

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0119

侧向撞击荷载作用下内八边形空心钢筋混凝土柱的动力响应*

陈亮廷, 王蕊

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 相比于实心钢筋混凝土柱, 空心钢筋混凝土柱具有自重轻和截面扩展好等优点, 被广泛地用作桥墩, 由此其不可避免地会受到船舶的撞击。本文中进行 6 根内八边形空心钢筋混凝土柱和 4 根内衬八边形钢管空心钢筋混凝土柱的动力响应的实验。在实验中记录了构件破坏形态、撞击力时程曲线和跨中位移时程曲线, 并从撞击高度、边界条件和钢板厚度等方面分析了构件的耐撞性能。结果表明: 内八边形钢筋混凝土柱和内衬八边形钢管空心钢筋混凝土柱在撞击荷载作用下的破坏形态主要分为两种破坏类型, 分别为局部型破坏和整体型破坏; 撞击高度越大构件破坏越严重; 两端固定对构件的耐撞性能有提升作用; 钢管厚度对构件的耐撞性能有较明显的提升作用。

关键词: 空心钢筋混凝土柱; 动力响应; 耐撞性能; 破坏形态

中图分类号: O389; TU375.3

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

近些年来, 世界范围内地震频发, 汽车和列车脱轨撞击桥墩会造成重大损失。空心钢筋混凝土柱(见图 1(a))相比于实心钢筋混凝土柱可以有效提高稳定性。钢管空心钢筋混凝土柱(见图 1(b))既可以提高柱子的稳定性又可以提高柱子的耐撞击性能。Wang 等^[1]、王蕊等^[2]、任够平等^[3]进行了一系列钢管混凝土梁在侧向撞击下的动力响应研究。

张瑞坤等^[4]研究了钢筋混凝土柱在三角形脉冲荷载下的动力响应研究。冯宇等^[5]研究了配筋率对混凝土柱抗侧向抗冲击性能的关系。Han 等^[6]通过试验并模拟了高强钢管混凝土构件横向冲击, 通过参数分析并建立了钢管混凝土构件在冲击荷载作用下的抗弯承载力简化模型。朱翔等^[7]对外包钢管加固 RC 柱进行了冲击试验研究和数值理论研究。周泽平等^[8]进行了低速撞击下钢筋混凝土梁的变形和破坏的试验研究。田力等^[9]研究了钢筋混凝土柱在撞击荷载下的损伤评估和防护方法。Thilakarathna 等^[10]对钢筋混凝土轴压柱侧向冲击荷载下动力特性和损伤程度进行了研究。Fujikake 等^[11-12]对钢筋混凝土梁的抗冲击性能进行了一系列的研究。Al-Thairy 等^[13]对不同轴压比的钢柱在横向撞击下的试验和理论研究。Rememikov^[14]、Bambach 等^[15-16]、Yousuf 等^[17]进行了不锈钢钢管混凝土构件和普通钢管混凝土构件在落锤撞击试验下的冲击性能研究。

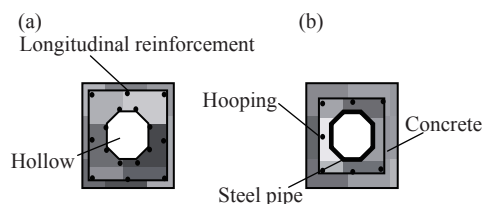


图 1 空心混凝土柱

Fig. 1 Hollow concrete

1 试验方案

1.1 试验装置

试验在太原理工大学结构实验室自主研发的大型落锤试验机上完成, 如图 2 所示。落锤试验机主

* 收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-09-17

基金项目: 山西省应用基础研究项目(201701D211006); 山西省高等学校科技创新项目(2017130)

第一作者: 陈亮廷(1992—), 男, 硕士研究生, 2814365559@qq.com;

通信作者: 王蕊(1979—), 女, 教授, wangrui@tyut.edu.cn。

要由顶部大梁、电葫芦吊机、脱钩器、锤体、锤头以及落锤防护装置等组成,冲击力传感器安装在锤体和锤头之间,组成落锤。通过控制电葫芦吊机控制落锤升降,通过激光测距仪来控制高度,通过脱钩器控制落锤的释放。通过液压千斤顶施加轴力。落锤尺寸如表 1 所示,试验装置如图 3 所示。

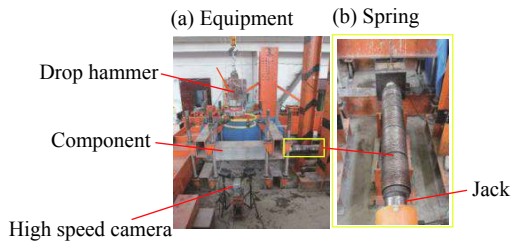


图 2 落锤冲击试验装置

Fig. 2 Drop-weight impact test setup

表 1 落锤参数

Table 1 Parameters of drop-weight

名称	直径/mm	高度/mm	质量/kg
锤体	490	486	719.43
锤头顶部	490	150	221.20
冲击力传感器	300	150	82.90
锤头底部	450	100	124.37

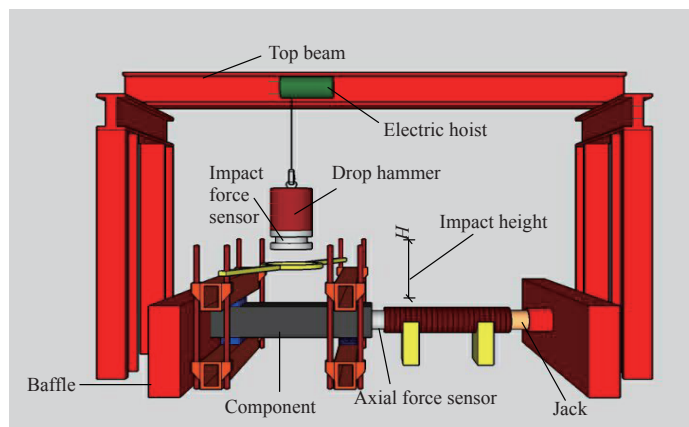


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic illustration of testing setup

落锤最大提升高度为 5.0 m,落锤总质量为 1.15 t(国内最大)。落锤试验机具体操作过程:首先用钩子吊住落锤;然后,在脱钩器内插入安全销子;使用遥控器缓缓提升落锤,并在提升中使用激光测距仪控制落锤距离构件表面的高度,等待落锤基本无晃动后,将安全销子从脱钩器内拉出,再次等待落锤基本无晃动后,迅速拉动脱钩器释放落锤。本次试验中落锤质量保持不变。

1.2 试件材料

试件材料的材料参数如表 2 所示。

1.3 试件尺寸

为了和实际工程更加接近,本次试验的构件设计长 1 800 mm,净跨 1 200 mm,截面尺寸 400 mm×400 mm,内八边形空心钢筋混凝土柱构件(图 4)箍筋间距在支座处为 25 mm,支座过渡段为 50 mm,在中间为 100 mm;内衬八边形钢管空心钢筋混凝土柱构件(图 5)箍筋间距在支座处为 50 mm,在中间为 100 mm,钢管厚度(T)分别为 2 mm 和 3.91 mm。

1.4 试验过程及结果

本试验过程中记录了撞击力时程曲线和跨中位移时程曲线,并观测了构件的最终破坏形态。其中,撞击力时程曲线由固定在钢锤中间的力传感器记录,数据采集系统采用 NIPX1e-1006Q 型号,通过

表 2 试件材料几何尺寸和性质

Table 2 Specimen geometry and material properties

名称	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	壁厚/mm
钢管	-	304.0	457.0	2.00
钢管	-	304.0	457.0	3.91
纵筋	15.6	455.5	641.6	-
箍筋	7.7	475.3	670.0	-

LabView Signal Express 软件进行采集; 跨中位移时程曲线通过高速摄像机对冲击过程中观测点的追踪进行记录, 拍摄速度取为 $4\,000\text{ s}^{-1}$ 。构件的试验结果记录如表 3 所示。

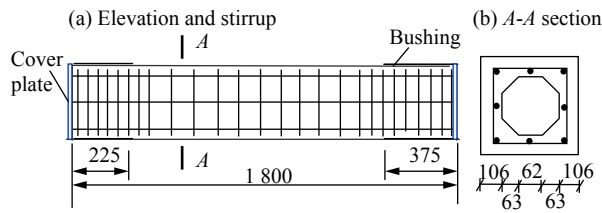


图 4 内八边形空心钢筋混凝土柱

Fig. 4 Inner octagonal hollow reinforced concrete column

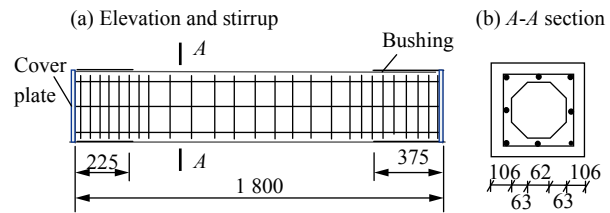


图 5 内衬八边形钢管空心钢筋混凝土柱

Fig. 5 Inner octagonal hollow steel tube reinforced concrete column

表 3 试件编号和试验结果

Table 3 Experimental results

试件编号	冲击高度/mm	冲击能量/J	力峰值/MN	残余挠度/mm	跨中底部实验前高度/mm	跨中底部实验后高度/mm
FF-2	2 000	2.25×10^4	25.56	9	400	391
FF-5	5 001	5.63×10^4	67.00	40	398	358
FS-2	2 000	2.25×10^4	12.69	6	398	392
FS-5	4 999	5.63×10^4	17.82	50	394	347
SS-2	2 001	2.25×10^4	12.33	11	400	389
SS-5	5 002	5.63×10^4	31.67	52	397	345
TFF-2	2 001	2.25×10^4	10.53	6	398	392
TFF-5	5 000	5.63×10^4	16.46	29	397	368
RSS-2	2 001	2.25×10^4	13.06	7	397	390
RSS-5	5 000	5.63×10^4	29.61	37	397	360

注: FF、FS、SS 分别代表两端固定、一端固定一端简支以及两端简支; 数字 2 和 5 分别表示冲击高度(H)为 2 m 和 5 m; T 和 R 分别表示钢管厚度(T)为 3.91 mm 和 2 mm; FS5 表示试件一端固定一端简支, 冲击高度为 5 m 的工况; TFF5 表示两端固支, 钢管厚度为 3.91 mm, 冲击高度为 5 m 的工况。

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

结合撞击试验后构件破坏的形貌如图 6 所示, 本次试验的破坏形态分为局部型破坏 (I 型) 和整体型破坏 (II 型), 如图 7 所示。

I 型: 落锤与构件撞击位置局部压裂, 落锤边缘与支座之间柱腹部混凝土拉应变达到混凝土的极限拉应变值时, 混凝土沿主压应力线开裂形成腹剪斜裂缝, 构件的下侧混凝土在弯矩作用下产生竖向裂缝。

II 型: 落锤与构件撞击位置发生严重压碎, 落锤能量大, 落锤边缘与支座之间柱腹部混凝土因为抗压能力不足迅速发生斜压破坏, 混凝土剥落严重, 钢筋裸露, 形成较宽的斜压破坏区。构件的下侧混凝土在弯矩和剪力作用下产生竖向裂缝和横向裂缝。

试件在承受某一能量 E_1 撞击时, 试件此时的混凝土开始形成腹剪斜裂缝, 试件开始丧失承载能力, E_1 称为试件的撞击开裂极限能量。试件在承受某一能量 E_2 撞击时, 试件此时的混凝土形成大量腹剪斜裂缝, 试件急剧丧失承载能力, 开始出现斜压破坏区, E_2 称为试件的撞击极限能量。

(1) 当撞击高度 $H=2\text{ m}$ 时, 落锤的撞击能量为 $22\,540\text{ J}$, $E_1 < 22\,540\text{ J} < E_2$, 试件的破坏形态为 I 型; $H=5\text{ m}$ 时, 落锤的撞击能量为 $56\,350\text{ J}$, $E_2 < 56\,350\text{ J}$, 试件的破坏形态为 II 型。

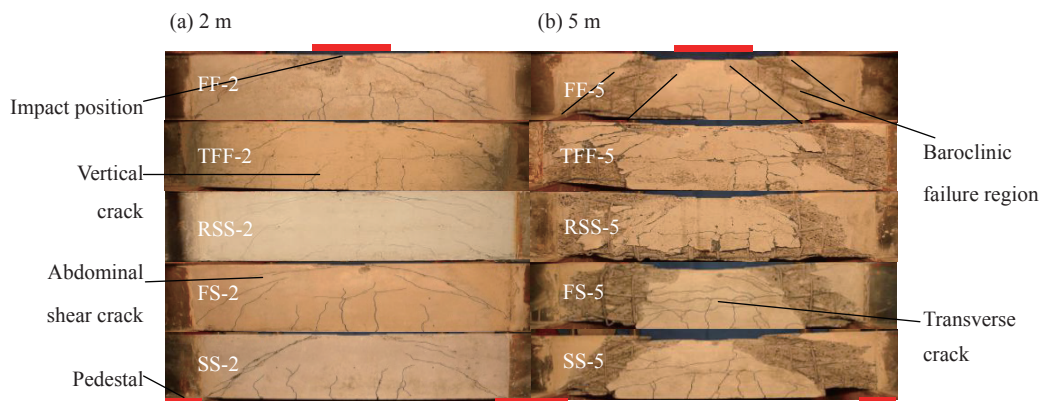


图 6 试验后构件破坏形态

Fig. 6 Failure mode of tested specimens

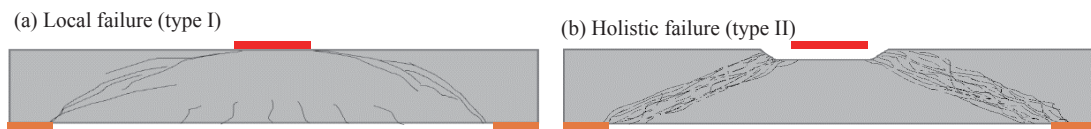


图 7 构件破坏简化图

Fig. 7 Illustration of the failure of specimen

(2) 当撞击高度 $H=5$ m, 边界条件相同时, 钢管厚度越大, 构件的耐撞击性能越好, 如编号 TFF-5 的残余挠度为 29 mm, FF-5 的残余挠度为 40 mm, RSS-5 的残余挠度为 37 mm, SS-5 的残余挠度为 52 mm。钢管可以将构件抗撞击性能提高 25%~28%。

(3) 当撞击高度 $H=5$ m, 钢管厚度, 两端固定可以明显提高构件的耐撞击性能, 如编号 FF-5 的残余挠度为 40 mm, FS-5 的残余挠度为 50 mm, SS-5 的残余挠度为 52 mm。两端固定可以将构件的抗撞击性能提升 20%。

2.2 撞击力时程曲线

撞击力时程曲线如图 8 所示, 从图 8 中可以看出构件的撞击力时程曲线表现出相似趋势, 撞击力在很短时间内增长到峰值, 然后又迅速降到零, 之后又连续出现多个峰值, 最后撞击力逐渐减小为零。

构件与落锤撞击, 构件的撞击部位获得向下的速度, 落锤向上弹起, 两者分离之后, 构件的速度逐渐减低, 落锤在重力作用下再次撞击构件, 撞击力出现第二次峰值, 循环往复撞击力时程曲线出现多个峰值阶段, 落锤的能量逐渐消耗, 撞击力逐渐减小为零。如编号 SS-2 出现多个逐渐减小的峰值, 最后逐渐减小接近为零。

当约束条件和轴压比相同时, 撞击高度越大, 撞击力峰值越大。如撞击高度 $H=2$ m 时编号 FF-2 的撞击力峰值达到 25 558 kN, 撞击高度 $H=5$ m 时编号 FF-5 的撞击力峰值达到 67 001 kN。

2.3 跨中位移时程曲线

跨中位移时程曲线如图 9 所示, 从图 9 中可以看出跨中位移在撞击后迅速增大, 随着能量的消耗, 曲线的斜率逐渐减小, 当斜率减小为零时, 跨中位移达到最大值。构件逐渐恢复变形, 最终在残余位移附近自由震动。

(1) 当撞击高度 $H=2$ m, 钢管厚度为零时, 一端固定一端简支相比两端简支, 可以提高构件的耐撞击性能。如一端固定一端简支条件下 (试样 FS-2) 的残余挠度为 6 mm; 两端简支条件下 (试样 SS-2) 的残余挠度为 11 mm。

(2) 当撞击高度 $H=5$ m, 两端的约束条件相同时, 钢管的厚度可以提高构件的耐撞击性能。如两端固定条件下, 钢管厚度为零时 (试样 FF-5) 的残余挠度为 40 mm; 在两端固定条件下, 钢管厚度为 3.91 mm (试样 TFF-5) 的残余挠度为 29 mm。

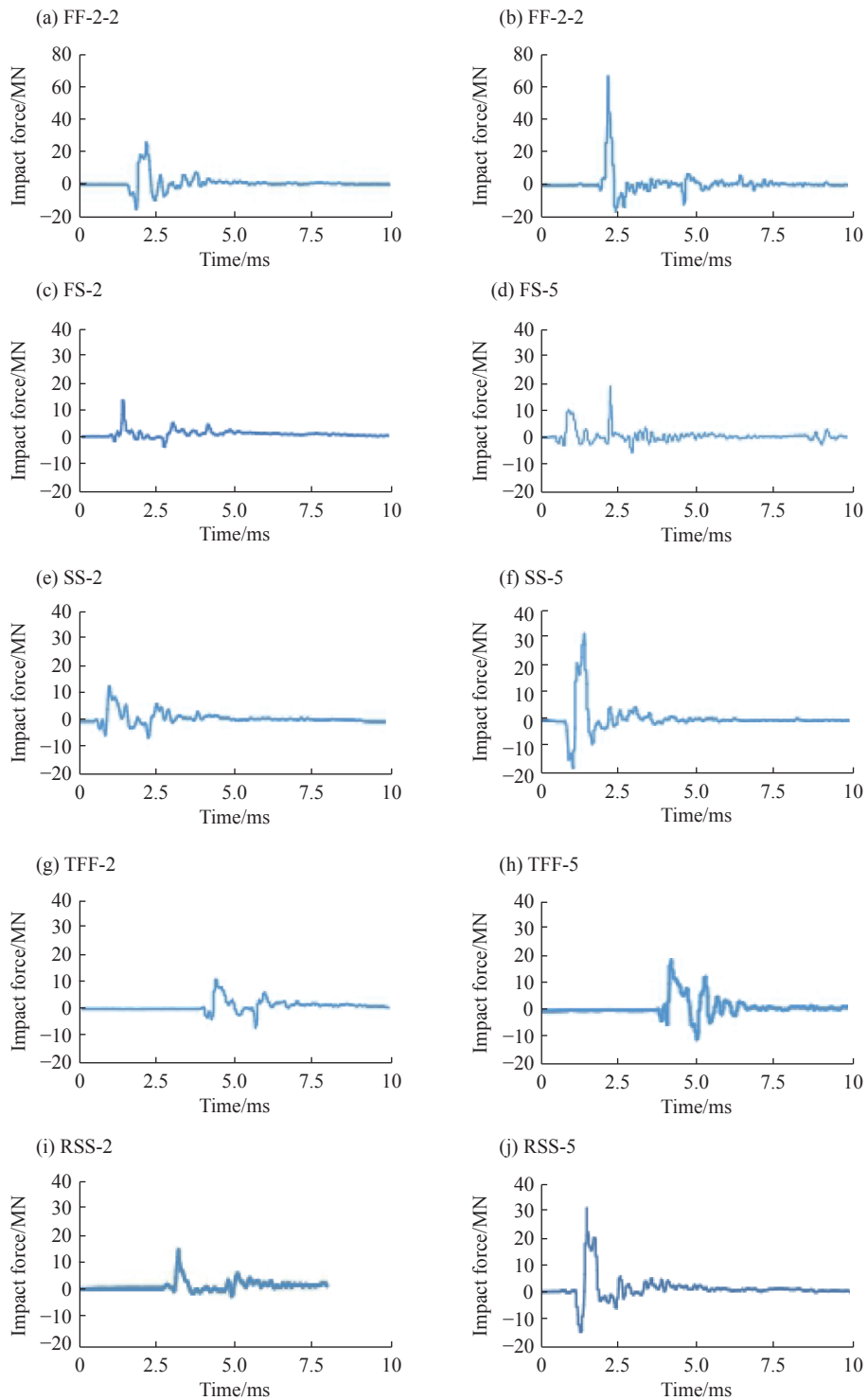


图 8 撞击力时程曲线

Fig. 8 Force versus time curves in impacts

(3) 当撞击高度 $H=5$ m, 钢管厚度为零时, 两端固定与一端固定一端简支以及两端简支相比, 两端固定可以提高构件的耐撞击性能。如两端固定条件下(试样 FF-5)的最大跨中位移为 35.9 mm; 一端固定一端简支条件下(试样 FS-5)的最大跨中位移为 41.9 mm; 两端简支条件下(试样 SS-5)的最大跨中位移为 37.9 mm。

冲击能量对构件的影响可参见柱状图(图 10), 从图 10 中可以显著的得到看出撞击高度和边界条件对构件耐撞击性能的影响十分显著。

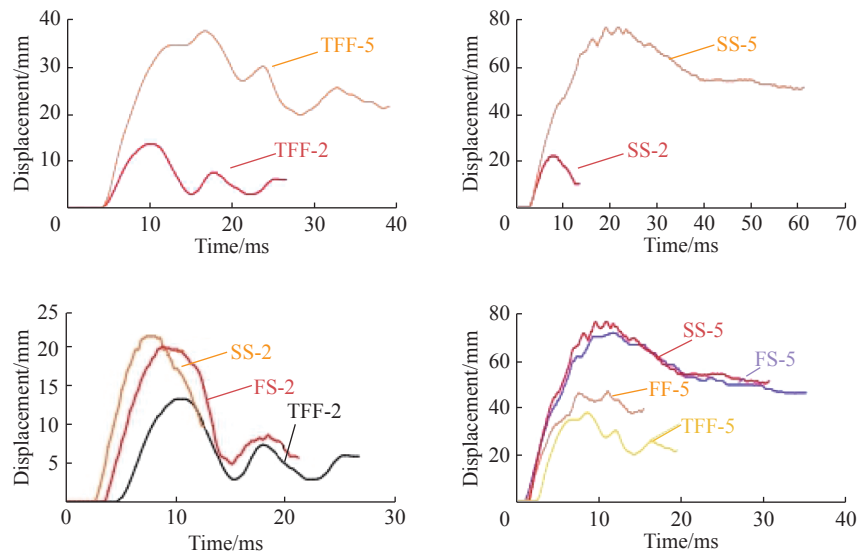


图 9 跨中位移时程曲线

Fig. 9 Trans-middle displacement versus time curves

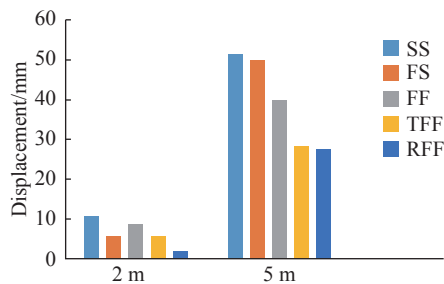


图 10 冲击能量对位移的影响

Fig. 10 Influence of impact energy on displacement

(1)当钢管厚度 $T=0$ 时,构件撞击高度由 2 m 上升到 5 m 时,能量增大 1.5 倍,构件的跨中位移增大 3.1 倍。如一端固定一端简支,撞击高度为 2 m (FS-2 的最大跨中位移为 10.2 mm;一端固定一端简支,撞击高度为 5 m (FS-5) 的最大跨中位移为 41.9 mm。当钢管厚度 $T \neq 0$ 时,构件撞击高度由 2 m 上升到 5 m,能量增大 1.5 倍,构件的跨中位移增大 1.8 倍。如两端固定条件下,撞击高度为 2 m,钢管厚度为 3.91 mm (试样 TFF-2) 的最大跨中位移为 9 mm;两端固定,撞击高度为 5 m,钢管厚度为 3.91 mm (试样 TFF-5) 的最大跨中位移为 25 mm。

(2)当撞击高度 $H=2$ m,钢管厚度为零时,两端固支可以提高构件的耐撞击性能。一端固定一端简支条件下 (试样 FS-2) 的残余挠度为 6 mm;两端简支条件下 (试样 SS-2) 的残余挠度为 11 mm。当撞击高度 $H=5$ m,钢管厚度为零时,两端固定可以提高构件的耐撞击性能。如两端固定条件下 (试样 FF-5) 的最大跨中位移为 35.9 mm,一端固定一端简支条件下 (试样 FS-5) 的最大跨中位移为 41.9 mm,两端简支条件下 (试样 SS-5) 的最大跨中位移为 37.6 mm。

(3)当撞击高度 $H=5$ m,两端固支时,钢管厚度的增加可以构件的抗撞击性能。如两端固定条件下,钢管厚度为零时 (试样 FF-5) 的残余挠度为 40 mm;两端固定条件下,钢管厚度为 3.91 mm (试样 TFF-5) 的残余挠度为 29 mm。

3 结 论

在本次试验研究范围内,得出如下主要结论:

(1) 当撞击高度 $H=2$ m 时, 构件的破坏形态为 I 型; 当撞击高度 $H=5$ m 时, 构件的破坏形态为 II 型。

(2) 当边界条件和钢管厚度相同时, 随着撞击高度的增大, 构件的跨中位移增大, 内八边形空心钢筋混凝土柱的破坏越严重。

(3) 当撞击高度为 5 m, 钢管厚度为零时, 两端固定与一端固定一端简支以及两端简支相比, 两端固定条件下构件的抗撞击性能可以提高 20%。

(4) 当撞击高度为 5 m, 两端的约束条件相同时, 构件中含钢管和不含钢管相比, 构件中含钢管构件的抗撞击性能提升 25%~28%。

参考文献:

- [1] WANG R, HAN L H, HOU C C. Behavior of concrete filled steel tubular (CFST) members under lateral impact: experiment and FEA model [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80: 188–201. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.003.
- [2] 王蕊, 李珠, 任够平, 等. 侧向冲击荷载作用下钢管混凝土梁动力响应的实验和理论研究 [J]. *工程力学*, 2008, 25(6): 75–93. DOI: 1000-4750(2008)06-0075-06.
WANG Rui, LI Zhu, REN Gouping, et al. Study on dynamic response of concrete filled steel tube under lateral impact loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(6): 75–93. DOI: 1000-4750(2008)06-0075-06.
- [3] 任够平, 李珠, 王蕊. 低速侧向冲击下钢管混凝土柱挠度研究 [J]. *工程力学*, 2008, 25(5): 170–175. DOI: 1000-4750(2008)05-0170-06.
REN Gouping, LI Zhu, WANG Rui. The deflection of concrete filled steel tubular column under lateral impact at low speed [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(5): 170–175. DOI: 1000-4750(2008)05-0170-06.
- [4] 张瑞坤, 王兴国, 葛楠, 等. 侧向撞击作用下钢管混凝土柱动力响应的有限元分析 [J]. *工程抗震与改造加固*, 2009, 32(1): 21–25. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2010.01.009.
ZHANG Ruikun, WANG Xingguo, GE Nan, et al. Finite element analysis of the dynamic response of column under lateral impact [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2009, 32(1): 21–25. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2010.01.009.
- [5] 冯宇, 王兴国, 张玉敏, 等. 配筋率对混凝土柱侧向抗撞击性能影响的试验研究 [J]. *工业建筑*, 2011, 41(11): 85–88. DOI: 10.13204/j.gyjz2011.11.016.
FENG Yu, WANG Xingguo, ZHANG Yuming, et al. Experimental study on the effect of reinforcement ratio of the capabilities of RC column to resist impact loading [J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(11): 85–88. DOI: 10.13204/j.gyjz2011.11.016.
- [6] 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.
- [7] 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, LUXingzheng, DU Yongfeng, et al. Experimental study on impact resistance of RC columns strengthened with external steel jackets [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(6): 23–33. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.0991.
- [8] 周泽平, 王明洋, 冯淑芳, 等. 钢筋混凝土梁在低速冲击下的变形与破坏研究 [J]. *振动与冲击*, 2007, 26(5): 99–103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2007.05.028.
ZHOU Zeping, WANG Mingyang, FENG Shufang, et al. Deformation and failure of reinforced beam under low velocity impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(5): 99–103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2007.05.028.
- [9] 田力, 朱聪. 碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的损伤评估及防护技术 [J]. *工程力学*, 2013, 30(9): 144–150. DOI: 1000-4750(2013)09-0144-07 144-150.
TIAN Li, ZHU Cong. Damage evaluation and protection technique of RC columns under impulsive load [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(9): 144–150. DOI: 1000-4750(2013)09-0144-07 144-150.
- [10] THILAKARATHNA H M I, THAMBIRATNAM D P, DHANASEKAR M, et al. Numerical simulation of axially concrete columns under transverse impact and vulnerability assessment [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(11): 1100–1112. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.06.003.

- [11] FUJIKAKE K, SENG T, UEDA N, et al. Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1): 99–108. DOI: 10.3151/jact.4.99.
- [12] 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.
- [13] AL-THAIRY H, WANG Y C. A numerical study of the behaviour and failure modes of axially compressed steel columns subjected to transverse impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(8/9): 732–744. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.03.005.
- [14] REMENNIKOV A M, KONG S Y, UY B. Response of foam-and concrete-filled square steel tubes under low-velocity impact loading [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 25(5): 373–381. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000175.
- [15] BAMBACH M R, JAMA H, ZHAO X L, et al. Hollow and concrete filled steel hollow sections under transverse impact loads [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(10): 2859–2870. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.003.
- [16] BAMBACH M R. Design of hollow and concrete filled steel and stainless steel tubular columns for transverse impact loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(10): 1251–1260. DOI: 10.1016/j.tws.2011.05.009.
- [17] 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(82): 177–189. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.01.005.

Dynamic response of inner octagonal hollow reinforced concrete columns under lateral impact loading

CHEN Liangting, WANG Rui

(School of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: By comparing with their solid reinforced concrete columns counterparts, the inner hollow reinforced concrete columns are widely used as piers because of their advantages including light weight and good section extension. These piers will inevitably be hit by ships. In this paper, dynamic response experiments of six inner octagonal hollow reinforced concrete columns with and without steel tube are carried out. The failure mode, the impact force- versus-time curves and trans-middle displacement-versus-time curves were recorded. The impact resistance of the component is obtained by analysis of the impact height, the condition of the boundary and the thickness of the steel tube. The experimental results show that failure modes of inner octagonal hollow reinforced concrete columns under lateral impact load can be divided into two categories: local failure (type I) and global failure (type II). As the height of impact increases, the damage seriousness of the component increases. Fixing two endings of the component can improve its impact resistance. The thickness of the steel tube has an obvious effect on the impact resistance of the component.

Keywords: inner octagonal hollow reinforced concrete columns; dynamic response; impact resistance; failure mode

(责任编辑 王易难)