

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.004

基于压电损伤监测的 CFRP 加固混凝土板 抗爆性能实验研究*

蔡路军^{1a,2,3}, 陈少杰^{1a,2,3}, 吴立过^{1a,2,3}, 许凯^{1b}

(1. 武汉科技大学 a. 理学院; b. 城市建设学院, 武汉 430065;

2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;

3. 中铁广州工程局 武科大爆破技术研究中心, 武汉 430065)

摘要: 针对普通钢筋混凝土板和碳纤维布加固混凝土板(CFRP)进行爆破试验,比较了不同 TNT 炸药当量下 CFRP 加固板的破坏机理和动态响应。实验采用嵌入式压电智能骨料监测混凝土板的内部损伤状况,利用小波包能量分析理论计算损伤指数,并通过加速度和应变片监测混凝土板在爆炸荷载作用下的动态响应。实验结果表明:在药量较小(10 g、20 g、40 g)时,经过 CFRP 加固的混凝土板在相同爆破荷载作用下损伤指数相比于普通板分别降低了 29.05%、27.44%、15.85%,表明粘贴于结构背部的 CFRP 材料分摊了拉伸波所携带的部分能量,延缓了混凝土的开裂,提高了混凝土的抗爆性能;但当药量较大(80g、160 g)时,CFRP 加固板损伤指数相比于普通板降低了仅为 8.69%、0.35%,CFRP 材料对提高混凝土板抗爆性能不明显。

关键词: 爆炸荷载; 损伤监测; 智能骨料(SA); CFRP 加固混凝土板

中图分类号: TD375.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0019-07

Experimental Study on Anti Explosion Performance of CFRP Reinforced Concrete Slabs based on Piezoelectric Damage Monitoring

CAI Lu-jun^{1a,2,3}, CHEN Shao-jie^{1a,2,3}, WU Li-guo^{1a,2,3}, XU Kai^{1b}

(1. a. College of Science; b. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Engineering Technology Research Center in Intelligent Blasting of Hubei Province, Wuhan 430065, China; 3. China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., & Research Center of Blasting Technology, WUST, Wuhan 430065, China)

Abstract: Blasting tests were carried out for ordinary reinforced concrete slabs and carbon fiber reinforced plastics(CFRP) concrete slabs, and different TNT explosive equivalents were used to compare the failure mechanism and dynamic response of the CFRP reinforced slabs. In the experiments, embedded piezoelectric intelligent aggregates were used to monitor the internal damage of the concrete slabs. The theory of wavelet packet energy analysis was used to calculate the damage index, and the acceleration and strain gauges were used to monitor the dynamic response of the concrete slabs under explosive loads. The experimental results show that when the amount of charge is 10 g, 20 g, and 40 g, the damage index of the CFRP reinforced concrete slab under the same blasting load is reduced by 29.05%, 27.44%, and 15.85%, respectively, compared to ordinary concrete slabs. The CFRP material pasted on the back of the structure shares part of the energy carried by the tensile wave, which delays the cracking of the concrete, and improves the anti-blast performance of the concrete. However, when the amount of charge is as large as 80 g and 160 g, the damage index of CFRP reinforced slabs is only 8.69% and 0.35% lower than that of ordinary slabs. In

this case, the CFRP materials does not improve the blast resistance of concrete slabs obviously.

Key words: explosion load; damage detection; smart aggregate (SA); CFRP reinforced concrete slabs

近年来,天然气爆炸和恐怖袭击事件频发,导致建筑结构经常处于爆炸荷载之下,受到不同程度的损伤,甚至破坏^[1-5]。因此,如何防护建筑结构在爆炸荷载作用下的破坏,并对结构进行损伤监测是非常重要的。碳纤维布(Carbon Fibre Reinforced Plastics)具有自重轻、力学性能优越、强度高、抗热冲击和抗热摩擦性能优异等特点,常被用于结构加固修复和工程改造过程中。Hao Zhou 等人研究了 CFRP 加固混凝土在疲劳循环荷载作用下的性能,实验结果表明,CFRP 加固混凝土在疲劳循环荷载作用下,破坏模式取决于混凝土的强度、类型、CFRP 层压板的尺寸和加载幅度^[6]。R Al-Rousan 等人研究了不同 CFRP 类型和结构加固钢筋混凝土板的性能,并建立了三维有限元模型,模拟了不同结构 CFRP 复合材料的圆形钢筋混凝土柱的响应^[7,8]。Zhen Huang 等人研究了 CFRP 网格作为抗弯、抗剪钢筋对混凝土板冲击剪切作用的影响,并研究对比了 CFRP 网格的不同放置方案^[9]。Hasan Elci 对修复不当的混凝土柱用 CFRP 进行抗震加固,实验结果表明,CFRP 修复过的混凝土柱其横向强度、刚度、延性和耗能特性明显增强^[10]。Rami H Haddad 等人采用近表面安装 CFRP 条来加固钢筋混凝土梁,并研究了碳纤维布条的剖面形状对结构性能改善的影响^[11]。张军伟等人研究了 CFRP 加固混凝土梁受弯性能实验,研究结果表明 CFRP 在钢筋屈服后发挥的作用最大^[12]。杜永峰等人利用压电智能骨料研究工程应用中套筒灌料的早期强度。Xu K 等人提出了一种利用嵌入式 PZT 压电智能骨料监测混凝土柱在爆炸荷载作用下损伤的新方法,并证明了所提出的主动监测方法的有效性^[14]。总结国内外研究,应用 CFRP 材料加固混凝土并研究混凝土各项基本力学性能较多,在实验研究和数值模拟方面都有很大的进展,而针对 CFRP 加固混凝土抗爆性能研究较少,受限于各项条件,实验开展数量还不够,且内部埋置压电智能骨料探测爆破作用下结构的损伤几乎是空白。

通过在混凝土板内埋置 PZT 压电智能骨料,监

测板在爆炸荷载作用下的损伤状况,并运用小波包能量分析方法对板的损伤情况进行判定,实验通过对比 CFRP 加固板和普通板在不同炸药当量作用下的内部损伤,研究 CFRP 材料对混凝土结构抗爆性能的提升,同时通过加速度和应变监测及板的破坏形态,反映混凝土板的抗爆性能。

1 压电传感器损伤监测基本原理

1.1 压电传感器

PZT 压电陶瓷材料(Piezoelectric Ceramic Transducer)是脆性的且防水性差,不能在没有保护的情况下直接放置在混凝土材料中使用,因此制作了一种智能骨料 SA(Smart Aggregate),即将 PZT 薄膜夹在两个大理石块之间进行保护,两个大理石块之间用环氧树脂进行粘贴封装,如图 1 所示,PZT 薄膜直径为 15 mm,厚度为 0.3 mm,带有 BNC 接头的电缆用于提供对智能骨料的电连接。采用这种封装措施,PZT 在大理石块保护下可以将其埋入混凝土中使用。

1.2 损伤监测原理

PZT 压电智能骨料具有正逆压电效应,在受到应力应变作用时可以产生电荷,受到电场作用时会产生应力应变,因此,智能骨料既可以作为驱动器也可以作为传感器。如图 2 所示,嵌入在混凝土板中的一个智能骨料作为驱动器产生沿结构传播的应力波,传播路径上的裂缝会显著降低应力波所携带的能量,被另一个作为传感器的智能骨料接收。由于传感器是嵌入在混凝土内部的,通过分析采集到的应力波信号,可以监测混凝土结构内部的损伤情况。

1.3 小波包分析和损伤指数

小波包分析能够在相对较短的时间窗口中检查相对较窄的频带中的信号,对于结构损伤监测的信号处理非常有效^[15,16]。本文基于小波包分析,给出了不同损伤下接收能量的对应值。传感器接收的信号 S 可以在 n 次分解下得到 2^n 组信号 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{2^n}\}$,其中 X_j 可以表示为 $X_j = \{X_{j,1}, X_{j,2}, X_{j,3}, \dots, X_{j,m}\}$ (m 为采样点)。分解信号的能量被定义为

$$E_{i,j} = \|X_j\|_2^2 = x_{j,1}^2 + x_{j,2}^2 + \dots + x_{j,m}^2 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 2^n) \quad (1)$$

因此, i 时刻被分解后的能量向量为

$$E_i = [E_{i,1}, E_{i,2}, E_{i,3}, \dots, E_{i,2^n}] \quad (2)$$

式中, i 是时间指数, j 是频带数 ($j = 1, 2, \dots$),

收稿日期:2021-06-15

作者简介:蔡路军(1975-),男,副教授,从事岩石动力学与爆炸力学研究工作,(E-mail)cailujun@wust.edu.cn。

通讯作者:陈少杰(1996-),男,硕士研究生,从事岩石动力学与爆炸力学研究,(E-mail)1921683619@qq.com。

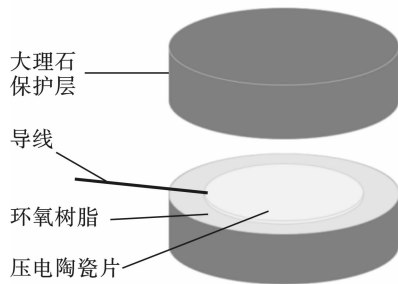
基金项目:国家自然科学基金(51574184);湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20151105)

2ⁿ)。第 *i* 次爆炸损坏指数定义为

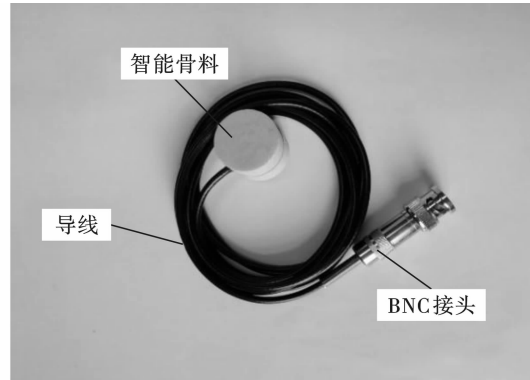
$$R = \sqrt{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{i,j} - E_{h,j})^2 / E_{h,j}^2} \quad (3)$$

式中, $E_{h,j}$ 是健康状态下第 *j* 次频带分解传感器

的能量。爆炸损伤指数表示为传播过程能量损失部分。当 *R* 值接近于 0 时,结构处于健康状态;*R* 值越大,表示损伤越严重,当 *R* 值接近 1 时,意味着结构中发生了严重的损伤。



(a) 智能骨料内部结构图
(a) Internal structure diagram of SA



(b) 智能骨料实物图
(b) SA physical map

图 1 压电智能骨料

Fig. 1 Illustration of a smart aggregate

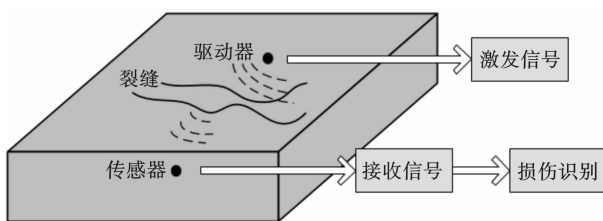


图 2 损伤监测原理

Fig. 2 Principles of damage monitoring

2 实验方案

2.1 试件制备

在实验中,设计并制作了两组等级为 C30 的钢筋混凝土板 RC(Reinforced Concrete)作为试件,板的

截面尺寸为 750 mm × 750 mm × 90 mm,钢筋型号采用 Q235φ8@130,钢筋混凝土板的尺寸设计如图 3 所示,混凝土配比如表 1 所示。在混凝土板浇筑之前,在两组板相同的位置分别安装三块智能骨料,每块智能骨料位置如图 3 所示,分别编号为 SA1, SA2, SA3,其中 SA2 作为启动器,SA1、SA3 作为传感器,试件按照标准程序养护 28 d。

在养护 28 d 后,用碳纤维布(CFRP)加固其中一组混凝土板,碳纤维布基本力学性能如表 2 所示,采用与混凝土粘结性较好的环氧树脂作为胶粘剂,碳纤维布加固的施工工艺按照 CECS 146:2003《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》,先进行表面找平,然后采用三次涂胶的粘贴法进行加固粘贴。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Detailed concrete mix composition

类型	水灰比/%	水泥/(kg · m ⁻³)	砂/(kg · m ⁻³)	石/(kg · m ⁻³)	水/(kg · m ⁻³)
普通板	0.38	450(32.5)	605	987	171

表 2 碳纤维布力学性能

Table 2 CFRP Mechanical properties

厚度/mm	伸长率/%	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
0.167	≥1.6	≥230	≥3400

2.2 实验装置

本次实验在武汉科技大学校内中铁广州工程局-武科大爆破技术研究中心的空气爆炸罐中进行,将模型运送于爆炸罐中筒支固定在钢架上,采用太

安猛炸药并转换为对应的 TNT 当量,将炸药用支架悬吊于离板迎爆面正中心以上 20 cm 处,采用毫秒一段导爆管雷管进行引爆,实验分多级进行加载。此外,在板的背爆面分别粘贴三组应变片,详细位置如图 4 所示,编号为 A1 至 A3,并在应变片旁边分别安装一个加速度计,用于测量试件的加速度。试件起爆时,用 PVC 管和棉被对应应变片、加速度计、智能骨料的传输线进行防护,防止传输线被破坏。

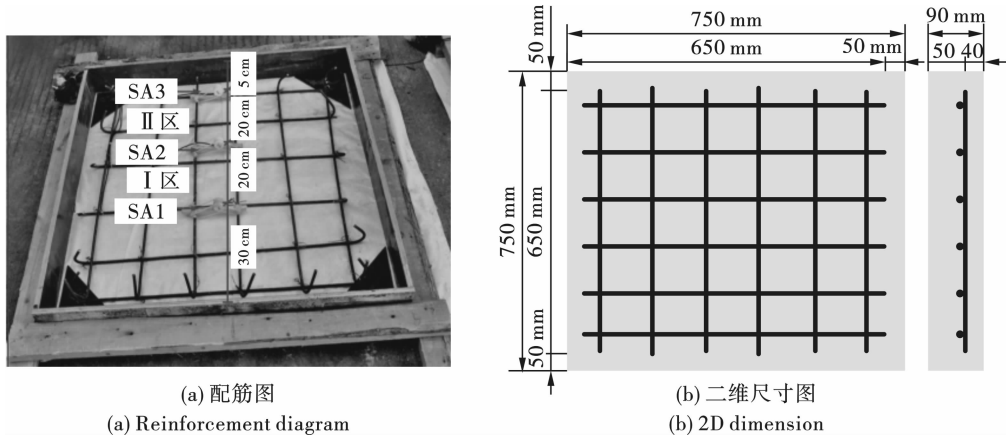


图3 板配筋以及智能骨料安放位置

Fig. 3 Reinforcement and smart aggregate position

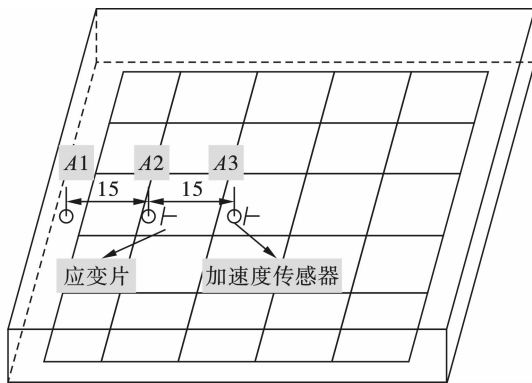


图4 传感器布置示意图(单位:cm)

Fig. 4 Sensor layout diagram(unit:cm)

2.3 实验过程

如图5所示,炸药放在板中心的上方,其具体爆炸方案如表3所示。

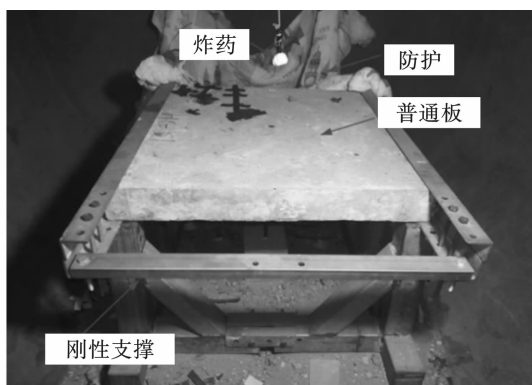


图5 加载方式

Fig. 5 Loading method

实验标号用 B_0 表示初始状态, $B_1 \sim B_5$ 表示五次不同的爆炸。在第一次爆炸之前和每次爆炸结束之后,利用压电智能骨料主动监测方法采集数据,将板划分为两块区域分别监测损伤,并在每次爆炸过程中采集加速度、应变的数据。

表3 爆炸实验方案

Table 3 Experimental program

编号	TNT 当量/g	高度/mm	描述
B_0	0	-	初始状态
B_1	10		第一炸
B_2	20	20	第二炸
B_3	40		第三炸
B_4	80		第四炸
B_5	160	0	第五炸

3 实验结果及分析

3.1 智能骨料损伤监测结果

PZT 压电智能骨料对混凝土板内部的裂缝比较敏感,当混凝土板受损后,压电智能骨料接受到的信号幅值将会衰减。图6分别为普通板(RC)和CFRP加固板在I区(S_2 作为驱动器, SA_1 作为传感器)的主动监测信号时程曲线。图7分别为普通板和CFRP加固板在II区(SA_2 作为驱动器, SA_3 作为传感器)的主动监测信号时程曲线。在开始实验之前对初始状态的混凝土板进行一次信号采集以及每次爆炸荷载施加结束后采集一次, B_0 为初始状态, $B_1 \sim B_5$ 依次为第一次到第五次爆炸荷载施加后所采集到的信号,复合图能够更好的表现出不同药量作用下板内部损伤情况的差异。

由图6、图7可知,混凝土板在初始状态下(B_0),信号幅值较大,随着爆炸荷载的增加,信号幅值逐渐减小,直到第五次爆炸荷载(B_5)施加后,信号幅值下降明显几乎为零,说明混凝土板已经严重损坏,施加荷载后产生的应力波不能从驱动器传到传感器。普通板相比于CFRP加固板信号分布较离散,能量密度不集中,说明CFRP的加固减少了信号的散射,对能量信号的传递有增强作用。在不同位置处,区域II信号分布较区域I更加集中,说明在爆源正下方区域I内板的损伤要更加严重。

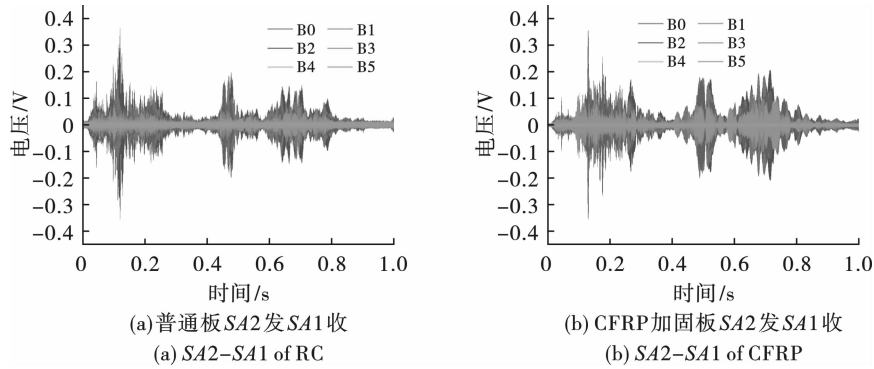


图 6 I 区损伤监测时域信号
Fig. 6 Damage monitoring time domain signal(I)

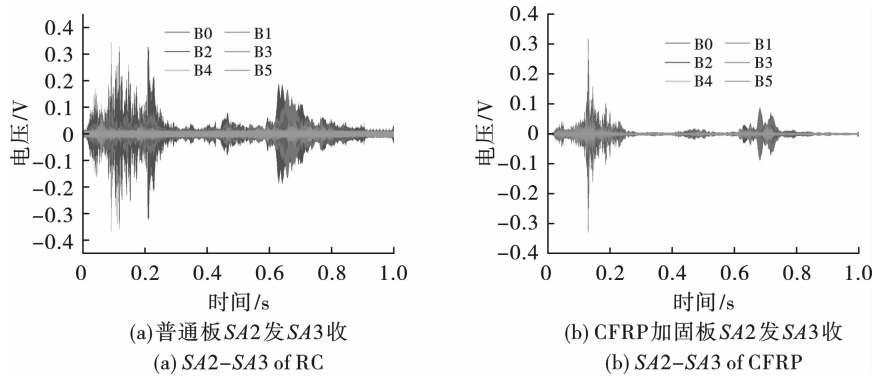


图 7 II 区损伤监测时域信号
Fig. 7 Damage monitoring time domain signal(II)

为了更好的比较普通板和 CFRP 加固板的损伤情况,通过 MATLAB 进行编程将信号进行小波包能量分析并计算出板健康状态下的能量指数,再根据

公式(3)计算出每次爆炸板的具体损伤指数 R ,绘成柱状图,如图 8 所示。

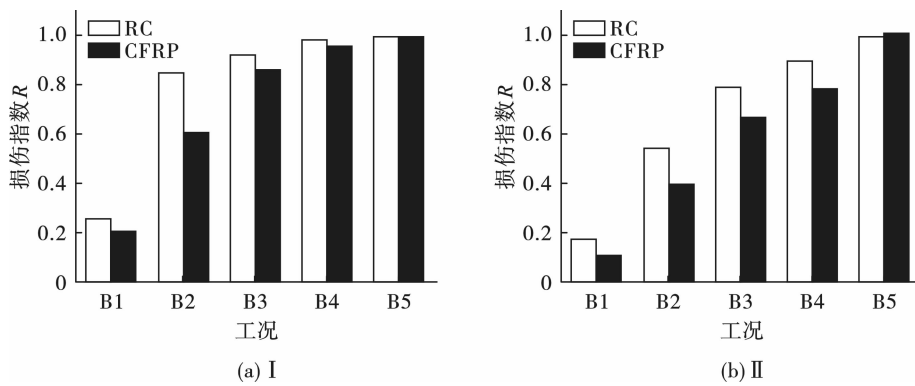


图 8 普通板和 CFRP 加固板损伤对比图
Fig. 8 Damage index

当损伤指数为 0 时表示混凝土板处于初始状态,当损伤指数为 1 时表示已经被完全破坏。在 B1 到 B5 工况爆炸荷载作用下,区域 I 内 CFRP 加固板损伤指数相比于普通板降低了 29.05%、27.44%、15.85%、8.69%、0.35%,区域 II 内损伤指数相比降低了 17.12%、27.24%、8.97%、2.54%、0.23%。如图 8 所示,无论是区域 I 和区域 II,CFRP 加固的混凝土板损伤指数都要小于普通混凝土板,且区域 I 在爆源正下

方,区域 II 相邻区域 I 远离爆源,损伤指数明显小于区域 I。而在 B5 工况下两块板损伤都趋近于 1,说明两块板都已被完全破坏。结果表明,在小药量爆炸冲击下(B1 ~ B3),CFRP 加固板的损伤指数明显小于未加固板的损伤指数,说明 CFRP 在药量较小时能有效提升混凝土板的抗爆性能。在大药量作用下(B4、B5),两块板的损伤指数区别不大,在最后一爆后损伤指数都趋近于 1,板中部形成贯穿空洞,已完全破坏失去

承载力,说明当药量较大时,CFRP 加固材料对混凝土板的抗爆性能提升不明显。

3.2 加速度结果分析

加速度结果可以直观的展现结构受载过程中局部响应行为,通过粘贴在混凝土背面的加速度传感

器可以获得混凝土板的抗爆性能的强弱。如图 9 所示,绘制了第二块加速度传感器(A2)在每次爆炸期间的的时间响应。在实验过程,第五次爆炸(B5)后混凝土被破坏,因此提前取下加速度传感器防止被破坏,应变片也因板破坏而失真,因此忽略不计。

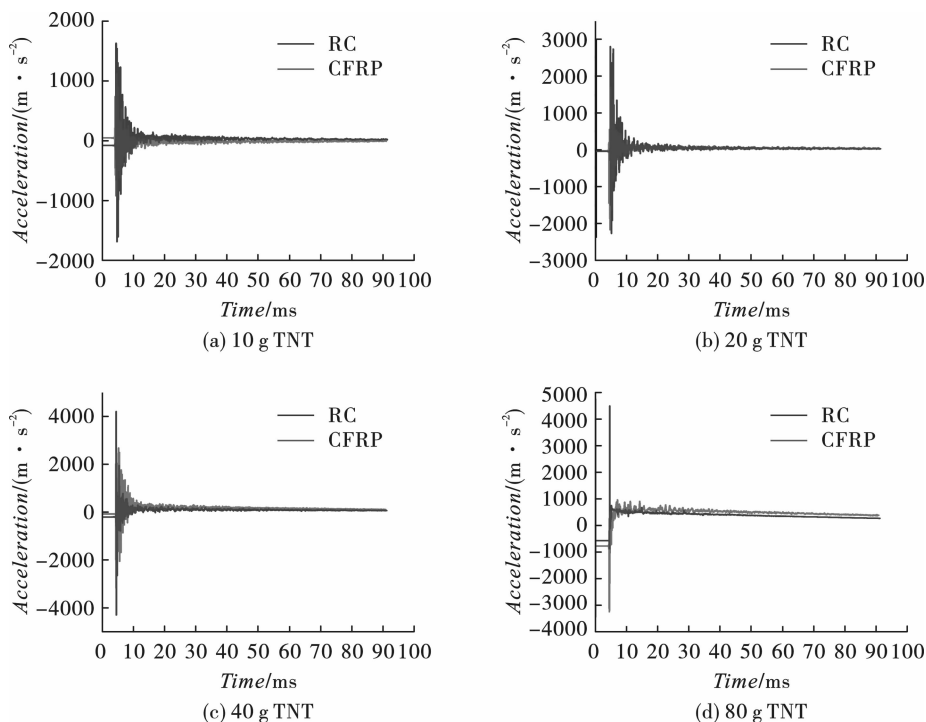


图 9 A2 测点加速度时程曲线

Fig. 9 Acceleration time history curve(A2)

加速度传感器具有较强的灵敏性,能够迅速捕捉爆炸产生冲击波作用于结构的能量,由图 9 可知,加速度在 5 ms 处达到峰值,然后缓慢衰减至平衡位置。在相同位置处炸药爆炸下,随着药量的增加,普通混凝土板和 CFRP 加固混凝土板的加速度峰值也不断增加,但增大幅值并非与炸药量成正比,在 10 g、20 g、40 g TNT 当量下加速度峰值增加较大,当在 80 g TNT 当量以上时,加速度峰值较前面两次趋于平缓。CFRP 加固板加速度峰值明显小于普通板,说明 CFRP 加固混凝土板可以吸收部分能量,减少板背爆面拉伸波所作的破坏作用。从不同位置加速度动力响应分析,B1 到 B3 阶段,A3 位置处加速度幅值显著大于 A1、A2 位置处加速度幅值,在 B4 阶段,A2 和 A3 处加速度幅值相差不大,说明当大药量作用于板时,距爆源于结构中心投影点一定范围内,结构所受爆炸效应相同,局部易发生剪切破坏。

3.3 应变结果及分析

图 10 显示了不同药量下普通板和 CFRP 加固板在 A2 位置处滤波后的应变信号。

由图 10 可知,在 5 ms 位置处,各板应变达到峰值,同位置下随着药量成倍数的增加,应变逐渐增大,

10 g、20 g、40 g TNT 当量下应变呈线性增强,普通板应变幅值上升随着荷载增加而加速增长,CFRP 加固混凝土板增量变化较小,再一次表明 CFRP 加固混凝土板可以显著改善混凝土的抗拉性能。比较不同位置应变变化情况,离爆源投影中心点近的板背部混凝土应变幅值远大于其他位置应变,变化趋势为 $A3 > A2 > A1$,说明炸药爆炸正冲击结构背面损伤较其他位置更严重,局部产生的弯曲拉应力更大。CFRP 的加入分散了应力波能量,减弱了爆炸应力波直接作用于结构而传播至背部的反射拉伸效应,体现了 CFRP 对混凝土拉伸变形的抑制作用以及增强了混凝土结构的抗裂性、抗爆性。

3.4 板的破坏形态及分析

图 11 显示了 CFRP 加固板和普通板在 160 g TNT 当量下接触爆炸后板的宏观破坏模式,从图中可以看到普通板破坏形式严重,板正面中心产生直径大约为 13 cm 的贯穿孔洞,表面分布有明显的近似方形的周向裂纹,而 CFRP 加固板正面也产生了直径约 12 cm 的贯穿孔洞,但板表面裂缝不明显,且数量明显少于普通板裂缝数量。说明在正面没有贴 CFRP 布时,迎爆面受压破坏模式和普通板相同,破

坏结果差别不大。而在板背面由于爆炸波在自由面反射拉伸波的作用下,出现大面积的剥落和震塌现象,产生大量的径向裂纹,而 CFRP 加固板背面剥落坑面积相较于普通板小很多,说明 CFRP 充分发挥

了其抗拉的优异性能,缓解拉伸波对混凝土的直接作用,抑制混凝土的裂纹发展,减小混凝土的开裂面积,同时,混凝土与碳纤维布之间的摩擦也分担了部分应力波能量,使得结构整体性抗爆性能增强。

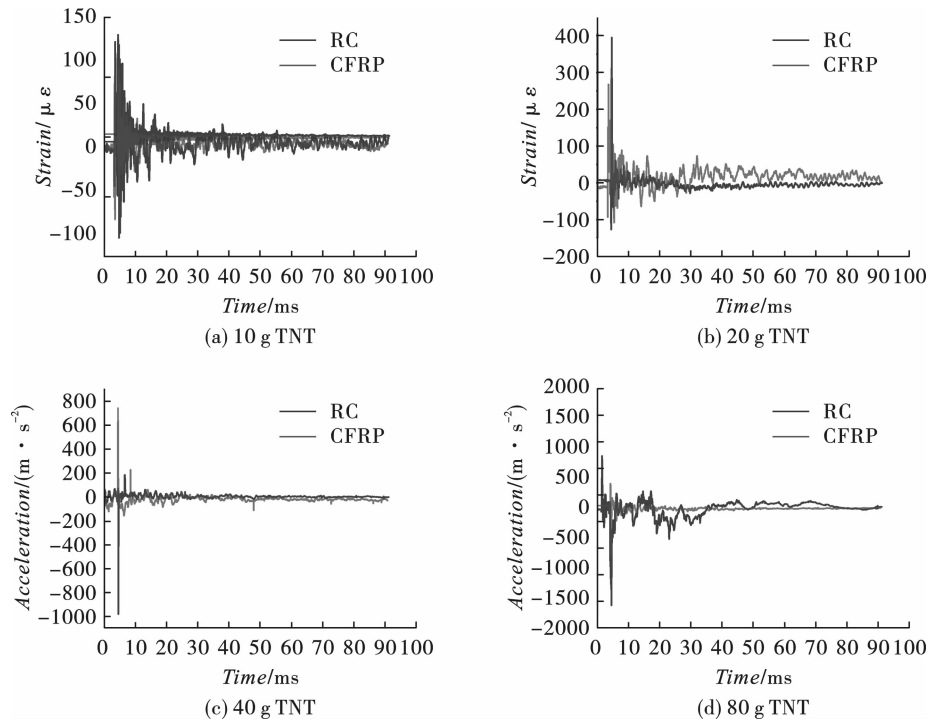


图 10 A2 测点应变时程曲线
Fig. 10 Strain time history curve(A2)

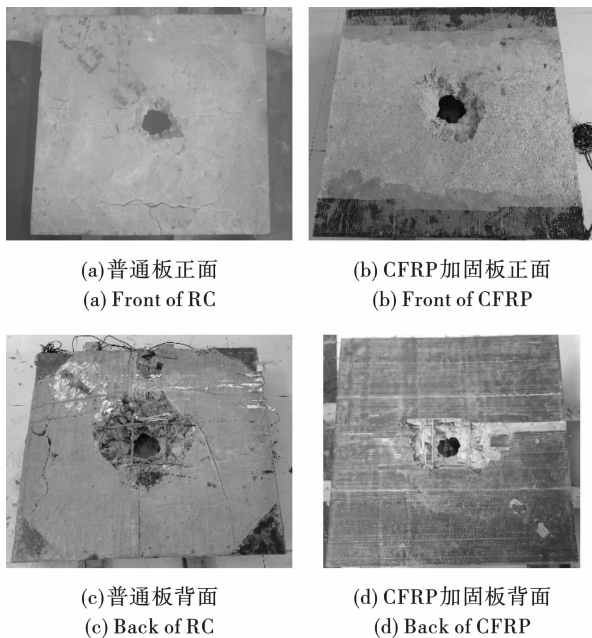


图 11 开裂图
Fig. 11 Damaged slabs

4 结论

通过将 PZT 压电智能骨料埋入混凝土板内部进行爆破实验,再结合加速度传感器和应变片,对混

凝土板的动态响应以及内部损伤进行研究,得到以下主要结论:

(1) 利用嵌入式 PZT 压电智能骨料可以对爆破荷载作用下混凝土板的内部损伤实现有效监测,同时,利用小波包能量分析法可以对采集到的信号进行有效分解。结果表明:在药量较小时 CFRP 加固板内部损伤明显小于普通板,说明 CFRP 材料能有效提高混凝土的抗爆性能。

(2) 基于应变片、加速度传感器对 CFRP 加固板和普通板的动态响应过程进行分析,对比验证了压电智能骨料监测内部损伤的可行性。当药量较小时,CFRP 加固板应变和加速度都明显小于普通板;当药量较大时,由于应变和加速度传感器易于损坏,采用智能骨料能够更加有效的反映结构内部破坏情况。

(3) 对 CFRP 加固板和普通板做了不同药量下爆破对比实验,对其破坏形态进行分析,结果表明:CFRP 加固后混凝土的抗拉强度和冲击韧性都得到了提高,CFRP 材料的加固可以抑制板的裂纹扩展,在背爆面产生剥落震塌面积明显小于普通板,说明 CFRP 材料能够有效提升混凝土结构的抗爆性能。