

文章编号:1673-2049(2017)05-0147-07

## 冲击受损 RC 梁残余力学性能试验

李 智<sup>1</sup>, 胡开赢<sup>1,2</sup>, 霍静思<sup>1,3</sup>, 曾 翔<sup>4</sup>

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 中国葛洲坝集团勘测设计有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
4. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

**摘要:**为给冲击受损后钢筋混凝土(RC)梁的修复加固和结构安全评估提供参考,开展了3根RC梁落锤冲击受损后的静载试验及1根静载梁的对比试验,通过变化冲击能量使RC梁遭受不同程度的冲击损伤,对冲击受损后RC梁的残余力学性能进行研究。比较分析了不同冲击能量下受损梁的裂缝发展形态以及冲击力、支座反力、跨中挠度和纵筋应变变化规律;重点研究了不同受损程度梁的残余承载力、残余抗弯刚度和残余变形能力。在综合分析相关文献试验数据并对冲击能量进行标准化的基础上,拟合出冲击受损后RC梁残余承载力与残余抗弯刚度的计算公式。结果表明:随着冲击能量增大,冲击损伤梁挠跨比也增大,残余承载力和刚度总体呈下降趋势;相比未损伤梁,冲击损伤梁弹性抗弯刚度和极限抗弯承载力先增大后减小,但加载后期延性明显降低。

**关键词:**RC梁;冲击损伤;残余承载力;残余刚度;残余变形能力

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A

## Experiment on Residual Mechanical Behavior of Impact-damaged RC Beams

LI Zhi<sup>1</sup>, HU Kai-ying<sup>1,2</sup>, HUO Jing-si<sup>1,3</sup>, ZENG Xiang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. China Gezhouba Group Survey Design Co., Ltd, Yichang 443002, Hubei, China; 3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

**Abstract:** In order to provide the basis for repairing, strengthening and structural safety assessment of impact-damaged reinforced concrete (RC) beams, static load tests on 3 RC beams impact-damaged by drop hammer and contrast test on static load beam were carried out. The RC beams suffered different degrees of impact damage by changing impact energy, and the residual mechanical behaviors of impact-damaged RC beams were studied. The crack development patterns of beams under different impact energies, and change laws of impact load, reaction force, mid-span deflection and reinforcement strain in mid-span were compared and analyzed. The residual capacity, residual stiffness and residual deformation resistance of beams were investigated with different impact damages. Moreover, on the basis of integrated analysis of the related literature and normalized impact energy, the calculating formulas of residual resistance and residual

收稿日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51378200, 51608156)

作者简介:李 智(1991-),男,湖南怀化人,工学博士研究生, E-mail: lz.owen1991@gmail.com。

通讯作者:霍静思(1970-),男,吉林梨树人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: jingsihuo@gmail.com。

stiffness were fitted out. The test results show that with the increase of impact energy, deflection-span ratio enhances, but the residual resistance and stiffness decrease generally. Compared with the undamaged beam, the residual capacity and residual stiffness increase before declining, the ductility evidently decreases at the latter stage.

**Key words:** RC beam; impacted-damage; residual resistance; residual stiffness; residual deformation capacity

0 引言

当今工程结构的爆炸、冲击事故频繁发生,如恐怖分子袭击建筑大楼、室内煤气爆炸事故、车辆和船舶撞击桥梁等。爆炸、冲击作用可能引起结构发生连续倒塌,或仅引起结构有限的局部损伤。因而,研究结构冲击受损后的残余力学性能对冲击后结构的安全性评估及其修复加固具有重要的理论意义和工程实用价值。

钢筋混凝土(RC)梁作为钢筋混凝土结构的基本构件,是该领域的重要研究对象。目前,国内外学者已经对 RC 梁的抗冲击性能进行了较为深入的研究,主要集中在以下几个方面:梁的抗冲击设计方法<sup>[1-6]</sup>、梁的冲击响应分析(如挠度时程、冲击力 and 支座反力时程、冲击过程中的惯性响应)以及梁冲击性能影响因素(冲击能量、剪跨比、配筋等)<sup>[1-15]</sup>。

针对冲击受损后 RC 梁的残余力学性能研究成果极其缺乏,仅见文献[16]报道。Adhikary 等<sup>[16]</sup>对 30 根不同配筋率、截面尺寸、剪跨比的梁在经历不同冲击损伤后进一步开展了静态残余承载力试验,并采用残余承载力指数(RRI)和残余刚度指数(RSI)评估梁冲击损伤程度,结果表明,梁配箍率越大(或纵向配筋率越小),其冲击后残余力学性能越优。

本文进一步对静态剪弯比(抗剪承载力与抗弯承载力之比)大于 0.9 的弯曲破坏型 RC 梁开展冲击损伤后的残余力学性能研究,进行了 3 根 RC 梁冲击受损后静载试验及 1 根无损伤静载梁的对比试验,比较分析了不同冲击能量下试件的裂缝发展形态以及冲击力、支座反力、跨中挠度和纵筋应变变化规律;重点研究了不同受损程度梁的残余变形能力、残余承载力和残余刚度,并综合分析了文献[16]的试验结果,提出了一种对冲击能量标准化后的残余承载力与残余刚度计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了 4 根截面尺寸和配筋相同的 RC 梁,

主要考察冲击能量对 RC 梁受冲击损伤后的残余力学性能的影响,试验主要参数和结果如表 1 所示。试件尺寸和截面配筋如图 1 所示。梁长 2 900 mm,净跨 1 860 mm,截面尺寸为 150 mm×300 mm,保护层厚度为 25 mm。梁底和梁顶对称配置 2 根直径为 16 mm 的纵筋,强度等级为 HRB400,配筋率为 1.03%;箍筋直径为 8 mm 的 HRB400 钢筋,间距 150 mm,配箍率为 0.44%。实测纵筋屈服强度为 524 MPa,极限抗拉强度为 636 MPa;箍筋屈服强度为 479 MPa,极限抗拉强度为 598 MPa。混凝土设计强度等级为 C30,试验时实测混凝土轴心抗压强度为 34.1 MPa。采用跨中单点集中加载,剪跨比为 3.58。

表 1 冲击能量与残余挠度  
Tab. 1 Impact Energy and Residual Deflection

试件 编号	<i>m</i> /kg	<i>h</i> /m	<i>v</i> /(m·s <sup>-1</sup> )	<i>E<sub>k</sub></i> /J	<i>δ</i> /mm	<i>δ</i> / <i>L</i>	损伤 程度
BS							完好
B070	328	0.7	3.46	1 968	8.1	1/250	轻度
B150	328	1.5	5.30	4 607	20.4	1/100	中度
B260	328	2.6	7.08	8 220	40.6	1/50	严重

注:试件编号中“070”代表试件的冲击高度为 0.7 m,其他以此类推;*m* 为锤头质量;*h* 为冲击高度;*v* 为实测冲击速度;*E<sub>k</sub>* 为冲击能量;*δ* 为冲击后的残余跨中挠度;*L* 为跨长。

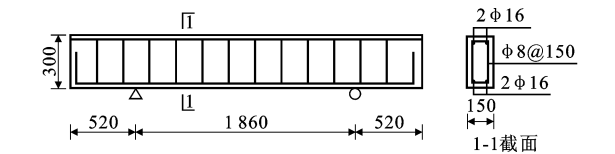


图 1 试件设计详图(单位:mm)  
Fig. 1 Details of Specimens (Unit:mm)

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)进行计算,试件在静载下的受弯承载力设计值和受剪承载力设计值分别为 68 kN 和 178 kN,剪弯比为 2.62。

1.2 试验装置与方法

本文试验分 2 个阶段:第 1 阶段为 RC 梁的落锤冲击试验;第 2 阶段为 RC 梁冲击受损后的静态残余承载力试验。

首先,采用湖南大学高性能落锤冲击试验机进行冲击试验<sup>[7]</sup>,试验装置如图 2 所示。落锤锤头为 200 mm 直径平头圆柱体,质量为 328 kg。RC 梁跨中正截面与落锤锤头截面中心位于同一铅垂面上,对称放置于水平的两铰支座上。铰支座由 2 个可转动圆钢(梁下方)和底座(固定于地面)组成。为了防止试验过程中梁体与支座脱离,在梁上端布置压梁(梁上方),由拉杆与下层圆钢相连,并在试验前,对压梁施加一定的预紧力,保证梁与支座接触紧密。试验中,通过落锤提升装置将锤体沿导轨提升至预定高度,松开夹头后落锤沿导轨自由落体冲击试验梁的跨中位置。



图 2 冲击试验装置

Fig. 2 Impact Test Setup

冲击力通过锤头内置的力传感器测量;支座反力由支座上 2 个圆钢之间安装的力传感器测量,并于梁底面跨中位置布置位移传感器,跨中梁底纵筋粘贴有应变片。数据采集系统由激光触发控制,并通过激光测速仪测量锤头接触梁之前的瞬时速度,根据锤头瞬时速度和锤头质量计算冲击能量。数据采集系统为 NI 公司生产的 PXIe-1062Q,并通过 LabVIEW Signal Express 软件进行采集参数设置及数据处理,采样频率为 500 kHz。

完成 RC 梁冲击试验后,进一步开展冲击受损梁的静态残余承载力试验。试验采用三分点加载方式,并且支座边界条件与冲击试验相同。采用量程 200 t 的千斤顶进行加载,并安装 300 kN 量程的力传感器对所施加的荷载进行量测。梁跨中底部布置位移传感器,对跨中挠度进行量测。试验中,采用分级加载,每级 5 kN。每次加载完成且荷载稳定后,记录力的大小与跨中挠度的大小。

## 2 试验结果分析

### 2.1 冲击响应

图 3 为各试件的冲击力、支座反力、跨中挠度、

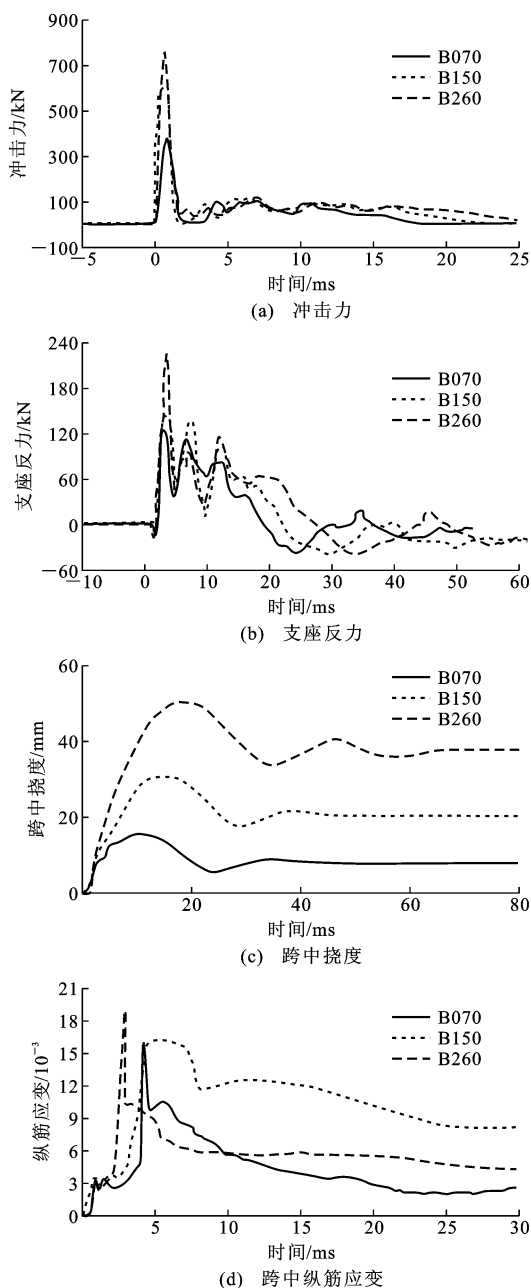


图 3 冲击力、支座反力、跨中挠度和应变时程曲线

Fig. 3 Time History Curves of Impact Force, Reaction Force, Deflection and Strain in Mid-span

跨中纵筋应变时程曲线。由图 3(a)可知:在 3 种冲击高度下,冲击力均瞬间达到峰值,随后迅速下降,形成一个脉冲波;接着波动变平缓,在 8~17 ms 之间,曲线出现了一段相对稳定的平台,平台冲击力为 100 kN 左右。冲击高度越大,冲击力峰值越大,峰值出现时间越靠前。由图 3(b)可知:3 种冲击高度下支座反力波动情况相似,在出现 3 次峰值后,都逐渐减小;冲击高度越大,支座反力峰值越大,且持续时间越长。由图 3(c)可知:所有试件跨中挠度时程曲线形状相似,初始阶段形成一个正弦半波波后,

逐渐减小,并出现 1 次波动;随着冲击高度的增加,跨中挠度峰值与持续时间增加,残余挠度增加。由图 3(d)可知,3 种冲击高度下,纵筋均达到了屈服。

2.2 挠跨比-冲击能量关系

采用冲击后的残余跨中挠度与净跨度的比值来比较梁的不同冲击损伤程度,见表 1。试件 B070 在冲击作用后残余挠度为净跨的 0.5% 左右,达到《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中梁的正常使用极限状态,为轻度损伤;B150 残余挠度为净跨的 1.1%,达到 Kishi 等<sup>[1]</sup>所给经验公式计算的在弯曲破坏时的残余挠度,而试件 B260 残余挠度已经达到 2%,进入极限状态,损伤严重。

冲击后的挠跨比-冲击能量关系如图 4 所示。由图 4 可以发现,弯曲破坏的梁在截面配筋和混凝土强度相同时,挠跨比随着冲击能量的增加而呈线性增长,与文献[1]中所述一致。

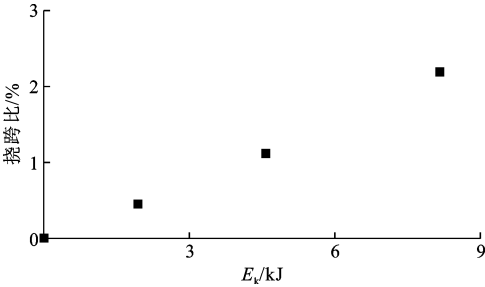


图 4 挠跨比-冲击能量关系

Fig. 4 Relationship Between Deflection-span Ratio and Impact Energy

2.3 裂缝形态

各试件受冲击荷载作用后在静载试验下的裂缝开展形态如图 5 所示。BS 表示无损伤试件在静载试验下的裂缝形态。B070, B150, B260 与 B070', B150', B260' 分别表示冲击荷载下和残余承载力试验下裂缝的开展形态。

试件 BS 破坏时,出现较多弯曲裂缝和少量弯剪裂缝,受压区混凝土压碎,钢筋已经屈服,破坏特征属于典型的适筋梁弯曲破坏形态。

在不同冲击高度下,试件的裂缝形态呈现较大差异。B070 的冲击高度较低,裂缝数量相对较少,整体贯穿裂缝不多,几乎没有弯曲裂缝,仅在跨中部位出现少量斜裂缝。试件 B150 冲击高度增至 1.5 m,裂缝数量增多,弯曲裂缝数量增加,且裂缝向跨中区域集中,靠近支座处梁顶出现负弯矩裂缝,并有部分裂缝向下发展,受剪力作用后进一步发展成斜裂缝,但数量不多。试件 B260 冲击高度进一步增加到 2.6 m,斜裂缝和弯曲裂缝数量、长度、宽度均

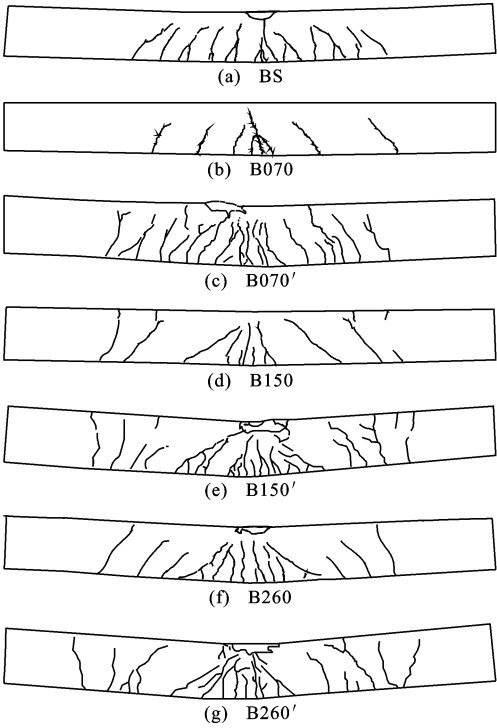


图 5 试件裂缝形态

Fig. 5 Crack Patterns of Specimens

显著增加且向跨中区域集中,甚至在近支座处形成贯穿的斜裂缝。

在残余静载试验下,各试件最终均发生弯曲破坏。B070 在残余静载试验下,跨中部位有较多新裂缝发展,原有裂缝有一定的扩展,跨中与支座之间有较多新裂缝发展,且长度较长。B150 跨中部位原有裂缝进一步扩展,且有部分新裂缝产生,而跨中与支座之间产生较少新裂缝。B260 跨中部位原有裂缝扩展,且产生部分新裂缝,裂缝主要集中在跨中部位。可以发现,静载试验下冲击产生的斜裂缝和弯曲裂缝都有一定程度的扩展,且在支座与跨中之间有新的弯曲裂缝产生,新裂缝宽度较窄但更加密集;所受冲击能量越高,新裂缝产生越少,原有裂缝的扩展程度越高。

2.4 荷载-挠度曲线

各试件静载试验的荷载-跨中挠度关系曲线见图 6,其中挠度不包含在冲击作用下产生的残余挠度。可见,各试件均经历了弹性和弹塑性 2 个阶段,未受损梁受力性能接近理想弹塑性,而冲击受损梁的弹塑性行为更加明显;与未受损梁相比,冲击受损梁的弹性抗弯刚度和峰值荷载均随冲击能量的增加而先增大后减小;对于弹塑性阶段,后期变形能力显著不同,冲击受损梁的塑性变形能力均低于未受损梁。

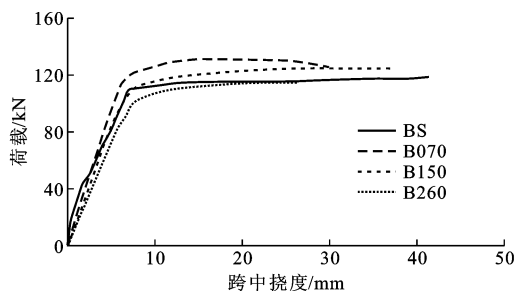


图 6 荷载-跨中挠度关系曲线

Fig. 6 Load-mid-span Deflection Curves

### 3 残余力学性能分析

#### 3.1 残余变形能力

为了进一步研究 RC 梁冲击受损后的变形能力,引入相对残余变形(RRD,即不考虑冲击下产生的残余变形)和绝对残余变形(ARD,即在冲击下和静载下的总残余变形)。残余变形-冲击能量关系见图 7。

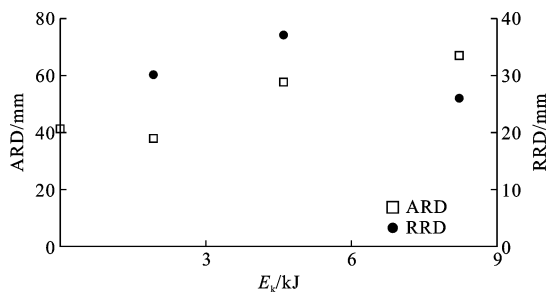


图 7 残余变形-冲击能量关系

Fig. 7 Relationships Between Residual Deflections and Impact Energy

由图 7 可知:冲击损伤后试件的相对残余变形均低于完好试件,说明冲击损伤梁的变形能力劣化,且随着冲击能量的增加先增大后减小;除未受冲击损伤梁,冲击损伤梁的绝对残余变形(ARD)随冲击能量增加而增加,说明当梁经受的冲击能量达到一定程度时,冲击受损梁的后期变形能力将大大劣化。

#### 3.2 残余承载能力与刚度

为了评估冲击损伤后试件的残余力学性能,引入残余承载力指数(RRI)和残余刚度指数(RSI)<sup>[14]</sup>。RRI为静载试验下受损与未受损试件抗弯承载力的比值,即  $M_r/M_s$ ;RSI为静载试验下弹性阶段受损与未受损试件割线刚度的比值,即  $EI_r/(EI_s)$ ,如图 8 所示。

对于轻度损伤试件 B070 与中度损伤试件 B150,其 RRI 与 RSI 分别比无损伤试件 BS 增加了 10.7%和 5.1%;对于中度损伤试件 B150,其 RRI

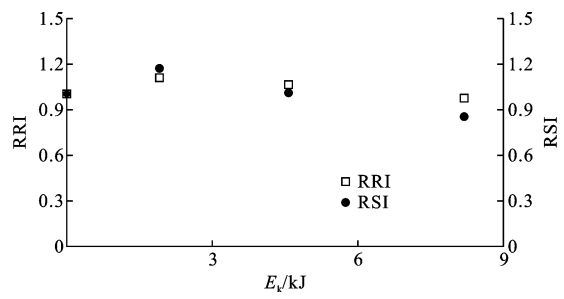


图 8 残余承载力(刚度)指数-冲击能量关系

Fig. 8 Relationship Between RRI(RSI) and Impact Energy

与 RSI 分别比试件 BS 增加了 17.4%和 1.4%;对于严重损伤的试件 B260,RRI 和 RSI 比试件 BS 略微下降 3.3%和 14.7%。随着冲击能量的增大,受损试件的残余承载力和刚度指数均近似呈线性降低,且降低程度基本一致。

影响冲击后梁残余承载力的因素主要包括混凝土的损伤、钢筋的损伤以及二者间的黏结性能 3 个方面。因为所有试件均为对称配筋,可取受压区高度为  $2a'_s$  来计算双筋梁的抗弯承载力  $M_u = A_s f_y \cdot (h_0 - a'_s)$ ,其中,  $A_s$  为梁底纵筋面积,  $f_y$  为钢筋屈服强度,  $h_0$  为梁正截面有效高度,  $a'_s$  为受压区边缘到受压纵筋截面中心的距离,故可认为其抗弯承载力与混凝土强度关系不大,主要对其他 2 个因素进行分析。从纵筋跨中应变时程曲线[图 3(d)]还可知:冲击作用下钢筋已经屈服,冲击作用完成后,钢筋硬化,屈服强度提高,而混凝土强度、钢筋-混凝土之间的黏结性能损伤有限,因此试件 B070 与 B150 承载力和抗弯刚度有所提高;试件 B260 挠跨比已经达到 2%以上,受压区混凝土局部压缩,裂缝宽度较大,且梁经历大变形,钢筋-混凝土之间黏结力退化。虽然钢筋由于硬化而强度提高,但残余承载力和抗弯刚度仍显著降低。

#### 3.3 残余力学性能统计分析

为了更深入地探究 RRI,RSI 与冲击能量的关系,将本文与文献[14]中试件的基本概况统计于表 2,并将试验结果统计于图 9,10。可以发现,剪跨比与残余力学性能没有表现出相关性,若仅采用剪跨比衡量试件的残余力学性能是非常不可靠的。

由表 2 可知,文献[14]中剪弯比小于 0.9 的试件发生剪切破坏,而其余试件都为弯曲破坏。由于不同破坏形态的梁受力性能与应力重分布方式存在较大差异,故需要将 2 种破坏形态的试件分类讨论,本文研究仅讨论弯曲破坏的试件。

考虑到各试件的配筋、材料强度以及剪跨比等变量均不同,有必要对弯曲破坏试件的残余承载力

表 2 试件概况统计  
Tab.2 Statistics of Specimens

数据来源	试件编号	$\rho/\%$	$\rho_v/\%$	$\lambda$	$M/(Vh_0)$	$\alpha$	$m/\text{kg}$	破坏形态
本文	BS	1.03	0.44	3.6	1.4	2.62	328	弯曲
	B070	1.03	0.44	3.6	1.4	2.62	328	弯曲
	B150	1.03	0.44	3.6	1.4	2.62	328	弯曲
	B260	1.03	0.44	3.6	1.4	2.62	328	弯曲
文献[14]	DR3.3-2.4	2.40		3.3	9.7	0.34	300	剪切
	DR3.3-2.4-0.12	2.40	0.12	3.3	7.3	0.45	300	剪切
	DR3.3-2.4-0.56	2.40	0.56	3.3	3.7	0.89	300	剪切
	SR3.8-0.8	0.80		3.8	3.4	1.14	300	弯曲
	DR3.8-0.8-0.11	0.80	0.11	3.8	2.5	1.51	300	弯曲
	DR3.8-0.8-0.15	0.80	0.15	3.8	2.3	1.65	300	弯曲
	SR5.7-1.6	1.60		5.7	6.1	0.93	300	弯曲
	DR5.7-1.6-0.15	1.60	0.15	5.7	4.3	1.33	300	弯曲
	DR5.7-1.6-0.20	1.60	0.20	5.7	3.8	1.49	300	弯曲

注： $\rho$ 为纵筋配筋率； $\rho_v$ 为箍筋配筋率； $\lambda$ 为剪跨比； $M$ 为抗弯承载力； $V$ 为抗剪承载力； $\alpha$ 为剪弯比。

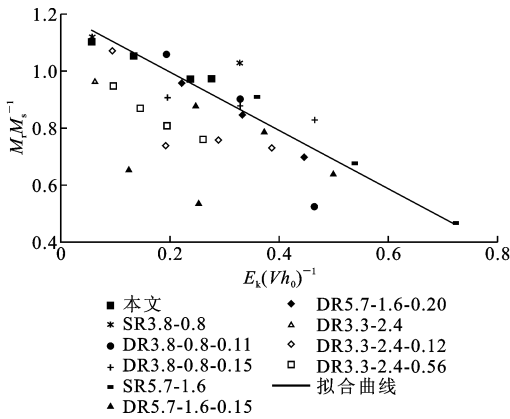


图 9 标准化残余承载力指数  
Fig.9 Normalisation of RRI

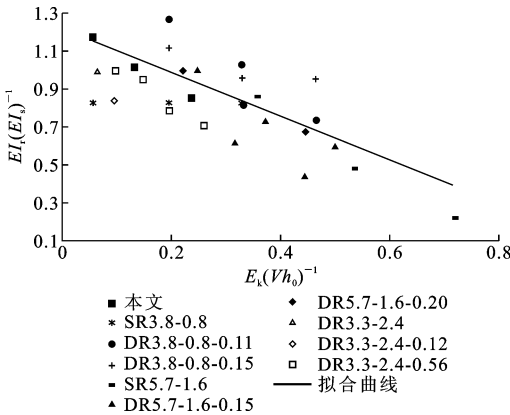


图 10 标准化残余刚度指数  
Fig.10 Normalisation of RSI

指数、残余刚度指数以及冲击能量进行标准化处理：由于冲击下试件的抗剪性能占主导作用，横坐标采用冲击能量和静态抗剪承载力与截面有效高度乘积的比值 $[E_k/(Vh_0)]$ ；冲击损伤后梁发生弯曲破坏，

抗弯承载力起控制作用，纵坐标采用  $M_r/M_s$  与  $EI_r/(EI_s)$ 。

由上述可知，弯曲破坏试件标准化后的残余承载力指数和残余刚度指数都与  $E_k/(Vh_0)$  有良好的相关性，本文与文献[14]中弯曲破坏试验结果拟合出的线性计算公式如下

$$\frac{M_r}{M_s} = -1.02 \frac{E_k}{Vh_0} + 1.20 \tag{1}$$

$$\frac{EI_r}{EI_s} = -1.15 \frac{E_k}{Vh_0} + 1.22 \tag{2}$$

式(1),(2)的相关系数分别为 0.913,0.794(强相关)。公式(1),(2)应用条件应在本文与文献[14]的试验范围内，即：①梁发生弯曲破坏形态(剪弯比大于 0.9)；② $0.057 < E_k/(Vh_0) < 0.716$ 。由公式(1),(2)可知，这种标准化处理方法基于试件的  $M_s$  与  $Vh_0$ ，因此， $M/(Vh_0)$  能有效地反映冲击后梁的残余力学性能。

由于相关试验数据极少，应用具有局限性，且仅限于弯曲破坏。建议根据破坏形态分类评估冲击后梁的残余力学性能，分别从钢筋和混凝土以及二者的黏结性能 3 个方面继续深入研究。

4 结 语

(1)冲击作用下梁的裂缝发展形态与静载下不同，裂缝数量相对较少，以斜裂缝为主；随冲击能量的提高，斜裂缝与弯曲裂缝显著增多，静态残余承载力试验下新裂缝产生越少，原有裂缝扩展程度越高。

(2)冲击能量越大，冲击损伤越大，冲击受损梁的残余承载力和抗弯刚度越低。当冲击能量较小

时,残余承载力与抗弯刚度高于无损伤梁。

(3)针对弯曲破坏形态梁,提出了一种考虑抗剪、抗弯承载力和对冲击能量标准化后的残余承载力与抗弯刚度计算公式,为冲击受损后 RC 梁的安全评估提供参考。

## 参考文献:

## References:

- [1] KISHI N, NAKANO O, MATSUOKA K G, et al. Experimental Study on Ultimate Strength of Flexural-failure-type RC Beams Under Impact Loading[C]//VAN GOETHEM G, ZURITA A, BERMEJO J M, et al. Transactions of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Washington DC: NC State University, 2001: 1-7.
- [2] KISHI N, MIKAMI H, MATSUOKA K G, et al. Impact Behavior of Shear-failure-type RC Beams Without Shear Rebar[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(9): 955-968.
- [3] KISHI N, MIKAMI H. Empirical Formulas for Designing Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading[J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(4): 509-519.
- [4] TACHIBANA S, MASUYA H, NAKAMURA S. Performance Based Design of Reinforced Concrete Beams Under Impact[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2010, 10(6): 1069-1078.
- [5] 赵德博, 易伟建. 钢筋混凝土梁抗冲击性能和设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 139-145.  
ZHAO De-bo, YI Wei-jian. Anti-impact Behavior and Design Method for RC Beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 139-145.
- [6] 王明洋, 王德荣, 宋春明. 钢筋混凝土梁在低速冲击下的计算方法[J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 399-405.  
WANG Ming-yang, WANG De-rong, SONG Chun-ming. A Calculation Method of Reinforced Concrete Beam Under Low Velocity Impact[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(3): 399-405.
- [7] 许 斌, 曾 翔. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 41-51, 61.  
XU Bin, ZENG Xiang. Experimental Study on the Behaviors of Reinforced Concrete Beams Under Impact Loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 41-51, 61.
- [8] 曾 翔, 许 斌. 无腹筋钢筋混凝土梁抗冲击行为试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 63-73.  
ZENG Xiang, XU Bin. Experimental Study on the Impact-resistant Behavior of RC Beams Without Shear-resistant Rebar[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 63-73.
- [9] SAATCI S, VECCHIO F J. Effects of Shear Mechanisms on Impact Behavior of Reinforced Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(1): 78-86.
- [10] OHNUMA H, ITO C, NOMACHI S G. Dynamic Response and Local Rupture of Reinforced Concrete Beam and Slab Under Impact Loading[C]//PRICE J W H. Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Brussels: North-Holland Physics Publishing, 1985: 179-184.
- [11] FUJIKAKE K, LI B, SOEUN S. Impact Response of Reinforced Concrete Beam and Its Analytical Evaluation[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(8): 938-950.
- [12] RAJAGOPALAN N, LAKHSMANAN N, MUTHUMANI K. Stiffness Degradation of Reinforced Concrete Beams Under Repeated Low-energy Impact Loading[J]. Indian Concrete Journal, 1995, 69(4): 227-234.
- [13] BENTUR A, MINDESS S, BANTHIA N. The Behaviour of Concrete Under Impact Loading; Experimental Procedures and Method of Analysis[J]. Materials and Structures, 1986, 19(5): 371-378.
- [14] LI B, NAIR A, KAI Q. Residual Axial Capacity of Reinforced Concrete Columns with Simulated Blast Damage[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(3): 287-299.
- [15] 刘 佳. 冲击损伤后 RC 短柱剩余承载能力试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
LIU Jia. Experimental Study on Residential Bearing Capacity of RC Short Column Under Impact Damage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [16] ADHIKARY S D, LI B, FUJIKAKE K. Residual Resistance of Impact Damaged Reinforced Concrete Beams[J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 67(7): 364-378.