

玄武岩复合筋性能试验及其在桥面铺装中的应用

王宏仁¹, 张瑞祺²

(1. 中交一航局第二工程有限公司; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司)

摘要:玄武岩纤维复合筋工程应用实例比较少, 为了探索玄武岩纤维复合筋力学性能指标和耐久性指标, 开展室内拉伸试验、弯曲试验、握裹力试验、蠕变松弛试验和线膨胀系数试验, 以及现场静载荷和动载荷试验, 结果表明玄武岩纤维复合筋具有抗拉强度大、温度应力小、抗疲劳、弹性变形能力大、质量轻等优点, 同时也具备弯曲性能差的缺点。玄武岩纤维复合筋可以大大提高构件的使用寿命, 解决高速公路连续配筋混凝土路面的施工技术难题和钢筋混凝土结构中钢筋需要焊接的问题, 可为同类型项目工程提供参考和借鉴作用。

关键词:玄武岩纤维复合筋; 抗拉强度; 弯曲破坏角度; 黏结强度; 松弛率; 线膨胀系数

0 引言

纤维增强复合材料(FRP)具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳等优良特性, 在工程的加固改造和结构增强中发挥了重要作用。但仍存在延伸率低、热膨胀系数与混凝土相差较大的缺点, 严重影响了其与混凝土共同工作的性能。近 20 年兴起的玄武岩纤维复合材料(BFRP)具有优越的综合性能, 已成为解决上述问题的有效途径。玄武岩纤维是将火山岩原料经 1 500 ℃高温熔融后拉制而成的连续纤维, 由于生产过程中无污染且能耗低(仅为碳纤维生产能耗的 1/16), 被称为 21 世纪无污染的“绿色工业原材料”, 与碳纤维、芳纶纤维、超高分子纤维并称中国的四大高技术纤维^[1-5]。

玄武岩纤维复合筋(简称 BFRP 筋)是采用高强度玄武岩纤维与树脂经拉挤、缠绕、表面涂覆, 复合成型、连续生产的新型建筑材料, 具有高强度及优异的耐腐蚀性能, 是同规格普通钢筋强度的 3 倍以上, 密度仅为普通钢筋的 1/5 左右, 自重轻且承载能力高。在公路桥梁建设中, 与传统的钢筋相比, BFRP 筋具有耐化学腐蚀、高轴向抗拉度强、抗疲劳、弹性变形能力大、非磁性、重量轻等优点^[6-8]。

针对 BFRP 筋性能试验国内外学者均有相关的研究: 霍宝荣等^[9]通过进行室内拉拔试验, 探索了不同玄武岩纤维掺量条件下 BFRP 筋的力学性能变化, 随着玄武岩掺量增大, BFRP 筋的弹性模量随之提升。顾兴宇等^[10]通过光纤检测法进一步提高了室内拉拔试验的精准性, 得出了玄武岩纤

维掺量增加, BFRP 筋的弹性模量增加; 刘纪峰等^[11]通过张拉对比试验, 分别测试了 8 mm、10 mm、12 mm 直径的 BFRP 筋和 GFRP 锚杆的性能, 试验结果显示, BFRP 筋的抗拉强度明显高于 GFRP 锚杆; 曹晓峰等^[12]通过对多种直径的 BFRP 筋进行拉拔试验, 得出随着 BFRP 筋直径的增加, 其抗拉强度也随之增加, 同时通过剪切试验发现 BFRP 筋的抗剪强度相对于钢筋锚杆稍低。通过对 BFRP 筋性能进行室内试验、现场静载荷和动载荷试验, 总结了 BFRP 筋的优缺点, 明确了其作为桥面铺装材料的适用性。

1 工程概况

长春经济圈环线高速公路九台至双阳段项目 K145+270 机动车天桥, 为四跨预应力混凝土单箱单室连续箱梁结构, 基础为钢筋混凝土扩大基础, 桥墩为柱式墩, 桥长 72 m(16 m+20 m+20 m+16 m), 桥面宽 5.5 m, 梁高 1.3 m, 桥面铺装面积 396 m², 铺装厚度为 8 cm 的 C40 防水混凝土。根据原设计, 本桥桥面铺装 HRB400E ϕ 12 mm 钢筋共需 10 728.79 kg, 钢筋间距 10 cm, 采用绑扎连接。现采用直径为 8 mm 的 BFRP 筋代替原钢筋, 布置形式不变, 连接采用扎丝绑扎的方式, 搭接长度为 40d(d 为 BFRP 筋直径), 替代后共需 BFRP 筋 12 082 m, 共重 1 329.02 kg, 是原设计钢筋重量的 12%。

根据现场施工条件, BFRP 筋与原钢筋对比试验布置在 3 号墩上方。施工时在 3 号墩处桥面左侧布置 1 根 12 m 长 ϕ 8 mm BFRP 筋试验筋, 右侧

布置 1 根 12 m 长 HRB400E ϕ 12 mm 的普通钢筋试验筋。

2 BFRP 筋力学性能试验

为了探究 BFRP 筋的各项力学性能和耐久性指标,室内试验选取了直径为 7 mm、12 mm、16 mm 的 BFRP 筋进行各项性能指标试验。

2.1 拉伸试验

由于 BFRP 筋无法使用试验机配备的夹具进行夹持,根据国内外对纤维材料拉伸强度试验的经验,本项目的拉伸试验采用无缝钢管作为锚头,并使用掺入石英砂的环氧树脂作固化剂,对 BFRP 筋进行锚固。BFRP 筋拉伸试验试样断裂后状态见图 1。



图 1 试样断裂后状态图

BFRP 筋在拉伸时没有明显的屈服阶段,试件的力-位移曲线以直线方式上升至力最大处随即发生破坏。为保护试验设备,当试件加载至 600 MPa 时需摘除引伸计,使用设备自带的位移采集器进行破坏前应变的采集。试验结果见表 1。

表 1 BFRP筋拉伸试验结果

试件 型号	试件 编号	抗拉强度/MPa		弹性模量/GPa		断裂伸长率/%	
		实测值	平均值	实测值	平均值	实测值	平均值
BFRP-7-A	LS7-1	965	972	44	44.3	4.0	3.5
	LS7-2	985		46		2.5	
	LS7-3	965		43		4.0	
BFRP-12-A	LS12-1	1 165	1 075	46	46.3	3.5	3.3
	LS12-2	995		45		3.0	
	LS12-3	1 065		48		3.5	
BFRP-16-A	LS16-1	1 200	1 100	49	49.0	2.5	2.8
	LS16-2	900		49		3.0	
	LS16-3	1 200		49		3.0	

注:试件型号中 BFRP 代表玄武岩复合筋;7、12、16 为 BFRP 筋直径;A 代表产品批号。

试验结果表明,BFRP 筋的断裂伸长率随直径增大而减小,断裂伸长率在 2.5%~4.0%时,平均伸长率为 3%左右;BFRP 筋的抗拉强度和弹性模量随直径的增大而增大。

2.2 弯曲试验

对于纤维材料弯曲试验方法,在国内外的相关规范与文献中虽有所提及,但主要都是针对其抗弯强度进行研究,对于弯曲能力的探索则很少见到。本试验参考钢筋冷弯试验方法,对 BFRP 筋的抗弯能力进行探索。对于 BFRP 筋,材料能承受的弯曲角度直接决定了其运输时绕盘的直径,从而决定了材料的运输难度。BFRP 筋弯曲试验后样品状态见图 2。



图 2 弯曲试验后样品状态图

选择 7 mm、12 mm、16 mm BFRP 筋,参考混凝土用热轧带肋钢筋相关要求,使用金属弯曲试验机进行本次试验,并以 3d 作为其弯心直径。试验时将量角器固定在试验机中心位置,并开动液压系统,以 2 mm/min 的加载速率对复合筋进行持续加载。

当加载系统出现:1)弯曲力明显减小;2)BFRP 筋下缘出现发白、破裂、外鼓;3)BFRP 筋发出连续断丝声音时,即在量角器中读出其弯曲角度并记录。试验结果见表 2。

表 2 BFRP筋弯曲试验结果

试件型号	试件编号	实测弯曲破坏角度/ (°)	平均弯曲破坏角度/ (°)
BFRP-7-A	LS7-1	51.2	51.4
	LS7-2	50.5	
	LS7-3	52.6	
BFRP-12-A	LS12-1	49.5	49.3
	LS12-2	48.2	
	LS12-3	50.2	
BFRP-16-A	LS16-1	46.3	45.4
	LS16-2	45.7	
	LS16-3	44.2	

试验结果表明,BFRP 筋的弯曲角度小于 60°,相比于钢材,BFRP 筋的弯曲性能差。BFRP 筋弯曲破坏角度随直径的增大而减小,弯曲破坏角度也从侧面反映了 BFRP 筋的冲击韧性相比钢筋弱。BFRP 筋是由树脂基体粘结而成,由于环氧

树脂在低温情况下,性能不会有较大提高。

2.3 握裹力试验

BFRP 筋替代钢筋成为水泥混凝土建筑物或构筑物拉应力的主要承受材料,其与混凝土间的配合则显得尤为重要。如果复合筋与水泥混凝土之间不具备良好的黏接性能,则不能达到两者间协调工作的情况,从而使得结构强度大大降低。选择 C40 和 C50 混凝土进行不同温度下的黏结强度对比试验。

将养护完成的试件安装至试验机上,以 3 kN/min 的速率对试件进行加载,直至出现以下任一情况后立即停止试验,并记录破坏荷载与破坏形态。1) 复合筋或钢筋自由端相对混凝土立方体发生明显地相对滑动;2) 混凝土立方体劈裂破坏。握裹力试验结果见表 3。

试验结果表明,BFRP 筋与混凝土的黏结强度不与温度成正相关关系,试验温度为 20 ℃时,BFRP 筋的黏结强度值最大;BFRP 筋与混凝土的黏结强度与混凝土的标号相关性不大。对比钢筋混凝土黏结强度,BFRP 筋混凝土结构的界面应力

不仅未损失且有所提高。

表 3 BFRP筋握裹力试验结果

混凝土标号	试验温度/ ℃	BFRP 筋黏结 强度值/MPa	钢筋黏结强 度值/MPa	黏结强度 比/%
C40	10	18.8	16.8	111.9
	20	20.3	18.3	110.9
	30	17.5	16.7	104.8
C50	10	24.0	21.0	114.3
	20	25.5	20.5	124.4
	30	20.6	17.5	117.7

2.4 蠕变松弛试验

BFRP 筋的蠕变松弛试验在现行规范中未进行明确的要求。参照预应力金属等温松弛试验方法,使用全自动数控松弛试验机对其松弛性能进行试验。与拉伸试验类似,采用无缝钢管套筒对 BFRP 筋锚固端进行加强。

为了避免在试验过程中出现 BFRP 筋与套筒、套筒与锚具、锚具与台架间的滑移导致拉力减小的情况,试验时在张拉端与固定端分别安装 3 个千分表,测定其滑移情况。本次试验初始试验力为 29 300 N,试验结果见表 4。

表 4 BFRP筋蠕变松弛试验结果

试件型号	试件编号	初始试验力/N	100 h 剩余试验力/N	100 h 剩余松弛率/%		推算 1 000 h 松弛率/%	
				实测值	平均值	实测值	平均值
BFRP-7-A	LS7-1	29 300	28 145.9	3.939	4.076	3.596	4.196
	LS7-2	29 300	28 046.6	4.278		4.488	
	LS7-3	29 300	28 125.0	4.010		4.503	
BFRP-12-A	LS12-1	29 300	28 027.7	4.342	4.217	4.812	4.816
	LS12-2	29 300	28 090.1	4.129		4.802	
	LS12-3	29 300	28 075.5	4.179		4.834	
BFRP-16-A	LS16-1	29 300	28 005.3	4.419	4.425	5.007	4.948
	LS16-2	29 300	28 003.9	4.424		4.920	
	LS16-3	29 300	28 001.1	4.433		4.918	

根据试验结果得出以下结论:1) BFRP 筋松弛率均约小于 5%;2) 树脂基体为环氧树脂的 BFRP 筋在 100 h 完成了约 90%的蠕变松弛;3) 树脂基体为环氧树脂的 BFRP 筋在 1 000 h 后蠕变松弛效应对结构的影响相对减弱;4) BFRP 筋直径与蠕变松弛试验之间无关联性,BFRP 筋的蠕变松弛仅与其本身性质有关。

2.5 线膨胀系数试验

线膨胀系数主要表征材料温度每变化 1 ℃材料长度变化的百分率。试验过程中对试件进行均匀加热,并控制试件温度的上升速率,测定试件温度及其对应的试件长度变化量,并计算所需温

度范围内的平均线膨胀系数,试验结果见表 5。

表 5 BFRP筋线膨胀系数试验结果

试件型号	试件编号	实测线膨胀系数/ (10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	线膨胀系数均值/ (10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)
BFRP-7-A	XZ7-1	9.86	9.78
	XZ7-2	9.59	
	XZ7-3	9.90	
BFRP-12-A	XZ12-1	10.13	10.32
	XZ12-2	10.42	
	XZ12-3	10.42	
BFRP-16-A	XZ16-1	10.86	10.45
	XZ16-2	10.20	
	XZ16-3	10.30	

试验结果表明,BFRP筋线膨胀系数随直径的增大而增大,在0~100℃范围内时,线膨胀系数为 $1.0\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,与实测值相似。

3 现场加载试验

现场加载试验所用的BFRP筋直径为8 mm,采用角磨机按照桥梁长度和宽度截断,纵向筋长71.98 m,横向筋长4.5 m。BFRP筋布设之前,先对桥面进行凿毛、冲洗,然后分别将纵、横向筋按照10 cm间距布设,采用扎丝绑扎。BFRP筋试验筋和直径12 mm普通钢筋分别布置到3号墩两侧距离护栏内侧边缘0.5 m的位置,试验筋布置图见图3。

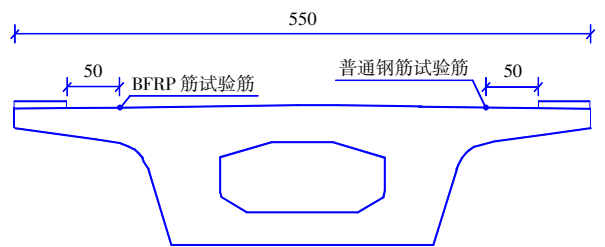


图3 试验筋布置图(mm)

桥面混凝土浇筑完成28 d后进行现场静载荷和动载荷试验,采用4.9 t叉车模拟车辆荷载进行桥梁加载试验,采集数据进行对比分析。BFRP筋与普通钢筋实测轴力值曲线图见图4。

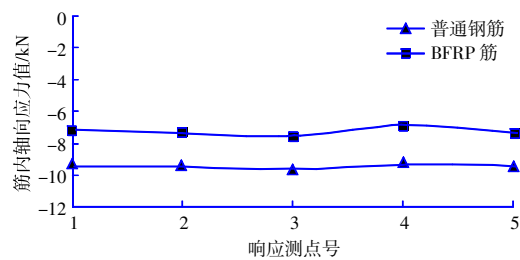


图4 BFRP筋与普通钢筋实测轴力值曲线图

通过对比测试,可以发现:

1) BFRP筋拉应力绝对值较低,桥面铺装层在梁结构中无法作为受力构件进行设计,与现行规范一致;

2) 与普通钢筋对比,BFRP筋在同种行车荷载下应力值较低,但两者相差较小,桥面铺装层更加均匀地将行车荷载传递给主梁。

3) 不论是普通钢筋铺装层还是BFRP筋铺装层,网片结构使得铺装层形成整体,荷载分散作用都得到了有效的发挥。

4 结语

通过开展BFRP筋室内性能试验和现场载荷试验,得出BFRP筋抗拉强度大、握裹力强,当用于桥面铺装等线性布设的部位时,可以充分发挥其抗拉强度大的优点,避开BFRP筋弯曲性能差的缺点。随着BFRP筋相应理论研究的进一步完善,其产品性能也越来越突出,在桥面铺装中值得推广应用。

参考文献:

[1] 景芳达,韩松,秦野,等.玄武岩纤维增强聚合物复合材料及其机械性能的研究进展[J].当代化工,2023,52(1):219-222.

[2] 张文斌,陶燕,李鑫鑫,等.玄武岩纤维水泥基复合材料基本力学性能试验研究[J].新型建筑材料,2022,49(6):17-22.

[3] 陈晋华.玄武岩纤维在桥梁抗裂中的应用研究[J].合成纤维,2023,52(1):20-23.

[4] 吴智深,汪昕,史健皓.玄武岩纤维复合材料性能提升及其新型结构[J].工程力学,2020,37(5):1-14.

[5] 陈兴芬.连续玄武岩纤维的高强度化研究[D].南京:东南大学,2018.

[6] 吴智深.玄武岩纤维及其复合材料作为建材的创新应用[J].江苏建材,2018(4):15-22.

[7] 李勇.岩土工程用玄武岩纤维复合材料研究及性能评价[J].合成纤维,2023,52(7):72-75.

[8] 吴刚,吴智深,胡显奇,等.玄武岩纤维在土木工程中的应用研究现状及进展[J].工业建筑,2007(S):410-415.

[9] 霍宝荣,张向东.BFRP筋的力学性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(4):626-630.

[10] 顾兴宇,沈新,陆家颖.玄武岩纤维筋拉伸力学性能试验研究[J].西南交通大学学报,2010,45(6):914-919.

[11] 刘纪峰,张会芝.玻璃纤维和玄武岩纤维锚杆设计探讨[J].河南城建学院学报,2012,21(5):5-8,50.

[12] 曹晓峰,赵文,谢强,等.BFRP筋材基本力学性能试验研究[J].公路工程,2016,41(5):215-217,255.