

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.020

GFRC 梁与 BFRC 梁抗爆性能对比试验*

许凯^{1a}, 张竣博^{1a}, 姚润^{1a}, 蔡路军^{1b,2}, 冯谦³

(1. 武汉科技大学 a. 城市建设学院; b. 理学院, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;
3. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 武汉 430070)

摘 要: 玻璃纤维与玄武岩纤维在土木工程领域已有广泛应用, 掺入玻璃纤维与玄武岩纤维可以改善混凝土材料的力学性能, 研究表明掺入纤维后的钢筋混凝土(RC)构件, 其抗爆性能得到了提高, 当体积掺入率为0.2%时, 这两种纤维提升混凝土抗爆性能的作用更明显。对强度等级为C40普通混凝土试块、体积掺入率为0.2%的玻璃纤维混凝土试块以及同等掺入率的玄武岩纤维混凝土试块进行抗压强度试验和劈裂抗拉试验, 对比两种纤维对混凝土材料力学性能的影响。材料力学性能试验结果显示: 掺入纤维后的两种混凝土材料, 其抗压强度、劈裂抗拉强度均有提高。为了比较玻璃纤维混凝土(GFRC)梁与玄武岩纤维混凝土(BFRC)梁的抗爆性能, 制作了普通RC梁、GFRC梁及BFRC梁各一根, 并对每根试验梁分别施加了4次爆炸荷载, 观察梁的动态响应和表面损伤情况。试验结果表明: 纤维的掺入提高了混凝土材料的韧性, 能够有效降低试验梁在爆炸荷载下的动态响应。对于体积掺入率为0.2%的GFRC梁, 其加速度峰值与应变峰值比BFRC梁更小, 且GFRC梁体表面的混凝土剥落面积与裂缝数量亦小于BFRC梁。

关键词: 混凝土; 玄武岩纤维; 玻璃纤维; 动态响应; 抗爆性能

中图分类号: TU375.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0196-07

Comparative Study on Blast Resistance of GFRC and BFRC Beams

XU Kai^{1a}, ZHANG Jun-bo^{1a}, YAO Run^{1a}, CAI Lu-jun^{1b,2}, FENG Qian³

(1. a. School of Urban Construction; b. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Intelligent Blasting, Wuhan 430065, China; 3. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Glass and basalt fibers have been extensively utilized in civil engineering applications, and their inclusion can enhance the mechanical properties of concrete materials. Empirical studies indicate that integrating fibers into reinforced concrete(RC) components augments their blast resistance. Specifically, at a volume incorporation rate of 0.2%, the efficacy of these fibers in enhancing the anti-explosion performance of concrete is notably pronounced. This investigation involves the design of standard concrete test blocks with a strength grade of C40, alongside glass fiber reinforced concrete(GFRC) and basalt fiber reinforced concrete(BFRC) test blocks, each with a volume incor-

收稿日期(Date of reception): 2022-11-02

网络首发日期(Published online): 2026-06-15

作者简介: 许凯(1975-), 男, 副教授, 主要从事计算力学与结构试验等研究, (E-mail) xukai@wust.edu.cn。

通信作者: 冯谦(1982-), 男, 教授, 主要从事工程安全与灾害防治等领域研究, (E-mail) qfengwh@foxmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51878628)碳纤维复合多芯光纤布及其结构加固与监测一体化系统

About the author: XUKai (1975-), male, Associate Professor, primarily engaged in research on computational mechanics and structural testing, (E-mail) xukai@wust.edu.cn.

Corresponding author: FENG Qian (1982-), male, Professor, primarily engaged in research in the fields of engineering safety and disaster prevention, (E-mail) qfengwh@foxmail.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China(No. 51878628) Carbon Fiber Composite Multi-core Fiber Fabric and Its Integrated System for Structural Strengthening and Monitoring

poration rate of 0.2%. These specimens undergo compressive and split tensile strength tests to evaluate the influence of the respective fibers on concrete's mechanical properties. The results demonstrate an improvement in the mechanical characteristics of both fiber-reinforced concretes. To assess the blast resistance of GFRC and BFRC beams, three types of beams—ordinary reinforced concrete (RC), GFRC, and BFRC—were constructed. Each beam was subjected to four explosive loads to observe the dynamic response and surface damage. The findings reveal that fiber reinforcement enhances concrete toughness and significantly mitigates the dynamic response of the beams under explosive loading conditions. Specifically, GFRC beams with a 0.2% volume fiber content exhibited lower peak accelerations and strains compared to BFRC beams, and the GFRC beams' surfaces showed reduced spalling and crack formation relative to BFRC beams.

Key words: concrete; glass fiber; basalt fiber; dynamic response; blast resistance performance

各类事故引起的爆炸时有发生,造成了结构的严重破坏,威胁了人民群众的生命财产安全^[1,2]。钢筋混凝土结构在土木工程领域被广泛应用,梁是结构中的重要构件,在遭受爆炸等极端荷载作用后,失效的梁可能会引起结构的局部损毁甚至整体坍塌^[3],因此,研究如何提高梁的抗爆性能具有重要意义。

混凝土为脆性材料,内部空隙多,破坏应变小^[4]。在混凝土材料中加入各类工程纤维材料可以有效改善混凝土材料的力学性能^[5,6],纤维分布在混凝土中,在水化过程中与混凝土粘合在一起,填补了混凝土内部微裂缝,抑制了混凝土中微裂缝的产生与扩展,增强了混凝土弯曲韧性,从而提高混凝土结构抗爆抗冲击性能^[7]。玻璃纤维和玄武岩纤维均属于绿色环保纤维,具有弹性模量高、与混凝土粘合性能好、耐腐蚀性等优点。仅需较小的体积掺入率,就对梁的延性有明显提升^[8,9]。已有学者对两种纤维各种力学性能进行研究。

玄武岩纤维是由玄武岩制成的矿物纤维,具有断裂强度高、加工方便等优点^[10]。Meyyappan等人用C30混凝土研究了不同体积掺入率下玄武岩纤维混凝土的抗压性能和劈裂抗拉性能^[11]。张向冈等人综合前人研究,指出掺入玄武岩纤维可以增强混凝土的韧性和抗冲击性^[12]。Liu等人使用高分辨率时间测量研究了早期玄武岩纤维增强混凝土梁弯曲过程中的应力变化^[13]。

玻璃纤维具有良好耐腐蚀性能,与混凝土材料能紧密结合^[14]。任延檬等人通过试验证实玻璃纤维的掺入对高温后混凝土的劈裂抗拉性能有明显改善^[15]。Islam和Waseem研究了混杂纤维增强生物混凝土的自愈合性能,结果表明玻璃纤维与细菌的共同掺入显著提升了混凝土的抗压强度恢复率和裂缝闭合能力^[16]。沈武等人认为玻璃纤维提高了混凝土的拉压比和泊松比,改善了混凝土的脆性,增强了混凝土的韧性^[17]。

不同的纤维体积掺入率对混凝土材料的力学性能有很大影响。Tibebu等人通过实验证明,玻璃纤维的掺入对混凝土力学性能具有提升作用,但不能掺量过多,当体积掺入率超过0.2%时会降低混凝土抗压强度^[18]。Ulu等人研究了不同掺入率玻璃纤维对混凝土力学性能和机械性能的影响,并通过电镜检查发现纤维掺入率在超过0.2%后表现出明显的团聚现象^[19]。张兰芳等人发现掺入0.05%~0.15%玄武岩纤维对混凝土抗压强度和劈裂抗拉性能具有明显改善^[20]。许凯等人研究了不同掺量的BFRC梁抗爆性能,发现玄武岩纤维掺量为0.2%时,梁的损伤程度显著下降^[21]。

在纤维混凝土构件的抗爆性能研究方面,有学者利用玻璃纤维与玄武岩纤维弹性模量高,可以吸收冲击能量的特点^[22],将玻璃纤维与玄武岩纤维掺入混凝土中进行抗爆抗冲击性能研究^[23,24]。邓宗才等通过梁弯曲冲击试验证明玻璃纤维显著改善了混凝土的抗弯冲击性能^[25]。Lei等人测试了玄武岩纤维混凝土在动态荷载下的力学性能,建立了玄武岩纤维混凝土的动态本构方程^[26]。马钢等人对素混凝土梁及纤维长度为6~8mm,体积掺量为0.3%的碳纤维混凝土梁、玻璃纤维混凝土梁与玄武岩纤维混凝土梁进行低速冲击试验,试验结果表明,掺入玄武岩纤维和玻璃纤维会降低混凝土梁的刚度,三种纤维对梁的抗冲击能力均有提升,玻璃纤维提升幅度优于玄武岩纤维^[27]。

前人研究成果表明,在体积掺入率为0.2%时BFRC与GFRC抗冲击性能较好。在此掺入率下,对两种纤维混凝土及素混凝土材料进行力学性能试验,同时制作了一根GFRC梁、一根BFRC梁及一根RC梁,对试验梁施加爆炸荷载,对比分析三根试验梁的动态响应和破坏形态,研究体积掺入率0.2%BFRC梁与GFRC梁的抗爆性能。

1 纤维混凝土力学性能试验

1.1 混凝土试块制作

试验中,水泥使用 42.5 级普通硅酸盐水泥,粗骨料选用粒径为 5~20 mm 的碎石。细骨料选用粒径为中粗的天然河砂,连续级配,密度为 2650 kg/m³。混凝土设计强度等级为 C40,配合比为水泥:砂:石:水 = 1:1.13:2.72:0.38,纤维体积掺入率为 0.2%。试验在混凝土养护 28 d 后进行。玻璃纤维和玄武岩纤维采用直径为 15 μm、长度均为 12 mm 的短切纤维,纤维各项性能参数如表 1 所示。纤维在混凝土中结团会降低混凝土材料力学性能,为使纤维在混凝土中分布均匀,纤维掺入混凝土过

程严格按照《纤维混凝土应用技术规程 JGJ/T221—2010》进行。见图 1。

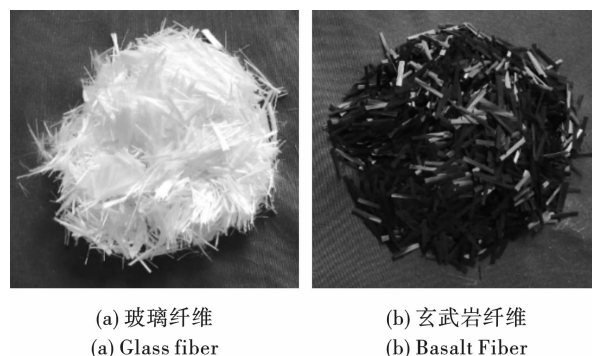


图 1 两种纤维

Fig. 1 Two kinds of fibers

表 1 两种纤维物理性能

Table 1 Physical properties of two fibers

纤维名称 Fiber type	长度 Length/ mm	直径 Diameter/ μm	密度 Density/ (g · cm ⁻³)	抗拉强度 Tensile strength/ MPa	弹性模量 Elastic modulus/GPa	断裂伸长率 Elongation at break/%
玻璃纤维 Glass fiber	12	15	2.68	3100 ~ 3800	73 ~ 76	2.7 ~ 5.0
玄武岩纤维 Basalt fiber	12	15	2.65	3000 ~ 3840	90 ~ 110	1.5 ~ 3.2

1.2 材料的力学性能试验

为比较两种纤维混凝土材料力学性能,制作了尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 普通混凝土、体积掺入率为 0.2% 玄武岩纤维混凝土和玻璃纤维混凝土立方体试块各 6 个,如图 2(a) 所示,编号分别

为 $R_1 \sim R_6$ 、 $B_1 \sim B_6$ 和 $G_1 \sim G_6$,编号 1~3 的试块进行抗压强度试验,编号 4~6 的试块进行劈裂抗拉试验。试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准 GB/T50081—2019》进行,压块试验使用微机控制电液伺服万能试验机进行(见图 2)。



(a) 混凝土试块
(a) Concrete specimen



(b) 劈裂抗拉试验
(b) Splitting tensile
strength test



(c) 抗压强度试验
(c) Compressive
strength test

图 2 混凝土力学性能试验

Fig. 2 Concrete mechanical property tests

1.3 力学性能试验结果

试块的抗压强度及劈裂抗拉强度试验结果如图 3、图 4 所示。与素混凝土试块相比,玻璃纤维和玄武岩纤维混凝土试块的抗压强度、劈裂抗拉强度均有小幅上升,玄武岩纤维混凝土试块劈裂抗拉强度提升了 7%,玻璃纤维混凝土试块提升了 8%。从试

验结果看,在体积掺入率为 0.2% 时,两种纤维的掺入均有改善混凝土材料力学性能的效果,玻璃纤维的效果略优于玄武岩纤维。在爆炸荷载作用下,梁在瞬时会发生大幅弯曲变形,如果混凝土材料的劈裂抗拉强度得到提高,对抑制材料损伤的发展、提高构件的抗爆性能会有明显作用。

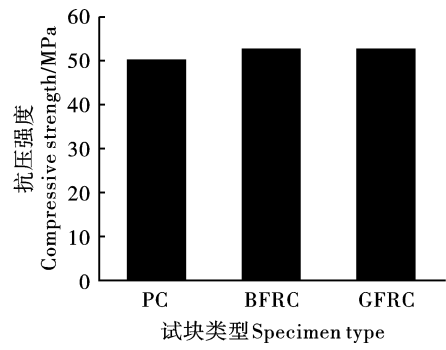


图 3 抗压强度
Fig. 3 Compressive strength

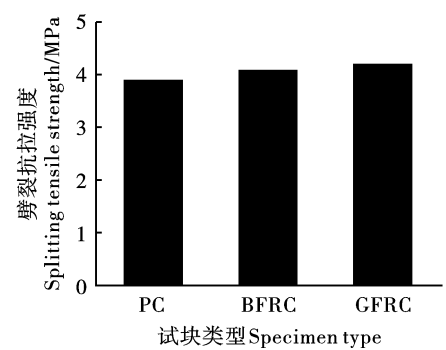


图 4 劈裂抗拉强度
Fig. 4 Splitting tensile strength

2 爆炸试验过程

本试验制作了 RC 梁、体积掺入率 0.2% 的

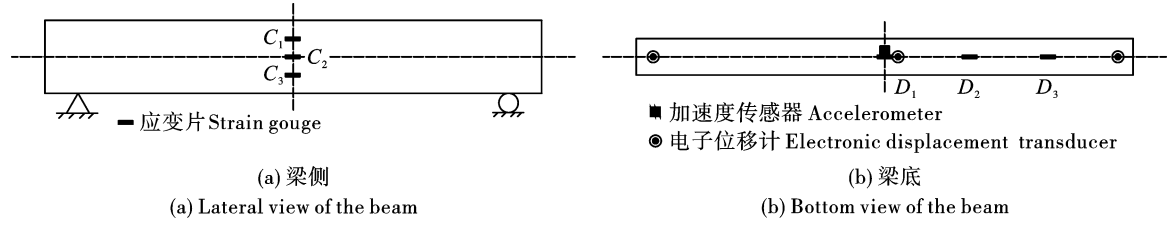


图 7 测点布置
Fig. 7 Layout of the test locations

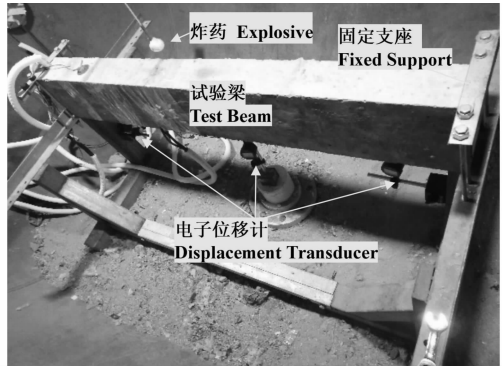


图 8 爆炸荷载试验装置
Fig. 8 Test setup for blast loading

BFRC 梁、GFRC 梁各一根,如图 5 所示。梁的尺寸为 1500 mm × 110 mm × 220 mm,钢筋布置如图 6 所示。标准养护 28 d 后,在试验梁表面粘贴各类传感器,测点位置如图 7 所示,梁侧应变片编号为 C_1 至 C_3 ;梁底应变片编号为 D_1 至 D_3 。在 D_1 处布置一个加速度传感器。电子位移计在梁底跨中、两支座处各布置一个。爆炸试验时,将试验梁移入爆炸罐内,两端用角铁固定,放置在定制的稳定钢架上如图 8 所示。将信号线引出至动态应变仪上,通过电脑采集系统进行控制,如图 9 所示。

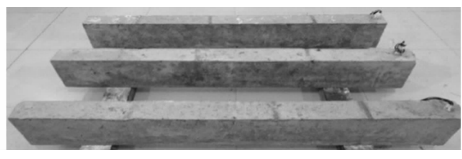


图 5 试验梁
Fig. 5 Test beams

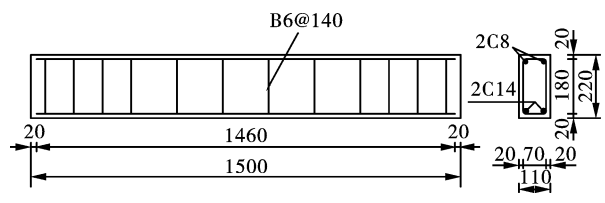


图 6 钢筋骨架(单位:mm)
Fig. 6 Steel of concrete(units:mm)

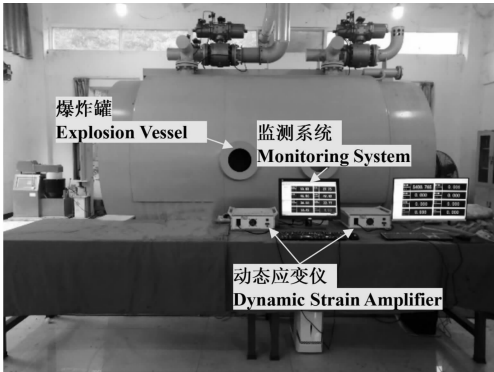


图 9 监测系统
Fig. 9 Monitoring system

对每根试验梁依次施加四次爆炸荷载,爆炸方案如表 2 所示。前 3 次爆炸试验为空气爆炸,主要研究不同荷载大小下试验梁的动态响应,第四次爆

炸试验为接触爆炸,梁体受爆炸后破坏较严重,主要研究试验梁的破坏形态。

表 2 爆炸试验方案
Table 2 Explosion test plan

爆炸编号 Explosion No.	编号 Test ID	爆炸方式 Explosion type	TNT 炸药当量 TNT equivalent/g	炸药与梁距离 Standoff distance/cm
第一次爆炸 1st explosion	B_1	空气爆炸 Air burst	20	10
第二次爆炸 2nd explosion	B_2	空气爆炸 Air burst	40	10
第三次爆炸 3rd explosion	B_3	空气爆炸 Air burst	80	10
第四次爆炸 4th explosion	B_4	接触爆炸 Contact explosion	80	0

3 爆炸试验结果与分析

3.1 加速度结果分析

试验测得三根试验梁的前三次爆炸过程梁体跨中加速度动态响应(见图 10)。三种梁的加速度峰值对比见图 11。随着炸药量增加,三根梁的加速度

峰值呈上升趋势。在相同爆炸荷载下,RC 梁加速度峰值最大,BFRC 梁次之,GFRC 梁最小,且随着炸药量增大,三者差值增大。试验结果表明,纤维与混凝土材料的结合,可以吸收爆炸冲击波的能量,提升梁的抗爆性能,且玻璃纤维材料的作用更明显。

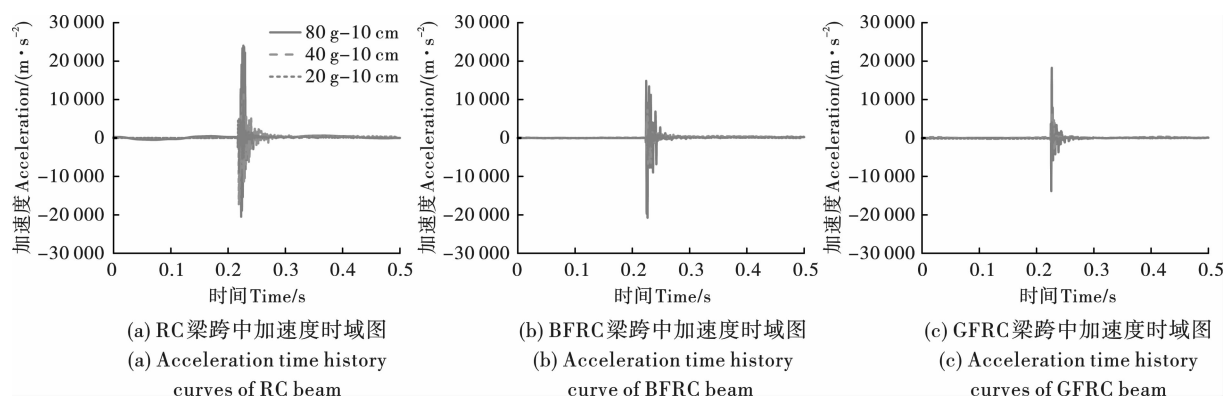


图 10 加速度时域图

Fig. 10 Acceleration time history curves

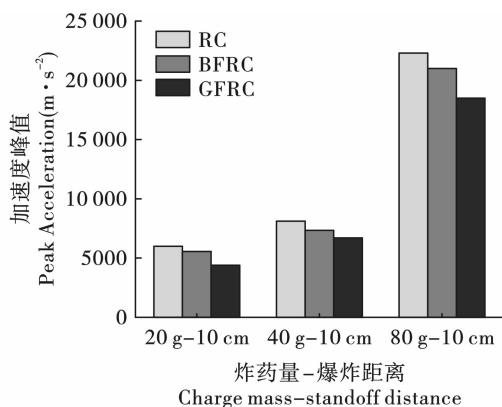


图 11 加速度峰值图

Fig. 11 Peak acceleration bar

3.2 应变结果分析

梁侧和梁底共测得应变时程曲线 63 条,每个测点测得的应变时程曲线规律相同,以梁底跨中 D_1 处应变时程曲线为例(图 12),梁体受爆炸冲击后,应变迅速达到峰值并快速衰减。不同测点的应变峰值如图 13、图 14 所示。梁侧从上至下($C_1 \sim C_3$ 测点),梁底从跨中至支座($D_1 \sim D_3$ 测点),应变峰值随测点离炸药距离增大,呈下降趋势,这表明爆炸对梁体的作用随着距离增大而减小。从结果中还发现,梁侧跨中应变较支座处梁底应变大,这说明当梁体缺少板的约束时,在爆炸冲击下会产生较明显的横向摆动,呈现出横向、竖向同时振动的复杂振动形

态。从图 13、图 14 中可以看到, 梁应变峰值随炸药量增加而上升。在相同荷载下, 应变峰值表现为 RC 梁最高、BFRC 梁次之、GFRC 梁最低, 这与加速度峰

值趋势相同。试验结果表明, 加入纤维材料对 RC 梁在爆炸下的变形具有明显抑制作用, 且玻璃纤维材料的作用更为明显。

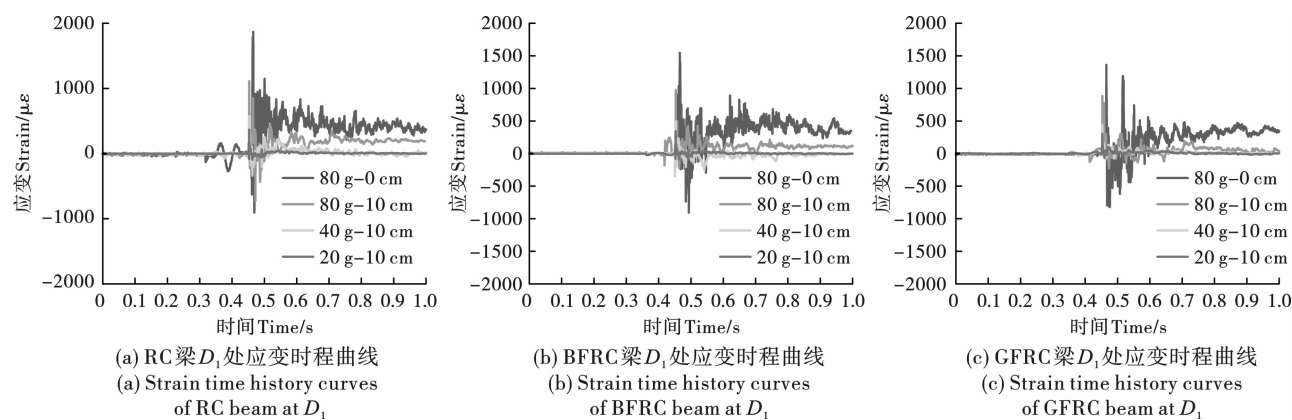


图 12 D_1 处应变时程曲线

Fig. 12 Strain time history curves of beams at D_1

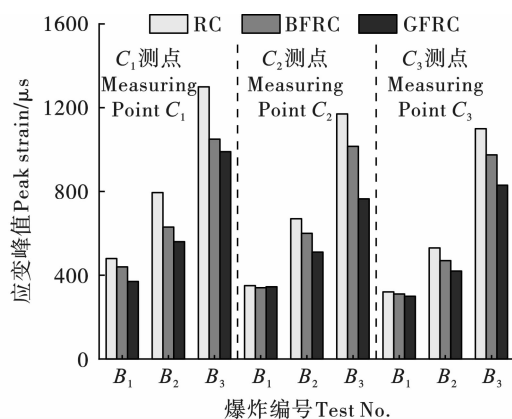


图 13 梁侧应变峰值

Fig. 13 Strain peaks on the beam side

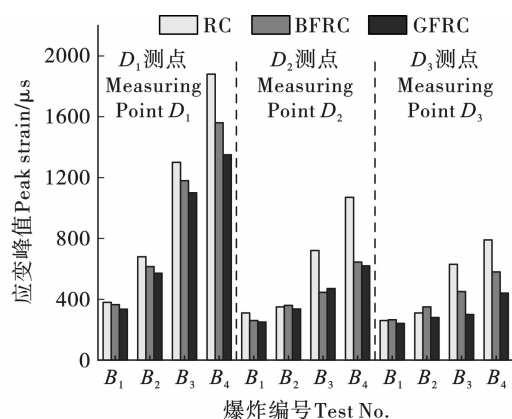


图 14 梁底应变峰值

Fig. 14 Strain peaks of beam bottom

3.3 挠度结果分析

前三次爆炸后, 梁跨中挠度如图 15 所示。梁跨中挠度变化趋势与梁表面应变峰值变化规律相似,

三根梁跨中挠度与炸药量呈正相关趋势。在炸药量较小时, 三根梁挠度差别很小。当炸药量为 80 g 当量时, GFRC 梁跨中挠度相比 RC 梁下降 24.4%, 而 BFRC 梁跨中挠度相比 RC 梁下降 8.3%, 这进一步验证了应变检测得到的结论。

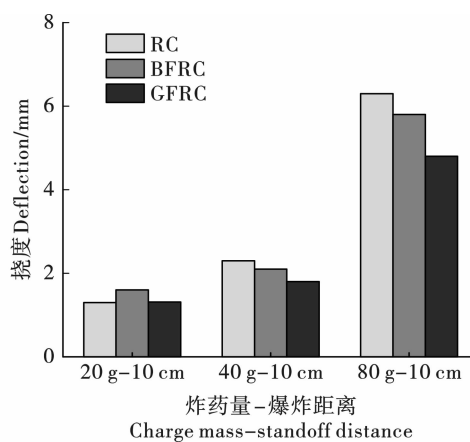


图 15 梁跨中挠度

Fig. 15 Mid-span deflections of beams

3.4 试验梁破坏形态分析

梁体表面在前三次爆炸过程中均未出现明显裂纹与剥落, 为观察试验梁在爆炸荷载下的破坏形态, 第四次爆炸为接触爆炸。从图 16 可以看出, 三根试验梁均出现梁上部混凝土剥落, 钢筋露出现象, 但从剥落面积上看, 三者差异明显。GFRC 梁表面混凝土剥落面积要远小于普通 RC 梁和 BFRC 梁, 且钢筋暴露范围小, 核心混凝土几乎无剥落。从试验梁侧面看, 梁体下部产生八字型裂缝向两端延伸。RC 梁裂纹与梁底角度接近 30° , 表面裂纹在各试验梁

中最多且最长。GFRC 梁与 BFRC 梁裂纹与梁底呈 45° , GFRC 梁表面裂缝比 BFRC 梁少。这说明了纤维材料的掺入对混凝土有明显的阻裂和增韧作用,能抑制混凝土材料裂缝的产生与发展,增强混凝土材料的抗破损性能。实验结果表明,0.2% 体积掺入率 BFRC 梁、GFRC 梁的抗爆性能均优于普通 RC 梁,且 GFRC 梁的抗爆性能更好。

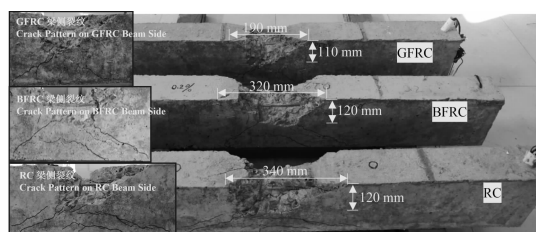


图 16 试验梁破坏形态

Fig. 16 Damage form of concrete beams

4 结论

从试验梁的动态响应、破坏形态等多个角度,对比分析了玻璃纤维与玄武岩纤维对混凝土梁抗爆性能的提升效果。从试验结果可得到如下结论:

(1) 抗压强度试验结果表明,纤维的掺入可以提高混凝土材料的力学性能,掺入玻璃纤维的效果优于掺入玄武岩纤维。

(2) 对比 RC 梁、BFRC 梁、GFRC 梁动态响应结果,纤维的掺入可以有效抑制 RC 梁在爆炸荷载下的振动与变形,在体积掺入率为 0.2% 时,GFRC 梁加速度峰值与应变峰值更小。

(3) 在接触爆炸后,三根梁表面损伤规律相似,但损伤程度差异较大。GFRC 梁混凝土剥落面积与裂缝数量均小于 BFRC 梁。

综上,纤维的掺入可以提高混凝土材料的韧性,抑制梁体损伤的产生和发展。在体积掺入率为 0.2% 时,玻璃纤维对混凝土梁体局部破坏的抑制作用尤为明显。

参考文献 (References)

- [1] BIEZMA M V, ANDR S M A, AGUDO D, et al. Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104446.
- [2] HU Qiong, ZHANG Qian, YUAN Meng-qi, et al. Traceability and failure consequences of natural gas explosion accidents based on key investigation technology [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106448.
- [3] 陆新征, 张炎圣, 江见鲸. 基于纤维模型的钢筋混凝土框架结构爆破倒塌破坏模拟 [J]. 爆破, 2007(2): 1-6.
- [3] LU Xin-zheng, ZHANG Yan-sheng, JIANG Jian-jing. Simulation for the collapse of reinforced concrete frame by blasting based on fiber model [J]. Blasting, 2007(2): 1-6. (in Chinese)
- [4] 胡时胜, 王道荣, 刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究 [J]. 工程力学, 2001(5): 115-118, 126.
- [4] HU Shi-sheng, WANG Dao-rong, LIU Jian-fei. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2001(5): 115-118, 126. (in Chinese)
- [5] AHMAD WANI T, GANESH S. Study on fresh properties, mechanical properties and microstructure behavior of fiber reinforced self compacting concrete: A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 6663-6670.
- [6] AHMAD J, ZHOU Zhi-xiang. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2022, 333: 127353.
- [7] YOO D-Y, BANTHIA N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103389.
- [8] YAN Peng, CHEN Bing, AFGAN S, et al. Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre [J]. Construction and Building Materials, 2021, 279: 122489.
- [9] 薛建英, 裴悦. 掺入玻璃纤维及玄武岩纤维对增强混凝土抗压性能的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 63-66.
- [9] XUE Jian-ying, PEI Yue. The compression strength of reinforced concrete mixed with glass fiber and basalt fiber [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 63-66. (in Chinese)
- [10] LI Yan, ZHANG Jian-chao, HE Yong, et al. A review on durability of basalt fiber reinforced concrete [J]. Composites Science and Technology, 2022, 225: 109519.
- [11] MEYYAPPAN P L, JEMIMAH CARMICHAEL M. Studies on strength properties of basalt fibre reinforced concrete [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 2105-2108.
- [12] 张向冈, 秦文博, 田琦, 等. 玄武岩纤维混凝土材料性能研究进展 [J]. 混凝土, 2018(2): 94-97.
- [12] ZHANG Xiang-gang, QIN Wen-bo, TIAN Qi, et al. Research progress of the material properties on basalt fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 2018(2): 94-97. (in Chinese)
- [13] LIU Zi-qing, WORLEY R, DU Feng, et al. A study on avalanches of early age basalt fiber reinforced concrete beams during flexure [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123695.