

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.04.019

玄武岩 FRP 筋混凝土梁抗弯性能试验研究^{*}

宋洋¹,张向东¹,和敏²

(1. 辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁阜新 123000; 2. 中铁十三局集团有限公司, 天津 300308)

摘要:通过6根玄武岩FRP筋混凝土梁与6根钢筋混凝土梁静力加载对比试验,研究不同纵筋配筋率的玄武岩FRP筋混凝土梁与钢筋混凝土梁的受力性能,分析其承载力变化过程、破坏形态、挠度变形与裂缝发展情况。试验结果表明,玄武岩FRP筋混凝土梁荷载-挠度曲线近似为直线,但仍然具有较好的延性;开裂荷载与极限荷载相比钢筋混凝土梁略低;裂缝宽度在2.5 mm以内,且分布对称均匀,裂缝间距略大于钢筋混凝土梁;玄武岩FRP筋混凝土梁产生的挠度较大,应提高玄武岩FRP筋与混凝土之间的粘结性能,最大限度发挥玄武岩FRP筋抗拉强度高的特点。

关键词:玄武岩FRP筋混凝土梁;对比试验;力学性能;配筋率

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)04-0082-04

Experimental Research on Flexural Behavior of Basalt FRP Reinforced Concrete Beams

Song Yang¹, Zhang Xiangdong¹, He Min²

(1. College of Civil Engineering and Architectural, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. China Railway 13th Bureau Group Company, Tianjin 300308, China)

Abstract: Static loading tests were performed for six basalt FRPs reinforced concrete beams and six reinforced concrete beams. The effects of different longitudinal reinforcement ratios on the mechanical behavior of basalt FRP reinforced concrete beams and reinforced concrete beams were studied. The flexural capacity, failure mode, flexibility deformation and crack distribution were analyzed. The test shows that load-deflection curve of the basalt FRP reinforced concrete beams is almost a straight line, but still performs a better ductility at the late loading stage. Cracking load and ultimate load are lower than that of the reinforced concrete beams, but crack width can be controlled within 2.5 mm, and the crack spacing is wider than that of the reinforced concrete beams. The deflection of the basalt FRP reinforced concrete beam is larger than that of reinforced concrete beams, so better non-peeling basalt FRP tendons should be made to ensure adequate bond strength with the concrete, which can maximize high tensile strength of basalt FRP tendons.

Keywords: basalt FRP reinforced concrete beam; contrast test; mechanical property; reinforcement ratio

钢筋锈蚀导致钢筋混凝土结构的过早失效已引起世界各国高度重视。在美国近期调查中,混凝土结构中钢筋锈蚀约占全美各种腐蚀的40%;日本新干线运行不到10年,由于钢筋锈蚀造成混凝土大面积开裂、剥蚀;我国超过90%的建筑为钢筋混凝土结构,在长期服役过程中受到高湿度、酸、碱、盐类介质的腐蚀,钢筋锈蚀导致建筑结构的耐久性和安全性均极大的下降^[1-3]。因此,研发具有较强耐腐蚀性的钢筋替代产品已迫在眉睫。

玄武岩纤维,是玄武岩石料在1450~1500℃熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板高速拉制而成的连续纤维。类似于玻璃纤维,其性能介于高强度S玻璃纤维和无碱E玻璃纤维之间,纯天然玄武岩纤维的颜色一般为褐色,有些似金色,其具有良好的耐高温、抗氧化、抗辐射和隔音隔热等性能,且玄武

岩纤维拉伸强度高于钢筋,不易发生锈蚀^[4]。玄武岩增强树脂基复合材料(FRP)筋弹性模量较小,属于脆性材料,其所表现出的力学性能与钢筋之间呈现较大差异,如果作为受力筋材使用,需要对玄武岩FRP筋混凝土梁性能进行深入研究,以达到结构的安全性。目前,关于碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋混凝土梁的研究较多^[5-7],但对于玄武岩FRP筋混凝土梁的研究仅处于起步阶段^[8]。着重通过玄武岩FRP筋混凝土梁与钢筋混凝土梁(共12根梁)的静力加载对比试验,对不同纵筋配筋率条件下玄武

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51174268);辽宁省自然科学基金(2051207)

联系人:宋洋,讲师,主要从事工程结构加固

收稿日期:2014-01-16

岩 FRP 筋混凝土梁的受力性能进行了深入研究。

1 实验部分

1.1 原材料

玄武岩 FRP 筋:上海俄金玄武岩纤维有限公司。

1.2 仪器

位移计:YHD 型,南京赛峰科技仪器实业有限公司;

裂缝宽度深度综合测试仪:TY71 型,天津津维公司;

应变计:YJ2 型,深圳市盛万江传感技术有限公司。

1.3 玄武岩 FRP 筋基本力学性能试验

选用 4 种直径的玄武岩 FRP 筋,分别为 6,12,16,19 mm,其基本力学性能如表 1 所示。

表 1 玄武岩 FRP 筋的力学性能参数

杆直径 / mm	断裂载荷 / kN	破坏极限应力 / MPa	拉伸弹性模量 / MPa
6	95	212.3	60 162
12	88	210.2	60 060
16	72	208.6	59 863
19	64	206.6	59 812

1.4 其它材料

试验中钢筋选用 $\Phi 14$ 钢筋,屈服强度 378 MPa,抗拉强度 556 MPa,伸长率 54%;箍筋选用 $\Phi 8$ 钢筋,屈服强度 325 MPa,抗拉强度 490 MPa,伸长率 23%;混凝土的设计强度等级为 C30,其平均抗压强度为 41.00 MPa,由 3 组 150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm 的立方体标准试块在 28 d 标准养护条件下测得。

2 试验概况

2.1 试验梁设计

试验共设计 12 根简支梁,M1,M2 和 M3 系列梁底部配置钢筋,M4,M5 和 M6 系列梁底部配置玄武岩 FRP 筋,每一系列梁制作两根试件。梁试件全长为 2 060 mm,截面尺寸为 200 mm $\times$ 300 mm,净跨径为 1 800 mm。具体参数见表 2,配筋率是钢筋混凝土构件中纵向受力(拉或压)钢筋的面积与构件的有效面积之比。梁构造配筋见图 1。

2.2 试验加载

试验加载装置如图 2 所示。位移计测量跨中挠度变形值,应变计测量试验梁截面不同高度处应变值。加载方式采用分级加载,第一条裂缝生成之前每级所加载荷为 5 kN,之后每级所加载荷降为 3

表 2 试验梁基本参数

试件系列	混凝土强度等级	上部筋	下部筋	配筋率
M1	C30	2 $\Phi 14$	S2 $\Phi 12$	0.36
M2			S2 $\Phi 16$	0.77
M3			S3 $\Phi 16$	1.15
M4			B2 $\Phi 12$	0.36
M5			B2 $\Phi 16$	0.77
M6			B3 $\Phi 16$	1.15

注:S 为普通钢筋;B 为玄武岩 FRP 筋,每一系列包括两根试验梁。

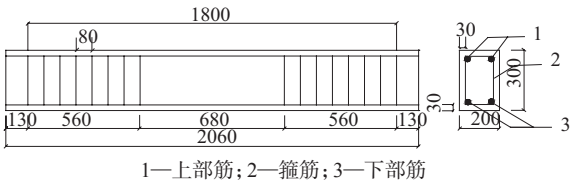


图 1 梁配筋及尺寸

kN,每一级载荷施加后均要保持载荷 2 min,待载荷与变形稳定后记录各试验数据。试验梁试件屈服后,而裂缝发展又较宽时,不再逐级加载,连续加载直至破坏。



图 2 试验加载装置现场

试验过程中使用裂缝测量仪观察试件的裂缝宽度及开展情况;

观测载荷、挠度及结构材料应变;记录试件裂缝出现的位置、开展及试件破坏形态;观测各项参数变化。

3 试验结果分析

3.1 试验现象及分析

加载初期,玄武岩 FRP 筋混凝土梁处于全截面工作状态,载荷—挠度曲线呈线性状态;随着载荷持续增加,混凝土梁底部受拉区域逐渐达到混凝土极限抗拉强度,在其最不利截面处产生第一条裂缝。此时,混凝土梁产生应力重分布,最不利截面处受拉区混凝土不再承受载荷,而是由玄武岩 FRP 筋继续承受拉应力。由于玄武岩 FRP 筋拉伸弹性模量值较小,混凝土受压区域迅速减小,裂缝数量持续增加,载荷—挠度曲线依然呈近似直线状态,但斜率较屈服前明显变小,挠度增长速率明显加快。图 3 为不同配筋率玄武岩 FRP 筋梁载荷—挠度曲线。由图 3 可知,随着配筋率的增加,玄武岩 FRP 筋混凝土

土梁极限载荷值不断提高,挠度也随之变大。在玄武岩 FRP 筋屈服后,混凝土梁承载能力仍在不断提高,梁试件表现出较好的延性特征。每一系列梁虽然配比相同,但是因为实验条件、试件制作与养护过程存在一定的偶然因素,所以试验结果略有差异,但整体发展趋势基本一致。

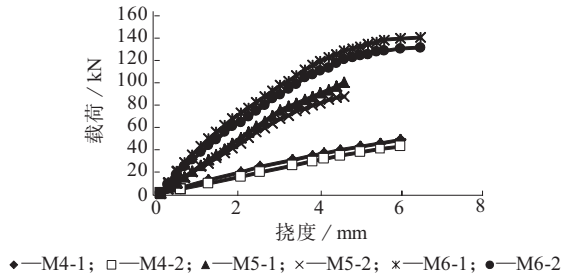


图 3 玄武岩 FRP 筋梁载荷—挠度曲线

图 4 为 M1~M6 梁载荷—挠度曲线。由图 4 可知, M1, M2 和 M3 系列钢筋混凝土梁在加载初期时段应力迅速增加,挠度增加较为缓慢; M4, M5 和 M6 系列玄武岩 FRP 筋混凝土梁应力增长较为缓慢,挠度则增加较快。其原因是,玄武岩 FRP 筋自身拉伸弹性模量较小,在梁试件变形较小时,应力很难有较大增幅。

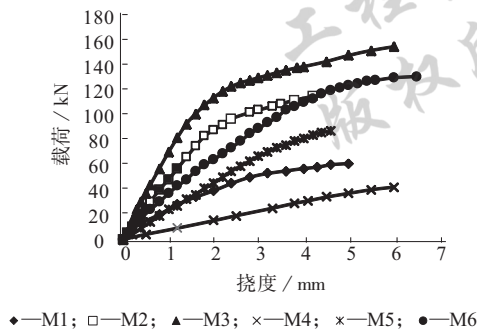


图 4 M1~M6 梁载荷—挠度曲线

3.2 特征载荷

玄武岩 FRP 筋混凝土梁与钢筋混凝土梁具有相似的开裂机理,当混凝土所受应力达到其抗拉强度时就会产生裂缝。裂缝产生后,开裂截面混凝土不再承受载荷,应力通过混凝土与玄武岩 FRP 筋之间粘结力传递给玄武岩 FRP 筋。在试验过程中很难准确捕获梁试件第一条裂缝产生时的载荷值,所以表 3 仅给出各系列梁试件实测开裂载荷范围值。由表 3 可知, M4, M5 和 M6 系列梁实测开裂载荷值略高于理论计算值。原因有两方面,一是现行规范中截面抵抗弯矩塑性影响系数取值偏于保守;二是玄武岩 FRP 筋配筋率对开裂弯矩会产生一定的影响,但是影响较小,原因是当梁达到开裂弯矩时,

纵筋所受应力较小,此时的开裂弯矩值主要取决于混凝土抗拉强度值大小。

表 3 梁试件开裂载荷实测值与理论值对比 kN

项 目	试件系列					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
实测开裂载荷	25 ~ 35	55 ~ 65	60 ~ 70	25 ~ 35	25 ~ 35	35 ~ 45
理论开裂载荷	27.6	55.6	61.3	27.6	22.4	29.8

表 4 给出了各系列梁试件的实测极限载荷值与理论计算值,理论计算值根据 GB 50608—2010《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》^[9] 计算得到。由表 4 可以看出,玄武岩 FRP 筋混凝土梁的理论极限载荷值略大于实测值,这是因为玄武岩 FRP 筋混凝土梁破坏时,玄武岩 FRP 筋并没有完全被拉断。玄武岩 FRP 筋属于脆性材料,不具有钢筋那样明显的屈服点,随着载荷的不断增大,筋材表面出现擦痕或者筋材中的纤维发生断裂,导致玄武岩 FRP 筋与混凝土之间发生剥离滑移,造成玄武岩 FRP 筋混凝土梁的极限载荷值略低于钢筋混凝土梁。

表 4 梁试件极限载荷实测值与理论值对比 kN

项 目	试件系列					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
实测极限载荷	58	120	158	47	89	132
理论极限载荷	54.6	122.3	152.2	69.6	130	177

3.3 裂缝特征

玄武岩 FRP 筋混凝土梁在加载过程中的受力性能与普通钢筋混凝土梁相类似。梁试件第一条微小裂缝出现在跨中底面,随着载荷的增加,梁的剪应力不断增大,两侧剪跨段相继出现斜裂缝,并且向梁顶和加载中心点延伸;当钢筋和玄武岩 FRP 筋达到屈服后,裂缝宽度迅速变宽,向上延伸的趋势加快。但是,由于玄武岩 FRP 筋的拉伸弹性模量较小,玄武岩 FRP 筋混凝土梁为同类型钢筋混凝土梁裂缝宽度的 3 倍多,因此计算玄武岩 FRP 筋混凝土梁裂缝宽度时不能直接套用钢筋混凝土梁裂缝宽度的计算公式。

(1) 裂缝宽度。

在梁试件开裂初期,裂缝宽度缓慢增加,当受力钢筋达到屈服极限后,裂缝迅速加宽,导致梁试件截面转角也不断变大,随即梁试件产生破坏。由于玄武岩 FRP 筋弹性模量较小,与钢筋相比,在相同载荷作用下,应变较大,所以梁试件的挠度变形也较大。在配筋率恰当时,玄武岩 FRP 筋混凝土梁破坏时裂缝宽度最大值小于 2.5 mm,且大部分位于

2.0 mm 以内,在玄武岩 FRP 筋混凝土梁使用过程中对裂缝宽度需要严格控制。

(2) 裂缝间距。

表 5 列出各梁裂缝条数和裂缝间距。由表 5 可知,裂缝条数与裂缝间距受配筋率的影响较大。在加载初期,裂缝集中出现在纯弯段,这是由弯矩变化产生的且与拉应力方向垂直的竖向裂缝;随着载荷的不断增加,纯弯区以外产生了大量由剪应力引起的斜向裂缝。裂缝的间距随着梁试件配筋率的增加而逐渐减小,减小的幅度由 FRP 筋的类型所决定。不同类型的 FRP 筋与混凝土之间粘结性能有所差异,粘结性能较好则 FRP 筋梁的裂缝宽度与裂缝间距变小,反之则变大。

表 5 各梁裂缝条数和裂缝间距

试件系列	实测裂缝条数 / 条	实测平均间距 / mm
M1	7	100
M2	13	85
M3	15	70
M4	4	200
M5	6	165
M6	8	90

图 5 给出了钢筋混凝土梁 M2 与玄武岩 FRP 筋混凝土梁 M5 裂缝发展图。由图 5 可见,玄武岩 FRP 筋混凝土梁的裂缝分布对称均匀,裂缝间距明显大于钢筋混凝土梁。两种配筋梁竖向裂缝最终均延伸至加载点处,加载后期,由于加载点的局部承压产生应力集中,在加载点处还会出现少量水平裂缝。

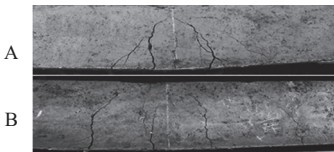


图 5 试件裂缝发展对比图

4 结论

(1) 玄武岩 FRP 筋拉伸弹性模量较小,当玄武岩 FRP 筋承受载荷时,梁试件将产生较大的变形,破坏前有较为明显的预兆,类似于适筋梁破坏,说明玄武岩 FRP 筋混凝土梁具有较好的延性。

(2) 玄武岩 FRP 筋混凝土梁的开裂载荷与极限载荷相比钢筋混凝土梁略低。

(3) 玄武岩 FRP 筋混凝土梁破坏时产生的裂缝以弯曲裂缝为主,剪跨段有部分斜裂缝。且裂缝分布对称均匀,裂缝间距略大于钢筋混凝土梁。

(4) 玄武岩 FRP 筋混凝土梁产生的挠度较大,应提高玄武岩 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能,最大限度发挥玄武岩 FRP 筋抗拉强度高的特点。

参考文献

[1] 付凯,王伟,薛伟辰.模拟混凝土环境下 GFRP 筋抗压性能加速老化试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):115-122.
Fu Kai, Wang Wei, Xue Weichen. Accelerated aging test for evaluation of compressive properties of GFRP rebars under simulated concrete environment [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1):115-122.

[2] 孙晓燕,董伟伟,王海龙,等.侵蚀性环境下桥梁 CFRP/BFRP 加固后的长期性能试验[J].中国公路学报,2013,26(2):77-84.
Sun Xiaoyan, Dong Weiwei, Wang Hailong, et al. Experiment for long-term performance of bridge girders strengthened with CFRP/BFRP sheets and subjected to erosion environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2):77-84.

[3] 邓宗才,李凯.预应力与非预应力 AFRP 加固腐蚀钢筋混凝土梁疲劳性能研究[J].预应力技术,2013,4(4):3-9.
Deng Zongcai, Li Kai. Experimental study on fatigue performance corroded reinforced concrete beams strengthened with prestressed AFRP sheets[J]. Prestress Technology, 2013, 4(4):3-9.

[4] 李为民,许金余,沈刘军.玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J].复合材料学报,2008,25(2):135-142.
Li Weimin, Xu Jinyu, Shen Liujun. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. Acta Material Compositae Sinica, 2008, 25(2):135-142.

[5] 王继兵,周德源,雷真.BFRP 加固砌体结构试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(2):56-61.
Wang Jibing, Zhou Deyuan, Lei Zhen. Experimental studies on masonry structures reinforced by BFRP[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(2):56-61.

[6] 闫松,王兴国.无粘结预应力 CFRP 板加固 RC 梁预应力损失研究[J].工程塑料应用,2013,41(4):40-42.
Yan Song, Wang Xingguo. Prestress loss study on RC beams strengthened with unbonded CFRP laminate[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(4):40-42.

[7] 王雪松,金贤玉,田野.开裂混凝土中钢筋加速锈蚀方法适用性[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(4):565-574.
Wang Xuesong, Jin Xianyu, Tian Ye. Applicability of accelerated corrosion method of steel bars in cracked concrete structure[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(4): 565-574.

[8] Sim J, Park C, Do Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete[J]. Structures, Composites:Part B, 2005, 36:504-512.

[9] 中国冶金建设协会.GB 50608-2010 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S].北京:中国计划出版社,2010:421-426.
China Metallurgical Construction Association.GB 50608-2010 Technical code for infrastructure application of FRP composites[S]. Beijing:China Planning Press, 2010:421-426.