



GFRP筋混凝土梁抗爆性能试验研究与数值分析

刘三丰¹, 金丰年¹, 周寅智^{1*}, 周健南¹, 张蓓^{1,2}

1. 陆军工程大学国防工程学院爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007;

2. 军事科学院国防工程研究所, 洛阳 471023

*联系人, E-mail: zhouyinzi_2009@yeah.net

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-07-10; 网络出版日期: 2019-10-22

国家自然科学基金(编号: 51508566, 51478465, 51778622)和江苏省科技厅社会发展项目(编号: BE2017780)资助

摘要 玻璃纤维增强聚合物(GFRP)筋具有耐腐蚀、抗拉承载力高等优点. 它们可作为混凝土防护结构的纵筋而代替钢筋. 为了明确GFRP筋混凝土梁(GRCBs)的抗爆性能, 对GFRP筋混凝土梁和钢筋混凝土梁(SRCBs)进行了爆炸试验、四点弯曲静力试验及数值模拟分析. 结果表明: 四点弯曲静力试验中, 工况是3kg-0.65m的爆炸荷载作用后相同等效刚度设计的GRCBs承载力是SRCBs的5.5倍. 在近距离爆炸作用下(比例爆距小于 0.5159 m kg^{-3}), 由于GFRP筋处于弹性阶段, 破坏形式主要是混凝土出现裂纹、剥落和震塌. 通过数值模拟分析, 增加纤维增强聚合物(FRP)筋刚度可以降低GRCBs跨中位移, 跨中最大位移降低率与EA比的比值为0.1, 减少GRCBs的裂纹与损伤, 增强GRCBs的抗爆性能. 当比例爆距小于 0.4095 m kg^{-3} , GFRP筋混凝土梁用C50及以上混凝土能有效减少混凝土震塌与剥落. 研究表明, GRCBs比SRCBs具有更高的抗爆性能.

关键词 GFRP筋, 混凝土梁, 爆炸荷载, 动力响应, 数值模拟

PACS: 81.05.Pj, 46.70.De, 43.28.Mw, 83.85.Vb, 02.60.-x

1 引言

目前, 国内外对钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的破坏进行了许多研究, 取得了一些研究成果. 方秦等人^[1-3]基于Timoshenko梁理论, 采用有限元分层梁有限元法和有限元差分法分析了钢筋混凝土梁的动力响应和弯曲、弯剪及剪切破坏的问题. 李猛深等人^[4]、汪维等人^[5,6]和唐德高等人^[7]进行了钢筋混凝土梁的爆炸试验, 分析了钢筋混凝土梁的破坏特征, 建立了相应的损伤判据. 都浩等人^[8]、郝彬^[9]和盛利^[10]采

用有限元软件LS-DYNA, 模拟分析了钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的动力响应.

海洋防护结构因潮湿、高温等原因, 对结构耐腐蚀性和抗爆性能有更高的要求, 采用纤维增强聚合物(FRP)筋是理想的选择. 王洋等人^[11]等进行了GFRP筋混凝土梁的受弯性能试验, 研究了裂缝分布, 平均间隙等特征. 程晟钊^[12]进行了玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)筋钢纤维复合增混凝土梁的受弯试验, 研究了梁的受弯性能、破坏模式及承载力计算等. 董志强等人^[13]基于试验数据和普通混凝土规范修正了最大裂

引用格式: 刘三丰, 金丰年, 周寅智, 等. GFRP筋混凝土梁抗爆性能试验研究与数值分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024610
Liu S F, Jin F N, Zhou Y Z, et al. Experimental study and numerical simulation of explosion resistance of GFRP reinforced concrete beams (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024610, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0178](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0178)

缝宽度的计算公式. Chen等人^[14]研究锚固玄武碳纤维增强聚合物(CFRP)布加固严重破坏的埋地拱的爆炸荷载特性. Feng等人^[15]通过爆炸试验揭示了FRP筋混凝土板的动力响应. 结果表明, FRP筋混凝土板具有良好的强变形恢复能力, 有效减少了混凝土在冲击波作用下的剥落面积. 爆炸后, 损伤板的静载承载能力仍高于普通钢筋混凝土板. 由于混凝土板不厚, 爆炸作用下FRP筋的变形是有限的, 远远低于其断裂应变, 这种板通常不容易剥落和断裂. 对于深混凝土梁, FRP筋承受较大的变形, 有可能脆性断裂^[16].

GFRP筋优越的抗拉强度与抗腐蚀性, 在海洋防护结构中有广泛的用途. 本文对GFRP筋混凝土梁进行了设计、试验研究和数值模拟分析^[17]. 模拟计算结果与试验结果比较, 利用数值模拟分析影响GFRP筋混凝土梁抗爆性能主要影响因素. 研究成果为GFRP筋在防护结构中的应用提供了可靠的参考.

2 GFRP筋混凝土梁抗爆性能

爆炸荷载作用下, 由于钢筋弹性模量大, 而且有明显屈服阶段, 钢筋混凝土梁容易发生混凝土震塌和剥落, 梁的整体抗爆性能有待提高. 随着复合材料在建筑结构中运用, 对GFRP筋混凝土梁的抗爆性能进行试验研究有着非常重要的意义.

2.1 构件设计

采用等刚度设计两种型号的梁, 尺寸是 $2\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$, SRCBs表示钢筋混凝土梁, GRCBs表示GFRP筋混凝土梁, 两种型号梁的受压筋均采用2根直径是12 mm的HRB400钢筋. 拉伸试验中测得钢筋屈服强度是428 MPa, 弹性模量是205 GPa. SRCBs受拉筋采用2根直径是12 mm的HRB400钢筋; GRCBs受拉筋采用3根直径是22 mm的GFRP筋. 拉伸试验中测得GFRP筋的极限抗拉强度是1035 MPa, 弹性模量是39 GPa. 箍筋采用直径是8 mm的HRB400钢筋. 拉伸试验中测得钢筋屈服强度是413 MPa, 弹性模量是199 GPa. 跨中0.64 m段, 箍筋间距是0.16 m, 两端箍筋间距是0.08 m, 混凝土保护层厚度是0.02 m, 混凝土采用C40混凝土配比配制. 水泥:砂:碎石:水是1:1.19:2.31:0.42. 水泥采用普通硅酸盐水泥, 强度等级为42.5. 标准条件下养护28 d, 测得混凝土标准轴心抗压强度是51.5 MPa.

2.2 试验设计

爆炸试验在江苏省某野外靶场进行. 试验时, 将梁固定在事先加工的钢架上, 采用两端简支的方式固定在钢架上, 两端部各留100 mm (如图1^[18]所示), 钢架通过铆钉固定在地面上. 方形TNT药块安放在梁中间的正上方, 由电雷管引爆. 位移传感器安装在定制的支座上, 支座固定在地上. 自由场压力传感器安装在单独的钢支架上, 与药块等高. 测试位移, 压力等数据的传感器从梁下方与对应四芯屏蔽线相连, 并在铁管中穿出, 与掩体内动态测量系统相连.

2.3 爆炸试验

试验工况是TNT炸药当量分别是: 2, 3, 4 kg, 爆距(炸药中心与梁中心上表面的距离): 0.65 m, 比例爆距分别是0.5159, 0.4507, 0.4095 m kg^{-3} , 试验工况用“kg-m”表示. 3kg-0.65m工况下, 梁跨中位移时程曲线如图2所示. 由于GRCBs与SRCBs的配筋采用等刚度设计, 两根梁的最大位移均为11.5 mm, 达到最大位移的时间几乎相同.

回弹运动中, SRCBs的最大回弹位移比GRCBs的小. 在爆炸荷载作用下SRCBs位移比较大, 钢筋进入塑性阶段, 最大回弹位移是5 mm, 比正向位移小很多; 停止运动后, 产生6 mm的残余变形. GFRP筋没有塑性阶段, GRCBs的最大回弹位移为10 mm, 与正向位移相当.

2.4 四点弯曲静力试验

工况是3kg-0.65m的爆炸荷载作用后, 进行四点弯曲静力试验, 测量两种型号梁的剩余承载力. SRCBs和GRCBs剩余承载力-跨中位移曲线如图3所示. SRCBs的剩余承载力是73.2 kN, GRCBs剩余承载力是402.3 kN, 是SRCBs的5.5倍. 四点弯曲静力试验中, SRCBs的破坏形式为钢筋屈服, GRCBs的破坏形式为受压区混凝土压碎. 进行爆炸试验后的SRCBs和GRCBs的破坏形式分别与未进行爆炸试验的梁的破坏形式相同.

四点弯试验中, SRCBs和GRCBs的剩余承载力-跨中位移百分比曲线如图4所示. 纵坐标为剩余承载力与完好梁的极限承载力的比值, 横坐标为剩余承载力位移与完好梁极限承载力对应的位移的比值. SRCBs在



图1 (网络版彩图)整体试验装置图
Figure 1 (Color online) Diagram of the overall experimental apparatus [18].

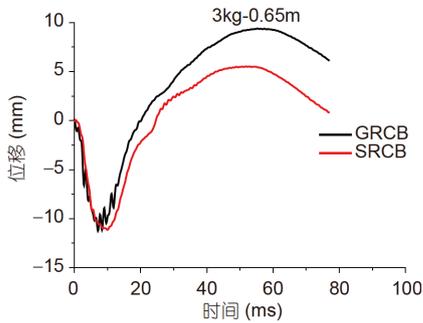


图2 (网络版彩图)GRCBs和SRCBs位移时程曲线
Figure 2 (Color online) Dynamics deflection curves of GRCBs and SRCBs [18].

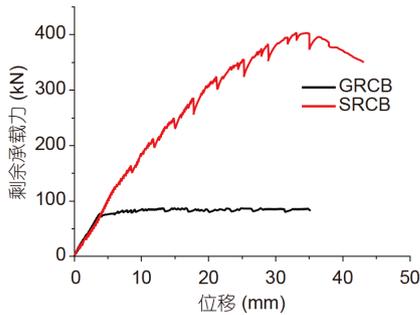


图3 (网络版彩图)GRCBs和SRCBs剩余承载力-位移曲线
Figure 3 (Color online) Residual load-displacement curves of GRCBs and SRCBs [18].

位移到80%的时候, 剩余承载力达到最大值, 最大剩余承载力为完好梁极限承载力的70%, 承载力和变形能力都有所降低, SRCBs在爆炸荷载作用下, 产生了约30%的损伤.

GRCBs剩余承载力达到最大值时的跨中位移是完好梁极限承载力对应位移的120%, 因为GRCBs的破

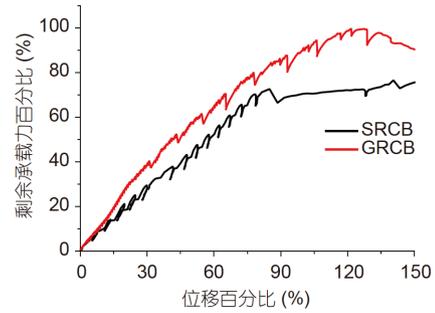


图4 (网络版彩图)GRCBs和SRCBs剩余承载力百分比-位移百分比曲线
Figure 4 (Color online) Residual capacity percentage-displacement curves of GRCBs and SRCBs.

坏形式为受压区混凝土破坏, 爆炸试验后, 梁的跨中有部分受压区混凝土剥落, 剩余承载力达到峰值的位移较完好梁的有所增加. GRCBs的最大剩余承载力为完好梁极限承载力的97%, 承载力基本没有损失. 通过对比爆炸后SRCBs和GRCBs承载力损失程度可以发现: GRCBs的抗爆性能优于SRCBs.

3 数值模拟

采用显式动力有限元分析软件LS-DYNA, 基于多物质流固耦合方法, 建立梁构件, 空气和炸药的数值模型, 对GRCBs在爆炸荷载作用下的动力响应和破坏形态进行模拟分析. 文献[19-20]通过研究验证了运用LS-DYNA流固耦合模拟混凝土结构在近距离爆炸荷载作用下动力响应的可靠性, 鉴于该算法精度高, 本文采用该计算方法来模拟爆炸荷载作用下GRCBs的动力响应和破坏形态.

3.1 材料参数

空气采用MAT_NULL材料模型和线性多项式状态方程EOS_LINEAR-POLYNOMIA^[21], 即

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E, \quad (1)$$

式中, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$; ρ 为当前密度; ρ_0 为初始密度; E 为材料的内能; C_0, C_4, C_5 为状态方程参数. 空气的材料参数见表1.

TNT采用模型MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN (008), 状态方程是JWL^[21]. 其形式为

表1 空气材料参数

Table 1 The material parameters of air

ρ_0 (m kg ⁻³)	C_0	C_4	C_5	E (MJ kg ⁻³)
1.29	-1×10^{-5}	0.4	0.4	0.25

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

式中, p 为静水压力(以压为正); V 是相对体积; E 是单位体积炸药初始内能; $A_1, B_1, R_1, R_2, \omega$ 均为JWL状态方程参数. 表2是TNT炸药主要材料参数, 其中 ρ 是炸药密度, D 是爆炸速度, P_{CJ} 是爆轰压力.

钢筋采用随动强化材料模型MAT_PLASTIC_KINEMATIC(003). 这个材料模型适于模拟钢材的弹塑性, 并且可以模拟等向强化和随动强化, 还可以考虑快速加载状态下的应变率效应, 符合爆炸荷载作用下钢筋的受力特点. 由于整个冲击过程在很短时间内完成, 按COWPERE_SYMONDS方式^[22]考虑应变率效应对屈服强度的影响. 钢筋材料为HRB400材料参数见表3.

玻璃纤维(GFRP)筋采用弹性模型MAT_ELASTIC(001), 在结构试验中, 纤维筋应变没有达到极限应变, 因此用弹性模型比较合适. GFRP筋弹性模量在拉伸试验中测量得到39 GPa, 密度是2100 m kg⁻³, 泊松比是0.2.

LS-DYNA中有很多混凝土本构关系模型, 本研究采用材料模型MAT_CSCM_CONCRETE(159), 该模型考虑了混凝土应变率影响, 能够较好反映出混凝土裂纹状态^[23]. 混凝土材料参数: 混凝土密度是2440 m kg⁻³, 标准轴心抗压试验中测量混凝土抗压强

度是51.5 MPa, 本模型中按C50强度设置参数. 模型中单元损伤建立在极大应变损伤的基础上(ERODE), 当ERODE设置值大于1时, 发生损伤. 根据文献, 当混凝土强度在20–58 MPa之间, 固支梁中ERODE设置在1.05–1.1之间可以较客观地反映出结构的损伤规律^[24,25], 本文中设置为1.08能较准确模拟梁结构的裂纹与损伤, 未提及的参数均采用系统默认值.

3.2 数值模型

运用有限元分析软件LS-DYNA建立GRCBs模型. 梁构件上部纵筋是2根直径为12 mm的HRB400钢筋, 下部纵筋是3根直径是22 mm的GFRP筋. 箍筋是直径为8 mm的HRB400钢筋, 跨中0.64 m段间距是0.16 m, 两端间距是0.080 m, 如图5所示, 混凝土强度是C50.

混凝土、空气和炸药单元采用三维固体单元SO-LID164, 筋材单元采用梁单元BEAM161. 采用国际标准单位m-kg-s, 建立模型如图6所示, 其中为方便表现梁构件空气PART有部分隐藏. GRCBs尺寸是2 m×0.3 m×0.22 m, 装药在梁中心正上方0.65 m, 建立空气网格与TNT共节点, 空气网格覆盖梁构件.

对梁两端面的点约束梁高度方向位移^[25](BOUNDARY_SPC_SET), 在空气外表面设置无反射边界条件(BOUNDARY_NON_REFLECTING). 混凝土与筋材设置共节点. 梁构件通过关键字SECTION_SOLID定义LAGRANGE算法, 空气与TNT炸药通过关键字SECTION_SOLID_ALE定义ALE算法, 定义多物质流固耦合算法关键字CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID描述爆炸过程中空气与被爆构件的相互作用^[26,27]. 梁构件网格尺寸是0.01 m×0.005 m

表2 TNT炸药材料参数

Table 2 The material parameters of TNT explosive

ρ (m kg ⁻³)	D (m s ⁻¹)	P_{CJ} (GPa)	A_1 (GPa)	B_1	R_1	R_2	ω
1630	6930	21.0	371.2	3.231	4.15	0.95	0.35

表3 钢筋材料参数^{a)}

Table 3 The material parameters of steel^{a)}

E (GPa)	ν	ρ (m kg ⁻³)	F_y (MPa)	C	P	E_{tan} (GPa)
200	0.3	7800	400	40	5	2.1

a) 表中 C, P 是应变率参数; E_{tan} 是剪切模量.

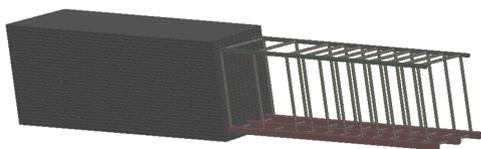


图5 (网络版彩图)GRCBs结构图
Figure 5 (Color online) Structure diagram of GRCBs

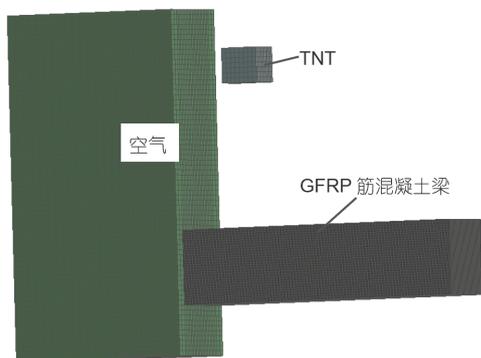


图6 (网络版彩图)整体模型图
Figure 6 (Color online) Overall model diagram.

×0.005 m, 计算时间是0.04 s, 每隔0.2 ms输出一次结果文件.

4 计算结果与试验对比

课题组前期对GRCBs进行野外爆炸试验, 计算结果与试验数据进行比较.

4.1 位移对比

野外试验中, 进行三种工况爆炸试验, 分别对三种工况建立数值模拟进行分析, 计算得到GRCBs的跨中及距端部0.55 m处位移. 图7是3kg-0.65m工况(比例爆距是 0.4509 m kg^{-3})下GRCBs跨中及距端部0.55 m处位移时程曲线图, 计算结果与曲线吻合较准确, 推测爆炸荷载作用下GRCBs的跨中位移迅速达到最大值, 并开始回弹.

表4列出了计算得到三种工况下梁跨中和局端部0.55 m处最大竖向位移, 并与试验得到的GRCBs的最大位移进行对比.

从表4可以看出, 三种不同的工况下, 梁的数值模拟分析结果与试验结果相差较小, 误差均在10%以内.

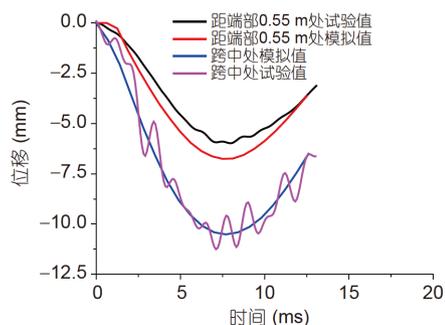


图7 (网络版彩图)跨中及距端部0.55 m处位移时程曲线图
Figure 7 (Color online) Dynamics displacement curves at 0.55 m from the end and the midspan of the beam.

表4 计算结果与试验结果对比

Table 4 The comparison of computed and experimental results

工况及位置	试验 (mm)	计算 (mm)	误差 (%)
2kg-0.65m跨中	4.88	5.35	9.6
3kg-0.65m跨中	11.51	10.51	6
3kg-0.65m端部0.55 m	5.98	6.57	10
4kg-0.65m端部0.55 m	9.74	10.49	8

4.2 裂纹对比

试验下与LS-DYNA计算情况下梁的裂纹对比如图8所示. LS-DYNA计算结果显示梁表面有裂纹, 整体裂缝情况与试验现象吻合较好, 整体裂纹呈三角形分布. 2kg-0.65m工况, 梁仅跨中有少量裂纹. 随着TNT炸药当量增加, 比例爆距减小, 纯弯区裂纹变得密长, 并且向弯剪区扩展. 3kg-0.65m工况, 梁下部出现较宽裂纹, 下部混凝土有震塌征兆. 4kg-0.65m工况, 上部混凝土剥落, 与试验情况相近, 震塌与试验情况相差较大. 主要是因为制备梁时, 为保护下部GFRP筋跨中应变片, 缠绕很多胶带, 降低了跨中混凝土与GFRP筋的黏结力.

综合位移与裂纹情况, 采用的GRCBs的数值分析模型可以较好地模拟出爆炸荷载作用下GRCBs的动力响应.

5 影响因素分析

GRCBs在爆炸荷载作用下的变形与受力性能不仅与爆炸荷载的大小有关, 还与FRP筋的刚度、混凝土强度、箍筋间距等有着密切的关系. 下面主要针对

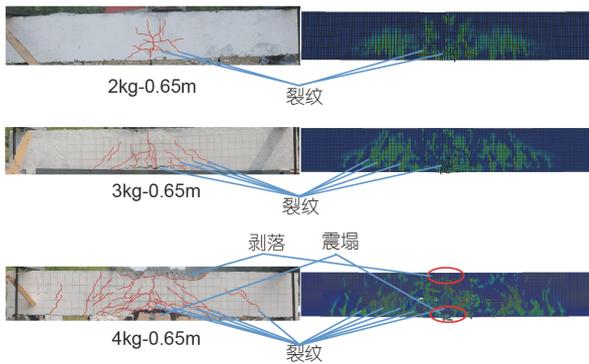


图8 (网络版彩图)试验与数值模拟下GRCBs裂纹发展对比

Figure 8 (Color online) Comparison of the cracks of GRCBs between experiment and LS-DYNA.

FRP筋的刚度和混凝土强度对爆炸荷载作用下GRCBs的动力响应进行研究分析。

5.1 FRP刚度

爆炸荷载作用下, 下部GFRP筋受拉, 改变FRP的刚度影响梁的整体刚度, 从而影响梁的动力响应. 分析FRP刚度对爆炸荷载作用下GRCBs动力响应的影响, 保持其他参数设置不变, 改变FRP弹性模量或者改变FRP筋直径. 一共分析四种刚度: (1) 弹性模量是39 GPa的GFRP筋, 直径是22 mm; (2) 弹性模量是60 GPa的BFRP筋, 直径是22 mm; (3) 弹性模量是120 GPa的CFRP筋, 直径是22 mm; (4) 弹性模量是39 GPa的GFRP筋, 直径是28 mm.

5.1.1 跨中位移

四种不同刚度的梁在爆炸荷载作用下的跨中位移时程曲线图如图9所示. 随着刚度增加, 梁的跨中最大位移减少, 反弹位移随之减小, 到达最大值的时间减小, 振动频率增大. BFRP筋混凝土梁与直径是28 mm的GRCBs刚度相差较小, 跨中最大位移相差较小.

四种刚度的FRP筋混凝土梁跨中最大位移对比见表5. EA比表示FRP筋混凝土梁的刚度与受拉筋直径是22 mm的GRCBs的刚度的比值. 三种爆炸荷载作用下, 梁下部均开裂, 拉力主要由下部受拉筋承受, 用下部受拉筋的刚度表示整个梁的刚度. 跨中最大位移降低率表示三种刚度FRP筋混凝土梁跨中最大位移与GRCBs跨中最大位移的差值, 与GRCBs跨中最大位移

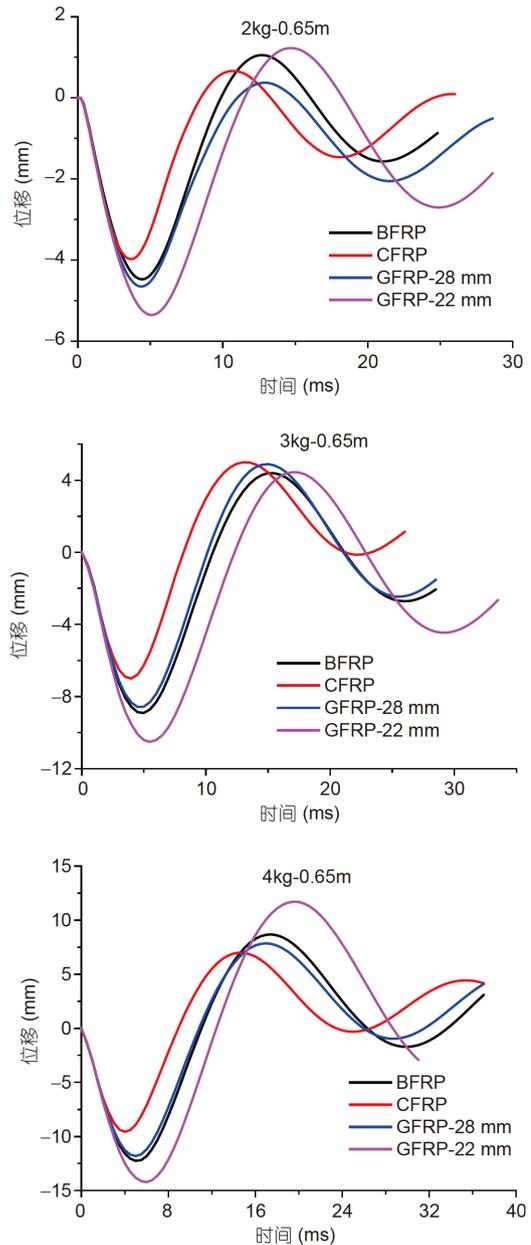


图9 (网络版彩图)四种刚度的混凝土梁的跨中位移时程曲线图

Figure 9 (Color online) Dynamics deflection curves of 4 kinds of stiffness beams.

的比值. 其中BFRP筋混凝土梁的刚度是GRCBs的1.5倍, 跨中最大位移降低率约为15%; CFRP筋混凝土梁的刚度是GRCBs的3倍, 跨中最大位移降低率约为30%, 直径是28 mm的GRCBs的刚度是直径是12 mm的GRCBs的1.62倍, 跨中最大位移降低率约为17%. 可以看出跨中最大位移降低率与EA比的比值为0.1.

表 5 四种刚度的梁的跨中最大位移对比

Table 5 The comparison of the mid-span maximum displacements of beams with four stiffness

工况	位置	GFRP-22 mm	BFRP	CFRP	GFRP-28 mm
2kg-0.65m	跨中最大位移 (mm)	5.35	4.47	3.92	4.61
	跨中最大位移降低率(%)	-	16.38	26.60	16.93
3kg-0.65m	跨中最大位移 (mm)	10.51	8.91	7.00	8.58
	跨中最大位移降低率(%)	-	15.22	33.39	18.36
4kg-0.65m	跨中最大位移 (mm)	14.21	12.18	9.56	11.80
	跨中最大位移降低率(%)	-	14.28	2.72	16.96

5.1.2 损伤与裂纹

爆炸荷载作用下梁的损伤与裂纹发展情况是衡量梁结构抗爆性能的重要依据. 四种刚度的FRP筋混凝土梁在爆炸荷载作用下梁的裂纹如表6-8所示.

2kg-0.65m工况下, 四种刚度的FRP筋混凝土梁均无震塌和剥落. GRCBs、直径是28 mm的GRCBs与BFRP筋混凝土梁, 三种梁的裂纹发展情况相差不大, CFRP筋混凝土梁的裂纹明显比其他三种刚度的FRP筋混凝土梁少.

3kg-0.65m工况下, GRCBs跨中下部有较宽裂纹, 是震塌征兆, 其他三种刚度的FRP筋混凝土梁无较宽裂纹. 四种刚度的FRP筋混凝土梁的裂纹发展情况相差较小.

4kg-0.65m工况下, GRCBs跨中有较多混凝土破碎, 四种刚度的FRP筋混凝土梁下部均有较小震塌, CFRP筋混凝土梁的裂纹明显比其他三种刚度的FRP筋混凝土梁少.

综合三种工况, 爆炸荷载作用下GRCBs较容易出现损伤, GRCBs、直径是28 mm的GRCBs与BFRP筋混凝土梁, 三种梁的裂纹发展情况相差不大, CFRP筋混凝土梁的裂纹明显比其他三种刚度的FRP筋混凝土梁少.

表 6 2kg-0.65m工况下FRP筋混凝土梁裂纹情况

Table 6 The cracks of 4 kinds of beams under 2kg-0.65m

型号	裂纹图
GFRP-22 mm	
GFRP-28 mm	
BFRP	
CFRP	

表 7 3kg-0.65m工况下FRP筋混凝土梁裂纹情况

Table 7 The cracks of 4 kinds of beams under 3kg-0.65m

型号	裂纹图
GFRP-22 mm	
GFRP-28 mm	
BFRP	
CFRP	

表 8 4kg-0.65m工况下FRP筋混凝土梁裂纹情况

Table 8 The cracks of 4 kinds of beams under 4kg-0.65m

型号	裂纹图
GFRP-22 mm	
GFRP-28 mm	
BFRP	
CFRP	

5.2 混凝土强度

GRCBs主要由GFRP筋与混凝土组成, 混凝土强度是影响GRCBs的抗爆性能的重要因素之一, 研究混凝土的强度对爆炸荷载作用下GRCBs的动力响应有重要意义. 为了研究混凝土轴心抗压强度对GFRP筋混凝土梁动力响应的影响, 保持其他参数不变, 对三根混凝土轴心抗压强度分别为35, 50和65MPa的GFRP筋混凝土梁分别在三种工况爆炸荷载作用下的动力响应进行了分析.

5.2.1 跨中位移

三种混凝土强度的梁在爆炸荷载作用下的跨中位移时程曲线如图10所示. 三种混凝土强度梁的跨中最大位移对比见表9. 2kg-0.65m工况下, C65混凝土梁跨中最大位移比C50小11.03%, C50混凝土梁跨中最大位移比C35小10.32%, 混凝土强度增加15MPa, 跨中最大位移减小约10%. 3kg-0.65m工况下, C35混凝土梁跨中最大位移比C50小12.18%, C65混凝土梁跨中最大位移比C50小20.55%; 4kg-0.65m工况下, C35混凝土梁跨中最大位移比C50小18.36%, C65混凝土梁跨中最大位移比C50小32.37%.

数值模拟中当爆炸冲击波到达梁表面, 实体单元破坏删除, 根据能量守恒, 爆炸冲击波传到下一个单元, 直至传播到梁底部. C35混凝土极限抗压强度较低, 混凝土容易破坏, 删除单元较多, 有较多爆炸冲击波贯穿梁, 与冲击波相互作用形成力的单元较少, 梁的跨中位移变小. 在2kg-0.65m工况下, 当梁的混凝土强度由C35提高到C50后, 梁的跨中位移减小10%; 同样, 当梁的混凝土强度由C50提高到C65后, 梁的跨中最大位移也减小10%; 3kg-0.65m和4kg-0.65m工况下, C35混凝土梁的跨中位移比C50混凝土梁跨中最大位移小.

三种工况下, TNT当量每增加1 kg, C65混凝土梁的跨中最大位移比C50减小率增加10%.

5.2.2 损伤与裂纹

三种爆炸荷载工况下, 三种混凝土抗压强度GRCBs的损伤与裂纹发展情况见表10-12. 2kg-0.65m工况下, 三种混凝土梁的裂纹发展差别较小.

3kg-0.65m工况下, C35混凝土梁的裂纹发展比C50混凝土梁的要大, C50混凝土梁与C65混凝土梁裂

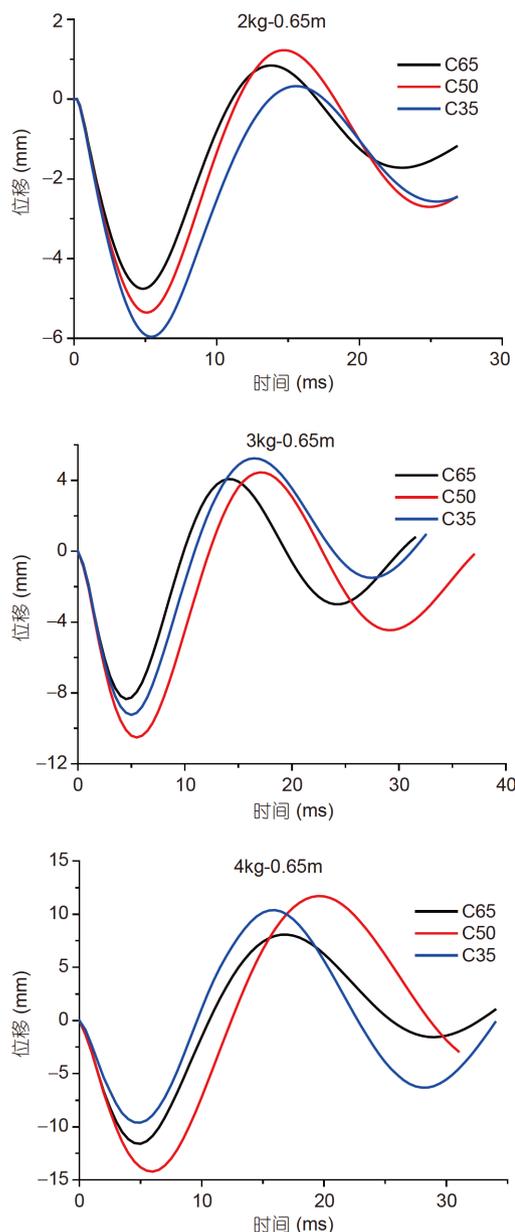


图10 (网络版彩图)三种混凝土抗压强度GRCBs的跨中位移时程曲线图

Figure 10 (Color online) Dynamics deflection curves of 3 kinds of compressive strengths of concrete beams.

纹发展差别不大.

4kg-0.65m工况下, C35混凝土梁有严重损伤, 跨中0.32 m约有一半混凝土被剥落和震塌, C50混凝土梁有较大损伤, 跨中有较多混凝土脱落, 下部有较小震塌, C65混凝土梁有轻微损伤, 下部有较小震塌. 损伤与裂纹发展情况进一步印证上节中, C35混凝土梁位移较

表 9 三种混凝土强度梁的跨中最大位移对比

Table 9 The comparison of the mid-span maximum displacements of beams with three concrete strengths

工况	位置	C35	C50	C65
2kg-0.65m	跨中最大位移 (mm)	5.96	5.35	4.76
	跨中最大位移降低率	-10.32%	-	11.03%
3kg-0.65m	跨中最大位移 (mm)	9.23	10.51	8.35
	跨中最大位移降低率	12.18%	-	20.55%
4kg-0.65m	跨中最大位移 (mm)	11.59	14.21	9.61
	跨中最大位移降低率	18.36%	-	32.37%

表 10 2kg-0.65m工况下三种混凝土抗压强度梁裂纹

Table 10 The cracks of 3 kinds of compressive strengths of concrete beams under 2kg-0.65m

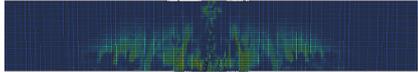
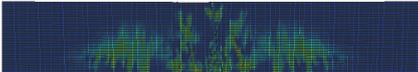
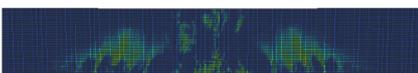
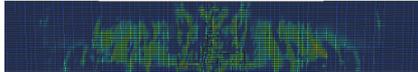
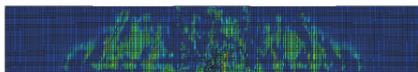
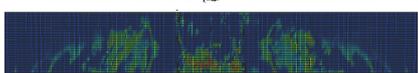
型号	裂纹图
C65	
C50	
C35	

表 11 3kg-0.65m工况下三种混凝土抗压强度梁裂纹

Table 11 The cracks of 3 kinds of compressive strengths of concrete beams under 3kg-0.65m

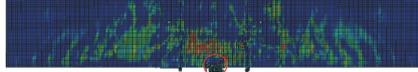
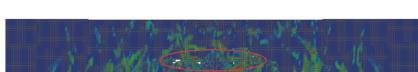
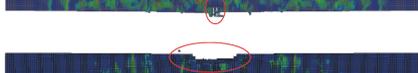
型号	裂纹图
C65	
C50	
C35	

小的原因。

当比例爆距大于 0.5159 m kg^{-3} , 爆炸荷载下, 混凝土抗压强度对梁的抗爆性能影响较小。随着爆炸荷载增加, 混凝土强度是混凝土梁损伤与裂纹情况的重要因素, 当比例爆距小于 0.4059 m kg^{-3} , 爆炸荷载下 C35混凝土梁, 破坏程度严重。研究表明, 相对于C35, 用C50及以上混凝土能有效减少梁的震塌与剥落。三

表 12 4kg-0.65m工况下三种混凝土抗压强度梁裂纹

Table 12 The cracks of 3 kinds of compressive strengths of concrete beams under 4kg-0.65m

型号	裂纹图
C65	
C50	
C35	

种工况下, TNT当量每增加1 kg, C65混凝土梁的跨中最大位移比C50减小率增加10%。

6 结论

LS-DYNA数值模拟仿真可以很好地模拟GRCBs在爆炸荷载作用下的动力响应和破坏过程。当比例爆距小于 0.4095 m kg^{-3} 时, 作用在结构上的爆炸冲击波很大, 作用时间极短, 对结构产生很大影响, 梁开始振动, 并产生严重的破坏。

(1) 根据相同的抗弯刚度设计准则, 爆炸试验后GRCBs的剩余承载力承载能力是SRCBs的5.5倍, 且挠度具有可比性。GRCBs具有较长的弹性变形, SRCBs具有完全塑性的弹塑性变形形式。弹性提高了GRCBs的负载能力, 而屈服限制了SRCBs的负载能力。

(2) 由于FRP筋极限抗拉强度高, FRP筋混凝土梁的破坏主要是跨中混凝土剥落与震塌超筋破坏, 破坏

模式为超筋破坏. FRP筋刚度和混凝土抗压强度是影响FRP筋混凝土梁抗爆性能的重要因素. 增大FRP筋刚度可以降低GRCBs跨中位移, 跨中最大位移降低率与EA比的比值为0.1, 减小梁的破坏程度. 比例爆距小于 0.4095 m kg^{-3} 时, 混凝土强度低于C35的FRP筋混凝土

梁中混凝土发生严重破坏, C50及以上混凝土能有效减少梁的震塌与剥落.

(3) 研究表明, 在抗弯刚度相同的情况下, GRCBs具有更好的抗爆性能, 可以替代SRCBs应用于防护结构中.

参考文献

- Fang Q, Liu J C. Finite element analysis of failure modes of blast-loaded R/C beams (in Chinese). *Eng Mech*, 2001, 18: 1–8 [方秦, 柳锦春. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁破坏形态有限元分析. *工程力学*, 2001, 18: 1–8]
- Fang Q, Wu P A. Main factors affecting failure modes of blast loaded RC beams (in Chinese). *Chin J Comput Mech*, 2003, 20: 40–48 [方秦, 吴平安. 爆炸荷载作用下影响RC梁破坏形态的主要因素分析. *计算力学学报*, 2003, 20: 40–48]
- Liu J C, Fang Q, Gong Z M, et al. Analysis of dynamic responses and failure modes of R/C beams under blast loading (in Chinese). *Explosion Shock Waves*, 2003, 23: 25–30 [柳锦春, 方秦, 龚自明, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形态分析. *爆炸与冲击*, 2003, 23: 25–30]
- Li M S, Li J, Li H, et al. Deformation and failure of reinforced concrete beams under blast loading (in Chinese). *Explosion Shock Waves*, 2015, 35: 177–184 [李猛深, 李杰, 李宏, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的变形和破坏. *爆炸与冲击*, 2015, 35: 177–184]
- Wang W, Liu R C, Wu B, et al. Damage criteria of reinforced concrete beams under blast loading (in Chinese). *Acta Armament*, 2016, 37: 1421–1428 [汪维, 刘瑞朝, 吴飏, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁毁伤判据研究. *兵工学报*, 2016, 37: 1421–1428]
- Zhang D, Yao S J, Lu F, et al. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading. *Eng Failure Anal*, 2013, 33: 497–504
- Tang D G, Liao Z, Xue Y L, et al. Research for flexural behavior of concrete beams with high-strength reinforcements under blast loading (in Chinese). *J Huazhong Univ Sci Tech (Nat Sci Ed)*, 2017, 45: 122–126 [唐德高, 廖真, 薛宇龙, 等. 爆炸荷载作用下高强钢筋加强混凝土梁抗弯性能. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45: 122–126]
- Du H, Deng P, Du R Q. Numerical analysis on dynamic response of reinforced concrete beam under blasting load (in Chinese). *J Shandong Univ Sci Tech (Nat Sci Ed)*, 2010, 29: 50–55 [都浩, 邓芃, 杜荣强. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁动力响应的数值分析. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 29: 50–55]
- Hao B. Numerical Simulation of Response and Damage Analysis on Reinforced Concrete Beams Subjected to Blast Loading (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of technology, 2014 [郝彬. 爆炸作用下钢筋混凝土梁动力响应数值模拟及破坏分析. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014]
- Sheng L. Numerical Simulation of Dynamic Response of Blast-Loaded RC Beams (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Changsha: Hunan University, 2007 [盛利. 爆炸作用下钢筋混凝土梁动力响应的数值模拟. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2007]
- Wang Y, Dong H L, Wang Z Y. Flexural experiment of concrete beams reinforced with GFRP bars (in Chinese). *J Harbin Inst Tech*, 2018, 50: 23–30 [王洋, 董恒磊, 王震宇. GFRP筋混凝土梁受弯性能试验. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50: 23–30]
- Cheng S Z. Flexural Behavior of High Strength Concrete Beams Reinforced with BFRP Bars and Steel Fiber (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018 [程晟钊. BFRP筋钢纤维复合增强高强混凝土梁受弯性能研究. 博士学位论文. 郑州: 郑州大学, 2018]
- Dong Z Q, Wu G. Calculation method for the maximum crack width of FRP bar reinforced concrete flexural member based on experimental data analysis (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2017, 50: 1–8 [董志强, 吴刚. 基于试验数据分析的FRP筋混凝土梁受弯构件最大裂缝宽度计算方法. *土木工程学报*, 2017, 50: 1–8]
- Chen H, Xie W, Jiang M, et al. Blast-loaded behaviors of severely damaged buried arch repaired by anchored CFRP strips. *Composite Struct*, 2015, 122: 92–103
- Feng J, Zhou Y, Wang P, et al. Experimental research on blast-resistance of one-way concrete slabs reinforced by BFRP bars under close-in explosion. *Eng Struct*, 2017, 150: 550–561
- Zhang Z Q, Shi X Q, Li Z Y. Experimental investigation of flexural behavior of concrete beams strengthened with GFRP (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2011, 46: 745–782 [张志强, 师晓权, 李志业. GFRP筋混凝土梁正截面受弯性能试验研究. *西南交通大学学报*,

- 2011, 46: 745–782]
- 17 Dong Z, Wu G, Xu Y. Experimental study on the bond durability between steel-FRP composite bars (SFCBs) and sea sand concrete in ocean environment. *Construct Building Mater*, 2016, 115: 277–284
 - 18 Liu S F, Zhou Y Z, Zhou J N, et al. Blast responses of concrete beams reinforced with GFRP bars experimental research and equivalent static analysis. *Composite Structures*, 2019, 226: 111271
 - 19 Du Q, Liu Y J, Li X X, et al. Numerical simulation on dynamic response of circular steel-concrete-CFRP-concrete composite columns under blast loading (in Chinese). *J Water Resources Architect Eng*, 2016, 14: 55–60 [杜仇, 刘永军, 李锡鑫, 等. 爆炸荷载下圆截面钢-混凝土-CFRP-混凝土组合柱动力响应数值模拟. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14: 55–60]
 - 20 Wu S. Analysis on the Dynamic Performance of Mutibarrel Tube-Confined Concrete Column under Explosive Load (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Xi'an: Chang'an University, 2015 [吴赛. 爆炸荷载下复式钢管混凝土柱动力响应研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 2015]
 - 21 Mussa M H, Mutalib A A, Hamid R, et al. Assessment of damage to an underground box tunnel by a surface explosion. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2017, 66: 64–76
 - 22 Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User'S Manul. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007
 - 23 Murray Y D, Abu-Odeh A Y, Bligh R P. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. Army Code. USA, 2007. Report No. FHWA-HRT-05-063
 - 24 Zhang C, Gholipour G, Mousavi A A. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading. *Eng Struct*, 2019, 181: 124–142
 - 25 Yu X, Chen L, Fang Q, et al. Blast mitigation effect of the layered concrete structure with an air gap: A numerical approach. *Int J Prot Struct*, 2018, 9: 432–460
 - 26 Yang R S, Ding C X, Wang Y B, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35: 3501–3506 [杨仁树, 丁晨曦, 王雁冰, 等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究. *岩石力学学报*, 2016, 35: 3501–3506]
 - 27 Li N, Zhao J H, Wu S, et al. Blast response of steel fiber reinforced high strength concrete walls based on CONWEP (in Chinese). *J Xi'an Univ Architect Tech (Nat Sci Ed)*, 2014, 46: 833–838, 855 [李楠, 赵均海, 吴赛, 等. 钢纤维高强混凝土墙基于CONWEP的爆炸响应. *西安建筑科技大学学报*, 2014, 46: 833–838, 855]

Experimental study and numerical simulation of explosion resistance of GFRP reinforced concrete beams

LIU SanFeng¹, JIN FengNian¹, ZHOU YinZhi^{1*}, ZHOU JianNan^{1*} & ZHANG Bei^{1,2}

¹ College of National Defense Engineering, the Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

² Research Institute for National Defense Engineering of Academy of Military Science PLA China, Luoyang 471023, China

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars have the advantages of corrosion resistance and high tensile bearing capacity. It can be used as longitudinal reinforcement of concrete protective structures instead of steel reinforcement. In order to clarify the anti-explosion performance of GFRP reinforced concrete beam (GRCBs), the explosion experiment, static bending experiment and numerical simulation analysis of GFRP reinforced concrete beam and reinforced concrete beam (SRCBs) are carried out. The results show that, in the four-point bending static experiment, the bearing capacity of GRCBs designed with the same equivalent stiffness is 5.5 times that of SRCBs under the working condition of 3kg-0.65m explosion loading. With the action of near explosion (proportional detonation distance is less than 0.5159 m kg^{-3}), because the GFRP bars are in the elastic stage, the failure forms are mainly crack, flake and collapse of concrete. According to numerical simulation, the increase of the stiffness of FRP bars can reduce the mid-span displacement of GRCBs. The ratio of the maximum mid-span displacement reduction rate to EA ratio is 0.1, which can reduce the crack and damage of GRCBs and enhance the anti-explosion performance of GRCBs. When the proportional detonation distance is less than 0.4095 m kg^{-3} , C50 and above concrete used in GFRP reinforced concrete beams can effectively reduce concrete collapse and spall. The results show that GRCBs have higher blast resistance than SRCBs.

GFRP bars, reinforced concrete beams, blast loads, dynamic response, numerical simulation

PACS: 81.05.Pj, 46.70.De, 43.28.Mw, 83.85.Vb, 02.60.-x

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0178](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0178)