

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.03.001

新型玄武岩 FRP 筋加固结构性能研究^{*}

宋洋¹, 张向东¹, 和敏², 祝百茹¹

(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: 针对钢筋锈蚀在工程加固领域中带来的严重安全生产问题, 应用具有极强耐腐蚀性的新型玄武岩增强塑料 (BFRP) 筋, 内嵌加固混凝土梁结构。制作 7 根混凝土梁进行静力加载试验, 研究采用不同直径、加固数量的 BFRP 筋加固试件的受力性能, 对其受力过程、破坏形态、承载力、变形和裂缝发展情况进行分析。结果表明, 采用新型 BFRP 筋对混凝土结构进行加固可以有效增加结构的开裂载荷与极限载荷, 开裂载荷提高 73.88%~165.01%, 极限载荷提高 62.16%~72.90%; 且有效减小加固构件的变形, 延缓裂缝开展。但并不是加固筋材数量越多加固效果越好。BFRP 筋可以推广应用在易受腐蚀地区代替钢筋进行结构加固工作。

关键词: 玄武岩纤维增强塑料筋; 内嵌法; 混凝土梁; 加固; 力学性能

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)03-0001-04

Experimental Study on Reinforcement Structural with New Basalt FRP Tendons

Song Yang¹, Zhang Xiangdong¹, He Min², Zhu Bairu¹

(1. School of Civil Engineering and Architectural, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. China Railway 13th Bureau Group Company, Tianjin 300308, China)

Abstract: Aiming at the serious production safety problems caused by corrosion of steel in the field of engineering reinforcement, new basalt fiber reinforced plastics (BFRP) tendons was applied to reinforce concrete beams. Seven concrete beams under monotonic loads were tested. Behavior of concrete beams strengthened with different diameter and number of BFRP tendons were studied. Based on tested values of concrete beams strengthened with new BFRP tendons, the stressing process, failure capacity, flexural capacity, deformation and crack distribution were studied. The test shows that strengthening technique using new BFRP tendons bonding in concrete cover can enhance the first-crack load and steel-yielding load of beams compared with the ordinary beam, the crack loads increased by 73.88% to 165.01%, the limit bearing capacities increased by 62.16% to 72.90%. The BFRP tendons can limit the crack width all the way up to failure and reduces deformation of reinforcement effectively. The reinforcement effect of the concrete beams is not better than the concrete beams strengthened with more BFRP tendons. BFRP tendons can be widely used in structure reinforcement instead of steel in susceptible to corrosion area.

Keywords: BFRP tendons; near surface mounted; concrete beams; strengthening; mechanical properties

钢筋长期在水泥中容易产生锈蚀造成建筑结构的破坏, 是安全生产必须面对的问题。近几年, 我国成功研发出玄武岩纤维制品, 其具有良好的耐高温、抗氧化、抗辐射和隔音隔热等性能^[1]。玄武岩纤维的拉伸强度高于钢筋, 且不易发生锈蚀。玄武岩连续纤维编织物和玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋可用来加固受损的建筑结构, 起到结构补强和抗震加固的作用, 尤其是经常被用在高湿度、酸、碱、盐类介质作用的建筑结构中, 能有效防止建筑物发生裂缝、龟裂等质量问题。内嵌法是将 FRP 板条或筋材植入加固构件的表面 (混凝土保护层内), 从而提高结构的承载力^[2]。

目前, 关于碳纤维增强塑料 (CFRP) 和玻璃纤

维增强塑料 (GFRP) 加固混凝土梁研究较多, 而 BFRP 进入市场较晚, 国内外对其研究较少。王继兵等^[3]通过模拟在地震条件下, 研究 BFRP 加固砌体结构的抗震性能。结果表明: 玄武岩纤维加固可以有效延缓墙体裂缝发展, 提高砖墙变形和承载能力, 增加结构整体性, 同时结构抗震性能得到显著改善。欧阳煜等^[4]采用不同方式粘贴玄武岩纤维布加固混凝土梁结构进行抗剪受力分析。试验结果表明, 玄武岩纤维布的抗剪原理与箍筋作用原理相似,

^{*} 国家自然科学基金项目 (50978131), 辽宁省自然科学基金项目 (2051207)

联系人: 宋洋, 讲师, 主要从事工程结构加固材料研究工作

收稿日期: 2014-01-02

可以大幅度地提高梁的刚度,从而提高梁的跨中位移以及梁的抗剪承载力。闫志刚等^[5]利用玄武岩纤维水泥与玄武岩纤维布对混凝土裂缝进行加固,试验结果表明:玄武岩纤维水泥砂浆与玄武岩纤维布结合使用,显著提高了构件耐久性、抗裂性和抗弯承载能力。笔者首先测试了新型 BFRP 筋的基本力学性能,随后应用新型 BFRP 筋内嵌加固混凝土梁展开静力加载试验研究,通过对 1 根对比梁和 6 根内嵌 BFRP 筋加固梁进行对比试验,对加固后混凝土梁的开裂载荷、屈服载荷、极限载荷、挠度和裂缝特征进行细致研究。

1 材料力学性能

1.1 BFRP 筋基本力学性能试验

试验装置如图 1 所示。试验选用 BFRP 筋由上海俄金玄武岩纤维有限公司加工生产,共选用四种直径的 BFRP 筋,分别为 8, 12, 16, 20 mm, 标记为 Ø8, Ø12, Ø16 和 Ø20, 通过拉伸试验得到的 BFRP 筋的破坏极限应力、拉伸弹性模量, 如表 1 所示。



图 1 试验装置

表 1 BFRP 筋的力学性能参数

筋径 / mm	断裂载荷 / kN	破坏极限应力 / MPa	拉伸弹性模量 / MPa
8	95	212.3	60 162
12	88	210.2	60 060
16	72	208.6	59 863
20	64	206.6	59 812

从表 1 可以看出, BFRP 筋的破坏极限应力较高, 随着直径的增加, 其破坏极限应力随之减小。在拉伸全过程中, 其为脆性材料。

1.2 粘合剂指标

试验选用 JGN803 改性环氧树脂灌注型粘合剂, 在室温条件下, 进行一系列性能试验, 具体结果见表 2。

表 2 JGN 型粘合剂实测结果

项目名称	实测结果	性能指标	结果评定
断裂伸长率 / %	2.1	≥ 1.5	合格
拉伸弹性模量 / MPa	3.9×10^3	$\geq 3.6 \times 10^3$	合格
轴心拉伸强度 / MPa	34.1	≥ 33	合格
剪切强度 / MPa	18.9	≥ 18	合格
压缩强度 / MPa	69.7	≥ 65	合格
正拉粘结强度 / MPa	3.5	≥ 2.5	合格
弯曲强度 / MPa	47.2	≥ 45	合格

1.3 其它材料

试验梁所用钢筋选用 Ø14 钢筋, 屈服强度为 378 MPa, 极限强度为 556 MPa, 伸长率为 54%; 箍筋选用 Ø6 钢筋, 试验中选用的混凝土强度等级为 C30, 其立方体压缩强度平均值为 40.73 MPa。

2 试验概况

2.1 加固方案设计

试验过程中选取 BFRP 筋的直径大小和加固量两个指标进行设计, 试验共设计 7 根钢筋混凝土梁试件^[6-7], 依据参数不同分为 4 组梁, 其中 M1 系列梁 (共 1 根梁) 为未加固梁作为对比梁, M2, M3 和 M4 系列梁 (每组 2 根梁) 为加固梁, 梁试件截面尺寸为 200 mm × 300 mm, 梁长为 2 060 mm, 实际净跨径 1 800 mm, 选取 Ø16 和 Ø20 做为补强筋, 具体参数见表 3, 梁配筋及开槽位置见图 2。

表 3 试验梁基本参数

梁编号	混凝土强度等级	配钢筋	钢箍筋	加固方式	BFRP 筋数量
M 1-1	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	
M 2-1	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	2Ø16
M 2-2	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	2Ø16
M 3-1	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	2Ø20
M 3-2	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	2Ø20
M 4-1	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	3Ø20
M 4-2	C30	4Ø14	Ø6@80	内嵌	3Ø20

注: 4Ø14 表示 4 根 Ø14 钢筋; 2Ø16 表示 2 根 Ø16 BFRP 筋; Ø6@80 表示间隔 80 mm 的 Ø6 钢箍筋。

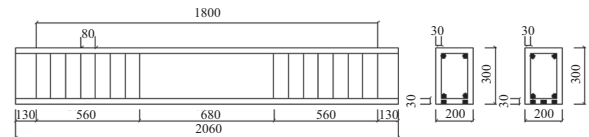


图 2 梁配筋及开槽位置图

Lorenzis^[8]提出最合适的槽口尺寸为内嵌 FRP 筋直径的两倍。因此将开槽高、宽尺寸确定为 25 mm, 具体步骤为:

(1) 在混凝土梁底面受拉区域用切割机切割开槽, 确保混凝土表层干爽不湿, 槽内无杂物;

(2) 将粘合剂主剂与固化剂分别搅拌以消除沉淀物, 然后按质量比 2 : 1 倒入混合容器, 充分搅拌直至呈现均匀灰色;

(3) 灌注粘合剂至沟槽内一半高度时, 嵌入 BFRP 筋, 轻轻按压使 BFRP 筋与粘合剂密实接触, 随后将槽内注满粘合剂并用刮刀将底面刮平, 养护 7 d 后, 即可进行加载试验。

加固构件如图 3 所示。嵌入法加固构件的预处理工程量较少, 与传统的外贴法加固相比, 节省大量

安装时间,避免了外贴法加固时繁重的打磨、修补、整平等工序,使工作效率得到了极大地提高。

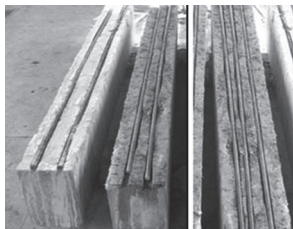


图3 加固后的构件

2.2 加载流程及测试内容

试验加载装置如图4所示。位移计监测跨中挠度变形值,应变计测量试验梁截面不同高度处的应变值。采用分级加载,裂缝出现前每级加载为5 kN,裂缝出现后每级加载3 kN,每一级加载完毕,持荷2 min,记录试验数据,待裂缝发展较宽后,不再逐级加载,连续加载直至破坏。



图4 试验加载装置现场

试验中通过裂缝测量仪记录试验梁开裂宽度及裂缝延伸情况,并记录试验梁载荷、挠度以及应变变化,观察梁破坏时形态。

3 试验结果分析

3.1 破坏模式

内嵌法加固受弯构件的破坏形式分为以下三种:一为弯曲破坏,分为混凝土压碎与FRP筋拉断两种形式,当加载超过加固梁抗弯极限承载力后,即产生弯曲破坏。二为剪切破坏,当加固梁试件的抗弯承载力超过梁固有的受剪承载力时,构件在弯曲破坏前首先产生受剪破坏,这种情况产生时,起加固作用的FRP筋没有充分发挥其作用,所以应尽量避免此种情况发生。三为剥离破坏,即胶结界面滑移,加固梁试件在未达到抗弯和抗剪极限承载力时发生混凝土与FRP筋分离,致使构件失去承载能力。

在加载过程中M4系列加固梁粘合剂出现连续断裂的响声,这是由于梁试件开裂造成BFRP筋与粘结剂发生剥离引起的。梁试件失去承载力时,产生明显的挠度变形,具有延性破坏特征。

3.2 试验结果

具体试验结果见表4。从表4可以看出,除了

M4-1, M4-2加固梁发生了混凝土局部剥离破坏外, BFRP筋与粘合剂之间没有出现剥离破坏现象。加固试验梁的开裂载荷、屈服载荷和极限载荷提高也都非常明显, M2系列梁的开裂载荷平均提高了73.88%,屈服载荷平均提高了40.04%,极限载荷平均提高了62.16%; M3系列梁的开裂载荷平均提高了112.75%,屈服载荷平均提高了56.43%,极限载荷平均提高了73.68%; M4系列梁的开裂载荷平均提高了165.01%,屈服载荷平均提高了77.49%,极限载荷平均提高了72.90%。从表4可以看出,开裂载荷值和屈服载荷值均随着BFRP筋直径和数量的增加而增加。在极限载荷值上, BFRP筋直径大小的影响较为明显,但是在加固数量上, M4系列梁的极限载荷值与M3系列相比略有下降。

表4 加固梁试验结果

梁编号	开裂载荷 / kN	屈服载荷 / kN	极限载荷 / kN	梁破坏模式
M1-1	30.67	90.35	120.48	弯曲破坏,混凝土被压坏
M2-1	56.13	128.24	198.67	混凝土被压坏,筋材未断,弯曲破坏
M2-2	50.53	124.81	192.07	混凝土被压坏,筋材未断,弯曲破坏
M3-1	62.27	140.05	208.38	混凝土被压坏,筋材未断,弯曲破坏
M3-2	68.23	142.62	210.11	混凝土被压坏,筋材未断,弯曲破坏
M4-1	80.51	159.50	207.12	混凝土局部剥离,筋材未断,弯曲破坏
M4-2	82.05	161.23	209.51	混凝土局部剥离,筋材未断,弯曲破坏

3.3 变形分析

各系列梁跨中载荷—挠度曲线如图5所示。

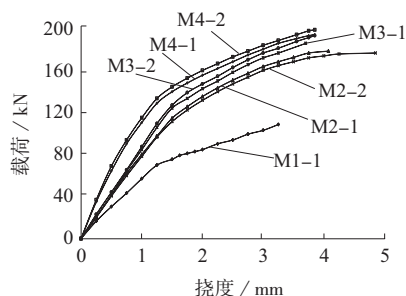


图5 加固梁跨中载荷—挠度曲线

从图5可知,内嵌BFRP筋加固混凝土梁能够大幅度提高梁的载荷。当BFRP筋加固数量相同,而直径不同时,在同一载荷作用下, M2系列梁跨中挠度大于M3系列梁;当BFRP筋直径相同,而加固数量不同时,在同一载荷作用下, M3系列梁跨中挠度大于M4系列梁。这些现象表明,增加BFRP筋的数量和直径大小,均可以有效地抑制挠度的发展,增加BFRP筋数量的加固梁其跨中挠度比增加

BFRP 筋直径的加固梁跨中挠度发展缓慢,说明增加 BFRP 筋数量抑制梁的跨中挠度效果更为显著。

表 5 给出了各试验梁破坏时裂缝分布情况,包括开裂时的裂缝宽度、长度、裂缝条数及破坏时裂缝最大宽度和平均间距。

同对比梁相比较,加固梁试件裂缝出现得较晚,对比梁加载至 30 kN 左右时出现第一条裂缝,而加固梁加载至 60 kN 左右时才出现裂缝。破坏形态为加固梁的弯剪段出现斜向裂缝向加载点发展,纯弯段裂缝缓慢向上发展,裂缝不断扩展、变通、贯通,分布均匀对称。梁的刚性降低,斜向裂缝大到一定程度后,部分 BFRP 筋与混凝土产生滑移,筋材表面出现擦痕,裂缝迅速增大,混凝土发生折断破坏。当增加加固筋材直径或者加固量时,混凝土梁的承载能力明显提高,破坏形态相似。M2 系列梁破坏时裂缝宽度为 1.9~2.2 mm, M3 系列梁破坏时裂缝宽度为 1.8~2.2 mm, M4 系列梁破坏时裂缝宽度为 1.4~1.5 mm,加固梁与对比梁相比,破坏时裂缝宽度减小,长度变短,开裂条数也减少,而且裂缝分布间距加大。这说明用 BFRP 筋加固混凝土梁,不但能大幅提高开裂载荷,还能控制裂缝发展。

表 5 加固梁裂缝统计结果

梁编号	开裂时裂缝宽度 / mm	开裂时裂缝长度 / mm	开裂时裂缝条数 / 条	破坏时裂缝最大宽度 / mm	破坏时裂缝平均间距 / mm
M1-1	0.01	21	3	2.8	100
M2-1	0.01	13	2	1.9	120
M2-2	0.01	8	1	2.2	129
M3-1	0.02	10	1	1.8	128
M3-2	0.02	12	2	1.9	135
M4-1	0.03	11	2	1.5	152
M4-2	0.03	9	1	1.4	147

4 结论

(1) 采用新型 BFRP 筋进行结构加固,可以显著提高其开裂载荷、屈服载荷、极限载荷。其中 M2 系列梁的开裂载荷平均提高了 73.88%,屈服载荷平均提高了 40.04%,极限载荷平均提高了 62.16%; M3 系列梁的开裂载荷平均提高了 112.75%,屈服载荷平均提高了 56.43%,极限载荷平均提高了 73.68%; M4 系列梁的开裂载荷平均提高了 165.01%,屈服载荷平均提高了 77.49%,极限载荷平均提高了 72.90%。

(2) 根据试验分析结果可知,增加 BFRP 筋的直径可以有效地提高混凝土梁的加固效果;增加 BFRP 筋的加固数量,极限载荷值反而略有下降,说明加固效果并不随着加固材料数量增加而变得越

好。

(3) 增加 BFRP 筋的数量和直径大小,均可以有效地减小构件的变形、延缓裂缝的出现,且裂缝宽度减小,长度变短,开裂条数减少,裂缝分布间距加大。

(4) BFRP 筋加固混凝土梁能够显著提高其受力性能,加之其具有优异的耐腐蚀性,在沿海地区推广代替钢筋进行结构加固,可以取得较好的社会和经济效益。

参考文献

- [1] 欧阳利军,丁斌,陆洲导.玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2010(3):84-88.
Ouyang Lijun, Ding Bin, Lu Zhoudao. BFRP and its application review in structural strengthening[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2010(3):84-88.
- [2] De Lorenzis L, Teng J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2):119-143.
- [3] 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.
- [4] 欧阳煜,张云超,李翔.玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(1):134-137.
Ouyang Yu, Zhang Yunchao, Li Xiang. The research on shear capacity of RC beams strengthened with BFRP sheets[J]. Industrial Construction, 2009, 39(1):134-137.
- [5] 闫志刚. 玄武岩纤维修复加固综合法修补混凝土结构裂缝的研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2011, 29(1):28-31.
Yan Zhigang. Research on concrete structure cracks with integrated basalt fiber repair and reinforcement method[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2011, 29(1):28-31.
- [6] 陈建伟,胡海涛,王希宾,等.玄武岩纤维加固混凝土梁的冻融试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(3):27-30.
Chen Jianwei, Hu Haitao, Wang Xibin, et al. Experiment with the freeze-thaw of the concrete beams reinforced by BF[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(3):27-30.
- [7] Malek A M, Saadatmanesh H, Ehsani M R. Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP late due to stress concentration at the plate end[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(2):142-153.
- [8] Lorenzis, Antonio Nanni, Antonio La Tegola. Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods[C] // International Meeting on Composite Materials, Plastic & Rubber 2000. Milan: 2000:9-11.