DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241379

基于DIC技术的修复后混凝土裂缝扩展特性试验研究

周小燕[1],杨 淘[1],代 薇[1],孙彦梅[1],张芮瑜[1],秦小枫[1],李 阳[2],张 野[2]

(1. 中国长江电力股份有限公司,四川 宜宾 644612;2. 西安理工大学水利水电学院,陕西 西安 710048)

摘要:为探究不同修复材料对预制带裂缝的混凝土试件在劈裂过程中内部裂缝发展的影响,采用数字图像相关技术观测混凝土劈裂过程中内部裂缝发展规律,结合扫描电镜技术从微观角度分析不同修复材料对混凝土裂缝界面的影响。试验结果表明,修复材料处理后的预制带裂缝的混凝土试件劈裂强度明显上升,裂缝宽度和裂缝最大扩展速率均有所降低,其中修复效果依次为丙烯酸>油性聚氨酯>水性聚氨酯>环氧树脂;SEM分析表明,修复材料注射到裂缝后,迅速固化,与水泥水化产物形成连续网状结构和团状堆积物,使修复材料与裂缝界面紧密结合,改善了混凝土的结构密实性。

关键词:混凝土裂缝修复;预制裂缝;修复材料;数字图像相关技术;扫描电镜

中图分类号:TV431^{+}.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)07-0119-04

1 引言

混凝土作为一种广泛使用的建筑材料,在外部环境、变形和各种荷载作用的影响下,混凝土表面或内部可能产生裂缝。裂缝会对混凝土的强度和耐久性造成不利的影响,严重危及结构安全[1-2]。因此,预防和控制混凝土裂缝是确保工程安全的重要措施。目前,关于混凝土修复方面的研究已经取得一些成果。张亚楠等[3]将形状记忆合金(SMA)材料植入混凝土材料中,给出了SMA智能混凝土材料的裂缝修复理论模型,得出了不同尺寸试件的裂缝修复过程和裂缝修复程度;易丹等[4]选用一种可在低温环境下生长的矿化微生物,然后在碱性溶液中研究Ca^{2+}浓度、pH值和钙化速率的变化,揭示了微生物诱导矿化的动态过程;温舒平等[5]研究使用环氧树脂胶粘剂修复混凝土裂缝问题,分析胶粘剂对于混凝土结构力学性能的影响,使用改性环氧树脂修复混凝土多种形式的裂缝,提升混凝土的性能。目前,混凝土裂缝的修复研究主要集中在修复材料宏观力学和微观裂缝,极少结合数字图像相关技术(DIC)对劈裂作用下不同修复材料混凝土裂缝扩展规律进行研究。因此,本文采用DIC观测混凝土劈裂过程中内部裂缝的发展规律,研究使用四种修复材料处理的混凝土裂缝在劈裂作用下的破坏形态及劈裂强度变化规律。结合扫描电镜技术从微观角度分析不同修复材料对混凝土裂缝界面的影响,以期为混凝土裂缝修复方案提供依据。

2 试验材料与方法

2.1 材料

试验采用的混凝土试件配合比见表1。采用四种修复材料,包括:①改性环氧树脂。127环氧树脂,固化剂环氧基酚基树脂,偶联剂氨丙基三乙氧基硅烷环氧,稀释剂丁基缩水甘油醚;②丙烯酸。丙烯酸盐,交联剂亚甲基二丙烯酰胺,促进剂三氯胺工业级,引发剂过硫酸铵;③水性聚氨酯。水性聚醚多元醇,水性甲苯二异氰酸酯TDI,溶剂选择乙醇,催化剂二胺;④油性聚氨酯。聚醚多元醇,甲苯二异氰酸酯,溶剂二甲苯,增塑剂氯化石蜡。

表1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratio of roller compacted concrete kg/m^3

材料	配合比	材料	配合比	材料	配合比
水	200	砂	700	矿粉	44
水泥	428	小石	525	减水剂	40
粉煤灰	83	中石	525		

收稿日期:2024-07-23,**修回日期**:2024-09-24

基金项目:三峡金沙江川云水电开发有限公司宜宾向家坝电厂资助(合同编码Z422302038);国家自然科学基金项目(52009110)

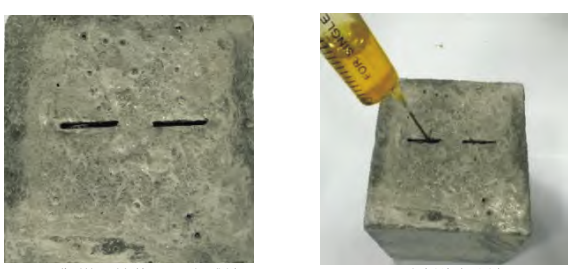
作者简介:周小燕(1987-),女,高级工程师,研究方向为水工结构工程,E-mail:zhou_xiaoyan@ctg.com.cn

通讯作者:李阳(1991-),男,博士、副教授,研究方向为混凝土耐久性能,E-mail:LY1990120311@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

2.2 试件成型

参照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2017[6])制备尺寸为 100 mm 的立方体混凝土试件。按照试验要求,将混凝土拌合物填入塑料模具中,采用插拔法预制两条裂缝长度为 20 mm、宽度为 1 mm 的中心穿透裂缝[7]。在进行混凝土浇筑前,为确保钢片不会与混凝土粘附,从而能够轻松地从混凝土中取出,需要在钢片表面均匀涂抹一层薄薄的润滑剂。在混凝土浇筑完成后的 6～8 h 内,缓慢而小心地将钢片从混凝土中抽出,避免对裂缝表面造成破坏。试件浇筑完成并静置 24 h 后拆模,在标准养护室(20±5)℃中分别养护至 28 d。用注射器将环氧树脂、丙烯酸、水性和油性聚氨酯修复材料注入裂缝中,室温固化 72 h,然后进行性能试验,图 1 为带裂缝的混凝土试件和注射修复材料示意图。



(a) 预制带裂缝的混凝土试件 (b) 注射修复材料

图 1 预制带裂缝的混凝土试件与注射修复材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of precast concrete specimens with cracks and injection repair materials

2.3 DIC 劈裂试验

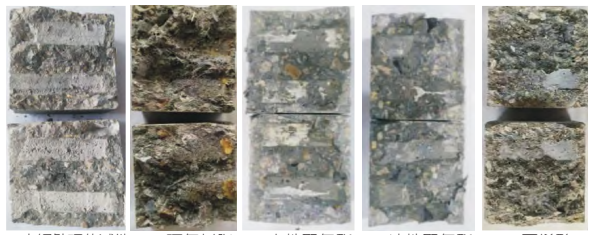
根据《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2017)[6]使用电液伺服压力试验机(YAW-5000),对不同修复材料处理的试件进行劈裂试验,记录劈裂破坏形态和劈裂强度。在进行劈裂试验过程中,使用 DIC 测试分析系统采集试件表面的应变,并计算得到预制裂缝试件内部裂缝的扩展宽度和速率[8]。

具体 DIC 劈裂试验步骤如下:①将试件准确放置在压力机的预定位置,确保试件中心与垫条保持水平。正对试件安装高速相机,并调整好焦距及补光设备,以便能够清晰地捕捉到试件的散斑图像区域。②进行初步加载,使垫条与承压板之间达到密合状态。③开始对试件进行加载,并同步启动数字图像相关技术。④利用高速相机,详细捕捉裂缝的扩展情况和试件的破坏过程。

3 结果与分析

3.1 劈裂破坏形态

图 2 为不同修复材料处理的试件劈裂破坏形态。由图 2(a)可知,未经修复材料处理的试件内部劈裂破坏面比较平整,同时存在大量的孔隙。由图 2(b)～(d)可知,试件内部的劈裂破坏面比较粗糙,在修复材料的作用下试件劈裂破坏时内部裂缝处裸露出大量的修复材料和少量的孔隙。其中图 2(e)丙烯酸处理后的表面最为粗糙,内部裂缝界面处粘结有大量骨料,裸露出少量的丙烯酸材料。原因是修复材料注射到预制带裂缝的混凝土试件中,形成团状堆积物迅速充满裂缝和裂缝周围的孔隙,与混凝土裂缝界面形成较强的机械咬合力,使修复材料与混凝土裂缝界面紧密结合,增强其粘结能力和摩擦能力,有效地修复了混凝土裂缝。



(a)未经处理的试件 (b) 环氧树脂 (c) 水性聚氨酯 (d) 油性聚氨酯 (e) 丙烯酸

图 2 不同修复材料处理的试件劈裂破坏形态

Fig. 2 Splitting failure modes of specimens treated with different repair materials

3.2 劈裂强度

根据图 3 不同修复材料处理后试件劈裂过程中的荷载位移曲线,将试件劈裂的内部裂缝发展分为Ⅰ(初始)、Ⅱ(萌生)、Ⅲ(扩展)和Ⅳ(贯通)四个阶段。在初始阶段,荷载位移曲线上升速率均较慢。在萌生阶段,荷载位移曲线呈指数快速增加,直至荷载达到最大值,其中丙烯酸处理后的试件荷载值最大,为 30.8 kN。在扩展阶段,荷载位移曲线开始下降,此时的裂缝快速形成,其中丙烯酸处理后的试件荷载位移曲线下降最快。在贯通阶段,荷载位移曲线下降速率逐渐减小最终趋于零,未经处理的试件相较于修复材料处理后的试

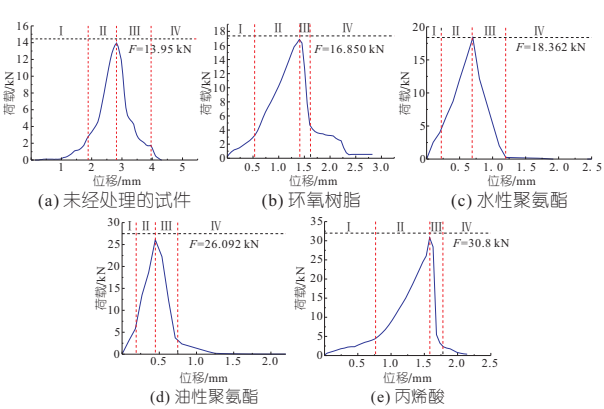


图 3 劈裂过程中的荷载位移曲线

Fig. 3 Load displacement curves during the splitting process of specimens treated with different repair materials

中国知网 https://www.cnki.net

件和荷载下降速率变快,此时裂缝已经贯通试件。

图 4 为不同修复材料处理后的劈裂强度与增长速率。与未经处理的试件相比较,修复材料处理后的试件劈裂强度明显增加,其中丙烯酸的劈裂强度增加了 126.64%,效果最明显。其次是油性聚氨酯、水性聚氨酯和环氧树脂,劈裂强度分别增加了 91.99%、35.09%、23.99%。造成这样的原因是修复材料通过与混凝土裂缝界面紧密结合,使得混凝土的内部结构变得更为致密,增加了裂缝界面处的粗糙度和粘结强度,从而增强了混凝土的劈裂强度。

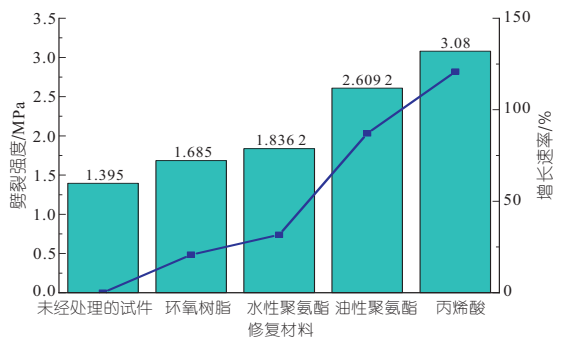


图 4　不同修复材料处理后试件的劈裂强度与增长速率

Fig. 4　Splitting strength and growth rate of specimens treated with different repair materials

3.3　DIC 分析

在Ⅰ～Ⅳ四个阶段开裂裂缝的起始位置,沿水平方向连续取点,结合 DIC 计算得出各点的横向位移。图 5、6 为劈裂过程应变云图和各点的横向位移。结合图 5、6 可知,在初始阶段时,沿水平方向各点的横向位移几乎没有变化,此时的裂缝还未产生。萌生阶段时,应变云图中可以看出未经处理的试件裂缝开始萌生,未经处理的试件横

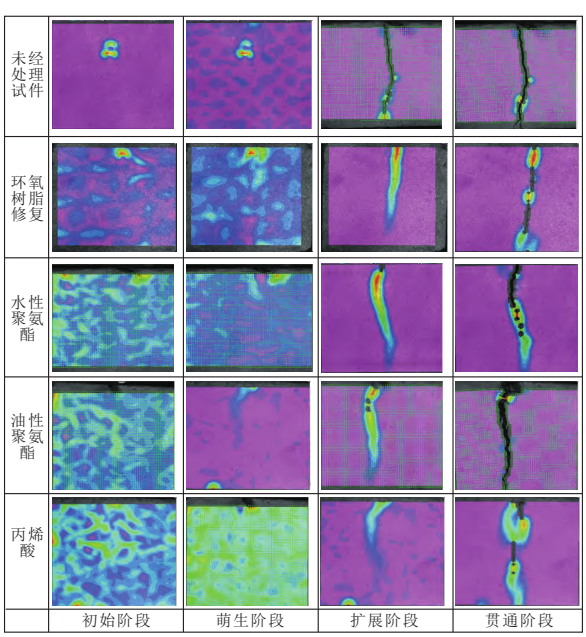


图 5　劈裂过程应变云图

Fig. 5　Strain cloud map during splitting process

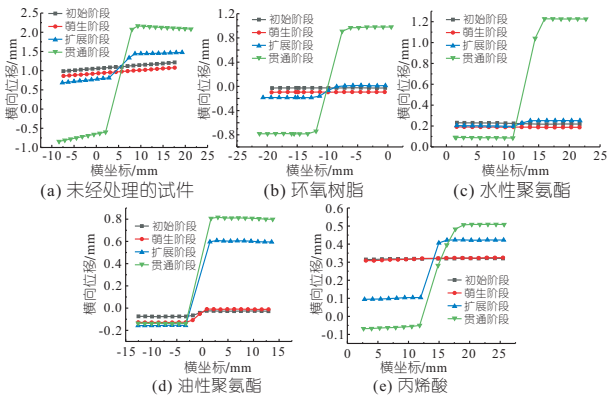


图 6　劈裂过程中各点的水平位移

Fig. 6　Horizontal displacement of each point during the splitting process

向位移差明显。在扩展阶段时,裂缝明显出现,且横向位移差均迅速变大。在贯通阶段时,裂缝已经完全形成,横向位移差值达到最大,由图 6 可知,丙烯酸的横向位移差最小,效果最佳。在贯通阶段,环氧树脂、水性聚氨酯、油性聚氨酯和丙烯酸距离劈裂断裂面最近两点的横向位移差相较于未经处理的试件,分别减少了 0.604、1.257 6、1.453、1.784 mm。试件通过修复材料处理后,能够延缓裂缝的发展。

3.4　裂缝分析

在裂缝发展的起始和萌生阶段,由于裂缝宽度和扩展速度的变化不明显,因此可以采用 2 s/张来计算裂缝开口宽度。在扩展和贯通阶段,裂缝宽度和裂缝扩展速率变化快,改为 0.1 s/张的取样间隔记录,以此来分析裂缝开口宽度的变化及裂缝扩展速度的规律性。如图 7 所示,在试件计算区域内的破坏裂缝上选取 ab,cd,ef 三条截线,以照片取样间隔代替时间,绘制裂缝开口宽度随时间变化图和裂缝扩展速率图。

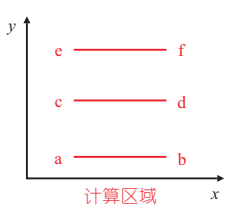
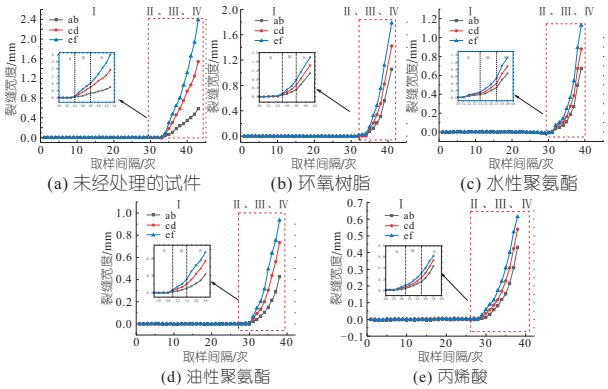


图 7　DIC 计算区域与截线位置

Fig. 7　DIC calculation area and section line position

图 8 为不同修复材料处理后试件劈裂时的裂缝宽度变化。在初始阶段时,裂缝宽度几乎无变化。随着荷载的增加,在萌生阶段时,裂缝宽度缓慢上升,此时出现轻微裂缝。在扩展阶段时,裂缝宽度快速增加,试件明显出现裂缝。达到贯通阶段时,随着裂缝宽度逐渐增加,此时的试件已经完全破坏,以贯通阶段结束时截线测得的裂缝宽度为最大裂缝宽度。在每个阶段中,修复材料处理

中国知网　https://www.cnki.net



(a) 未经处理的试件 (b) 环氧树脂 (c) 水性聚氨酯

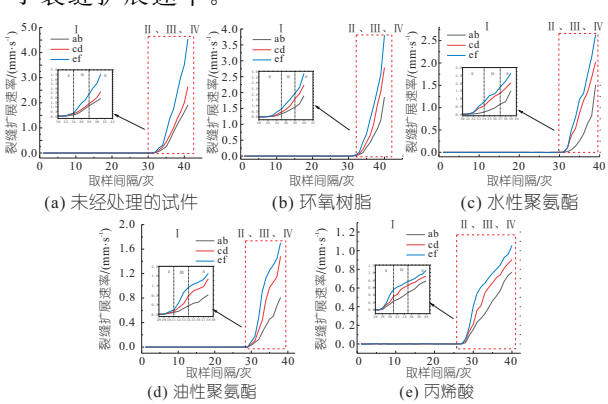
(d) 油性聚氨酯 (e) 丙烯酸

图 8 不同修复材料处理后试件劈裂时的裂缝宽度变化

Fig. 8 Changes in crack width during specimen splitting after treatment with different repair materials

后的试件裂缝宽度均有所降低，其中丙烯酸处理后的试件裂缝宽度最低，相较于未经处理的试件裂缝宽度降低了 73.87%。

图 9 为不同修复材料处理后试件劈裂时的裂缝扩展速率。裂缝的扩展总是先以接近于 0 的扩展速度开始，并持续一段时间，然后出现轻微波动，经过短暂上升后迅速增大。这是由于在萌生阶段，受劈裂荷载试件发生变形但裂缝并未产生；在萌生阶段，裂缝开始产生，并出现轻微裂缝。当裂缝出现后，在持续荷载下，裂缝宽度将迅速扩展并形成贯通裂缝。扩展阶段，裂缝扩展速度明显升高。贯通阶段，裂缝扩展速率数值出现陡增现象，以贯通阶段中速率最大值作为裂缝最大扩展速率。经修复材料处理后的试件裂缝扩展速率均小于未修复的试件，其中丙烯酸处理后的试件裂缝最大扩展速率最低，相较于未经处理的试件最大扩展速率降低了 76.65%。原因主要是修复材料嵌入到混凝土裂缝中，增加了机械摩擦力，减缓了裂缝扩展速率。



(a) 未经处理的试件 (b) 环氧树脂 (c) 水性聚氨酯

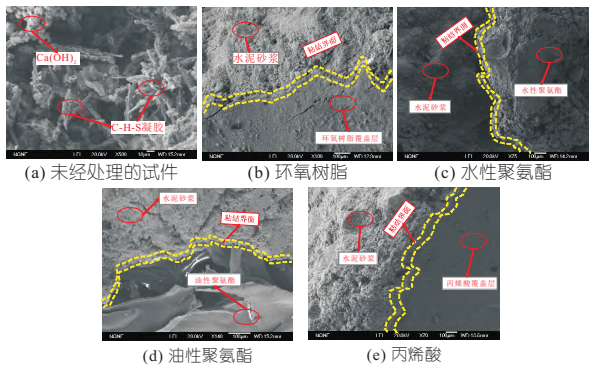
(d) 油性聚氨酯 (e) 丙烯酸

图 9 不同修复材料处理后试件劈裂时的裂缝扩展速率

Fig. 9 Crack propagation rate during splitting of specimens treated with different repair materials

3.5 SEM 分析

图 10 为混凝土与不同修复材料界面处的微观形态。由图 10(a)可知，未经修复材料处理的



(a) 未经处理的试件 (b) 环氧树脂 (c) 水性聚氨酯

(d) 油性聚氨酯 (e) 丙烯酸

图 10 混凝土与不同修复材料界面处的微观形态

Fig. 10 Microscopic morphology at the interface between concrete and different repair materials

混凝土主要是水化产物氢氧化钙和 C-S-H 凝胶。C-S-H 凝胶呈细小的针状和片状晶体，分布在裂缝和孔洞周围。氢氧化钙呈层状晶体，表面形态松散，结构之间存在着大量裂缝和孔隙。

由图 10(b)～(d)可知，环氧树脂渗入到裂缝表面粗糙凹陷处，填充孔隙，形成光滑的表面，但存在少量裂纹。水性聚氨酯呈现泡沫状覆盖在砂浆内部裂纹处，形成了相互交织的连续网状结构，与水泥的水化产物紧密结合填充砂浆内部孔隙。由于其结构中仍存在大量细小孔隙，在一定程度上削弱了修复后混凝土结构的致密性。油性聚氨酯充满裂缝与孔隙，加入之后明显改善了混凝土结构，使砂浆裂缝变窄，结构逐渐变得密实。由图 10(e)可知，丙烯酸注入混凝土裂缝后，因为其流动性好，能够有效流到混凝土裂缝深处，并且在固化后与混凝土表面的微观结构紧密结合，形成良好的附着力，能够加强混凝土的整体性，减少结构内部的空隙和降低孔隙率。四种修复材料均在一定程度上改善了混凝土的结构密实性，其中丙烯酸与混凝土裂缝界面结合最为紧密，迅速填充使得骨料之间的机械咬合力增大。与宏观测量得到的劈裂强度、裂缝宽度和裂缝扩展速度规律一致，丙烯酸效果最佳。

4 结论

a. 修复材料处理带裂缝的试件后劈裂强度增加，修复效果依次为丙烯酸＞油性聚氨酯＞水性聚氨酯＞环氧树脂。

b. 丙烯酸修复材料修复后的试件裂缝宽度和扩展速率最低，相较于未经处理的试件分别降低了 73.87%、76.65%。

c. 修复材料通过与水泥水化产物形成连续网状结构和团状堆积物，使修复材料与裂缝界面紧密结合，增加了混凝土结构密实性。

（下转第 68 页）

中国知网 https://www.cnki.net

[4] WANG W J, HUAI W X, THOMPSON S, et al. Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation[J]. Water resources research, 2015, 51(12): 10 047-10 064.
[5] GAO X P, LV J Z, SUN B W, et al. Effects of bed permeability on the hydrodynamic characteristics in a channel with a vegetation patch: A modeling study [J]. Journal of hydrology, 2022, 612: 128046.
[6] BEBINA DEVI T, SHARMA A, KUMAR B. Flow characteristics in a partly vegetated channel with emergent vegetation and seepage [J]. Eco-hydrology & hydrobiology, 2019, 19(1): 93-108.
[7] 王伟杰. 明渠植被水流流速分布解析解与阻力特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.

Hydrodynamic Features of Vegetated Permeable Riverbed

ZHENG Cai-ling[1,2], WANG Wei-jie[2], DONG Fei[2], XU Ming-yang[1,2], ZHAO Zhen[1,2], JIA Feng-cong[3]
(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the hydrodynamic characteristics of vegetated permeable riverbeds, a vegetation resistance coefficient equation under seepage conditions was established based on the Saint-Venant equations. Rigid vegetation was simulated using cylindrical aluminum rods, and indoor flume experiments were conducted to analyze the flow structure characteristics and resistance features of emergent rigid vegetation under varying densities and seepage intensities. The results demonstrate that seepage intensity significantly influences the flow resistance coefficient in vegetated zones. Under varying seepage intensities, the longitudinal variation of roughness coefficient n exhibited three distinct trends: continuous decrease, initial increase followed by decrease, and initial decrease followed by increase. Notably, the roughness n values at the downstream end of vegetated zone converged within the range of 0.15-0.17. The research results provide valuable references for ecological restoration and engineering applications related to riverbed and riparian environments.

Key words: permeable riverbed; drag coefficient; vegetated flow; Saint-Venant equations; roughness

(上接第 122 页)

参考文献:

[1] 穆黎明. 五种外加剂对混凝土早期开裂性能的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 132-134.
[2] 张翔, 田正宏, 张闻起, 等. 混凝土早龄期收缩开裂细观力学机理研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(2): 57-61.
[3] 张亚楠, 李军超, 王庆菲, 等. SMA 智能混凝土材料裂缝监测与修复机理和试验研究[J]. 固体力学学报, 2020, 41(2): 170-181.
[4] 易丹, 杨国军. 低温微生物诱导碳酸钙沉积及其在混凝土裂缝修复中的应用研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(3): 959-968.
[5] 温舒平, 任朝纲, 肖瑶, 等. 环氧树脂胶粘剂对混凝土裂缝修复性能的影响研究[J]. 粘接, 2024, 51(1): 32-35.
[6] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
[7] 李锺奥, 陆春华, 成亮, 等. 扩散法用于微生物矿化修复混凝土竖向裂缝的试验研究[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 125-130.
[8] 罗滔, 李骄洋, 张天祺, 等. 基于 DIC 技术的自密实混凝土界面裂缝扩展规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1): 143-153.

Experimental Study on Crack Propagation Characteristics of Repaired Concrete Based on DIC Technology

ZHOU Xiao-yan[1], YANG Tao[1], DAI Wei[1], SUN Yan-mei[1], ZHANG Rui-yu[1], QIN Xiao-feng[1], LI Yang[2], ZHANG Ye[2]
(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yibin 644612, China; 2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to investigate the impact of different repair materials on the development of internal cracks in precast concrete specimens with cracks during the splitting process, this study used digital image correlation technology to observe the development law of internal cracks in concrete splitting process, and combined with scanning electron microscopy technology to analyze the impact of different repair materials on the interface of concrete cracks from a microscopic perspective. The experimental results show that the splitting strength of precast concrete specimens with cracks treated with repair materials significantly increases, while the crack width and maximum crack propagation rate decrease. The repair effect is in the order of acrylic acid>oil-based polyurethane>water-based polyurethane>epoxy resin; The SEM analysis revealed that after the repair materials were injected into the cracks, they quickly solidified and formed continuous network structures and clustered deposits with the cement hydration products. This led to a tight bond between the repair materials and the crack interfaces, enhancing the compactness of the concrete structure.

Key words: concrete crack repair; prefabricated cracks; repair materials; digital image related technologies; scanning electron microscope

中国知网 https://www.cnki.net