

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0500

## 钢骨混凝土构件抗冲击性能试验研究\*

朱 翔<sup>1,2</sup>, 刘 宏<sup>2</sup>, 陆新征<sup>3</sup>, 王 蕊<sup>4</sup>

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210018;

2. 山西大学土木工程系, 山西 太原 030013;

3. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

4. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 利用超重型落锤试验机对钢骨混凝土构件进行了侧向冲击试验, 研究了落锤冲击钢骨混凝土构件的冲击全过程和最终的破坏形态; 分析了钢骨混凝土构件冲击力、位移和轴力时程曲线的特性; 对比了不同冲击速度、冲击能量、轴压和边界条件等因素对钢骨混凝土构件的动力响应的影响。结果表明: 钢骨混凝土构件在落锤冲击作用下外侧混凝土破坏严重, 且冲击能量越大, 外侧混凝土越易出现剪切破坏, 但内部钢筋和钢骨只发生了一定的弯曲变形, 表明钢骨混凝土构件抗冲击性能整体良好。本次试验参数范围内, 钢骨混凝土构件的冲击力和跨中位移随冲击速度增加而增大; 轴压力增大使钢骨混凝土构件的冲击力峰值增大, 冲击持时和跨中位移减小; 相对于固简支和两端简支的边界条件, 两端固支的边界对于钢骨混凝土构件的抗冲击性能提升最好。

**关键词:** 钢骨混凝土; 落锤冲击试验; 破坏形态; 动力响应

**中图分类号:** O383; TU398.9

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

钢骨混凝土构件具有承载力高、刚度大和延性好的特点, 其抗震性能和抗火性能也较好<sup>[1]</sup>。因此, 钢骨混凝土构件在高层结构、超高层结构和大跨空间结构等建筑中广泛使用。叶列平等<sup>[2]</sup>最早研究了钢骨混凝土柱的轴压比限值问题并进行了大量的静力试验研究。周颖等<sup>[3]</sup>对不同含钢率的钢骨混凝土连梁联肢剪力墙的抗震性能进行了试验研究。蒋晶<sup>[4]</sup>利用有限元软件 ABAQUS 对 T 形截面的异形钢骨混凝土柱侧向撞击性能进行了分析。张玲<sup>[5]</sup>对钢骨混凝土桥墩抗冲击性能进行了初步研究, 对三根角钢混凝土桥墩和两根槽钢混凝土桥墩进行了抗冲击试验。朱翔等<sup>[6]</sup>利用有限元软件 MSC.Marc 对结构中所使用的钢骨混凝土柱进行了抗冲击性能分析。以上研究表明钢骨混凝土构件的力学性能被广泛关注。

钢骨混凝土构件作为主要的承重构件在服役期间可能遭到汽车、火车和船舶等交通工具的撞击<sup>[7-9]</sup>, 从而导致其损伤或者破坏。而现阶段国内外研究者对构件的抗冲击试验研究主要集中于钢管混凝土构件、钢筋混凝土构件和钢骨混凝土桥墩等。Yousuf 等<sup>[10]</sup>对比研究了空心不锈钢钢管和不锈钢钢管混凝土柱的抗冲击性能。Han 等<sup>[11]</sup>研究了侧向撞击作用下钢管混凝土柱的抗冲击性能。朱翔等<sup>[12-13]</sup>对比研究了钢筋混凝土柱、外包钢管加固 RC 柱和新型截面复合柱的抗冲击性能。但是, 钢骨混凝土的冲击破坏模式与钢管混凝土构件和钢筋混凝土构件都有所不同, 需要深入研究对比。张南等<sup>[14]</sup>、陈佳佳等<sup>[15]</sup>最早对钢骨混凝土桥墩进行了水平撞击试验, 分析了其抗冲击性能, 但对比试件较少, 不具有普遍性。上述研究中对建筑结构中常用的钢骨混凝土构件抗冲击试验研究较少, 而钢骨混凝土构件作为建筑结构中主要的承重构件其抗冲击性能试验研究是十分必要的。

因此, 本文采用落锤试验机对钢骨混凝土构件进行侧向撞击试验, 通过变化冲击速度、轴压比和边界条件等参数对钢骨混凝土构件的抗冲击性能进行了深入研究, 进而对比分析了不同参数影响下钢骨混凝土构件的抗冲击性能, 从而全面掌握钢骨混凝土构件的抗冲击性能。

\* 收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题(CPCSME2016-11);  
国家自然科学基金(51578274); 山西省交通科研计划(2016-1-7)

第一作者: 朱 翔(1987—), 男, 博士, 副教授, zhuxiang@sxu.edu.cn。

# 1 试验概况

## 1.1 试件设计

本试验设计了 8 根完全相同的钢骨混凝土试件进行对比分析其抗冲击性能, 试件信息如表 1 所示。试件长度为 1 800 mm, 左侧支座固定试件长度为 225 mm, 右侧支座固定试件长度为 350 mm, 预留 25 mm 为自由端施加轴力, 则有效长度为 1 200 mm。本次试验中钢骨混凝土试件截面尺寸设计为 300 mm×300 mm。试件的内配十字型钢截面尺寸为 200 mm×100 mm×9 mm×6 mm, 纵筋直径 12 mm, 箍筋在支座加密区配置  $\phi 8@50$ , 跨中配置为  $\phi 8@100$ , 混凝土保护层厚度为 20 mm。型钢采用 Q345 低碳钢, 纵筋采用 HRB335 级钢筋, 箍筋采用 HPB300 级钢筋, 混凝土设计强度等级为 C40。试件左右两侧的钢盖板厚度为 20 mm, 以防止试件加载轴力时混凝土局部破坏。钢骨混凝土试件设计详图如图 1 所示。

表 1 钢骨混凝土试件信息及试验结果

Table 1 SRC specimen information and test results

试件编号	边界条件	$m/\text{kg}$	$N/\text{kN}$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$F_{\text{max}}/\text{kN}$	$F_{\text{stab}}/\text{kN}$	$T_d/\text{ms}$	$\Delta_{\text{cmax}}/\text{mm}$	$\Delta_{\text{cstab}}/\text{mm}$	$\Delta_{\text{rstab}}/\text{mm}$
SRC4	两端固支	1 158.7	340.4	5.42	10 932.02	2 524.77	10.40	13.67	5.00	5.36
SRC5	两端固支	1 158.7	340.4	7.67	12 489.50	3 780.58	21.97	27.43	15.43	13.02
SRC6	两端固支	1 158.7	340.4	9.39	14 936.49	3 977.93	31.93	34.18	20.65	20.10
SRC7	两端固支	1 158.7	680.8	5.42	-	-	-	14.23	3.94	5.00
SRC8	两端固支	1 158.7	680.8	7.67	12 600.27	3 429.33	19.93	25.35	13.00	12.76
SRC9	两端固支	1 158.7	680.8	9.39	15 426.77	4 259.52	25.93	32.55	19.50	21.00
SRC10	固简支	1 158.7	0	9.39	12 880.98	1 703.57	43.93	46.13	30.00	22.28
SRC11	两端简支	1 158.7	0	9.39	12 281.95	1 648.84	47.93	59.00	42.50	40.96

注:  $m$  为冲击质量;  $N$  为所施加的轴力;  $v$  为冲击速度;  $F_{\text{max}}$  为冲击力峰值;  $F_{\text{stab}}$  为冲击力平台值;  $T_d$  为冲击力持续时间;  $\Delta_{\text{cmax}}$  为高速摄影测得试件跨中位移最大值;  $\Delta_{\text{cstab}}$  为高速摄影测得试件跨中残余位移值;  $\Delta_{\text{rstab}}$  为高度尺测得试件跨中残余位移值。

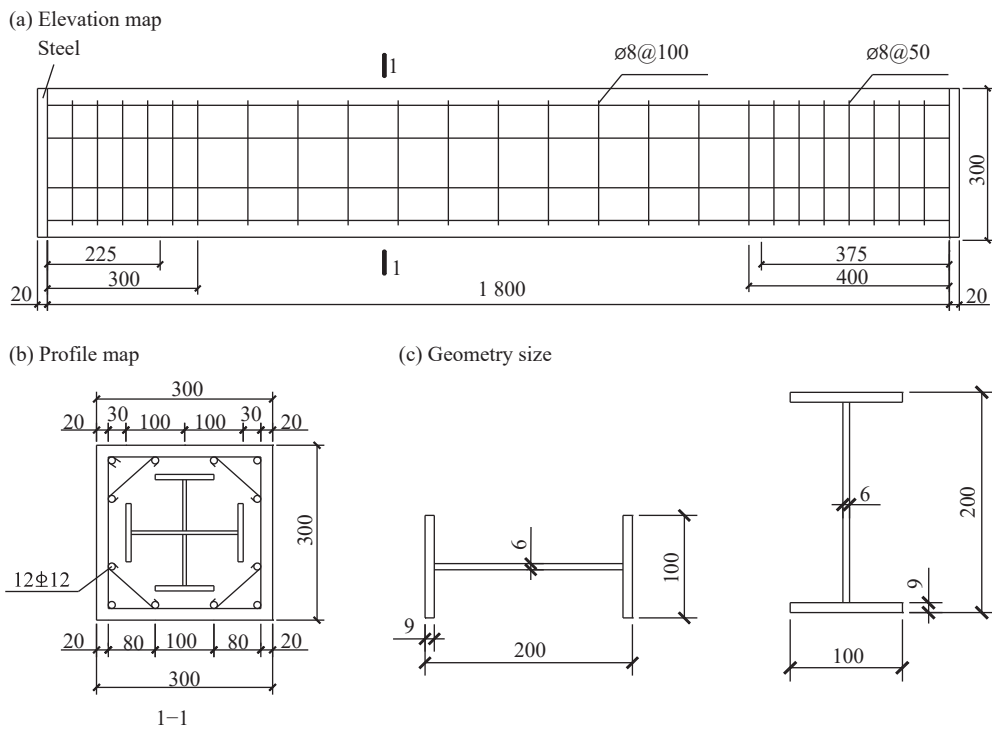


图 1 钢骨混凝土试件设计详图(单位: mm)

Fig. 1 Design details of SRC specimen (unit: mm)

### 1.2 材料力学性能

每个钢筋混凝土试件进行浇筑的同时预留 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试块, 在进行钢筋混凝土抗冲击试验的同时测得混凝土立方体抗压强度为 44.84 MPa。采用标准拉伸试验方法, 测得钢筋混凝土构件所用 H 型钢和钢筋的相关力学性能参数, 如表 2 所示。

表 2 钢材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the steel

钢材类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
6 mm 钢板	427.0	625.3	210	22.2
9 mm 钢板	358.2	529.4	203	23.0
12 mm 纵筋	362.3	543.5	212	23.2
8 mm 箍筋	370.2	525.7	216	20.8

### 1.3 试验装置

试验在超重型落锤试验机上完成, 试验装置如图 2 所示。该试验机有效高度为 5 m, 相应冲击速度为 9.9 m/s, 落锤总质量可达到 1.16 t, 为国内外同类落锤试验装置中最重落锤质量。本次试验最大冲击速度为 9.39 m/s, 这是根据文献 [16] 中列车脱轨后侧向撞击站房柱的横向撞击速度确定的。试验中落锤总质量恒定为 1 158.7 kg (约为 1.16 t), 锤头底部为长方体 (300 mm×300 mm×200 mm), 锤头底部与试件冲击接触面为 300 mm×300 mm 的正方形, 具体尺寸见表 3 和图 3。冲击位置为试件有效长度的中点处。运用高速摄影采集跨中的挠度时程曲线, 采集速度为 3 000 帧/秒。轴力通过 200 t 液压千斤顶首先施加在蝶形弹簧上, 再通过蝶形弹簧施加到试件上。蝶形弹簧在试件遭受冲击的过程中可以通过储存的弹性势能使其一直加载在试件上。

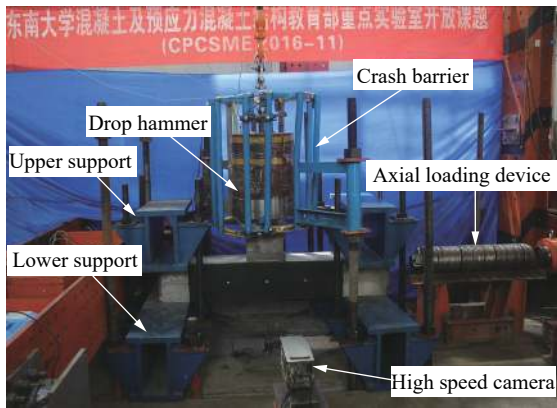


图 2 超重型落锤试验装置

Fig. 2 Super heavy drop weight test equipment

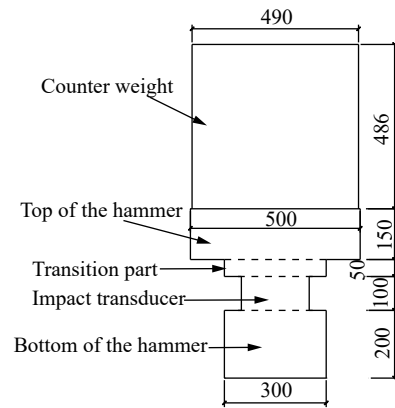


图 3 落锤示意图(单位: mm)

Fig. 3 Illustration of drop weight (unit: mm)

表 3 落锤具体尺寸

Table 3 Specific size of drop weight

名称	形状	底面直径/mm	底面尺寸/mm	高度/mm	质量/kg
配重	圆柱体	490	-	486	719.43
锤头顶	圆柱体	500	-	150	231.20
过渡部位	长方体	-	300×300	50	35.33
传感器	长方体	-	200×200	100	31.40
锤头底部	长方体	-	300×300	200	141.30
总质量					1 158.70

## 2 试验结果

### 2.1 冲击过程

通过高速摄影对钢筋混凝土柱的冲击全过程进行追踪,掌握落锤冲击钢筋混凝土柱的各个过程。以试件 SRC6 为例,冲击全过程如图 4 所示。落锤冲击试件前试件 SRC6 在轴力和支座约束下保持静止状态(图 4(a)),而后落锤下落,试件与落锤瞬间接触(图 4(b))。在超重型落锤的巨大冲击能量作用下试件同时出现剪切斜裂缝和弯曲裂缝(图 4(c)),落锤和试件一起向下运动,直到试件达到一定变形量时试件和落锤发生反弹(图 4(d)),试件的反弹量较小,而落锤反弹位移较大(图 4(e))。最后落锤反弹与防撞护栏接触后缓慢落下后与试件最终静止(图 4(f))。

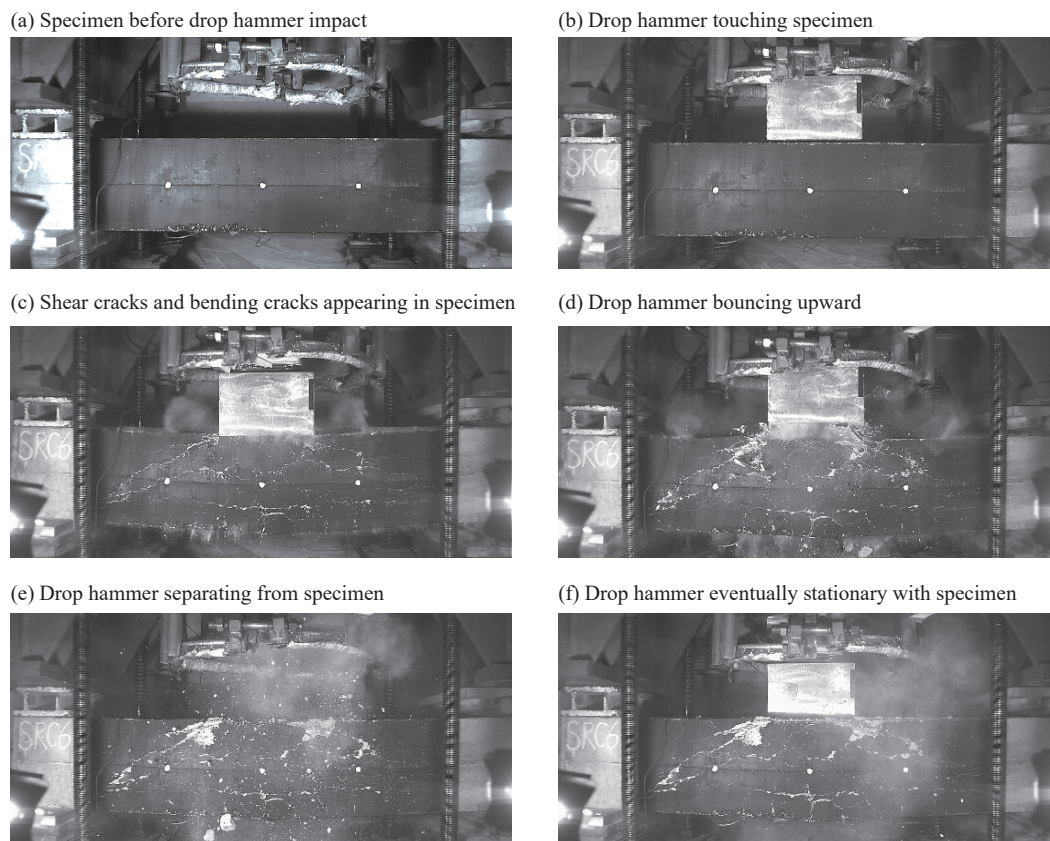


图 4 试件 SRC6 冲击全过程

Fig. 4 Impact process for SRC6

### 2.2 冲击力

冲击力时程曲线如图 5 所示。由图 5 可知,较大截面尺寸的钢筋混凝土试件在超重型落锤冲击下造成的冲击力峰值都较大;而冲击力平台值相对于冲击力峰值衰减了很多,这是由于外侧混凝土破坏导致冲击力平台值变得较小;钢筋混凝土冲击力时程曲线经历了峰值段、平台段和下降段。

### 2.3 跨中位移

跨中位移时程曲线如图 6 所示。由图可见,冲击速度越大跨中位移也随之越大;不同边界条件对试件的跨中位移时程曲线也有较大影响,两端简支试件跨中挠度最大,其次为固简支试件,两端固支试件跨中位移最小。结合表 1 和图 6 可知,无论高速摄影还是高度尺所测得的跨中残余位移规律一致,且两者所测得的跨中残余位移误差都较小。



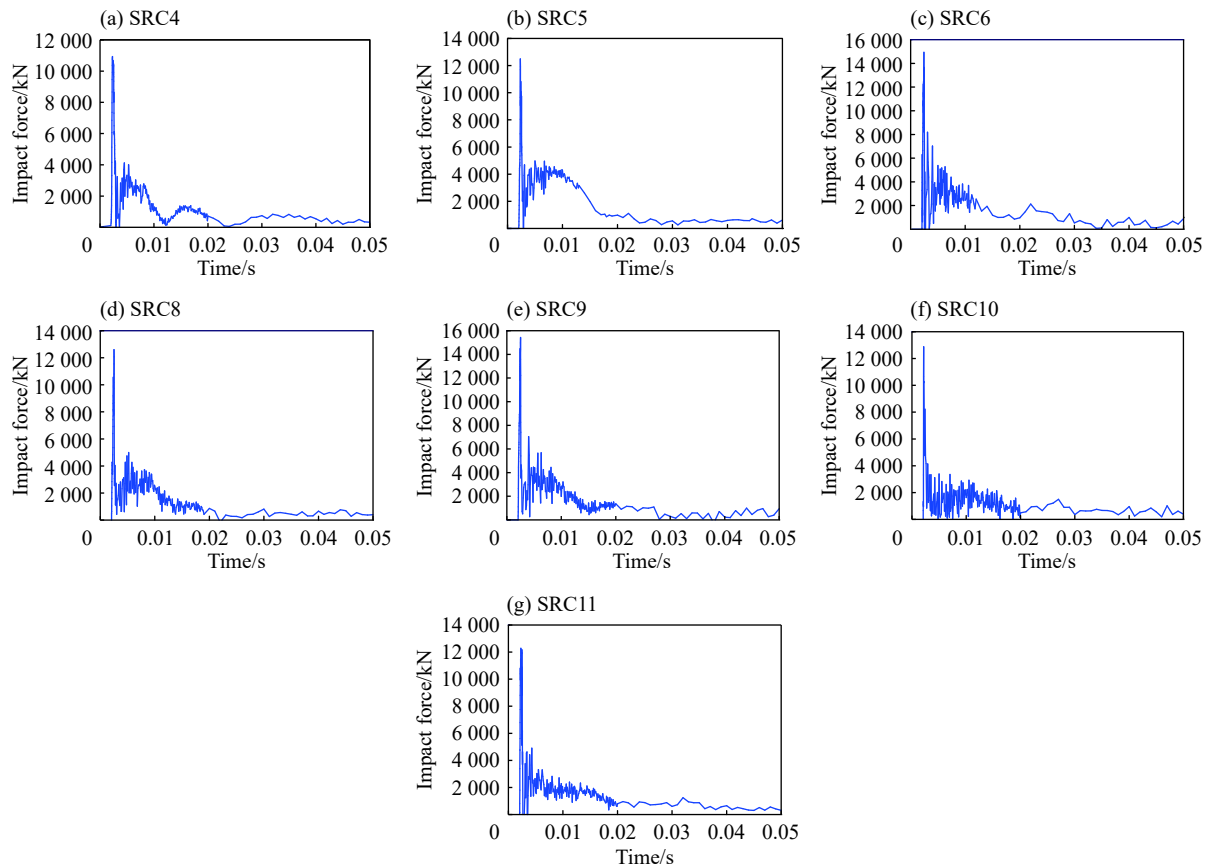


图 5 SRC6 构件冲击力时程曲线

Fig. 5 Time history curves of impact load of SRC6 specimen

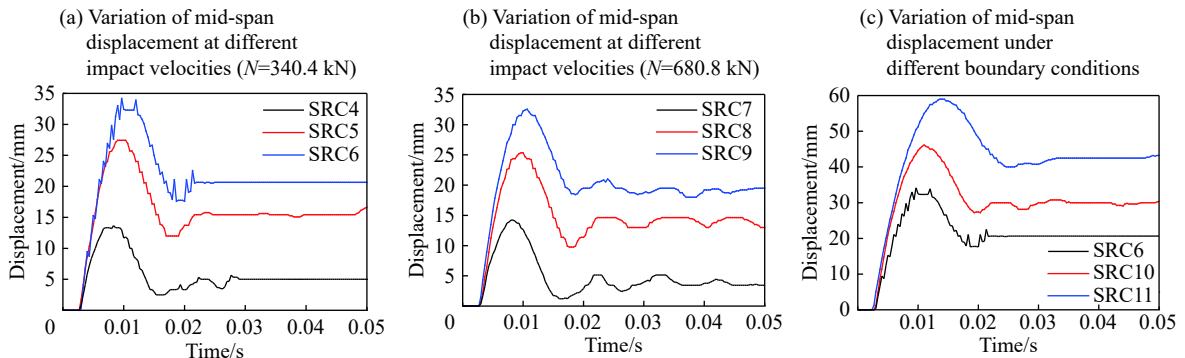


图 6 SRC 构件跨中位移时程曲线

Fig. 6 Time history curves of mid-span displacement of SRC specimen at different impact velocities and under different boundary conditions

### 2.4 轴压力

轴压时程曲线如图 7 所示。由图可见, 落锤冲击试件后轴力突然有小幅提升, 这是由于落锤冲击试件后, 冲击波从跨中向两侧端部转递, 导致轴力有小幅增大; 但由于钢骨混凝土构件外侧混凝土破坏严重且落锤撞击导致构件发生整体弯曲变形, 使构件向跨中收缩, 这样导致轴力发生明显的卸载直到最终平稳; 试件 SRC4 轴力卸载 4.1%, SRC5 轴力卸载 7.5%, SRC6 轴力卸载 15.3%, SRC8 轴力卸载 8.9%, SRC9 轴力卸载 22.8%, 这说明冲击速度越大轴力卸载越明显, 轴压力越大轴力卸载也越明显。

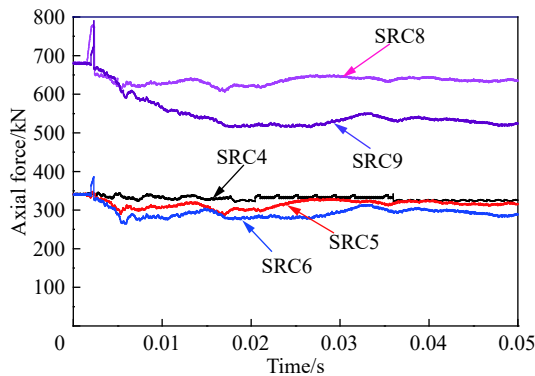


图 7 轴压时程曲线

Fig. 7 Time history curves of axial pressure

### 2.5 破坏形态

落锤在不同冲击速度下撞击钢筋混凝土构件的破坏形态如图 8 所示。由图 8 可知,在冲击质量相同的情况下,随着冲击速度的增加,即冲击能量增加,钢筋混凝土构件外侧的混凝土破坏明显,尤其冲击速度为 9.39 m/s(冲击能量为 51.08 kJ)时,试件上部冲击接触区混凝土剥落范围较大且损害严重,同时试件出现明显的剪切斜裂缝。因此,冲击能量越大试件越容易出现剪切破坏。

不同轴压力下落锤冲击钢筋混凝土构件后的破坏形态如图 9 所示。由图 9 可知,本次试验

范围内,在相同的冲击能量下(即冲击质量和冲击速度都相同),轴压力越大,试件的剪切裂缝越明显,受拉区的弯曲裂缝越少。对比试件 SRC6 和试件 SRC9 可知,试件 SRC6 的弯曲变形更明显,说明在一定的轴压力范围内,轴力越大抗弯承载力越大。

(a) Specimen SRC7 ( $v=5.42$  m/s,  $E=17.02$  kJ)



(b) Specimen SRC8 ( $v=7.67$  m/s,  $E=34.08$  kJ)



(c) Specimen SRC9 ( $v=9.39$  m/s,  $E=51.08$  kJ)

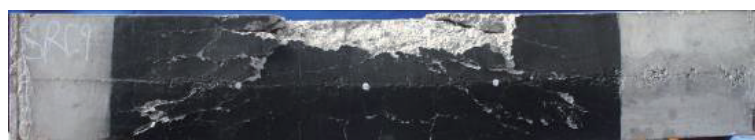


图 8 不同冲击速度下构件破坏形态

Fig. 8 Failure models of SRC at different drop hammer impact velocities

(a) Specimen SRC6 ( $N=340.4$  kN)



(b) Specimen SRC9 ( $N=680.8$  kN)

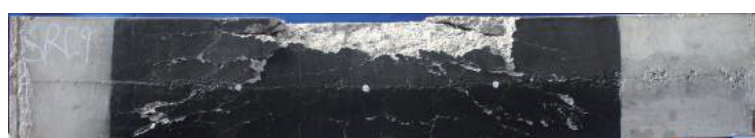


图 9 不同轴压力下落锤冲击后构件破坏形态

Fig. 9 Failure models of SRC under different axial load by drop hammer

不同边界条件下落锤冲击钢骨混凝土构件后的破坏形态如图 10 所示。由图 10 可知, 在相同的冲击条件下, 落锤冲击后两端简支的试件破坏最为严重, 其次为固简支的试件, 两端固支的试件破坏程度相对于前两种支座要好; 3 个试件的剪切斜裂缝和弯曲裂缝都很明显, 其中两端简支的试件弯曲变形最为明显, 其次为固简支试件, 最后为两端固支的试件。

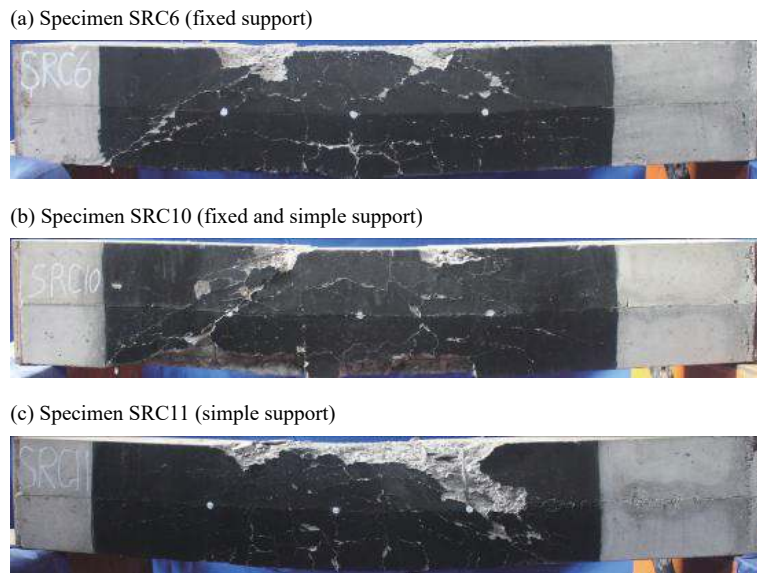


图 10 不同边界条件下落锤冲击后构件破坏形态

Fig. 10 Failure models of SRC under different boundary conditions by drop weight

总体看来, 钢骨混凝土构件整体抗冲击性能良好, 内部钢筋和钢骨只发生了弯曲变形。但在超重型落锤的巨大冲击能量作用下构件外侧混凝土会出现多道斜剪切裂缝且主要以剪切破坏为主, 而相比与冲击能量较小的落锤试验机冲击钢筋混凝土柱<sup>[12]</sup>和外侧为混凝土的钢管混凝土叠合柱<sup>[17]</sup>时主要以受弯破坏为主。

### 3 试验参数分析

#### 3.1 冲击速度的影响

落锤冲击速度变化对钢骨混凝土构件动力响应的影响如图 11 所示。由图 11 可知, 随着冲击速度的增加钢骨混凝土构件的冲击力峰值、冲击力平台值、冲击持时和跨中最大挠度也随之增加。冲击速度对于钢骨混凝土构件的动力响应影响较大且全面, 越大的冲击速度也越容易使试件发生破坏。

#### 3.2 轴压的影响

轴压力变化对钢骨混凝土构件动力响应的影响如图 12 所示。由图 12 可知, 在本次试验轴力范围内, 轴压力增加, 冲击力峰值也随之增加, 而冲击持时随之减少, 冲击力平台值的规律不明显, 有增有减; 轴压力增加, 试件跨中位移最大值基本上随之减小, 这是由于在较小轴压力范围内, 轴力使试件抗弯承载力有所提高。

#### 3.3 边界条件的影响

边界条件变化对钢骨混凝土构件动力响应的影响如图 13 所示。由图 13 可知, 其他条件都相同的情况下, 两端简支试件的冲击力峰值和平台值要小于固简支试件的冲击力峰值和平台值, 但冲击力持时和跨中最大位移情况相反; 相同冲击速度下, 两端固支试件的冲击力峰值和平台值要明显大于固简支试件和两端简支试件的冲击力峰值和平台值, 相应的冲击持时和跨中最大位移正好情况相反。总体而言, 试件边界条件越强, 其冲击力峰值和平台值越大, 冲击持时和跨中位移越小。

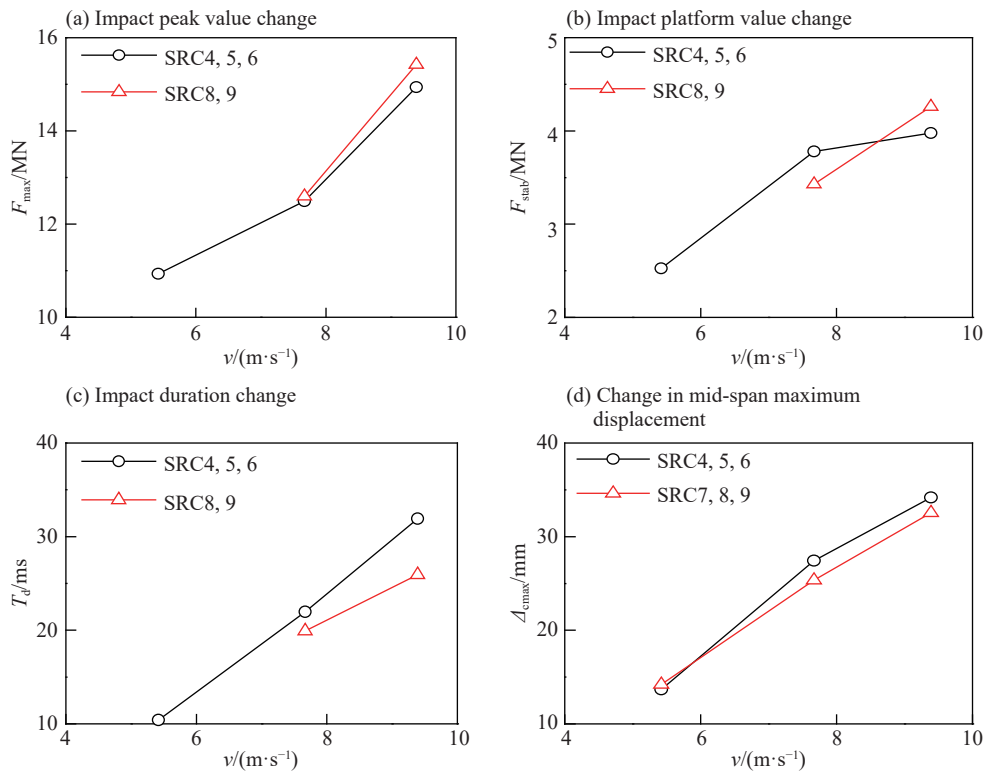


图 11 冲击速度的影响

Fig. 11 Effect of impact velocity

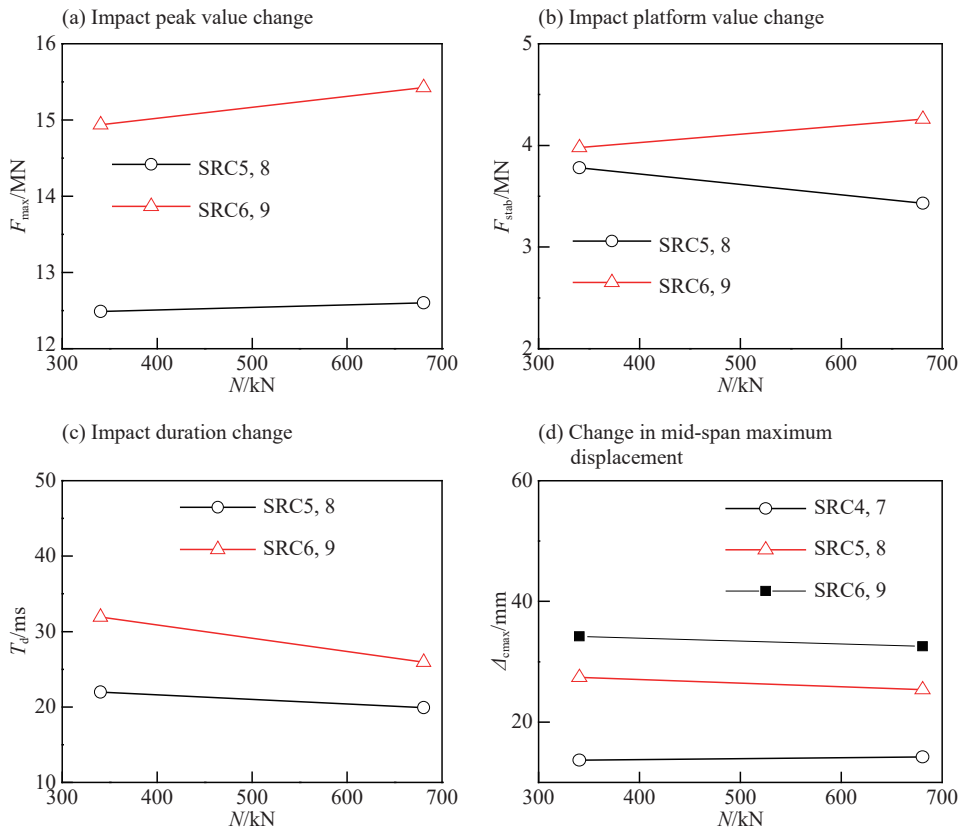


图 12 轴压的影响

Fig. 12 Effect of axial pressure



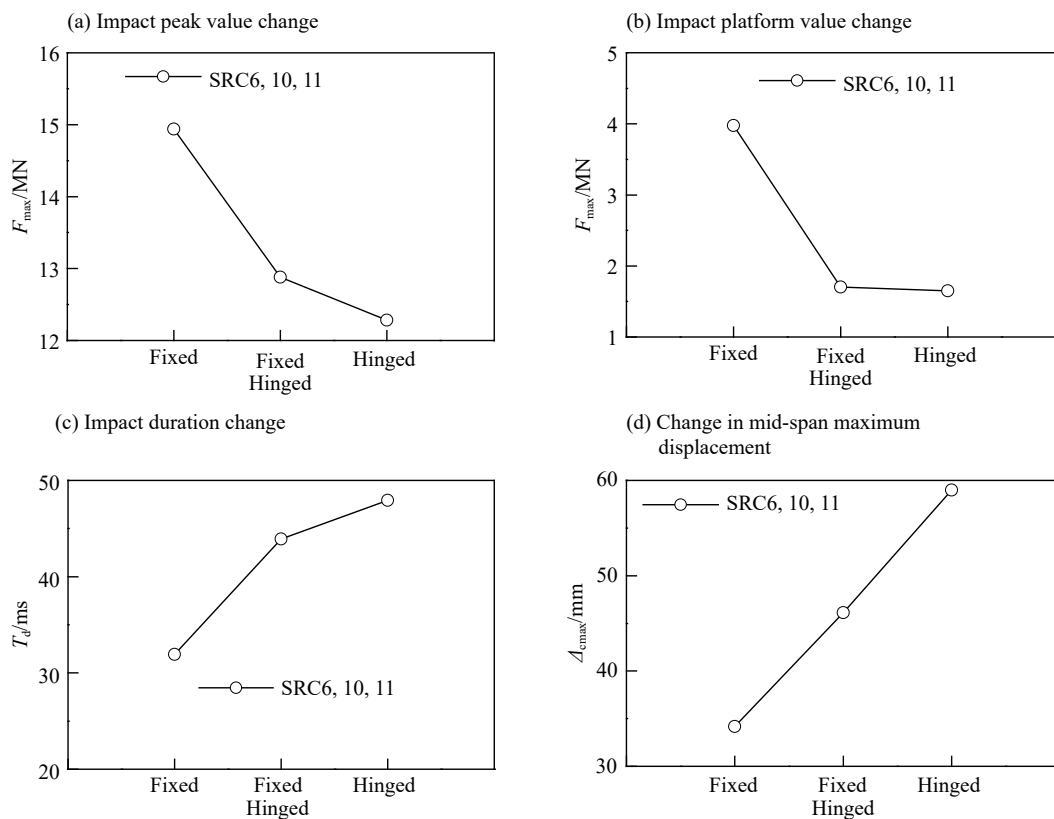


图 13 边界条件的影响

Fig. 13 Effect of boundary conditions

## 4 结 论

本文利用超重型落锤试验机对钢骨混凝土构件进行了抗冲击试验,在试验参数范围内得到以下结论:

(1) 落锤冲击作用下钢骨混凝土构件会产生弯曲变形和剪切变形,但随着冲击能量增大,构件外侧混凝土主要以剪切破坏为主;

(2) 冲击速度对于钢骨混凝土构件的动力响应影响较大且全面,随着冲击速度增加,冲击力峰值、平台值、持时和跨中位移也随之增大;冲击速度越快轴压力卸载也越明显;且冲击速度的增大使落锤冲击能量增大更快,导致钢骨混凝土构件的破坏越严重;

(3) 本文试验较小的轴压力范围内(340.4 kN~680.8 kN),冲击能量相同的情况下,轴力越大钢骨混凝土构件的抗弯承载力也越大,具体表现为随着轴力增大构件受拉区混凝土的弯曲裂缝随之减少,跨中最大位移和残余位移也随之减小;

(4) 两端固支的边界条件对于钢骨混凝土构件的抗冲击性能提升最为明显,其次为固简支边界,最差为两端简支的边界;

(5) 本文试验中两端固支的钢骨混凝土构件(SRC)的冲击力平台值所占冲击力峰值的比例范围为23.1%~30.27%,相比于钢管混凝土构件(CFST),钢骨混凝土构件(SRC)的冲击力平台值较冲击力峰值衰减了很多。

## 参考文献:

- [1] 叶列平,方鄂华. 钢骨混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 1-12. DOI: 10.15951/

- j.tmgcxb.2000.05.001.
- YE Lieping, FANG Ehua. State of the art of study behaviors of steel reinforced concrete structure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(5): 1–12. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2000.05.001.
- [2] 叶列平, 方鄂华, 周正海, 等. 钢筋混凝土柱的轴压力限值 [J]. *建筑结构学报*, 1997, 18(5): 43–50. DOI: 10.14006/j.jz.jgxb.1997.05.005.
- YE Lieping, FANG Ehua, ZHOU Zhenghai, et al. Axial load limit for steel reinforced concrete columns [J]. *Journal of Building Structures*, 1997, 18(5): 43–50. DOI: 10.14006/j.jz.jgxb.1997.05.005.
- [3] 周颖, 缪驰, 闫峰, 等. 钢管混凝土连梁联肢剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(3): 36–45. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.03.005.
- ZHOU Ying, MIAO Chi, YAN Feng, et al. Experimental study and FEA of seismic performance of coupled shear walls with steel reinforced concrete coupling beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(3): 36–45. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.03.005.
- [4] 蒋晶. 异形钢管混凝土柱侧向抗冲击性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
- JIANG Jing. Research on resistance to lateral impact properties of the special-shaped steel reinforced concrete columns [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.
- [5] 张玲. 钢管混凝土桥墩静动响应研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2015.
- ZHANG Ling. Research on static and dynamic response of steel reinforced concrete bridge piers [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2015.
- [6] 朱翔, 曹瑞东, 康婷婷, 等. 侧向冲击荷载作用下钢管混凝土柱抗冲击性能研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2017(04): 161–170. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2017.04.023.
- ZHU Xiang, CAO Ruidong, KANG Tingting, et al. Study on the impact resistance of steel reinforced concrete columns under lateral impact loads [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017(04): 161–170. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2017.04.023.
- [7] PAN J, FANG H, XU M C, et al. Study on the performance of energy absorption structure of bridge piers against vehicle collision [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 85–100. DOI: 10.1016/j.tws.2018.05.008.
- [8] 朱翔, 陆新征, 杜永峰, 等. 列车脱轨后运行姿态模拟 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(23): 126–130. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.23.026.
- ZHU Xiang, LU Xinzhen, DU Yongfeng, et al. Simulation for running attitude of a train after derailment [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(23): 126–130. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.23.026.
- [9] GHOLIPOUR G, ZHANG C, LI M. Effects of soil–pile interaction on the response of bridge pier to barge collision using energy distribution method [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(11): 1–15. DOI: 10.1080/15732479.2018.1450427.
- [10] YOUSUF M, UY B, TAO Z, et al. Transverse impact resistance of hollow and concrete filled stainless steel columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 82: 177–189. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.01.005.
- [11] HAN L H, HOU C C, ZHAO X L, et al. Behaviour of high-strength concrete filled steel tubes under transverse impact loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 92: 25–39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.09.003.
- [12] 朱翔, 陆新征, 杜永峰, 等. 外包钢管加固 RC 柱抗冲击试验研究 [J]. *工程力学*, 2016, 33(6): 23–33. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.0991.
- ZHU Xiang, LU Xinzhen, DU Yongfeng, et al. Experimental study on impact resistance of RC columns strengthened with steel jacket [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(6): 23–33. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.0991.
- [13] 朱翔, 陆新征, 杜永峰, 等. 新型复合柱抗冲击试验研究及有限元分析 [J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 158–166. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.0153.
- ZHU Xiang, LU Xinzhen, DU Yongfeng, et al. Experimental study and finite element analysis of impact resistance of novel composite columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 158–166. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.0153.
- [14] 张南, 王慧, 陈旭, 等. 钢管混凝土桥墩抗撞击性能试验研究 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30(11): 99–107. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.11.010.
- ZHANG Nan, WANG Hui, CHEN Xu, et al. Experimental research on impact performance of steel reinforced concrete bridge piers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(11): 99–107. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.11.010.

- [15] 陈佳佳, 张南, 巫业双, 等. 内置钢骨形式对混凝土桥墩撞击性能影响研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(1): 72–80. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2018.01.010.  
CHEN Jiajia, ZHANG Nan, WU Yeshuang, et al. Research on influence of embedded steel skeleton form on impact performance of concrete piers [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(1): 72–80. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2018.01.010.
- [16] 朱翔. 脱轨列车撞击站房结构的非线性响应及连续倒塌研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.  
ZHU Xiang. Nonlinear response and progressive collapse research of railway station due to the impact of derailed trains [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [17] 胡昌明, 韩林海. 圆形钢管混凝土叠合构件抗冲击性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2016(10): 11–17. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.10.004.  
HU Changming, HAN Linhai. Experimental behavior of circular concrete-encased concrete-filled steel tubes under lateral impact [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016(10): 11–17. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.10.004.

## Experimental study on impact resistance of steel reinforced concrete members

ZHU Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>, LU Xinzhen<sup>3</sup>, WANG Rui<sup>4</sup>

(1. *Key Laboratory of Concrete and Pre-stressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210018, Jiangsu, China;*

2. *Department of Civil Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi, China;*

3. *Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

4. *College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

**Abstract:** In this work we carried out a lateral impact test of steel reinforced concrete (SRC) members using a super heavy drop weight impact tester, studied the whole process of impact and the ultimate failure mode of drop weight impacted SRC members, and analyzed the time history curves of the impact force, the displacement and the axial force, with the effects of different impact velocities, impact energies, axial pressures and boundary conditions on the dynamic response of SRC members compared. The following results were achieved: the outer concrete of the SRC members is seriously damaged under drop weight impact; the larger the impact energy of the drop weight, the more likely the shear failure of the outer concrete; the internal rebar and H-shaped steel only have a limited bending deformation; and the impact resistance of SRC is generally good. Within the parameters of this test, the impact force and the mid-span displacement of SRC increase with the increase of the impact velocity; the increase of the axial pressure increases the peak value of the impact of SRC, and the impact time and mid-span displacement decrease. Compared with the boundary conditions of one fixed end, one simply supported end and the two simple supported ends, the boundary of the two fixed ends is the best for the impact resistance of SRC.

**Keywords:** steel reinforced concrete; drop weight impact experiment; failure mode; dynamic response

(责任编辑 王易难)