落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的实验研究

付应乾^{①②}, 董新龙^{①*}

① 宁波大学机械工程与力学学院, 宁波 315211;

② 北京理工大学机电学院, 北京 100081

* E-mail: dongxinlong@nbu.edu.cn

收稿日期: 2015-12-18; 接受日期: 2016-02-22; 网络出版日期: 2016-03-16

国家自然科学基金(批准号: 11390361)资助项目

摘要 钢筋混凝土结构在受到爆炸、冲击等荷载作用时的设计及安全性受到越来越多的关注. 本文采用落锤三点弯曲实验方法对具有不同黏结强度的钢筋混凝土梁进行研究, 探讨不同速度冲击下混凝土结构的破坏机理及钢筋黏结强度作用, 实验结果显示: (1) 钢筋混凝土梁的冲击力响应曲线峰值与钢筋黏结强度无关, 为混凝土结构的响应, 随速度提高而提高; (2) 裂纹分布和发展模式与冲击速度相关, 在较低速度冲击下, 钢筋混凝土梁主要呈现弯曲破坏模式, 随加载率提高向剪切破坏模式为主转变, 更高速度下为冲切破坏控制; (3) 钢筋黏结强度对破坏模式转变有影响, 钢筋混凝土黏结强度低, 越易产生剪切破坏, 且易出现混凝土的块状破碎崩落, 塑性铰破坏也会提前.

关键词 钢筋混凝土梁, 冲击响应, 黏结强度, 破坏模式

1 引言

钢筋混凝土结构作为广泛采用的工程结构, 在面对恐怖袭击、飞行器意外撞击等爆炸、冲击等荷载作用时的安全性日益受到关注, 混凝土结构在冲击条件下的动态响应及破坏特性研究成为学术及工程界关注的热点. 混凝土等脆性材料在准静态作用下其应力-应变曲线具有软化特性, 即当荷载达到最大值后迅速衰减失效. 这类材料制成的结构单元响应都具有明显的加载率效应, 一般情况下, 高的加载率下具有较高的变形抗力, 结构的失效模式也会发生变化^[1~5]. 在高加载率下, 结构的失效模式会从 Mode-I

转变为复合的破坏模式, 如钢筋混凝土梁在准静态下主要表现为弯曲失效^[1~5], 而在高应变率下会出现剪切失效形式^[1~4]. 同样, 对于混凝土板在准静态下出现弯曲断裂, 而在冲击下会发生局部冲剪破坏^[6,7].

目前已有较多的实验分析工作探讨钢筋混凝土结构在冲击、爆炸下的性能响应, 由于军事需要, 大多为极高速度(40~300 m/s)下的局部贯穿等破坏研究^[6~11]. 研究认为在高速冲击下混凝土板以冲剪破坏为主, 其冲击力与结构的约束条件关系不大; 板的厚度增加, 能够提高混凝土板结构的冲击力及抗冲击能力^[9,10], 而混凝土结构配筋率对改善层裂破坏有较大作用, 但对最大撞击力影响不大^[10]. 另一方面, 实

引用格式: 付应乾, 董新龙. 落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的实验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 400–406

Fu Y Q, Dong X L. An experimental study on impact response and failure behavior of reinforced concrete beam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 400–406, doi: 10.1360/N092015-00337

际工程中, 由于外界环境(包括化学和物理)作用下混凝土材料性能衰减研究方面, 较多关注混凝土寿命、钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构的承载能力影响, 且研究主要集中在准静态载荷下的响应. 除配筋率外, 关于钢筋黏结力退化、动态黏结滑移特性对现役钢筋混凝土结构的动力分析至关重要. 但目前的相关研究多集中在材料层面, 国内外动态荷载下的响应研究成果尚不多见.

本文利用落锤三点弯曲实验, 对钢筋混凝土梁构件的动态响应及破坏模式进行探讨, 研究加载率及钢筋混凝土的动态黏结特性对结构响应及破坏模式的影响, 为相关模型建立提供参考依据.

2 材料与方法

2.1 材料与试样

混凝土设计强度为 C30, 水灰比为 0.5, 水泥采用普通硅酸盐(P.I 42.5)水泥, 细骨料采用河沙, 粗骨料采用 5~15 mm 连续级配破碎石灰岩, 最大粒径为 15 mm. 实验用梁长 1.2 m, 截面尺寸为 120 mm×120 mm, 纵向钢筋采用 HRB335, 箍筋采用 HRB235, 保护层厚 20 mm, 如图 1. 为尽可能保证性能一致, 一次浇注 18 根梁, 标准条件养护 28 天. 同时制作混凝土试块(尺寸 150 mm×150 mm×150 mm), 试件抗压强度为 31.9 MPa. 梁的准静态受弯承载力和受剪承载力测试结果见表 1.

为研究锈蚀钢筋混凝土的黏结性能退化对结构的动态性能影响, 通过电化学加速锈蚀方法, 对 6 根

梁试件中的钢筋进行锈蚀. 通过对比黏结长度内铁的锈蚀后重量与锈蚀前重量得到钢筋平均锈蚀率. 梁岩等人^[12]通过电化学加速侵蚀实验测定 C30 混凝土中 HRB335 钢筋的极限黏结强度与锈蚀率的关系曲线, 如图 2 所示, 认为锈蚀率大于 1.5%, 黏结强度发生明显退化. 本文采用相似方法, 获取 10%锈蚀率的钢筋混凝土梁, 对应图 2 中极限黏结强度较未锈蚀试样下降约 40%, 以此作为钢筋黏结力退化比对试样.

2.2 实验方法

钢筋混凝土梁三点弯曲落锤冲击实验设计、布置如图 3 所示. 所有试样实验中均采用锤头 124 kg, 分别用 1.2, 2.4 和 4.8 m 高度自由落下对试件冲击加载. 实验中对锤头加速度、跨中位移、跨中钢筋应变进行动态测试采集.

为精确测量动态响应数据, 两个压电式加速度传感器(量程 20000 m/s²)安装在锤头底部接近锤头与梁接触区, 用于测量冲击载荷. 梁跨中挠度位移采用 KEYENCE-GK400 激光位移传感器直接测量锤头位移, 该传感器采用半导体激光波长为 655 nm, 为非接触式, 测量范围 20 cm. 采用电阻应变片测量混凝土及纵向钢筋的应变, 在试样浇注前在钢筋上黏贴应变片并用环氧密封. 同时在梁跨中位置, 表面贴应变片, 测量混凝土的应变. 采用高速摄影机, 以 3000 帧/s 记录冲击过程. 实验过程中, 所有测试通道接入 2 台串联的 Tektronix 数字存储式示波器, 测试系统采用外部触发, 其中位移和加速度信号采样频率为 10 kHz, 应变信号采样频率为 1 kHz.

图 1 梁尺寸及配筋截面图

表 1 钢筋混凝土梁设计准静态抗弯承载及抗剪承载力^{a)}

纵筋配置	箍筋配置	抗弯承载力(kN) $R_M=4M_U/L$	抗剪承载力(kN) $R_V=2V_U$	R_V/R_M
受压区 2Φ10 受拉区 2Φ12	Φ8@50	46.9	115.6	2.46

a) M_U , 等效弯矩; L , 计算长度; V_U , 等效剪切力

图 2 黏结强度随锈蚀率变化曲线^[12]

图 3 (网络版彩图)落锤冲击实验
(a) 设计图; (b) 实物图

2.3 数据处理

落锤冲击实验的锤头加速度信号包含高频噪声, 需进行反演滤波处理. 分析可将落锤冲击得到的频域信号简化为弹簧、黏壶并联模型, 其中高频信号主要来自弹簧, 而冲击载荷主要是黏壶作用, 这部分加速度幅值随频率增加而衰减, 分析可以得到较好的精度. 为保证分析精度一致, 实验中采用以下步骤处理: (1) 选取 3 个典型的加速度原始信号, 进行频谱分析, 作傅里叶变换得到频域分布; (2) 由于冲击载荷主要是黏壶作用, 加速度幅值随频率增加而衰减, 根据频谱分析取截至频率; (3) 对加速度原始信号进行低通滤波. 如图 4 给出了典型的处理过程, 其中图 4(b)为加速度信号频谱分析结果, 在 530 Hz 之后, 幅值增大, 取 530 Hz 为滤波低通截至频率, 图 4(a)为原

图 4 (网络版彩图)加速度计信号处理方法
(a) 典型加速度原始信号; (b) 频谱分析

始加速度与滤波处理后的波形比较. 几组典型加速度信号处理低通截至频率结果均在 520~550 Hz 之间, 实验中取 530 Hz.

3 实验结果与分析

表 2 给出了实验结果的总结, 其中冲击力为锤头加速度得到的力时程曲线的最大峰值力及时间; 中点挠度为激光位移传感器测得的位移曲线的最大值及时间; 钢筋应变为试样下部两根纵筋中点应变第一个峰值的平均值.

3.1 载荷、位移响应特性

典型的钢筋混凝土梁试件在落锤冲击下的锤头力及中点位移响应曲线如图 5 所示, 为试样 RC20-17-1 在 4.8 m 高落锤冲击响应曲线, 可见试件在冲击过程中首先经历一个脉冲峰值力, 随后震荡并趋于近乎水平平台发展, 试件中点挠度不断增大, 随后锤头反弹卸载, 变形回复. 汇总所有实验结果发现, 无论锤头冲击速度高低、钢筋混凝土试件中钢筋是否被锈蚀, 力和位移响应曲线几乎有相同的变化趋势, 所有结果总结在表 2 中, 可见随冲击速度增加, 冲击

表 2 实验结果汇总

试件编号		落锤高度(m) /锤重(kg)	冲击力		中点挠度		钢筋应变	
			峰值(kN)	时间(ms)	最大(mm)	时间(ms)	峰值(με)	时间(ms)
原始样	RC16-n-1	1.2/124	104	1.45	28.3	11.2	1322	1.61
	RC15-n-1	2.4/124	94.7	1.40	51.2	17.8	1408	1.80
	RC17-n-1	4.8/124	173.9	1.20	90.4	19.2	1833	1.26
钢筋锈蚀试样	RC20-y-1	1.2/124	72.4	1.4	31.2	12.0	1284	1.6
	RC19 -y-1	2.4/124	121.1	1.25	53.4	16.8	2217	1.45
	RC18-y-1	4.8/124	192.5	2.2	97.2	22.0	5261	2.60

图 5 钢筋混凝土梁力位移响应(试件 RC17-n-1)

力峰值明显增大, 但平台力增大趋势不明显, 甚至落锤 4.8 m 高冲击的锈蚀钢筋试件(RC18-y-1)的水平平台力还低于冲击速度低的试件, 这可能与失效模式变化相关, 下面将进一步分析.

图 6 为一组不同冲击速度下, 原始试样与锈蚀钢筋试样的位移响应曲线比较. 可见在相同撞击速度下, 原试样与锈蚀钢筋试样的位移响应曲线在上升阶段基本一致, 尤其对已 1.2 m 落锤低速撞击情况时, 达到最大挠度前, 两者几乎相同, 这表明: 实验条件下, 钢筋与混凝土的黏结力的差别对构件整体挠度变形没有影响. 对于较高速度撞击, 如 4.8 m 落锤冲击, 两者在后期有差别, 黏结力低的锈蚀钢筋试件, 中点挠度大. 表明黏结力的差别在冲击初始对梁构件响应影响不大; 随冲击速度的增大, 由于失效模式的转变, 可能从弯曲失效模式向剪切失效转变, 引起混凝土结构的变形响应的变化. 也意味着钢筋混凝土试样黏结强度变化对破坏模式转变有影响. 这一点也反映在冲击力-挠度曲线上, 如图 7 所示. 在冲击初期, 无论原始试样还是锈蚀钢筋试样, 冲击力响应曲线几乎相同, 即主要是混凝土的响应, 与布筋及黏结特性无关. 随冲击速度增加, 在 4.8 m 落锤冲击下, 冲击力随挠度增加后迅速下降, 变形破坏从弯曲模

图 6 梁跨中挠度时程曲线比较

图 7 梁冲击力-跨中挠度曲线

式向局部剪切破坏转变, 当在跨距中点形成塑性绞后, 冲击力几乎不变, 挠度不断增大; 而在 1.2 m 冲击下, 试件冲击力呈震荡发展.

3.2 裂纹发展及破坏分析

通过高速相机记录, 我们可以观察分析钢筋混凝土梁在不同冲击速度下的变形、损伤及破坏发展状况. 图 8 给出了试件在不同速度冲击下, 跨中位移达到最大值时试样表面的裂纹分布, 该裂纹分布图是按高速相机所记录照片处理得到.

(1) 1.2 m 落锤低速冲击下, 梁试样跨中底部产

出弯曲起裂, 裂纹竖直向上传播, 表现为弯曲破坏模式, 如图 9(a). 对于原试样, 裂纹还没有贯通整个试样截面, 裂纹数多、扩展慢; 而锈蚀钢筋试样裂纹数少而集中, 主裂纹已贯通整个截面, 将形成塑性铰, 可见钢筋黏结强度对混凝土中裂纹的破坏发展起着明显的抑制作用.

(2) 随冲击速度提高(2.4 m 落高), 冲击能量增大, 与 1.2 m 冲击相同裂纹仍从底部起始发展, 但裂纹数目增多且出现剪切型裂纹; 其中原试件裂纹还未贯穿试样截面; 与 1.2 m 冲击比较, 裂纹数量增加明显, 但裂纹长度增大不显著. 而对于锈蚀钢筋试样主裂纹已贯穿试样截面, 且出现沿下部钢筋的横向裂纹, 这说明在该加载条件下, 破坏仍以弯曲破坏为主.

(3) 冲击速度进一步提高(4.8 m 落高), 与较低速度冲击不同, 在梁下部出现弯曲裂纹的同时落锤与梁接触部位向下辐射扩展出大量剪切裂纹, 且弯曲裂纹并未扩展至上部, 如图 9(b); 表明在高速冲击下钢筋混凝土出现局部冲压剪切为主的破坏模式, 并形成塑性铰, 随后的中点挠度是梁绕塑性铰的转动贡献的. 从混凝土梁剪切损伤破坏体积看, 随下落高度增大而增加. 原钢筋混凝土梁的剪切损伤体积明显大于同样加载条件下锈蚀钢筋混凝土梁, 如图 8 所示. 说明钢筋黏结强度退化会影响破坏, 黏结强度小更容易在钢筋混凝土中产生局部的冲切破坏.

图 9(b)还显示, 锈蚀钢筋混凝土梁, 在中点混凝土块发生大量碎裂剥落, 出现明显塑性铰, 而原始混凝土梁则保持较好的整体性, 无块体剥落. 说明钢筋黏结强度严重影响混凝土的破碎崩落, 黏结强度越大, 混凝土不易破碎崩落, 推迟塑性铰形成, 提高结

图 8 钢筋混凝土梁表面裂纹分布特征

图 9 钢筋混凝土梁破坏过程

(a) 落高 1.2 m 不同黏结力; (b) 落高 4.8 m 不同黏结力

构抗冲击阻力.

3.3 底部纵筋应变发展与混凝土破坏分析

钢筋混凝土梁的破坏特征也可从其底部中点纵筋位置所贴的应变片信号上得到验证, 图 10 为底部纵筋(两根)中点处中性层位置的应变时程曲线, 编号 C25 和 C26. 为保证加速度信号、位移信号和应变片信号的同步, 在梁上方设置一个触发源, 在落锤接触梁之前, 同步触发加速度信号、位移信号和应变片信号, 且采集信号的示波器也采用相同的设置.

(1) 对比冲击力信号时间, 见表 2, 发现在冲击力第一个峰的上升阶段, 钢筋应变几乎为 0, 说明冲击瞬间主要是混凝土的响应, 纵向钢筋几乎不起作用. 说明这一时刻钢筋混凝土结构的动态力响应主要是混凝土的作用, 此时底部纵筋几乎没有影响, 随变形发展, 底部钢筋受拉伸, 钢筋才起明显作用. 对比图 9, 无论原钢筋混凝土梁还是锈蚀钢筋混凝土梁, 只有当底部弯曲裂纹出现, 且冲击力从峰值下降之

图 10 底部纵筋应变信号

(a) 1.2 m 冲击下纵筋应变时程曲线; (b) 1.2, 2.4 与 4.8 m 冲击下纵筋应变比较; (c) 4.8 m 冲击下锤头冲击力、位移及梁纵筋应变响应

后, 钢筋才承受拉伸, 应变开始迅速增大. 这时钢筋混凝土仍保持良好的整体刚性, 所以力位移曲线发展趋势相同, 但值得注意的是在相同撞击速度下, 锈蚀钢筋梁应变信号都大于原始钢筋混凝土梁信号.

(2) 在较低速度冲击时(1.2 m 落高), 如图 9(a), 钢筋混凝土梁呈现弯曲变形. 当梁底部裂纹起裂后, 底部钢筋受拉伸作用应变不断增加, 但与混凝土仍

保持整体性. 随变形发展, 裂纹进一步扩展、变宽, 使得局部形成塑性铰, 应变陡然下降, 底部纵筋保持恒定的塑性应变, 如图 10(a). 表明锈蚀钢筋混凝土梁较原钢筋混凝土梁更易发生局部塑性铰.

(3) 随冲击速度增加, 如 4.8 m 高落锤冲击下, 由于发生局部剪切失效, 很快在梁跨距中部形成塑性铰机构, 应变达到第一个峰值后急剧下降, 如图 10(c)所示. 且随冲击速度增大, 塑性铰形成时间提前, 如图 10(b)所示.

4 总结

采用三点弯曲落锤冲击实验方法对钢筋混凝土梁构件的冲击力动态响应及破坏特征进行探讨. 实验设计了不同黏结强度的钢筋混凝土梁, 分析了不同冲击速度下梁的冲击力响应、裂纹发展及破坏、钢筋应变特征等, 探讨不同速度冲击破坏机理及钢筋黏结强度作用, 研究有利于进一步理解冲击速度、黏结强度等对钢筋混凝土破坏的影响. 得到如下结果.

(1) 冲击力响应峰值与钢筋黏结强度无关, 主要与冲击动量相关, 为混凝土结构的响应, 随速度提高而提高.

(2) 在实验条件下, 钢筋黏结力对钢筋混凝土梁跨中冲击位移(挠度)影响不明显, 只有当裂纹扩展至钢筋后, 两者才有明显差别, 黏结强度低的锈蚀钢筋混凝土试件中点挠度及钢筋中的拉伸应变都大于原始试样.

(3) 裂纹分布和发展模式与冲击速度相关: 在较低速度冲击下, 钢筋混凝土梁主要呈现弯曲破坏模式, 裂纹在梁跨中底部产生并向上扩展; 随加载率提高底部弯曲裂纹起始及撞击位置的剪切裂纹同时产生, 并向剪切破坏模式为主转变; 更高速度下, 破坏是由剪切破坏控制.

(4) 钢筋黏结强度对破坏模式转变有影响, 钢筋混凝土黏结强度越低, 越易产生剪切破坏, 而提高钢筋混凝土黏结强度, 可提高结构的抗剪切能力. 钢筋黏结强度低, 越易产生混凝土的块状破碎崩落, 发生塑性铰破坏, 降低结构的抗冲击能力.

参考文献

- 1 Brandon D G. Dynamic loading and fracture. In: Blazynski T Z, ed. Materials at high strain rates. Amsterdam: Springer Science & Business

- Media, 1987. 187–218
- 2 Ožbolt J, Rah K K, Meštrović D. Influence of loading rate on concrete cone failure. *Int J Fract*, 2006, 139: 239–252
  - 3 Saatci S, Vecchio F J. Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams. *ACI Struct J*, 2009, 106: 78–86
  - 4 Travaš V, Ožbolt J, Kožar I. Failure of plain concrete beam at impact load: 3D finite element analysis. *Int J Fract*, 2009, 160: 31–41
  - 5 Zhan T, Wang Z, Ning J. Failure behaviors of reinforced concrete beams subjected to high impact loading. *Eng Fail Anal*, 2015, 56: 233–243
  - 6 Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *Int J Impact Eng*, 2005, 32: 224–284
  - 7 Barr P, Carter P G, Howe W, et al. Replica scaling studies of hard missile impacts on reinforced concrete. In: *Proceedings of RILEM-CEB-IABSE-IASS Interassociation symposium on concrete structures under impact and impulsive loadings*, West Berlin, 1982. 329–344
  - 8 Chen Y, May I M. Reinforced concrete members under drop-weight impacts. *Proc ICE-Struct Build*, 2009, 162: 45–56
  - 9 Hrynyk T D, Vecchio F J. Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load. *ACI Struct J*, 2014, 111: 1213–1224
  - 10 Zineddin M, Krauthammer T. Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading. *Int J Impact Eng*, 2007, 34: 1517–1534
  - 11 Kishi N, Kurihashi Y, Ghadimi Khasraghy S, et al. Numerical simulation of impact response behavior of rectangular reinforced concrete slabs under falling-weight impact loading. *Appl Mech Mater*, 2011, 82: 266–271
  - 12 梁岩, 罗小勇, 肖小琼, 等. 锈蚀钢筋混凝土黏结滑移性能试验研究. *工业建筑*, 2012, 42: 95–100

An experimental study on impact response and failure behavior of reinforced concrete beam

FU YingQian^{1,2} & DONG XinLong¹

¹ Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

² School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

It has been a growing trend to design reinforced concrete structures to resist the blast and impacted loads. In this paper, an experimental investigation has been conducted to collect the fundamental data and develop more understanding of the effect of bond between reinforcement and concrete on the dynamic response of reinforced concrete beam to the different loading rate. The reinforced concrete beams with different bonded rebar were tested by three-point bending tests using drop-weight impact technique. The results show that: (1) the maximum impact force has limited effect on bonded rebar, which is proportional to the cross section of concrete structure and the impact loading rate; (2) the impact velocity has significant effect on the failure pattern, the flexural failure is predominant failure pattern at low-velocity impact and it would transform to the shear failure with increasing the loading rate; (3) the shear failure is easier to occur in those beams with the weaker bonding strength between concrete and reinforcement, additionally, the bonding strength of rebar has a significant effect in controlling bursting and spalling of concrete, and lead to the plastic hinge failure in beam fast.

reinforced concrete beam, response of impact, bonding, failure model

doi: 10.1360/N092015-00337