

钢管轻集料混凝土柱水平往复荷载下 滞回性能试验

傅中秋¹, 吴东阳¹, 吉伯海¹, 王占飞²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要目的 研究钢管轻集料混凝土柱在水平往复荷载下的破坏形态和滞回性能。

方法 对8个钢管轻集料混凝土柱进行拟静力试验, 研究轴向压力下, 不同轴压比、不同外径的钢管轻集料混凝土柱在水平往复荷载下的破坏形态和受力性能, 得到其滞回曲线、钢管应变曲线。根据试验结果对比分析钢管轻集料混凝土柱的骨架曲线、延性和受力过程中钢管对核心轻集料混凝土的紧箍力。**结果** 钢管轻集料混凝土柱的破坏主要表现为钢管底部位置的鼓曲破坏; 滞回曲线饱满, 骨架曲线完整, 延性系数均在4.0以上。**结论** 钢管轻集料混凝土抗震性能较好; 混凝土的承载力和延性的增大主要来自钢管的约束作用, 钢管对轻集料混凝土的紧箍力随着水平位移的增加而增大, 直至钢管鼓曲破坏不再提供紧箍力。

关键词 钢管轻集料混凝土; 水平往复荷载; 滞回性能; 紧箍力

中图分类号 TU395

文献标志码 A

Experimental Study on Hysteretic Behavior of LACFST Columns under Horizontal Cyclic Loading

FU Zhongqiu¹, WU Dongyang¹, JI Bohai¹, WANG Zhanfei²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, China, 210098; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The pseudo static test of 8 light aggregate concrete filled steel tube columns was carried out to study the failure mode and hysteretic behavior of the light aggregate concrete filled steel tube columns with different axial compression ratio and different external diameter under horizontal cyclic load. The hysteresis curve and the strain curve of steel tube were obtained. Based on the test results, the skeleton curve, ductility and the confine force of the steel tube to the core lightweight aggregate concrete were compared and analyzed. The analysis shows that the failure of the light-weight aggregate concrete filled steel tube column is mainly manifested by the buckled damage at the bottom of the steel tube. The hysteretic curves and skeleton curves are respectively plump and complete, the ductility coefficient is above 3, and the seismic performance is good. The increase of

收稿日期: 2018-04-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51208176)

作者简介: 傅中秋(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事组合结构桥梁、钢桥疲劳与维护等方面研究。

the bearing capacity and the ductility of concrete is mainly due to the confine of steeltube. The confine force of the steel tube to the core lightweight aggregate concrete increases with the increase of horizontal displacement until the steel tube is damaged.

Key words: lightweight aggregate concrete filled steel tube; horizontal cyclic load; hysteretic behavior; confine stress

钢管混凝土因具有承载力高、抗震性能好、制作施工方便等优点,在工程建设中得到了较广泛的应用.而钢管混凝土自重较高,若采用轻集料混凝土代替普通混凝土填充钢管,在同等强度条件下可减轻自重 20% 以上^[1-2],可较好地适应现代材料轻质高强的发展需求.对高层、大跨等现代大型工程而言,钢管轻集料混凝土具有其独特的优势.

目前,国内外学者对普通钢管混凝土柱的抗震性能进行了大量的研究,取得了丰硕的成果.在水平往复荷载下,钢管对混凝土有较好的约束作用,使核心混凝土的耗能性能和延性性能得到很大提高^[3-4].韩林海^[5]对圆形和矩形截面钢管混凝土柱的抗震性能进行了系统研究,给出了方形和矩形截面钢管混凝土柱的滞回模型.聂瑞峰^[6]对方钢管的抗震性能进行了试验研究和仿真分析,并研究了各种参数对其承载性能和延性的影响.D. Denavit^[7]分析总结了以往的试验研究,提出了针对钢管混凝土滞回性能的数值模拟方法,并与试验数据有较好的一致性.近几年很多学者对钢管混凝土剪力墙结构、框架结构的抗震性能进行了研究^[8-13].但以往的研究主要集中在钢管混凝土协同工作的受力性能,对钢管和核心混凝土的相互作用及各自的受力特征没有深入研究.而钢管轻集料混凝土柱的相关研究起步较晚,目前的研究主

要集中在静力性能和耐久性方面^[14-18],钢管轻集料混凝土柱在水平往复荷载下的受力性能研究尚待开展.基于此,笔者以不同外径设计两组钢管轻集料混凝土柱,每组以不同轴压比设置设计 4 个试件.对各个钢管轻集料混凝土试件进行水平往复加载试验,从承载性能、延性等角度对钢管轻集料混凝土柱的抗震性能进行了初步评价.最后通过钢管和混凝土的应变变化,对水平往复荷载下钢管与核心轻集料混凝土的相互作用进行分析.研究表明,钢管轻集料混凝土在水平往复荷载下构件底部发生屈曲破坏,滞回曲线饱满,延性较好,具有良好的抵抗变形能力.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验所采用的材料为 Q235B 直焊缝圆钢管,轻集料混凝土采用 CL30 轻集料混凝土.轻集料混凝土的配合比见表 1,其中粗骨料粒径为 1 ~ 3 mm;细骨料采用中粗砂,细度模数为 2.8,表观密度为 2 700 kg/m³;水泥采用 P. C 32.5 复合硅酸盐水泥;水为普通自来水.分别制作三组轻集料混凝土立方体试块,采用 LS 抗压试验机进行立方体抗压强度试验,得到轻集料混凝土的抗压强度和弹性模量,分别为 31.35 MPa 和 2.39 × 10⁴ MPa.

表 1 轻集料混凝土材料参数

Table 1 Material parameters of lightweight aggregate concrete

材料体积质量/(kg·m ⁻³)				抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比
水泥	陶粒	沙子	水			
18.40	26.80	26.00	11.60	31.35	2.39 × 10 ⁴	0.17

分别设计并制作了两组 8 个试件,每组试件均考虑了轴压比 *n* 为 0、0.1、0.2 三种情

况,并设计制作了一个无孔试件,以对比分析预留预应力钢筋管道对试件产生的影响. 试件参数见表 2. 试件制作时在钢管上下端底座正中心处预留 16 mm 孔道并预埋 PVC 管,通过张拉预应力钢束完成对试件轴向力

的施加. 为防止试验过程中试件的底座板发生局部屈曲,在试件底板与混凝土地锚之间设置高度为 70 mm 的混凝土块,通过地锚杆将试件、混凝土块、地锚连接在一起.

表 2 试件参数

Table 2 Specimen parameters

试件编号	钢管外径 <i>D</i> /mm	钢管计算长度 <i>L</i> /mm	钢管壁厚 <i>t</i> /mm	轴压比 <i>n</i>	轴压力 <i>N</i> /kN	备注
CFST-A-1	114	1 000	3	0	0	无孔
CFST-A-2	114	1 000	3	0.1	52	有孔
CFST-A-3	114	1 000	3	0.2	104	有孔
CFST-A-4	114	1 000	3	0	0	有孔
CFST-B-1	133	1 000	3	0	0	无孔
CFST-B-2	133	1 000	3	0.1	67	有孔
CFST-B-3	133	1 000	3	0.2	134	有孔
CFST-B-4	133	1 000	3	0	0	有孔

1.2 测点布置

1.2.1 应变片布置

采用 TS3890 型静态应变测量处理仪采集试验过程中的应变. 试验设计了三个应变片布置截面,距离试件底端的距离分别为 20 mm、80 mm 和 180 mm,布置截面分别记为 A-20、A-80、A-180. 每个截面均布置一个三向应变片和三个单向应变片,其中三向应变片布置在液压作动头作用面方向,单向应变片分别布置在其余三对称的切面上. 截面 A-20 上的三向应变片编号为 1~3(分别对应变片方向为 0°、45°、90°),单向应变片编号按顺时针方向分别为 4~6,截面 A-80 和 A-180 上的应变片编号依次为 7~12 和 13~18.

1.2.2 位移计布置

试验沿试件高度方向布置了 4 个位移计,测量加载过程中试件各截面的水平位移. 位移计布置位置距离试件顶端的距离分别为 20 mm、250 mm、500 mm、750 mm,分别记为 DM1、DM2、DM3 和 DM4,其中 DM1、DM2、DM3 的量程为 -100 ~ +100 mm,DM4 的量程为 -50 ~ +50 mm. 应变片和位移计的布置如图 1 所示,试验现场加载如图 2 所示.

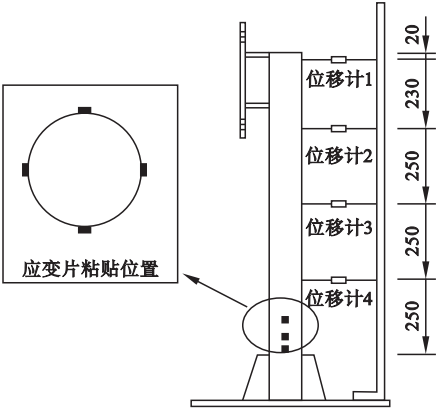


图 1 测点布置示意图

Fig. 1 Layout of measurement points

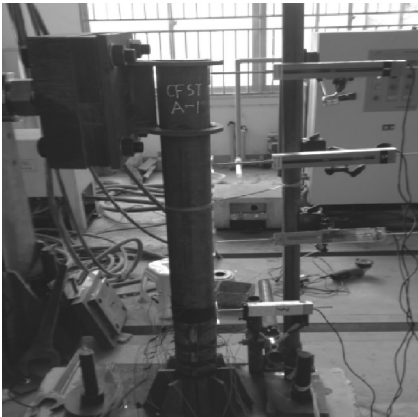


图 2 现场加载图

Fig. 2 Loading diagram

1.3 加载制度

采用 MTS 加载机对试件加载. 选择位移控制加载的方法,对钢管轻集料混凝土试件进行拟静力低周往复加载,模拟试件在地震作用下的受力、位移及地震响应. 加载分为屈服前加载和屈服后加载两部分. 屈服前加载是一次循环加载,加载位移为 $4 + 4n$ (n 为循环次数),若加载过程中荷载不变而位移不断增加,则认为试件已经屈服,屈服前加载结束. 屈服后加载为三次循环加载,加载位移分别为 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 、 $4\Delta_y$ (Δ_y 为屈服位移),若加载水平荷载降低为最大荷载的 85% 时,即认为试件已经破坏,停止加载. 加载循环周期为 4 min. 加载制度示意图如图 3 所示.

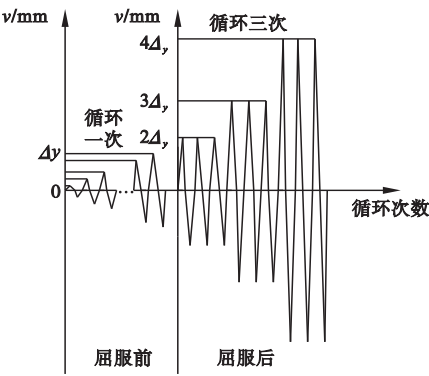


图 3 加载制度
Fig. 3 Loading regime

2 试件破坏形态

加载初期试件并无发生明显变化,此时处于弹性加载阶段;随着加载位移的增加,试件进入弹塑性发展阶段,此时试件底部加载面前后侧出现微微鼓曲,钢管的鼓曲处应变逐渐达到了屈服应变;随着加载位移的进一步增加,试件的鼓曲现象逐渐明显,且部分试件鼓曲部位产生了横向、竖向裂纹;加载结束后,试件的加载前后两侧均形成了明显的鼓曲波,部分试件发生了不同程度的横向开裂或纵向开裂. 试验过程中预应力钢束的锚固情况良好,部分试件破坏形态如图 4 所示.

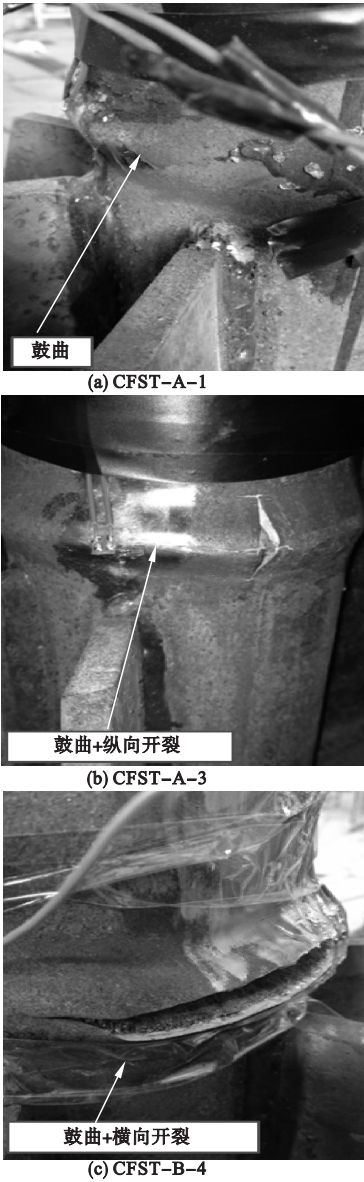


图 4 破坏形态
Fig. 4 Failure modes

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

根据液压伺服系统的压力传感器得到的荷载数据(水平推力 P)与顶端 1 号位移计的加载数据(水平位移 Δ),可得到钢管轻集料混凝土位移-荷载滞回曲线,即 $P-\Delta$ 曲线, A 组试件与 B 组试件受力情况类似,选取 A 组试件 $P-\Delta$ 曲线列于图 5.

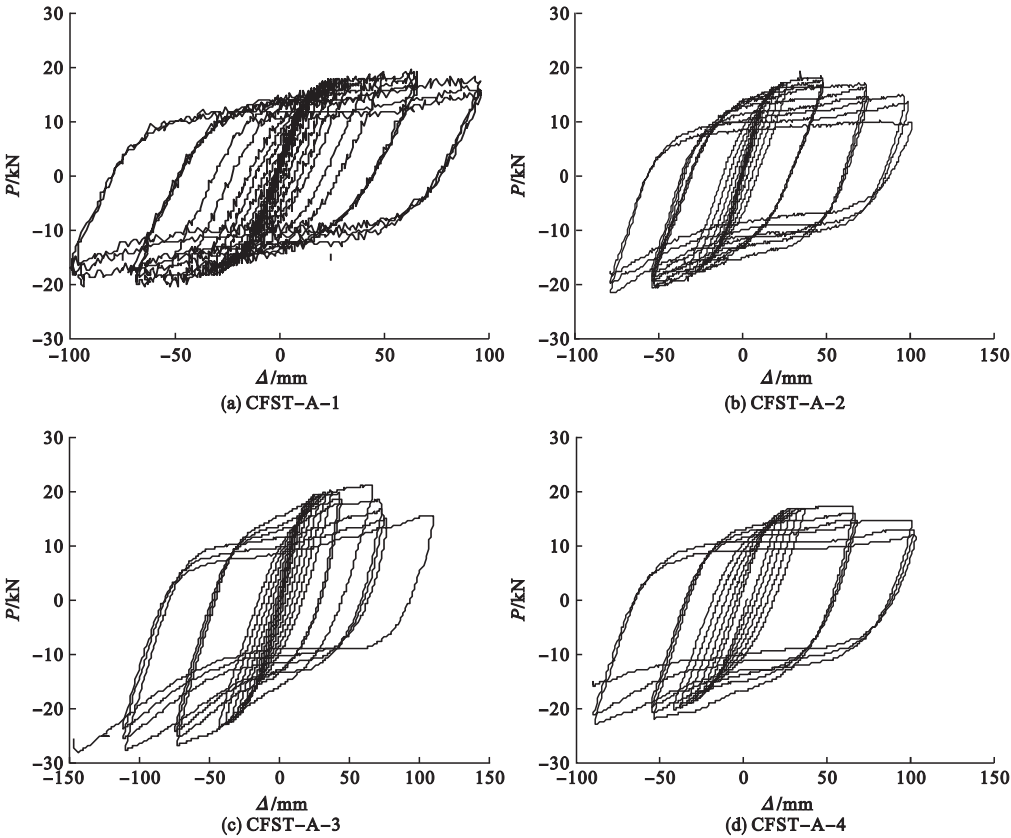


图5 滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curves

由图5可以看出,加载初期试件的 $P-\Delta$ 曲线基本重合且呈线性变化,试件的初始弹性刚度几乎没有变化,且试件没有产生残余变形,此时试件处于弹性工作状态,滞回曲线呈典型的梭形.随着荷载的施加,试件逐渐进入了弹塑性工作状态,此时试件逐渐产生了一定的残余变形,位移滞后现象明显.当水平荷载下降到最大承载力的85%时,试件破坏停止加载.弹塑性阶段内单位荷载梯度下的位移增长较大,表明试件发生了一定的刚度退化.试件产生刚度退化时,其滞回曲线依旧饱满,表明钢管轻集料混凝土柱具有良好的耗能能力.由图5(a)、(d)可知,无孔道与有孔道试件的滞回曲线没有明显差别,试件的耗能性能基本相同,初步分析是由于预留孔道在钢管形心位置,孔道的存在对试件截面惯性矩的影响不大,因而对水平荷载作用下试件的受力性能几乎没有影响.对于轴压比

单参数变化试件,本试验不同轴压比试件的滞回曲线差别不大,均具有较好的饱满程度和耗能能力,这可能与本试验设计的轴压比均较小有关.

3.2 骨架曲线

试件骨架曲线如图6所示.加载初期试件骨架曲线基本重合,表明此时试件处于弹性工作阶段;加载中期,加载位移增加较大的情况下水平推力增加缓慢,表明试件逐渐进入了弹塑性工作阶段;加载后期,加载位移不变的情况下水平推力逐渐降低,表明试件发生了明显的刚度退化.两组试件的骨架曲线后期下降平缓,主要是由于钢管对核心混凝土起到了良好的约束作用,使其处于三向受压状态,核心混凝土的抗压及变形能力均得到了一定程度的提高;同时,核心混凝土对钢管壁起到了一定的支承作用,避免或延缓了钢管壁的内凹屈曲,使其具有较好的稳定性.

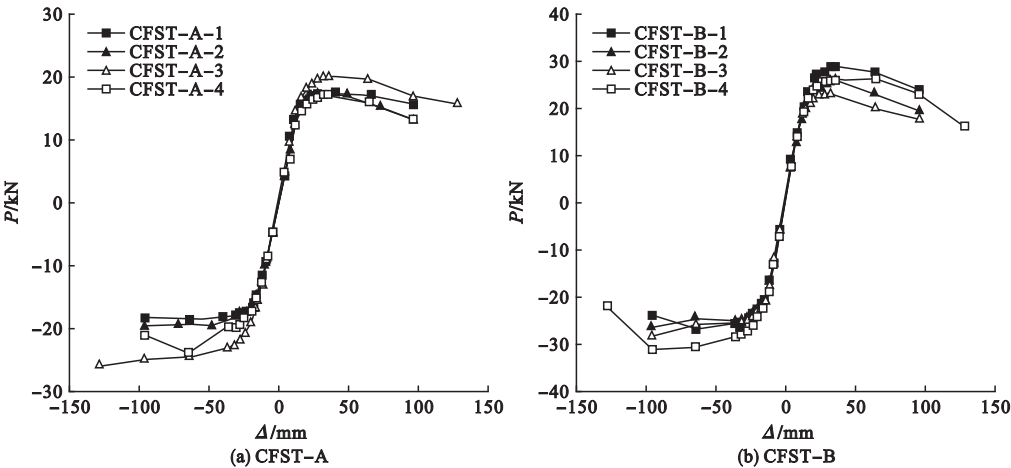


图6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves

各试件在水平往复位移下的承载力见表3。可以看出,随着轴压比增大,试件承载能力略微增加。B组试件管径较大,承受荷载能力较强。

表3 各试件屈服荷载和极限荷载
Table 3 Yield load and ultimate load of each specimen

试件编号	正向		反向	
	P_y	P_m	P_y	P_m
CFST-A-1	14.83	19.74	15.02	19.41
CFST-A-2	15.94	16.70	15.10	21.60
CFST-A-3	16.12	21.30	19.05	27.45
CFST-A-4	15.93	17.84	17.15	23.94
CFST-B-1	23.71	28.65	21.14	30.09
CFST-B-2	22.14	25.91	21.03	26.94
CFST-B-3	20.63	23.69	21.54	27.95
CFST-B-4	22.83	27.59	22.91	33.89

注: P_y 为屈服荷载; P_m 为极限荷载。

3.3 钢管应变与紧箍力

各试件的宏观破坏形态基本相同,表现为钢管底部位置产生局部屈曲,形成一道明显的鼓曲波,部分试件在鼓曲部位产生了局部开裂。通过钢管外壁应变数据的初步分析,各试件测点的应变变化规律基本一致,因此选取具有代表性的CFST-A-4的前侧测点和环向测点的应变数据进行分析,结果如

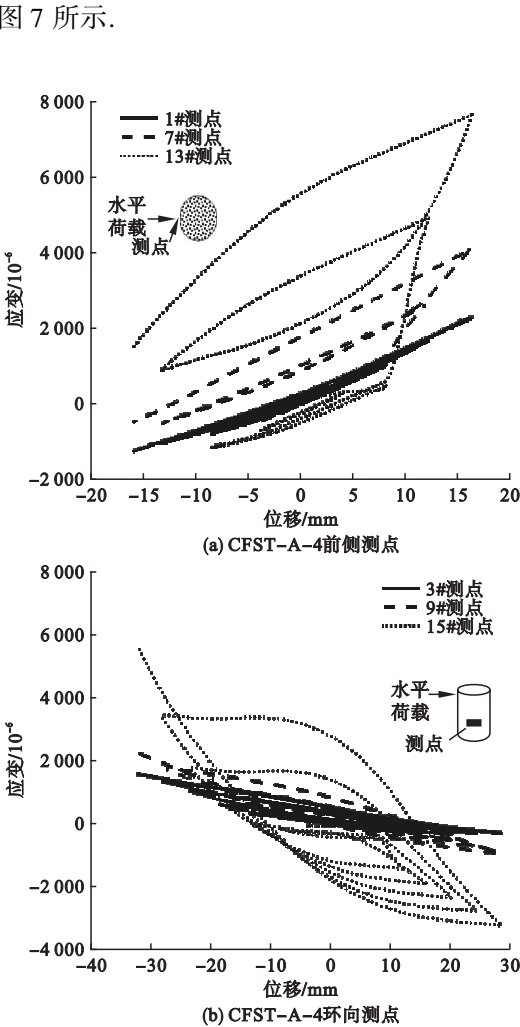


图7 钢管应变变化曲线

Fig. 7 Strain of steel tube

1#(3#)测点、7#(9#)测点以及 13#(15#)测点距离钢管底部的距离分别为 20 mm、80 mm 和 180 mm。由图 7(a)可以看出,加载前期各测点的应变均呈线性变化,此时试件处于弹性受力阶段;随着荷载的施加,1#测点的应变曲线产生突变,该测点位置的钢管壁逐渐进入弹塑性受力阶段;随着荷载的进一步施加,1#测点的应变曲线呈现非线性变化,随着钢管底部位置逐渐出现鼓曲,1#应变片的数据逐渐超过量程而退出工作。加载过程中 7#测点的应变数据呈线性变化,仅在加载后期进入非线性变化阶段,这是由于加载后期钢管底部鼓曲过大,对 7#测点位置的应变产生了一定的影响;而 13#测点的应变值几乎一直呈线性变化。根据三个测点应变的不同,也说明了在水平往复荷载下钢管底部发生局部鼓曲破坏。

由图 7(b)可以看出,加载过程中 15#环向测点的应变几乎呈线性变化,与 13#测点的应变变化规律基本类似,表明此处的钢管对核心混凝土的约束作用不强;加载前期 9#测点的应变呈线性变化,在加载后期该测点的应变呈非线性变化,表明受到钢管底部鼓曲的影响,该处钢管壁对核心混凝土的约束作用逐渐增强;3#测点位于钢管鼓曲位置,随着加载的进行,该测点的应变最先进入非线性变化阶段,位移-应变滞回曲线饱满且滞回环的面积随荷载的增加而逐渐增大,表明钢管对核心混凝土的约束作用逐渐增大,钢管与核心混凝土处于良好的协同工作状态。

根据试验中环向应变片测得的往复水平荷载下的钢管环向应变,采用弹性和塑性力学方法,利用钢材本构关系,计算得到钢管的环向应力。由静力平衡条件可以得出:紧箍力 $P = 2t\sigma_{sh}/D^{[19]}$,可以得到钢管对核心混凝土的紧箍力。笔者选取 CFST-A-4 和 CFST-B-4 位于加载位移 $-32 \sim +32$ mm 内的环向应变进行分析计算,得到钢管对核心混凝土紧箍力的变化过程(见图 8)。

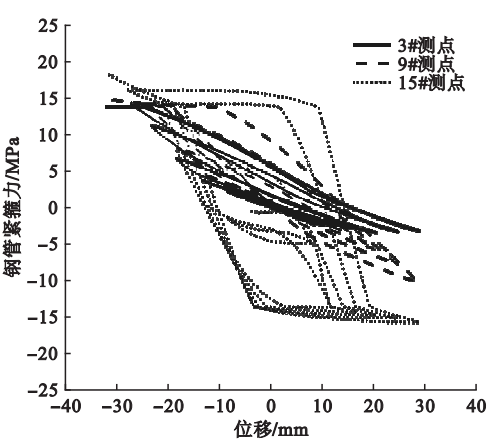


图 8 钢管紧箍力

Fig. 8 Confine stress of steel tube

从图中可以看出,在加载前期,钢管对核心混凝土的紧箍力随着加载位移的增加不断增大,在加载后期,3#测点的钢管对核心混凝土的紧箍力一直随着应变增加线性增大。而底部钢管对核心混凝土的紧箍力不断增加,达到 17.31 MPa。此后钢管达到极限强度,发生鼓曲破坏,认为不再提供紧箍力。

3.4 延性

采用能量等值法 $\mu = \Delta_u/\Delta_y$ 计算试件的延性系数^[20],其中 Δ_u 为试件的极限位移,取峰值荷载下降到其自身的 85% 时对应的位移值; Δ_y 为屈服位移。能量等值法的计算示意图如图 9 所示,其中 $S_{OAB} = S_{BYM}$, Δ_y 即为所求的屈服位移。计算得到延性系数及特征值取试验正反向的平均值,结果见表 4。

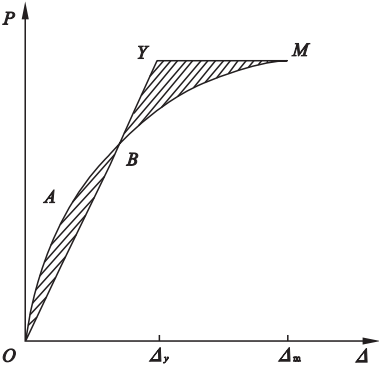


图 9 能量等值法计算示意图

Fig. 9 Diagram of energy equivalent method

表4 延性系数
Table 4 Ductility coefficient

试件	屈服点		峰值点		破坏点		$\mu = \Delta_u / \Delta_y$
	P_y / kN	Δ_y / mm	P_m / kN	Δ_m / mm	P_u / kN	Δ_u / mm	
CFST - A - 1	14.93	16.94	19.58	68.33	14.81	95.81	5.66
CFST - A - 2	15.52	18.05	19.15	48.99	12.83	95.78	5.31
CFST - A - 3	17.59	20.94	24.38	80.34	20.85	126.81	6.06
CFST - A - 4	16.54	21.98	20.89	64.59	13.045	96.14	4.37
CFST - B - 1	22.43	20.25	29.37	62.47	17.87	96.91	4.79
CFST - B - 2	21.59	19.05	26.43	48.51	19.68	96.36	5.06
CFST - B - 3	21.09	16.94	25.82	48.31	20.84	95.86	5.66
CFST - B - 4	22.87	17.03	30.74	79.83	18.82	128.76	7.57

由表4可知,试件的延性系数均大于4,表明钢管轻集料混凝土柱具有良好的抗震变形性能。有孔、无孔试件延性系数相差不大,表明预留预应力筋管道对试件的延性没有影响。CFST - A组试件的延性系数均大于CFST - B组试件的延性系数,表明钢管外径越大,试件的延性越差,这是由于较小钢管外径的试件,截面的含钢率较大,而钢材具有优良的塑性变形性能,因此较小钢管外径试件的延性系数较高。此外,各组试件的延性系数相差不大,表明在轴压比为0~0.2时,轴压比对试件的延性系数影响不大。

4 结 论

- (1)钢管轻集料混凝土柱的破坏过程、破坏形态与普通钢管混凝土柱类似,主要表现为钢管底部位置的鼓曲破坏。试件前后两侧均产生了一道明显的鼓曲波且部分试件的鼓曲位置发生了不同程度的开裂现象。
- (2)两组试件的滞回曲线比较饱满,试件骨架曲线的变化趋势基本一致,表现出了良好的稳定性。两组试件的延性系数均在4.0以上,说明钢管轻集料混凝土柱具有良好的抗震变形性能。
- (3)在水平往复荷载作用下,混凝土的承载力和延性的增大主要来自钢管的约束作用,钢管对核心混凝土的紧箍力随着水平位

移的增大而增加,直至钢管达到极限强度,发生鼓曲,退出工作。

参考文献

[1] 傅中秋,吉伯海,马麟,等. 偏心率对钢管轻集料混凝土受压性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40(3):624-629.
(FU Zhongqiu,JI Bohai,MA Lin,et al. Impact of eccentricity ratio on behavior of lightweight aggregate concrete filled steel tube columns under eccentricity compression [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2010,40(3):624-629.)

[2] 吉伯海,傅中秋,瞿涛,等. 钢管轻集料混凝土抗剪承载力试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(12):25-33.
(JI Bohai,FU Zhongqiu,QU Tao,et al. Experimental study of the shear strength of lightweight aggregate concrete filled steel tube[J]. China civil engineering journal,2011,44(12):25-33.)

[3] HAN L H,LI W,BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [J]. Journal of constructional steel research, 2014,100:211-228.

[4] SUI W,CHENG H,WANG Z. Bearing capacity of an eccentric tubular concrete-filled steel bridge pier[J]. Steel and composite structures, 2018,27(3):285-295.

[5] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2016.)

[6] 聂瑞锋,徐培蓁,阎宇. 方钢管混凝土柱抗震性能试验研究和仿真分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(11):1596-1602.
(NIE Ruifeng,XU Peizhen,YAN Yu. Experimental research and finite element analysis on seismic behavior of concrete-filled square steel

- tubular columns[J]. Journal of tongji university(natural science), 2012, 40 (11): 1596 – 1602.)
- [7] DENAVITM D, HAJJAR J F. Nonlinear seismic analysis of circular concrete-filled steel tube members and frames[J]. Journal of structural engineering, 2011, 138(9): 1089 – 1098.
- [8] 王静峰, 张琳, 戴阳. 半刚性钢管混凝土框架梁柱端板连接抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012(11): 13 – 21.
(WANG Jingfeng, ZHANG Lin, DAI Yang. Experimental study on seismic performance of semi-rigid connection steel concrete frame beam column end plate[J]. China civil engineering journal, 2012(11): 13 – 21.)
- [9] 徐亚丰, 王越. 碳纤维钢骨 – 钢管混凝土柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(4): 612 – 620.
(XU Yafeng, WANG Yue. Experimental study and nonlinear FEM analysis on seismic performance of CFRP steel tube composite columns filled with steel reinforced concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2013, 29(4): 612 – 620.)
- [10] 阎石, 邵鹿峰, 张曰果, 等. 方钢管混凝土柱 – H 型钢梁组合节点抗震性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2): 297 – 303.
(YAN Shi, SHAO Lufeng, ZHANG Yueguo, et al. Experimental study on seismic performance for joints of concrete-filled square steel tube column and H-shaped steel beam[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2013, 29(2): 297 – 303.)
- [11] 钱稼茹, 江枣, 纪晓东. 高轴压比钢管混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 40 – 48.
(QIAN Jiaru, JIANG Zao, JI Xiaodong. Experimental study on seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite shear walls with high axial compressive load ratio[J]. Journal of building structures, 2010, 31(7): 40 – 48.)
- [12] 聂建国, 胡红松, 李盛勇, 等. 方钢管混凝土暗柱内嵌钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013(1): 52 – 60.
(NIE Jianguo, HU Hongsong, LI Shengyong, et al. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete composite shear walls with square CFST concealed columns[J]. Journal of building structures, 2013, 34(1): 52 – 60.)
- [13] ZHANG Y F, ZHAO J H, CAI C S. Seismic behavior of ring beam joints between concrete-filled twin steel tubes columns and reinforced concrete beams[J]. Engineering structures, 2012, 39: 1 – 10.
- [14] FU Z Q, JI B H, ZHU W, et al. Bending behaviour of lightweight aggregate concrete-filled steel tube spatial truss beam[J]. Journal of central south university, 2016, 23(8): 2110 – 2117.
- [15] 应小勇. 圆钢管高强轻骨料混凝土结构受力性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
(YING Xiaoyong. Research on mechanical behavior of round steel tube high-strength lightweight aggregate concrete structure[D]. Changsha: Central South University, 2010.)
- [16] GHANNAM S, AL-ANI H R, AL-RAWI O. Comparative study of load carrying capacity of steel tube columns filled with lightweight concrete and normal concrete[J]. Jordan journal of civil engineering, 2010, 4(2): 2010 – 2164.
- [17] 肖海兵, 赵均海, 孙楚平, 等. 薄壁钢管轻骨料混凝土轴压短柱承载力分析[J]. 建筑结构, 2012(11): 101 – 106.
(XIAO Haibing, ZHAO Junhai, SUN Chuping, et al. Bearing capacity of thin-walled steel tube short columns filled with lightweight aggregate concrete under axial load[J]. Building structure, 2012, 42(11): 101 – 106.)
- [18] AL-ELIWI B, TALHA E, MOHANAD I, et al. Behavior of reinforced lightweight aggregate concrete-filled circular steel tube columns under axial loading[J]. Structures, 2018, 16(11): 101 – 111.
- [19] HE Liusheng, ZHAO Yangang, LIN Siqu. Experimental study on axially compressed circular CFST columns with improved confinement effect[J]. Journal of constructional steel research, 2018(140): 74 – 81.
- [20] DENG J, LIU A, YU Q, et al. Seismic performances of steel reinforced concrete bridge piers[J]. Steel and composite structures, 2016, 21(3): 661 – 677.