文章编号: 1001-1455(2006)03-0234-06

GFRP 加固 RC 双向板抗爆性能试验研究*

周布奎[1],王安宝[1],杨秀敏[1],汪忠新[1],王 钊[2]

(1. 总参工程兵第四设计研究院,北京 100850;
2. 解放军理工大学工程兵工程学院,江苏 南京 210007)

摘要: 为探讨化爆条件下玻璃纤维对钢筋混凝土结构的加固效果,对粘贴玻璃纤维条带钢筋混凝土复合板以及普通钢筋混凝土板同时进行了抗爆性能试验,并将两者的结果进行了对比分析。结果表明,玻璃纤维能够有效阻止混凝土裂缝的发展,提高钢筋混凝土板的抗爆能力,研究结果可为玻璃纤维加固机理研究及复合结构的抗爆设计提供依据和参考。

关键词: 爆炸力学;抗爆性能;承载力;玻璃纤维;复合结构

中图分类号: O381; TU378.5 **国标学科代码**: 130·35 **文献标志码**: A

1 引 言

钢筋混凝土施工工艺简单、取材容易,广泛用于建筑结构。长期以来,人们认为混凝土结构具有寿命长和无需维护的特点,但是后来发现,由于地理环境、自然灾害、运营条件的改变、设计和施工不当、年久失修、灾害荷载和环境作用等原因,许多在役钢筋混凝土结构出现了损坏,不能满足正常使用,迫切需要加固。钢筋混凝土结构的加固方法主要有:增大截面法、增设支点法、粘钢法、粘贴纤维加固法等,前两种方法的优点是可以明显提高结构抗力,缺点是影响结构的使用空间;粘钢法已在重要工程加固改造中得到了应用,相关研究也受到了重视[1],但这种结构存在着如下不易克服的缺点:(1)节点不易处理;(2)对施工和材料,特别是对粘结剂要求较高;(3)钢板容易锈蚀,从而引起钢板与混凝土之间粘结层的损坏;(4)价格比较高。

经过多年的研究与实践,人们发现混凝土+纤维复合结构具有较高的承载能力,能够克服混凝土+钢板组合结构的缺点,而且粘贴纤维加固技术具有许多其他方法无法比拟的优点:施工简便、不影响结构的使用空间和功能、耐腐蚀、粘贴后即可发挥作用。市场上常用的纤维主要有碳纤维和玻璃纤维,从经济和结构延性的角度考虑,玻璃纤维更适合于工程的加固改造。

目前关于混凝土+玻璃纤维复合结构在静载条件下的力学性能已经取得了一定的研究成果,主要包括以下几个方面:(1)混凝土+玻璃纤维复合结构梁的研究[2~3],研究结果表明,玻璃纤维能较好地与混凝土协同工作,提高梁的承载力和刚度,大大改善梁的延性;(2)混凝土+玻璃纤维复合结构板的研究[4],结果表明,构件承载能力有明显的提高,但截面变形能力明显减弱。在达到极限状态之前,有一个明显的局部粘结破坏产生和发展的过程,这对改善构件加固后的延性是有利的;(3)其他方面的研究[5],包括受压柱、梁柱节点、界面粘结应力等。

上述的研究成果主要是在静载条件下得出的,有关混凝土+玻璃纤维复合结构在化爆动载条件下的研究成果尚未见报道。本文中以化爆动载条件下外贴玻璃纤维钢筋混凝土双向板为研究对象,对复合结构的受力变形性能进行试验研究,分析玻璃纤维对混凝土板在爆炸荷载作用下的加固效果以及加固方式对加固效果的影响,研究结果可为复合结构的抗爆机理研究及抗爆性能设计提供参考和依据。

* **收稿日期**: 2005-03-23; **修回日期**: 2005-05-23

作者简介: 周布奎(1975—),男,博士。

2　试验设计

2.1　试件设计

试验试件为钢筋混凝土双向板，共 3 块，编号分别为：PB1（普通对比板）、SB2（粘贴方式一板）、SB3（粘贴方式二板），外形尺寸 1 500 mm×1 500 mm×150 mm，全部采用强度等级为 C25 的混凝土浇铸，单面配筋，钢筋为∅12 HPB235 级钢，设计配筋率 0.8%。由于玻璃纤维是一种单向受拉纤维，仅能沿其长度方向受力，故采用板底粘贴纤维条带加固，纤维条带宽 100 mm，沿着平行于板边缘的方向按十字交叉形状粘贴于板底。玻璃纤维布采用南京玻璃纤维研究设计院生产的高强玻璃纤维浸渍片材（SGFW430），纤维布厚 0.169 mm，粘结胶采用该院生产的配套胶（lica 型纤维建筑结构胶）。粘贴方式共两种，如图 1 所示。

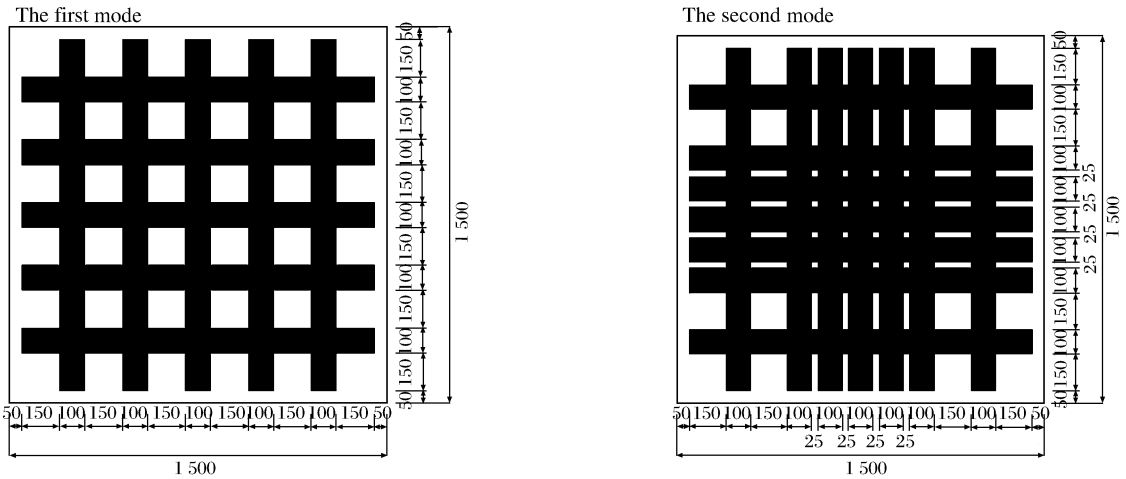

图 1　粘贴方式

Fig. 1　The affixing mode

2.2　测试内容及测点布置

试验量测内容主要包括：试件顶板压力、板底位移以及钢筋和纤维条带的应变。

（1）板顶爆炸压力：由压力传感器测得。试验中压力传感器与动态应变仪及动态数据采集系统相连，通过动态数据采集系统可直接观察板顶压力大小及变化规律，并完整记录板顶压力随时间的变化曲线，测点布置详见图 2；

（2）板底钢筋应变、纤维应变：由事先粘贴于钢筋、纤维表面上的应变片测得，应变片的布置见图 3，应变值由动态应变仪和动态数据采集系统记录；

（3）板底挠度：由板底安装位移计来测得，位移计布置如图 3 所示，位移计和动态应变仪及动态数据采集系统相连，通过动态数据采集系统可完整记录板的挠度随时间的变化曲线。

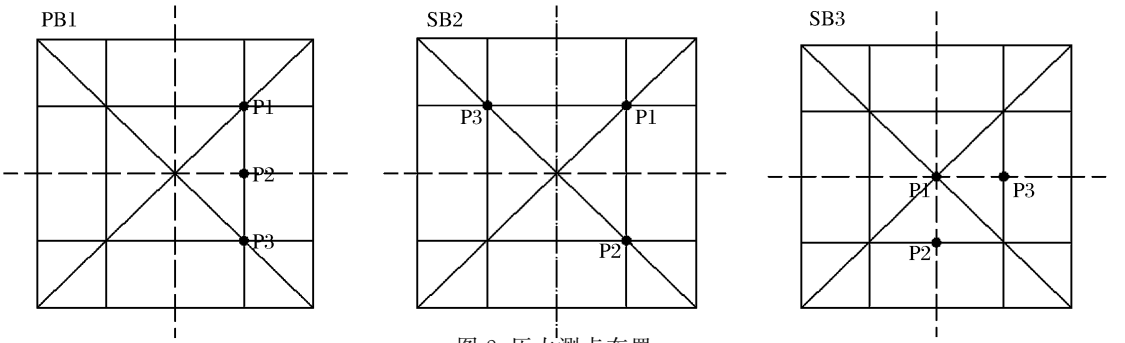

图 2　压力测点布置

Fig. 2　Arrangement of pressure measurement point

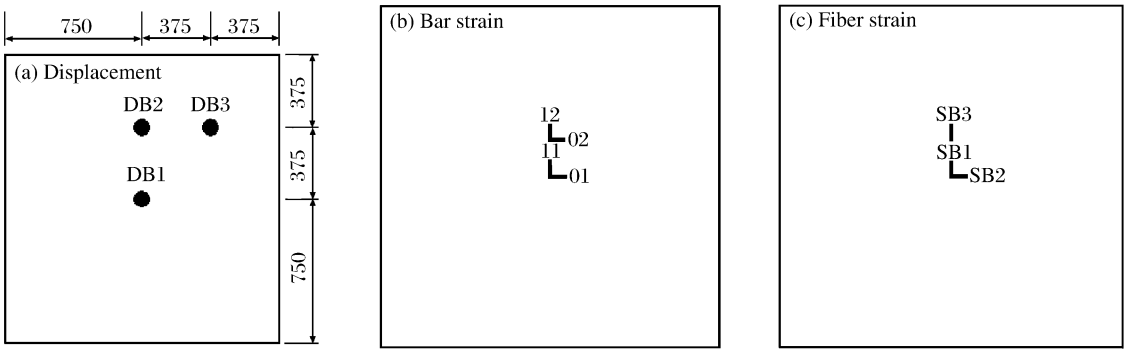

图 3 位移、钢筋及纤维应变测点布置

Fig. 3 Arrangement of displacement and strain of bar and fiber measuring point

2.3 试验原理及装置

试验板四边简支，简支点距板边缘 50 mm，试件吊装就位后，采用不良级配干沙填埋试件，试件顶板复沙厚度为 500 mm。采用 TNT 集中装药作为加载源，埋置在距试件顶面 300 mm 处，爆炸中心投影点位于试件板的中心。采用电雷管起爆，分级加载，直至结构破坏。试验加载装置布置详见图 4。

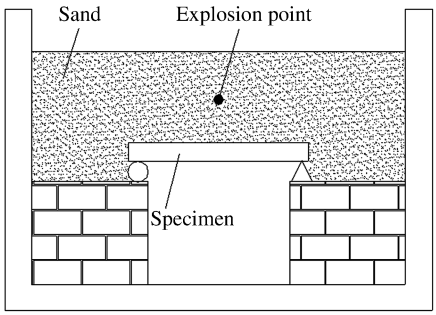

图 4 加载装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the loading set-up

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

爆炸荷载作用下，板顶压力、板底位移、钢筋应变典型的实测时程曲线如图 5～7 所示，图中 m 为 TNT 装药量。

3.2 试验现象描述及结果分析

从图 5 可以看出，化爆作用下，板顶荷载升压时间短，衰减迅速，具有明显的局部作用特点，结构的动态响应时间也很短，所以试件的裂缝开展和破坏过程无法仔细观察，只能在每一炮后观察试件的开裂、破坏情况。下面对 3 块板在爆炸荷载作用下的受力变形试验结果进行对比研究和分析。

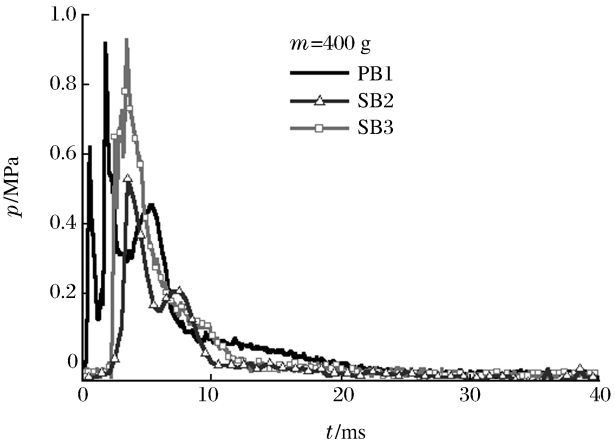

图 5 P3 测点压力时程曲线

Fig. 5 Pressure history curves of P3 point

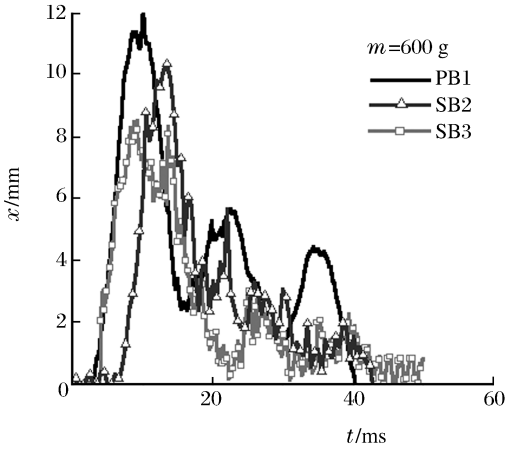

图 6 W1 点位移时程曲线

Fig. 6 Displacement history curves of W1 point

TNT 药量 200 g 时，普通对比试件板顶和板底均无裂缝，试件处于弹性工作状态；

TNT 药量 400 g 时，PB1 试件板顶无裂缝，板底跨中产生四边形裂缝，并在角部向对角线方向延伸（见图 8）。SB2 试件的变形程度与相同药量的普通对比板相近。从钢筋和纤维的应变测试结果可以看出此时板处于弹性工作状态；SB3 试件板底位移小于相同药量的普通对比板和 SB2 加固板，尽管板顶的实测压力大于前两者，说明玻璃纤维条带提高了板的抗弯刚度，且纤维粘贴率越高提高得越明显。板顶和板底均无裂缝出现。

TNT 药量为 600 g 时，PB1 试件板底开裂严重，主裂缝明显，宽度大约为 2 mm，基本上是以板底中心为圆心向四周呈放射状分布，不仅对角线方向的裂缝较宽，与板边平行的裂缝也较宽；SB2 试件板顶完好，板底未粘贴纤维条带的区域出现了细裂缝，宽度约 0.2 mm，呈断断续续的形状，在纤维粘贴处止裂，与相同药量的普通对比板相比，板底裂缝的数量、长度、宽度明显减小，板底位移也小于相同药量的普通对比板，说明纤维条带有效阻止了裂缝开展，增加了板的抗弯刚度，此时玻璃纤维的应变均小于极限应变，处于弹性状态；SB3 试件顶面完好，板底跨中产生难以看到的少量细短裂缝。板底位移比相同药量下的普通钢筋混凝土对比板减小了近 50%，比 SB2 加固板降低了 20%，证明按方式二进行加固效果是明显的。TNT 药量为 600 g 时，PB1、SB2、SB3 试件板底裂缝分布如图 9 所示。

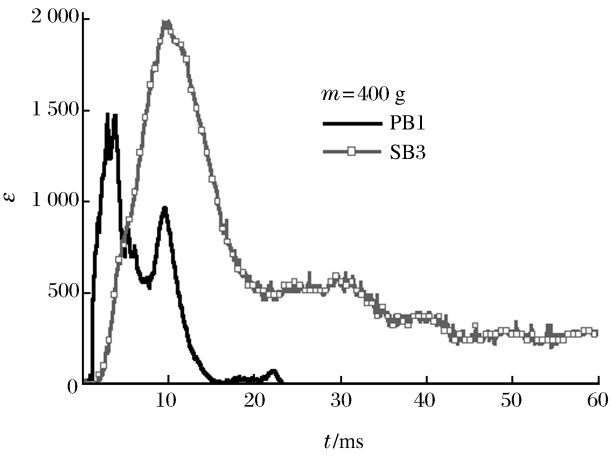

图 7　PB1 板 11 点钢筋应变时程曲线

Fig. 7　Strain history curves of 11 point

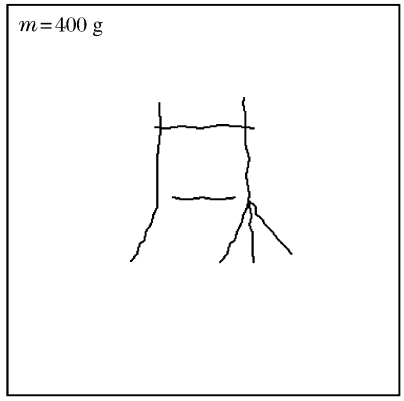

图 8　PB1 板底裂缝分布

Fig. 8　Crack distribution of PB1

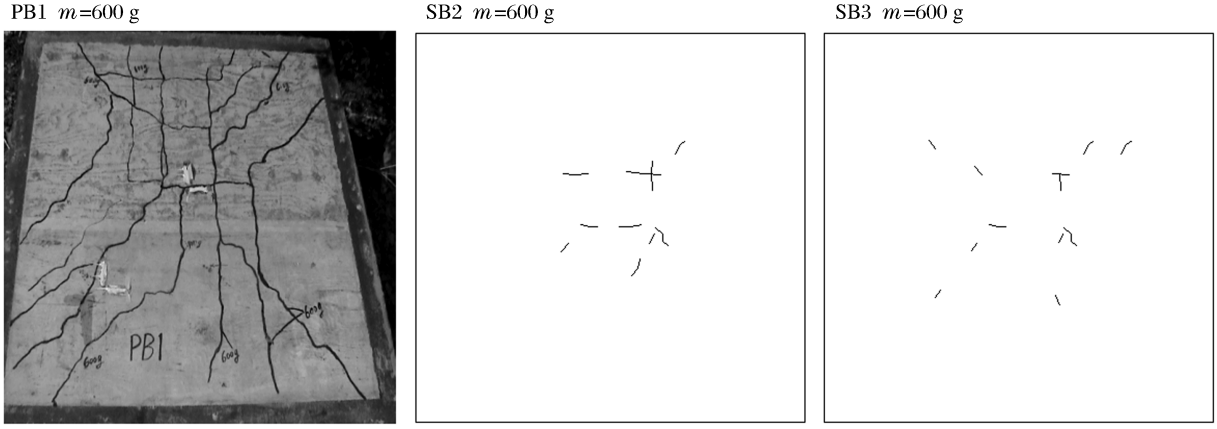

图 9　PB1、SB2、SB3 板底裂缝分布

Fig. 9　Crack distributions of PB1, SB2 and SB3

TNT 药量为 800 g 时，SB2 试件钢筋屈服，板底原有裂缝沿对角线方向发展延伸至板角，有 2～3 条沿平行于板边方向延伸至板边，同时在板底其他部位产生了新裂缝，主要位于未粘贴纤维条带的区域，且呈断续分布形状，在纤维条带处闭合；裂缝宽度约为 0.8 mm，无明显主裂缝，试件最终因剪切而

破坏，板底面中心混凝土震塌脱落，板底跨中纤维条带被冲断，中部出现了方形冲切区域，再次证明化爆荷载的局部作用特点；SB3 试件板顶无裂缝，板底未粘贴区产生了细微的裂缝，跨中粘结胶表面产生了呈白色的细小裂缝，宽度不到 0.15 mm，裂缝主要分布在未粘贴纤维的混凝土表面，且主要是断断续续的形状，接近纤维部位重新闭合。TNT 药量为 800 g 时，SB2 和 SB3 试件的板底裂缝分布情况如图 10 所示。

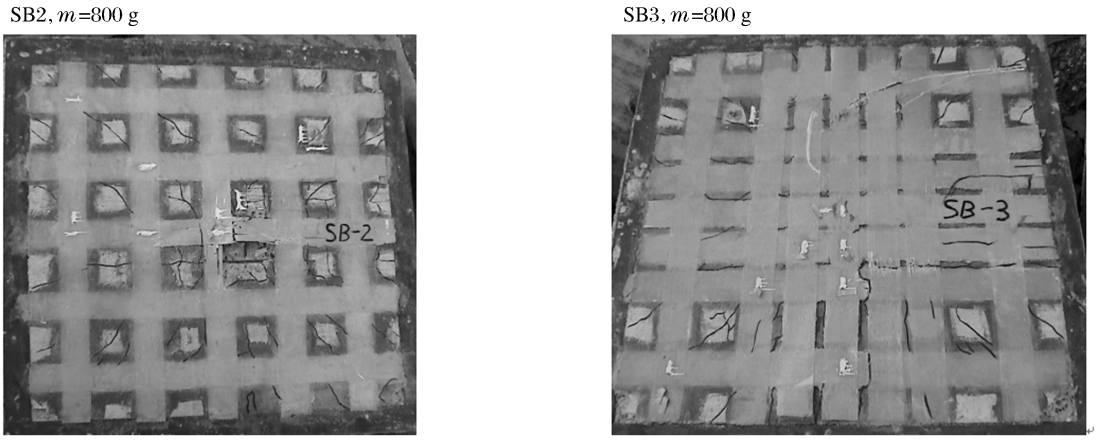

图 10 SB2、SB3 板底裂缝分布

Fig. 10 Crack distributions of SB2 and SB3

4 结 论

根据试验测试结果及试验现象的描述和分析，可以得出如下主要结论：

(1)玻璃纤维加固混凝土板在爆炸荷载作用下的最终破坏现象相似：板跨中部因混凝土震塌脱落发生局部粘结破坏，部分玻璃纤维被拉断，边缘多处发生局部粘结破坏，纤维条带脱落，普通试件和加固试件的主要裂缝均以板底中心为圆心呈放射状分布。

(2)板顶荷载与自由场冲击波和结构的动力响应密切相关，一般具有两个波峰，升压时间短，衰减迅速，因爆点在板的正上方，板跨中部压力较大，边缘处压力较小，表明化爆具有明显的局部作用特点。

(3)试验中所有的试件均进行了分级加载，药量由小到大，根据玻璃纤维应变测试结果及试验现场观察，试验过程中没有出现纤维剥落现象，说明化爆荷载条件下，玻璃纤维和钢筋混凝土协同工作良好，在截面内力计算时，可将其按和钢筋相同的处理方法处理。

(4)根据试件的位移和应变测试结果，药量较小时，结构处于弹性工作阶段，玻璃纤维加固板和普通钢筋混凝土板的动态响应相差不大，说明此时玻璃纤维并没有发挥作用。增加药量，试件破坏之前，粘贴玻璃纤维试件的裂缝长度、宽度均小于普通对比试件，而且玻璃纤维粘贴率越高，这种现象越明显，说明玻璃纤维能够有效阻止混凝土裂缝的开展。

(5)结构的最大位移与药量和板的刚度直接相关，最大值出现在荷载的下降段，药量越大位移也越大，相同试验条件下，加固试件的抗弯刚度高于普通试件，尤其是在钢筋屈服段，根据试件的最大位移响应，第二种加固方式的加固效果明显优于第一种加固方式：TNT 药量为 600 g 时，SB3 板(第二种加固方式)的位移比普通板减小了 30%～42%，比 SB2 板(第一种加固方式)减小了 18%～40%，增加跨中板带的玻璃纤维粘贴率可明显提高试件的抗力。

参考文献：

[1] 张继文，吕志涛. 承受均匀荷载混凝土双向板的粘钢板加固设计[J]. 建筑结构，2001，31(12)：20－23.
ZHANG Ji-wen，LÜ Zhi-tao. The design of two way RC slab reinforced with steel plate under equispaced load[J]. Journal of Building Structure，2001，31(12)：20－23.

[2] Mukhopadhyaya P, Swamy N, Lynsda C. Optimizing structural response of beams strengthened with GFRP[J]. Journal of Composites for Construction, 1998,2(2):87－95.

[3] Buyukozturk O, Hearing B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP[J]. Journal of Composites for Construction, 1998,2(23):138－144.

[4] 曹双寅.外贴纤维复合材料加固 RC 悬臂板的实验研究及简化计算[J].土木工程学报,2001,34(1):39－43.
CAO Shuang-yin. Experiment study and simplified calculation of RC projecting slab reinforced with FRP externally [J]. Journal of Civil Engineering, 2001,34(1):39－43.

[5] Granata P J, Parvin A. An experimental study on kevlar strengthening of beam-column[J]. Composite Structures, 2001,53(2):163－171.

Chemical explosion resistance performance of two-way RC slab reinforced with GFRP ribbon externally

ZHOU Bu-kui[1*], WANG An-bao[1], YANG Xiu-min[1],
WANG Zhong-xin[1], WANG Zhao[2]

(1. *Bulding Design and Research Academy of Canbao, Beijing* 100850, *China*;
2. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: The explosion resistance performance of reinforced concrete (RC) slabs reinforced with glass fiber reinforced plastic (GFRP) ribbon and the common RC slab were experimentally studied to explore the strengthening effect of GFRP on RC structures under explosion load. The experimental results show that GFRP can prevent the development of concrete flaw and enhance the explosion resistance performance of RC slab. The researched result can provide a reference for reinforcement mechanism study of GFRP and explosion resistance design of RC slabs reinforced with GFRP.

Key words: mechanics of explosion; explosion resisting performance; bearing capacity; GFRP; combination structure

* Corresponding author: ZHOU Bu-kui
E-mail address: zbk111@sina.com
Telephone: 010-66860218