.水泥土的孔隙分布及其对渗透性的影响[J].工程地质学报,2018,26(5):1243-1249.
TAO Gaoliang, WU Xiaokang, YANG Xiuhua, et al. Pore distribution of cement-soil and its effect on permeability [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1243-1249. (in Chinese)
- [2] LIU C, STARCHER R D. Effects of curing conditions on unconfined compressive strength of cement-and cement-fiber-improved soft soils [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(8): 1134-1141.
- [3] 杨俊杰,孙 涛,张玥宸,等.腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究[J].岩土工程学报,2012,34(1):130-138.
YANG Junjie, SUN Tao, ZHANG Yuechen, et al. Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 130-138. (in Chinese)
- [4] NARLOCH P, WOYCIECHOWSKI P, KOTOWSKI J, et al. The effect of soil mineral composition on the compressive strength of cement stabilized rammed earth [J]. Materials, 2020, 13(2): 324-330.
- [5] MO Y, PANG J, HUANG J. Dynamic mechanical properties and fractal characteristics of polypropylene fiber-reinforced cement soil under impact loading [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 19: 1-14.
- [6] MANITA D, ASHIM K D. Use of soil-cement bed to improve bearing capacity of stone columns [J]. 2020, 20(6): 6020008.
- [7] 侯永峰,龚晓南.水泥土的渗透特性[J].浙江大学学报工学版,2000,34(2):77-81.
HOU Yongfeng, GONG Xiaonan. Permeability characteristics of soil-cement [J]. Journal of Zhejiang University Engineering Science, 2000, 34(2): 77-81. (in Chinese)
- [8] 朱崇辉,王增红.水泥土渗透系数变化规律试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(7):59-63.
ZHU Chonghui, WANG Zenghong. Experimental research on the variation regularity of permeability coefficient of cement soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(7): 59-63. (in Chinese)
- [9] 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(增刊2):1192-1196.
ZHANG Lei, WANG Xiaoxue, YE Yong, et al. Study on anti-permeability performance of soil-cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Suppl. 2): 1192-1196. (in Chinese)
- [10] 王鹏云,杨永亮,王林浩,等.偏高岭土对水泥土强度及渗透系数的影响[J].科学技术与工程,2018,18(10):112-116.
WANG Pengyun, YANG Yongliang, WANG Linhao, et al. Influence of metakaolin on strength and permeability coefficient of cement soil [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(10): 112-116. (in Chinese)
- [11] 焦德才,杨俊杰,董猛荣,等.水泥土的长期渗透特性研究[J].中国海洋大学学报自然科学版,2021,51(2):112-118.
JIAO Decai, YANG Junjie, DONG Mengrong, et al. Long-term permeability characteristics of cement soil [J]. Periodical of Ocean University of China Natural Science, 2021, 51(2): 112-118. (in Chinese)
- [12] 焦德才,杨俊杰,董猛荣,等.劣化对水泥土渗透性影响室内试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(增刊2):97-100.
JIAO Decai, YANG Junjie, DONG Mengrong, et al. Laboratory tests on effect of deterioration on permeability of cement soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Suppl. 2): 97-100. (in Chinese)
- [13] 陈四利,杨雨林,周 辉,等.污水环境对水泥土渗透性能影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(11):3047-3054.
CHEN Sili, YANG Yulin, ZHOU Hui, et al. Effect of sewage environment on permeability of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3047-3054. (in Chinese)
- [14] 陈四利,李 锋,侯 芮,等.温度变化对水泥土渗透特性影响试验[J].沈阳工业大学学报,2020,42(4):453-458.
CHEN Sili, LI Feng, HOU Rui, et al. Tests on influence

- of temperature variation on permeability of cemented soil [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2020, 42(4): 453-458. (in Chinese)
- [15] 吴依涵, 陈四利. 水泥土挡墙渗透系数对基坑渗流的影响[J]. *低温建筑技术*, 2015, 37(2): 70-72.
WU Yihan, CHEN Sili. Influence of permeability coefficient of cement soil retaining wall on seepage of foundation pit [J]. *Journal of Low Temperature Building Technology*, 2015, 37(2): 70-72. (in Chinese)
- [16] CHEN Huie, CHEN Zongfang, ZHENG Chuanfeng, et al. Damage evolution process of cement-stabilized soil based on deformation and microstructure analysis [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(1): 64-71.
- [17] KUNITO T, HONDA A, MASHIMA M, et al. A study on the relationship between pore structure and coefficient of permeability of soil stabilized with cement [J]. *MRS Proceedings*, 1988, 137: 457.
- [18] 郑晓培. 水泥土的渗透性及其计算模型[D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHENG Xiaopei. Cement soil permeability and its calculation model [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [19] DYLMAR P D, CLEIO T. Fracture toughness of geo polymeric concretes reinforced with basalt fibers [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005, 27(1): 49-54.
- [20] 马芹永, 高常辉. 玄武岩纤维和砂对水泥土微观结构及拉压强度的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(1): 148-159.
MA Qinyong, GAO Changhui. Effects of basalt fiber and sand on the microstructure and tensile and compressive strength of cement-soil [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(1): 148-159. (in Chinese)
- [21] 徐丽娜, 牛 雷, 张 颖, 等. 冻融循环作用下玄武岩纤维水泥土力学性质研究[J]. *工业建筑*, 2020, 50(3): 109-113.
XU Lina, NIU Lei, ZHANG Ying, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical proper ties of fiber-reinforced cemented soil [J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(3): 109-113. (in Chinese)
- [22] 陈 峰, 简文彬. 玄武岩纤维水泥土三轴试验研究[J]. *兰州大学学报自然科学版*, 2016, 52(6): 741-745.
CHEN Feng, JIAN Wenbin. Experiment on triaxial test of basalt fiber cement-soil [J]. *Journal of Lanzhou University Natural Sciences*, 2016, 52(6): 741-745. (in Chinese)
- [23] 陈 峰. 玄武岩纤维水泥土抗拉性能试验研究[J]. *深圳大学学报理工版*, 2016, 33(2): 188-193.
CHEN Feng. Experiment research on tensile strength of basalt fiber cement-soil [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2016, 33(2): 188-193. (in Chinese)
- [24] 陈 峰. 早龄期玄武岩纤维水泥土的强度及变形特性[J]. *深圳大学学报理工版*, 2017, 34(6): 611-617.
CHEN Feng. Strength and deformation characteristics of basalt fiber cement-soil at early age [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2017, 34(6): 611-617. (in Chinese)
- [25] ZIELIŃSKI K, OLSZEWSKI P. The impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar [J]. *Betonwerk Und Fertigteil Technik/Concrete Precasting Plant & Technology*, 2005, 71(3): 28-33.

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】