

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0102

钢筋混凝土梁冲击动力响应和破坏模式转化 试验研究*

宋春明¹, 钟家和¹, 徐吉威², 吴学志¹, 程怡豪¹

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 随着结构配置和冲击能量等主要影响因素的变化, 钢筋混凝土梁的冲击动力响应和破坏模式会发生转化。开展不同配置的钢筋混凝土梁的落锤冲击试验, 综合测量获得冲击力、支座反力、钢筋与混凝土应变、冲击局部与结构整体变形等参数, 重点分析不同混凝土强度、不同纵筋/箍筋配置以及不同冲击速度对钢筋混凝土梁的动力响应以及破坏模式的影响规律。试验表明: 低速撞击下钢筋混凝土梁的位移峰值、残余位移随冲击速度的提高而增大, 均与冲击动能与极限静承载力之比存在近似线性关系; 混凝土强度越高、纵筋配筋率越高, 相同冲击条件下梁所受的冲击力峰值越大, 但整体位移响应越小; 配筋率的变化对结构的局部响应和整体响应的影响均较小; 结构受到撞击时剪切效应在前, 弯曲效应在后, 斜裂缝先于垂直裂缝出现; 依据结构的破坏极限状态, 判断梁在冲击作用下存在的弯曲破坏、弯剪破坏、剪切破坏和冲切破坏等4种破坏模式, 结果表明: 相同结构配置条件下, 随冲击速度的不断提高, 钢筋混凝土梁由弯曲破坏向弯剪破坏、剪切破坏和冲切破坏转化; 冲击速度相同时, 提高混凝土强度、配筋率或降低纵向钢筋配筋率, 梁的破坏模式逐步由冲切、剪切破坏向弯曲破坏模式转化。结构的冲击破坏模式及其转化规律能够为结构的抗撞设计与防护提供参考。

关键词: 钢筋混凝土梁; 落锤试验; 动力响应; 破坏模式; 冲切破坏

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on dynamic response and failure mode transformation of reinforced concrete beams under impact

SONG Chunming¹, ZHONG Jiahe¹, XU Jiwei², WU Xuezhi¹, CHENG Yihao¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: By changing the main influencing factors such as structural configuration and impact energy, the impact dynamic response and failure mode of reinforced concrete beams would change. Drop hammer impact tests of reinforced concrete beams with different configurations were conducted, and the parameters of impact force, support reaction, reinforcement and concrete strain, impact local deformation and overall structural deformation of the structure were obtained by comprehensive measurements. The influence law of different concrete strength, different longitudinal reinforcement/stirrup configuration, and different impact velocity on the dynamic response and failure mode of reinforced concrete beams was thoroughly analyzed. The result of the experiment proves that the peak displacement and residual displacement of reinforced concrete beams under low-velocity impact increase with the improvement of impact velocity. Moreover, the peak displacement and residual

* 收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-07-15

第一作者: 宋春明(1979—), 男, 博士, 副教授, ming1979@126.com

通信作者: 钟家和(1997—), 男, 硕士研究生, zhongjh68@163.com

displacement are approximately linearly related to the ratio of impact kinetic energy to static ultimate load. The higher the concrete strength and the greater the longitudinal reinforcement ratio are, the larger the peak impact force on the beam is under the equal impact conditions, whereas the smaller the overall displacement response is. Changing the stirrup ratio has little effect on the local response and the overall response of the structure. When the structure is impacted, the shear effect occurs first, the bending effect occurs last, and the oblique crack appears before the vertical crack. Four failure modes of a beam under impact are assessed in accordance with the failure limit state of the structure: bending failure, bending-shear failure, shear failure, and punching failure. According to the test results, with the improvement of the impact velocity, the reinforced concrete beam changes from bending failure to bending shear failure, shear failure and punching failure under the same structural arrangement. By increasing the concrete strength and stirrup ratio or decreasing the longitudinal reinforcement ratio, the failure mode of the beam gradually changes from punching failure to bending failure under the same impact velocity. The impact failure mode and its transformation law can provide important reference for anti-collision design and protection of structures.

Keywords: reinforced concrete beams; drop hammer experiments; dynamic response; failure mode; punching failure

建筑物在服役期间可能遭受到冲击荷载作用(诸如汽车撞击护栏、船舶撞击桥墩、高空重物坠落等事故型冲击荷载,以及燃气爆炸、恐怖袭击等造成爆炸飞射物的冲击荷载)。因此,亟需合理的结构抗冲击荷载设计和评估方法。钢筋混凝土梁作为常见的承重结构,研究分析其在冲击荷载作用下的动力响应和破坏模式对结构抗冲击设计与毁伤评估具有重要意义。冲击荷载的特点是在非常短的时间内接触点的速度急剧变化和强动载作用^[1],使得梁的冲击动力响应及破坏机理显著区别于静载下的。国内外学者们针对钢筋混凝土梁在低速冲击下的动力响应特点进行了大量研究。Hughes 等^[2]对 92 根钢筋混凝土梁进行了冲击试验,研究了冲击速度、冲击质量和接触刚度对构件动态响应的影响,并指出等效静力设计方法由于不能反映高阶振型的贡献,因此不适用于构件的抗撞设计。Kishi 等^[3]采用落锤冲击试验研究了无腹筋钢筋混凝土梁在冲击荷载下的动态响应和耗能能力,并指出支座反力比碰撞力更能反映构件内力和抗冲击能力。曾翔等^[4]、许斌等^[5]对无腹筋梁、钢筋混凝土梁进行了落锤试验研究,给出了考虑惯性力作用时冲击荷载作用下简支梁的弯矩和剪力分布,并研究了冲击力与冲击速度、冲击能的关系。霍静思等^[6]通过钢筋混凝土梁落锤试验,发现在冲击过程中,冲击力在很短的时间内达到峰值,并在冲击位置产生斜裂缝;当应力波传播到支座时,进入整体响应阶段,跨中位移发展,产生垂直裂缝。Cotsovos 等^[7-8]基于试验观察以及数值模拟结果提出了“有效长度”的概念,解释了冲击作用下承载力提高的原因,并提出了计算梁的冲击承载能力的简化计算方法。数值模拟方面,刘飞等^[9]基于数值模拟从损伤发展和冲击能量转化方面分析了钢筋混凝土构件的冲击响应过程和破坏机理,赵武超等^[10-11]数值模拟研究了冲击荷载下钢筋混凝土梁局部响应特征以及对梁的冲击损伤进行评估,王银辉等^[12]基于数值模拟研究了冲击初期梁中的惯性力分布,Pham 等^[13]基于数值模拟研究了边界条件对冲击动力响应的影响,Li 等^[14]则对落锤形状及垫片材料、厚度的影响规律进行了研究。王明洋等^[15]以弯曲理论为基础,总结和分析了钢筋混凝土梁在低速冲击下的局部与整体变形和破坏特征,分别建立钢筋混凝土梁的准弹性阶段和塑性阶段的简化计算模型。

在不同的撞击条件下,钢筋混凝土梁呈现不同的破坏模式。Ohnuma 等^[16]进行了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,低速冲击下发生弯曲破坏,而在较高速冲击下却发生剪切破坏。Fu 等^[17]研究了冲击荷载作用下无箍钢筋混凝土梁的破坏行为,利用高速摄影和数字图像相关(digital image correlation, DIC)设备可视化了裂缝的开展模式。Sukontasukkul 等^[18]研究了素混凝土和纤维增强混凝土(fiber reinforced concrete, FRC)短梁的抗冲击性能,发现端部约束在梁的抗冲击性能中起重要作用,端部约束力会影响钢筋混凝土梁的破坏模式,端部约束加强,弯曲破坏会转化为剪切破坏。Kishi 等^[19]通过改变配筋率和剪跨比,共进行了 27 次落锤冲击试验,通过裂纹模式的观察得到,RC 梁在低速冲击荷载下可能会以弯曲破坏模式破坏,但在高速冲击荷载下可能会在剪切破坏模式下破坏。Fujikake 等^[20]保持配箍率不变,对 3 种不同纵筋配筋率钢筋混凝土梁进行落锤冲击试

验,发现纵筋配筋率对钢筋混凝土梁的破坏模式有显著影响。Zhao 等^[21]通过改变梁跨度、配箍率、冲击体质量和冲击速度对梁的剪切破坏模式进行研究,指出不同于静态加载试件裂纹分布,冲击加载试件裂纹均集中在冲击点处,赵德博等发现^[22]随冲击速度提高和冲击质量减小,梁的局部变形加剧,梁的整体耗能反而减小,说明结构的响应正由整体模式向局部或局部与整体耦合模式转变。梅福林等^[23]对素混凝土梁和无箍筋轻混凝土梁进行了有限元分析,发现钢筋混凝土梁的冲击破坏模式与冲击体的冲击速度和梁的配筋率直接相关,在冲击体以较低速度冲击下梁发生弯曲破坏,当冲击速度达到一定程度时,在跨中区域形成八字形剪切破坏形态,继续增大冲击速度,钢筋混凝土梁会发生局部的冲切破坏。

目前对钢筋混凝土构件抗冲击性能的研究大部分集中在冲击力、构件的变形以及破坏规律方面,但对破坏模式的转化及其影响规律仍缺乏系统性研究。为了揭示梁破坏模式的转化规律,本文中对不同配置的钢筋混凝土梁进行系统的落锤冲击试验,以研究不同速度下落锤冲击梁的动力响应。重点分析各种混凝土强度、纵向钢筋/箍筋构型以及冲击速度对钢筋混凝土梁裂缝发展、破坏模式和破坏模式转化规律的影响,以期为结构的抗撞设计与防护提供重要参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

钢筋混凝土梁长为 2200 mm,截面尺寸为 200 mm×120 mm(高×宽),均为简支支承,梁净跨为 1800 mm。按照配置不同分别编号为 B1、B2、B3、B4,详见表 1,其中 v 为落锤冲击速度,根据落锤自由落体的高度计算得到, E_I 为冲击能量。表中试验编号 B1-S 中, S 代表静载作用; B1-X 中的数字 X 代表冲击速度。B3 底部配置 2 根 $\varnothing 14$ mm 的纵向受拉钢筋,其余梁底部配置 2 根 $\varnothing 10$ mm 纵向受拉钢筋,梁顶部均配

表 1 冲击试验工况
Table 1 Impact test conditions

结构配置	试验工况	落高/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	E_I/J
B1-S (静载)				
混凝土: C20 底部纵筋: 2 $\varnothing 10$ 箍筋: $\varnothing 6@200$	B1-3.13	0.5	3.13	489.85
	B1-5.42	1.5	5.42	1468.82
	B1-7.00	2.5	7.00	2450.00
	B1-9.39	4.5	9.39	4408.61
B2-S (静载)				
混凝土: C40 底部纵筋: 2 $\varnothing 10$ 箍筋: $\varnothing 6@200$	B2-3.13	0.5	3.13	489.85
	B2-4.25	1.5	5.42	1468.82
	B2-7.00	2.5	7.00	2450.00
	B2-9.39	4.5	9.39	4408.61
B3-S (静载)				
混凝土: C40 底部纵筋: 2 $\varnothing 14$ 箍筋: $\varnothing 6@200$	B3-3.13	0.5	3.13	489.85
	B3-5.42	1.5	5.42	1468.82
	B3-9.39	4.5	9.39	4408.61
	B3-12.12	7.5	12.12	7344.72
B4-S (静载)				
混凝土: C40 底部纵筋: 2 $\varnothing 10$ 箍筋: $\varnothing 6@100$	B4-3.13	0.5	3.13	489.85
	B4-5.42	1.5	5.42	1468.82
	B4-7.00	2.5	7.00	2450.00
	B4-9.39	4.5	9.39	4408.61

置 2 根直径 6 mm 的纵向钢筋。B1~B3 梁配置箍筋为 $\phi 6@200$, B4 梁配置箍筋为 $\phi 6@100$ 。所有的钢筋均为 HRB400 钢筋, 图 1 给出了 HRB400 钢筋的拉伸试验结果, 钢筋试样的 3 次屈服强度分别为 401.3、395.7 和 402.8 MPa, 平均静态屈服强度 $f_y=400$ MPa。弹性模量 $E_s=200$ GPa, 断裂应变 $\epsilon_u=0.28$ 。B1 梁混凝土强度等级为 C20, B2~B4 梁混凝土强度等级为 C40。图 2~3 给出了在标准养护室养护至 28 d、边长 150 mm 的立方体标准试件的应力-应变曲线, C20 混凝土实测立方体抗压强度 $f_c=21$ MPa (3 次测试结果分别为 20.5、20.8 和 21.1 MPa, 平均峰值应力为 21 MPa)、C40 混凝土实测立方体抗压强度 $f_c=42$ MPa (3 次测试结果为 40.8、41.6 和 42.2 MPa, 平均峰值应力为 42 MPa), C20、C40 混凝土立方体峰值应变 $\epsilon_0=0.002$ 。纵向钢筋保护层厚度为 10 mm。

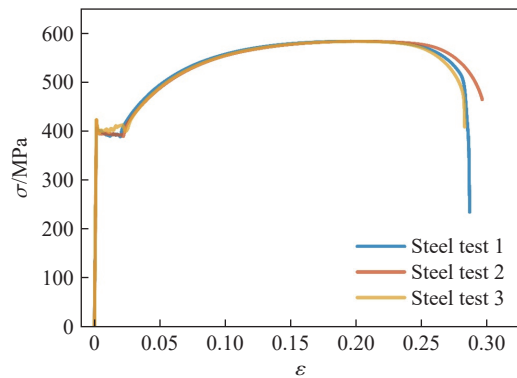


图 1 HRB400 钢筋应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves of HRB400 rebars

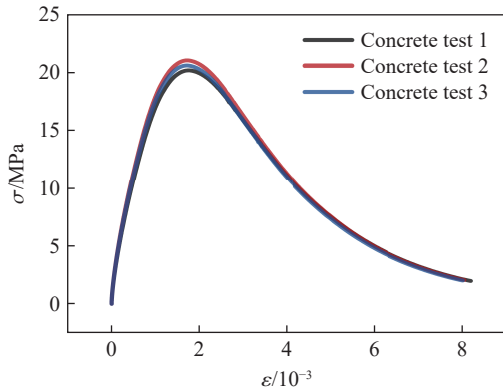


图 2 C20 混凝土应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of C20 concrete

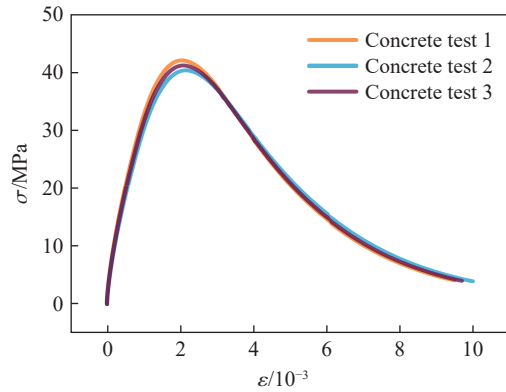


图 3 C40 混凝土应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of C40 concrete

1.2 试验冲击加载方案

试验利用山东省土木工程防灾减灾重点实验室的落锤冲击系统, 其试验装置, 如图 4 所示。试验落锤锤头直径为 100 mm 的平面锤头, 落锤总质量为 100 kg, 具体的试验工况见表 1。

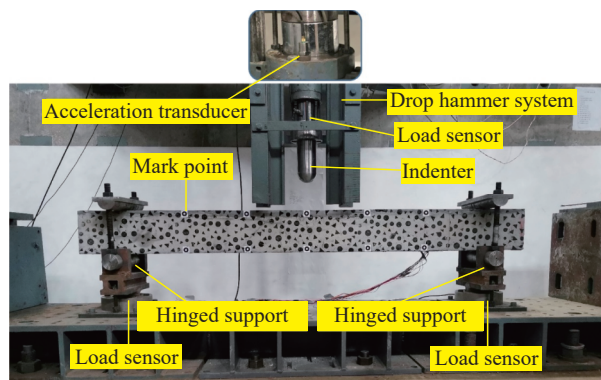


图 4 试验装置示意图
Fig. 4 Diagram of the test device

1.3 测试方案

为了准确采集钢筋混凝土梁受落锤冲击的动态响应过程, 综合采用动态采集仪、高速摄影、DIC 装置等设备, 测量相关数据, 包括: (1) 冲击力; (2) 支座反力; (3) 跨中位移及挠度分布; (4) 混凝土和钢筋应变; (5) 裂缝发展过程及最终破坏形态等。纵筋和箍筋应变片安装位置见图 5(a), L-T-1~L-T-3 为架立钢筋的应变片, L-B-1~L-B-3 为纵筋的应变片, T-1~T-3 为箍筋的应变片。试件的跨中位移和挠度分布以及混凝土的应变采用 DIC 系统配合高速摄影进行获取, 数字喷斑及位移观测标记点位置如图 5(b) 所示, 相邻标记点的轴向距离为 300 mm。利用高速摄影记录裂缝开展过程, 拍摄帧率为 5000 s^{-1} , 拍照记录梁的最终整体破坏形态和局部破坏情况。数据采集仪的采样频率为 10 kHz 。

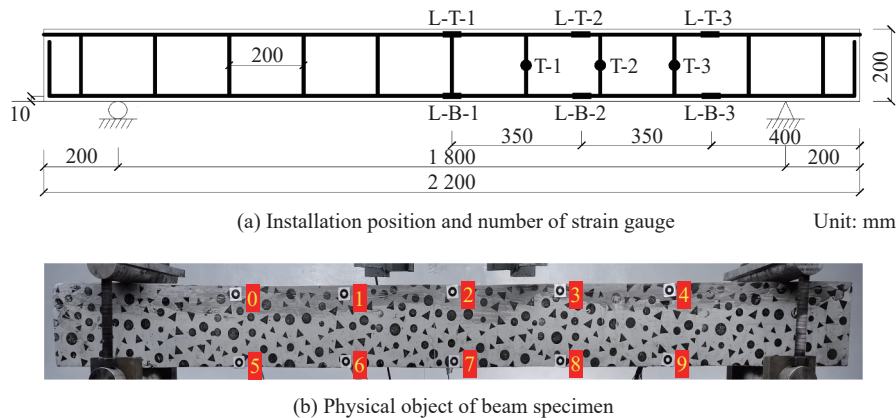


图 5 应变片安装与 DIC 喷斑

Fig. 5 Strain gauge installation and DIC spray spot

2 静载试验结果及分析

首先完成了 B1~B4 等 4 类不同配置的钢筋混凝土的静载试验, 获得了梁跨中位移时程以及跨中纵筋应变时程。图 6 是 B1 梁在静力加载下力-跨中位移曲线和力-跨中纵筋应变曲线, 可以看出梁的典型弹塑性变形过程。当荷载增大到 29.81 kN 时, 跨中位移 8.14 mm , 底部纵筋屈服, 屈服应变约为 0.0034 ; 随着变形增加, 梁进入强化阶段, 当荷载增加到约 36.96 kN 时, 跨中位移达到 35.86 mm 并发生破坏。试验表明, 该梁在静载下表现出适筋梁的变形能力和承载特性。通过静载试验, 可分析得到 B1~B4 梁的屈服承载力 F_y 、屈服时的位移 x_y 、跨中极限位移 x_u 和极限承载力 F_u 等参数, 见表 2。

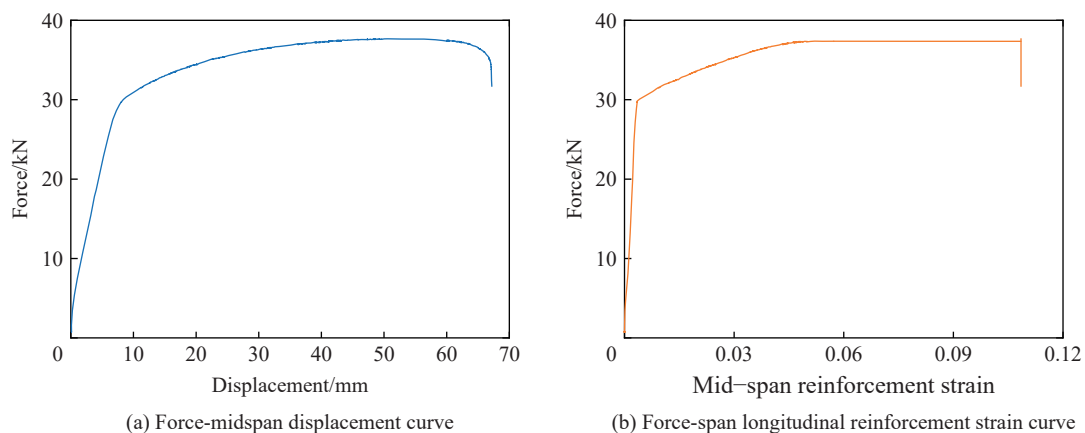


图 6 B1 梁的静载试验力-变形曲线

Fig. 6 Force-deformation curves of the B1 beam obtained in static load test

表 2 梁试件的静态承载力参数

Table 2 Static bearing capacity parameters of beam specimens

试件	x_y/mm	F_y/kN	x_y/mm	F_y/kN
B1-S	8.14	29.81	35.86	36.96
B2-S	6.97	29.76	31.75	38.48
B3-S	8.82	49.57	39.86	55.08
B4-S	6.25	31.96	31.64	39.03

3 冲击试验结果与分析

共进行了 4 组 16 根梁试件的落锤冲击试验, 主要试验结果见表 3, 包括冲击速度、冲击力峰值 p_{Imax} 、支座反力峰值 p_{Rmax} 、位移峰值 D_{max} 和残余位移 D_r 。基于测得的试验数据, 对梁的动力响应规律、破坏模式及转化进行分析。

表 3 落锤冲击试验结果

Table 3 Drop hammer impact test results

试件	混凝土强度	冲击速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	冲击动能 E_i/kJ	冲击力峰值 $p_{\text{Imax}}/\text{kN}$	支座反力峰值 $p_{\text{Rmax}}/\text{kN}$	位移峰值 D_{max}/mm	残余位移 D_r/mm
B1-3.13	C20	3.13	0.49	168.10	101.48	13.60	3.71
B1-5.42	C20	5.42	1.47	268.64	163.90	37.10	19.96
B1-7.00	C20	7.00	2.45	415.29	177.75	70.97	58.21
B1-9.39	C20	9.39	4.41	627.57	184.76	垮塌	—
B2-3.13	C40	3.13	0.49	291.69	122.85	12.21	3.83
B2-5.42	C40	5.42	1.47	616.70	231.68	27.33	15.77
B2-7.00	C40	7.00	2.45	726.94	238.19	50.07	34.55
B2-9.39	C40	9.39	4.41	868.77	147.89	81.90	64.45
B3-3.13	C40	3.13	0.49	257.75	124.76	10.40	0.38
B3-5.42	C40	5.42	1.47	570.26	293.24	21.69	9.56
B3-9.39	C40	9.39	4.41	1049.27	352.62	63.83	42.63
B3-12.12	C40	12.12	7.34	1285.89	219.83	垮塌	—
B4-3.13	C40	3.13	0.49	268.00	142.44	12.62	4.19
B4-5.42	C40	5.42	1.47	627.47	230.03	29.16	18.68
B4-7.00	C40	7.00	2.45	744.12	285.57	47.78	31.38
B4-9.39	C40	9.39	4.41	903.26	290.69	82.43	64.33

3.1 冲击力、支座反力

B1~B4 梁在平面锤头冲击下的冲击力时程曲线和支座反力时程曲线如图 7~8 所示。从图 7 可以看出, 冲击力时程曲线由持时短、峰值较大的脉冲段和持时长、峰值小的平台段组成, 配置相同的梁随冲击速度提高, 其脉冲段的持续时间接近, 但峰值明显增大。落锤冲击速度相同时, 冲击力峰值随混凝土强度、纵向钢筋配筋率的增加而增大, 说明结构变形刚度对冲击力影响显著。从图 7~8 梁的支座反力可以看出, 支座反力的响应时间明显迟于冲击力, 两者之间的时间差就是剪切波的传播时间, 在冲击力激发时刻为计时起点, 可以看出支座反力开始响应的时刻约为 0.4 ms。通常支座反力的峰值随冲击速度的提高而增大, 但梁在较高冲击速度下发生冲击破坏时, 支座反力会减小, 如 B3 梁在 12.12 m/s 的冲击速度下, 发生冲切破坏, 冲切破坏属于脆性破坏, 冲击力不能向两侧支座传播, 导致支座反力减小。

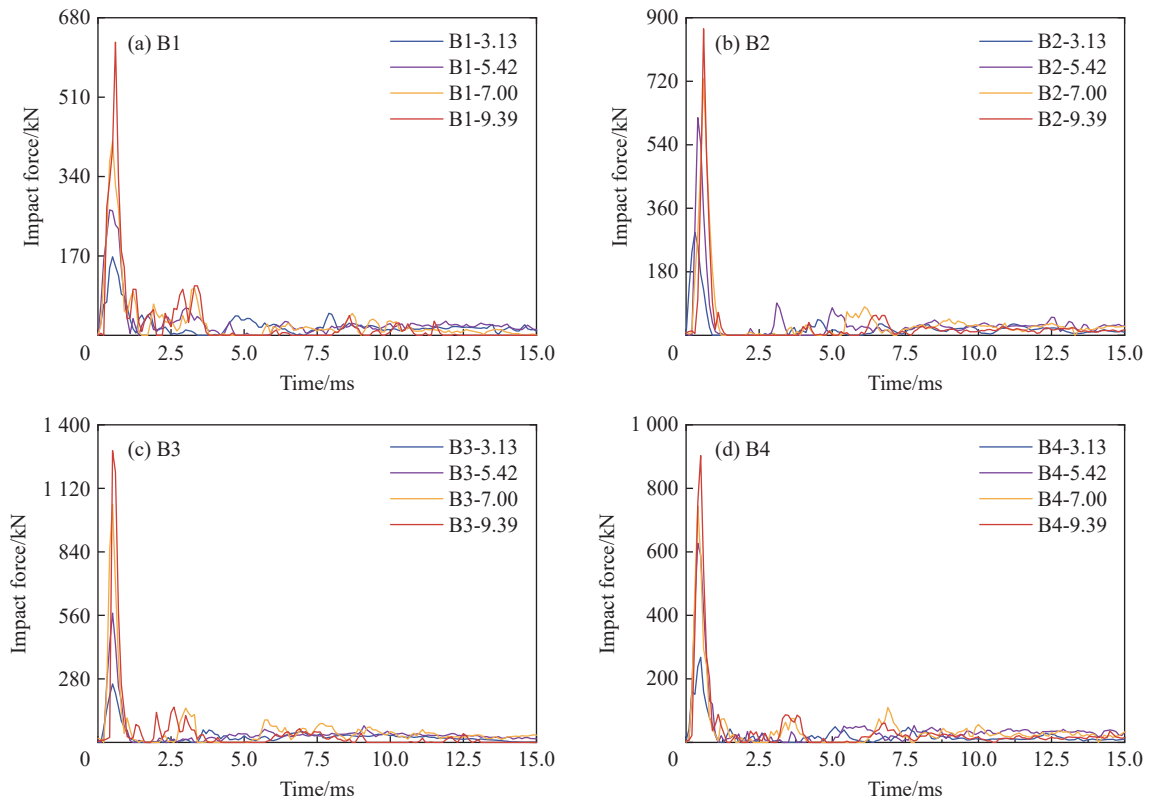


图 7 B1~B4 梁冲击力时程曲线

Fig. 7 Time history curves of impact force of beams B1-B4

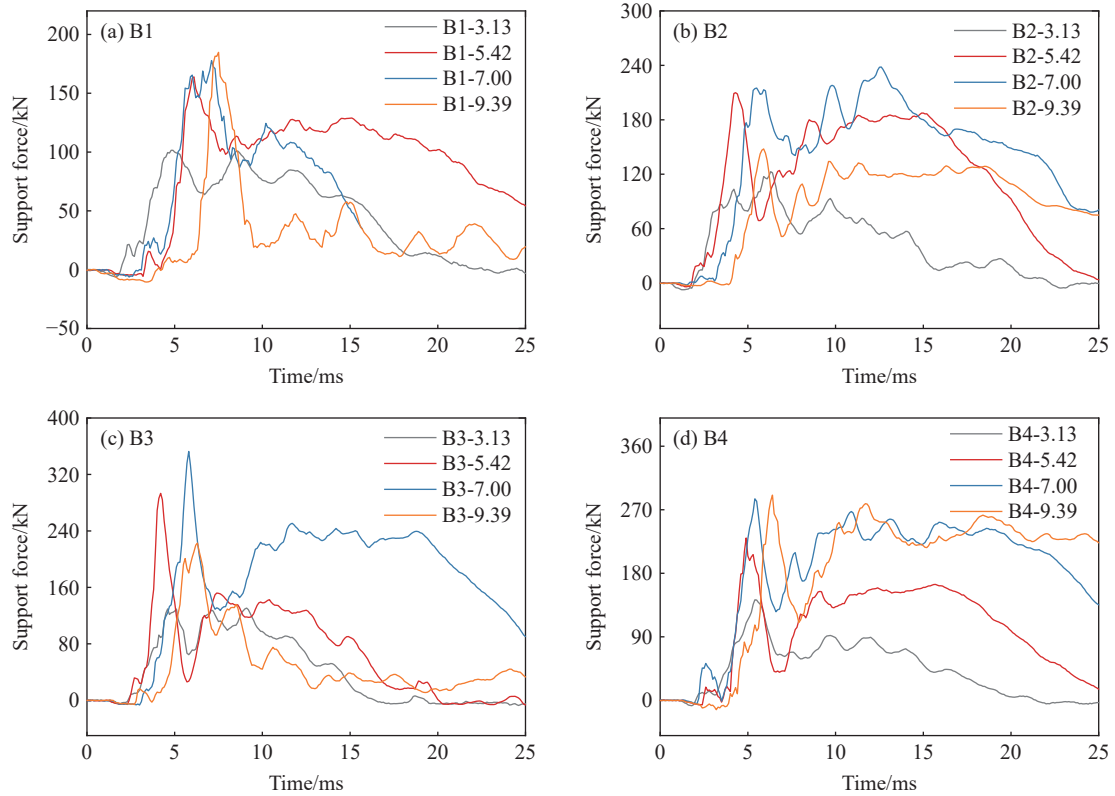


图 8 B1~B4 梁支座反力时程曲线

Fig. 8 Time history curves of bearing reaction of beams B1-B4

图 9 所示为冲击力峰值与冲击速度的关系, 可以看出冲击力峰值随着冲击速度的增加而增大, 同时受混凝土强度、纵向钢筋配筋率、配箍率的影响。B1 梁为 C20 混凝土梁, 其冲击力峰值明显小于相同冲击速度下的 C40 混凝土 B2 梁的冲击力峰值, 说明冲击力受混凝土强度的影响显著, 混凝土强度直接影响撞击力的局部接触刚度。B2 梁和 B3 梁在相同冲击条件下, B3 梁的冲击力峰值更大, 主要原因是其底部配置有 $2\phi 14$ mm 纵向受拉钢筋, B3 梁的整体变形刚度大造成结构与锤头之间的接触力大, 说明结构的整体刚度会影响冲击局部效应, 但并不显著。B4 梁同 B2 梁相比较, 其配箍率增大, 但相同冲击速度下的冲击力峰值非常接近, 反映出配箍率对冲击力影响较小。因此, 冲击体-梁的局部接触力主要取决于局部接触刚度, 结构整体刚度的影响较小, 理论分析可以忽略整体刚度的影响。

3.2 跨中位移

图 10 为 B1~B4 梁分别在不同冲击作用下的跨中位移时程曲线, 可以看出, 跨中位移峰值以及残余位移随冲击速度的提高而增大。其中试件 B1-9.39 和 B3-12.12 破坏严重, 发生冲切断裂破坏。梁的跨中位移峰值 D_{max} 、残余位移 D_r 见表 3。图 11 为相同冲击速度下不同配置梁的跨中位移时程曲线, 可以看出, 梁配置不同, 结构的位移响应明显不同。B1 梁的跨中位移最大, B2 梁和 B4 梁的跨中位移接近,

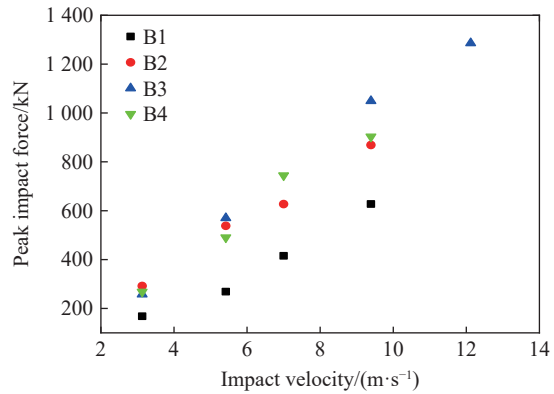


图 9 冲击力峰值与冲击速度的关系

Fig. 9 Relationship between impact force peak and impact velocity

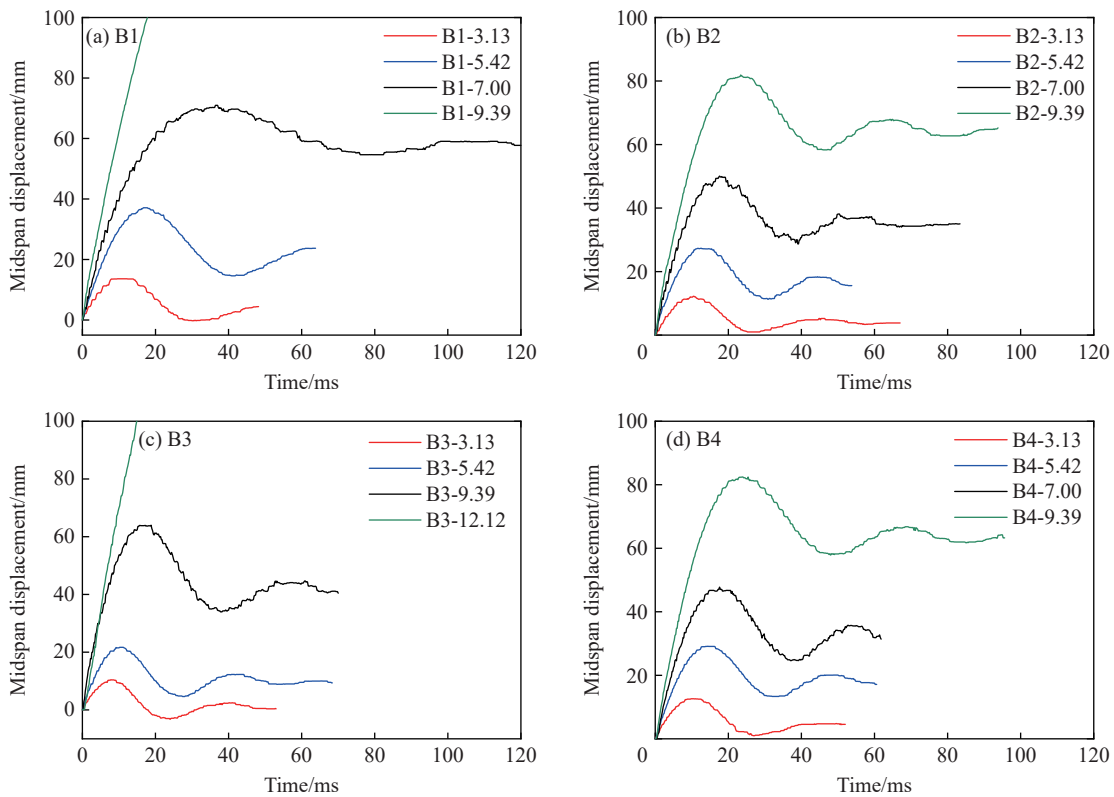


图 10 钢筋混凝土梁在不同冲击速度下的跨中位移时程曲线

Fig. 10 Time history curves of mid-span displacement of reinforced concrete beams under different impact velocities

B3 梁的跨中位移最小。综合分析表明: 底部纵筋配筋率越大以及混凝土强度越高, 结构整体刚度越大, 在相同冲击条件下, 梁的位移响应越小, 而配箍率主要提高抗剪能力, 对整体刚度影响不大, 对结构整体位移的影响较小。

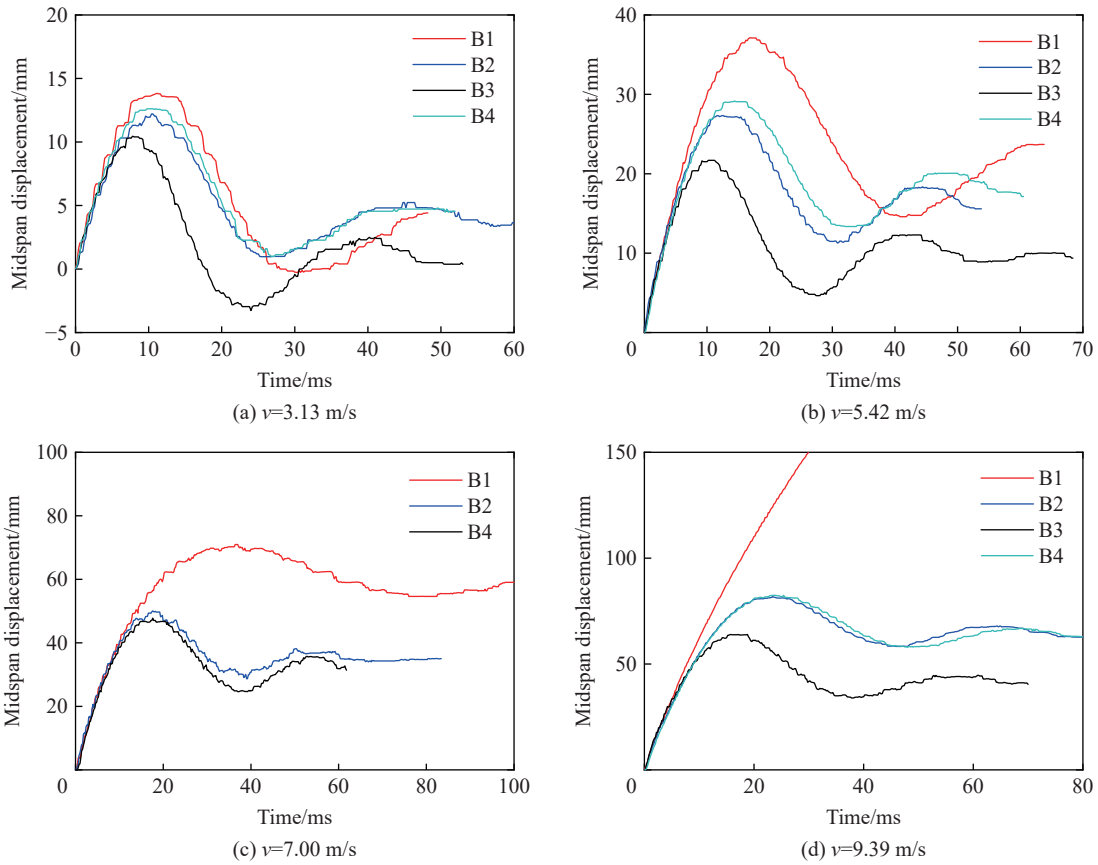


图 11 相同冲击速度不同配置梁的跨中位移时程曲线

Fig. 11 Time history curves of mid-span displacement of beams with different configurations at the same impact velocity

梁冲击发生弯曲破坏时, 跨中位移响应与冲击动能和梁的极限静承载力密切相关^[24-25]。图 12~13 给出了位移峰值 D_{max} 和残余位移 D_r 与 E_I/F_u 的关系, 其中 E_I 为冲击动能, F_u 为极限静承载力。可以看出弯曲破坏时, D_{max} 与 E_I/F_u 以及 D_r 与 E_I/F_u 之间存在较好的线性关系, 图 12 中线性相关系数 $R=0.99728$, 图 13 中线性相关系数 $R=0.99538$ 。B1-7.00 梁由于发生剪切破坏, 不属于弯曲破坏, 剔除后可分

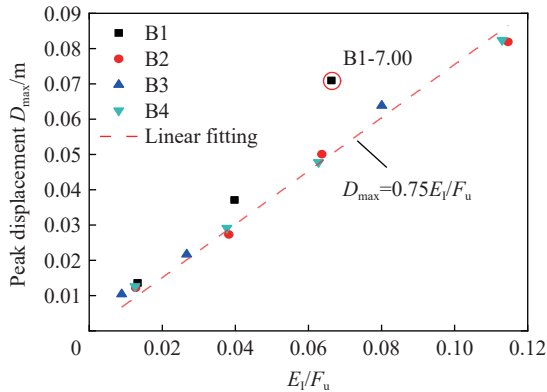


图 12 D_{max} 与 E_I/F_u 之间的线性关系

Fig. 12 Linear relationship between D_{max} and E_I/F_u

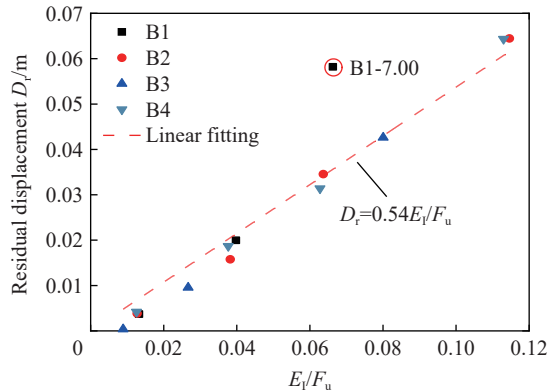


图 13 D_r 与 E_I/F_u 之间的线性关系

Fig. 13 Linear relationship between D_r and E_I/F_u

析得到位移峰值和残余位移与 E_1/F_u 的线性关系式分别为:

$$D_{\max} = 0.75 \frac{E_1}{F_u} \quad (1)$$

$$D_r = 0.54 \frac{E_1}{F_u} \quad (2)$$

3.3 钢筋应变

钢筋的应变能够反映梁的整体响应阶段, 图 14 所示为 B3 梁底部纵筋应变的 3 处应变曲线, L-B-1~L-B-3 均为拉应变, 且纵筋应变越靠近跨中其值越大, 挠度达到峰值的时间约 10 ms, 可以看出梁冲击并发生弯曲整体响应时, 底部钢筋的应变与位移响应规律基本一致。

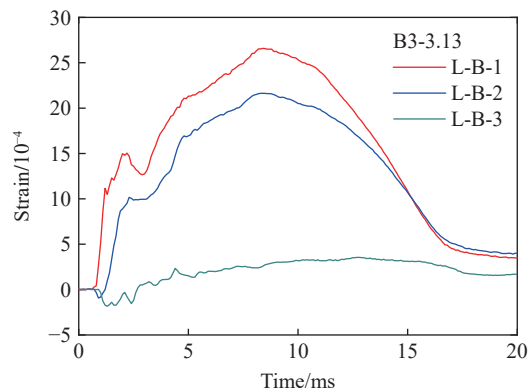


图 14 钢筋应变时程曲线

Fig. 14 Steel strain time history curves

3.4 混凝土应变

利用 DIC 系统通过对高速摄影拍摄的喷涂在梁侧面的散斑的识别, 可以分析得到混凝土应变分布和变化特点。图 15 为梁 B1 受落锤 5.42 m/s 冲击时的表面应变分布, 可以看出冲击开始梁底出现局部拉应力区, 并不断向两侧扩展, 最终梁净跨内底部区域均成为拉应力区, 表明 B1-5.42 梁为弯曲变形。

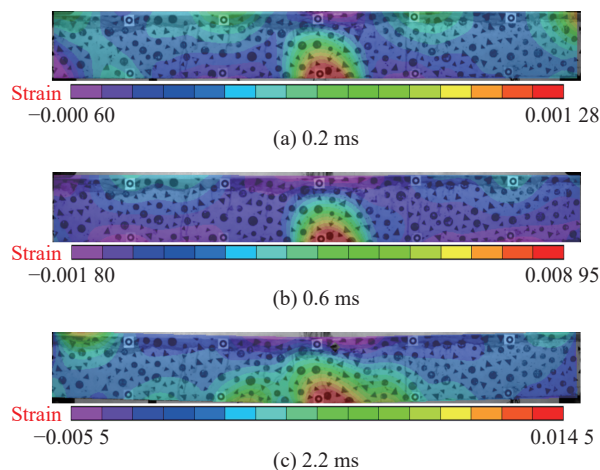


图 15 冲击过程中 B1-5.42 混凝土轴向应变分布

Fig. 15 Axial strain distribution in concrete of beam B1-5.42 during impact process

B1-9.39 梁的混凝土轴向应变分布如图 16 所示。同样可以看到初始时刻梁底局部受拉应力作用, 并向两侧扩展, 同时梁顶部区域撞击两侧形成斜裂缝, 并成近似 45° 向下延伸到梁底形成贯穿裂缝, 造成冲切塞块, 约 3.6 ms 时混凝土冲切塞块形成, 而梁底部的受拉区仅扩展冲切塞块内, 表明梁发生了冲切破坏。

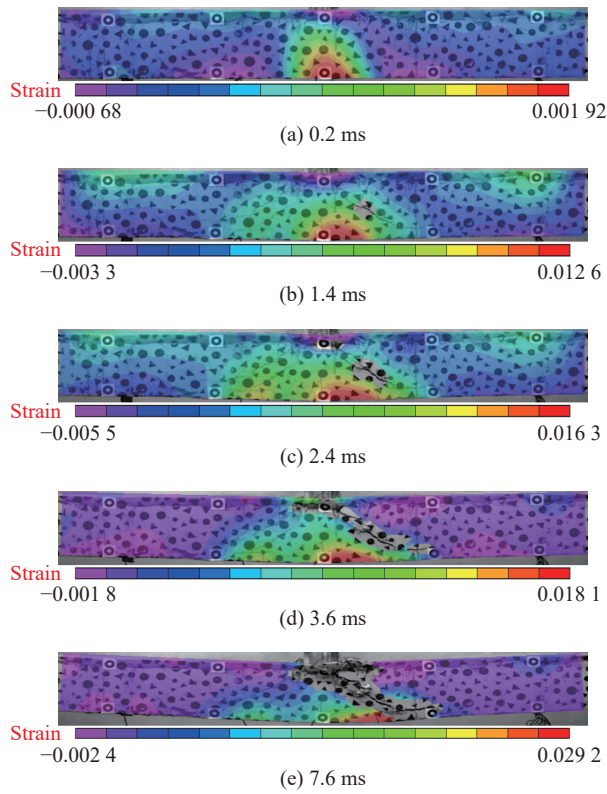


图 16 冲击过程中 B1-9.39 混凝土轴向应变分布

Fig. 16 Axial strain distribution in concrete of beam B1-9.39 during impact process

4 钢筋混凝土梁破坏模式及转化

4.1 裂缝开展过程

通过高速摄影获得了钢筋混凝土梁受冲击时裂缝的典型发展过程, 有助于判定结构的冲击破坏模式。

4.1.1 弯剪破坏

图 17 为 B4-9.93 的裂缝开展过程。冲击后约 0.6 ms 时, 冲击区域率先形成近似八字形剪切斜裂缝, 并快速扩展到梁底, 形成剪切破坏区; 2.0 ms 时, 跨中截面出现垂直裂缝; 7.0 ms 时, 剪切破坏区内不断增加新的弯曲斜裂缝。斜裂缝和垂直裂缝出现的顺序表明结构受冲击后, 先达到结构的极限剪切承载力, 剪切裂缝首先开始发育, 后达到试件的极限弯曲承载力, 弯曲裂缝开始发育, 即剪切效应在前, 弯曲效应在后。这是因为撞击初期接触区域即产生了较大的剪力, 瞬时形成剪切斜裂缝。锤头-梁紧密接触后一并向下运动, 至 25.0 ms 梁的挠度达到最大值, 期间斜裂缝和垂直裂缝不断开展变宽, 底部受拉钢筋变形较大, 并且梁顶撞击区域混凝土受压破坏剥落迹象, 表明钢筋混凝土梁发生的是弯剪破坏模式。

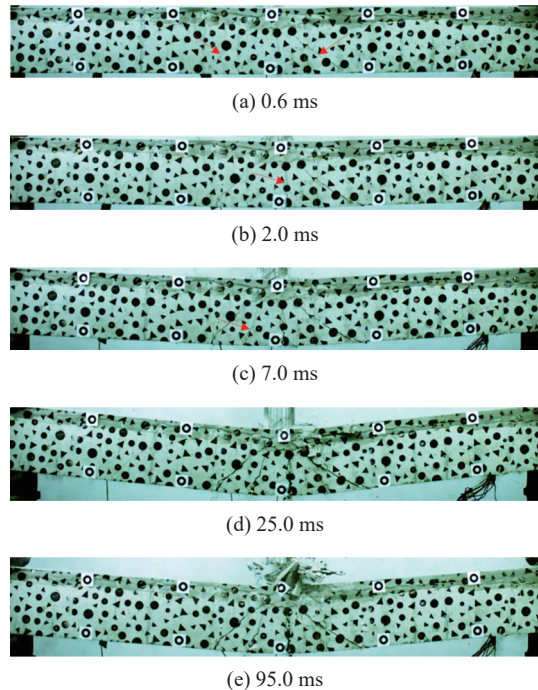


图 17 弯剪破坏梁 B4-9.39 裂缝发展过程

Fig. 17 Fracture development process in beam B4-9.39

4.1.2 剪切破坏

图 18 为试件 B1-7.00 的裂缝发展过程。冲击开始约 0.4 ms, 梁-锤接触区附近的梁腹中首先出现剪切斜裂缝, 随之不断扩展, 在跨中截面所在区域的梁腹产生 2 条对称的斜裂缝; 3.4 ms 时, 右边一侧的主斜裂缝在后续的撞击过程中继续扩展, 扩展到整个梁高范围, 形成贯穿斜裂缝, 梁顶部的梁锤接触区开始压碎; 17.0 ms 时, 梁发生整体剪切破坏, 锤头撞击点处的混凝土破裂飞散, 梁锤保持一致向下运动, 40.8 ms 时, 跨中挠度发展到最大值, 此后进入回弹阶段。

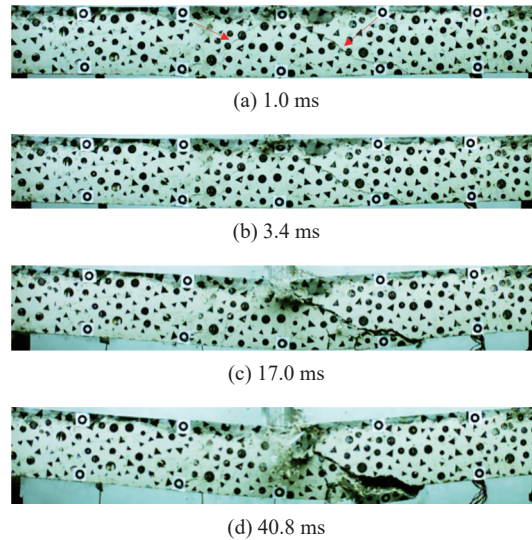


图 18 剪切破坏梁 B1-7.00 裂缝发展过程

Fig. 18 Fracture development process in beam B1-7.00

4.1.3 冲切破坏

图 19 为试件 B1-9.39 的裂缝发展过程。冲击开始约 0.8 ms, 跨中出现由梁腹开展的对称斜裂缝; 3.0 ms 时斜裂缝明显发育; 7.2 ms 时梁-锤接触区混凝土被压碎; 17.0 ms 时混凝土保护层开始剥离; 27.6 ms 时受压区混凝土破坏严重, 剪切塞剥离; 69.6 ms 时梁断裂触底。冲击过程初期跨中底部形成细微的垂直裂缝, 后期几乎没有发展。

4.2 破坏模式

4.2.1 B1 梁在不同冲击速度下的破坏模式

B1 梁在不同加载条件下的破坏形态分别如图 20 所示。

(1) 准静态加载时, 跨中及附近形成 6 条间隔分布的垂直裂缝和斜裂缝, 主裂缝为垂直裂缝, 斜裂缝开展不充分, 表明适筋梁发生弯曲破坏。

(2) 3.13 m/s 冲击速度下, 裂缝最终分布形态与准静态近似结果类似, 但以垂直裂缝为主, 且裂缝沿梁跨均匀分布, 说明梁发生弯曲破坏。

(3) 5.42 m/s 冲击速度下, 梁跨中除撞击区域底部出现垂直裂缝外, 还有 2 条与梁底面夹角为 45° 的贯穿斜裂缝, 梁 1/4 跨出现近似对称的斜裂缝, 属于弯剪破坏模式。

(4) 7.00 m/s 冲击速度下, 裂缝集中于撞击点底部区域, 梁左侧斜裂缝开展不明显, 右侧形成贯穿的主斜裂缝, 裂缝与梁底面约呈 45° , 其余区域没有明显裂缝, 表明梁发生剪切破坏模式。

(5) 9.39 m/s 冲击速度下, 沿梁跨垂直裂缝和斜裂缝均有分布, 但裂缝发育较浅, 而冲击区域底部破坏区域更加集中, 并形成冲切塞块, 塞块两侧边界与梁底面的夹角大于 45° , 表明发生冲切破坏模式。

4.2.2 B2 梁在不同冲击速度下的破坏模式

B2 梁在不同加载条件下的破坏形态分别如图 21 所示。

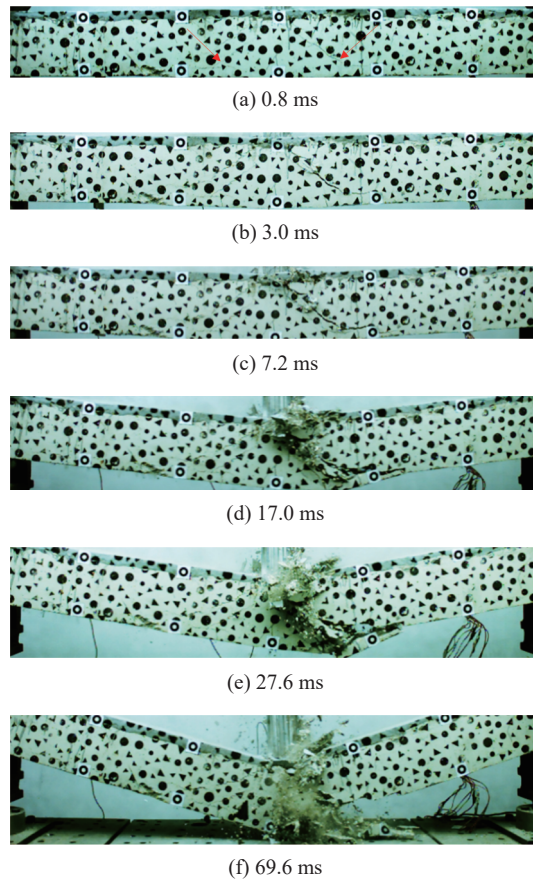


图 19 冲切破坏梁 B1-9.39 裂缝发展过程

Fig. 19 Fracture development process in beam B1-9.39

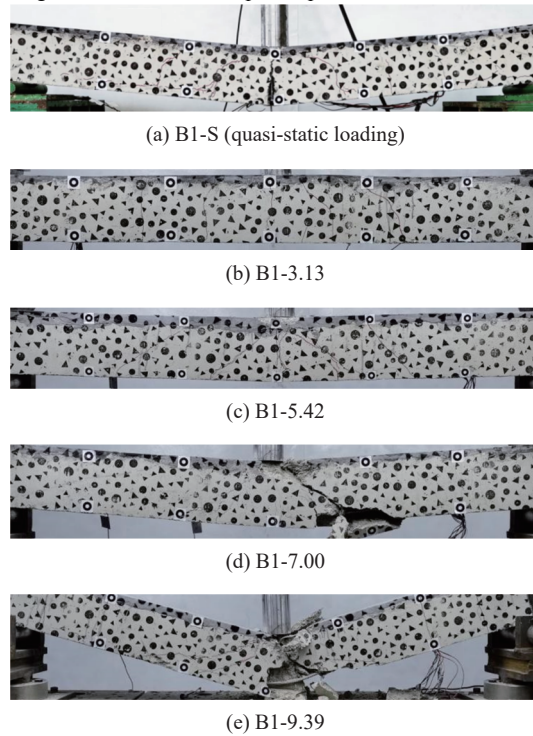


图 20 B1 梁在不同冲击速度下的最终破坏模式

Fig. 20 Final failure modes of B1 beam under different impact velocities

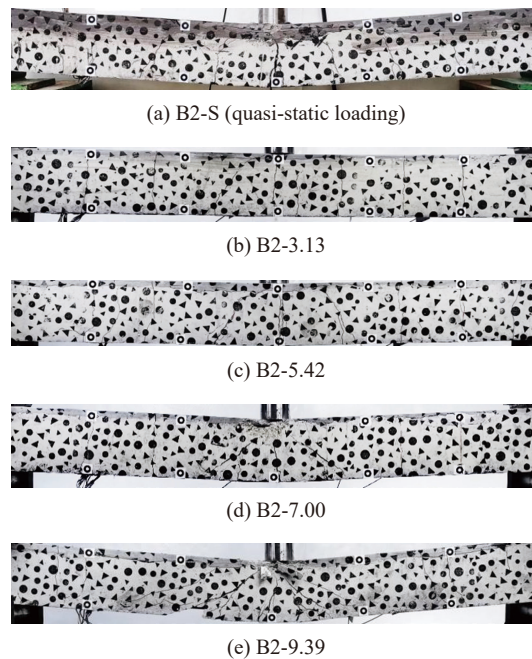


图 21 B2 梁在不同冲击速度下的最终破坏模式

Fig. 21 Final failure modes of B2 beam under different impact velocities

(1) 准静态加载时,沿梁跨形成 7 条近似垂直的裂缝,裂缝分布左右对称,为典型的适筋梁弯曲破坏。

(2) 3.13 m/s 冲击速度下,裂缝发展形态与准静态加载时的相似,但接触区域下方的裂纹数量比静态加载时多,梁左侧有一条斜裂缝,斜裂缝与梁底面的夹角大于 45° ,属于弯曲破坏模式。

(3) 5.42 m/s 冲击速度下,梁底部出现间隔分布的裂缝,主裂缝以垂直裂缝为主,接触区域下方的斜裂缝与梁底面夹角大于 45° ,属于弯曲破坏模式。

(4) 7.00 m/s 冲击速度下,形成的垂直裂缝和斜裂缝主要集中分布在撞击点底部区域,在梁左右 1/4 跨位置有 2 条对称的垂直裂缝,表明梁属于弯剪破坏模式。

(5) 9.39 m/s 冲击速度下,裂缝更加向跨中集中,而主裂缝为斜裂缝,梁左侧斜裂缝开展明显,剪切塞有剥离趋势,表现为剪切破坏特征,表明结构发生剪切破坏。

4.2.3 B3 梁在不同冲击速度下的破坏模式

B3 梁在不同加载条件下的破坏形态分别如图 22 所示。

(1) 准静态加载时,跨中底部垂直裂缝和斜裂缝密集分布,同时受压区混凝土发生压缩破碎,表明是弯剪破坏。

(2) 3.13 m/s 冲击速度下,在跨中以及离两支座 1/4 跨位置处,形成贯穿垂直裂缝,在接触区域下方有 2 条对称的斜裂缝,但斜裂缝较浅,发育不充分,属于程度较轻的弯剪破坏。

(3) 5.42 m/s 冲击速度下,跨中区域垂直裂缝和斜裂缝发育明显,接触区域垂直裂缝和斜裂缝均贯穿梁侧面,梁支座位置附近垂直裂缝和斜裂缝均有分布,意味着弯曲和剪切共同作用,表现出弯剪破坏模式。

(4) 9.39 m/s 冲击速度下,裂缝进一步向跨中集中,形成细密的斜裂缝和垂直裂缝,且底部裂缝发展充分,造成底部混凝土掉落,属于弯剪破坏。

(5) 12.12 m/s 冲击速度下,梁跨中出现贯穿塞块,结构发生冲切破坏。

4.2.4 B4 梁在不同冲击速度下的破坏模式

B4 梁在不同加载条件下的破坏形态分别如图 23 所示。

(1) 准静态加载时,以沿梁跨分布的垂直裂缝为主,裂缝沿梁跨近似均匀分布且跨中裂缝分布范围较大,为弯曲破坏。

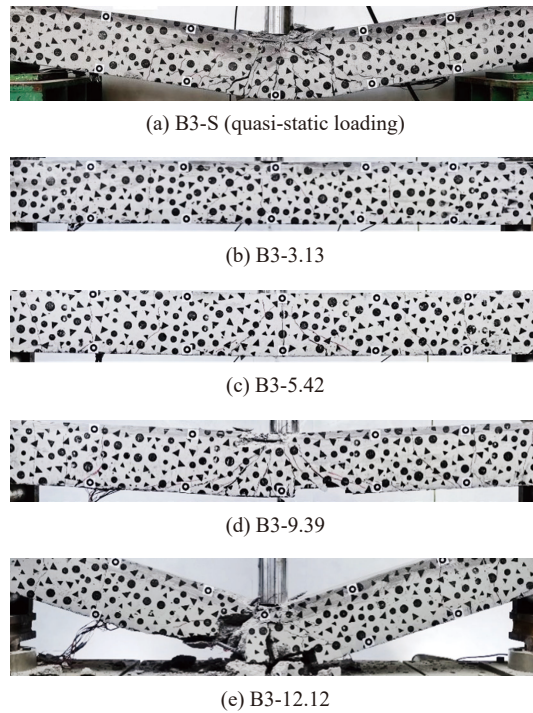


图 22 B3 梁在不同冲击速度下的最终破坏模式

Fig. 22 Final failure modes of B3 beam under different impact velocities

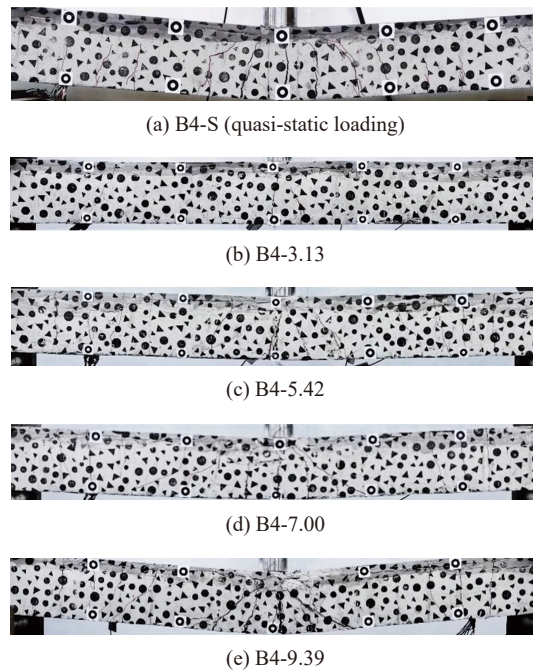


图 23 B4 梁不同冲击速度下的最终破坏模式

Fig. 23 Final failure modes of B4 beam under different impact velocities

(2) 3.13 m/s 冲击速度下, 梁跨中形成一条贯穿垂直裂缝, 另一条较短的斜裂缝发育不充分, 为弯曲破坏。

(3) 5.42 m/s 冲击速度下, 主裂缝以垂直裂缝为主, 并沿梁跨均匀分布, 在梁接触区域右侧形成两条斜裂缝, 但斜裂缝与梁底面夹角很大, 垂直裂缝向上扩展至梁顶部区域, 为弯曲破坏。

(4) 7.00 和 9.39 m/s 冲击速度下, 跨中形成较多的斜裂缝和垂直裂缝, 其中对称斜裂缝之间的区域内是垂直裂缝, 表现出弯剪破坏形式。9.39 m/s 的冲击加载下, 裂缝更加向跨中集中, 斜裂缝和垂直裂缝宽度加大。

4.3 破坏模式转化分析

根据结构冲击后的极限破坏状态的裂缝分布规律和破坏特征, 可以判定出 4 种不同的冲击破坏模式。

(1) 梁底部以分布的垂直裂纹为主, 为弯曲大变形或弯曲破坏模式;

(2) 裂缝趋向集中于撞击区底部, 形成密集分布的斜裂缝和垂直裂缝, 斜裂缝与梁底面夹角约 45° , 接触区域下方的斜裂缝和垂直裂缝发育较为明显, 在梁 1/4 跨或梁端附近有对称的垂直裂缝分布, 为弯剪破坏模式。

(3) 梁底裂缝更加向撞击点区域集中, 主裂缝为斜裂缝, 斜裂缝与梁底面的夹角约 45° , 斜裂缝发育明显, 有剥离趋势但未形成冲切塞块, 剪切起控制作用, 为剪切破坏模式。

(4) 出现冲切塞块, 塞块侧边与梁底面夹角大于 45° , 为冲切破坏模式。

依据上述破坏模式判别标准, 可对试验梁构件的破坏模式进行判断, 并分析破坏模式转化规律, 见表 4。

表 4 梁的冲击破坏模式及转化规律

Table 4 Impact failure modes and transformation laws of beams

试件编号	加载速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	破坏模式	破坏模式的转化
B1-S	静载	弯曲破坏	
B1-3.13	3.13	弯曲破坏	
B1-5.42	5.42	弯剪破坏	弯曲破坏→弯剪破坏→剪切破坏→冲切破坏
B1-7.00	7.00	剪切破坏	
B1-9.39	9.39	冲切破坏	
B2-S	静载	弯曲破坏	
B2-3.13	3.13	弯曲破坏	
B2-5.42	5.42	弯曲破坏	弯曲破坏→弯剪破坏→剪切破坏
B2-7.00	7.00	弯剪破坏	
B2-9.39	9.39	剪切破坏	
B3-S	静载	剪弯破坏	
B3-3.13	3.13	弯曲破坏	
B3-5.42	5.42	弯剪破坏	弯曲破坏→弯剪破坏→剪切破坏→冲切破坏
B3-9.39	9.39	弯剪破坏	
B3-12.12	12.12	冲切破坏	
B4-S	静载	弯曲破坏	
B4-3.13	3.13	弯曲破坏	
B4-5.42	5.42	弯曲破坏	弯曲破坏→弯剪破坏
B4-7.00	7.00	弯曲破坏	
B4-9.39	9.39	弯剪破坏	

综合以上的分析, 对 B1~ B4 梁破坏模式转化进行汇总:

(1) 冲击速度对混凝土梁破坏模式转变的影响。从表 4 中可以看出, 随着冲击速度的增加, 钢筋和混凝土的应变率效应^[26-29]愈发明显地反映到结构上, 会使钢筋混凝土结构的性能发生改变以及使钢筋混凝土梁的动态承载能力增加。由于在动态加载条件下钢筋和混凝土材料显著增加, 钢筋混凝土梁的

轴向和抗弯承载能力有明显提高,因此会引起冲击破坏模式的转变,逐步由弯曲破坏向弯剪破坏、剪切破坏和冲切破坏模式转化。

(2) 不同结构配置对混凝土梁破坏模式转变的影响。从表 4 同样可看出,冲击速度相同时,结构的配置不同,结构的破坏模式同样会发生转化。

① 在静力加载下 B1、B2 和 B4 梁发生弯曲破坏, B3 梁发生弯剪破坏。这是由于 B3 梁的受拉纵筋为 $2\phi 14$ mm, B3 梁抗弯承载能力提高,在荷载作用下同时达到梁的抗弯承载力极限和抗剪承载力极限。

② 在 3.13 m/s 冲击速度下, B1、B2 和 B4 梁发生弯曲破坏, B3 梁发生弯剪破坏。在较低速度冲击作用下,材料的应变率效应不明显,梁的抗弯承载能力增强不明显,致使 B1、B2 和 B4 梁在 3.13 m/s 冲击荷载作用下达到抗弯承载力极限。B3 梁在 3.13 m/s 冲击荷载作用下只发生较轻程度的弯剪破坏。

③ 在 5.42 m/s 冲击速度下, B2 和 B4 梁发生弯曲破坏, B1、B3 梁发生弯剪破坏。B1 梁采用的是 C20 混凝土,其抗剪强度小于 C40 混凝土的,由于材料的应变率效应, B1 梁在 3.13 m/s 冲击荷载作用下其抗弯承载力增强,同时达到梁的抗弯承载力极限和抗剪承载力极限。

④ 在 7.00 m/s 冲击速度下, B1 梁发生剪切破坏、B2 梁发生弯剪破坏、B4 梁发生弯曲破坏。在 7.00 m/s 冲击荷载作用下,材料的应变率效应较明显,梁的抗弯承载能力增强, C20 混凝土抗剪强度小于 C40 混凝土, B1 梁达到抗剪承载力极限,发生剪切破坏; B2 梁采用 C40 混凝土,同时达到梁的抗弯承载力极限和抗剪承载力极限,发生弯剪破坏; B4 梁采用 C40 混凝土、箍筋配置为 $\phi 6@100$,抗剪能力增强,发生弯曲破坏。

⑤ 在 9.39 m/s 冲击速度下, B1 梁发生冲切破坏、B2 梁发生剪切破坏、B3 和 B4 梁发生弯剪破坏。落锤以较高速度冲击梁时,梁与落锤接触区域吸收能量增加,导致局部响应开始时形成较多微裂缝,削弱剪切波向支撑处传递能力,落锤的动能进一步被梁锤接触区域吸收,使得 B1~B4 梁发生更严重的破坏。

5 结 论

开展了不同配置、不同速度的钢筋混凝土梁落锤冲击试验,综合测量获得了冲击力、支座反力、钢筋与混凝土应变和结构变形等参量,重点分析了不同混凝土强度、不同纵筋/箍筋配置以及不同冲击速度对钢筋混凝土梁的动力响应以及破坏模式的影响规律,得到以下结论。

(1) 低速冲击下钢筋混凝土梁的位移峰值和残余位移随冲击速度的提高而增大,且与冲击动能与极限静承载力之比均存在较好的线性关系;混凝土强度越高、纵筋配筋率越高,相同冲击条件下梁所受的撞击力峰值越大,但结构的整体位移响应越小,且配箍率对整体位移响应的影响越小。

(2) 钢筋混凝土梁在静载和冲击动载作用下的破坏模式明显不同,冲击作用下梁裂缝向撞击点区域集中,且斜裂缝先于垂直裂缝出现,表明撞击时剪切效应在前,弯曲效应在后。

(3) 钢筋混凝土梁试件在静载作用下均发生弯曲破坏,但落锤冲击作用下,钢筋混凝土梁存在着弯曲破坏、弯剪破坏、剪切破坏和冲切破坏 4 类破坏模式。

(4) 相同结构配置条件下,随冲击速度的不断提高,钢筋混凝土梁逐渐由弯曲破坏模式向弯剪破坏、剪切破坏、冲切破坏转化。当冲击速度相同,提高混凝土强度和配箍率或降低纵向钢筋配筋率,梁的破坏模式同样会发生变化,逐步由冲切、剪切破坏模式向弯剪破坏和弯曲破坏模式转化。结构的冲击破坏模式及其转化规律能够为结构的抗撞设计与防护提供重要参考。

参考文献:

- [1] 王明洋, 杨晓宁, 卢浩, 等. 事故性冲击钢筋混凝土结构的计算原理与设计方法 [J]. *防护工程*, 2020, 42(4): 1-14. DOI: CNKI:SUN:FHGC.0.2020-04-001.
WANG M Y, YANG X N, LU H, et al. Computation and design of accidental impact on reinforced concrete structure [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(4): 1-14. DOI: CNKI:SUN:FHGC.0.2020-04-001.

- [2] HUGHES G, BEEBY A W. Investigation of the effect of impact loading on concrete beams [J]. *Structural Engineer*, 1982, 60(15): 45–52.
- [3] KISHI N, MIKAMI H, MATSUOKA K G. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(9): 955–968. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00149-X.
- [4] 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. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.09.022.
ZENG X, XU B. Experimental study on the impact-resistant behavior of RC beams without shear-resistant rebar [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(9): 63–73. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.09.022.
- [5] 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. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.02.010.
XU B, ZENG X. Experimental study on the behaviors of reinforced concrete beams under impact loadings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(2): 41–51, 61. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.02.010.
- [6] 霍静思, 胡开赢. RC 梁冲击破坏机理试验研究与残余变形预测方法探讨 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 44(1): 112–117. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2017.01.014.
HUO J S, HU K Y. Failure mechanism of RC beams under impact loading and discussion on prediction methods of residual deflection [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(1): 112–117. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2017.01.014.
- [7] COTSOVOS D M, STATHOPOULOS N D, ZERIS C A. Behavior of RC beams subjected to high rates of concentrated loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(12): 1839–1851. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:12(1839).
- [8] COTSOVOS D M. A simplified approach for assessing the load-carrying capacity of reinforced concrete beams under concentrated load applied at high rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 907–917. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.01.005.
- [9] 刘飞, 罗旗帜, 蒋志刚. 低速冲击下 RC 梁的动态响应和破坏机理研究 [J]. *工程力学*, 2015(5): 155–161. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1089.
LIU F, LUO Q Z, JIANG Z G. Dynamic responses and failure mechanism of RC beams to low velocity impact [J]. *Engineering Mechanics*, 2015(5): 155–161. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1089.
- [10] 赵武超, 钱江. 冲击荷载下钢筋混凝土梁局部响应特征研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2019, 46(3): 25–32. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.03.004.
ZHAO W C, QIAN J. Study on local response characteristics of RC beams under impact loading [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(3): 25–32. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.03.004.
- [11] 赵武超, 钱江, 张文娜. 冲击荷载下钢筋混凝土梁的性能及损伤评估 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1): 111–122. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0288.
ZHAO W C, QIAN J, ZHANG W N. Performance and damage evaluation of RC beams under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(1): 015102. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0288.
- [12] 王银辉, 陆晓宏. 钢筋混凝土梁在冲击作用初期的惯性力分布 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(6): 2457–2463. DOI: CNKI:SUN:KXJS.0.2020-06-050.
WANG Y H, LU X H. Inertial force distribution of reinforced concrete beams at the initial stage of impact [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(6): 2457–2463. DOI: CNKI:SUN:KXJS.0.2020-06-050.
- [13] PHAM T M, HAO H. Effect of the plastic hinge and boundary conditions on the impact behavior of reinforced concrete beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 102(4): 74–85. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.12.005.
- [14] LI H, CHEN W, HAO H. Influence of drop weight geometry and interlayer on impact behavior of RC beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 222–237. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.028.
- [15] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2006.03.004.
WANG M Y, WANG D R, SONG C M. A calculation method of reinforced concrete beam under low velocity impact [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(3): 399–405. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2006.03.004.
- [16] OHNUMA H, ITO C, NOMACHI S G. Dynamic response and local rupture of reinforced concrete beam and slab under

- impact loading[R]. IASMiRT, Brussels, Belgium. 1985.
- [17] FU Y, YU X, DONG X, et al. Investigating the failure behaviors of RC beams without stirrups under impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137(3): 103432.1. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103432.
- [18] SUKONTASUKKUL P, MINDESS S. The shear fracture of concrete under impact loading using end confined beams [J]. *Materials & Structures*, 2003, 36(6): 372–378. DOI: 10.1007/bf02481062.
- [19] KISHI N, NAKANO O, MATSUOKA K G, et al. Experimental study on ultimate strength of flexural-failure-type RC beams under impact loading [R]. IASMiRT, Washington DC, USA, 2001.
- [20] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000039.
- [21] ZHAO D B, YI W J, KUNNATH S K. Shear mechanisms in reinforced concrete beams under impact loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 04017089. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001818.
- [22] 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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.11.025.
- ZHAO D B, YI W J. Anti-impact behavior and design method for RC beams [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(11): 139–145. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.11.025.
- [23] 梅福林, 董新龙, 俞鑫炉. 不同落锤速度冲击下混凝土和 RC 梁破坏研究 [J]. *宁波大学学报 (理工版)*, 2017, 30(5): 83–88.
- MEI F L, DONG X L, YU X L. On failure behavior of concrete and RC beam to different velocity impact [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2017, 30(5): 83–88.
- [24] KISHI N, MIKAMI H. Empirical formulas for designing reinforced concrete beams under impact loading [J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(4): 509–519.
- [25] TACHIBANA S, MASUYA H, NAKAMURA S. Performance based design of reinforced concrete beams under impact [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(6):1069–1078. DOI: 10.5194/nhess-10-1069-2010.
- [26] CHUNG L, SHAH S P. Effect of loading rate on anchorage bond and beam-column joints [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(2): 132–142. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90174-1.
- [27] FU H C, ERKI M A, SECKIN M. Review of effects of loading rate on reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(12): 3660–3679. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:12(3660).
- [28] SOROUSHIAN P, CHOI K. Steel mechanical properties at different strain rates [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 113(4): 663–672. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:4(663).
- [29] HONG S, KANG T H K. Dynamic strength properties of concrete and reinforcing steel subject to extreme loads [J]. *ACI Structural Journal*, 2016, 113(5): 983. DOI: 10.14359/51688754.

(责任编辑 王易难)