

钢筋混凝土对边简支板的爆炸试验¹⁾

孙文彬²⁾

(淮阴工学院土木工程系, 江苏淮安 223001)

摘要 爆炸载荷作用下钢筋混凝土板是建筑结构破坏的薄弱环节, 其破坏还导致结构整体刚度退化和动力响应升级. 以对边简支钢筋混凝土板为试验对象, 在两个相同的试样上进行独立的爆炸试验, 观测钢筋混凝土板在弹性区动力响应和塑性区破坏特征, 为碳纤维加固钢筋混凝土板抗爆炸试验研究提供有效的数据和参照, 实验现象和数据可供同类研究参考.

关键词 钢筋混凝土板, 对边简支, 爆炸试验

BLAST EXPERIMENTS OF THE REINFORCED CONCRETE SLABS SIMPLY-SUPPORTED AT BOTH ENDS¹⁾

SUN Wenbin²⁾

(Department of Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Jiangsu Huai'an 223001, China)

Abstract Under blast loads, reinforced concrete slabs are usually weak links in building structural failure, which in turn induces the structural stiffness degradation and results in the structural blast-response upgrading. The reinforced concrete slabs simply supported at both ends were selected as experimental objects, the blast experiments were performed on two same specimens to investigate the dynamic response of the reinforced concrete slab in the elastic range and the failure characteristics in the plastic range. The experimental results provide some effective data and comparisons in the development of experimental study on the reinforced concrete slabs retrofitted with carbon fiber reinforced polymer sheets under blast loadings, and also serve as references for similar researches.

Key words reinforced concrete slabs, simply-supported at both ends, blast experiment

引 言

美国俄克拉荷马的默勒石联邦建筑受近距离的剧烈爆炸灾难性地倒塌, 灾后调查发现^[1,2], 剧烈的爆炸波冲破门窗在楼面上产生远超过其设计承载力的爆炸压力, 二层、三层的大部分楼板和四层部分楼板直接破坏, 同时向相邻梁传递巨大的内力, 楼板的破坏还导致梁与梁、梁与柱之间失去了可靠的侧向连接, 结构整体刚度退化, 加剧了结构动力响应, 引发了建筑结构的连续破坏和倒塌.

选择钢筋混凝土对边简支板为试验对象, 观测爆炸载荷下的动力响应和破坏特征, 为钢筋混凝土板的

抗爆炸研究与设计提供试验结果, 也为后续的碳纤维加固钢筋混凝土板抗爆炸试验研究提供对比数据.

1 试验设计

1.1 试样设计

两块钢筋混凝土板试样具有相同的几何尺寸、材料等级和钢筋布置, 表 1 为试验前测定的材料参数平均值, 图 1 为结构简图及截面配筋情况. 设计兼顾剪力墙和楼面板的配筋形式, 采用双筋, 纵向受力钢筋直径为 10 mm 间距 100 mm; 分布钢筋同样选择 10 mm 间距 200 mm; 保护层选 25 mm 是为满足后续的碳纤维加固钢筋混凝土板抗爆炸试验研究

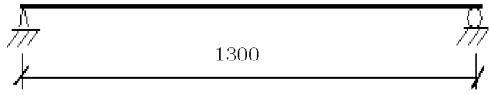
2007-05-23 收到第 1 稿, 2008-05-04 收到修改稿.

1) 2005 年江苏省政府留学奖学金资助项目, 江苏教育厅立项课题 (05KJD560031).

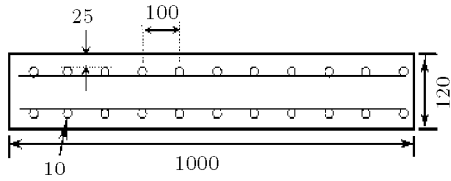
2) E-mail: sunwb1969@163.com

表 1 材料参数

| 材料 | 屈服强度 / MPa | 极限强度 / MPa | 抗压强度 / MPa | 弹性模量 / GPa |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 钢筋 | 560 | 605 | — | 156 |
| 混凝土 | — | — | 48 | 48 |



(a) 板结构简图



(b) 截面配筋图

图 1

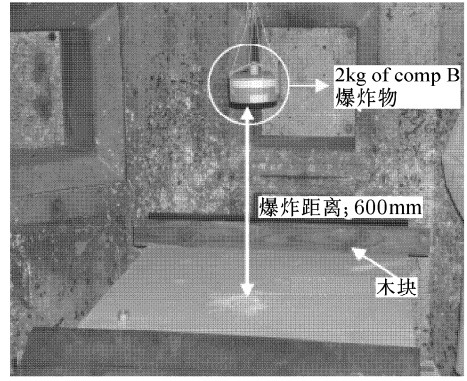
的对比需要。

1.2 爆炸装置

试验在 DSTO(defense science and technology organization, Australia) 的爆炸实验仓进行, 装置如图 2. 试样采用对边简支, 为约束板向上弹起, 板端采用木条固定, 但不影响板的转动; 爆炸物悬挂在板的正上方 600 mm 处, 如图 2(b).

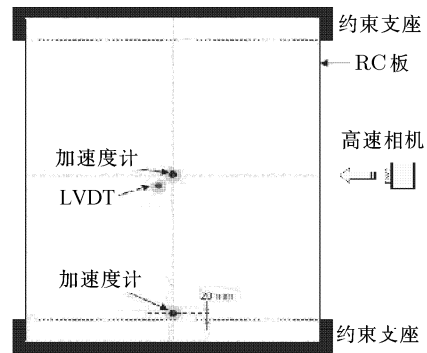
1.3 数据采集

数据采集设备包括: 位移传感器 LVDT, 加速度计和高速相机 (6000 帧 / 秒). 位移传感器安置于纵向对称线中点; 两个加速度计分别设置在对称线中点和支座处; 用高速相机记录混凝土的破裂过程, 为避免混凝土碎片损坏相机, 设置图 3(b) 铝板反射装置.



(b) 爆炸点位置

图 2 试验装置 (单位: mm)

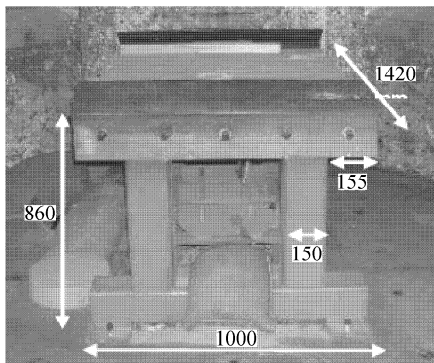


(a) 仪器布置示意图



(b) 反射铝板位置

图 3 数据采集仪器布置



(a) 试验装置及尺寸

1.4 爆炸设计

爆炸物的质量和到目标的距离是描述普通炸弹对目标威胁的两个相对重要的元素. 为方便地描述和比较爆炸对目标的危害性, 通常采用比例距离的概念

$$R = \frac{r}{\sqrt[3]{m}} \quad (1)$$

R 为比例距离, $m \cdot \text{kg}^{-1/3}$; r 为目标到爆炸源的距离, m ; m 为爆炸物的 TNT 当量, kg . 比例距离

越小,威胁力和破坏力越强.所以,科研人员采用近距离小爆炸来模拟大规模爆炸的破坏特性,相反,一些政府建筑和军事设施都通过设置障碍来增加距离以防范爆炸风险.

本次实验的爆炸距离均为0.6m,爆炸I的炸药量相当于0.079kg TNT,目的是为了观测试样的弹性响应;爆炸II的装药量相当于2.09kg TNT,试验分析试样的塑性响应和观测试样的破坏特征.表2为爆炸I和爆炸II与默勒石联邦建筑爆炸的数据对比.

表2 数据对比

| | 比例距离 / $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ | 换算距离 / m | 换算当量质量 / kg |
|------------------------|---|-------------|----------------|
| 默勒石联邦建筑 ^[1] | 0.33 | 4 | 1 814 |
| 爆炸 I | 1.40 | 4 | 23.3 |
| 爆炸 II | 0.47 | 4 | 620.4 |

2 试验结果及分析

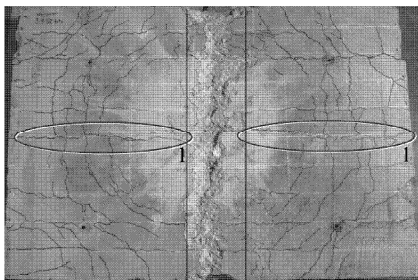
2.1 爆炸 I

试验数据显示钢筋混凝土板的爆炸动力响应处于弹性区域,试样无明显破坏表现.根据加速度计的记录结果,跨中最大加速度为31.5g,弹性恢复最大加速16.3g,发生于0.0052s.根据LVDT记录,最大位移1.12mm,出现在0.022s,随后迅速衰减.

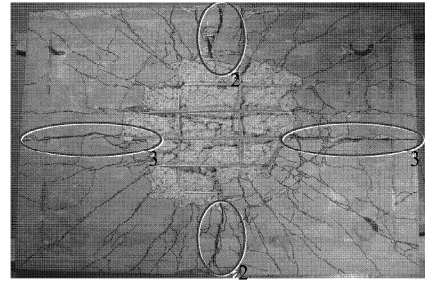
2.2 爆炸 II

2.2.1 受拉面的破坏

试样的受拉面破坏具有混凝土在近距离爆炸载荷作用的典型特征——龟裂和碎片脱落.根据高速相机记录混凝土在0.5ms已开始出现裂缝,随后迅速发展,伴随混凝土碎屑喷射和脱落,导致试样刚度急剧退化,弯曲变形快速增加,不断增加的曲率进一步加剧了混凝土开裂和碎屑的喷射与脱落,受拉面形成周长为2190mm最大深度65mm的坑,有5根受力钢筋和2根分布钢筋暴露,如图4(b)所示.



(a) 正面的混凝土压缩破坏



(b) 背面的受拉破坏

图4 弯曲裂缝

2.2.2 板的裂缝

板跨方向,正面跨中有一条宽度120~150mm的混凝土压碎区域,如图4(a)所示;背面有两条宽度为6~8mm的弯拉主裂缝,如图4(b)所示.板正面纵向中部有一条宽度为3mm左右的混凝土压碎裂缝,在主裂缝两侧有数条垂直于该裂缝的混凝土压碎区域和受压破坏的裂缝,图4(a)圆圈1;背面有两条宽度为1~2mm的弯拉裂缝,图4(b)圆圈3.板顶靠近四角附近,图4(a),出现垂直于对角线方向,基本呈圆形的环状裂缝,具有双向弯曲的角部裂缝的特征.

2.2.3 永久变形

爆炸II在试样上产生了永久变形,表现出明显的双向弯曲,如图5所示,主弯曲方向(纵向)的最大变形50mm,次弯曲方向(横向)的相对最大位移6mm.根据试验记录和理论分析,最大变形出现在爆炸结束和试样自振周期之间.爆炸距离非常近,压力主要集中于中心区域,是双向弯曲的主要原因.四角约束薄弱,成为双向弯曲变形的另一主要原因.

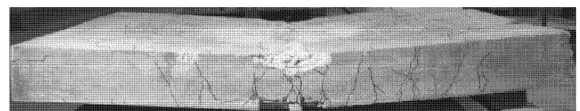


图5 试样的永久变形

2.2.4 加载试验

为进一步观测裂缝扩展并检测试样残余的承载能力,对爆炸后的试样进行了3点弯单调静载试验.试验结果显示,试样仍然具有约85%的抗弯承载力,整体破坏特征表现为弯曲破坏,如图6所示.

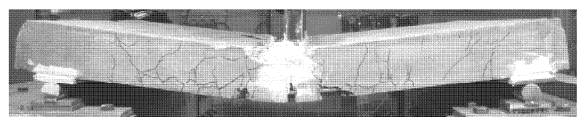


图6 试样爆炸后的3点弯试验

3 结 论

试验研究了钢筋混凝土对边简支板在弹性区和塑性区的爆炸响应。钢筋混凝土板的开裂在显著的弯曲变形出现之前，随着爆炸脉冲的持续，受拉面出现混凝土碎屑的喷射和脱落，导致刚度急剧退化，变形显著增加，不断增加的曲率进一步加剧混凝土开裂和脱落。

尽管试样属于对边简支板，受多种因素影响，钢筋混凝土板在爆炸 II 呈现出明显的双向弯曲。根据

数据记录和理论分析，最大变形出现在爆炸结束和试样自振周期之间。

参 考 文 献

- 1 Mlakar PF, Corley WG, Sozen MA, et al. The Oklahoma City bombing: Analysis of blast damage to the Murrah Building. *J Perform Constr Facil*, 1998, 12(3): 113~119
- 2 John D. Murrah Building bombing revisited: A qualitative assessment of blast damage and collapse patterns. *J Perform Constr Facil*, 2006, 20(11): 330~335