

端部带肋方钢管混凝土柱抗震试验研究^{*}

汪梦甫[†], 杨冕

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为进一步提高方钢管混凝土柱的承载能力和延性,提出了一种新的方钢管混凝土柱构造方案,即在方钢管柱的端部设置加劲肋,并设计制作了3根端部带肋方钢管混凝土柱,进行了拟静力试验,比较、分析了试件在水平低周往复荷载作用下的承载能力、滞回曲线、骨架曲线以及位移延性等抗震性能指标. 研究表明:相对于普通方钢管混凝土柱,3根端部带肋方钢管混凝土柱的滞回曲线更为饱满,骨架曲线的下降段更为平缓,柱极限位移明显提高,分别提高了44.4%、65.3%、29.3%,位移延性系数明显增大,分别增大了27.0%、51.3%、6.7%,表现出了更良好的延性与耗能能力,抗震性能有比较明显的改善.

关键词:方钢管混凝土柱;端部带肋;拟静力试验;抗震性能

中图分类号:TU375;P315.9

文献标志码:A

Experimental Study on Seismic Behavior of Square Concrete-filled Steel Tube Column with End Ribs

WANG Mengfu[†], YANG Mian

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to improve the bearing capacity and ductility of square concrete-filled steel tube (CFST) column, this paper proposed a new structure scheme, adding ribs at the end of CFST column. Three CFST columns with end ribs were designed and produced. Pseudo static test was conducted, and seismic behaviors including the bearing capacity, hysteresis curves, skeleton curves and displacement ductility were obtained. Compared with the conventional CFT columns, experimental results indicated that the hysteretic loop curve of the test specimens dissipated large energy, and the decline of the skeleton curve was not significant. The ultimate displacement increased obviously by 44.4%, 65.3% and 29.3%, respectively. The ductility increased by 27.0%, 51.3% and 6.7%, respectively. The CFST columns with ribs exhibited good energy dissipation capacity and their seismic performance was significantly improved with larger ductility.

Key words: square concrete-filled steel tube column; end ribs; pseudo static test; seismic behavior

^{*} 收稿日期:2016-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278181, 51578225), National Natural Science Foundation of China(51278181, 51578225);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120161110022), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20120161110022)

作者简介:汪梦甫(1965—),男,湖北通城人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: wangmengfu@126.com

钢管混凝土柱是由钢管与混凝土组合而成的一种结构形式,钢管对核心混凝土有约束效应,混凝土的存在可延缓钢管的局部屈曲,这种相互作用能弥补各自的缺点,从而使其承载力高、塑性和韧性好、耗能能力强,具有良好的抗震性能。^[1-3]

试验研究发现^[4],方钢管混凝土柱中钢管的宽厚比超过一定限值时,钢管壁端部易向外局部鼓曲,从而降低了构件的承载力与延性。为了延缓方钢管混凝土柱的端部屈曲,增强混凝土与方钢管之间的相互作用,改善构件的延性与抗震性能,国内外学者已对方钢管混凝土柱展开了相关试验及理论研究,尤其是薄壁钢管混凝土柱。Tao等^[5]进行了19根带肋薄壁方钢管混凝土轴压短柱的试验研究。张耀春等^[6]进行了9根带肋薄壁方钢管混凝土柱的滞回性能试验研究。Mao等^[7]进行了6根端部外壁套箍钢板或钢板条的方钢管混凝土柱抗震性能研究。在上述研究中,仅有Mao等在端部设置约束,其他则研究加劲肋的通长设置。

为改善方钢管混凝土柱抗震性能,本文提出了一种新的构造措施,即在方钢管内壁端部设置纵向加劲肋。设置的长度,对于底层方钢管混凝土框架柱,取净高的1/3,其他则取净高的1/6与500 mm的较大值。方钢管混凝土柱端部设置加劲肋,不仅能延缓柱端部屈曲,改善抗震性能,而且相对于通长设置加劲肋,能节约钢材,降低造价。此外,相对于钢管外壁设置钢板条或钢板^[7],方钢管内壁设置加劲肋在实际工程中更具有可操作性。为了较系统和完善地研究端部带肋方钢管混凝土柱的抗震性能,本文设计制作了3根端部带肋方钢管混凝土柱试件,并进行了低周反复荷载作用下的试验研究,同时与普通方钢管混凝土柱的试验结果^[8]进行了比较。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

图1为试件的外形示意图。本文试验以框架柱为研究对象,对于两端为嵌固支座、一端有水平侧移的框架柱,由于其反弯点在柱的中央,可将其简化为从反弯点到固定端的悬臂柱,因此本文试件模型为悬臂柱模型,悬臂柱计算长度为1500 mm。试件采用的钢板为Q235钢,钢管由4块钢板拼焊而成。本文试验的3个试件的钢管厚度分别为4 mm、6 mm及10 mm,试件截面尺寸均为250 mm×250

mm。由于试件模型是悬臂柱,为了保证柱身与地梁的固接,钢管延伸到梁底,通长2100 mm,且钢管穿孔,使地梁纵筋贯通。柱底端设置加劲肋,加劲肋厚度与钢管相同,加劲肋也延伸到梁底,全长950 mm,在悬臂柱柱身范围内的长500 mm,为悬臂柱计算长度的1/3。加劲肋单边宽50 mm,为方钢管边长的1/5,加劲肋总宽度占柱截面宽度的2/5,比例适中,便于混凝土浇筑密实。

本次试验的混凝土均采用C40普通混凝土。在试件加工制作过程中,先给地梁支模、扎筋,将焊接好的钢管插入地梁,地梁纵筋穿过钢管贯通。地梁与钢管内混凝土同时浇筑,采用振捣器深入钢管内部进行振捣,以保证混凝土的密实度。待混凝土凝结硬化后,焊上厚度为20 mm的盖板,以保证钢管与混凝土在试验施荷初期就能共同受力。

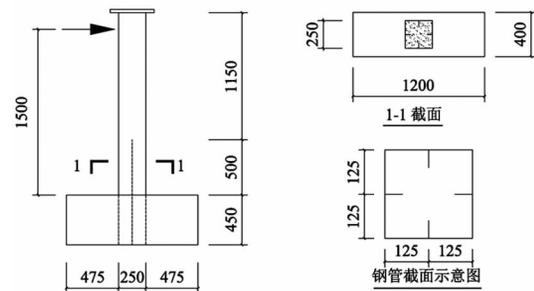


图1 试验试件图(单位:mm)

Fig.1 Test specimen figure(unit: mm)

1.2 材料力学性能与基本参数

钢材强度由标准拉伸试验确定,将试件所用的钢板加工成每组3个的标准试件,进行拉伸试验。测试按《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228—2010)^[9]的相关规定进行。钢材材料力学性能参数见表1,表中 f_y 为屈服强度, f_u 为极限强度, E_s 为弹性模量。混凝土采用C40普通混凝土,配合比见表2。在混凝土浇筑时,浇筑3个边长为150 mm的立方体试块,同条件养护28 d。根据《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)^[10]进行立方体抗压强度的测定,测得混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}=38.6 \text{ N/mm}^2$ 。

表1 钢材材料力学性能指标

Tab.1 Steel material indicators

厚度/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/GPa
4	269.5	389.6	182.2
6	263.7	376.5	180.2
10	239.1	359.8	179.2

表 2 混凝土配合比

Tab.2 Concrete mix		kg · m ⁻³	
$\rho_{\text{水}}$	$\rho_{\text{水泥}}$	$\rho_{\text{砂}}$	$\rho_{\text{石}}$
201	548	588	1 056

本文试验的 3 个试件,即 DL-4L、DL-6L、DL-10L,与文献[8]中的 3 个试件,即 RT-4M、RT-6H、RT-10L 的基本参数见表 3。表中, B 为试件截面边

表 3 试件基本参数一览表

Tab.3 Specimen basic parameter list

试件编号	$B \times t \times L / (\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	b / mm	t_b / mm	$f_{\text{cu}} / \text{MPa}$	f_y / MPa	ξ	N / kN	N_u / kN	n
DL-4L	250×4×1 500	50	4	38.6	269.5	0.8	1 149.9	3 159.1	0.36
DL-6L	250×6×1 500	50	6	38.6	263.7	1.1	1 637.1	3 662.5	0.45
DL-10L	250×10×1 500	50	10	38.6	239.1	1.8	871.6	4 587.5	0.19
RT-4M	250×4×1 500	—	—	36.5	265.0	0.6	1 002.0	2 752.7	0.36
RT-6H	250×6×1 500	—	—	36.5	317.6	1.1	1 569.0	3 510.1	0.45
RT-10L	250×10×1 500	—	—	36.5	242.2	1.5	737.0	3 878.9	0.19

1.3 试验装置及加载制度

试验装置如图 2 所示。安装试件时,为保证对中和竖直,可在柱子与地梁四面及试验位置处弹线,进行吊装就位与几何对中。为保证试件底部的固定边界条件,可在试件地梁两侧各安装一根刚度很大的压梁,同时在地梁两端用千斤顶顶死,以防在试验过程中地梁产生转动和相对滑移。加载方式采用在轴向施加常轴力的同时在柱顶施加反复水平荷载。竖向轴力由 2 000 kN 的液压千斤顶施加,千斤顶上有 200 t 的压力传感器,用来测量轴力。水平力由固定在反力架上的伺服作动器施加,作动器的最大行程为 500 mm。在柱顶端和地梁部位分别安装 2 个位移计和 1 个位移百分表,用于测量柱顶端水平位移及地梁的水平位移。

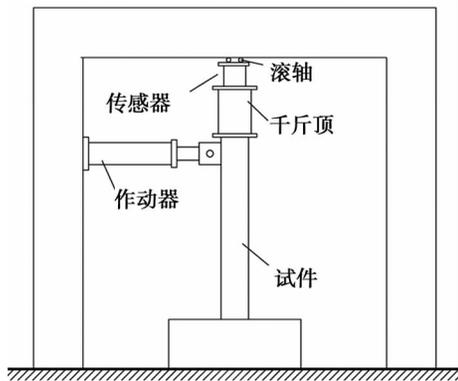


图 2 试验装置图

Fig.2 Test device

试验加载方法参考《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[12]。先施加轴压力,取轴压力值的 50% 预加载、卸载一次,以便消除试件内部组织的

长, t 为钢管厚度, t_b 为加劲肋厚度, L 为试件计算长度, b 为加劲肋宽度, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, f_y 为钢材屈服强度, ξ 为套箍系数^[11],对于端部设置加劲肋的试件,研究水平承载力时,要考虑加劲肋对 ξ 的影响。 N 为施加的轴向荷载, N_u 为构件轴心受压承载力^[11],其中 ξ 的计算不考虑端部加劲肋的影响, $n = N/N_u$ 为试件轴压比。

不均匀性,然后加载至满载,直到试验结束。水平力采用力位移混合控制加载,在屈服前,采用力控制,分级加载;屈服后,采用位移控制,以屈服时试件最大位移的倍数加载,直到水平荷载下降至峰值荷载的 85% 时,认为构件破坏,停止试验。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

普通方钢管混凝土柱^[8]中钢管对混凝土的约束主要集中在混凝土截面的角部与核心部位,从而导致同等条件下其受力性能比圆钢管混凝土柱差,尤其是套箍系数^[11]较小时,柱底端钢管壁较易向外鼓曲,出现屈曲波,波长为柱宽。端部带肋方钢管混凝土柱中,端部纵向加劲肋为壁板提供了约束变形的支撑点,从而减小了壁板局部屈曲的波长,延缓了壁板的向外屈曲,增强了钢管与混凝土之间的相互作用,提高了构件的延性。本文试验观察发现,3 个试件破坏时,柱端部均发生双波鼓曲,波长为 1/2 柱宽,屈曲最显著的位置大约离柱脚 60 mm。

因 3 个试件的破坏形态基本一致,故以试件 DL-4L 为例,描述试件的具体破坏过程。在加载过程中,当水平位移达到约 13 mm 时,在距柱底约 55 mm 处,钢管受压翼缘发生局部微小屈曲,如图 3(a)所示。在随后的卸载和反向加载过程中,屈曲部分又被重新拉平,同时另一侧翼缘出现局部屈曲。当位移达到约 25 mm 时,钢管受压翼缘屈曲现象已经相当突出,出现双屈曲波,波长为 1/2 柱宽,如图 3(b)所示。当位移达到约 36 mm 时,受压翼缘的屈

曲现象进一步发展,如图 3(c)所示,同时钢管腹板发生屈曲,如图 3(d)所示. 随着位移的进一步增大,钢管的屈服现象越来越明显,水平荷载出现下降,之后进一步加载,当听见混凝土被压碎的声音时,水平荷载已下降至峰值荷载的 85%,认为构件破坏,停止试验.此时受压翼缘的屈曲现象尤为显著,如图 3(e)所示,钢管腹板的屈曲也相当明显,如图 3(f)所示.

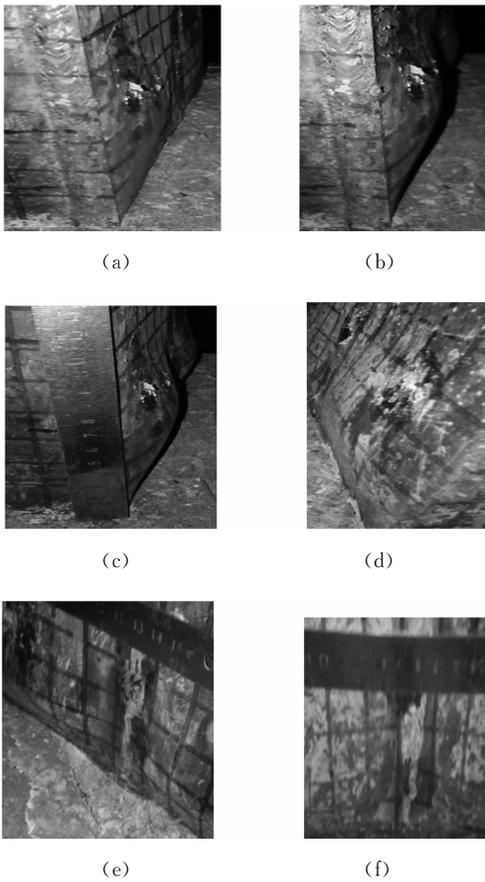


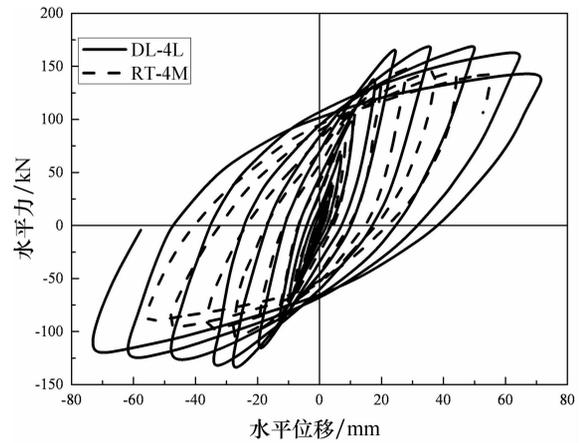
图 3 破坏形态图

Fig.3 Failure mode

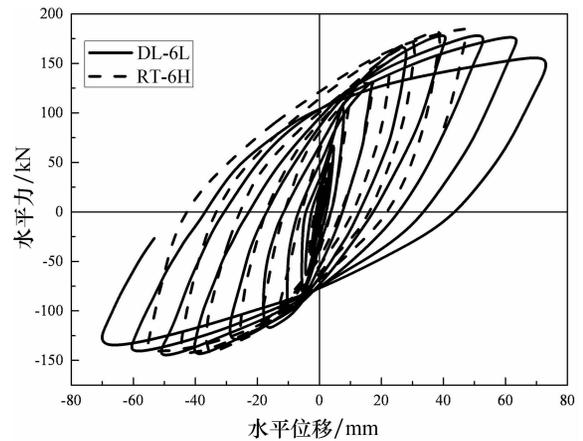
2.2 荷载-位移滞回曲线

荷载-位移滞回曲线概括了承载能力、刚度与延性等重要力学特征,是钢管混凝土柱抗震性能的集中体现. 本文试验的 3 个试件,即 DL-4L、DL-6L、DL-10L,及文献[8]中 3 个试件,即 RT-4M、RT-6H、RT-10L 的滞回曲线如图 4 所示.

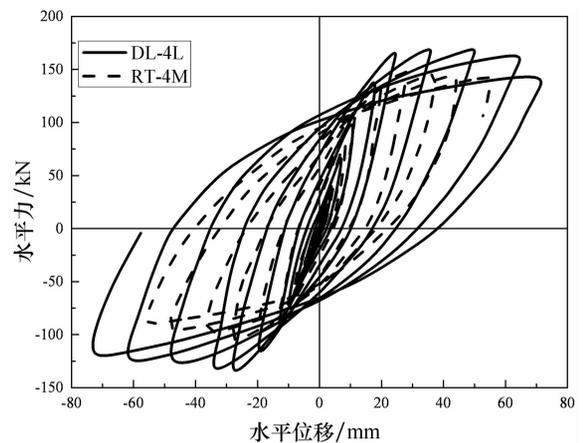
从图 4 中可看出,试件 DL-4L、DL-6L、DL-10L 的滞回曲线饱满,没有明显的捏拢现象,表现出良好的耗能能力. 以 DL-4L 的滞回曲线为例,来说明试件的滞回曲线的变化. 在加载初始阶段,滞回曲线基本上是一条过原点的直线,加载与卸载曲线基本重合,滞回环的面积小,处于弹性工作阶段. 随着



(a) 4 mm 带肋与未带肋比较



(b) 6 mm 带肋与未带肋比较



(c) 10 mm 带肋与未带肋比较

图 4 荷载-位移滞回曲线

Fig.4 Loading-displacement hysteretic loop curves

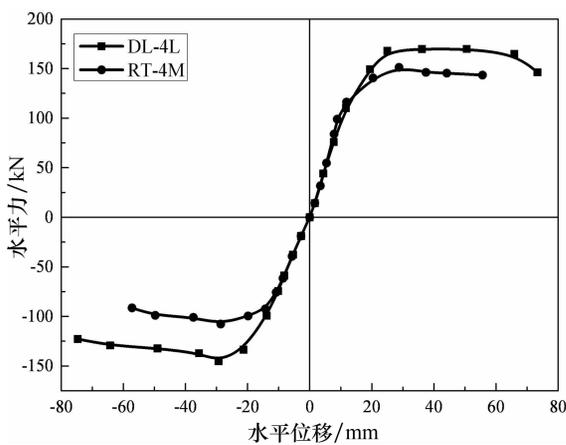
位移增大,刚度开始退化,处于弹塑性工作阶段. 当钢管屈服后,随着位移增加,刚度退化虽然加大,但也不明显,这是由于钢管与混凝土之间的相互作用,尤其当柱端部加劲肋进一步加强混凝土的约束时,方钢管混凝土柱表现出良好的塑性与延性.

端部带肋方钢管混凝土柱,即试件 DL-4L、DL-6L、DL-10L,与普通方钢管混凝土柱,即试件 RT-4M、RT-6H、RT-10L 比较可知,端部带肋钢管混凝土柱的滞回曲线更饱满,刚度退化更平缓,承载力有一定程度的提高,极限位移明显增加.表明柱端设置加劲肋,能提高方钢管混凝土柱的承载能力,增强构件的延性与耗能能力,改善构件的抗震性能.

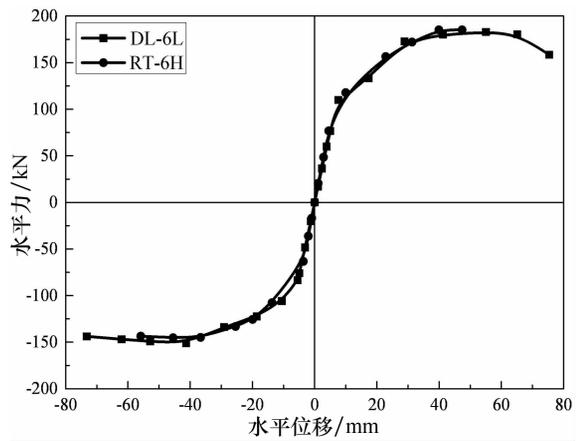
2.3 荷载-位移骨架曲线

试件的荷载-位移骨架曲线,能较直观地反映试件在水平荷载作用下的屈服荷载、极限荷载与延性等重要特征.图 5(a)(b)(c)分别为试件 DL-4L 与

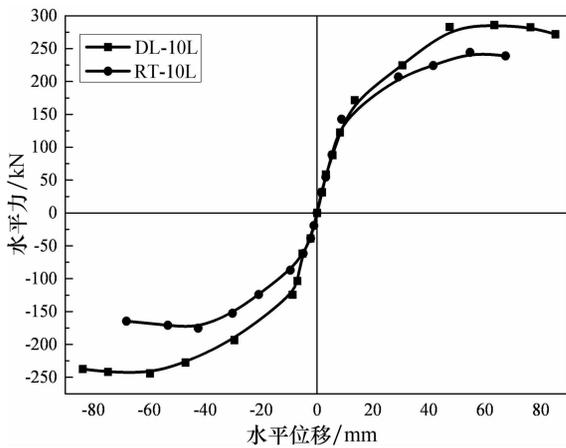
RT-4M、DL-6L 与 RT-6H、DL-10L 与 RT-10L 的荷载-位移骨架曲线的比较图.可看出,不管端部带肋与否,初始刚度基本无变化.但随着进一步加载,达到峰值荷载,曲线出现下降段后,端部带肋钢管混凝土柱的下降段相对于普通钢管混凝土柱,即 RT-4M、RT-6H、RT-10L 的下降段更为平缓,表现出更好的延性.且试件 DL-4L、DL-6L、DL-10L 相对于 RT-4M、RT-6H、RT-10L 的极限位移都有很大程度的增加,极限位移分别增大了 44.4%、65.3%、29.3%.



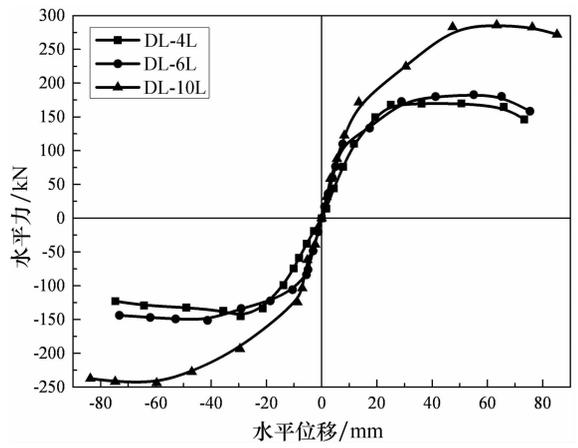
(a) 4 mm 带肋与未带肋比较



(b) 6 mm 带肋与未带肋比较



(c) 10 mm 带肋与未带肋比较



(d) 带肋的比较

图 5 荷载-位移骨架曲线

Fig.5 Loading-displacement skeleton curves

本文试验的 3 个试件的骨架曲线比较如图 5(d)所示.可看出,轴压比越小,套箍系数越大,试件正负两方向下降段越平缓,表现出更好的塑性与耗能能力,抗震性能越强.

2.4 刚度退化分析

图 6 所示为试件的刚度退化曲线,图中等效刚

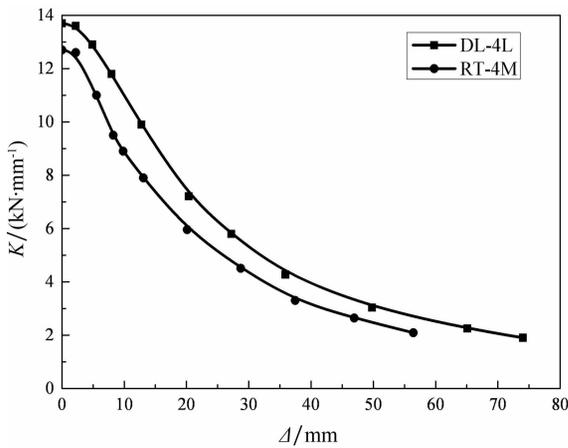
度 K 为每次循环的荷载峰值与侧移 Δ 的比值,其中荷载峰值取正反两方向峰值荷载绝对值的平均值,侧移 Δ 取正反两方向峰值荷载所对应位移绝对值的平均值.

图 6(a)(b)(c)分别为试件 DL-4L 与 RT-4M、DL-6L 与 RT-6H、DL-10L 与 RT-10L 的刚度退化

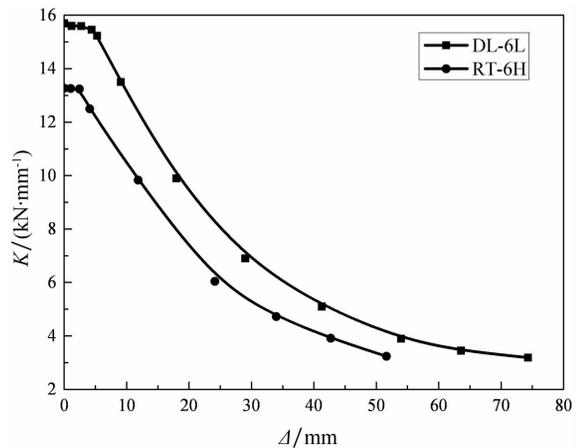
曲线的比较图. 由图可见,加载初期,试件的刚度基本没有变化,试件处于弹性工作阶段. 随着位移的增加,试件刚度出现退化,但退化并不明显,其中,试件 DL-4L、DL-6L、DL-10L 的刚度退化更为平缓,说明柱端部设置加劲肋后,确实能延缓柱端部的鼓曲,约束混凝土的变形,增强柱的延性,改善柱的抗

震性能.

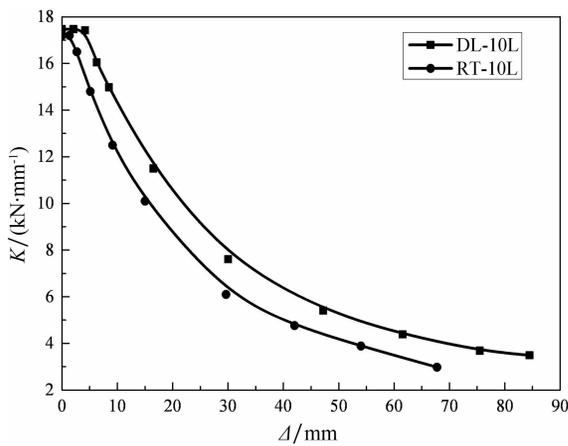
图 6(d) 所示为试件 DL-4L、DL-6L 与 DL-10L 的刚度退化曲线的比较图. 由图可见,轴压比越小,套箍系数越大,刚度退化曲线下降得越平缓,试件具有更好的延性.



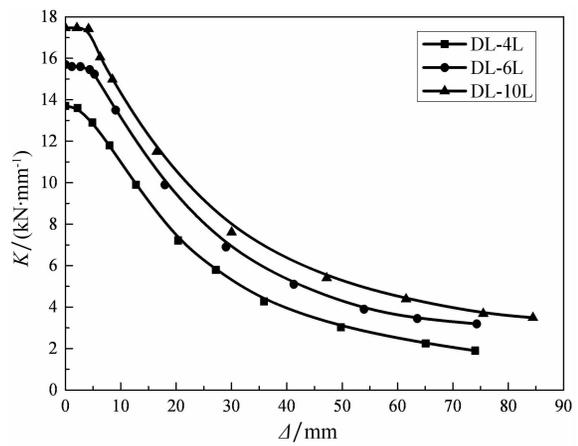
(a) 4 mm 带肋与未带肋比较



(b) 6 mm 带肋与未带肋比较



(c) 10 mm 带肋与未带肋比较



(d) 带肋的比较

图 6 刚度退化曲线

Fig.6 Stiffness degradation curves

2.5 位移延性系数分析

表 4 为试验分析结果一览表,表中 P_u 为试件的最大水平荷载, Δ_y 为试件的屈服位移,取初始刚度线与最大荷载水平线交点处的位移值, Δ_u 为试件水平荷载下降到 85% P_u 时的位移, u 为试件延性系数, $u = \Delta_u / \Delta_y$, θ 为极限位移角.

由表 4 可知:

1)端部带肋方钢管混凝土柱相对于普通钢管混凝土柱的承载力有一定程度的提高.

2)端部带肋方钢管混凝土柱相对于普通方钢管混凝土柱的延性系数有很大程度的提高,试件 DL-4L、DL-6L、DL-10L 相对于 RT-4M、RT-6H、

RT-10L 的延性系数分别增大了 27.0%、51.3%、6.7%.

表 4 试验结果一览表

Tab.4 The test result

试件编号	P_u /kN	Δ_y /mm	Δ_u /mm	μ	θ
DL-4L	170.2	15.6	73.5	4.7	1/20
DL-6L	181.3	12.1	71.3	5.9	1/21
DL-10L	286.5	17.8	85.6	4.8	1/18
RT-4M	147.0	13.8	50.9	3.7	1/30
RT-6H	188.0	11.1	43.1	3.9	1/35
RT-10L	231.0	14.8	66.2	4.5	1/23

3) 端部带肋方钢管混凝土柱相对于普通方钢管混凝土柱的极限位移角有很大程度的提高. 试件

DL-4L、DL-6L、DL-10L 相对于 RT-4M、RT-6H、RT-10L 的极限位移角分别增大了 50%、66.7%、27.7%。

3 结 论

通过对 3 根端部带肋钢管混凝土柱的试验研究与分析,可初步得到以下结论:

本文试验的 3 根端部带肋方钢管混凝土柱与文献[8]中的普通方钢管混凝土柱对比可以看出,普通方钢管混凝土柱端部设置加劲肋后,承载力有一定程度的提高.端部带肋方钢管混凝土柱的荷载-位移滞回曲线更为饱满,表现出良好的耗能能力.荷载-位移骨架曲线的下降段更为平缓,极限位移有很大程度的提高,刚度退化更为缓慢.结果表明,柱端部设置加劲肋后,能较好地提高方钢管混凝土柱的延性,进一步增强耗能能力,改善抗震性能.

参考文献

- [1] 刘劲,丁发兴,龚永智,等.圆钢管混凝土短柱局压力性能研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(11):33-40.
LIU Jin, DING Faxing, GONG Yongzhi, *et al.* Round steel tube concrete short column pressure performance study[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(11): 33-40. (In Chinese)
- [2] 李佳,易伟建.钢管混凝土压弯构件滞回模型分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2002,29(3):132-136.
LI Jia, YI Weijian. Concrete-filled steel tube bending component hysteretic model analysis[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2002, 29(3): 132-136. (In Chinese)
- [3] 李德山,陶忠,王志滨.钢管混凝土柱-钢梁单边螺旋链接节点静力性能试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(3):43-49.
LI Deshan, TAO Zhong, WANG Zhibin. Concrete-filled steel tube column-steel beam single spiral link node static performance test research[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(3): 43-49. (In Chinese)
- [4] 黄宏,张安哥,李毅,等.带肋方钢管混凝土轴压短柱试验研究及有限元分析[J].建筑结构学报,2011,32(2):75-82.
HUANG Hong, ZHANG Ange, LI Yi, *et al.* Experimental study and finite element analysis on the ribbed square concrete-filled steel stub columns under axial load [J]. Journal of Building Structure, 2011, 32(2): 75-82. (In Chinese)
- [5] TAO Zhong, HAN Linhai, WANG Zhibin. Experimental behavior of stiffed concrete-filled thin-walled hollow columns structural stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(7): 962-983.
- [6] 张耀春,徐超,卢孝哲.带肋薄壁方管钢管混凝土柱滞回性能研究[J].东南大学学报,2007,37(1):100-106.
ZHANG Yaochun, XU Chao, LU Xiaozhe. Hysteretic behavior of square concrete-filled thin-wall steel stub columns with ribs [J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(1): 100-106. (In Chinese)
- [7] MAO X Y, XIAO Y. Seismic behavior of confined square CFT columns [J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1378-1386.
- [8] 杜喜凯.往复荷载作用下钢管混凝土柱性能研究及理论分析[D].天津:天津大学建筑工程学院,2010:17-33.
DU Xikai. Experimental research and theoretical analysis of seismic behavior of concrete-filled steel tube beam-columns under cyclic loading [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2010: 17-33. (In Chinese)
- [9] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].北京:中国标准出版社,2002:9-18.
GB/T 228.1—2010 Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature [S]. Beijing: Standard Press of China, 2002: 9-18. (In Chinese)
- [10] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2002:4-12.
GB/T 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 4-12. (In Chinese)
- [11] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践[M].2版.北京:科学出版社,2007:227-229.
HAN Linhai. Concrete-filled steel stub structure: theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 227-229. (In Chinese)
- [12] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997:9-13.
JBJ 101—96 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 9-13. (In Chinese)