

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0171

## 接触爆炸荷载对钢筋混凝土梁的局部毁伤效应\*

王辉明<sup>1,2</sup>, 刘 飞<sup>2</sup>, 晏麓晖<sup>3</sup>, 汪剑辉<sup>2</sup>, 尚 伟<sup>2,4</sup>, 吕林梅<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410072;

2. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023;

3. 国防科技大学军事基础教育学院, 湖南 长沙 410073;

4. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为得到接触爆炸下钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 梁的局部破坏模式和毁伤效应, 对同一尺寸的 RC 梁进行了不同装药量的接触爆炸试验研究。试验中采用框架结构中典型工程尺度 RC 原型梁为研究对象, 通过 4 次爆炸试验, 观测了 RC 梁在不同装药量下的局部破坏模式和破坏特征, 分析了装药量对局部毁伤效应的影响。研究结果表明: 接触爆炸荷载作用下, RC 梁将发生正面成坑、侧面崩落、背面震塌和截面冲切等局部破坏模式, 爆坑深度、震塌厚度、表面毁伤面积以及受压区纵筋变形均与装药量立方根近似呈线性增加关系。在试验数据基础上, 将 RC 梁局部毁伤程度划分为轻度毁伤、中度毁伤、重度毁伤和严重毁伤 4 个等级, 采用比例装药量判据进行评估。研究成果可为抗爆结构设计和结构毁伤评估提供理论依据。

**关键词:** 接触爆炸; 钢筋混凝土梁; 局部毁伤; 破坏模式

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Local damage effects of reinforced concrete beams under contact explosions

WANG Huiming<sup>1,2</sup>, LIU Fei<sup>2</sup>, YAN Luhui<sup>3</sup>, WANG Jianhui<sup>2</sup>, SHANG Wei<sup>2,4</sup>, LYU Linmei<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Science, Nation University of Defense Technology, Changsha 410072, Hunan, China;

2. Research Institute of Defense Engineering, Academy of Military Science, Luoyang 471023, Henan, China;

3. College of Military Basic Education, Nation University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

4. Institute of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to investigate the local failure modes and damage effects of reinforced concrete (RC) beams under contact explosion, the experimental studies of RC beams with the same size under different TNT charge masses were conducted. In the tests, the typical engineering scale RC prototype beams designed for frame structures were used as research objects. Through four independent explosion tests, the failure modes and damage characteristics of the RC beams were observed at different TNT charge masses, and the influence of different TNT charge masses on the local damage was analyzed. The results show that RC beams undergo four types of local failure modes such as front crater, side breakdown, back collapse and section punching under contact detonations. The depth of crater, thickness of the spallation, surface damaged area, and the deformation of the steel bars exhibited a linear increase with the cubic root of TNT charge masses. Based on the experimental data, the local damage degree could be divided into four grades: slight, moderate, serious and severe, that could be evaluated by the proportional charge criterion. The research results can provide a theoretical basis for designing the anti-blast structures and assessing the damage of components subjected to explosive loading.

**Keywords:** contact explosion; reinforced concrete beam; local damage; failure mode

\* 收稿日期: 2020-05-28; 修回日期: 2020-09-01

第一作者: 王辉明(1995—), 男, 硕士研究生, [whui\\_ming@126.com](mailto:whui_ming@126.com)

通信作者: 刘 飞(1977—), 男, 博士, 高级工程师, [13525944181@163.com](mailto:13525944181@163.com)

钢筋混凝土(RC)梁是建筑结构常用的主要受力构件之一,其在爆炸荷载作用下的毁伤破坏及动力响应特性对于抗爆结构设计和结构抗爆分析具有重要意义。与远距离爆炸不同,近距离爆炸产生的爆炸荷载在结构构件上分布不均,高强度的冲击波局部作用会对钢筋混凝土构件产生严重的局部毁伤<sup>[1-3]</sup>,从而导致构件承载力急剧下降,接触爆炸作用下,局部破坏效应更为剧烈。

近年来,学者们对钢筋混凝土梁板构件抗近距离爆炸特性开展了大量研究<sup>[4-10]</sup>,系统探讨了近距离爆炸作用下 RC 结构的损伤破坏与装药量、爆炸距离和结构特性的关系。但对于接触爆炸下钢筋混凝土构件破坏效应的研究仍不充分<sup>[11]</sup>。张想柏等<sup>[12]</sup>、岳松林等<sup>[13]</sup>以及徐金贵<sup>[14]</sup>通过试验对爆坑形态、直径和深度等局部破坏特征进行分析,归纳出接触爆炸下钢筋混凝土板的4种典型破坏模式,建立了 RC 板的震塌与贯穿破坏效应模型; Hong 等<sup>[15]</sup>、Zhao 等<sup>[16]</sup>通过数值模拟研究了接触爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的层裂特性。在 RC 梁方面,王晓峰等<sup>[17]</sup>开展了简单支撑 RC 模型梁接触爆炸试验,研究了3种装药量作用下梁的损伤和破坏特征,发现随着装药量的加大,梁的破坏逐渐由弯曲破坏转变为局部的冲切破坏; Hang 等<sup>[18]</sup>对预应力钢筋混凝土梁进行接触爆炸模型试验,研究了不同 TNT 当量下 T 形 RC 梁的局部破坏模式以及混凝土的裂缝发展和钢筋的损伤变化; Li 等<sup>[19]</sup>基于试验结果提出了采用损伤面积比进行接触爆炸下 RC 梁的爆坑及震塌损伤评估方法。由此可见,虽然已有一些钢筋混凝土梁板构件接触爆炸的研究,但关于梁的研究较少,且多以缩尺模型试验或数值分析为主。Andrew 等<sup>[20]</sup>的研究表明,由于 RC 结构的尺度效应,爆炸作用的模型相似条件很难完全满足,缩尺模型试验结果往往不能真实反映原型结构的损伤与响应。因此,要得到钢筋混凝土结构接触爆炸作用的有效损伤破坏理论,需要开展更多的全尺结构试验研究,而迄今为止基于全尺 RC 梁的接触爆炸原型试验研究鲜有报道。

本文中开展了钢筋混凝土全尺梁接触爆炸局部破坏效应试验。参考工程中常用 RC 梁的结构尺度范围,设计制作典型钢筋混凝土原型梁构件,进行了4种 TNT 装药量接触化爆试验,研究了梁的局部破坏特征及毁伤效应表征方法,分析了局部破坏模式随装药量变化的规律。

## 1 试验概况

试验梁为长( $L$ )6 600 mm、宽( $B$ )350 mm、高( $H$ )500 mm 的矩形截面梁,两端带 380 mm 宽肢脚,以便于安装固定,结构尺寸及配筋方案如图 1 所示。混凝土强度等级为 C30,纵向钢筋均为 HRB400 带肋钢筋,配筋率为 2.33%,保护层厚度为 15 mm。为抑制梁两端剪切破坏,在梁两端 1 140 mm 内进行箍筋(四肢箍)加密,箍筋加密区间距为 100 mm,采用直径 8 mm 的三级钢筋;非加密区间距为 200 mm,采用直径 8 mm 的三级钢筋。

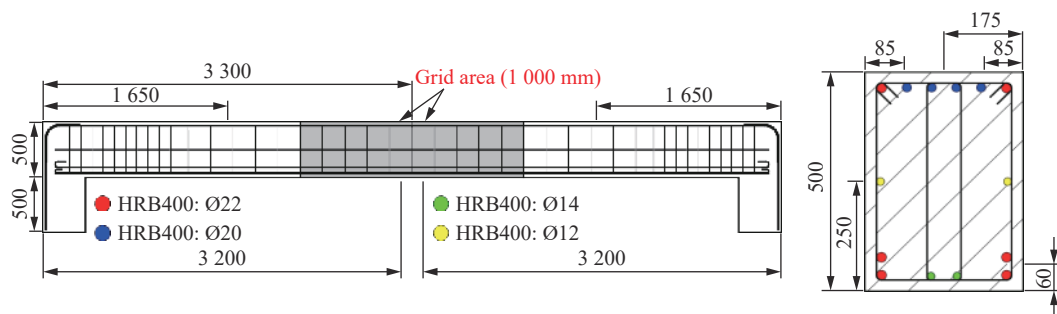


图1 试验梁结构尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement diagram of RC beam (unit in mm)

爆炸试验在东北某试验靶场进行,试验现场布置如图 2 所示。为合理模拟梁两端固支边界条件,通过梁两端的弯肢将梁安装在素混凝土支承台上,采用木塞紧固弯肢与支承台间缝隙,限制梁在试验过程中的移动。炸药采用质量为 200 g 标准 TNT 药块(规格为 100 mm×50 mm×25 mm)组成集团装药,如图 3 所示,

直接放置于梁上表面中央位置, 采用电雷管于炸药中心处起爆, 共进行了装药量分别为 4、6、8 和 16 kg, 分别对应 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 接触爆炸试验。为便于观测试验现象, 以爆源为中心在梁侧面对称划分了长 1 m、规格为 100 mm×50 mm 的网格。

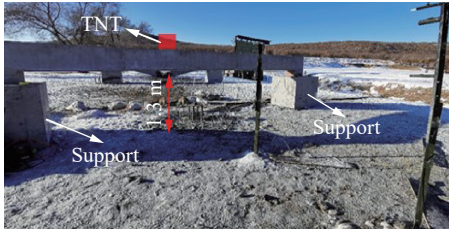


图 2 试验布置

Fig. 2 Experimental arrangement



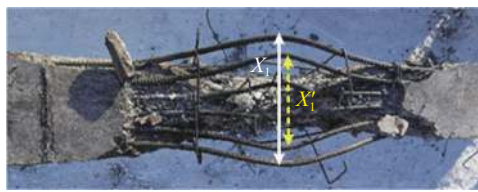
图 3 试验用 TNT 装药

Fig. 3 TNT charges used in experiment

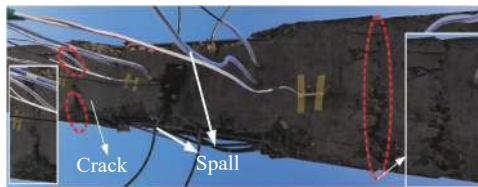
## 2 结果分析

### 2.1 破坏模式

图 4~7 分别给出 4、6、8 和 16 kg 装药接触爆炸下 RC 梁迎爆面、背爆面、侧面的破坏形态。



(a) Blast side



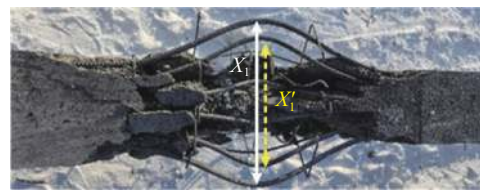
(b) Rear side



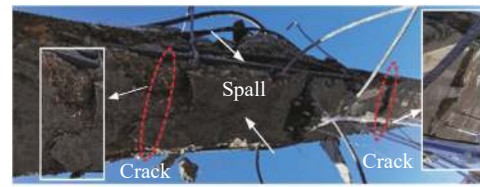
(c) Side face

图 4 4 kg 装药接触爆炸下梁 1<sup>#</sup> 破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of beam 1<sup>#</sup> under contact explosion of 4 kg charge



(a) Blast side



(b) Rear side



(c) Side face

图 5 6 kg 装药接触爆炸下梁 2<sup>#</sup> 破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of beam 2<sup>#</sup> under contact explosion of 6 kg charge

由图 4 可知, 在 4 kg TNT 集团装药接触爆炸作用下, 梁跨中产生了 70 mm 永久位移。爆点处迎爆面形成了最大深度为 155 mm 爆炸坑, 两侧 1 210 mm 长区域混凝土破坏; 迎爆面 6 根纵筋弯曲形成凹坑, 角部 2 根 22 mm 纵筋外张 560 mm, 外侧 2 根 20 mm 纵筋外扩 398 mm, 中央 2 根 20 mm 纵筋向下弯曲 90 mm, 张开宽度 310 mm, 6 根箍筋暴露, 4 根箍筋断裂散开。侧面混凝土近似呈双梯形状破坏, 沿两侧腰筋破坏混凝土边缘有放射状裂缝, 表面未破坏区域左侧剩余 4 网格, 右侧剩余 6 网格。背爆面边缘

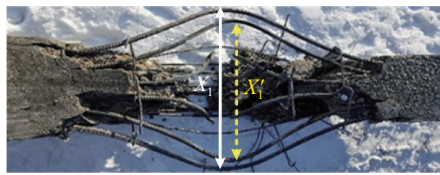


两侧混凝土剥落, 底层 2 根 22 mm 钢筋暴露长 830 mm, 距爆心投影点左右侧各 500 和 550 mm 沿梁宽度方向各有 1 条可视裂缝(见放大图), 表现出震塌开裂现象, 但由于底部纵筋约束没有产生混凝土剥落。

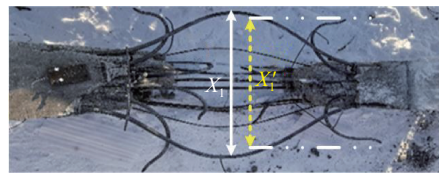
6 kg TNT 装药接触爆炸作用时, 见图 5, 梁跨中位移 330 mm。迎爆面混凝土最大破坏深度 210 mm, 两侧破坏长度 1 400 mm; 角部 2 根 22 mm 纵筋外张 710 mm, 暴露区域最长 1 150 mm, 外侧 2 根 20 mm 纵筋外张 540 mm, 中央 2 根 20 mm 纵筋向下弯曲深度 175 mm, 箍筋散开 4 根, 中间两根断落。梁侧面混凝土剥落掉块, 腰筋上部混凝土碎块直径达 230 mm, 腰筋下部破坏混凝土多为小碎块, 腰筋暴露长达 760 mm; 暴露边缘两侧裂缝成斜向下延伸趋势, 裂缝边出现掉块, 表面未破坏区域左侧剩余 4.5 网格, 右侧剩余 4.5 网格。背爆面表层混凝土多处碎块崩落, 两侧有 4 条交错横向裂缝, 底层 2 根 22 mm 钢筋暴露长 980 mm。

由图 6 所示, 8 kg TNT 装药接触爆炸作用下, 梁跨中位移 900 mm。迎爆面爆坑深度 255 mm, 两侧混凝土破坏区长度达 1 470 mm; 角部 2 根 22 mm 纵筋外张 1 000 mm, 外侧 2 根 20 mm 纵筋外张 600 mm, 中央 2 根 20 mm 纵筋向下弯曲 230 mm 且断裂。侧面大量混凝土碎块崩落, 可见混凝土中裂缝分层; 6 根箍筋断裂, 其中 4 根完全散开落地, 腰筋及底部第二层 2 根 22 mm 纵筋斜向下外张; 表面未破坏区域左侧剩余 4 网格, 右侧剩余 3 网格。背爆面混凝土震塌, 大量碎块崩落, 但两层 2 根 22 mm 纵筋托住部分碎裂混凝土; 6 根纵筋全暴露, 两侧 2 根 22 mm 钢筋暴露长约 1 450 mm。

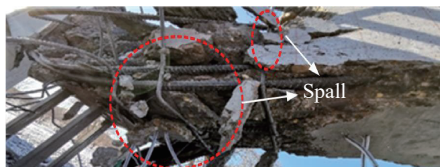
16 kg TNT 装药作用时, 见图 7, 梁被冲断, 整体弯曲倒塌。迎爆面两侧混凝土破坏区域最长达 1 900 mm; 两侧 2 根 22 mm 纵筋严重变形向下扭曲, 钢筋外露长 1 900 mm, 中央 4 根 20 mm 纵筋向下外弯曲且断裂呈“八”字形状; 箍筋暴露 8 根, 6 根完全断裂落地。侧面混凝土严重剥落, 腰筋和底部第二层 2 根 22 mm 钢筋外张, 底层所有纵筋向下弯曲; 表面未破坏区域左侧剩余 4 网格, 右侧剩余 1 网格。背爆面梁底完全贯穿混凝土崩落区域长 1 150 mm, 崩落混凝土块最大直径 220 mm。



(a) 8 kg blast side



(a) 16 kg blast side



(b) 8 kg rear side



(b) 16 kg rear side



(c) 8 kg side face



(c) 16 kg side face

图 6 8 kg 装药接触爆炸下梁 3# 破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of beam 3# under contact explosion of 8 kg charge

图 7 16 kg 装药接触爆炸下梁 4# 破坏形态

Fig. 7 Failure patterns of beam 4# under contact explosion of 16 kg charge

综合分析破坏形态发现, 接触爆炸荷载作用下 RC 梁发生了以下 4 种破坏模式: (1) 正面成坑破坏, 即装药爆炸高压使得迎爆面混凝土压碎破坏, 纵向钢筋弯曲(图 4(a)、图 5(a))或断裂(图 6(a)、图 7(a)), 产生爆炸坑。当药量较小时, 主要是混凝土破碎, 钢筋变形较小; (2) 侧面崩落破坏, 主要是因为爆炸压缩波在侧面反射拉伸作用, 使梁侧面出现超出爆炸坑深度的侧面混凝土崩落(图 4(c)、图 5(c)); (3) 背面震塌



破坏, 爆炸压缩波在背面反射拉伸波使得背爆面混凝土产生层裂震塌(如图 6(b)), 当药量较小且底部配筋较强时, 破坏现象不太显著(图 4(b)); (4) 截面冲切破坏, 装药量较大, 使得爆坑深度与震塌厚度之和超过梁高度, 发生迎、背爆面的内纵筋断裂、外纵筋大变形或断裂, 全截面混凝土破碎脱落的破坏情况(如图 7)。

## 2.2 毁伤效应

### 2.2.1 爆坑深度

图 8 为根据爆点附近梁侧面混凝土网格损伤绘制的爆坑图(对应图 1 灰色网格区域), 由于各次试验的 TNT 药块未能完全绑扎成相同底面积规则形状且放置位置略有偏差, 爆坑表现为非对称形态, 其中第 4# 炮由于发生冲切破坏, 无爆坑特征。

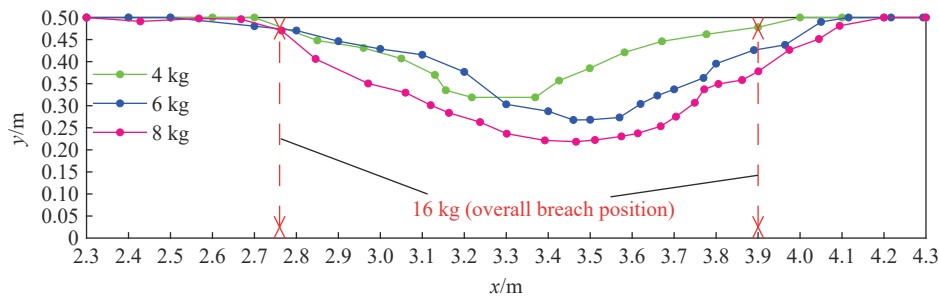


图 8 爆坑形状

Fig. 8 Crater shape

结果显示, 试验梁 1#~3# 产生的爆坑深度  $h$  分别为 155、210 和 255 mm。采用下式拟合:

$$h = K_a \sqrt[3]{Q} - a \quad (1)$$

式中:  $Q$  为装药量, kg;  $K_a$  为介质抗爆系数,  $m/kg^{1/3}$ ;  $a$  为装药相关系数。

根据试验结果拟合得到  $K_a=0.242 m/kg^{1/3}$ ,  $a=0.229 m$ ,  $R^2=0.99$ , 即试验梁介质抗爆系数为  $0.242 m/kg^{1/3}$ , 外推出爆坑 4# 深度  $h=380 mm$ 。

常规武器防护设计原理<sup>[21]</sup>指出, 接触爆炸作用下防护结构迎爆面爆坑深度为结构 1/3 厚时, 结构易发生贯穿破坏, 而试验梁 2# 的爆坑深度已远大于  $H/3$ , 并没发生局部贯通现象。这主要是因为试验梁采用了腰筋和受拉区双层纵筋加强, 控制了层裂碎块的震塌(图 4~7), 说明腰筋和侧面底筋对 RC 梁抗贯穿破坏具有增强作用。

### 2.2.2 震塌效应

测得试验梁 1#~4# 的震塌长度  $L_z$  分别为 1 000、1 200、1 450 和 1 670 mm。由此得到震塌投影(震塌长度与梁跨之比  $L_z/L$ ) 分别为 0.15、0.18、0.22 和 0.25, 发现与比例高度(定义为梁高与装药量立方根之比  $H/Q^{1/3}$ ) 近似呈线性关系, 如图 9 所示, 拟合结果符合下式:

$$L_z/L = -0.896H/Q^{1/3} + 0.434 \quad (2)$$

式中:  $L_z$  为震塌长度, mm。当  $L_z/L=0$  时,  $H/Q^{1/3}=0.48 m/kg^{1/3}$ , 说明发生震塌破坏的临界比例高度为  $0.48 m/kg^{1/3}$ 。

根据图 4(c) 和图 5(c) 所示破坏图像, 测得试验梁 1# 和 2# 的震塌厚度为 220 mm 和 245 mm, 且震塌剥裂角  $\alpha$  为  $20^\circ \sim 23^\circ$ 。为推算试验梁 3# 和 4# 的震塌厚度, 假设震塌破坏区符合 Prandtl 滑移线场<sup>[13, 22]</sup>, 得到震塌厚度计算公式为:

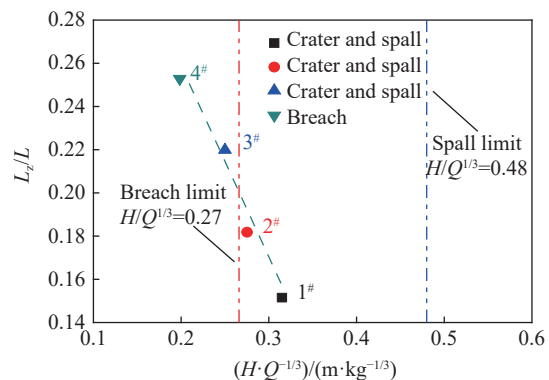


图 9 震塌投影变化

Fig. 9 Change tendency of  $L_z/L$

$$h_z = r_0 e^{(45^\circ + \varphi/2) \tan \varphi} \cos \varphi \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_0 = L_0/2 \sin(45^\circ - \varphi/2) \\ L_0 = L_z \frac{\tan(45^\circ - \varphi/2)}{\tan(45^\circ - \varphi/2) + e^{0.5\pi \tan \varphi}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\varphi=90^\circ-\alpha/2$ ； $L_0$  为滑移主动区长度，mm。

取  $\varphi=21^\circ$  计算，得到试验梁 1# 和 2# 震塌厚度理论值分别为 220 和 265 mm，与试验值吻合很好，并推得试验梁 3# 和 4# 震塌厚度值约为 320 和 360 mm。据此，假设震塌厚度与装药量立方根成线性关系：

$$h_z = K_z \sqrt[3]{Q} - b \quad (5)$$

式中： $Q$  为装药量，kg； $K_z$  和  $b$  为拟合参数，其中  $K_z$  定义为构件抗震塌系数， $\text{m/kg}^{1/3}$ 。

拟合得到  $K_z=0.148 \text{ m/kg}^{1/3}$ ， $b=0.002 \text{ m}$ ， $R^2=0.91$ ，即试验梁抗震塌系数为  $0.148 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

当  $h+h_z=H$  时，全截面混凝土将被毁伤，通常会发生贯穿破坏。结合式(1)和式(5)可以得到发生临界贯穿破坏时  $H/Q^{1/3}=0.27 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。临界贯穿线和临界震塌线见图 9，结果显示，试验梁 3# 和 4# 已超过临界贯穿破坏线，应发生了贯穿破坏；试验梁 1# 和 2# 仍在临界贯穿线以内，不会出现贯穿破坏，这些与试验现象一致。但试验梁 2# 已处于贯穿线的边缘，应该有较大的震塌破坏反应，而试验梁采用了腰筋和二层底筋加强，没有出现预期的破坏效果。

Morishita 等<sup>[23]</sup> 根据 RC 板接触爆炸试验研究，给出板震塌和贯穿临界条件分别为  $H/Q^{1/3}=0.36 \text{ m/kg}^{1/3}$  和  $H/Q^{1/3}=0.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ ，显然都比试验中梁的震塌和贯穿临界  $H/Q^{1/3}$  小，表明相比同等厚度的板，梁发生同类局部破坏需要的装药量要小。虽然一维梁相对二维板存在承受的爆炸荷载减少情况，但由于接触爆炸的冲击能量高度集中特性，梁的约束弱化效应应使得其抗接触爆炸性能小于同厚度的板。

### 2.2.3 表面毁伤

接触爆炸下，RC 梁表面局部毁伤面积的大小也能反映其局部破坏程度，可采用横截面破坏面积比  $W=A/BH$  来表征<sup>[19]</sup>，其中  $A$  为某表面的毁伤面积， $B$  和  $H$  为梁截面宽及高。一般情况下，迎爆面、背爆面和侧面的毁伤面积具有相关性，可取某个面或多个面进行评估，但由于背面毁伤只在  $H/Q^{1/3} \leq 0.48$  才会产生层裂震塌，这里主要分析迎爆面和侧面的毁伤。试验结果表明，迎爆面和侧面毁伤形状近似如图 10 所示(括号内数据表示对称面)，相应毁伤特征参数测量值如表 1 所示。

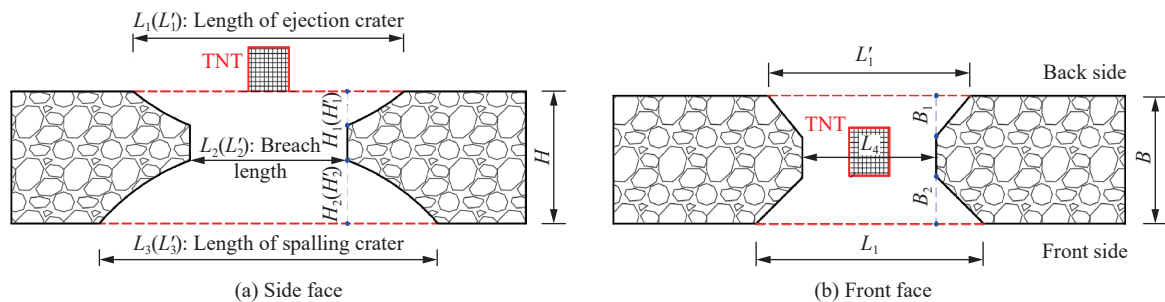


图 10 表面毁伤形状示意图

Fig. 10 Schematic diagram of surface damage shape

表 1 表面毁伤特征参数 (单位: mm)

Table 1 Surface damage characteristic parameters (unit: mm)

试验	$L_1/L_1'$	$L_2/L_2'$	$L_3/L_3'$	$L_4$	$H_1/H_1'$	$H_2/H_2'$	$B_1$	$B_2$
1	1 210/1 500	800/850	1 100/1 300	560	175/150	100/90	100	130
2	1 260/1 400	1 000/800	1 480/1 450	710	90/125	100/125	170	100
3	1 470/1 440	1 270/1 250	1 450/1 500	1 000	100/85	100/120	150	130
4	1 810/1 900	1 500/1 380	1 570/1 690	1 040	100/80	150/150	111	57

根据图 10 所示特征参数关系可计算得到迎爆面横截面破坏面积比  $W_y$  和侧面破坏面积比  $W_c$  随  $Q^{1/3}/H$  的关系如图 11 所示, 其中  $W_c$  拟合线为两侧面值。结果显示, 本试验条件下, 迎爆面  $W_y$  在 1.63~2.48 变化, 侧面  $W_{c1}$  在 2.98~3.97 变化, 侧面  $W_{c2}$  值在 3.05~4.38 变化, 且破坏面积比与比例装药量(装药量立方根与梁高之比  $Q^{1/3}/H$ )呈线性关系。

2.2.4 钢筋变形

图 12 给出迎爆面混凝土角部 2 根 22 mm 纵筋扩张后距离  $X_1$ 、外侧 2 根 20 mm 纵筋扩张距离  $X_1'$  以及中央 2 根 20 mm 纵筋弯曲深度  $X_2$  随装药量变化。结果显示, 试验梁 1#~4# 迎爆面角部 2 根 22 mm 纵筋间距  $X_1$  分别增大到了原间距 (278 mm) 的 2.01、2.55、3.59、3.74 倍; 试验梁 1#~3# 迎爆面外侧 2 根 20 mm 钢筋间距增大达原间距 (165 mm) 的 2.84、3.27、5.51 倍 (试验梁 4# 中钢筋已断裂); 试验梁 1#~3# 迎爆面中央 2 根 20 mm 纵筋弯曲深度分别为 70 mm、175 mm、230 mm (试验梁 4# 中央 2 根 20 mm 钢筋断裂); 且各组钢筋的变形都与装药量立方根呈线性增加关系。

3 毁伤等级

根据以上矩形截面 RC 梁的破坏模式和毁伤效应研究结果, 基于本文试验数据, 可将 RC 梁在接触爆炸作用下局部毁伤程度划分为轻度毁伤、中度毁伤、重度毁伤和严重毁伤 4 个等级, 采用比例装药量  $Q^{1/3}/H$  作为毁伤判据判别, 毁伤判据划分标准与板<sup>[16, 24]</sup> 试验结果验证亦符合较好。具体分级的毁伤主要特征及判据指标见表 2 所示。

表 2 RC 梁接触爆炸局部毁伤等级

Table 2 Local damage grades of RC beam under contact explosion

试验编号	毁伤等级	破坏形态	主要特征	判别标准	毁伤判据
-	轻度毁伤		迎爆面形成爆坑, 纵向钢筋轻微变形; 背爆面混凝土无层裂; 侧面混凝土轻微剥落; 梁整体无明显变形	$h > 0, h_z = 0$	$Q^{1/3}/H < 2.1$
-	中度毁伤		迎爆面形成爆坑, 纵向钢筋适量变形; 背爆面混凝土有碎块震塌、纵向钢筋外露但变形较小, 或混凝土出现层裂裂纹(加强型); 侧面混凝土部分剥落; 梁整体轻度变形(加强型)	$0 < h + h_z < H/2$	$2.1 < Q^{1/3}/H \leq 2.5$
1#, 2#	重度毁伤		迎爆面爆坑较大, 纵向钢筋较大变形; 背爆面混凝土震塌脱落、爆坑与震塌坑连通, 或混凝土有碎块脱落、局部钢筋外露(加强型); 侧面混凝土严重剥离; 梁整体变形明显或轻度变形(加强型)	$H/2 \leq h + h_z < H$	$2.5 \leq Q^{1/3}/H < 3.8$
3#, 4#	严重毁伤		混凝土贯穿破坏, 迎爆面纵向钢筋变形很大或断裂; 背爆面混凝土大量震塌脱落, 纵向钢筋大变形。特别严重时, 横截面冲切破坏, 迎、背爆面纵向钢筋都有剪断, 梁倒塌	$h + h_z > H$	$Q^{1/3}/H > 3.8$

注: 所谓加强型, 指本文研究的采用腰筋和侧面底筋加固的梁

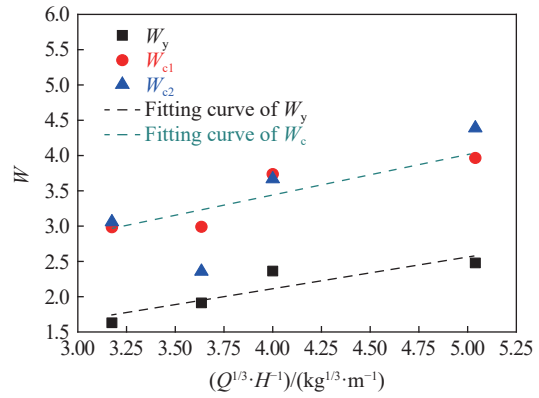


图 11 横截面破坏面积比

Fig. 11 Ratios of damage area to cross-section

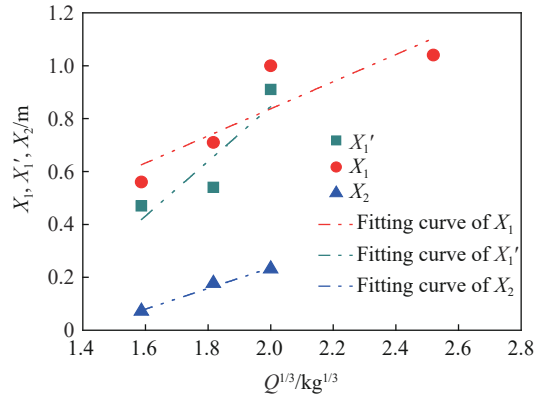


图 12 迎爆面  $X_1$ 、 $X_1'$ 、 $X_2$  随装药变化

Fig. 12 Changes of  $X_1$ ,  $X_1'$  and  $X_2$  with charge



## 4 结 论

进行了接触爆炸 RC 原型梁试验研究,考察了梁的毁伤破坏现象,系统分析了梁接触爆炸破坏模式和局部毁伤效应,研究了接触爆炸局部毁伤等级,得到以下主要结论:

(1)接触爆炸荷载作用下 RC 梁将会发生正面成坑、侧面崩落、背面震塌和截面冲切等 4 种局部破坏模式,正面成坑和侧面崩落模式总会产生,背面震塌模式仅当  $H/Q^{1/3} < 0.48$  时出现,当  $H/Q^{1/3} < 0.27$  时可能呈现冲切破坏模式。

(2)接触爆炸下 RC 梁的局部毁伤表征参量包括爆坑深度、震塌厚度、震塌投影、表面毁伤面积和纵向钢筋变形等,它们都与装药量的立方根近似呈线性关系。

(3)接触爆炸下 RC 梁的局部毁伤程度可分为轻度、中度、重度和严重破坏 4 个等级,采用比例装药量判据进行评估。

(4)加配腰筋及受拉区采用双层纵筋对于混凝土的层裂及震塌脱落有抑制作用,加固配筋对梁混凝土的开裂和裂缝发展以及结构抗爆性能的影响值得进一步试验对比研究。

## 参考文献:

- [1] SHI Y F, STEWART M G. Damage and risk assessment for reinforced concrete wall panels subjected to explosive blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 85(11): 5–19. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.06.003.
- [2] SHI Y C, XIONG W, LI Z X, et al. Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90(4): 122–131. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.002.
- [3] ALOK D, ABASS B, MANISH K. Experimental and numerical investigation of rectangular reinforced concrete columns under contact explosion effects [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205(15): 109891. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109891.
- [4] ZHANG D, YAO S J, LU F Y, et al. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 33(10): 497–504. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.06.020.
- [5] 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 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1421–1429. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.012.  
WANG W, LIU R C, WU B, et al. Damage criteria of reinforced concrete beams under blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1421–1429. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.012.
- [6] YAO S J, ZHANG D, LU F Y, et al. Damage features and dynamic response of RC beams under blast [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 62(4): 103–111. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.12.001.
- [7] RAO B, CHEN L, FANG Q, HONG J, et al. Dynamic responses of reinforced concrete beams under double-endinitiated close-in explosion [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(5): 527–539. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.024.
- [8] 李忠献, 师燕超, 史祥生. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板破坏评定方法 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(6): 60–66. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.06.008.  
LI Z X, SHI Y C, SHI X S. Damage analysis and assessment of RC slabs under blast load [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(6): 60–66. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.06.008.
- [9] ZHAO C F, CHEN J Y. Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2013, 63-64(2-4): 54–62. DOI: 10.1016/j.tafmec.2013.03.006.
- [10] YAO S J, ZHANG D, CHEN X G, et al. Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 66(8): 120–129. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.027.
- [11] 郑全平, 周早生, 钱七虎, 等. 防护结构中的震塌问题 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003(8): 1393–1398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.08.031.  
ZHENG Q P, ZHOU Z S, QIAN Q H, et al. Spallation in protective structures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003(8): 1393–1398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.08.031.
- [12] 张想柏, 杨秀敏, 陈肇元, 等. 接触爆炸钢筋混凝土板的震塌效应 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2006.004.  
ZHANG X B, YANG X M, CHEN Z Y, et al. Explosion spalling of reinforced concrete slabs with contact detonations [J].

- Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2006.004.
- [13] 岳松林, 王明洋, 张宁, 等. 混凝土板在接触爆炸作用下的震塌和贯穿临界厚度计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.  
YUE S L, WANG M Y, ZHANG N, et al. A method for calculating critical spalling and perforating thicknesses of concrete slabs subjected to contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
- [14] 徐金贵. 混凝土接触爆炸破坏效应研究 [D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2019.
- [15] HONG J, FANG Q, CHEN L, et al. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K&C material model [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1013–1024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.060.
- [16] ZHAO C F, LU X, WANG Q, et al. Experimental and numerical investigation of steel-concrete (SC) slabs under contact blast loading [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196(1): 109337. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109337.
- [17] 王晓峰, 郑全平, 吴飏, 等. 接触爆炸条件下钢筋混凝土梁实验及数值模拟研究 [C] // 第 4 届全国工程安全与防护学术会议论文集. 洛阳, 2014: 160–166.  
WANG X F, ZHENG Q P, WU B, et al. Experimental Study and numerical simulation for reinforced concrete beam under contact explosion [C] // Proceedings of the 4th National Engineering Safety and Protection Conference. Luoyang, 2014: 160–166.
- [18] HANG G Z, YAN BO, YANG Z. Damage model test of prestressed T-beam under explosion load [J]. *IEEE Access*, 2019, 99(1): 135340. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2940037.
- [19] LI Z, LIU L, YAN J B, et al. Experimental investigation of p-section concrete beams under contact explosion and close-in explosion conditions [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(5): 540–549. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.025.
- [20] ANDREW R, NICOLA B, GIUSEPPE C, et al. Full scale experimental tests and numerical model validation of reinforced concrete slab subjected to direct contact explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132(10): 103309.1. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.023.
- [21] 美国陆军工程兵水道试验站. 常规武器防护设计原理 [M]. 方秦, 译. 南京: 解放军工程兵工程学院, 1997.
- [22] 蒋洋, 王晓谋, 郭建坤, 等. 基于滑移线场理论斜坡条基极限承载力解析解 [J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(1): 92–100.  
JIANG Y, WANG X M, GUO J K, et al. Analytical solutions of ultimate bearing capacity for strip foundations on slopes based on slip line theories [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(1): 92–100.
- [23] MORISHITA M, TANAKA H, ITO M, et al. Damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 46: 1787–1797.
- [24] ALOK D, ABASS B. Assessment of reinforced concrete slab response to contact explosion effects [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(4): 04020061. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001469.

(责任编辑 王易难)