

水性环氧砂浆与混凝土界面剪切性能试验研究

张雷^{1,2}, 黄飞亚^{1,3}, 张英豪^{1,2}, 曹建国⁴, 吴安兴⁴, 赛米·艾木都立⁴, 刘东⁵

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

2. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

4. 新疆轮台县长瑞鑫水务有限公司, 新疆 轮台 841600; 5. 河南智河工程技术有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:针对水泥基修补材料与混凝土界面剪切强度没有标准测试方法的问题,设计了一种双L直剪试验装置,该装置能够有效避免弯曲应力的影响,使界面处发生纯剪破坏。采用该装置试验研究了混凝土表面粗糙度、含水率和界面剂类型对砂浆-混凝土界面剪切强度的影响。结果表明:适度的粗糙处理有利于剪切强度的提高,粗糙度过大剪切强度反而降低;混凝土表面含水率越高,界面剪切强度越低,含水率对剪切强度影响显著;使用界面剂能够加强界面过渡区的结构,依据混凝土表面干湿情况选取合适的界面剂有助于黏结界面抗剪性能的提高。

关键词:双L直剪;混凝土;水性环氧砂浆;粗糙度;含水率;界面剂

中图分类号:TV32

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0039-05

Experimental study on shear performance of waterborne epoxy mortar and concrete interface//ZHANG Lei^{1,2}, HUANG Feiya^{1,3}, ZHANG Yinghao^{1,2}, CAO Jianguo⁴, WU Anxing⁴, SAIMI Aimuduli⁴, LIU Dong⁵(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Test and Protection, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Xinjiang Luntai Changruixin Water Affairs Co., Ltd., Luntai 841600, China; 5. Henan Zhihe Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Aiming at the problem that there is no standard test method for the shear strength of cement-based repair material and concrete interface, a double L direct shear test device was designed, which can effectively avoid the influence of bending stress and make pure shear failure at the interface. Based on this test device, the effects of concrete surface roughness, water content and interfacial agent type on the shear strength of mortar-concrete interface were studied. The results show that moderate roughness treatment is conducive to the improvement of shear strength, and the shear strength decreases when the roughness is too large. The higher the surface moisture content of concrete, the lower the interfacial shear strength will be, and the surface moisture content has a significant influence on the shear strength. The use of interfacial agent can strengthen the structure of interface transition zone, and the selection of appropriate interfacial agent according to the dry and wet conditions of concrete surface is helpful to improve the shear performance of the bonding interface.

Key words: double L direct shear; concrete; waterborne epoxy mortar; roughness; moisture content; interface agent

高速含沙水流对过流面的冲磨破坏是水工泄水建筑物常见的危害之一,近70%大型混凝土坝运行过程中存在冲磨破坏现象^[1-3]。近年来,随着混凝土修补加固技术的飞速发展,水性环氧砂浆以其优异的抗冲磨性能^[4]、良好的力学性能和黏结性能^[5],成为重要的修补加固材料之一^[6]。然而,当老混凝土接近完成水化,而新砂浆存在体积收缩时,两者的结合面存在变形协调的问题,在外部荷载和体积收

缩的共同作用下,砂浆-混凝土界面往往由于剪力作用而率先失效^[7-9]。目前,对聚合物改性砂浆与混凝土黏结抗拉强度的研究已有很多^[10-12],但对黏结抗剪强度的研究仍有不足^[13-20]。由于现行规范DL/T 5126—2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》中砂浆-混凝土界面剪切强度测试方法无相关条文规定,而常用的双面剪切、斜剪等^[21-24]试验方法不能使界面处发生纯剪切破坏,故亟待设计一种新的

试验装置开展专项研究。本文以水性环氧砂浆与混凝土黏结界面为对象,采用自制双 L 试验装置重点研究了混凝土表面粗糙度、含水率和界面剂类型对剪切强度的影响,以促进水性环氧砂浆在工程加固修复中的应用。

1 试验装置与材料

1.1 双 L 直剪试验装置设计

双 L 直剪试验装置由 2 块相同的 L 形挡板和 4 块侧板以及固定侧板的 4 组螺栓组成。L 形挡板中部开有工形槽,侧板卡入工形槽中夹住试件,通过螺栓固定侧板,确保试件不会滑落。双 L 直剪试验装置示意图如图 1 所示。

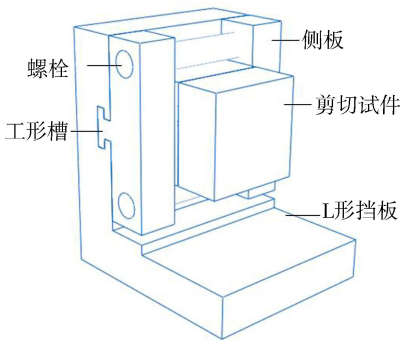


图 1 双 L 直剪装置示意图

双 L 直剪试验装置成品如图 2 所示,装置的上表面受到试验机压力荷载,并通过紧贴混凝土试件的侧面及挡板转化为摩擦力传达到试件表面,使其在剪力作用下发生破坏,试件两侧受到方向相反的剪切摩擦力作用。由于试件上下表面没有受到作用力,因此,试件在破坏过程中不会受到弯剪作用的影响。



图 2 双 L 直剪试验装置成品

1.2 原材料及配合比

参考水工泄水建筑物常用混凝土强度,本文试验中基底混凝土强度等级选用 C40,剪切试验中混凝土基底原材料如下:①诸城市杨春水泥有限公司产 P·O52.5 普通硅酸盐水泥;②细骨料为洁净的中砂,细度模数为 2.3~2.7;③粗骨料为洗净后晾干的碎石,碎石直径为 5~15 mm;④本地自来水。C40 强度等级混凝土 7 d 抗压强度为 31.36 MPa,28

d 抗压强度为 42.52 MPa,水、水泥、砂、石子和高效减水剂的比例为 0.44:1:1.82:2.51:0.008。

水性环氧树脂采用上海汉中化工有限公司产水性环氧树脂体系,分为 A、B 两组分,其中 A 组分为 H123A 环氧树脂,B 组分为 H123B 环氧固化剂。水性环氧树脂乳液由 A、B 两组分和水按照 1:1.3:2.5 配制,乳液掺量为 15%,28 d 抗压强度为 45.46 MPa。

1.3 混凝土表面粗糙度和含水率

混凝土表面依据不同抛光、刷毛处理和 3 种凿毛程度设置 5 种不同的粗糙度,记 5 种粗糙度分别为 $r_1 \sim r_5$,得到相应的灌砂平均深度如表 1 所示。

表 1 不同粗糙程度的灌砂平均深度

粗糙度	混凝土表面处理	灌砂平均深度/mm
r_1	采用砂纸均匀抛光 1 min	0.0274
r_2	钢丝刷轻度按压,均匀刷毛 1 min	0.1139
r_3	凿除表面浮浆,使石子露出大约 10%	0.6086
r_4	中度凿毛,使石子露出大约 30%	1.0410
r_5	重度凿毛,使石子露出大约 50%	1.8751

混凝土表面含水率采用真空干燥法和自然浸泡法配合进行控制^[24],在混凝土表面饱和含水率分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% 时,设置 5 组不同的表面含水率。在混凝土含水率达到相应的目标含水率后将混凝土块从水中取出,擦干表面水分并迅速用保鲜膜包裹密实,确保不与外界发生水分交换,保证质量不发生变化,在室温下静置 3 d 使内部水分扩散均匀,此时混凝土块的含水率即为混凝土表面含水率。记 5 种不同饱和含水率对应的目标含水率分别为 $w_1 \sim w_5$,得到混凝土表面含水率如表 2 所示。

表 2 不同饱和含水率下的混凝土表面含水率

饱和含水率/%	目标含水率	混凝土表面含水率/%
0	w_1 (干基)	0
25	w_2	1.04
50	w_3	2.07
75	w_4	3.11
100	w_5 (饱水)	4.14

1.4 剪切试件制作及界面处理

双 L 直剪试件为 100 mm 立方体试块,首先将养护 28 d 的 100 mm 立方体混凝土从中间切割开,得到 2 个 100 mm×100 mm×50 mm 的混凝土基底备用。为提高水性环氧砂浆与原混凝土的黏结性能,往往需要涂刷界面剂,通过优化选择,分别以水性环氧乳液和与水性环氧砂浆同水灰比的水泥净浆作为界面剂,并与未涂刷界面剂的情况进行对比分析,研究界面剂类型对水性环氧砂浆-混凝土黏结界面剪切强度的影响。混凝土表面经过相应的处理及涂刷界面剂后,以 100 mm×100 mm 的横截面作为黏结面,浇筑 50 mm 厚水性环氧砂浆,自然养护 7 d 后进行双 L 直剪试验。

2 试验结果与分析

2.1 破坏特征

界面过渡区是砂浆-混凝土黏结体系的薄弱区域,剪切试件基本上都从黏结界面处发生破坏。首先在界面底部产生裂缝,随着压力的进一步增大,裂缝迅速向上扩展,最终贯穿整个界面造成剪切破坏。混凝土表面粗糙度越大,有越多水泥石及小石子黏结在砂浆表面。使用水性环氧乳液界面剂时,砂浆表面会产生白色环氧乳液薄膜,混凝土表面含水率越高,乳液薄膜面积越大。在饱水状态时,乳液薄膜几乎覆盖整个砂浆表面。不同含水率时混凝土和砂浆表面形态如图3所示。

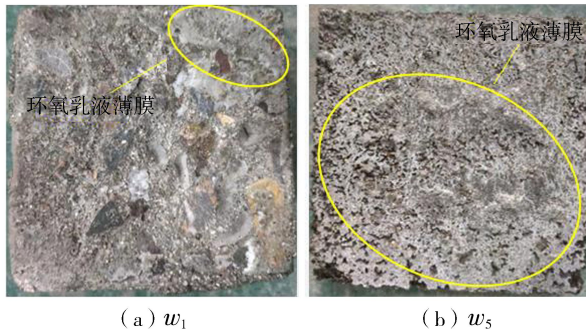


图3 不同含水率时混凝土和砂浆表面

2.2 粗糙度对剪切强度的影响

将经过表面处理的混凝土基底烘干并冷却至室温后涂刷环氧乳液界面剂,通过双L直剪试验,得到混凝土表面5种粗糙度下的界面剪切强度,每组3个试件,取它们的平均值为该组试件的抗剪强度,得到 $r_1 \sim r_5$ 粗糙度下混凝土-水性环氧砂浆的直剪剪切强度分别为1.8574 MPa、2.4658 MPa、2.7626 MPa、3.0197 MPa和2.8413 MPa。

由试验结果可以看出,随着混凝土表面粗糙度的增加,界面剪切强度先增后降。粗糙度低于 r_4 时,随着粗糙度的增加,界面剪切强度也增大。与混凝土表面抛光相比,经过中度凿毛处理使石子裸露大约30%时,界面剪切强度增加了62.58%。随着表面粗糙度进一步提高,剪切强度反而降低,表明粗糙度应有一定的限制,过高的粗糙度并不能带来更高的剪切强度。

水性环氧砂浆与混凝土界面黏结作用力包括黏结力、机械咬合力和化学作用力。其中,砂浆-混凝土界面剪切性能主要依靠机械咬合力。混凝土表面粗糙度对界面剪切强度的影响可以从以下两方面分析:一方面,混凝土表面进行粗糙处理后,与水性环氧砂浆的有效接触面积增大,相应增加了界面黏结面积,提高了砂浆-混凝土界面的黏结力;另一方面,由于混凝土表面粗糙度的增加,水性环氧砂浆与混凝土相互交错、互相

嵌入,形成类似于机械齿轮之间的咬合作用,极大地提高了界面处机械咬合力,使得界面剪切强度大幅提高。因此,粗糙度低于 r_4 时,随着粗糙度增加,砂浆与混凝土之间黏结力和机械咬合力均增大,造成界面剪切强度增大。当在混凝土表面重度凿毛使石子裸露大约50%时,界面剪切强度降低,其原因可能是凿毛过程造成了较多的裂缝、孔隙以及部分粗细骨料松动。

2.3 表面含水率对剪切强度的影响

混凝土表面采取中度凿毛处理并涂刷环氧乳液界面剂后,通过双L直剪试验,得到混凝土目标含水率为 $w_1 \sim w_5$ 的界面剪切强度分别为3.1132 MPa、2.6563 MPa、2.3428 MPa、2.0895 MPa和1.9504 MPa。试验结果表明,混凝土表面含水率与砂浆-混凝土界面剪切强度成反比关系,表面含水率越高,剪切强度越低,且随着表面含水率的升高,剪切强度的降低速度趋缓。造成这种现象的可能原因是:当混凝土表面含水率过高时,会在混凝土表面形成一层水膜,水膜阻止了水性环氧砂浆与基底混凝土的接触,不利于砂浆嵌入混凝土表面裂缝和孔隙以形成机械齿轮咬合作用,造成机械咬合力降低。同时,混凝土表面的孔隙均被水分填满,待水分挥发后,在界面处形成空泡,降低了有效黏结面积,使得修补界面的黏结不够紧密,也造成界面剪切强度下降。

2.4 界面剂类型对剪切强度的影响

依据上文研究结果,采用中度凿毛的表面处理方式,在干基和饱水两种情况下,研究无界面剂、涂刷水性环氧乳液界面剂和与水性环氧砂浆同水灰比的水泥净浆界面剂时砂浆-混凝土界面的剪切强度,试验结果如图4所示。

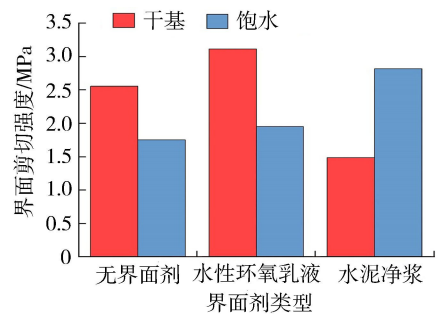


图4 界面剂类型对剪切强度的影响

试验结果表明:水性环氧乳液与混凝土界面剪切强度最大值、最小值均出现在干基状态下,采用水性环氧乳液界面剂时剪切强度最大,为3.1121 MPa;采用水泥净浆界面剂时最小,仅有1.4856 MPa。在无界面剂和使用水性环氧乳液界面剂时,干基时的剪切强度均大于饱水时;使用水泥净浆界面剂时,干基时的剪切强度反而低于饱水时,在干基和饱水情况下的界面剪切强度分别为1.4856 MPa和2.8174 MPa,与

干基相比饱水时剪切强度增幅达到 89.65%, 增长显著。造成这种现象的原因可能是: 混凝土表面饱水时, 在混凝土表面形成了一层水膜, 封闭了混凝土表面的微小孔隙、裂缝, 不利于新拌砂浆与混凝土形成“齿轮”以增大机械咬合力。因此, 在无界面剂和使用水性环氧界面剂时饱水状态下界面剪切强度低于干基。采用与水性环氧砂浆同水灰比的水泥净浆界面剂时, 在干基状态下, 混凝土基底吸收了大量的水分, 不利于界面处水泥的水化, 造成剪切强度显著降低, 部分试块甚至自动脱粘。

不使用界面剂时, 新拌砂浆与老混凝土之间为“硬接触”, 在环氧改性砂浆固化收缩中与老混凝土的变形协调问题比较突出, 黏结界面为整体剪切试件的薄弱环节。界面黏结力主要是机械咬合力和范德华力, 其中机械咬合力起主要作用。此时, 水性环氧砂浆中的粗细骨料不易嵌入混凝土表面的缝隙和孔隙, 不利于机械咬合力的提高。此外, 不采用界面剂会造成黏结界面处出现较多空隙, 降低了有效黏结面积, 使得剪切强度较低。

水性环氧砂浆在填筑过程中, 由于需要插捣密实, 会造成细骨料挤压在界面处与基底混凝土形成“点接触”, 阻碍了水性环氧砂浆与混凝土的接触, 造成“缺浆”现象。“缺浆”使得界面处的水性环氧砂浆出现孔隙, 造成黏结强度降低。使用水性环氧乳液界面剂时, 不仅能够填补混凝土表面缺陷, 增大机械咬合力, 还能够对界面处水性环氧砂浆进行“补浆”, 有利于提高水性环氧砂浆的黏结强度。使用水泥净浆界面剂与使用水性环氧乳液界面剂类似, 可以减少界面过渡区的空隙。水泥净浆能够在界面处生成水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙及钙矾石二次结晶体填充界面过渡区, 使得黏结界面的结构得到加强。在混凝土表面涂刷水泥净浆界面剂后, 水泥水化反应中的化学作用力也有利于界面剪切强度的提高。总之, 界面剂的使用能够使得过渡区更加致密, 改善了水性环氧砂浆与混凝土黏结界面的微观形态。

3 结 论

a. 当混凝土表面粗糙度低于 r_4 , 即混凝土表面经中度凿毛处理使石子露出 30% 以下时, 随着粗糙度的增加, 界面剪切强度增大; 之后粗糙度进一步增加, 界面剪切强度反而降低。

b. 采用环氧乳液界面剂时, 混凝土表面含水率越高, 界面剪切强度越低。混凝土表面湿润时形成的水膜阻碍水性环氧砂浆渗入混凝土表面裂缝和孔隙, 不利于机械咬合力的提高是造成这种现象的可

能原因。

c. 界面剂的使用使界面过渡区的结构更加致密, 有利于剪切强度的提高。干基状态下, 水性环氧乳液界面剂效果最好, 而在混凝土表面饱水时, 与砂浆同水灰比的水泥净浆能提供更优异的抗剪性能。

参考文献:

- [1] 杨春光. 水工混凝土抗冲磨机理及特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006.
- [2] 韩成银, 刘红军, 傅宗甫, 等. 除险加固水闸的消能防冲措施[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 42-46. (HAN Chengyin, LIU Hongjun, FU Zongfu, et al. Energy dissipation and scour prevention measures of reinforced sluices [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 42-46. (in Chinese))
- [3] 牟献友, 文恒. 废旧轮胎在闸下消能防冲中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 64-66. (MOU Xianyou, WEN Heng. Application of scrap tires in energy dissipation and erosion control under sluice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 64-66. (in Chinese))
- [4] 俞亮, 张雷, 郭家琛. 水性环氧砂浆抗冲磨特性研究[J]. 人民黄河, 2021, 44(1): 1-6. (YU Liang, ZHANG Lei, GUO Jiachen. Study on the abrasion resistance of waterborne epoxy mortar [J]. Yellow River, 2021, 44(1): 1-6. (in Chinese))
- [5] 程红强, 高丹盈, 刘国龙. 改性环氧水泥浆试验设计及其黏结性能[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 57-59. (CHENG Hongqiang, GAO Danying, LIU Guolong. Test design of modified epoxy cement mortar and its application to concrete bonding repair [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1): 57-59. (in Chinese))
- [6] 张振忠, 陈亮, 汪在芹, 等. 水工泄水建筑物抗冲磨材料发展现状[J]. 化工新型材料, 2016, 44(10): 230-232. (ZHANG Zhenzhong, CHEN Liang, WANG Zaiqin, et al. Development status of anti-abrasion materials for hydraulic drainage buildings [J]. New Chemical Materials, 2016, 44(10): 230-232. (in Chinese))
- [7] 田稳苓, 宋昭, 肖成志, 等. 带植筋新老混凝土黏结面剪切试验及有限元模拟分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(23): 127-133. (TIAN Wenling, SONG Zhao, XIAO Chengzhi, et al. Shear test and finite element simulation analysis of bonding interface of new and old concrete with planting bars [J]. Building Structure, 2019, 49(23): 127-133. (in Chinese))
- [8] 李斌, 肖成志, 孙文君. 新老混凝土界面连接形式对其界面剪切作用特性的影响分析[J]. 河北水利电力学院学报, 2019(2): 22-27. (LI Bin, XIAO Chengzhi, SUN

- Wenjun. Effect analysis of new and old concrete connection forms on interface properties under shear action [J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2019(2):22-27. (in Chinese))
- [9] 白鹏翔,倪英荐,蒋睿,等. 基于数字图像相关技术的混凝土剪切破坏实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(36): 105-110. (BAI Pengxiang, NI Yingjian, JIANG Rui, et al. Experimental research of concrete shearing failure based on digital image correlation technology[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(36): 105-110. (in Chinese))
- [10] 刘志伟,张雷,王中林,等. 水性环氧砂浆修复混凝土的黏接界面性能[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 256-261. (LIU Zhiwei, ZHANG Lei, WANG Zhonglin, et al. Bonding interface performance of waterborne epoxy mortar for repairing concrete [J]. Foundation Treatment, 2021, 3(3): 256-261. (in Chinese))
- [11] 彭杰,胡铁刚,单韧,等. 水性环氧改性快速修补砂浆的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(7): 128-130. (PENG Jie, HU Tiegang, SHAN Ren, et al. Research of waterborne epoxy modified rapid repair mortar [J]. New Building Materials, 2021, 48(7): 128-130. (in Chinese))
- [12] 王钰轲,于博文,曹天才,等. 非水反应高聚物-混凝土界面单调剪切特性及本构模拟[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6): 122-131. (WANG Yuke, YU Bowen, CAO Tiancai, et al. Constitutive simulation and interfacial shear characteristics of non-water reaction polymer and concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6): 122-131. (in Chinese))
- [13] 伍敏,黄莉,张小玉,等. FRP-混凝土的颗粒增强界面及其剪切性能研究[J]. 混凝土, 2022(1): 57-60. (WU Min, HUANG Li, ZHANG Xiaoyu, et al. Study on the shear properties of FRP-concrete interface layer with reinforced particles [J]. Concrete, 2022(1): 57-60. (in Chinese))
- [14] 李淑芬,贺晓东. 再生混凝土新旧界面剪切特性研究[J]. 科学技术创新, 2021(12): 153-154. (LI Shufen, HE Xiaodong. Study on shear characteristics of new and old interface of reclaimed concrete [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(12): 153-154. (in Chinese))
- [15] 章凯. 环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能与结构[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(12): 40-42. (ZHANG Kai. Properties and structure of cement mortar modified with epoxy emulsion [J]. New Building Materials, 2012, 39(12): 40-42. (in Chinese))
- [16] 卜良桃,罗兴华. 钢纤维水泥砂浆与老混凝土双面剪切黏结性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(9): 90-94. (BU Liangtao, LUO Xinghua. Two-sided shearing bonding strength of steel fiber cement mortar to old concrete [J]. Industrial Construction, 2009, 39(9): 90-94. (in Chinese))
- [17] 朱海堂,高丹盈,张启明. 钢纤维高强混凝土的劈拉及剪切变形性能[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(6): 5-8. (ZHU Haitang, GAO Danying, ZHANG Qiming. Deformation behavior of steel fiber-reinforced high strength concrete under splitting or shear [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 5-8. (in Chinese))
- [18] 卜良桃,全玥. 高性能水泥复合砂浆与混凝土黏结的剪切性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008(3): 64-67. (BU Liangtao, QUAN Yue. Experimental research on shear properties of adhesion between high performance cement-mortar and concrete [J]. Sichuan Building Science, 2008(3): 64-67. (in Chinese))
- [19] 柯敏勇,金初阳,陈红卫,等. 外贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 29-32. (KE Minyong, JIN Chuyang, CHEN Hongwei, et al. Experimental study on strengthening RC beams with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheets [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 29-32. (in Chinese))
- [20] 王少伟,徐应莉,朱平华,等. 溶蚀作用下混凝土层间劈裂抗拉强度试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 27-32. (WANG Shaowei, XU Yingli, ZHU Pinghua, et al. Experimental study on splitting tensile strength of concrete layer interface under dissolution effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 27-32. (in Chinese))
- [21] MOMAYEZ A, EHSANI M R, RAMEZANIANPOUR A A, et al. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(4): 748-757.
- [22] RAY I, DAVALOS J F, LUO S. Interface evaluations of overlay-concrete bi-layer composites by a direct shear test method [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3): 339-347.
- [23] WALL J S, SHRIVE N G, GAMBLE B R. Testing of bond between fresh and hardened concrete [M]. Boston, M A: Springer, 1986: 335-344.
- [24] 孟繁强. 新旧砂浆黏结性能及水分传输规律试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.

(收稿日期: 2022-02-06 编辑: 骆超)

