

# 外贴玻璃纤维钢筋混凝土双向板抗爆性能研究

周布奎<sup>1</sup>, 王安宝<sup>1</sup>, 杨秀敏<sup>1</sup>, 汪忠新<sup>1</sup>, 王朝<sup>2</sup>

(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:** 玻璃纤维材料具有强度高, 韧性好, 耐腐蚀, 施工工艺简单等诸多特点, 已被广泛应用于一般民用建筑结构的加固改造, 以提高其承载力, 延长使用寿命。与此同时, 有关粘贴玻璃纤维钢筋混凝土复合结构在静载条件下的受力性能研究逐渐受到国内外相关学者的广泛关注, 并取得了一定的研究成果。但是, 有关动载条件下的应用和研究尚属起步。为探讨抗爆条件下玻璃纤维对钢筋混凝土结构的增强机理和效果, 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抗爆性能试验, 对两者的受力变形过程进行研究, 并将两者的结果进行对比分析。结果表明, 玻璃纤维能够有效阻止混凝土裂缝的发展, 能提高钢筋混凝土板的抗爆能力。研究结果可以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:** 结构工程; 玻璃纤维; 抗爆性能; 复合结构; 承载力

**中图分类号:** TU 528.572

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 1 - 4887 - 07

## STUDY ON CHEMICAL EXPLOSION RESISTING PERFORMANCE OF TWO-WAY RC SLAB REINFORCED WITH GFRP RIBBON EXTERNALLY

ZHOU Bu-kui<sup>1</sup>, WANG An-bao<sup>1</sup>, YANG Xiu-min<sup>1</sup>, WANG Zhong-xin<sup>1</sup>, WANG Zhao<sup>2</sup>

(1. *Building Design and Research Academy of Canbao, Beijing 100850, China;*

2. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China*)

**Abstract:** The glass fiber reinforced(GFRP) plastic material has many characteristics such as high intensity, large ductility, resisting erosion, simple construct technology, etc.. In order to improve bearing capacity of structure and extend the expiration date, the GFRP is used to rebuild and reinforce common civil building structures. In the same time, the domestic and overseas scholars pay more attention to the characteristics about the complex structure of GFRP and reinforced concrete under static loading gradually, and have obtained many achievements. The application of complex structure characteristics of GFRP and concrete under dynamic loading is initiated. In order to study the strengthening effect and mechanism of GFRP on RC (reinforced concrete)structures under explosion load, the explosion resisting performance of RC slabs reinforced with GFRP ribbon and that the common RC slabs are simultaneously studied. The deforming processes of GFRP reinforced concrete slabs and those of the common concrete slabs under explosion loading are also studied. The test results indicate that GFRP can control the development of concrete flaw effectively and enhance the explosion resisting performance of RC slab, which can provide reference to reinforcement mechanism study of GFRP and explosion resisting design of RC slabs reinforced with GFRP.

**Key words:** structural engineering; glass fiber reinforced plastic(GFRP); explosion resisting performance; combination structure; bearing capacity

**收稿日期:** 2005 - 04 - 28; **修回日期:** 2005 - 06 - 24

**作者简介:** 周布奎(1975 -), 男, 博士, 2003 年毕业于解放军理工大学工程兵工程学院防灾减灾及防护工程专业, 主要从事防护工程方面的研究工作。Email: zhoubukui@sohu.com.

# 1 引言

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，但是后来人们发现，由于地理环境、自然灾害、设计和施工不当、年久失修等原因，许多钢筋混凝土结构出现了病害，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<sup>[1]</sup>，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所无法比拟的优点：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，玻璃纤维更适合于承受动荷载工程的加固改造。

目前，关于“混凝土+纤维”复合结构的力学性能研究已经取得了一定的研究成果，主要是在静载条件下得出的，包括以下几个方面：(1) “混凝土+玻璃纤维”复合结构梁的研究<sup>[2-3]</sup>，研究表明，玻璃纤维能较好地与混凝土协同工作，提高了梁的承载力和刚度，大大改善了梁的延性；(2) “混凝土+玻璃纤维”复合结构板的研究<sup>[4-5]</sup>，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<sup>[6-7]</sup>，包括受压柱、梁柱节点、界面粘结应力等。动荷载条件下复合结构的研究成果相对较少，文[8]对碳纤维加固混凝土单向板的抗爆性能进行了探讨，分析了结构胶和纤维粘贴层数对构件变形的影响。

本文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了试验研究，分析了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。

# 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，外形尺寸 1 500 mm×1 500 mm×150 mm，全部采用强度等级 C25 的混凝土浇筑，单面配筋，设计配筋率 0.8%，钢筋等级为 HPB235。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)，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 2 种，详见图 1，2。试验用材料的力学性能指标见表 1。

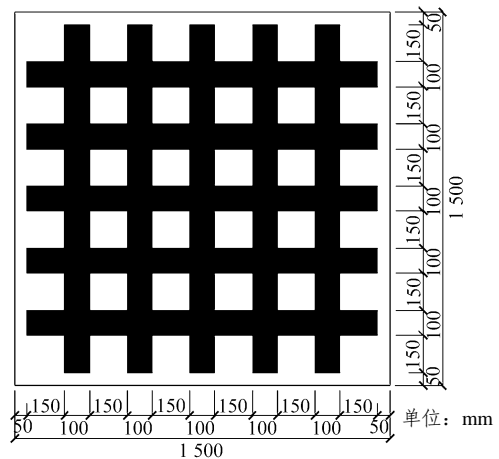


图 1 粘贴方式 I  
Fig.1 Affixing mode I

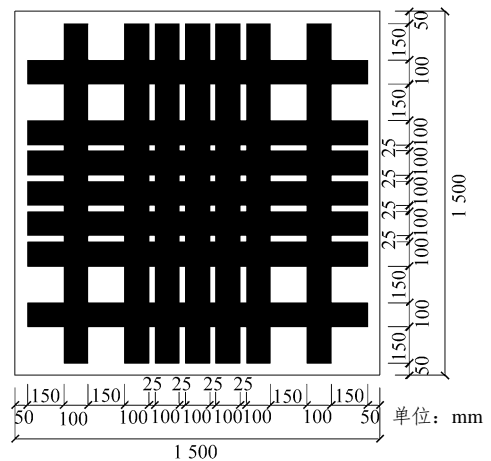


图 2 粘贴方式 II  
Fig.2 Affixing mode II

表 1 材料力学性能试验结果

Table 1 Test results of material mechanical property

材料类别	型号或规格	弹性模量 /MPa	抗压强度 /MPa	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa
混凝土	边长 150 mm 的立方体	-	28.2	-	-
钢筋	HPB235	$1.68 \times 10^5$	-	422.4	467.80
玻璃纤维	SGFW430	$1.007 \times 10^5$	-	-	1 775.15
粘结胶	Lica 型纤维建筑结构胶	3 262.4	81.40	-	47.45

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、板底位移及钢筋和纤维条带的应变。

(1) 板顶压力

通过压力传感器来测得，压力传感器和动态应变仪及动态数据采集系统相连，数据采集系统可完

整记录板顶压力随时间的变化曲线，压力测点布置详见图 3。

(2) 板底钢筋、纤维应变：通过事先粘贴于钢筋、纤维表面上的应变片来测得，由动态应变仪和动态数据采集系统记录，应变测点布置见图 4。

(3) 板底挠度：由板底安装位移计来测得，位移计布置如图 4 所示，位移传感器和动态应变仪及动态数据采集系统相连。

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，采用不良级配干砂填埋试件，试件顶板覆砂厚度为 500 mm。采用 TNT 集团装药作为加载源，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，分多级进行加载，至结构破坏为止。试验加载装置详见图 5。

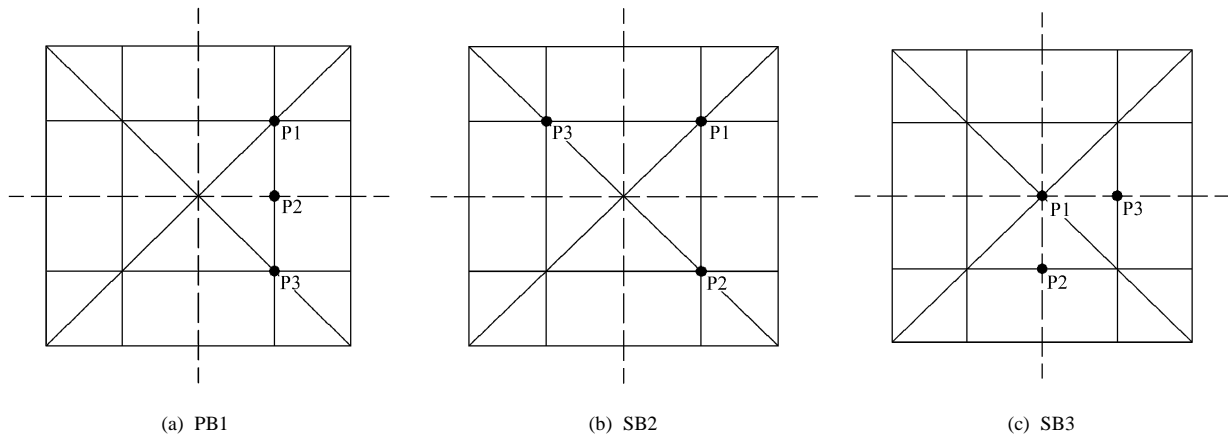


图 3 压力测点布置

Fig.3 Arrangement of pressure measuring point

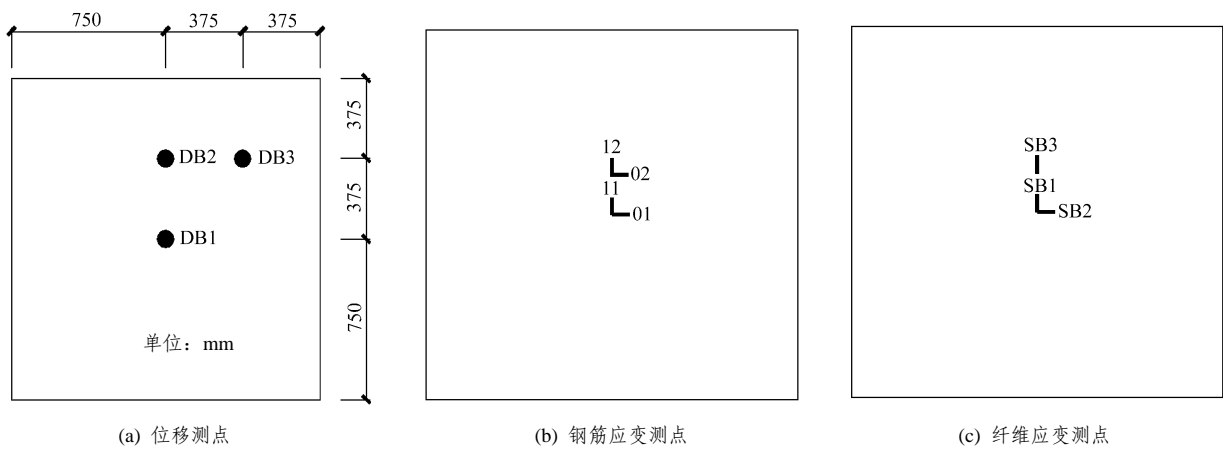


图 4 位移、钢筋及纤维应变测点布置

Fig.4 Arrangement of displacement, strain of bar and fiber measuring point

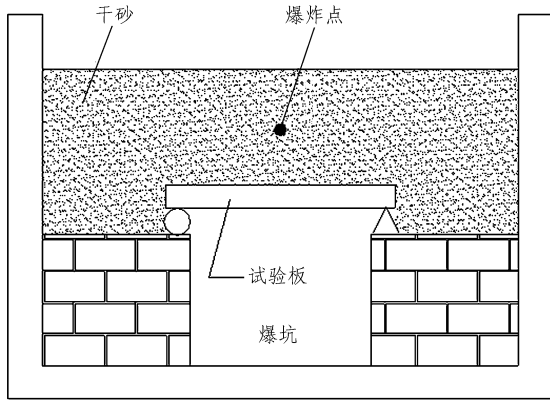


图 5 加载装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of test facility

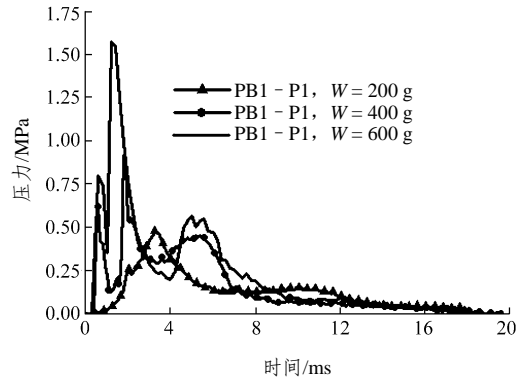


图 6 PB1 板 P1 点压力时程曲线

Fig.6 Pressure and time-dependent curves of point P1 in plate PB1

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 试验测试结果

爆炸荷载作用下，板顶压力、板底位移、钢筋及纤维应变的测试结果见表 2~4，典型的板顶压力、板底位移、钢筋及纤维应变时程曲线见图 6~9。

表 2 板顶压力测试结果

Table 2 Results of pressure MPa

药量/g	试件编号								
	PB1			SB2			SB3		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
200	0.47	1.04	0.32	-	-	-	-	-	-
400	0.92	2.04	0.98	0.46	0.61	0.56	3.3	1.0	0.95
600	1.60	2.80	0.83	1.18	1.63	1.18	-	-	-

表 3 试件位移测试结果

Table 3 Results of displacement mm

药量/g	编号								
	PB1			SB2			SB3		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
200	5.2	-	4.8	-	-	-	-	-	-
400	5.1	-	5.0	5.9	6.8	2.9	4.9	5.6	4.3
600	12.0	15.2	9.8	10.4	13.1	10	8.5	9.8	5.9

表 4 应变测试结果

Table 4 Results of strain test  $\mu\epsilon$

药量/g	编号								
	PB1			SB2			SB3		
	10	11	SB1	SB3	01	02	SB1	SB2	SB3
200	323.5	1154	-	-	-	-	-	-	-
400	1476.0	1669	1625	2760	1340	2030	2370	-	-
600	2236.0	2242	4650	-	9840	12300	21080	18580	17700

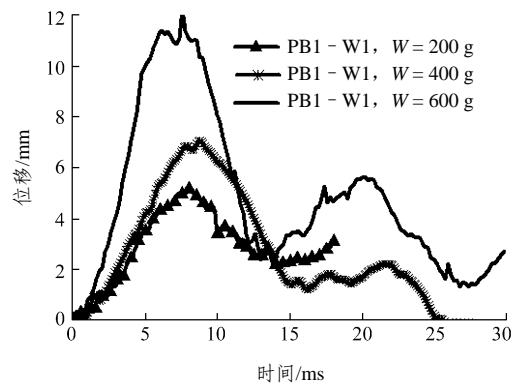


图 7 W1 点位移时程曲线

Fig.7 Displacement and time-dependent curves of point W1 in plate PB1

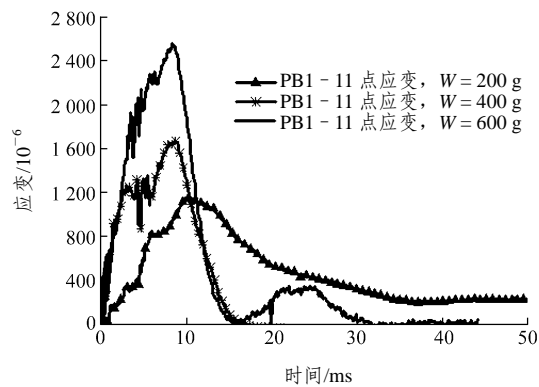


图 8 PB1 板 11 点钢筋应变时程曲线

Fig.8 Strain and time-dependent curves of point No.11 in plate PB1

#### 3.2 试验现象描述及结果分析

从图 6~9 可看出，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验

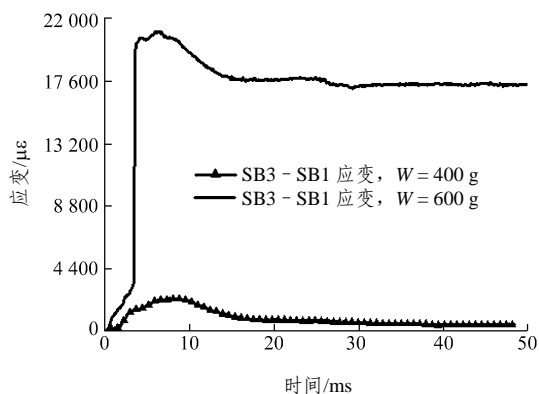


图 9 SB3 板纤维 SB1 点应变时程

Fig.9 Strain and time-dependent curves of point SB1 in plate SB3

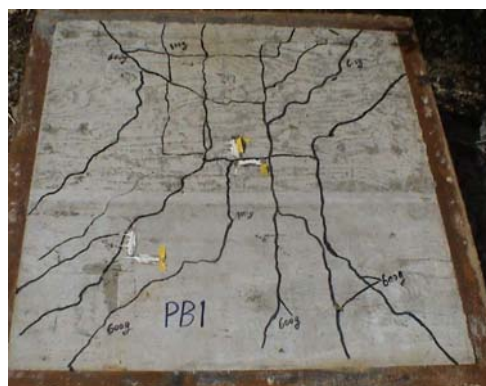


图 11 第三炮 PB1 板底裂缝分布

Fig.11 Crack distribution in the bottom of PB1 after the third explosion

板的开裂、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分别研究与分析。

(1) PB1 板

第一炮, TNT 药量 200 g, 板顶和板底均无裂缝, 试件处于弹性工作状态; 第二炮, TNT 药量 400 g, 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 10。第三炮, TNT 药量 600 g, 10, 11 点钢筋的应变分别为 2 236 和 2 442 με, 小于屈服应变, 但是板底开裂严重, 主裂缝明显, 宽度大约为 2 mm, 以爆心投影点为中心沿对角线方向分布, 板底裂缝分布见图 11, 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。

(2) SB2 板

第一炮, TNT 药量 400 g, 板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; 第二炮,

TNT 药量 600 g, 板顶无裂缝, 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, 在纤维粘贴处闭合, 见图 12。与相同药量的普通对比板相比, 板底裂缝的开展程度明显减小, 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, 说明纤维仍然处于弹性状态; 第三炮, TNT 药量 800 g, 11 点钢筋的应变为 7 240 με, 远超出了钢筋的屈服应变, 测点 SB2, SB3 玻璃纤维的应变分别为 13 920, 6 740 με。试验板板底原有裂缝沿着对角线方向发展延伸至板角, 有 2~3 条按平行于板边方向延伸至板边缘, 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, 见图 13, 再次证明化爆荷载的局部作用特点。

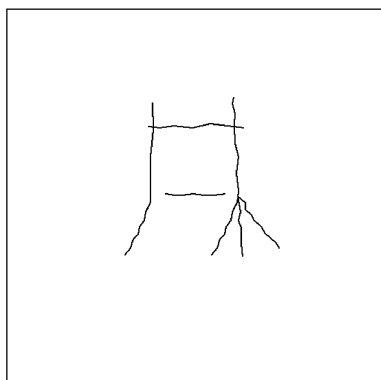


图 10 第二炮 PB1 板底裂缝分布

Fig.10 Crack distribution in the bottom of PB1 after the second explosion

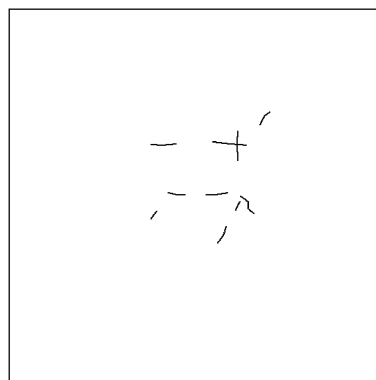


图 12 第二炮 SB2 板底裂缝分布

Fig.12 Crack distribution in the bottom of SB2 after the second explosion

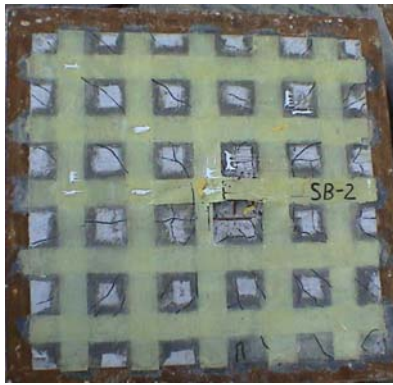


图 13 第三炮 SB2 板底裂缝分布

Fig.13 Crack distribution in the bottom of SB2 after the third explosion

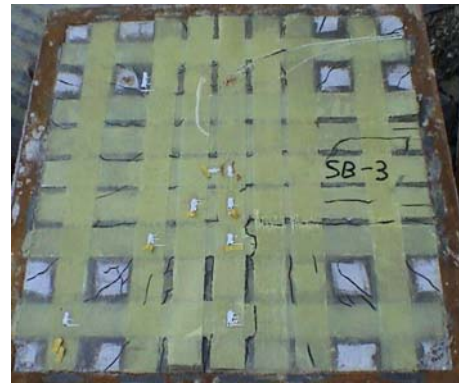


图 15 第三炮 SB3 板底裂缝分布

Fig.15 Crack distribution in the bottom of SB3 after the third explosion

### (3) SB3 板

第一炮，TNT 药量 400 g，板底位移小于相同药量的 PB1 板和 SB2 板，尽管板顶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的越明显。板顶和板底均无裂缝出现；第二炮，TNT 药量 600 g，板底位移比相同药量的 PB1 板减小了近 50%，比 SB2 板降低了 20%，再次证明按方式二进行加固效果是明显的，从应变的角度看钢筋和纤维均超过了极限弹性应变，钢筋出现屈服，纤维出现拉断破坏。板顶面无裂缝，板底跨中产生难以看到的少量细短裂缝，见图 14；第三炮，TNT 药量 800 g，板顶无裂缝，板底未粘贴区产生了细微的裂缝，跨中粘接胶表面产生了呈白色状的细小裂缝，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。试件开裂情况详见图 15。

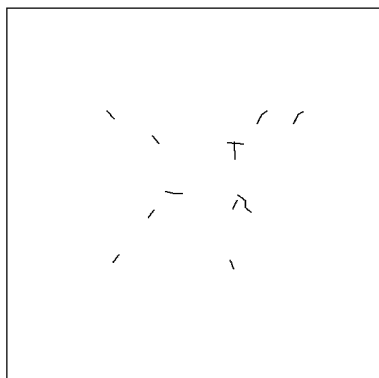


图 14 第二炮 SB3 板底裂缝分布

Fig.14 Crack distribution in the bottom of SB3 after the second explosion

## 4 试验小结

根据试验测试结果及试验现象描述和分析，可以看出，板顶荷载与入射冲击波和结构的动力响应密切相关，一般具有 2 个波峰，且升压时间短，衰减迅速，爆点投影点压力较大，边缘处压力较小，表明化爆具有明显的局部作用特点。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。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。两种粘贴玻璃纤维的钢筋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。结构的最大位移与药量和板的刚度直接有关，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。

### 参考文献(References):

[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 Jiwen, Lu Zhitao. The design of two-way RC slab reinforced with steel plate under uniform load[J]. Journal of Building Structure, 2001, 31(12): 20 - 23.(in Chinese))
- [2] Mukhopadhyaya P, Swamy N, Lynsda C. Optimizing structural response of beams strengthened with GFRP[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 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, ASCE, 1998, 2(3): 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, 2000, 34(1): 39 - 43.(Cao Shuangyin. Experiment study and simplified calculation of RC projecting slab reinforced with FRP externally[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 34(1): 39 - 43.(in Chinese))
- [5] 方德平. CFRP 或钢条带加固混凝土双向板的承载力分析[J]. 华侨大学学报, 2002, 23(3), 260 - 262.(Fang Deping. Bearing capacity analysis of two-way concrete slab reinforced with CFRP or steel ribbon[J]. Journal of Huaqiao University, 2002, 23(3), 260 - 262.(in Chinese))
- [6] Granata P J, Parvin A. An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column composite structures[J]. Composites structures, 2001, 53(2): 163 - 171.
- [7] Yuan H. Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates[J]. JSCE, 2001, 675(1 - 55): 27 - 39
- [8] 李水泉. 碳纤维布(CFS)加固结构抗爆性能试验研究[硕士学位论文][D]. 南京: 解放军理工大学, 2002.(Li Shuiquan. Experimental study on resisting explosion characteristic of reinforced concrete structure strengthened by CFS[M. S. Thesis][D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2002.(in Chinese))