



水工混凝土修复用纤维增强砂浆 粘结和耐久性能试验研究*

黄珊珊, 张伟伟, 李晓宇

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对水工混凝土长期处于特殊环境的表面损坏特点, 分别采用掺量为 0.6、1.6、2.6 kg/m³ 的聚丙烯纤维和玄武岩纤维配制了用于修复其外表面的增强砂浆, 进行纤维增强砂浆的粘结性能和抗冲磨、抗渗及抗冻性等耐久性能的试验研究。研究表明, 加入纤维能明显提高砂浆与老砂浆间的粘结强度, 与砂浆空白样相比, 聚丙烯和玄武岩纤维增强砂浆的 28 d 新老砂浆粘结强度分别提高了 16.60%~28.80% 和 10.60%~21.40%。加入纤维也极大地改善了砂浆的抗冲磨、抗渗及抗冻性等各项耐久性能, 与砂浆空白样相比, 最高纤维掺量下的聚丙烯和玄武岩纤维增强砂浆的抗冲磨强度分别提高了 77.30% 和 38.65%。现场拉拔试验结果表明, 聚丙烯和玄武岩纤维砂浆具有良好的抗拉拔性能, 且未增强成本, 因此, 可用于水工混凝土修复。

关键词: 水工混凝土修复; 纤维增强砂浆; 粘结强度; 耐久性能; 现场拉拔试验

中图分类号: U 657.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0057-05

Experimental study on the bond strength and durability properties of fiber reinforced mortar for repairing hydraulic concrete

HUANG Shan-shan, ZHANG Wei-wei, LI Xiao-yu

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Hydraulic concrete structures underlie particular conditions all year round, so they have suffered from severe degradation. Contents of 0.6, 1.6 and 2.6 kg/m³ polypropylene fiber (PP fiber) and basalt fiber (BF) were added to the plain mortar (M0) respectively to prepare repair materials for hydraulic structures surfaces. The bond strength, abrasion resistance, water permeability and freeze-thaw resistance were tested and analyzed. Test results indicate that the addition of fiber improves the bond strength of mortar significantly. Compared with M0, the bond strength of PP fiber and BF reinforced mortar presents an increase of 16.60%~28.80% and 10.60%~21.40% respectively. Besides, the abrasion resistance, water permeability and freeze-thaw resistance are also enhanced due to the addition of fiber. The abrasion resistance strength of PP fiber and BF reinforced mortar are 77.30% and 38.65% more than M0 when the fiber content is 2.6 kg/m³. The field tensile strength test indicates that the tensile strength of these two kinds of fiber reinforced mortar is sufficient. With no increase in cost, fiber reinforced mortar is suitable to be used to repair hydraulic concrete surfaces.

Keywords: hydraulic concrete repair; fiber reinforced mortar; bond strength; durability property; field tensile strength test

水工建筑物由于长期遭受含沙高速水流的冲刷、水质污染、自然碳化、冻融循环等不利

因素作用, 损坏情况较为严重并影响到其正常使用。对产生局部破坏的水工建筑物进行修复,

收稿日期: 2016-04-13

*基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20151496)

作者简介: 黄珊珊 (1992—), 女, 硕士, 从事港口、海岸及近海工程方面研究。

是既能节约成本又能快速高效地令建筑物再次投入正常运营的方法。国内外不乏对混凝土修复材料的研究,然而针对水工混凝土所处的环境特征和损坏特点所需的,具备与旧墙粘结牢固的力学性能以及高抗冲磨、高抗渗、高抗冻等耐久性能修复材料的系统、全面的试验研究却不多。因此,研究具备较强的力学性能和较好的耐久性能的水工混凝土表面修复材料具有十分重要的现实意义。

在砂浆中掺入纤维是获得高性能水泥基材料的有效手段,纤维砂浆作为一种新型材料也正得到越来越广泛的应用。纤维能够在砂浆中均匀乱向分布,起到支撑集料的作用,从而形成支撑体系,提高水泥基质的连续性和整体性。此外,纤维与水泥浆之间的界面粘结力和机械咬合力能够控制砂浆内微裂缝的生成及发展,缓和砂浆内部应力集中。目前对于纤维砂浆的研究多集中于纤维对砂浆抗裂收缩性能的提高^[1-3],纤维与砂浆基体粘结性能的增强^[4-5]以及纤维对砂浆力学性能的改善^[6-7],但是针对纤维砂浆的抗冲磨、抗渗性和抗冻性等耐久性能并将其应用于水工混凝土修复的研究较少。聚丙烯纤维和玄武岩纤维是目前应用较多的两种纤维。作为最具实用价值和发展前景的纤维,国

内外关于聚丙烯纤维(polypropylene fiber,简称PP fiber)对砂浆性能的影响已有许多研究^[8-11],为砂浆作为修复材料的进一步应用提供了有价值的参考依据。玄武岩纤维(basalt fiber,简称BF)是一种新型无机纤维,凭借其诸多优点成为多种纤维的代替材料,受到了越来越多的关注,也将会有广阔的应用前景。

本文选取了聚丙烯纤维和玄武岩纤维配制增强砂浆,采用“8”字形试件测定其与老砂浆间的粘结强度,同时开展了增强砂浆的抗冲磨、抗渗、抗冻性等耐久性能试验,并结合相关机理、工程应用可行性和经济效益分析,为修复水工混凝土表面创伤提供依据。

1 试验原材料

试验用水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,中国水泥厂生产;采用细度模数为2.33的某地河砂配制增强砂浆;高效减水剂为南京水利科学研究院生产的FDN。为了对比纤维的作用效果,制样时保持砂浆中水泥、砂和水的用量不变,在此基础上分别掺入0.6、1.6、2.6 kg/m³的聚丙烯纤维和玄武岩纤维,高效减水剂的用量为1%(质量分数)。增强砂浆具体配合比见表1,纤维的性能参数见表2。

表1 各组修复砂浆配合比

编号	水泥/(kg/m ³)	砂/(kg/m ³)	水/(kg/m ³)	聚丙烯纤维/(kg/m ³)	玄武岩纤维/(kg/m ³)	高效减水剂/%
M0	680.8	1 361.6	367.3			1
PP 0.6	680.8	1 361.6	367.3	0.6		1
PP 1.6	680.8	1 361.6	367.3	1.6		1
PP 2.6	680.8	1 361.6	367.3	2.6		1
BF 0.6	680.8	1 361.6	367.3		0.6	1
BF 1.6	680.8	1 361.6	367.3		1.6	1
BF 2.6	680.8	1 361.6	367.3		2.6	1

表2 聚丙烯纤维和玄武岩纤维的性能参数

种类	长度/mm	密度/(g/cm ³)	动弹模量/GPa	直径/μm	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%	吸水性
聚丙烯纤维	4~19	0.91	3.5	20~50	500	12.9	<0.1
玄武岩纤维	20	2.7	93~110	13	624	3.1	<0.5

2 试验方法

依据 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》中的水泥砂浆粘结强度试验测定“8”字形试样的直接拉伸粘结强度。将配比为 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{水}}=1:3:0.5$ 的老砂浆养护 14 d 后断面丙酮去脂, 与新拌增强砂浆一起成型, 24 h 后脱模, 标准养护室养护 27 d 后测其粘结强度, 如图 1 所示; 抗冲磨试验依据 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》中的水下钢球法进行, 通过冲磨前后磨损率式(1)和抗冲磨强度式(2)来评价增强砂浆的抗冲磨性能:

$$L = \frac{m_0 - m_T}{m_0} \quad (1)$$

式中: L 为磨损率; m_0 为试验前试件质量(kg); m_T 为试验后试件质量(kg)。

$$f_a = \frac{TA}{\Delta m} \quad (2)$$

式中: f_a 为抗冲磨强度 [$\text{h}/(\text{kg}/\text{m}^2)$]; T 为试验累积时间(h); A 为试件受冲磨面积(m^2); Δm 为经 T 时段冲磨后, 试件损失的累积质量(kg)。抗渗性和抗冻性试验依据 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》进行。

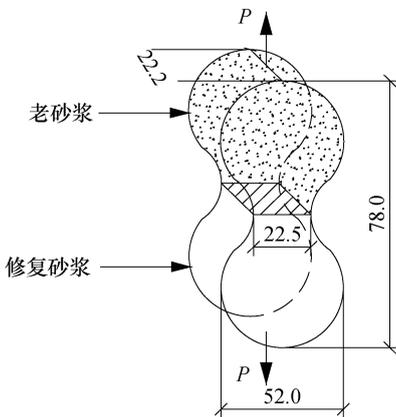


图 1 粘结强度试验示意图 (单位: mm)

3 试验结果及分析

3.1 新老砂浆“8”字形试样粘结强度试验结果及分析

各增强砂浆与老砂浆间的 28 d 粘结强度试验结果见图 2。

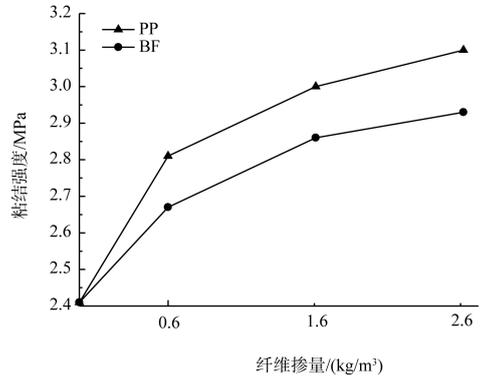
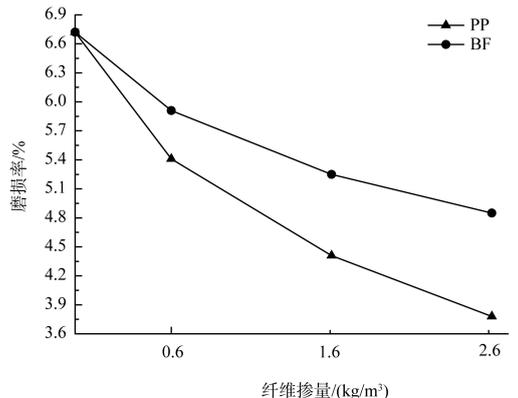


图 2 增强砂浆粘结强度试验结果

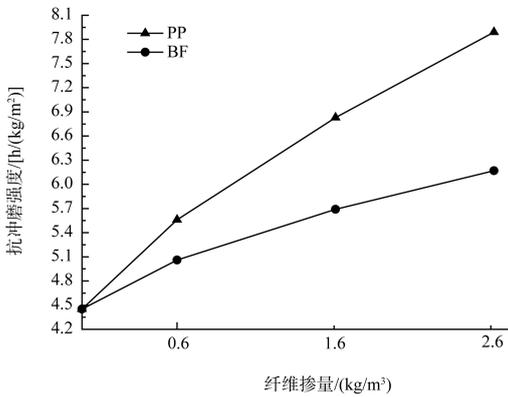
增强砂浆与老砂浆间的粘结强度能力直接影响其在修复水工混凝土表面应用上的可行性, 是衡量其修复性能的重要力学指标之一。由图 2 可知, 纤维的加入对砂浆的粘结性能有明显改善。砂浆空白样 M0 的 28 d 粘结强度为 2.41 MPa, PP 0.6、PP 1.6、PP 2.6 共 3 组聚丙烯纤维增强砂浆试样的 28 d 粘结强度与 M0 相比分别提高了 16.60%、24.50%、28.80%, BF 0.6、BF 1.6、BF 2.6 共 3 组玄武岩纤维增强砂浆试样的 28 d 粘结强度与 M0 相比的提高量为 10.60%、18.50%、21.40%。掺入纤维后砂浆的韧性增加, 脆性降低, 因而在一定程度上增强了砂浆的抗拉强度。同时, 纤维的存在改善了砂浆与老砂浆之间的界面过渡层。另有研究表明, 砂浆干缩产生的微裂缝是新老砂浆粘结强度降低的主要原因^[12], 在新砂浆中掺入纤维可以有效降低砂浆的干缩率, 因而新老砂浆之间的粘结性能得以提高。

3.2 抗冲磨试验结果及分析

各增强砂浆的抗冲磨试验结果见图 3。



a) 磨损率



b) 抗冲磨强度

图3 增强砂浆抗冲磨试验结果

由图3可以看出,两种纤维增强砂浆的磨损率均比砂浆空白样M0低很多,抗冲磨强度相应地提高很多,并且砂浆的抗冲磨性能均随着纤维掺量的增加而增强。相对于M0,PP 2.6组聚丙烯纤维修复砂浆的磨损率降低了43.75%,抗冲磨强度提高了77.30%;BF 2.6组玄武岩纤维修复砂浆的磨损率降低了27.83%,抗冲磨强度提高了38.65%。Grdic^[8]等指出,砂浆力学性能的增强能够减缓其被冲刷的过程。聚丙烯纤维和玄武岩纤维在一定程度上增强了砂浆的力学强度,因此有效改善了砂浆的抗冲磨性能,且聚丙烯纤维增强砂浆的抗冲磨作用更为显著。由此可见,以上两种纤维砂浆尤其适合用于修复长期遭受含沙高速水流冲蚀的水工混凝土。

3.3 抗渗性试验结果及分析

图4为各增强砂浆在1.5 MPa下恒压6h的渗水高度情况。从图4可以看出,聚丙烯纤维增强砂浆和玄武岩纤维增强砂浆都具有良好的抗渗性能,且抗渗性能随着纤维掺量的增加而增强。1.5 MPa下M0试样的渗水高度为13.8 mm,PP 2.6和BF 2.6试样的渗水高度分别降至4.1、5.6 mm。渗水高度的降低说明了纤维的加入可以阻碍试样中裂缝的产生以及进一步发展,从而降低了砂浆中微裂缝和连通孔出现的数量和存在几率,砂浆的抗渗性能得到增强。

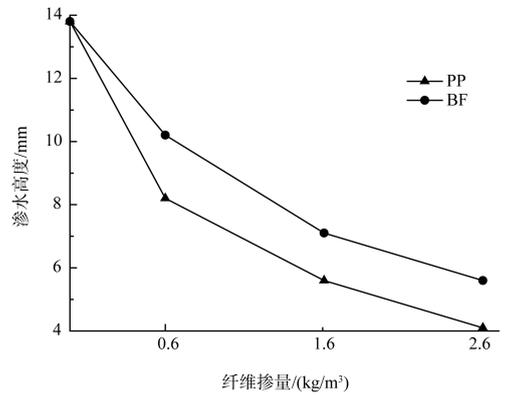


图4 增强砂浆抗渗性试验结果

3.4 抗冻性试验结果及其分析

表3为各增强砂浆在分别冻融50、100、150个循环之后的质量损失率,及冻融150个循环后的抗压和抗折强度损失率。

表3 增强砂浆抗冻性试验结果

编号	质量损失率/%			强度损失率/%	
	50个循环	100个循环	150个循环	抗压	抗折
M0	0.25	0.56	0.92	19.2	22.3
PP 0.6	0.16	0.39	0.78	16.6	18.6
PP 1.6	0.12	0.32	0.73	12.3	15.5
PP 2.6	0.09	0.27	0.68	10.1	13.1
BF 0.6	0.19	0.46	0.86	17.8	20.4
BF 1.6	0.16	0.40	0.81	14.4	17.2
BF 2.6	0.14	0.36	0.76	13.5	15.4

由表3可知,试样的质量和强度损失率都随着纤维的掺加而显著降低。与未加纤维的空白样M0相比,PP 2.6试样在150个冻融循环后的质量损失率、抗压强度损失率和抗折强度损失率分别减少了26.09%、47.40%和41.26%,150个冻融循环后BF 2.6试样相应的各项损失率分别减少了17.39%、29.69%和30.94%。处于饱水状态的砂浆试样在受冻时,孔隙中的水由于结冰体积增大,导致试样膨胀。乱向分布的纤维能够有效抑制试样膨胀,从而减少冻融对砂浆造成的损害。

4 工程应用可行性及经济技术分析

口岸船闸在1999年实施断航大修,采用硅粉砂浆修补混凝土基面。2007年11月对其进行检测,

结果表明采用硅粉砂浆修补过的混凝土表面依旧完好。为检验纤维增强砂浆是否能作为水工混凝土表面修复材料, 委托江苏信达工程检测咨询有限公司对用上述硅粉砂浆、本文中的砂浆空白样、纤维掺量为 1.6 kg/m^3 的聚丙烯及玄武岩纤维增强砂浆修补后两个月的该船闸另一段闸墙进行现场拉拔试验, 每组砂浆各检测 2 个断面 6 个数据。试验结果见表 4。

表 4 现场拉拔试验结果

修复砂浆	抗拉强度检测数据/MPa			平均值/MPa
	1	2	3	
硅粉砂浆 A 断面	2.3	2.1	2.4	2.27
硅粉砂浆 B 断面	2.2	2.4	2.4	2.33
砂浆空白样 A 断面	2.2	2.1	2.2	2.17
砂浆空白样 B 断面	2.1	2.2	2.3	2.20
聚丙烯纤维砂浆 A 断面	2.8	3.0	3.0	2.93
聚丙烯纤维砂浆 B 断面	3.0	3.2	3.3	3.17
玄武岩纤维砂浆 A 断面	2.7	2.8	2.8	2.77
玄武岩纤维砂浆 B 断面	2.8	2.9	2.8	2.83

现场拉拔试验结果表明, 硅粉砂浆与船闸混凝土基面的平均检测值为 $2.27 \sim 2.33 \text{ MPa}$, 本文中的砂浆空白样与混凝土基面的平均检测值为 $2.17 \sim 2.20 \text{ MPa}$, 接近于硅粉砂浆。随着纤维的掺入, 砂浆与混凝土基面的拉拔试验检测值显著增大, 说明聚丙烯纤维砂浆和玄武岩纤维砂浆的修复性能优于硅粉砂浆, 因此可作为水工混凝土表面的修复材料。

表 5 为硅粉砂浆、砂浆空白样、纤维掺量为 1.6 kg/m^3 聚丙烯和玄武岩纤维增强砂浆的综合费用对比。

表 5 各种修复砂浆综合费用对比 元/ m^2

修复砂浆	材料	人工	辅助	综合单价
硅粉砂浆	25.0	120.0	30.0	175.0
砂浆空白样	20.0	120.0	25.0	165.0
聚丙烯纤维砂浆	20.6	124.0	26.0	170.6
玄武岩纤维砂浆	20.5	124.0	26.0	170.5

从表 5 可以看出, 与硅粉砂浆相比, 聚丙烯纤维和玄武岩纤维砂浆在未增加综合单价的基础上, 与混凝土基面的粘结强度提高了约 $20\% \sim 30\%$ 。

总结以上分析可知, 聚丙烯和玄武岩纤维增强砂浆的技术性能与硅粉砂浆相比具有较大的优越性, 且未增加成本, 因此可作为水工混凝土表面的修复材料。

5 结论

1) 纤维的掺入明显提高了砂浆与老砂浆间的粘结强度, 且在掺量为 $0.6 \sim 2.6 \text{ kg/m}^3$ 范围内, 粘结强度随着掺量的增加而增加。与砂浆空白样相比, 聚丙烯纤维增强砂浆和玄武岩纤维增强砂浆的 28 d 新老砂浆粘结强度分别提高了 $16.60\% \sim 28.80\%$ 和 $10.60\% \sim 21.40\%$ 。

2) 聚丙烯纤维增强砂浆和玄武岩纤维增强砂浆具有良好的耐久性能, 且在纤维掺量为 $0.6 \sim 2.6 \text{ kg/m}^3$ 范围内, 抗冲磨、抗渗和抗冻性等耐久性能均随着掺量的增加而增强。与砂浆空白样相比, 最高纤维掺量下聚丙烯纤维增强砂浆和玄武岩纤维增强砂浆的抗冲磨强度分别提高了 77.30% 和 38.65% 。说明这两种纤维增强砂浆都适合用于长期处于特殊环境下水工混凝土表面的修复。

3) 现场拉拔试验结果表明, 聚丙烯和玄武岩纤维砂浆可以作为水工混凝土表面修复材料, 并具有显著的技术和经济成效。

4) 同样的掺量下, 聚丙烯纤维对砂浆各项性能的改善略优于玄武岩纤维, 其可能的原因为聚丙烯纤维的密度低于玄武岩纤维, 并且能够在砂浆中较玄武岩纤维更为均匀地分散。

参考文献:

- [1] 李岩凌, 肖群芳, 王婷, 等. PVA 自修复砂浆用于混凝土修补技术研究[J]. 新型建筑材料, 2015(10): 25-28.
- [2] 戴建国, 刘明, 黄承逵. 聚丙烯纤维混凝土和砂浆的塑性收缩试验研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报: 自然科学版, 2000, 16(3): 195-198.
- [3] 康秋波, 方永浩, 邓红芬. 玄武岩/聚丙烯纤维水泥砂浆的力学性能与抗裂性[J]. 材料导报: 研究篇, 2011(12): 122-126.