

文章编号:1001-4888(2018)02-0325-08

桥梁桩基防护用玄武岩复合纤维 套筒的抗冲磨试验研究^{*}

焦明东^{1,4}, 张建龙^{2,3}, 唐国斌^{1,4}, 程坤^{1,4}

(1. 河南省交通科学技术研究院有限公司, 郑州 450000; 2. 河南省交通运输厅高速公路管理局, 郑州 450000;
3. 长安大学, 西安 710021; 4. 公路桥梁安全检测与加固技术交通运输行业研发中心, 郑州 450000)

摘要:介绍了用于解决桥梁水下桩基腐蚀及冲刷问题的玄武岩复合纤维套筒防护技术。为检验玄武岩复合纤维套筒的抗冲磨效果,重点开展了基于水下钢球法的玄武岩复合纤维板材的抗冲磨试验研究。试验结果表明,冲磨试验前后以及不同冲磨周期下试件板材的颜色均存在明显差异;与裸露混凝土试件相比,采用玄武岩复合纤维板防护试件的平均抗冲磨强度增加,同时平均磨损系数显著降低;随着冲磨周期的增加,材料抗冲磨强度逐渐增大,而磨损系数趋于稳定。本文试验验证了玄武岩复合纤维套筒具有较好的抗冲磨能力和长期抗冲磨稳定性,可用于桥梁水下桩基的工程防护。

关键词:桥梁水下桩基防护;玄武岩复合纤维套筒;冲磨试验;抗冲磨强度;磨损系数

中图分类号: TU528.36 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-258

0 引言

对于含砂率高、流动性强的江河流域桥梁,如跨越黄河的桥梁,其水下桩基由于长期承受回旋水流携带推移质及类推移质的冲磨作用,容易造成桩基表层混凝土剥蚀,加之施工过程中钢护筒过早拔出导致混凝土表层松散等问题,极易对桥梁运营带来安全隐患。随着材料科学的发展和进步,抗冲磨混凝土的抗压强度逐渐由早期的 C25 提高到 C50~C70,以硅粉混凝土或改性硅粉混凝土为主的抗冲磨混凝土得到普遍应用^[1];针对桥梁水下桩基的冲刷及腐蚀问题,Dhir 等^[2]通过测量养护后混凝土的抗压强度、回弹硬度和渗透系数,测试了混凝土材料抗冲磨系数与上述因素的关系。基于粉煤灰含量和水灰比的不同,Yen 等^[3]通过 ASTM C1138 验证了粉煤灰含量增加或者水灰比减小,对于混凝土的抗冲磨性能具有一定程度的提高。鉴于粉煤灰含量的不同,Naik 等^[4]通过开发加速混凝土冲磨的装置对于不同掺量的混凝土的抗冲磨性能进行了研究。随着科技的发展,当前对于混凝土抗冲磨性能的防护多采用防护涂层,薄层抗冲磨防护材料和薄层冲磨破坏修补材料则以改性环氧砂浆为主,如低粘度环氧砂浆、低温潮湿固化环氧砂浆、弹性环氧砂浆等;以环氧树脂改性为主的抗冲磨防护涂料,如用增韧组分和互穿网络技术改性的柔性环氧抗冲磨涂料,开始在工程中获得应用^[5,6]。鉴于涂层施工对于现场施工条件要求较高,防护效果与设计效果相差较大,为充分利用无机材料的密实性和抗冲磨性能,又能保证防护效果,因此采用复合纤维板防护桥梁水下结构的防护方法逐渐被利用起来,据可查文献,当前对于复合纤维防护混凝土及其抗冲磨性能的研究较少,无法适应当前复合纤维的防护需求^[7]。

^{*} 收稿日期:2016-11-29;修回日期:2017-04-20

基金项目:河南省重大科技专项(151100310900),河南省重点科技攻关项目(152102310252),河南省交通运输科技计划项目(2016Z1)

通讯作者:程坤(1987—),男,工学博士,高级工程师,主要从事桥梁全寿命理论研究。Email: ck@hntri.com

鉴于已有大量的桥梁水下桩基冲刷实例,作者等借鉴水下桩基的玻纤套筒加固技术^[8],针对新建桥梁提出采用玄武岩复合纤维套筒进行防护的技术。为检验该技术的防护效果,本文进一步进行玄武岩复合纤维套筒的抗冲磨试验研究。基于改进后水下钢球法^[9,10],通过开展粘贴玄武岩复合纤维板防护试样和裸露混凝土试样的对比试验,验证玄武岩复合纤维板的抗冲磨效果。

1 新建桥梁桩基玄武岩复合纤维套筒防护技术

对于新建桥梁结构常用的钻孔灌注桩基础,提出如图 1 所示的玄武岩复合纤维套筒防护技术。图 1 中玄武岩复合纤维套筒位于桩基钢筋笼和钢护筒之间,加强箍主要是为了保证套筒的横向刚度设计,防溢套是为了防止复合纤维套筒内混凝土的溢出,固定套则主要起竖向固定套筒的作用。该技术通过在钢筋笼外侧、钢护筒内侧新增玄武岩复合纤维套筒作为桩基的附加保护层,具体实施过程为:完成清孔后安装钢筋笼时,将玄武岩复合纤维套筒置于钢筋笼外壁并合理连接,吊装完成后浇筑混凝土,在混凝土达到一定强度后拔出钢护筒,玄武岩复合纤维套筒则以永久模板的形式保留下来,从而达到对混凝土桩基长期防护的目的。

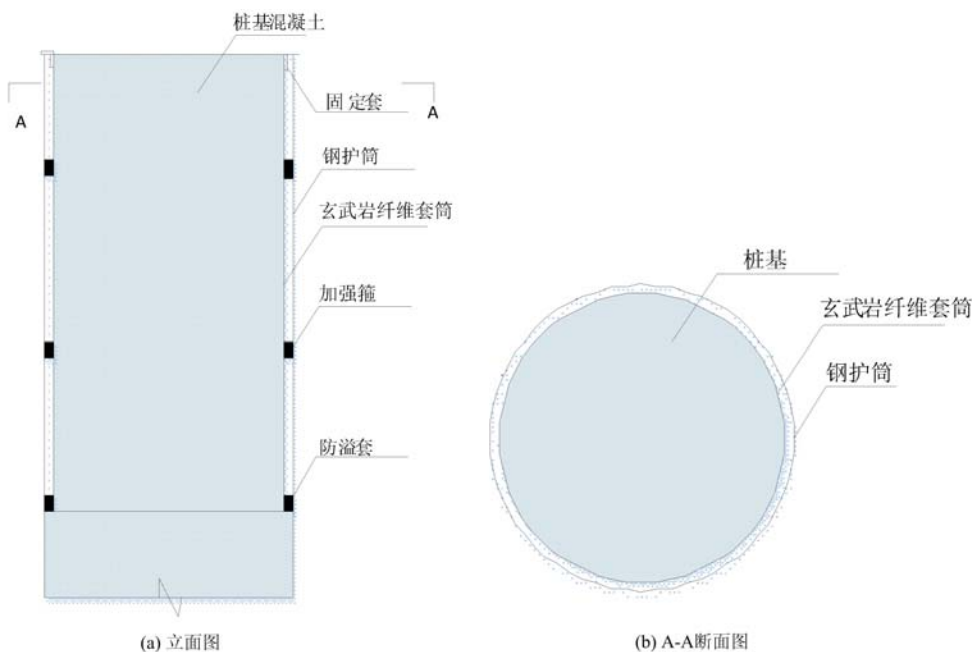


图 1 新建桩基玄武岩纤维套筒防护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the new pile foundation composite basalt fiber protection tube

该技术的优势主要为:(1)在桩基施工过程中考虑到钢护筒的重复利用和易于拆除,经常在桩基混凝土尚未达到规定强度前拔出钢护筒,极易导致桩基混凝土的松散变形,影响混凝土的耐久性和抗冲刷能力;而新增复合纤维套筒后,可以长期作为桩基混凝土的附加保护层,同时护筒拔出时不会对混凝土造成影响。(2)在桥梁运营过程中复合纤维套筒和桩基混凝土紧密结合,利用玄武岩复合纤维材料的高耐久性和耐磨性,可以显著提高混凝土桩基的抗冲刷性能和耐久性能。

2 玄武岩复合纤维套筒抗冲磨试验研究

2.1 材料要求

实际工程中采用的玄武岩复合纤维套筒由玄武岩复合纤维板和饱和环氧树脂胶通过卷制粘贴而成,首先对试验选用的材料性能要求予以说明。

(1) 玄武岩纤维

玄武岩属于火山岩,由此制作的玄武岩纤维具有较高的拉伸强度,与无碱玻纤及碳纤维相当,在所有类别纤维中是最高的。玄武岩纤维的弹性模量是无碱玻纤的 1.5 倍,是高强玻纤的 1~9 倍,仅低于

碳纤维。从机械力学性能看,玄武岩纤维是介于碳纤维与玻璃纤维之间的一种纤维,且造价仅为碳纤维的10%,这也是在桩基防护中采用玄武岩复合纤维的原因之一。工程及本试验采用的玄武岩纤维物理力学性能如表1所示。

表1 玄武岩复合纤维物理力学性能表
Tab.1 Physical and mechanical properties of composite basalt fiber

纤维类型	拉伸强度 /MPa	弹性模量 /GPa	断裂伸长率 /%	密度 /(g/cm ³)	使用温度 /℃	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ /k)
玄武岩纤维	3300~4500	95~115	2.4~3.0	2.65~2.8	-260~650	5.5

(2) 饱和环氧树脂胶

环氧胶粘涂层的冲蚀磨损行为非常复杂,使用条件、胶粘剂配比均对其有影响^[7]。本试验所采用的饱和环氧树脂胶相关性能如表2所示。

表2 环氧树脂胶的技术性能表
Tab.2 Technical performance of epoxy resin

胶体类型	τ /MPa	$\Delta\tau$ /%	$\Delta\epsilon$ /(g·m ⁻² h ⁻¹)	ϵ
饱和环氧树脂胶	16.2	3.2	3.81	2.1

注: τ 为环氧树脂胶的拉伸剪切强度; $\Delta\tau$ 为拉伸剪切强度增长率; $\Delta\epsilon$ 为拉伸应变增长率; ϵ 为环氧树脂拉伸微应变。

(3) 玄武岩复合纤维板

试验采用的玄武岩复合纤维板采用图2所示制作工艺:首先涂刷一层环氧胶于模板上,粘贴一层纤维布;然后涂刷第二层环氧胶,粘贴第二层纤维布,鉴于纤维布的力学单向性能,第一层纤维布与第二层纤维布垂直相连;涂刷第三层环氧胶,粘贴第三层纤维布,第三层纤维布与第二层纤维布垂直布置;涂刷第四层环氧胶,然后进行固化处理,在固化养护箱内养护48h后,即为玄武岩复合纤维板成品。

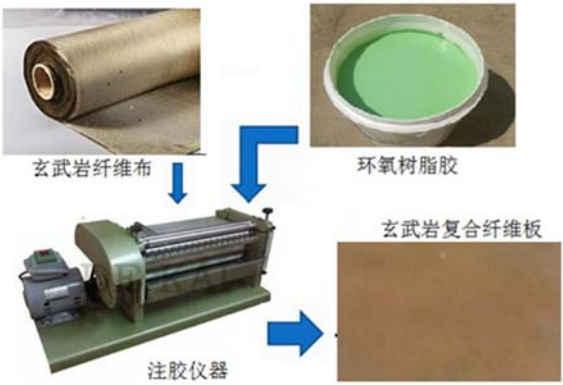
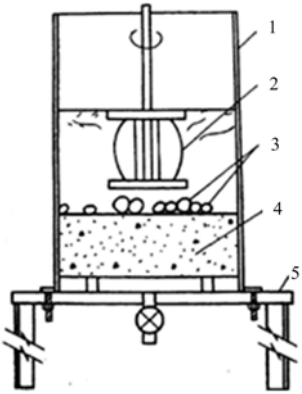


图2 玄武岩纤维板制作流程
Fig.2 Production process of composite basalt fiber sheet



1-钢容器;2-搅拌桨;3-不同直径研磨钢球;
4-混凝土试件;5-底座
图3 钢球冲磨仪示意图^[10]
Fig.3 The sketch map of steel balls abrasion apparatus^[10]

2.2 试验原理及方法

推移质和类推移质冲刷破坏能力的大小主要由其运动速度、粒径、质量和过流时间决定。对于推移质或类推移质冲刷过程的试验模拟,开始于美国军工行业,即T. C. Liu通过水下钢球法的试验进行评价水下结构的抗冲磨性能^[11]。水下钢球法最早被ASTMC1138采用,随后被水利规范DL/T5150^[10]等标准采用。具体试验仪器如图3所示。

对于推移质、类推移质对于水下结构的冲刷磨损机理的研究,利用材料避免受到不同冲角作用的力学解释,目前得到了相关专家学者的认可,即砂砾微切削和冲击变形磨损构成了水下结构受到的整体磨

损。当前主要利用下式对于磨损能量进行定量分析:

$$I(\alpha) = \frac{1}{2\epsilon}(V_s \sin \alpha - K)^2 + \frac{1}{2\phi} V_s^2 \cos^2 \sin(n\alpha) \quad (\alpha \leq \alpha_0)$$

$$I(\alpha) = \frac{1}{2\epsilon}(V_s \sin \alpha - K)^2 + \frac{1}{2\phi} V_s^2 \cos^2 \alpha \quad (\alpha > \alpha_0)$$

通过确定材料 K 、 ϵ 、 ϕ 、 n 等参数,即可定量描述水下结构冲磨情况。

基于水下钢球法^[10],制作 300mm(直径)×100mm(高)的规格试件,由转速 1200r/min 的叶轮带动水和 70 个大小不等的钢球冲磨试件表面。相关研究表明^[11],固定尺寸下的转速 1200r/min,相应水下结构过流速度为 1.8m/s,相应钢球组合很好地模拟了水下推移质或类推移质组成情况,冲磨历时 72h,为水下复合结构的实际冲磨周期,即水下钢球法试验能够较好地重现水下结构受到推移质和类推移质冲磨的过程。

2.3 试件制备

试验共制作 4 组试件,其中 1 组作为对比组,3 组作为试验组,试验试件编号及对应的冲磨时间如表 3 所示。对比组为裸露混凝土试件,试验组在对比组基础上由冲磨面采用结构胶粘贴 3mm 厚的玄武岩纤维板制作而成,如图 4 所示。

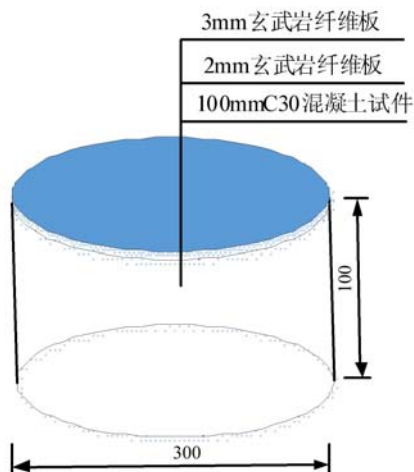


图 4 试件示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of test piece (unit: mm)

料含有环氧胶类有机材料,参考文献[9]的方法,采用 $40 \pm 5^\circ\text{C}$ 恒温下烘干 24h 后取出,放入干燥器内冷却至室温;重复上述操作,直至临近两次相对误差在 0.1% 之内,则认为试件达到绝对干燥状态。

(2) 冲磨试验

根据相关混凝土浸水饱和试验的要求^[13],将试件浸水 144h,使试件达到绝对饱和状态,然后将试样放入水下钢球法冲磨试验机进行抗冲磨试验,累计冲磨一个周期(72h)后取出。试验照片如图 5 所示。

(3) 试验后处理

采取与试验前相同方法进行干燥称重处理,记录称重数据。

3 试验结果及分析

图 6 给出了试验后不同试件间的对比情况,可以看出冲磨前后以及不同冲磨周期玄武岩纤维板的颜色发生了较大的变化,随着磨损周期增加,玄武岩纤维表面变得粗糙,颜色变暗。

对于玄武岩复合纤维的防护性能,主要以抗冲磨强度和磨损系数衡量,以下进行详细分析。

2.4 试验过程描述

根据张彬等^[9]对冲磨试验过程的优化,采取绝对质量进行磨损系数的计算,在磨损前和磨损后分别进行干燥处理,完全去除水分的影响,避免含水量不同对于试验结果的干扰。根据上述分析,参考规范^[12,13]中对于试件干燥和浸水饱和的有关规定,进行试件试验前后的烘干作业,保证试验前后试样重量一致。具体试验过程如下:

(1) 试验前处理

按 C30 标准制作混凝土试样,养护 28d 后采用结构胶进行玄武岩复合纤维板和试样的粘结,在标准温度和湿度情况下,静置 24h 后放置烘箱进行干燥处理,使试件达到绝对干燥状态,然后取出来称重。由于试验中玄武岩复合纤维板材料



图 5 冲磨试验照片

Fig. 5 Abrasion test picture

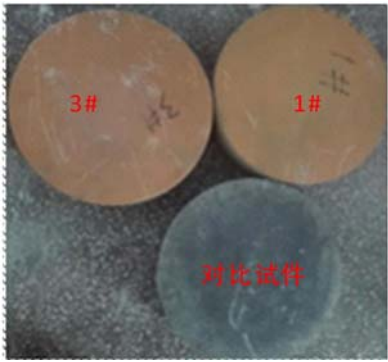


图 6 不同试件对照图片

(1# 为一个冲磨周期,3# 为三个冲磨周期)

Fig. 6 Comparison of different subjects

(1# for a punch cycle, 3# for the three punch cycle)

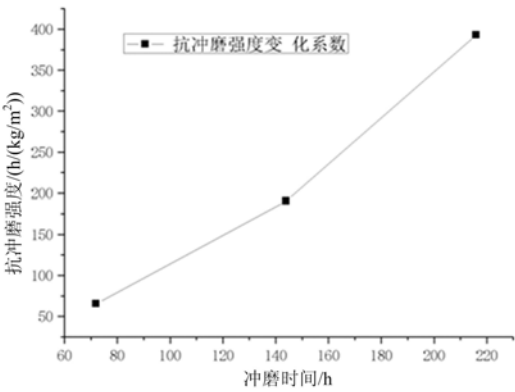


图 7 防护组抗冲磨强度随冲磨时间变化曲线图

Fig. 7 The change curve of the impact strength of the protection group with the grinding time

3.1 抗冲磨强度

对于玄武岩复合纤维的抗冲磨性能评价,抗冲磨强度是衡量复合纤维防护性能的指标之一,抗冲磨强度按照下式进行计算: $f_a = TA/(\Delta M)$,其中 T 为试验累积时间, h ; A 为受冲磨面积, m^2 ; ΔM 为试件累积损失质量, kg 。根据根据上述分析,可得到如表 3 所示结果,对比组的抗冲磨强度为 $7.784h/(kg/m^2)$,试验组的抗冲磨强度则为 $65.335h/(kg/m^2)$,抗冲磨强度呈几何级增长。

根据表 3 可知,相比对比组,防护组的抗冲磨强度有了较大程度的提高;随着冲磨周期的增加,抗冲磨强度也得到了一定程度的提高,最高达到 $392.928h/(kg/m^2)$,相对于对比组,抗冲磨强度增大了 49 倍,说明随着冲磨周期增加,复合纤维板抗冲磨强度逐渐增加,对于水下桩基具有较好的抗冲磨性能,具体如图 7 所示。相比于纤维增强水泥基复合材料的抗冲磨强度 $210h/(kg/m^2)$,玄武岩复合纤维板材的抗冲磨强度($392.928h/(kg/m^2)$)提高了 87%,鉴于复合纤维套筒施工工艺较为简单,具有更好的适用性^[14]。

表 3 试验结果对比表(一)
Tab. 3 Comparison chart 1 of experiment results

序号	组别	冲磨时间/h	抗冲磨强度 $h/(kg/m^2)$	平均值/%
S-1-1	对比组	72	7.62	7.874
S-1-2			7.78	
S-1-3			8.23	
S-2-1-1	试验组(一)	72	56.03	65.335
S-2-2-1			81.65	
S-2-3-1			58.32	
S-2-1-2	试验组(二)	144	158.76	190.585
S-2-2-2			184.37	
S-2-3-2			228.62	
S-2-1-3	试验组(三)	216	329.74	392.928
S-2-2-3			372.75	
S-2-3-3			476.29	

3.2 磨损系数分析

为进一步量化试验效果,定义: $\eta = (m_0 - m_T)/m_0$ 试件的为磨损系数,其中 m_0 和 m_T 分别为试验前

后的试件质量, kg。经称重后得到的各组试件的冲磨试验结果如表 3 所示。由表 3 可知, 一个冲磨周期后, 对比组平均磨损系数为 3.660%, 试验组平均磨损系数为 0.450%, 磨损系数则减小了 87% 左右, 表明玄武岩纤维板具有较好的防冲磨效果。有关玄武岩纤维板的冲磨系数分析如表 4 所示。

表 4 试验结果对比表(二)

Tab. 4 Comparison chart 2 of experiment results

序号	组别	冲磨周期	磨损系数 $\eta/\%$	平均值/ $\%$
S-1-1	对比组	1	3.78	3.660
S-1-2			3.70	
S-1-3			3.50	
S-2-1-1	试验组(一)	1	0.51	0.450
S-2-2-1			0.35	
S-2-3-1			0.49	
S-2-1-2	试验组(二)	2	0.36	0.306
S-2-2-2			0.31	
S-2-3-2			0.25	
S-2-1-3	试验组(三)	3	0.26	0.223
S-2-2-3			0.23	
S-2-3-3			0.18	

根据表 4 可以看出, 一个冲磨周期后平均磨损系数为 0.450%, 二个冲磨周期后平均磨损系数为 0.306%, 三个冲磨周期后平均磨损系数为 0.223%, 即随着冲磨周期增加, 磨损程度趋于平缓, 也表明玄武岩纤维板具有较好的长期抗磨损稳定性。这是因为随着冲磨周期的增加, 表层环氧树脂逐渐被冲磨掉, 浸滞于玄武岩纤维的环氧树脂开始承担部分冲磨作用, 鉴于玄武岩纤维的抗冲磨性能和在纤维板中的骨架作用, 复合纤维板抗冲磨性能大大增加, 也即抗冲磨程度趋于稳定, 具体如图 8 所示。

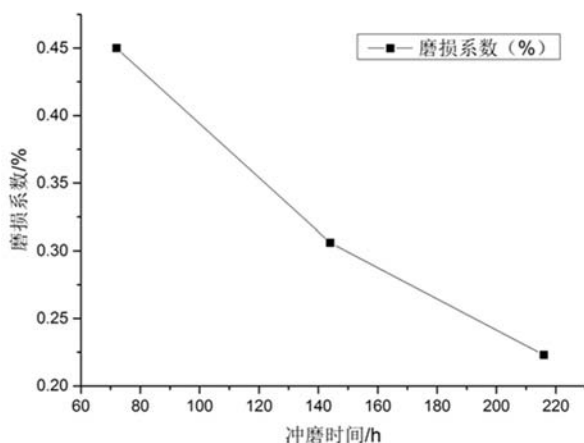


图 8 平均磨损系数随冲磨时间变化的曲线

Fig. 8 The variation curve of average wear coefficient with time

4 结论

本文为验证新建桥梁桩基防护采用的玄武岩复合纤维套筒的防冲刷效果, 进行了玄武岩复合纤维套筒材料的抗冲磨试验研究, 主要得到以下结论:

(1) 对于存在冲刷现象及较高腐蚀可能性的桥梁水下桩基, 提出了在新建桥梁钻孔灌注桩基础中

采用玄武岩复合纤维套筒进行防护的新技术。

(2) 基于水下钢球法,完成了4组共12个混凝土或粘贴有玄武岩纤维板材料试件的抗冲磨试验。试验结果表明,冲磨前后以及不同周期玄武岩纤维板的颜色存在明显差异。具体冲磨定性分析如下:

①与无防护冲磨组相比,防护组抗冲磨强度呈指数增加;随着冲磨周期增加,抗冲磨强度逐渐增大,最终达到 $392.928\text{h}/(\text{kg}/\text{m}^2)$,与纤维增强混凝土或环氧砂浆相比其防护性能大大增强;

②经历一个冲磨周期后,相对于裸露混凝土对比试件,试验试件的平均磨损系数显著降低,表明玄武岩纤维板具有较好的防冲磨效果;同时,随着冲磨周期增加,磨损程度趋于平缓,表明玄武岩纤维板具有较好的长期抗冲磨稳定性。

参考文献:

- [1] 刘卫东,林瑜,钟海荣,等. 抗冲刷磨蚀混凝土的耐磨损试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊):157—160 (LIU Weidong, LIN Yu, ZHONG Hairong, et al. Anti-abrasion test of erosion and denudation resistant concrete [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl.):157—160 (in Chinese))
- [2] Dhir R K, Hewlett P C, Chan Y N. Near-surface characteristics of concrete: abrasion resistance[J]. Materials and Structures, 1991, 24(2):122—128.
- [3] Yen T, Hsu T H, Liu Y W, et al. Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(2):458—463.
- [4] Naik T R, Singh S S, Hossain M M. Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(6):649—659.
- [5] Batis G, Routoulas A, Rakanta E. Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(1):109—115.
- [6] 程相春. 环氧树脂的合成与应用研究概况[J]. 当代化工, 2011, 40(5):514—516 (CHENG Xiangchun. Summary on synthesis and application of epoxy resin[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(5):514—516 (in Chinese))
- [7] Wen J, Vasudevan V J, Wilkes G L. Abrasion resistant inorganic/organic coating materials prepared by the sol-gel method[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 1995, 5(2):115—126.
- [8] 许小海. 一种用于水下墩柱加固玻纤套筒[P]. 天津:CN205223836U, 2016-05-11 (XU Xiaohai. One kind of reinforced glass fiber sleeve[P]. Tianjin: CN205223836U, 2016-05-11 (in Chinese))
- [9] 张彬, 范伟丽, 张雷, 等. 基于水下钢球法的混凝土抗冲磨试验研究[J]. 水力发电, 2014, 40(8):126—128 (ZHANG Bin, FAN Weili, ZHANG Lei, et al. Experimental research of concrete abrasion resistant based on underwater steel ball method[J]. Water Power, 2014, 40(8):126—128 (in Chinese))
- [10] DL/T 5150—2001. 水工混凝土试验规程[S]. 中国电力出版社, 2002 (DL/T 5150—2001. Test code for hydraulic concrete[S]. China Electric Power Press, 2002 (in Chinese))
- [11] Liu T C. Abrasion resistance of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1981, 3(1):19—28.
- [12] SL264—2001. 水利水电工程岩石试验规程[S]. 中国水利水电出版社, 2001 (SL264—2001. Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering [S]. China Water & Power Press, 2001 (in Chinese))
- [13] GB/T50082—2009. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验防范标准[S]. 中国水利水电出版社, 2009 (GB/T50082—2009. Standard for test method of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. China Water & Power Press, 2009 (in Chinese))
- [14] 张振忠, 汪在芹, 陈亮. 改性环氧砂浆抗冲磨材料性能研究[J]. 水力发电, 2016, 42(6):95—98 (ZHANG Zhengzhong, WANG Zaiqin, CHEN Liang. Research on the property of anti-abrasion modified epoxy mortar[J]. Water Power, 2016, 42(6):95—98 (in Chinese))

Experimental study on impact abrasion resistance performance of basalt composite fiber sleeve used for bridge pile foundation protection

JIAO Ming-dong^{1,4}, ZHANG Jian-long^{2,3}, TANG Guo-bin^{1,4}, CHENG Kun^{1,4}

(1. Henan Transportation Research Institute CO. LTD, Zhengzhou 450000, China; 2. Henan Provincial Department of Transportation Highway Administration Bureau, Zhengzhou 450000, China; 3. Chang'an University, Xi'an 710021, China; 4. Highway Bridge Safety Inspection and Reinforcement Technology Transportation Industry Research and Development Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: This paper introduces the protection technology for solving the corrosion and scour of bridge underwater pile foundation by using basalt composite fiber sleeve. In order to verify the impact abrasion resistance performance of basalt composite fiber sleeve, an impact abrasion-resistance experiment was carried out for basalt composite fiber sheets, based on underwater steel ball method. Experimental results show that there are obvious differences in the color of basalt composite fiber sheet specimens before and after impact abrasion experiment or after different abrasion cycles. Compared with exposed concrete specimen, the average impact abrasion-resisting strength of basalt composite fiber sheet specimen increases, at the same time, the average wear coefficient significantly decreases. Along with the increase of abrasion cycles, the impact abrasion-resisting strength increases and the wear coefficient of material tends to be stable. Above experiment verifies that basalt composite fiber sleeve has good abrasion-resisting performance and long-term abrasion-resisting stability, and can be used in engineering protection of underwater pile foundation of bridge.

Keywords: underwater pile foundation protection of bridge; basalt composite fiber sleeve; impact abrasion experiment; wear-resisting strength; wear coefficient