

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.02.016

不同柱端约束下外方内圆双重钢管混凝土组合柱抗侧向冲击动力性能研究

范定坚¹, 任曼妮²

(1. 陕西省现代建筑设计研究院, 陕西 西安, 710021; 2. 哈尔滨工业大学建筑设计研究院, 黑龙江 哈尔滨, 150090)

摘要: 为研究不同柱端约束作用下方形空心钢管混凝土柱受冲击后的动力性能,对已有试验的钢管混凝土柱进行模拟,验证了有限元模拟分析的可靠性。基于有限元模拟,完成了16个钢管混凝土柱的水平横向冲击数值模拟,分析不同柱端约束条件和柱端轴力大小对钢管混凝土侧向冲击动力性能的影响。结果表明:方形空心钢管混凝土柱受到冲击作用后,冲击侧发生局部鼓曲,冲击部位主要表现为剪切变形,而另一侧主要表现为弯曲变形;柱端未施加轴力条件下,加强柱端约束均有利于提高柱抗侧向冲击动力性能,减少冲击部位和柱整体的变形;柱端约束相同的条件下,柱端施加轴力会对试件抗侧向冲击性能产生不利作用;在固端约束条件下,轴力为柱轴压承载力0.01倍时,冲击力峰值达到最小值,随后冲击力峰值得到一定程度的回升,此时轴压力对空心钢管柱起到一定的保护作用;施加轴力后的悬臂柱由于悬臂端受到轴压力的限制,间接增大了悬臂柱的约束,导致试件柱比预计吸收更多能量。

关键词: 方形空心钢管混凝土柱; 动力性能; 柱端约束; 轴力; 冲击力峰值

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)02-0251-06

Study on dynamic behavior of hollow concrete filled steel tubular columns with different end constraints under lateral impact

FAN Dingjian¹, REN Manni²

(1. Shaanxi Modern Architecture Design and Research Institute, Xi'an 710021, China;

2. The Architectural Design and Research Institute of HIT, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to study the dynamic performance of square hollow concrete filled steel tubular columns under different end restraints, the concrete-filled steel tubular columns of existing test are simulated, and the reliability of finite element simulation analysis is verified. Based on the finite element simulation, the 16 concrete filled steel tubular columns under impact is simulated, with the effects investigated of confinement conditions at the end of the column and the magnitude of the axial force applied at the end of the column on the lateral impact dynamic properties of concrete filled steel tubular (CFST). The results show that local buckling occurs on the impact side of square hollow concrete filled steel tubular columns under impact, and that the main impact part is shear deformation, while the other side is bending deformation. When the axial force applied at the end of the column is zero, strengthening the restraint at the end of the column can improve the dynamic performance of the column against lateral impact and reduce the deformation of the impact part and the whole column. Compared with the case without axial force, the axial force at the end of the column will have an adverse effect on the lateral impact resistance of the specimen. Under the fixed-end constraint condition, when the axial force is in the range of the test parame-

收稿日期: 2019-11-28; 网络出版日期: 2020-05-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200520.1113.002.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务经费专项资金资助项目(2572018BJ01); 中央高校基本科研业务经费专项资金资助项目(2572019BJ03)

第一作者: 范定坚,男,硕士生,工程师,研究方向为钢筋混凝土结构抗震。E-mail: fandingjian2019@126.com

通信作者: 任曼妮,女,硕士,工程师,研究方向为钢筋混凝土结构及装配式混凝土结构。E-mail: rmn2018@126.com

ters, the peak value of impact force reaches the minimum value for the axial force to be $0.01F$, with the peak value of impact force rising to a certain extent. At this time, the axial pressure plays a certain protective role in hollow steel tube columns. The restraint of the cantilever column increases indirectly due to the restriction of the axial pressure on the cantilever end, resulting in the increase of the restraint of the cantilever column and the specimen column absorbing more energy than expected.

Key words: square hollow concrete filled steel tubular column; dynamic performance; confinement conditions at the end of the column; magnitude of the axial force; peak value of impact force.

钢管混凝土是指钢管内部填充混凝土组合而成。钢管混凝土构件充分利用了混凝土和钢材的力学性能,二者实现优势互补。钢管内的混凝土提供柱受到外界荷载的稳定性,钢管则能起到约束混凝土的作用,间接提高混凝土的抗压承载能力,提高了钢管混凝土柱的延性。钢管混凝土由于其承载力大、抗震能力强、较大的变形能力和施工方便等优势,使其在工程中得到广泛的应用。钢管混凝土结构相比混凝土结构,有效缩小构件截面尺寸,节省结构空间。在实际工程中,结构不仅会受到恒荷载、活荷载和风荷载等常规荷载,同时会受到地震、爆炸、冲击等瞬间动力荷载,会对钢管混凝土结构的整体稳定性和安全性造成很大的影响,因此对钢管混凝土结构进行抗侧向冲击动力性能研究具有重要的意义。

Bambach^[1]对方钢管混凝土柱进行了冲击荷载作用下的动力性能研究并进行有限元模拟分析。王瑞峰等^[2-4]研究了钢管混凝土在不同约束条件下抗侧向动力性能。章琪等^[5]对不同截面钢管混凝土柱进行抗冲击性能分析,比较不同截面构件的抗冲击性能差异及破坏模式。胡昌明等^[6]开展了钢管混凝土叠合试件落锤冲击试验。王丙赋^[7]研究了空心率对不锈钢-钢管中空夹层混凝土组合柱耐撞性能,分析了空心率、冲击能量和轴压比三种因素对钢管混凝土柱的动力性能影响。曾希等^[8]对圆钢管混凝土柱进行横向冲击试验,分析柱在冲击作用下的破坏形态、变形和应变分布规律。王潇宇等^[9]对钢管混凝土柱进行冲击试验,考察冲击速度、冲击质量、冲击能量以及柱端约束等关键因素对钢管混凝土柱侧向冲击动力响应的影响,并结合现行规范,引入动力放大系数和能量吸收比提出了钢管混凝土结构柱抗冲击承载力计算方法。

综上所述,国内外研究人员关于柱端约束条件对钢管混凝土受侧向冲击性能影响研究较少,同时缺少柱端条件对空心钢管混凝土的研究。基于此,本文设计一种内配圆钢管的方形空心钢管混凝土柱,研究柱端不同约束条件对空心钢管混凝土柱的

抗侧向动力性能研究。

1 数值模型及验证

为验证有限元分析的准确性,本文首先对文献[5]中的不同约束条件下的钢管混凝土进行了研究。本文选取文献中的试件为:两端简支试件 ZA-4、固简试件 ZB-4、两端固定试件 ZC-4 和两端固定同时施加轴力试件 ZC-7。试件高度为 1 200 mm,截面形状为圆形,试件外径为 114 mm,冲击部位在跨中,试件材料参数见表 1。

表 1 试件材料性能

Tab. 1 Material properties of test pieces

壁厚/mm	钢管		混凝土强度
	屈服强度/ ($N \cdot mm^{-2}$)	极限强度/ ($N \cdot mm^{-2}$)	标准值/ ($N \cdot mm^{-2}$)
3.5	274	355	47.5

1.1 有限元模型的建立

本文中钢材和混凝土模型采用 C3D8R 实体单元模型,混凝土与圆钢管和方钢管之间相互作用采用接触进行设置,钢管与混凝土的法向接触为“硬接触”,切向力采用 Coulomb 摩擦力。分析步采用动力分析,冲击块采用刚体单元,冲击块赋予初速度即为试验中钢块与试件接触时的速度。混凝土材料属性采用 ABAQUS 中提供的弹塑性损伤模型,钢材和混凝土的应力-应变本构关系参照文献[10],有限元模型见图 1。

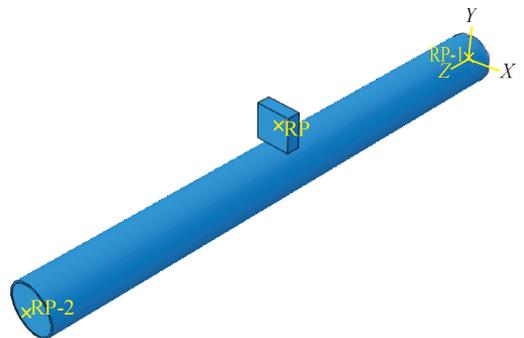


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element mode

1.2 数值验证

表2将文献[3]中得到的冲击力峰值和跨中挠度进行对比,数值模拟冲击力峰值结果与实际结果相差1%左右,挠度相差1%左右,只有ZC-7挠度相差5%,表明数值模拟结果与实际试验结果吻合良好。试验与模拟冲击力峰值曲线对比见图2。

表2 试验与数值模拟对比

Tab.2 Comparison of experiment and numerical simulation

试件	冲击力峰值/kN		跨中挠度/mm	
	试验	模拟	试验	模拟
ZA-4	320.77	322.34	150.6	153.85
ZB-4	382.6	386.72	121.8	122.36
ZC-4	440.8	443.26	87.20	92.93
ZC-7	332.1	339.96	过大	过大

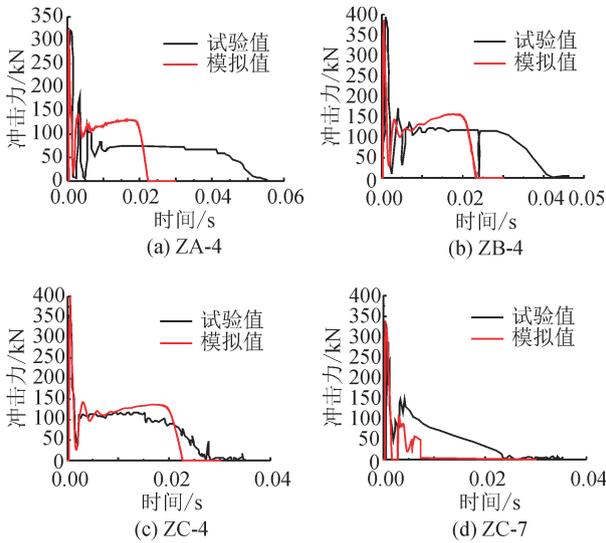


图2 试验与模拟冲击力峰值曲线对比图

Fig.2 Comparison of peak curve of test and simulation impact force

模拟结果与实际试验结果相吻合,能够很好地说明在冲击作用下,钢管-混凝土之间二者的整体协同作用和二者相互作用的有限元模拟接触设置是与实际情况相符合的,该类模拟是能够应用推广到钢-混凝土组合结构,可直接采用此类有限元模拟方法对外方内圆钢管混凝土柱抗侧向冲击进行模拟分析。

2 有限元模型建立

柱结构中,方钢管和圆钢管强度均为Q235,构件尺寸见图3,钢管外径边长为300 mm,方钢管和圆钢管的厚度均为3.5 mm,圆钢管的外直径为170 mm,方钢管和圆钢管之间填充混凝土强度为C40,空心钢管柱长度为1 200 mm,钢块尺寸为300 mm×50 mm×50 mm,

冲击块质量为202.8 kg,冲击速度为30 m/s。空心钢管混凝土柱截面尺寸图见图3,有限元模型见图4,各个试件约束工况及试验结果见表3。

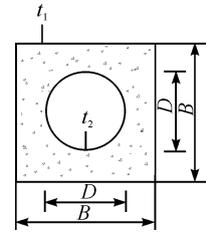


图3 截面尺寸

Fig.3 Section size

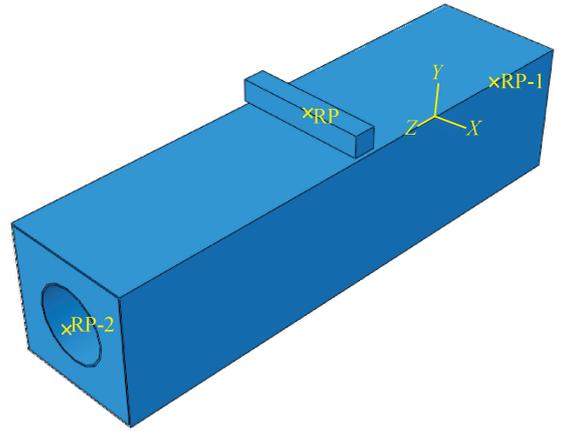


图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

表3 试件约束工况及试验结果

Tab.3 Constraint conditions and test results of test pieces

编号	端部约束	轴压比	冲击力峰值/kN	跨中挠度/mm
Z-1	固结	0	2 504.55	31.06
Z-2	固筒	0	2 177.77	35.70
Z-3	简支	0	1 962.21	37.37
Z-4	悬臂	0	1 943.23	81.76
Z-5	固结	0.005	1 873.91	48.54
Z-6	固结	0.01	1 807.71	50.08
Z-7	固结	0.05	1 833.17	49.21
Z-8	固结	0.1	1 854.53	48.07
Z-9	固结	0.2	1 927.09	45.89
Z-10	固结	0.3	2 075.46	44.39
Z-11	固结	0.4	2 175.28	43.09
Z-12	固结	0.5	2 158.84	42.35
Z-13	固结	0.6	2 245.20	41.45
Z-14	固筒	0.2	1 873.27	48.68
Z-15	简支	0.2	1 776.26	50.08
Z-16	悬臂	0.2	1 758.30	87.99

3 抗侧向动力性能分析

3.1 冲击破坏模式

图5列出了在无轴压力作用下,柱端约束分别为两端固结、固筒、简支和悬臂下的破坏图。当钢块撞击到柱中部时,Z-1、Z-2、Z-3 构件固定端会受到冲击处传来的冲击力但变形不大,柱冲击位置侧向变形较大,而 Z-4 悬臂构件除了冲击位置受力和变形较大,固定端受力和侧向变形较大。Z-1~Z-3 试件变形呈 V 形,最大位移出现在冲击部位,Z-4 试件的侧向位移沿冲击方向呈斜线分布,最大位移出现在自由端。钢管混凝土柱冲击侧发生局部鼓曲,而另外一侧则产生弯曲变形,这是由于钢管内存在空心部位,使得冲击力未能有效从冲击部位顶部传至底部,冲击部位主要表现为剪切变形,而另一侧主要表现为弯曲变形。悬臂柱冲击处局部变形较其余构件较小,这是由于固结、固筒和简支约束下的钢管混凝土构件受冲击产生塑性变形,而悬臂构件冲击部位受到弯矩较小,悬臂柱固定端表现为弯曲变形。

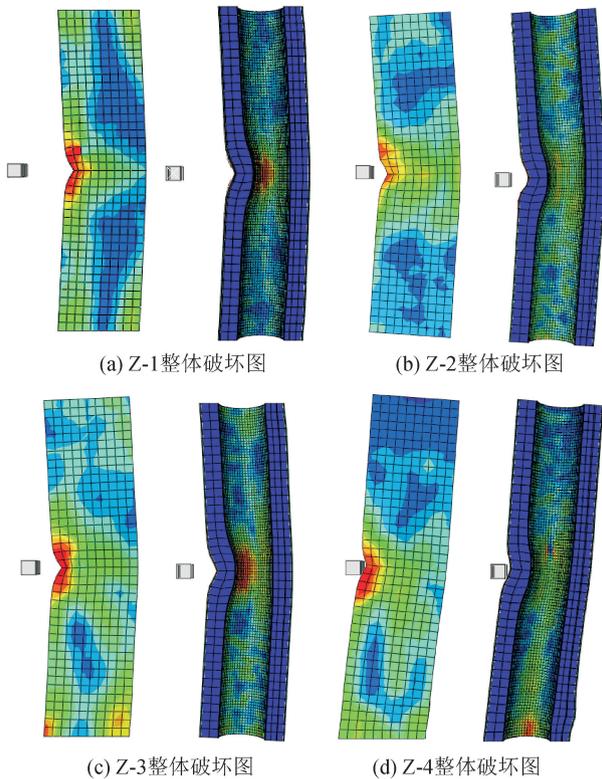


图5 无轴力作用下试件破坏

Fig. 5 Failure of specimen without axial force

3.2 无轴力作用下柱端约束影响

图6给出了无轴力作用下 Z-1~Z-4 四个试件的冲击力和挠度时程曲线对比。从图6(a)中可以看出,柱两端固结、固筒和简支约束工况下,冲击力

时程曲线会经历三个阶段。第一阶段,冲击力上升阶段,构件在与冲击块接触的短时间内冲击力达到峰值,该阶段时间短,冲击力迅速从 0 kN 上升到峰值。第二阶段,冲击力开始衰减,在一定时间内冲击力会达到一个稳定范围内,产生一个冲击力平台值。最后,冲击力会迅速衰减至 0 kN。随着柱端约束逐渐减少,固结、固筒和简支平台值持续时间增加。而悬臂冲击力曲线变化与其余三种柱端约束不同。悬臂柱的冲击力曲线也会经历与上述三个试件相同的三个阶段,不同之处在于:冲击力平台值持续时间较上述三个柱试件要小,当冲击力衰减至 0 之后即第三阶段完成,随后冲击力会出现一个二次反弹阶段。这是由试验柱变形反弹并与冲击块二次接触导致,该段曲线呈二次抛物线形状,该阶段冲击力最大值约为冲击力峰值的 1/6 左右。

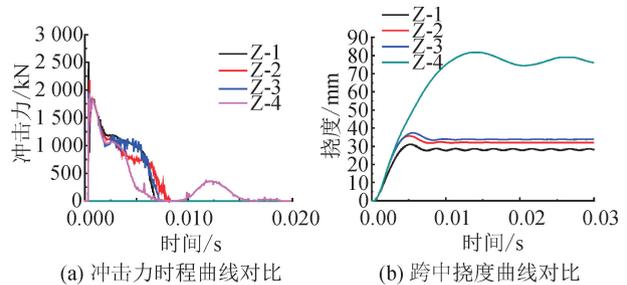


图6 无轴力作用下冲击力和挠度时程曲线对比

Fig. 6 Comparison of time history curves of impact force and deflection without axial force

从图6(b)挠度曲线对比图中可以看出:Z-1~Z-4 四个试件的跨中挠度依次增大,Z-4 试件由于柱一侧为自由端,故位移增长要明显大于其余三个试件;Z-1 与 Z-2、Z-3 相比,当跨中挠度达到稳定阶段时,位移会在一定幅度变化,这是由于柱端约束较大导致。

Z-1~Z-4 试件的冲击力峰值分别为 2 504.55 kN、2 177.77 kN、1 962.21 kN、1 943.23 kN,相比 Z-1 钢管混凝土柱的冲击力峰值,Z-2、Z-3 和 Z-4 冲击力峰值分别下降了 13.05%、21.65% 和 22.41%。相比 Z-1 柱的跨中挠度峰值,Z-2、Z-3 和 Z-4 跨中挠度峰值分别增大了 12.97%、16.89% 和 62.01%。可以得出在柱端无轴力作用下,随着柱端约束的减少,冲击力峰值逐渐降低,跨中挠度逐渐增大,说明加强柱端约束有利于提高柱抗侧向冲击动力性能,减少冲击部位和柱整体的变形。

3.3 柱端轴力的影响

对钢管混凝土柱端施加轴力作用,施加轴力值为钢管混凝土柱承载能力的 20% 即 500 kN,钢管柱承载能力按照文献[11]进行计算得出。图7和图8

给出了柱端约束分别为固结、固筒、简支和悬臂下的轴力为 0 kN 和 500 kN 下冲击力和跨中挠度时程曲线对比。从图 7 和图 8 可以看出:柱端在四种约束条件下,施加轴力均会减少柱冲击力峰值和冲击力平台值,增大柱跨中挠度,说明在相同约束条件下,柱端施加轴力会对试件抗侧向冲击性能产生不利影响。相对于未加轴力试件冲击力峰值,施加轴力后固端、固筒、简支和悬臂约束下冲击力峰值降低幅度分别为 23.05%、13.98%、9.51%和 9.50%,挠度增大幅度分别为 32.31%、26.68%、25.39%和 7.07%,说明柱端约束越强,轴力对该柱的抗侧向冲击力影响越大。

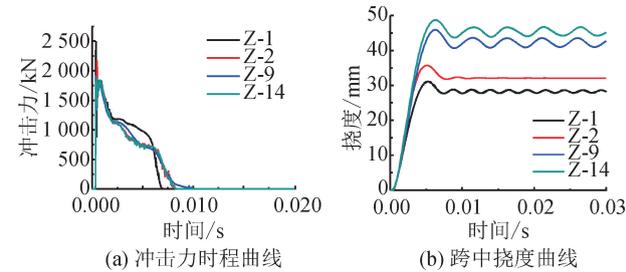


图 7 柱端固结和固筒的冲击力和挠度时程曲线

Fig. 7 Time history curves of impact force and deflection for consolidation and consolidation of column ends

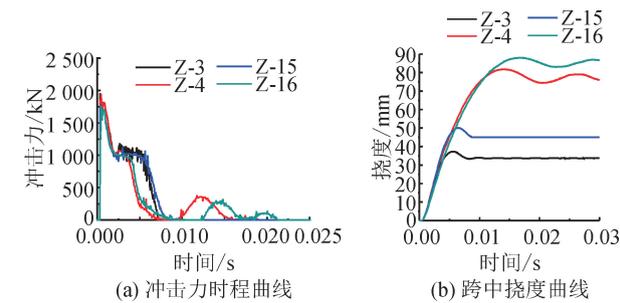


图 8 柱端简支和悬臂的冲击力和挠度时程曲线

Fig. 8 Time history curves of impact force and deflection of simply supported and cantilevered columns

对比轴力为 500 kN 下,不同约束条件下试件的抗侧向冲击力和挠度。在相同轴力作用下,相对于固结试件,固筒、简支和悬臂冲击力峰值分别降低了 2.80%、7.82%和 8.76%,挠度值分别增大了 5.73%、8.37%和 47.85%,说明在相同轴力作用下,端部约束越强,钢管混凝土柱的抗侧向冲击变形能力越强。

3.4 不同轴力对固结约束试件的影响

为分析不同轴力对固结约束试件抗侧向冲击性能影响,分别对固结约束的空心钢管混凝土施加 0.005 F 、0.01 F 、0.05 F 、0.1 F 、0.2 F 、0.3 F 、0.4 F 、0.5 F 、0.6 F ,其中 F 为该钢管混凝土柱轴

压承载力,每次冲击能量相同。图 9 为不同轴力下冲击力峰值和挠度值。从图 9 中可以看出,相对于无轴压力的试件,轴压力对柱抗侧向冲击能力起不利作用;随着轴压力增大,轴力为 0.01 F 时,冲击力峰值达到最小值,随后冲击力峰值得到一定程度的回升,此时较大轴压力相对于 0.01 F ,轴压力对结构的抗侧撞击性能起到一定的保护作用,这主要是由于较大轴压力给钢管混凝土柱提供了径向力,该径向力会抵消部分冲击能量,提高结构的抗侧刚度,抵消部分轴压力对试件产生的不利影响,从而在一定程度上保护钢管混凝土柱。

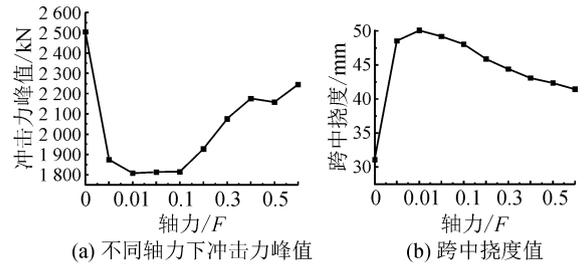


图 9 不同轴力下冲击力峰值和挠度值

Fig. 9 Peak value and deflection value of impact force under different axial forces

3.5 吸收能量对比

本试验中外界的冲击能量是固定的,冲击能量按照下式进行计算:

$$E_w = 0.5 \times mv^2 \quad (1)$$

式中: m 为质量; v 为速度; E_w 为冲击能量。

冲击块质量 m 为 202.8 kg,冲击速度 v 为 30 m/s,则外界冲击能量 E_w 为 91.60 J。柱吸收能量 E 按照力-位移曲线积分得到,假定冲击能量和吸收能量存在一定比例关系,则将二者比值定为 k ,即 $k = E/E_w$ 。表 4 为 k 计算值。

表 4 k 计算值

Tab. 4 The calculated values of k

编号	E /kJ	k
Z-1	41.62	0.45
Z-2	44.99	0.49
Z-3	45.97	0.50
Z-4	51.60	0.56
Z-9	52.31	0.57
Z-14	54.50	0.59
Z-15	55.08	0.60
Z-16	48.09	0.53

从图 9 中可以看出,在无轴力工况下,固端约束 Z-1 试件 m 值最小,悬臂状态下 Z-4 试件 m 值最大,

说明柱端约束越强,试件吸收能量越小,加强固端约束有利于提高柱抗侧向冲击性能。在相同轴力作用下,固结、固筒和筒支三个试件随着柱端约束降低,柱吸收能量随之增大,而悬臂柱 m 值不是最大,这是由于悬臂柱由于悬臂端受到轴压力的限制,间接增大了悬臂柱的约束。

4 结 论

本文对内配圆钢管的方形空心钢管混凝土柱进行了抗侧向冲击模拟,分析不同约束条件对试件抗侧向冲击性能的影响,得出以下结论。

1) 空心钢管混凝土柱受到冲击作用后,冲击侧发生局部鼓曲,冲击部位主要表现为剪切变形,而另一侧主要表现为弯曲变形。悬臂柱冲击处局部变形较其余构件较小,悬臂构件冲击部位受到弯矩较小,悬臂柱固定端表现为弯曲变形。

2) 四种约束条件下受到相同冲击作用时,冲击力时程曲线均会经历三个阶段:冲击力上升阶段、平台阶段和衰减阶段。悬臂约束相对于其余三个约束,在经历三个阶段之后,冲击力会出现一个二次反弹阶段,该段曲线呈二次抛物线形状,这是由试验柱变形反弹并与撞击块二次接触导致。

3) 柱端未施加轴力时,加强柱端约束有利于提高柱抗侧向冲击动力性能,减少冲击部位和柱整体的变形;相对于无轴力作用的柱端,柱端施加轴力会对试件抗侧向冲击性能产生不利作用。

4) 在固端约束条件下,轴力在本文试验参数范围内时,轴力为 $0.01F$ 时,冲击力峰值达到最小值,随后冲击力峰值得到一定程度的回升,此时轴压力对空心钢管柱起到一定的保护作用。

5) 在相同冲击力作用下,施加轴力后的悬臂柱由于悬臂端受到轴压力的限制,间接增大了悬臂柱的约束,导致试件柱比预计吸收更多能量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘亚玲. 常见约束类型的钢管混凝土构件侧向冲击响应试验研究与数值分析 [D]. 太原:太原理工大学,2005.
LIU Yaling. Experiment research and numerical analysis of lateral impact respond of steel tube-confined concrete at common type restrain [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [3] 王博. 固筒支钢管混凝土构件在侧向冲击荷载作用下响应的分析 [D]. 太原:太原理工大学,2007.
WANG Bo. The research of steel tube-confined concrete

component in fix-simply support under the lateral impact load [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.

- [4] 王瑞峰. 不同约束条件钢管混凝土构件的侧向冲击试验研究与数值分析 [D]. 太原:太原理工大学,2008.
WANG Ruifeng. The research and simulation analysis of steel tube-confined concrete with different restrain condition in the lateral impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [5] 章琪,蒋庆,陆新征. 不同截面钢管混凝土结构抗冲击性能比较 [J]. *工程力学*, 2013, 30(增刊 1): 89-93.
ZHANG Qi, JIANG Qing, LU Xinzhen. Comparison of impact resistance of different concrete filled steel tube sections [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(S1): 89-93.
- [6] 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, 49(10): 11-17.
HU Changming, HAN Linhai. Experimental behavior of circular concrete-encased concrete-filled steel tubes under lateral impact [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(10): 11-17.
- [7] 王丙斌. 空心率对不锈钢-钢管中空夹层混凝土组合柱耐撞性能影响的研究 [D]. 太原:太原理工大学,2017.
WANG Bingbin. Effect of hollow ratio on the crashworthiness of stainless steel-concrete double-skin tubular columns [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [8] 曾希,熊雷,李召,等. 圆钢管混凝土柱抗冲击性能试验与有限元分析 [J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(增刊 1): 157-164.
ZENG Xi, XIONG Lei, LI Zhao, et al. Experiment and FEA of impact resistance of CFST columns with circular cross-section [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(S1): 157-164.
- [9] 王潇宇,DEMARTINO C,徐金俊,等. 侧向冲击作用下钢管混凝土柱动力响应试验研究及计算方法 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(12): 28-36.
WANG Xiaoyu, DEMARTINO C, XU Jinjun, et al. Dynamic response of concrete filled steel tube column under lateral impact load; experimental study and calculation method [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(12): 28-36.
- [10] 邹淼. 不同空心率的 FRP 管-混凝土-钢管组合柱在侧向撞击下的动力性能 [D]. 太原:太原理工大学,2016.
ZHOU Miao. Dynamic performance of FRP-Concrete-Steel double-skin tubular column with different hollow ratio under lateral impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 北京:科学出版社,2007.

(责任编辑 王绪迪)