

## 不同落锤速度冲击下混凝土和 RC 梁破坏研究

梅福林<sup>1</sup>, 董新龙<sup>1\*</sup>, 俞鑫炉<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 为探究冲击载荷作用下钢筋混凝土(RC)梁的破坏模式转变及影响因素, 对素混凝土梁和无箍筋轻 RC 梁试样开展落锤冲击实验及有限元分析, 结果表明: (1) RC 梁的冲击破坏模式与冲击速度、配筋率相关, 在较低速度下以弯曲破坏为主, 随速度提高将出现跨中呈现八字形的剪切破坏模式, 并随纵筋率增大剪切破坏转变的临界速度呈增大趋势, 但在更高速度下( $>10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 素混凝土及 RC 梁均会出现局部冲切破坏. (2) 梁冲击力峰值随冲击速度增加而增大, 受梁的配筋率影响较小, 但在较高冲击速度下( $>4.85\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 梁冲击力峰值并不随速度增加而增大; (3) 有限元分析 RC 梁的冲击响应及破坏过程与实验现象及趋势符合较好.

**关键词:** RC 梁; 落锤冲击; 破坏模式; 有限元

**中图分类号:** O347.1; TU375.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2017) 05-0083-06

钢筋混凝土(RC)结构(如梁、板及柱等)在掩体、坝体及核能结构等工程实际中有广泛应用, 这些设计一般必须满足冲击载荷作用下抵抗弯曲破坏的安全容量<sup>[1]</sup>. 为此, 许多学者开展了冲击载荷下 RC 梁、板及柱的弯曲破坏研究<sup>[2-5]</sup>, 认为动态抗冲击弯曲破坏设计可以近似地按相关的准静态载荷估算<sup>[5-6]</sup>. 事实上, 动载荷下梁的剪力、弯矩与准静态不同<sup>[7-12]</sup>, 还可能存在局部剪切型破坏模式<sup>[1]</sup>. 在动态冲击下, 由于梁中应力波传播特性与冲击速度、强度及材料强度、RC 梁经历的局部损伤等相关, 已很难按等效的准静态假设分析<sup>[1,11-12]</sup>.

作为脆性材料, 混凝土在准静态作用下, 其应力—应变曲线具有软化特性, 即当载荷达到最大值后迅速衰减失效. 此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, 其失效模式会从弯曲破坏转变为复合机制的破坏模式, 如 RC 梁在准静态下主要表现为弯曲失效, 而在高应变率下会出现局部的剪切失效形式<sup>[1,13-15]</sup>. RC 梁在冲击位置发生局部破坏形成塑性铰及其沿轴传播的过程, 会对 RC 梁的抗冲击

性能产生影响<sup>[11-12]</sup>. Kishi 等<sup>[1]</sup>对无箍筋 RC 梁在准静态下得到的极限承载力和冲击载荷下的冲击力以及破坏过程进行比较, 探讨 RC 梁抗冲击剪切失效的性能设计方法. 近来, Pham 等<sup>[12]</sup>结合有限元进一步分析了大冲击载荷下塑性铰形成、边界条件等对 RC 梁抗冲击性能的影响, 包括边界约束条件、材料强度等对冲击力响应曲线、中点挠度、弯矩及剪力等的影响, 认为对于较长的梁, 在塑性波传至支座位置前, RC 梁边界约束条件、材料强度对冲击力峰值及最大挠度影响不大, 但对其残余挠度有明显作用.

综上所述, 已有工作对于冲击载荷作用下 RC 梁的破坏模式转变及其影响因素并未充分认识清楚, 结构设计还主要依据类似准静态工况, 即考虑箍筋设置对提高 RC 梁抗剪切破坏的作用. 本文重点研究冲击速度对 RC 梁破坏及其模式转变的影响, 采用实验及有限元方法探讨无箍筋 RC 梁在不同落锤冲击速度下的响应及破坏过程. 实验比较了素混凝土梁及 RC 梁在不同落锤速度冲击下的破坏现象, 并进一步采用 LS-DYNA 非线性有限元, 分析实验过程以及冲击速度对破坏模式转变的影响,

收稿日期: 2017-03-08.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11390361).

第一作者: 梅福林(1990—), 男, 湖北武汉人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 钢筋混凝土的动态响应. E-mail: 17855847736@163.com

\*通信作者: 董新龙(1964—), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 材料和结构的动态响应. E-mail: dongxinlong@nbu.edu.cn

结果对于 RC 梁抗冲击分析及设计具有参考意义。

## 1 实验观察及有限元分析方法

### 1.1 实验方法及试样

实验研究采用落锤三点弯曲冲击方法, 具体布置如图 1 所示, 利用高速相机记录冲击载荷下混凝土梁破坏过程, 高速相机采样频率  $5\,000\text{ fps}\cdot\text{s}^{-1}$ . 锤头表面喷涂散斑, 以便利用二维数字图像相关法直接输出锤头的位移时程曲线. 在梁三点弯曲支座底部布置有压电力传感器, 以测量支座反力. 试验中, 落锤总质量为  $67\text{ kg}$ , 通过调整落锤高度改变冲击速度, 试验中速度分别为  $4.85\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $1.2\text{ m}$  落高)和  $6.86\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $2.4\text{ m}$  落高).

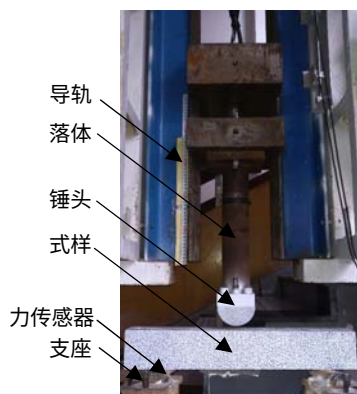


图1 落锤冲击实验装置

实验采用试样尺寸如图 2(a)所示, 所设计 RC 梁只在底部设置 2 根拉伸纵筋, 布置如图 2(b), 纵筋为  $\Phi 6$  的 HRB335 光面热轧钢筋, 无箍筋. 试样包括素混凝土梁(S0)、双筋混凝土梁(S2). 热轧钢筋抗拉强度和屈服强度为  $394.5\text{ MPa}$  和  $303.3\text{ MPa}$ .

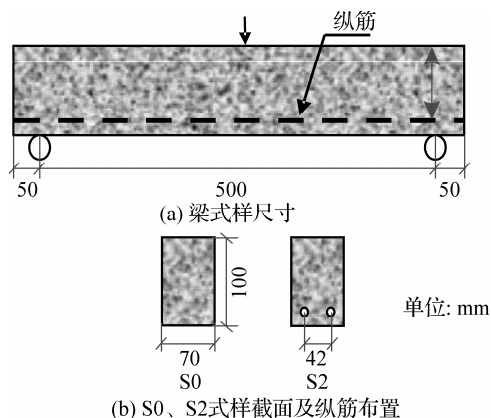


图2 梁试样尺寸及截面配筋设计

混凝土设计强度为 C40, 水灰比 0.5, 采用普

通硅酸盐(P.I 42.5)水泥, 粗骨料采用  $5\sim 15\text{ mm}$  连续级配破碎石灰岩, 细骨料采用河沙(中沙). 浇筑成  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  标准立方体压缩试样, 标准条件养护 28 d, 测得其抗压强度为  $59\text{ MPa}$ .

### 1.2 有限元分析模型

试验采用 LS-DYNA 软件做全过程数值模拟, 采用 Hypermesh 前处理软件建立有限元模型(图 3), 整个系统包括锤头、混凝土梁试件、钢筋、垫块. 各部分均采用六面体网格划分, 单元均为 Solid164 三维实体单元. 实验观察到 RC 梁试样在  $67\text{ kg}$  锤头冲击作用下, 破坏主要集中在试样跨中位置, 其他部分几乎没有观察到裂纹及破坏, 因此, 将梁跨中三分之一处网格细化加密, 最小单元网格尺寸为  $1\text{ mm}$ , 其余部件的网格尺寸均为  $2\text{ mm}$ . 钢筋与混凝土采用共节点建模, 不考虑粘结滑移. 梁与落锤之间定义面面侵蚀接触, 接触表面可以滑移及分离; 梁与支座间采用自动面面接触, 接触面的摩擦系数均设为 0.3.

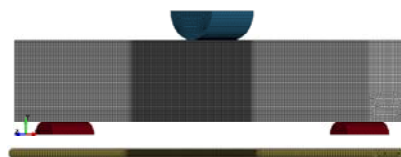


图3 有限元网格模型

混凝土的本构采用 LS-DYNA 程序中的 CSCM (MAT\_159)模型<sup>[16-17]</sup>, 该模型将混凝土压缩、拉伸破坏响应过程分为弹性、塑性及损伤软化几个阶段, 并考虑混凝土低围压对损伤破坏的影响, 围压对混凝土破坏面的影响如图 4 所示, 即: (1)当静水压为压应力时, 在较低静水压力下, 其损伤破坏强度随静水压应力增大, 破坏面减小形成盖帽面; (2)当静水压力为拉时, 损伤破坏面随静水压线性变化. CSCM 本构模型在塑性屈服面、损伤和断裂能计算中, 还计及了混凝土材料的应变率强化特性, 其动态抗拉和抗压强度  $f'_{T,dynamic}$  和  $f'_{C,dynamic}$  分别表示由

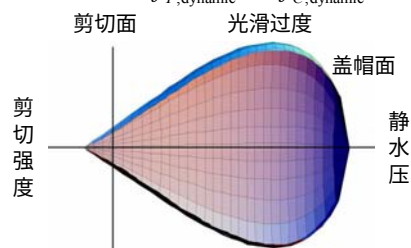


图4 混凝土 CSCM 本构

应变率效应导致的过应力:

$$f'_{T,dynamic} = f'_T + E\dot{\epsilon}\eta, \quad (1)$$

$$f'_{C,dynamic} = f'_C + E\dot{\epsilon}\eta, \quad (2)$$

式中,  $f'_T$ 、 $f'_C$  为准静态试验得到的抗拉、抗压强度;  $E$  为混凝土的杨氏模量;  $\dot{\epsilon}$  为有效应变率;  $\eta$  为粘性系数. 有限元计算时, 混凝土的刚度恢复系数(recover)取 10, 即损伤单元的恢复(裂缝的闭合)受静水压和体积应变的影响, 当单元应力状态从受拉转为受压时, 损伤刚度恢复, 而应力状态从受压转为受拉时, 单元损伤刚度不变. 另外, 取  $erode=1$ , 表示当损伤为 0.99 时单元删除. 混凝土单轴抗压强度  $\sigma_b$  取实验测试结果  $f'_T = 59$  MPa, 单轴抗拉强度取  $f'_C = 4.5$  MPa.

钢筋采用塑性随动强化模型, 不考虑其应变率效应. 其中, 弹性模量  $E$  为 206 GPa, 屈服强度为 335 MPa, 切线模量为 2.06 GPa, 弹性泊松比为 0.33. 由于有限元主要分析钢筋对混凝土梁破坏响应的影响, 故不考虑钢筋后期的断裂. 落锤定义为弹性体, 通过改变其密度来改变落锤质量, 支座设置为刚体模型, 不考虑其在冲击过程中的变形.

为节省计算时间, 数值模拟时锤头和梁顶面初始设定恰好接触, 给定落锤初速度, 并施加重力加速度, 接触力和跨中挠度及钢筋应变输出响应的的时间间隔为 5  $\mu$ s, 计算时间为从撞击开始至 2 ms.

## 2 实验结果分析及有限元模型验证

素混凝土梁在  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  落锤冲击下的实验结果显示, 裂纹首先在梁跨中底部形成, 并向上发展贯穿梁表面, 呈现典型脆性弯曲破坏特征. 图 5(a)为混凝土试样在  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  落锤冲击的典型破坏过程, 0.2 ms 时已可见一条弯曲破坏裂纹向上发展, 到 0.38 ms 时, 裂纹发展至顶部, 试样断裂. 图 5(b)为梁裂纹发展过程等效应力云图, 有限元模拟显示 0.2 ms 时, 梁表面跨中底部出现拉伸应力集中, 0.64 ms 时跨中裂纹贯穿, 最终断裂为 2 段, 与实验破坏结果符合较好.

图 6 为 RC 梁 S2 在落锤  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下, 实验梁表面破坏过程、最终回收试样以及有限元等效应力云图演化的典型破坏特征比较. 图 6(a)为高速相机记录的试样表面, 可见在  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下, S2 梁表面开始出现一条垂直发展裂纹(0.28 ms), 到达

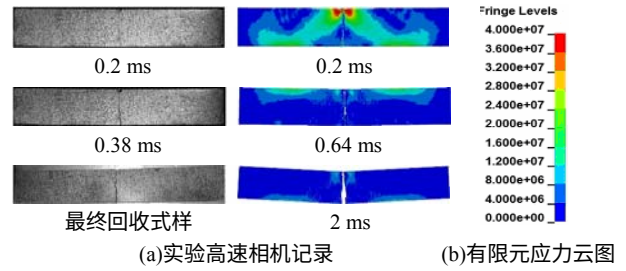


图 5 素混凝土梁  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下结果比较

0.48 ms 时, 裂纹已贯穿梁表面, 1.1 ms 时实验仍只见一条垂直裂纹, 只是裂纹张开位移增大. 与高速相机所记录的梁表面只可见一条垂直裂纹演化不同, 实验最终回收试样呈现八字形局部剪切破坏特征, 梁跨中混凝土完全破碎塌落. 有限元计算结果如图 6(b)和(c)所示, 其中, 图 6(b)为试样表面裂纹演化的等效应力云图, 可见在 0.66 ms 时, 梁表面无可见裂纹, 但其纵剖面跨中已出现破坏, 而到 1.1 ms 时, 虽然梁表面云图仅可见一条垂直发展的裂纹, 但此时纵剖面云图已出现八字型剪切损伤破坏特征(图 6(c)), 与实验的回收试样八字形特征符合. 实验以及有限元结果比较表明, 在速度  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下, 虽然 S2 梁在冲击变形过程中, 表面只见一条垂直发展的裂纹, 但试样内部事实上整体已发生局部剪切型破坏.

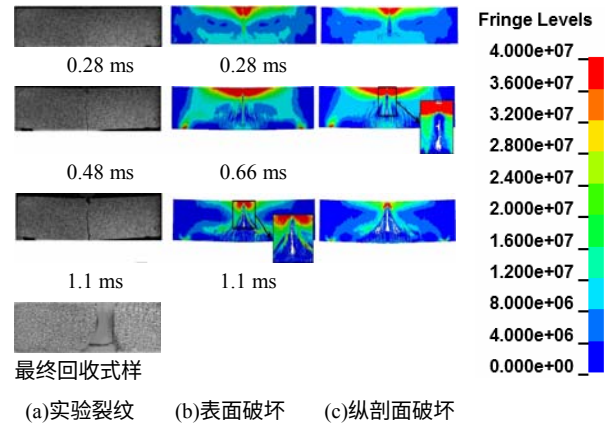


图 6 RC 梁落锤  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击实验及有限元结果比较

当落锤加载速度增加到  $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , S2 梁的实验破坏特征与  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下类似, 有限元结果显示其在试样内部更早地出现八字型的剪切破坏特征.

图 7 为  $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  落锤冲击下 S0、S2 梁锤头位移测试结果与有限元结果, 可见素混凝土梁实验结果与有限元计算的锤头位移曲线符合较好, S2

梁的位移曲线在 0.45 ms 以后存在一定偏差. 这是由于试样开始破坏后, 有限元模型中混凝土材料一旦到达损伤阈值, 单元即删除, 而实验中破坏混凝土不会立即塌落, 可能造成整体刚度较大. 图 8 为  $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  落锤冲击下 S2 梁支座反力实验测试结果与有限元结果, 由图可见, 虽然峰值有差别, 但支反力曲线的趋势吻合较好.

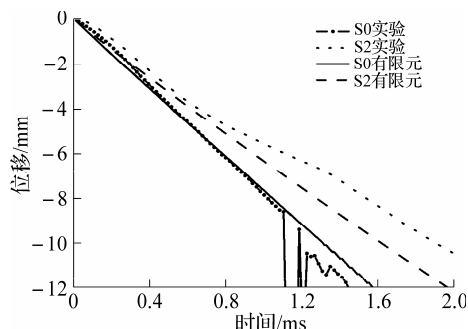


图 7 冲击速度为  $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  锤头位移时程曲线

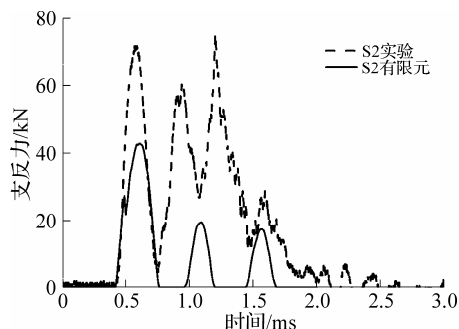


图 8 冲击速度为  $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  RC 梁支反力时程曲线

有限元与实验比较分析表明, 速度  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $6.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下, S0 素混凝土梁试样断裂成 2 块, 呈现出弯曲断裂特征; 而 S2 梁虽然高速相机记录的表面只有一条主裂纹, 但梁试样整体为局部剪切的破坏特征. 计算结果表明, 所采用 CSCM 模型分析混凝土和 RC 梁的响应及破坏过程与实验现象及趋势符合较好.

### 3 不同配筋率 RC 梁的冲击破坏特性分析

进一步利用有限元分析不同配筋率下的 RC 梁在落锤冲击下的破坏特性, 梁尺寸与实验试样相同, 其纵筋布置如图 9 所示, S0、S1、S2 试样配筋率分别为 0、0.4%、0.81%. 有限元分析比较不同速度下混凝土及 RC 梁的破坏特征、冲击力响应及纵筋应变特性等, 其中, 纵筋的应变取跨中中层中点单元进行应变分析.



图 9 S0、S1、S2 试样截面网格模型

图 10 为不同速度落锤冲击下, S0、S1、S2 梁纵剖面破坏的等效应力云图, 显示: (1)冲击速度为  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时(图 10(a)), 无论素混凝土梁还是 RC 梁, 最终均只出现垂直裂纹的破坏特征, RC 梁跨中钢筋层处等效应力分布大于底部, 破坏先在钢筋层以上位置产生, 并垂直发展. (2)当速度为  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  冲击下(图 10(b)), S0、S1 仍呈现弯曲破坏特征, 而 S2 梁已出现八字形剪切破坏特征; (3)随着冲击速度进一步增大,  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时(图 10(d)), 梁的破坏形态与较低速度时不同, 锤头与梁接触处的混凝土单元破坏严重, 破坏裂纹从冲击点向梁下部扩展, 表现为冲切破坏特征. 可见梁的破坏特征与冲击速度、配筋率相关. 素混凝土梁主要为呈弯曲破坏. 对于 RC 梁而言, 在较低速度冲击下为弯曲破坏, 较高速度下为八字形剪切破坏, 并且随配筋率增加, 梁从弯曲破坏向剪切破坏转变的临界速度呈增大趋势. 如对于配筋率为 0.81% 的双筋混凝土梁 S2, 计算结果显示, 其弯曲破坏向剪切破坏转变临界速度大约在  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而配筋率为 0.4% 单筋混凝土梁 S1 转变的临界速度约在  $1.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (图 10(c)). 当冲击速度进一步增大至  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 此时无关配筋率, 梁均发生从冲击点起始的局部冲切破坏.

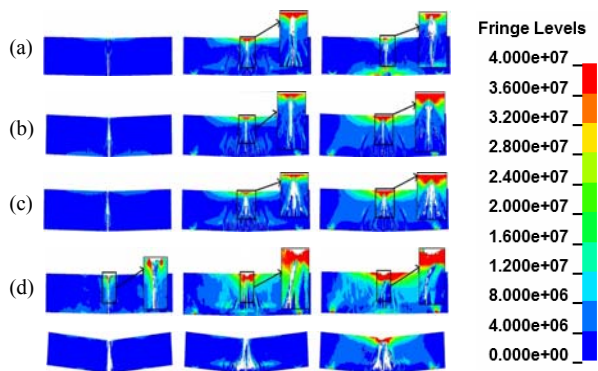


图 10 不同速度下梁的破坏特征

图 11 为 S0、S1、S2 在速度为  $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、锤头质量为 67 kg 时冲击下的冲击力、钢筋等效塑性应变响应时程曲线, 冲击力反映了梁在锤头冲击下结构、材料破坏过程的响应特性, 由图 11 梁的

冲击响应显示: (1)不同配筋的混凝土梁在相同速度冲击下, 冲击力的第一个脉冲波形曲线几乎相同, 只是波形持续的时间有差别, 表明纵筋配筋率对冲击力峰值影响不大。(2)3种配筋率混凝土梁冲击初始阶段(图中 $t_A = 0.06$  ms时刻前, 即0~0.06 ms范围)的响应曲线完全相同, 说明该阶段主要是梁结构材料应力波(惯性)响应, 此时, 钢筋应变极小, 与混凝土保持良好整体性, 钢筋还没起作用。(3)随后梁整体变形振动、撞击部位局部损伤破坏, 冲击力开始下降。对于S0混凝土梁, 由于在 $t_B$ 点(0.4 ms左右)已发生破坏断裂, 冲击力变为0, 而S1和S2梁虽发生局部破坏, 但裂纹并未贯穿整个梁表面, 冲击力时程曲线随后的震荡发展与RC梁中应力波传播引起梁的变形振动相关。

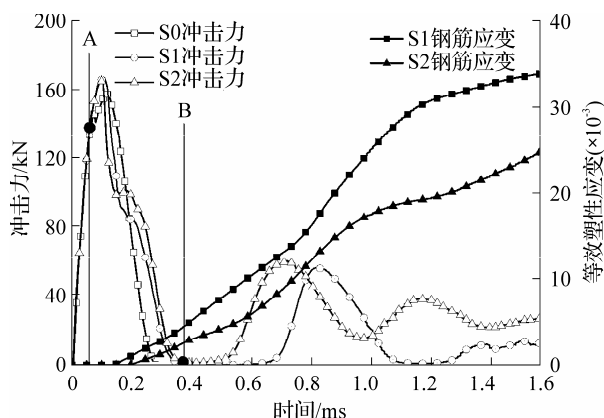


图11 4.85 m·s<sup>-1</sup>下RC梁的冲击力、钢筋应变响应曲线

图12为锤头在相同冲击能量以不同速度冲击S2梁的冲击力、钢筋等效塑性应变—位移响应曲线, 由图可见, 在较小冲击速度范围, 随冲击速度增大, 梁冲击力峰值增大, 冲击力响应反映了梁结构及破坏响应过程, 但当冲击速度到达4.85 m·s<sup>-1</sup>

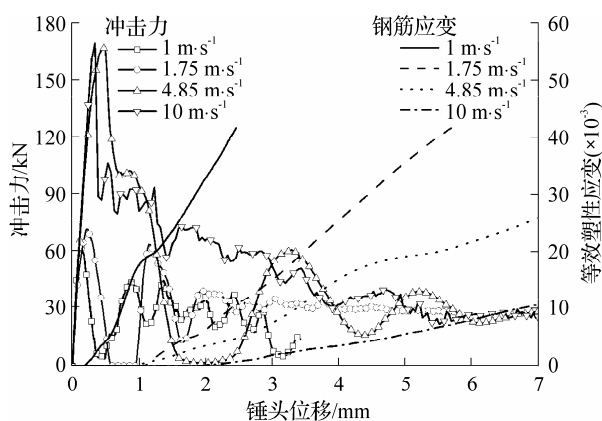


图12 不同速度下S2梁冲击力、钢筋应变—位移曲线

以上, 冲击力峰值趋向一致。冲击力峰值主要受冲击位置局部破坏控制, 主要为材料局部破坏响应, 冲击力位移曲线积分为梁的吸能特性。

#### 4 结论

对冲击载荷作用下无箍筋的RC梁响应及破坏特性开展研究, 采用实验和有限元的方法探讨了冲击速度对RC梁的响应特性, 结果表明:

(1)在4.85 m·s<sup>-1</sup>和6.86 m·s<sup>-1</sup>速度冲击下, 素混凝土梁试样对称断裂成2块, 呈现出弯曲断裂特征, RC梁试样整体为局部剪切的破坏模式。采用CSCM有限元模型模拟分析混凝土梁和RC梁的响应及破坏过程与实验现象趋势符合较好。

(2)RC梁的冲击破坏模式与速度、配筋率相关, 在较低速度下以弯曲破坏为主, 随速度提高将出现八字形的剪切破坏模式, 并且随纵筋率增大剪切破坏转变的临界速度呈增大趋势。当冲击速度进一步提高(10 m·s<sup>-1</sup>以上), 混凝土及RC梁又均变为局部冲切破坏。

(3)不同配筋率的RC梁在相同落锤速度冲击下, 冲击力峰值几乎不变, 主要受混凝土材料性能及梁结构影响, 为材料响应。在较低冲击速度下, 梁冲击力峰值随冲击速度增加而增大, 但当较高冲击速度(>4.85 m·s<sup>-1</sup>)时, 梁冲击力峰值与速度无关, 几乎不再继续增加。

研究结果对于RC梁抗冲击破坏分析模型的建立及设计具有参考意义。

#### 参考文献:

- [1] KISHI N, MIKAMI H, MATSUOKA KG, et al. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(9):955-968.
- [2] KISHI N, NISHI H, KONNO H, et al. A falling-weight impact test of large-scale RC slabs with two opposite edges simply supported[J]. Kozo Kogaku Ronbunshu A (Journal of Structural Engineering), 2011, 57:1181-1193.
- [3] SATO M, OYAMADA Y, TANIMOTO T, et al. 2158 dynamic behavior of RC columns subject to impact loading[J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 1997, 19:969-974.
- [4] 德光岸, 史雄田口, 浩三上, 等. Impact resistant behavior of bending failure type RC beams mixed with

- Vynylon short-fiber[J]. 构造工学论文集, 2005, 51: 1675-1686.
- [5] KISHI N, MIKAMI H, MATSUOKA K I G, et al. An empirical impact resistant design formula of RC beams with statically bending failure mode[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 2000, 647(647): 177-190.
- [6] JSCE. Japan Concrete Standard[S].
- [7] 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.
- [8] KISHI N, MIKAMI H. Empirical formulas for designing reinforced concrete beams under impact loading[J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(4):509-519.
- [9] ADHIKARY S D, LI B, FUJIKAKE K. Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 47(4):24-38.
- [10] GOLDSTON M, REMENNIKOV A, SHEIKH M N. Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading[J]. Engineering Structures, 2016, 113:220-232.
- [11] PHAM T, HAO H. Prediction of the impact force on reinforced concrete beams from a drop weight[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(11):1710-1722.
- [12] 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, 102:74-85.
- [13] OŽBOLT J, RAH KK, MEŠTROVIĆ D. Influence of loading rate on concrete cone failure[J]. International Journal of Fracture, 2006, 139(2):239-252.
- [14] 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.
- [15] TRAVAŠ V, OŽBOLT J, KOŽAR I. Failure of plain concrete beam at impact load: 3D finite element analysis [J]. International Journal of Fracture, 2009, 160(1):31-41.
- [16] MURRAY YD, ABUODEH A Y, BLIGH R P. Evaluation of LS-DYNA concrete material model 159[EB/OL]. [2016-10-15]. <http://www.docin.com/p-1454675818.html>.
- [17] MURRAY Y D. User's manual for LS-DYNA concrete material model 159[R]. McLean: Federal Highway Administration, 2007.

## On failure behavior of concrete and RC beam to different velocity impact

MEI Fu-lin<sup>1</sup>, DONG Xin-long<sup>1\*</sup>, YU Xin-lu<sup>1,2</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China )

**Abstract:** To investigate the change in failure mode of the reinforced concrete (RC) beams and its influencing factors under dynamic load, both experimental test and finite element analysis are conducted to identify the effect of the loading rate and reinforcement ratio on the failure behavior of light RC beams under drop-weight impact. The results show that: 1) the failure mode of RC beam is related to the longitudinal reinforcement ratio and loading rate, which varies from predominantly flexure to shear failure with the increasing impact velocity, and the punching shear is in the predominate failure pattern for beams under high speed impact ( $>10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  in this paper). Furthermore, the critical velocity of shear failure mode transformation increases with increasing longitudinal reinforcement ratio; 2) For the light RC beam, the peak of impact force increases with increasing loading rates under slow-impact velocity, but it does not noticeably change when impact speed is high ( $>4.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Moreover, the reinforcement ratio of RC beam has less effect on the peak impact load; 3) The variation tendency of the failure behavior and response of RC beam simulated by finite element model is in good agreement with the experimental results.

**Key words:** RC beam; drop-weight impact; failure pattern; finite element

(责任编辑 章践立)