

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.016

落锤冲击作用下钢筋混凝土短梁 响应及破坏试验研究*

杜宇翔^{a,b,c}, 贾永胜^{a,b,c}, 孙金山^{a,b,c,d}, 姚颖康^{a,b,c}, 谢全民^{a,b,c}, 汪远远^{a,b,c}, 聂森林^{a,b,c}

(江汉大学 a. 精细爆破国家重点实验室; b. 爆破工程湖北省重点实验室;
c. 湖北(武汉)爆炸与爆破技术研究院; d. 数字建造与爆破工程学院, 武汉 430056)

摘要: 钢筋混凝土短梁是建构筑物的关键承力构件,为研究其在冲击荷载作用下的动力响应及破坏机制,结合应变式传感器、高速摄影、数字图像技术(DIC)等测量手段,开展了不同冲击体质量、冲击速度和冲击能量下的落锤冲击试验。结果表明:(1)冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁破坏形式表现为拱形震塌裂缝和整体弯曲变形,与浅梁破坏形式有明显差异;(2)钢筋混凝土短梁跨中轴向应变由拉应变变为压应变,随着冲击能量增加($18\ 061\ \text{J} \leq E \leq 49\ 831\ \text{J}$),跨中轴向峰值拉应变、残余压应变均先增大后减小,钢筋混凝土短梁依次处于弹塑性挠曲变形、冲剪破坏模式阶段;(3)冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁的裂缝萌生和扩展过程并不是单向的,裂缝多次多向扩展形成裂缝带,进而形成塑性铰,导致短梁整体破坏;(4)梁体变形程度主要取决于冲击速度而非冲击能量,具体表现相同冲击能量($30\ 000\ \text{J}$)下,随着冲击速度增加($5.53\ \text{m/s} \leq v \leq 17.13\ \text{m/s}$),梁体跨中峰值挠度和残余挠度相应增大($26.81\ \text{mm} \leq w_p \leq 29.85\ \text{mm}$; $17.12\ \text{mm} \leq w_r \leq 21.66\ \text{mm}$)。研究成果可为钢筋混凝土短梁的抗冲击性能设计、拆除爆破工程设计提供试验依据和机制认识。

关键词: 钢筋混凝土短梁; 落锤冲击试验; 冲击能量; 动力响应; 破坏机制

中图分类号: TU375.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0115-09

Experimental Study on Response and Failure of Short Reinforced Concrete Beams under Impact Load by Drop Hammer

DU Yu-xiang^{a,b,c}, JIA Yong-sheng^{a,b,c}, SUN Jin-shan^{a,b,c,d}, YAO Ying-kang^{a,b,c},
XIE Quan-min^{a,b,c}, WANG Yuan-yuan^{a,b,c}, NIE Sen-lin^{a,b,c}

(a. State Key Laboratory of Precision Blasting; b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering;
c. Hubei (Wuhan) Institute of Explosion Science and Blasting Technology; d. School of
Digital Construction and Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: Reinforced concrete (RC) short beam is the key load-bearing component of buildings. In order to study its dynamic response and failure mechanism under impact load, drop hammer impact tests with different impact

收稿日期 (Date of reception): 2022-12-12 网络首发日期 (Published online): 2023-04-20

作者简介: 杜宇翔(1992-),男,副教授、博士,主要从事工程爆破方面的科研工作, (E-mail) duyuxiang@jhun.edu.cn.

通讯作者: 贾永胜(1970-),男,教授、博士,主要从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) jason03566@163.com.

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2022CFB874, 2020CFA043, 2021CFB541); 湖北省重点研发计划项目(2020BCA084); 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022282); 国家自然科学基金项目(52209131); 武汉市知识创新专项项目(2023020201020444)

About the author: DU Yu-xiang (1992-), male, associate professor, Ph. D, mainly engaged in scientific research in engineering blasting, (E-mail) duyuxiang@jhun.edu.cn.

Corresponding author: JIA Yong-sheng (1970-), male, professor, Ph. D, mainly engaged in research and practice of engineering blasting, (E-mail) jason03566@163.com.

Fund Programs: Natural Science Foundation of Hubei Province (2022CFB874, 2020CFA043, 2021CFB541); Key Research and Development Project of Hubei Province (2020BCA084); Scientific Research Project of Hubei Education Department (B2022282); National Natural Science Foundation of China (52209131); Wuhan Knowledge Innovation Special Project (2023020201020444)

mass, impact velocity and impact energy were carried out by combining strain gauge sensor, high-speed photography and digital image technology (DIC). The results show that, the failure forms of the short RC beams under impact loads are arch collapse cracks and overall bending deformation, which are obviously different from those of shallow beams. The axial strain in the mid span of a short RC beam changes from tensile strain to compressive strain. With the increase of impact energy ($18\ 061\ \text{J} \leq E \leq 49\ 831\ \text{J}$), the axial peak tensile strain and residual compressive strain in the mid span increase first and then decrease. The short RC beam is in the stage of elastic flexural deformation, elastic-plastic flexural deformation and punching shear failure mode in turn. The crack initiation and propagation process of the short RC beam under impact load is not unidirectional. And the fracture zone is formed by the multidirectional fracture propagation with multiple times, and then the plastic hinge is formed, resulting in the overall short beam failure. The deformation degree of the beam mainly depends on the impact speed rather than the impact energy. Specifically, the peak deflection and residual deflection in the middle span of the beam ($26.81\ \text{mm} \leq w_p \leq 29.85\ \text{mm}$; $17.12\ \text{mm} \leq w_r \leq 21.66\ \text{mm}$) increase with the increase of the impact speed ($5.53\ \text{m/s} \leq v \leq 7.13\ \text{m/s}$) under the same impact energy (30 000 J).

Key words: short RC beam; drop hammer impact test; impact energy; dynamic response; failure mechanism

钢筋混凝土结构是目前最常见的工程结构类型之一,在使用过程中可能遭受各种自然或人为的爆炸、冲击动力灾害。此外,在常见的爆破拆除过程中,钢筋混凝土结构需按照拆除爆破设计要求定向倒塌和充分解体。钢筋混凝土梁是钢筋混凝土结构的主要构件之一,根据受力形式和承载性能可分为短梁和浅梁,《混凝土结构设计规范》将跨高比小于5的梁定义为短梁^[1],短梁以承受竖向荷载为主,广泛应用于房建、市政、交通、水工等领域,例如剪力墙连梁、框支梁、箱型基础箱梁、高桩码头横梁等^[2]。钢筋混凝土短梁具有较大的承载力,往往是建构筑物关键承力构件。因此,钢筋混凝土短梁的冲击动力响应及破坏机制研究,对于抗爆结构设计和拆除爆破工程设计均具有重要的理论指导意义。

在钢筋混凝土短梁力学性能方面,国内外学者开展了相关试验和理论研究,高丹盈^[3]、周云等开展了钢筋混凝土短梁的受弯试验^[4],研究了配筋率对梁体极限承载力的影响,提出了短梁抗弯刚度过程曲线的计算方法。李平先、Omeman等研究了钢筋混凝土短梁受剪变形破坏特征^[5,6],提出了短梁受剪承载力计算方法,探讨了加固混凝土短梁的抗剪性能。熊进刚等通过试验分析了钢筋混凝土简支短梁的挠度曲线特征^[7],探讨了钢筋混凝土短梁的破坏模式。Fan研究了温度对钢筋混凝土短梁受剪切力作用时跨中挠度、破坏模式的影响^[8],提出了计算模型用于预测钢筋混凝土的高温性能。目前针对钢筋混凝土短梁的研究主要是通过静力学试验分析其承载性能及影响因素,对于动态冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁力学响应的研究较少。

由于材料的率敏感性和惯性效应存在^[9],冲击

荷载作用下钢筋混凝土梁的响应和静力荷载作用下明显不同。国内外学者对钢筋混凝土梁的冲击动力响应开展了大量的试验研究,Kishi等通过落锤冲击试验研究发现冲击体形状对钢筋混凝土梁整体破坏形态影响较小^[10],试验结论为落锤冲击试验设计提供了思路。Bentur等研究表明冲击荷载作用下梁体变形破坏过程中惯性荷载所占比重约为2/3,Lan和Shah研究表明钢筋混凝土梁动态极限强度相对于静态强度提升了15%~25%,同时探究了加载速率对构件裂缝发展和分布规律的影响^[11,12]。赵德博通过开展落锤冲击试验^[13],记录了冲击力和跨中位移,分析了冲击能量的耗散规律。Kulkarni和Shah开展了钢筋混凝土梁不同速率加载试验^[14],结果表明高速加载时梁体裂缝数量减少,破坏形式为剪切破坏,不同于静载条件下的弯曲破坏形式,其他学者也得到了类似结论^[15-23]。国内外学者通过试验研究表明,钢筋混凝土梁动态力学性能与静态力学性能有较大差异,而目前试验研究对象主要以浅梁为主,鉴于短梁和浅梁的受力形式和静力承载性能有明显区别,需对钢筋混凝土短梁动态力学性能开展进一步试验研究,探究其在冲击荷载作用下的动力响应及破坏机制。

基于上述问题,通过开展钢筋混凝土短梁的落锤冲击试验,试验变量设置为冲击体质量、冲击速度和冲击能量,研究了钢筋混凝土短梁的破坏形态、变形发展过程和跨中挠度的变化,分析了冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁变形破坏的影响因素和影响规律,探讨了钢筋混凝土短梁冲击破坏机制。研究成果为钢筋混凝土短梁的抗冲击性能设计、拆除爆破工程设计提供了试验依据和机制认识。

1 试验概况

1.1 试件制备及试验装置

本次试验所制备的钢筋混凝土短梁截面尺寸为 400 mm × 400 mm, 长度为 1200 mm, 跨度与高度之比为 3, 梁体共配置 12 根纵向钢筋, 直径为 22 mm, 配筋率为 2.85%; 箍筋采用光圆钢筋, 直径为 8 mm, 间距 100 mm, 纵筋保护层厚度为 50 mm, 混凝土标号为 C30, 试件尺寸及配筋如图 1 所示。

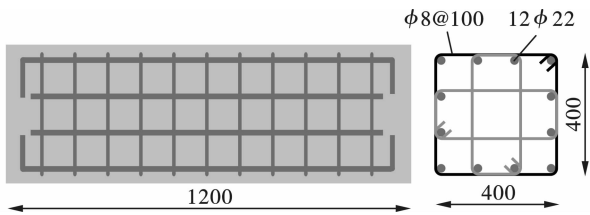


图 1 试件尺寸及配筋(单位:m)

Fig. 1 Specimen size and reinforcement(unit:m)

试验采用江汉大学爆破研究院落锤冲击试验机 DTM-2504, 主锤体质量为 1180 kg, 单个砝码质量为

30 kg, 最多可配置 26 个砝码, 总锤体质量为 1960 kg, 最大冲击高度为 2600 mm, 最大冲击速度为 7.14 m/s。试验所采用的支承条件为两端简支, 试验装置如图 2 所示。

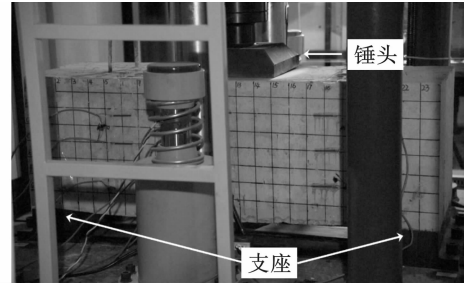


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

1.2 工况设计及测量方案

本次试验主要研究钢筋混凝土短梁在不同条件冲击荷载作用下的变形破坏过程和破坏机制, 共设计了 9 种工况, 试验变量为冲击速度、冲击体质量和冲击能量, 如表 1 所示。

表 1 试验设计工况

Table 1 Test design conditions

编号	锤体质量/kg	冲击高度/m	冲击速度/(m · s ⁻¹)	冲击能量/J
1-1	1180	1.56	5.53	18 061
1-2	1570	1.56	5.53	24 031
1-3	1960	1.56	5.53	30 000
2-1	1180	1.95	6.18	22 548
2-2	1570	1.95	6.18	30 000
2-3	1960	1.95	6.18	37 452
3-1	1180	2.59	7.13	30 000
3-2	1570	2.59	7.13	39 915
3-3	1960	2.59	7.13	49 831

试验测量数据包括: ①梁体跨中轴向应变; ②梁体破裂区域动态应变; ③冲击过程高速摄影图像; ④梁体跨中挠度。梁体跨中轴向应变采用应变式传感器结合 DH8302 高性能动态信号采集分析系统进行采集, 梁体破裂区域应变演化过程采用高速摄影图像结合数字图像技术(DIC)进行分析, 梁体跨中挠度采用高频位移传感器进行采集, 梁体冲击破坏过程采用 PHANTOM 高速摄像机进行记录, 试验测量方案如图 3 所示。

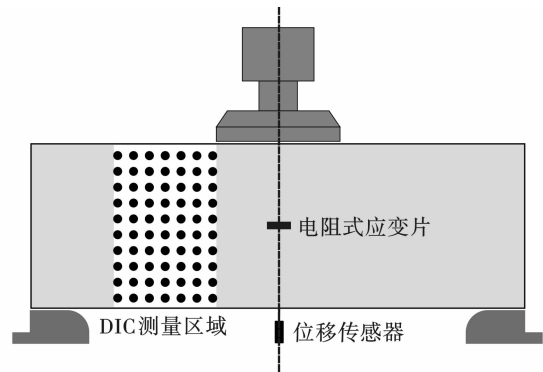


图 3 试验测量方案

Fig. 3 Test measurement scheme

2 试验结果及分析

2.1 梁体破坏特征

不同工况冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁破坏形态如图 4 所示, 由结果分析可知:

(1) 冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁破坏形式表现为震坍裂缝和整体弯曲变形, 裂缝延伸至支承

端,梁体破坏程度与冲击体质量、冲击速度和冲击能量密切相关;(2)当冲击能量小于 30 000 J 时(1-1、1-2、2-1),震塌裂缝生成于梁体对称中心两侧,形成具有一定宽度的裂缝带,裂缝带两端与梁体底面夹角约为 45°,并在梁体中部贯通,整体呈拱形分布,整体弯曲变形小;(3)当冲击能量增至 30 000 J 时(1-3、2-2、3-1),裂缝带仍然呈拱形分布,但

裂缝带曲率半径有所增大,且裂缝更为密集,梁体整体弯曲变形不大;(4)当冲击能量大于 30 000 J 时(2-3、3-2、3-3),裂缝带呈“八”字形分布,冲击部位局部变形较大,部分钢筋裸露,整体弯曲变形较大;(5)冲击荷载作用下短梁破坏形态受支承端影响较大,与浅梁破坏形态有明显差异,如图 5 所示。

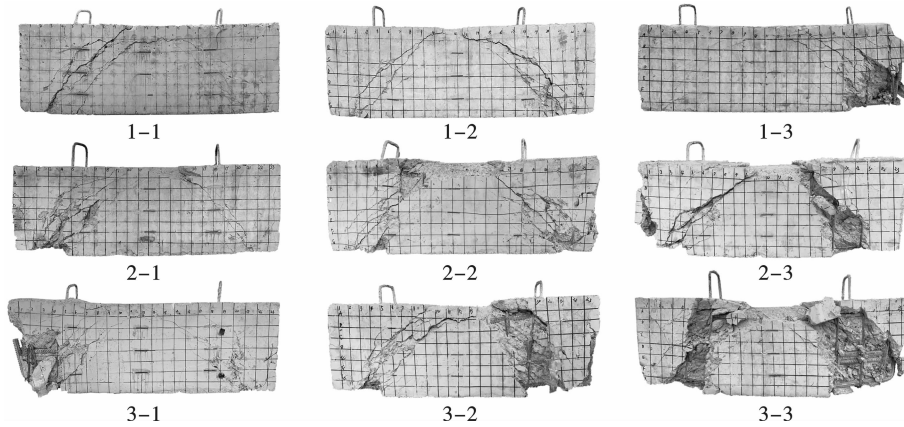


图 4 冲击荷载作用下短梁破坏形态

Fig. 4 Failure mode of short beam under impact load

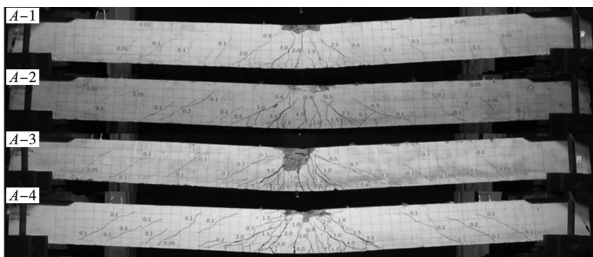


图 5 冲击荷载作用下浅梁破坏形态^[13]

Fig. 5 Failure mode of shallow beam under impact load^[13]

2.2 梁体变形发展过程

试验监测了梁体跨中轴向应变,将锤头与梁体接触作为初始时刻,应变时程曲线如图 6 所示,结果

表明:在 0 ~ 2 ms,梁体跨中轴向应变表现为拉应变,应变增大到峰值后迅速恢复至初始状态;在 2 ~ 30 ms,梁体跨中轴向应变表现为压应变;在 30 ~ 40 ms,梁体跨中轴向应变趋于稳定,表现为残余压应变。由结果分析可知:钢筋混凝土短梁在冲击荷载作用下发生弹塑性挠曲变形,跨中部位产生轴向拉应变,冲击荷载作用结束后,梁体弹性变形恢复,跨中部位产生轴向压应变,梁体塑性变形表现为中部震塌破坏,形成两个对称倾斜塑性铰,中部拱形震塌段相对于初始状态弯矩减小,初始轴向拉应力释放,因此轴向残余应变表现为压应变。

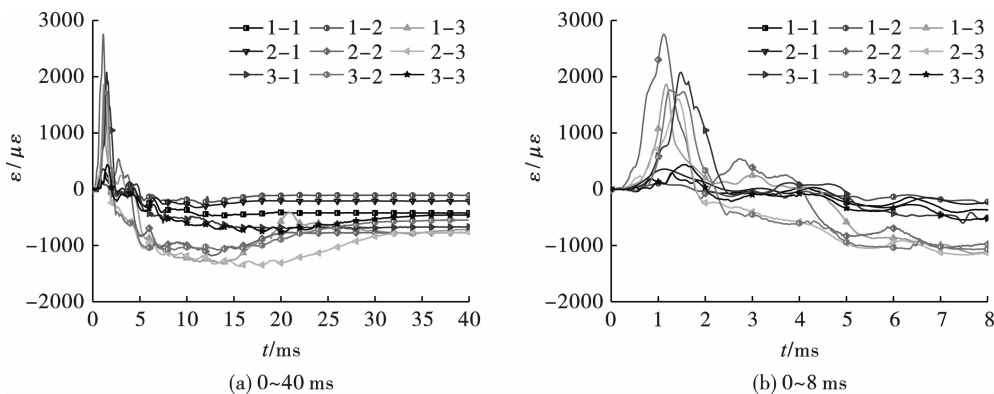


图 6 梁体跨中轴向应变时程曲线

Fig. 6 Time history curve of axial strain in mid span of beam

表 2 给出了不同工况梁体跨中轴向峰值应变和残余应变,峰值应变、残余应变与冲击能量的关系如图 7 所示,结果表明:峰值拉应变、残余压应变随冲击能量增加均表现为先增大后减小的趋势;结合钢筋混凝土短梁冲击破坏形态,分析原因:冲击能量较小时($E < 30\ 000\ \text{J}$),梁体挠曲变形不明显,拱形震坍裂缝不发育,两侧未形成明显的塑性铰,峰值拉应变、残余压应变均较小;随着冲击能量增大($30\ 000\ \text{J} < E < 40\ 000\ \text{J}$),梁体发生较明显弹塑性挠曲变形,拱形震坍裂缝发育,两侧形成塑性铰,峰值拉应变、残余压应变较大;当冲击能量继续增大($E > 40\ 000\ \text{J}$),梁体表现为冲剪破坏模式,塑性铰呈“八”字形,梁体两侧与中部震塌段错开,中间段未发生明显挠曲变形,因此跨中轴向峰值拉应变、残余压应变反而

减小。

表 2 跨中轴向峰值应变和残余应变

Table 2 Axial peak strain and residual strain in midspan

编号	冲击能量/J	峰值应变 ε_p/mm	残余应变 ε_r/mm
1-1	18 061	291.45	-422.25
1-2	24 031	105.58	-107.11
1-3	30 000	1862.56	-710.71
2-1	22 548	357.66	-211.11
2-2	30 000	2753.56	-772.85
2-3	37 452	1607.84	-769.68
3-1	30 000	2076.57	-670.45
3-2	39 915	1764.28	-550.03
3-3	49 831	437.88	-461.41

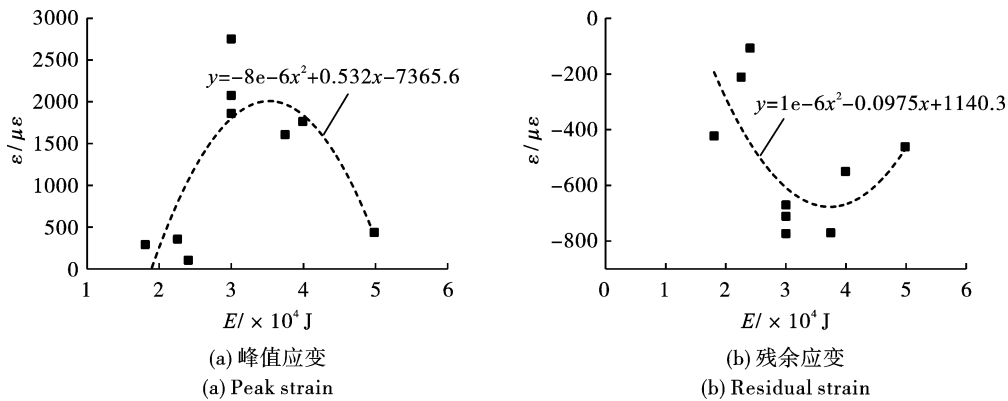


图 7 跨中轴向应变与冲击能量关系

Fig. 7 Relationship between mid span axial strain and impact energy

为了进一步分析冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁的变形破坏过程,揭示短梁冲击破坏机制,通过高速 DIC 对 3-3 工况钢筋混凝土短梁裂缝带区域应变发展过程进行了测量,得到最大主应变云图,选取 2 ms、4 ms、8 ms 时刻,分别提取 6 个纵向截面最大主应变,根据峰值应变时空演变过程,绘制潜在扩展裂缝及扩展方向,如图 8 所示,结果表明:在 0 ~ 2 ms,潜在裂缝位于梁体下部,表现为由梁体中心向梁体两端扩展的趋势,裂缝呈拱形分布;在 2 ~ 4 ms,拱形裂缝发展至梁体上部,由梁体两端向梁体中心扩展;在 4 ~ 8 ms,裂缝由梁体中心和梁体两端同时向中部扩展汇聚,发展形成一定宽度的裂缝带。高速 DIC 分析结果表明:冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁的变形破坏过程极为复杂,梁体内裂缝的萌生和扩展过程并不是单向的,由于应力波在梁体内部传播时发生来回反射和多次叠加,以及梁体内部钢筋和混凝土介质的不均匀性,导致梁体内单条裂缝的形成和扩展过程随应力场时空分布状态而发生

改变,最终在裂缝密集区域形成主裂缝带,进而形成塑性铰,钢筋混凝土短梁失去承载能力,造成梁体的整体破坏。

2.3 梁体跨中挠度

试验采用高频位移传感器结合动态信号采集分析系统测得钢筋混凝土短梁跨中挠度时程曲线,如图 9 所示,进一步分析得到峰值挠度和残余挠度(表 3),结果表明:(1) 在 0 ~ 25 ms,梁体跨中挠度迅速增大至峰值,在 25 ~ 100 ms,梁体发生回弹变形,跨中位置回弹至最高点,在 100 ~ 250 ms,跨中位置跌落至稳定状态,形成残余挠度;(2) 梁体在冲击荷载作用下表现为弹塑性变形,残余挠度反映了梁体的塑性变形,峰值挠度为梁体弹性变形与塑性变形之和。

图 10 给出了短梁跨中挠度与冲击能量关系(30 000 J 取工况 3-1),结果表明,钢筋混凝土短梁跨中挠度与冲击能量大致呈正相关,但工况 1-2 冲击能量大于工况 2-1,跨中挠度反而小,分析原

因认为:冲击能量并非梁体变形破坏程度的决定因素。为进一步探究冲击荷载作用下短梁变形的影响因素及程度,对工况 1-3、2-2、3-1 的试验结果展开分析,给出了相同冲击能量下(30 000 J)梁体跨中挠度随冲击速度、冲击体质量的变化关系(图 11),结

果表明:在试验范围内($v = 5.53 \sim 7.13 \text{ m/s}$; $m = 1180 \sim 1960 \text{ kg}$),钢筋混凝土短梁变形程度主要取决于冲击速度,表现为相同冲击能量下,随着冲击速度增加,梁体跨中峰值挠度和残余挠度相应增大。

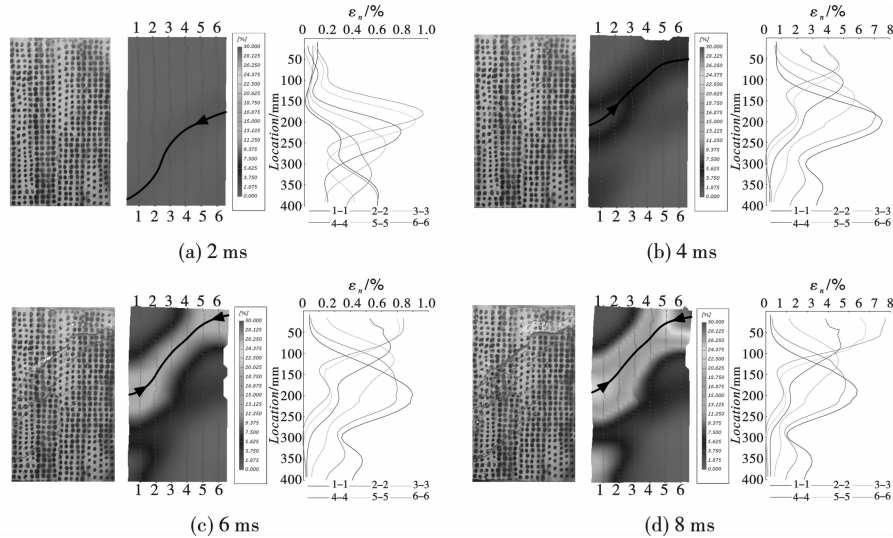


图 8 裂缝带区域最大主应变变化及裂缝扩展过程

Fig. 8 Maximum principal strain evolution and fracture propagation process in fracture zone

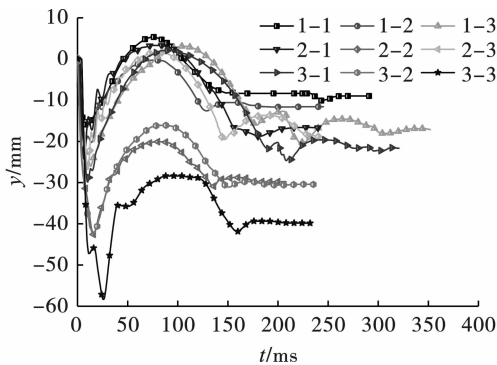


图 9 梁体跨中挠度时程曲线

Fig. 9 Time history curve of mid span deflection of beam

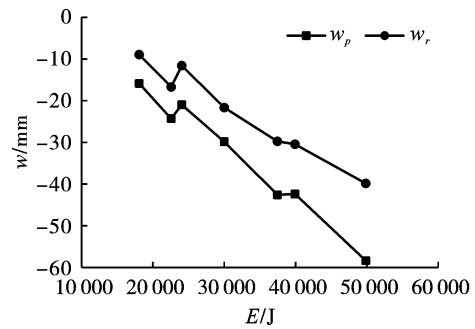
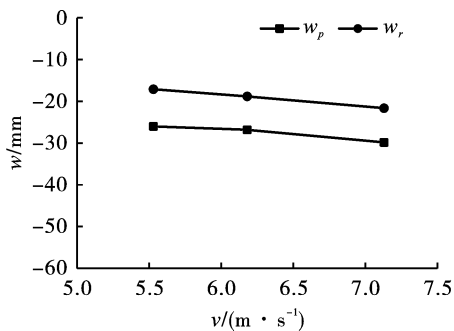


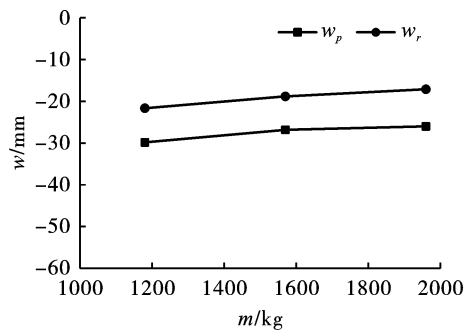
图 10 挠度与冲击能量关系

Fig. 10 Relationship between deflection and impact energy



(a) 挠度与冲击速度关系

(a) Relationship between deflection and impact velocity



(b) 挠度与冲击体质量关系

(b) Relationship between deflection and impact mass

图 11 相同冲击能量下跨中挠度影响因素

Fig. 11 Influencing factors of mid span deflection under the same impact energy

由试验数据进一步分析了钢筋混凝土短梁跨中挠度受冲击速度、冲击体质量的影响规律(图 12、图 13),结果表明:钢筋混凝土短梁跨中峰值挠度和残余挠度与冲击速度、冲击体质量均呈正相关;当冲击体质量越大,随着冲击速度增加,梁体峰值挠度和残余挠度增长越快;同样,当冲击速度越大,随着冲击体质量增加,梁体峰值挠度和残余挠度增长越快。见表 3。

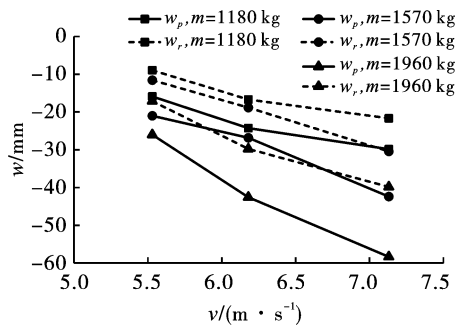


图 12 跨中挠度与冲击速度关系

Fig. 12 Relationship between mid span deflection and impact velocity

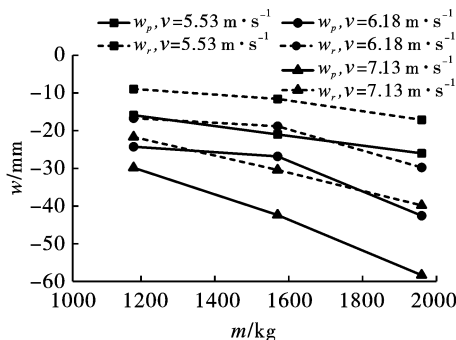


图 13 跨中挠度与锤体质量关系

Fig. 13 Relationship between mid span deflection and hammer mass

表 3 梁体跨中峰值挠度与残余挠度

Table 3 Peak deflection and residual deflection at mid span of beam

编号	峰值挠度 w_p /mm	残余挠度 w_r /mm
1-1	-15.89	-8.95
1-2	-20.99	-11.57
1-3	-26.01	-17.12
2-1	-24.28	-16.70
2-2	-26.81	-18.82
2-3	-42.56	-29.76
3-1	-29.85	-21.66
3-2	-42.38	-30.45
3-3	-58.34	-39.84

3 结论

开展了钢筋混凝土短梁的落锤冲击试验研究,分析了不同工况下钢筋混凝土短梁的破坏形态、梁体跨中轴向应变演化特征,研究了裂缝带区域应变发展过程,分析了梁体跨中挠度的影响因素和影响规律,探讨了钢筋混凝土短梁冲击破坏机制,主要结论如下:

(1) 冲击荷载作用下钢筋混凝土浅梁破坏形态表现为裂缝以冲击点为中心,呈放射状分布,而钢筋混凝土短梁主要表现为裂缝带呈拱形分布,与浅梁有明显差异;短梁整体弯曲变形程度与冲击体质量、冲击速度和冲击能量密切相关。

(2) 钢筋混凝土短梁跨中轴向应变由拉应变转变为压应变,反映了冲击荷载作用下梁体的弹塑性变形过程,梁体两侧对称塑性铰的形成导致梁体跨中轴向拉应力释放而转为压应变;随着冲击能量增加,跨中轴向向峰值拉应变、残余压应变均先增大后减小,钢筋混凝土短梁依次处于弹塑性挠曲变形、冲剪破坏模式阶段。

(3) 高速 DIC 测量分析结果表明冲击荷载作用下钢筋混凝土短梁的裂缝萌生和扩展过程并不是单向的,由于应力波在梁体内来回反射和多次叠加,以及钢筋混凝土介质的不均匀性,导致梁体内单条裂缝的扩展过程随应力分布状态发生改变,最终在裂缝密集区域形成主裂缝带,进而形成塑性铰,钢筋混凝土短梁失去承载能力,造成梁体的整体破坏。

(4) 钢筋混凝土短梁跨中峰值挠度和残余挠度反映了冲击荷载作用下梁体的弹塑性变形程度,试验结果表明,梁体变形程度主要取决于冲击速度而不是冲击能量,具体表现相同冲击能量下,随着冲击速度增加,梁体跨中峰值挠度和残余挠度相应增大。

参考文献 (References)

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 (2015 版) 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[2] 梁兴文,王社良,李晓文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2003.

[3] 高丹盈,王廷彦,何亚军. 碳纤维布加固钢筋混凝土短梁受弯试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报,2017, 38(11):122-131.

[3] GAO Dan-ying, WANG Ting-yan, HE Ya-jun. Flexural test and calculation on capacity of reinforced concrete short beam strengthened by CFRP sheets[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 122-131. (in Chi-

- nese)
- [4] 周云,王廷彦,张军伟. CFRP加固钢筋混凝土短梁抗弯刚度计算方法[J]. 土木工程学报,2020,53(11):9-20,35.
- [4] ZHOU Yun, WANG Ting-yan, ZHANG Jun-wei. Calculation method on flexural stiffness of reinforced concrete short beam strengthened by CFRP[J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(11):9-20,35. (in Chinese)
- [5] 李平先,丁自强,郭进军. 钢筋混凝土短梁受剪承载力的计算方法[J]. 建筑结构,2002(12):39-41.
- [5] LI Ping-xian, DING Zi-qiang, GUO Jin-jun. Calculation method of shear capacity of reinforced concrete short beams[J]. Building Structure,2002(12):39-41. (in Chinese)
- [6] Z Omeman, M Nehdi, H El-Chabib. Experimental study on shear behavior of carbon-fiber-reinforced polymer reinforced concrete short beams without web reinforcement[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2008,35(1):1-10.
- [7] 熊进刚,伍卫秀,程文灏. 钢筋混凝土短梁刚度和变形的分析与计算[J]. 建筑结构,2003(8):22-24.
- [7] XIONG Jin-gang, WU Wei-xiu, CHENG Wen-rang. Analysis and calculation of stiffness and deformation of reinforced concrete short beam[J]. Building Structure,2003(8):22-24. (in Chinese)
- [8] FAN Sheng-xin, ZHANG Yao, TAN Kang-hai. Experimental and analytical studies of reinforced concrete short beams at elevated temperatures[J]. Engineering Structures,2020,212:110445.
- [9] P Bischoff, S Perry. Compressive behaviour of concrete at high strain rates[J]. Materials and structures,1991,24(6):425-450.
- [10] N Kishi, K Ikeda, H Mikami, et al. Dynamic behavior of RC beams under steel weight impact loading. Effects of nose-shape of steel weight[C]//CONSEC'01:Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions,2001:660-667.
- [11] ARNON Bentur, S Mindess, NEMY Banthia. The behaviour of concrete under impact loading: Experimental procedures and method of analysis[J]. Materials and Structures,1986,19(5):371-378.
- [12] CHUNG Lan, SURENDRA P Shah. Effect of loading rate on anchorage bond and beam-column joints[J]. Structural Journal,1989,86(2):132-142.
- [13] 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.
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] SHRIKRISHNA M Kulkarni, SURENDRA P Shah. Response of reinforced concrete beams at high strain rates[J]. Structural Journal,1998,95(6):705-715.
- [15] 袁健,易伟建. 加载速率对钢筋混凝土梁受剪性能影响的试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(7):119-127.
- [15] YUAN Jian, YI Wei-jian. Tests for effects of loading rate on shear behaviors of RC beams[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(7):119-127. (in Chinese)
- [16] 王向阳,冯英骥. 爆炸冲击作用下连续梁桥动力响应和影响因素研究[J]. 爆破,2017,34(3):104-113.
- [16] WANG Xiang-yang, FENG Ying-ji. Study on dynamic response and Influencing factors of continuous girder bridge under explosion impact[J]. Blasting,2017,34(3):104-113.
- [17] 亓兴军,刘青. 爆炸作用下曲线梁桥的倒塌模式[J]. 爆破,2015,32(4):110-117.
- [17] QI Xing-jun, LIU Qing. Collapse mode of curved beam bridge under explosion[J]. Blasting,2015,32(4):110-117. (in Chinese)
- [18] 孙炳鑫,王晓磊,马文彪,等. 爆炸荷载作用下不同抗剪连接件组合梁动力响应及破坏模拟分析[J]. 爆破,2022,39(1):152-158.
- [18] SUN Bing-xin, WANG Xiao-lei, MA Wen-biao, et al. Dynamic response and failure simulation analysis of composite beams with different shear connectors under explosion load[J]. Blasting,2022,39(1):152-158. (in Chinese)
- [19] 杨涛,谢元康,郝天之. 装配式混凝土框架子结构动态倒塌性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(1):126-134.
- [19] YANG Tao, XIE Yuan-kang, HAO Tianzhi. Experimental study on dynamic collapse behavior of prefabricated concrete frame substructures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2022,42(1):126-134. (in Chinese)
- [20] 张景峰,仝朝康,张智超,等. CFRP加固钢筋混凝土梁抗冲击性能试验[J]. 中国公路学报,2022,35(2):181-192.
- [20] ZHANG Jing-feng, TONG Chao-kang, ZHANG Zhi-chao, et al. Impact resistance test of reinforced concrete beams reinforced by CFRP[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(2):181-192. (in Chinese)
- [21] 罗绪昌,蔺宝奎,张春霞. 钢筋混凝土深梁在冲击荷载作用下的动力响应分析[J]. 公路交通科技,2022(3908):94-100,108.
- [21] LUO Xu-chang, LIN Bao-yao, ZHANG Chun-xia. Dynamic response analysis of reinforced concrete deep beams under impact loads[J]. Journal of Highway and Trans-

- portation Science and Technology, 2022, 39(8):94-100, 108. (in Chinese)
- [22] 院素静,宗周红,娄凡,等. 预应力混凝土连续梁桥桥面爆炸损伤试验研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11):160-170.
- [22] YUAN Su-jing, ZONG Zhou-hong, LOU Fan, et al. Experimental study on explosion damage of prestressed concrete continuous beam bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11):160-170. (in Chinese)
- [23] 刘翔宇,孙亮明,夏振兴. 弹性支承曲线梁在移动荷载作用下动力响应研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(1):55-61.
- [23] LIU Xiang-yu, SUN Liang-ming, XIA Zhen-xing. Dynamic response of a curved beam with Elastic Support under Moving Load [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(1):55-61. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第43页)

- [11] YAN Peng, ZHOU Wang-xiao, LU Wen-bo, et al. Simulation of bench blasting considering fragmentation size distribution[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016(90):132-145.
- [12] WU Liang, LIANG Zhi-jian, CHEN Ming, et al. Experiments and fluent - engineering discrete element method-based numerical analysis of block motion in underwater rock-plug blasting [J]. Applied Sciences-Basel, 2023(13):348.
- [13] DAI Yu, ZHANG Yan-yang, LI Xu-yang. Numerical and experimental investigations on pipeline internal solid-liquid mixed fluid for deep ocean mining[J]. Ocean Engineering, 2020, 220(2):108411.
- [14] DUAN Xu, SHI Bo-hui, WANG Jun-ao, et al. Simulation of the hydrate blockage process in a water-dominated system via the CFD-DEM method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021(96):104241.
- [15] HE Yi, ANDREW E B, ALI H. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows[J]. Powder Technology, 2018, 325:620-631.
- [16] FU Yan-bin, ZENG De-qi, XIONG Hao, et al. Seepage effect on failure mechanisms of the underwater tunnel face via CFD DEM coupling [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 146:104591.
- [17] WU Liang, LIANG Zhi-jian, CHEN Ming. Experiments and simulation of block motion in underwater bench blasting[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):4703.
- [18] WU Liang, LIANG Zhi-jian, ZHANG Ao, CHEN Ming. The blasting pile formation process of rock mass bench blasting under water based on fluid solid coupling model of fluent and EDEM[C]//13# International Symposium on rock fragmentation by blasting, Hangzhou China, 2022:539-547.
- [19] LI Xing-yue, ZHAO Ji-dong. Dam-break of mixtures consisting of non-Newtonian liquids and granular particles [J]. Powder Technol, 2018, 338:493-505.
- [20] WANG Yu-han, NGUYEN N. The effects of rock-infill interfacial properties on the compressive damage behaviour of flawed rocks: Results from a DEM study[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 117:103166.
- [21] JI Song-tao, KARLOV EK J. Calibration and uniqueness analysis of microparameters for DEM cohesive granular material[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(1):121-136.
- [22] WU Zhi-jun, ZHANG Peng-lin, FAN Li-feng, et al. Numerical study of the effect of confining pressure on the rock breakage efficiency and fragment size distribution of a TBM cutter using a coupled FEM-DEM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 88:260-275.
- [23] WANG P, GAO N, JI K, et al. DEM analysis on the role of aggregates on concrete strength [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119:103290.
- [24] WANG Li-ge, GE Rui-huan, CHEN Xi-zhong. Establishing an oblique impact breakage master curve using a DEM bonded contact model [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 145:104668.

英文编辑:陈东方