

## RC梁冲击破坏机理试验研究与 残余变形预测方法探讨\*

霍静思<sup>1,2†</sup>, 胡开赢<sup>1,3</sup>

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

**摘要:**进行了3根剪跨比为3.58钢筋混凝土梁的落锤冲击试验和1个静力对比试验,重点研究钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下的破坏机理和冲击能量对钢筋混凝土梁残余变形的影响规律.试验结果表明,在静力下发生弯曲破坏的梁在低速冲击下的裂缝形态以弯曲裂缝、弯剪裂缝为主,在高速冲击荷载作用下以腹剪裂缝为主.试验测试了冲击力、支座反力、跨中位移和跨中纵筋应变等动态时程曲线,通过分析其动态时程曲线结果,获得了钢筋混凝土梁的冲击破坏机理,即冲击作用下梁的破坏过程分为局部响应阶段和整体响应阶段.同时,还统计了国内外相关文献冲击试验结果,通过比较分析钢筋混凝土残余变形-冲击能量关系实验数据,探讨了冲击荷载作用下钢筋混凝土梁残余变形的经验公式的适用性和存在的问题.

**关键词:**钢筋混凝土梁;冲击试验;动态响应;残余变形

**中图分类号:**TU375.1

**文献标志码:**A

## Failure Mechanism of RC Beams under Impact Loading and Discussion on Prediction Methods of Residual Deflection

HUO Jingsi<sup>1,2†</sup>, HU Kaiying<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. China Gezhouba Group Survey Design Institute, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Tests of three RC beams under impact loading and one under static loadings were carried out with the shear span ratio of 3.58. The failure mechanism and the influence of impact energy on residual deflection of the RC beams under impact loading were investigated. The test results showed that cracks of the flexural beams under static loading were mainly attributed by the bending-shear failure mode under low-velocity impact, while they changed to the shear failure mode under high-velocity impact. The time history of impact loading, support reaction force, mid-span deflection and reinforcement strain in mid-span were recorded and presented. Based on the analysis of the time history curves, the failure mechanism of RC beams was discussed. The failure process under impact loading can be divided into partial response phase and overall response phase. Moreover, the impact test results in the existing related papers were col-

\* 收稿日期:2016-01-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378200,51438010), National Natural Science Foundation of China(51378200,51438010)

作者简介:霍静思(1970-),男,吉林梨树人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: jingsihuo@gmail.com

lected, and based on the comparison of the relationship between residual deflection and impact energy, the applicability of empirical formula to estimate residual deflection under impact loadings was discussed.

**Key words:** RC beams; impact test; dynamic response; residual deflection

由于全球范围内的恐怖袭击事件日益增多,煤气爆炸和其它撞击事故也逐渐引起关注,因此,亟需合理的结构抗冲击荷载设计和评估方法,进行合理的冲击试验对改进结构的抗冲击设计方法尤为重要。研究和认识结构在冲击荷载作用下的响应是进行结构抗冲击设计的基础,国内外研究者已经对钢筋混凝土结构在极端荷载(如地震、爆炸和冲击荷载等)作用下的受力性能开展了研究。

由于材料的应变率敏感性<sup>[1-2]</sup>、构件的惯性效应和构件冲击区域的局部破坏变形,冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的受力性能与静力荷载作用下明显不同,国外学者从不同的角度对梁的冲击过程进行了研究。Rajagopalan 等<sup>[3]</sup>研究了反复低能量冲击下钢筋混凝土梁抗弯刚度的退化,并给出了抗弯刚度退化的理论计算方法。Bentur 等<sup>[4]</sup>对落锤试验中梁体的加速度进行了测量,结果表明,在冲击初始阶段钢筋混凝土梁的加速度很大,此阶段冲击力由惯性力抵抗。Kishi 等<sup>[5]</sup>试验研究表明,可以采用最大支座反力评估冲击作用下钢筋混凝土简支梁受弯破坏极限承载力,并用平行四边形的简化模型来描述支座反力与跨中位移的关系,进一步提出了钢筋混凝土梁抗冲击设计所需求的静态承载力的经验计算公式。Ohnuma 等<sup>[6]</sup>完成了 18 根钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,研究发现不同的冲击速度会导致不同的破坏模式:钢筋混凝土梁在低速冲击下发生弯曲破坏,而在高速冲击下却发生剪切破坏。Saatei 等<sup>[7]</sup>完成了 8 根钢筋混凝土梁的冲击试验,通过对破坏形态及裂缝分布的分析,发现冲击荷载下不管梁是发生弯曲破坏还是剪切破坏,剪切机制都发挥重要作用。Fujikake 等<sup>[8]</sup>对 3 种不同纵筋配筋率的混凝土梁进行不同冲击高度的冲击试验,并提出了用于估算梁的最大跨中位移的计算模型,用双自由度质量-弹簧-阻尼系统模型对弯曲破坏类型的混凝土梁的动态行为进行分析,分析结果与试验结果吻合较好。许斌等<sup>[9]</sup>对钢筋混凝土梁的抗冲击性能也进行了研究。

国内外学者对钢筋混凝土梁抗冲击设计方法也进行了研究。王明洋等<sup>[10]</sup>将钢筋混凝土梁的抗冲击响应划分为准弹性阶段和塑形阶段来建立简化模

型,由此提出了低速冲击下梁抗冲击响应的计算方法。Kishi 等<sup>[11]</sup>对 27 根无腹筋钢筋混凝土梁进行了冲击试验,考虑的参数包括剪跨比和冲击速度(1~5 m/s),提出了抗冲击设计时无腹筋梁所需的静态抗剪承载力与冲击能量和残余变形的经验公式。Tachibana 等<sup>[12]</sup>进行了一系列的静态下受弯破坏梁的冲击试验,通过对试验数据的分析得到了各冲击特征参数的经验关系式,同时提出了基于冲击能量与静态抗弯承载力的跨中最大位移计算公式,建立了钢筋混凝土梁在冲击荷载下基于性能的设计方法。Kishi 等<sup>[13]</sup>进行了 36 根不同截面、不同剪跨比的钢筋混凝土梁冲击试验,以跨中最大变形和跨中残余变形为衡量标准提出了抗冲击设计方法,并提出了预测跨中残余变形的经验公式。赵德博等<sup>[14]</sup>对钢筋混凝土梁的抗冲击性能和设计方法进行了研究。

就目前研究情况来看,国内外学者对冲击荷载作用下梁的试验研究主要集中在以下几个方面:冲击下梁的抗弯抗剪设计方法<sup>[3-5]</sup>、梁的反应特点<sup>[6-7]</sup>(如裂缝形态、冲击力支座反力时程)及其影响因素<sup>[8-9]</sup>(冲击能量、配筋变化等)、抗冲击设计方法<sup>[10-14]</sup>等方面。国内外对冲击过程中梁的破坏机理研究较为缺乏,因此本试验进行了 3 根钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,研究了冲击过程中冲击力、支座反力、跨中位移以及纵筋应变时程曲线,重点分析了梁在冲击荷载下的破坏机理。国内外学者在各自的试验基础之上提出了相关的抗冲击设计方法并拟合得到了经验公式。本试验在将试验结果与经验公式进行验证的过程中,发现经验公式所存在的问题。通过对相关文献试验结果的统计分析,对冲击荷载作用下梁残余变形经验公式的适用性进行了探讨。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

共设计了 4 根钢筋混凝土梁,试件尺寸和截面的配筋如图 1 所示。试件长 2 900 mm,净跨 1 860 mm;截面尺寸为  $b \times h = 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,纵筋保护层厚度 25 mm。梁底和梁顶各配置两根直径为 16 mm 的纵向钢筋,强度等级为 HRB400,配筋率为

1.03 %;箍筋采用 $\phi 8@150$ 带肋钢筋,强度等级为HRB400,配箍率为0.44 %。实测纵筋屈服强度为524 MPa,极限强度636 MPa;箍筋屈服强度479 MPa,极限强度598 MPa。混凝土设计强度为C30,试验时实测混凝土轴心抗压强度34.1 MPa。采用跨中单点集中加载,剪跨比为3.58。

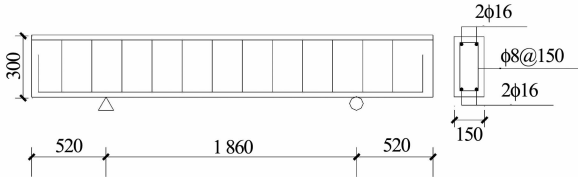


图1 试件设计详图(单位:mm)

Fig. 1 Details of the RC beams(Unit:mm)

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50001—2010)计算,试件在静载下的承载力设计值及剪弯比见表1,试件的剪弯比为2.63。

表1 试件承载力设计值

Tab. 1 Parameters of the beam capacity

受弯承载力设计值 $F_M/kN$	受剪承载力设计值 $F_V/kN$	剪弯比 $F_V/F_M$
67.83	178.28	2.63

## 1.2 试验装置及试验方法

采用湖南大学高性能落锤试验机进行冲击试验,并设计了梁抗冲击试验用的铰支座,如图2所示。铰支座由两个圆钢(梁下方)、一个压梁(梁上方)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,由拉杆与下层圆钢相连。由于下层圆钢可转动,压梁对梁体在支座处的转动没有影响。两个圆钢之间安装力传感器以测量支座反力。落锤锤头为200 mm直径平头圆柱体,通过在上部加减钢板砝码调节锤头重量,试验锤头重量为328 kg,锤头冲击点在梁顶面跨中位置,锤头内置有力传感器以测量冲击力。梁底面跨中位置布置位移传感器以测量冲击时的位移响应,梁底纵筋粘有应变片以测量钢筋应变时程。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,以对支座反力进行良好的测量。

试验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重量计算冲击能量。数据采集系统为NI公司生产的PXIe-1062Q,并通过Labview Signal Express软件进行采集控制设置及数据处理,采样频率为500 kHz。各试件的冲击高度及冲击

能量如表2所示。



图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of test setup

表2 试件冲击高度与冲击能量

Tab. 2 Summary of impact height and impact energy

试件编号	$m/kg$	$h/m$	$v/(m \cdot s^{-1})$	$E/J$
BS-01	—	—	—	—
Ba070	328	0.7	3.46	1968
Bb150	328	1.5	5.3	4607
Bc260	328	2.6	7.08	8220

注: $m$ 为锤头质量, $h$ 为冲击高度, $v$ 为冲击速度, $E$ 为冲击能量。

## 2 冲击试验结果与分析

### 2.1 裂缝形态

各个试件受冲击荷载作用后的裂缝发展形态如图3所示。试件BS-01为静力对比试件,均可见较多的弯曲裂缝和剪切裂缝,受压区混凝土压碎,钢筋已经屈服,其破坏形态为弯曲破坏。试件Ba070的冲击高度较小,裂缝数量较少,在跨中部位有若干条垂直弯曲裂缝,斜裂缝较少,试件的残余变形达到跨度的0.44 %。随着冲击高度的增加,裂缝的数量增多。试件Bb150冲击高度为1.5 m,垂直弯曲裂缝集中在跨中区域,斜裂缝分布在支座与跨中区域之间,试件的残余变形为20.1 mm,达到了试件净跨的1.1 %,已经达到Kishi等<sup>[7]</sup>所定义的弯曲破坏极限状态。试件Bc260冲击高度为2.6 m,斜裂缝由梁底部向梁顶发展,且数量显著,跨中区域还有弯曲裂缝发展。此时,试件的残余变形为40.6 mm,已达到梁净跨的2.2 %。

试件的剪弯比为2.63在静力下发生弯曲破坏。从裂缝的发展情况来看,在低速冲击下,试件的裂缝形态以弯曲、弯剪裂缝为主;在高速冲击下,试件的裂缝形态以腹剪裂缝为主。

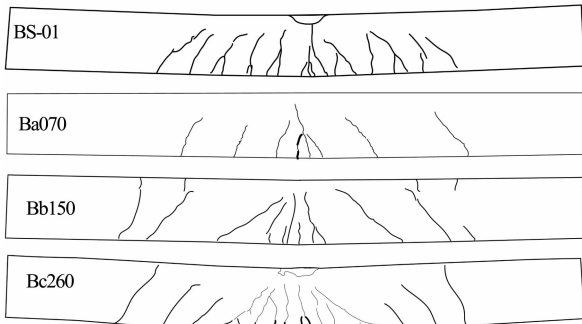
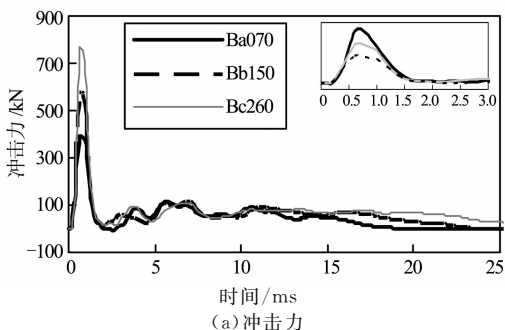


图 3 试件裂缝形态

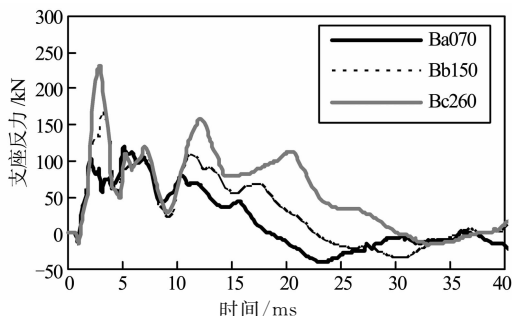
Fig. 3 Crack patterns of the beams

## 2.2 冲击试验结果

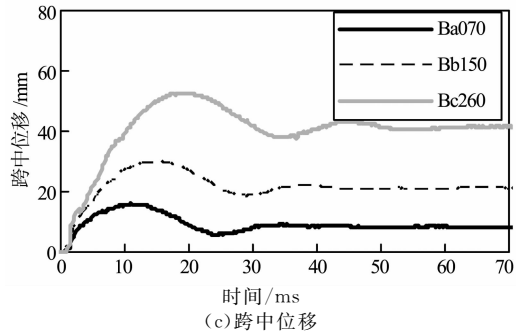
图 4 分别给出了各个试件的冲击力、支座反力、跨中位移、跨中纵筋应变时程曲线。图 4(a) 所示冲击力时程曲线,在 3 种冲击高度下,冲击力都在很短的时间内达到峰值,随后迅速下降,形成一个半正弦波;接着出现一个平台,平台冲击力约 100 kN 左右。冲击高度越大,冲击力峰值越大。图 4(b) 为支座反力时程曲线,3 种高度下支座反力波动情况相似,在出现两次峰值后,都逐渐减小;冲击高度越大,支座反力峰值越大,且持续时间越长。图 4(c) 为跨中位移时程曲线,可见所有试件跨中位移时程曲线形状相似,初始阶段形成一个正弦半波波形后,逐渐减小,并出现一次波动。随着冲击高度的增加,跨中位移峰值与持续时间增加,残余变形增加。图 4(d) 为跨中纵筋应变时程曲线。在冲击初始阶段,纵筋应变均急剧增大,随后变缓,紧接着又在短时间达到二次峰值。



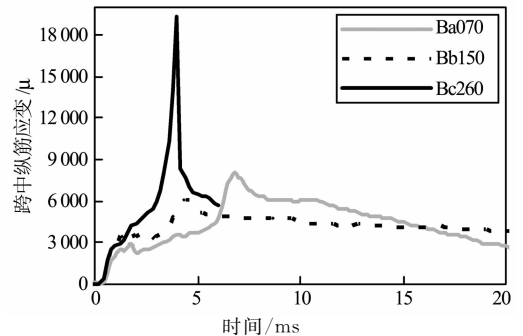
(a) 冲击力



(b) 支座反力



(c) 跨中位移



(d) 跨中纵筋应变

图 4 冲击力、支座反力、位移和应变时程曲线  
Fig. 4 The time histories of impact force, reaction force, deflection and rebar strain in mid-span

## 2.3 冲击作用下梁的破坏机理分析

为了揭示钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下的破坏机理,深入研究图 4 所示各试件在冲击过程中的冲击力、支座反力、跨中位移和纵筋应变时程曲线的变化规律及其相互关系,以试件 Ba070 为例,将各个时程曲线数据绘制于同一图中,如图 5 所示(将跨中位移扩大 20 倍,跨中纵筋应变缩小 20 倍,冲击力和支座反力不变)。从图 5 所示各时程曲线的比较分析可见,可将冲击过程分为如下两个阶段。

第一阶段为局部响应阶段。此阶段冲击力作用时间很短(小于 1.2 ms 时),冲击力迅速达到了峰值,但支座反力响应不明显,跨中位移几乎没有发展。由于冲击力的作用,梁跨中局部区域受到剪力作用,而此时支座反力很小,试件以受剪为主,局部产生斜裂缝。从图 5 可见,纵筋应变在这一阶段急剧增大,这是由于跨中局部区域斜裂缝的发展导致的。

第二阶段为整体响应阶段,作用延时为 1.2 ~ 14 ms。1.2 ~ 3.2 ms 内,冲击力逐渐减小到 0,支座反力达到峰值,跨中位移开始增大,纵筋应变变化较小。在这一阶段,锤头的冲击动能转化给梁体,梁获得速度开始向下加速运动(由位移时程曲线可以看出),而锤头逐渐减速直到和梁一起运动,因此冲击力会逐渐减小;由冲击产生的应力波传递到支座处,

支座反力开始响应并逐渐达到峰值(2.2 ms). 3.2 ms以后,冲击力第二次达到峰值,这是由于在抗力的作用,梁体逐渐减速,而锤头继续向下运动,锤头与梁发生二次冲击作用,导致锤头力出现第二次峰值(3.8 ms). 3.8 ms以后,梁与锤头的相互作用逐渐减小,冲击力变化不大,支座反力与冲击力的变化趋势一致. 由于梁仍具有向下的运动速度,跨中位移继续增大并达到峰值,试件的垂直裂缝在这一过程中发展. 此时,纵筋应变出现第二次峰值,斜裂缝进一步发展. 跨中位移在 10.4 ms 时达到峰值,此时冲击力和支座反力开始减小.

梁在冲击作用下和静力作用下受力情况明显不同,其破坏机理差异显著. 冲击过程中,冲击力在较短时间内达到峰值,跨中局部区域首先产生斜裂缝;当应力波传递到支座处,支座反力开始响应;冲击力在达到第二次峰值后逐渐衰减并与支座反力趋于一致,跨中位移达到峰值,垂直弯曲裂缝发展.

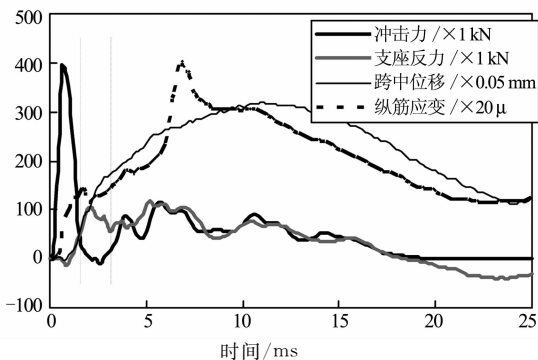


图5 梁动态响应的时程曲线

Fig. 5 Time history of the beam response

### 3 残余变形经验公式的探讨

目前,在钢筋混凝土梁抗冲击设计方法中,通过允许构件发生大变形以耗散能量被认为是一种较为合理的设计方法. 此方法可采用冲击过程中梁残余变形作为设计控制指标. Kishi 等<sup>[13]</sup>在实验的基础上提出了估算钢筋混凝土梁残余变形的经验公式,其形式为:

$$\delta_r = \alpha \frac{E}{P_{usc}} \quad (1)$$

式中: $E$ 为冲击能量; $P_{usc}$ 为试件静态受弯承载力设计值; $\delta_r$ 为试件的残余变形; $\alpha$ 为拟合实验数据得到的系数,Kishi等拟合得到 $\alpha=0.42$ . 试验中试件的剪弯比均大于1,因此本公式只适用于剪弯比大于1

的试件.

由式(1),已知落锤冲击能量便可确定试件的残余变形,但对比本次试验,发现该公式有待改进之处. 如按照此公式,试件 Ba070, Bb150, Bc260 的计算残余变形分别为 12.2 mm, 25.4 mm, 50.8 mm, 但试验实测结果却为 8.1 mm, 20.4 mm, 40.6 mm, 相差较大.

统计相关文献及本试验共 4 根梁,对此公式的适用性进行验证. 图 6 为对文献统计中试件冲击能量与残余挠度的关系曲线,其中 B48 为文献[11]中试验数据, BD 为文献[9]中试验数据, B-10 为文献[5]中试验数据,且所有试件的剪弯比均大于 1.5. 从图中看出,冲击能量与跨中挠度呈正比关系,这与 Kishi<sup>[13]</sup>等人得出的结论是一致的.

利用公式(1)计算文献统计中试件的残余变形,并与其试验实测值进行比较,结果见表 3. 对于系列 B48<sup>[11]</sup>,所有试件的试验值均小于经验公式的计算值,且最高相差 26%;系列 BD 中<sup>[9]</sup>,试件 BD-1, BD-2 的试验值小于经验公式的计算值,而试件 BD-3, BD-4, BD-5 的试验值均大于经验公式的计算值,最高相差 38%;系列 b-10 中<sup>[5]</sup>,试验值与经验公式的计算值相差不大,小于 10%;本次试验的实际值均小于经验公式的计算值,最高相差 33%.

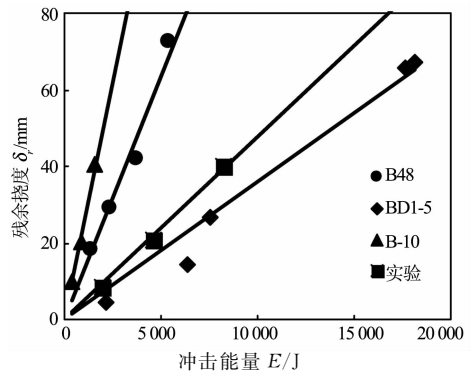


图6 冲击能量-梁跨中挠度曲线

Fig. 6 Relationship between impact energy and residual deflection in beam mid-span

由文献统计结果的对比发现,不同截面的梁在冲击荷载作用下其残余变形的分布具有一定的离散性,经验公式所计算的试件残余变形与试验结果有较大差距. 在实际设计中,若构件的残余变形小于经验公式的计算结果,构件是偏于安全的. 在文献统计中发现,试件的残余变形并不完全小于经验公式的计算结果,因此, Kishi 等给出的经验设计公式的安全性有待进一步论证.

表 3 跨中残余变形计算值与试验值对比  
Tab. 3 Comparison of beam mid-span residual deflection from experiment and an empirical formula<sup>[13]</sup>

系列编号	$b \times h$ /mm <sup>2</sup>	$L$ /m	$a$	$b$ /%	试件编号	$E$ /J	$F_M$ /kN	$d_c$ /mm	$d_r$ /mm	$\frac{\delta_r - \delta_c}{\delta_r}$ /%
B48 <sup>[11]</sup>	150×250	2	4.8	0.8	B48-1	1 350	39.3	14.4	18.2	26
					B48-2	2 400		25.6	29.4	15
					B48-3	3 750		40.0	42.2	5.5
					B48-4	5 400		57.7	72.7	26
BD <sup>[9]</sup>	150×310	1.86	5.9	1.45	BD-1	2 179	129.3	7.1	4.4	-38
					BD-2	6 395		20.8	14.5	-30
					BD-3	18 095		58.8	67.2	14
					BD-4	17 620		57.2	65.5	14
					BD-5	7 517		24.4	26.6	9
B-10 <sup>[5]</sup>	200×220	2	3.4	0.42	b-10-1	400	16.9	9.9	9.7	-2.0
					b-10-2	900		22.4	20.3	-9.4
					b-10-3	1 600		39.8	40.7	2.2
试验	150×300	1.86	3.6	1.03	Ba070	1 968	67.87	12.2	8.1	-33
					Bb150	4 100		25.4	20.4	-20
					Bc260	8 210		50.8	40.6	-20

注: $b, h$  为截面宽与高, $L$  为净跨, $a$  为剪跨比, $b$  为配筋率, $E$  为试件冲击能量, $F_M$  为试件受弯承载力设计值, $d_c$  为跨中残余变形计算值, $d_r$  为跨中残余变形试验值。

## 4 结 论

本文对 4 根钢筋混凝土梁进行了冲击试验和静力对比试验研究,试验中得到了冲击力、支座反力、跨中位移、跨中纵筋应变等时程曲线。根据本次试验结果,并对比已有试验数据,得到如下主要结论:

1) 在静力作用下发生弯曲破坏的梁,在低速冲击作用下,弯曲裂缝、弯剪裂缝发展较多,在高速冲击作用下,腹剪裂缝发展较多。

2) 通过分析冲击过程中梁冲击力、支座反力、跨中位移和纵筋应变时程曲线,对冲击下梁的破坏机理进行了分析,冲击荷载作用下梁的破坏过程由局部响应阶段和整体响应阶段组成。

3) 通过对已有文献中残余变形经验公式的探讨,指出了该经验公式存在的不足之处,其适用性需进一步论证。

## 参 考 文 献

- [1] SOROUSHIAN P, CHOI K B. Steel mechanical properties at different strain rates[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(4): 663-672.
- [2] 陈英,刘瑞娟,霍静思. 冲击荷载下角焊缝动态强度试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015,42(3):31-35  
CHEN Ying, LIU Ruijuan, HUO Jingsi. Experimental study of dynamic property transverse fillet weld[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(3): 31-35. (In Chinese)
- [3] 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.
- [4] BENTUR A, MINDESS S, BANTHIA N. The behaviour of con-

- crete under impact loading: experimental procedures and method of analysis[J]. Materials and Structures, 1986, 19(5): 371-378.
- [5] KISHI N, NAKANO O, MATSUOKA K G, *et al.* Experimental study on ultimate strength of flexural-failure-type RC beams under impact loading[C]// Transactions of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. NC State University, Washington DC, 2001: 1-7.
  - [6] OHNUMA H, ITO C, NOMACHI S G. Dynamic response and local rupture of reinforced concrete beam and slab under impact loading[C]// Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Amsterdam, Brussels, Belgium: North-holland Physics Publishing, 1985: 179-184.
  - [7] 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.
  - [8] 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.
  - [9] 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.  
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. (In Chinese)
  - [10] 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 Mingyang, WANG Derong, SONG Chunming. A calculation method of reinforced concrete beam under low velocity impact[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(3): 399-405. (In Chinese)
  - [11] 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.
  - [12] 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.
  - [13] KISHI N, MIKAMI H. Empirical formulas for designing reinforced concrete beams under impact loading[J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(4): 509-519.
  - [14] 赵德博,易伟健. 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 Debo, YI Weijian. Anti-impact behavior and design method for RC beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 139-145. (In Chinese)