

郑宏宇,孟森,朱振,等.薄壁圆钢管约束陶粒混凝土短柱偏心受压性能试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(3):61-69. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.008

ZHENG H Y, MENG M, ZHU Z, et al. Experimental Study on Eccentric Compressive Behavior of Ceramsite Concrete Filled Thin-walled Circular Steel Tube Short Column [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):61-69. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.008

薄壁圆钢管约束陶粒混凝土短柱偏心受压性能试验

郑宏宇^{1*}, 孟森¹, 朱振², 柯晓军¹, 郑煜缤¹, 郑峻¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004;
2. 广西建工集团 第五建筑工程有限责任公司设计研究院, 广西 南宁 530001)

摘要:在满足承载力要求的前提下,薄壁钢管约束陶粒混凝土可进一步减轻构件自重,节省用钢量.为研究其偏心受压性能,以陶粒混凝土强度等级、钢管壁厚、偏心距为变化参数,对 12 根薄壁钢管约束陶粒混凝土短柱进行单调静力加载试验,观测其破坏形态、承载力、侧向挠度、钢管应变.试验结果表明:所有试件均为弹塑性破坏,钢管屈服,具有良好的延性;随偏心距的增大,试件的极限承载力降低;增大钢管壁厚可有效提高试件的延性和极限承载力;随陶粒混凝土强度的增大,试件的极限承载力增大,但延性降低;钢管壁厚与陶粒混凝土强度等级存在匹配性;薄壁钢管约束可大幅提高陶粒混凝土短柱的偏压承载力.基于试验结果,以中、美、英相关规范的公式估算各试件的偏压承载力,发现 CECS 28: 2012《钢管混凝土结构技术规程》的误差最小,建议作为薄壁钢管约束陶粒混凝土柱压弯承载力的预测公式.

关键词:薄壁钢管;陶粒混凝土;短柱;偏心受压;承载力;延性

中图分类号:TU398;TU528.2 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)03-0061-09

Experimental Study on Eccentric Compressive Behavior of Ceramsite Concrete Filled Thin-walled Circular Steel Tube Short Column

ZHENG Hongyu¹, MENG Miao¹, ZHU Zhen², KE Xiaojun¹, ZHENG Yubin¹, ZHENG Jun¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education,
School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Design and Research Institute of No.5 Construction Engineering Co., Ltd., Guangxi Construction Engineering Group, Nanning 530001, China)

Abstract: When bearing capacity requirements are met, ceramsite concrete filled thin-walled steel tube can further reduce the weight of components and save steel consumption. In order to investigate its eccentric compressive behavior, 12 ceramsite concrete filled thin-walled circular steel tube short columns are tested by monotonic static loading, considering ceramsite concrete strength grade, initial eccentricity and steel tube wall thickness as variable parameters. Failure modes, bearing capacity, lateral deflection and steel tube strains are recorded. The test results indicate that all specimens fail in elastic-plastic mode with yielding of thin-walled steel tube and show good ductility; ultimate bearing capacities of specimens decreases with the increase of initial eccentricity. Increasing the thickness of steel tube wall can effectively improve the ductility and ultimate bearing

收稿日期:2021-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508112);广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFAA050007)

*通信作者, E-mail: zhenghyu@gxu.edu.cn

capacity. With the increase of the strength grade of ceramsite concrete, the ultimate bearing capacity increases, but the ductility decreases. The wall thickness of steel tube should match the strength grade of ceramsite concrete. The confinement of thin-walled steel tubes can greatly improve the eccentric bearing capacity of ceramsite concrete short columns. Based on the test data, the eccentric bearing capacities of the specimens are estimated according to the relevant codes of China, USA and UK. It is found that the calculated bearing capacities of the Chinese code CECS 28: 2012 *Technical Specification for Concrete-filled Steel Tubular Structures* are most closed to the test ones. Thus this code can be recommended to predict the compression-bending capacity of ceramsite concrete filled thin-walled circular steel tube column.

Keywords: thin-walled steel tube; ceramsite concrete; short column; eccentric compression; bearing capacity; ductility

钢管混凝土柱具有截面小、承载力高、延性好等优点.经过多年的研究,其计算理论及设计规范相对较为成熟,在高层和超高层建筑、多层工业厂房柱、地铁站台柱以及桥梁结构中得到广泛应用^[1-3].然而,在中低层建筑采用普通钢管混凝土柱的经济性不佳^[2],一些学者的研究表明,在钢管混凝土结构设计规范^[4]和规程^[5]限值之外的薄壁钢管约束普通混凝土柱以及常规钢管约束轻骨料混凝土柱也具有良好的受力性能^[6-14].其中,薄壁钢管的壁厚较小,可降低用钢量,减轻柱的自重,只是相对于普通钢管,单纯的薄壁钢管更易发生局部屈曲^[6-9],但张耀春等^[10-11]研究发现,薄壁圆钢管约束普通混凝土柱在达到其极限承载力之前,薄壁钢管很少发生局部屈曲的现象,因此薄壁圆钢管仍有应用潜力.轻骨料混凝土的密度普遍较普通混凝土低20%,可进一步减轻构件自重,常规钢管约束轻骨料混凝土柱的受力性能和普通钢管混凝土柱相似^[12-14],但由于轻骨料混凝土的弹性模量较低,常规钢管对其约束作用弱于普通混凝土^[15].若采用薄壁钢管约束轻骨料混凝土,可使2种材料在材性上匹配更好,还可以最大程度减轻柱或桁架受压杆的自重,提高其中低层建筑、大跨建筑中的经济性和抗震性能^[16].

偏心受压是实际柱子最主要的受力状态^[17],但目前对薄壁钢管约束轻骨料混凝土柱的研究相对偏少,缺少试验数据和计算方法的研究^[16, 18].因此,本文以陶粒混凝土强度等级、钢管壁厚、偏心距为变化参数,设计、制作了12根薄壁圆钢管陶粒混凝土短柱试件,通过静力偏心加载试验,观测试件的破坏形态、特征荷载、侧向挠度、钢管应变,了解其偏压性能,再对比分析国内外钢管混凝土规范、规程及相关文献对薄壁圆钢管陶粒混凝土短柱偏心受压承载力估算的准确性,为此类受压构件的推广应用提供参考依据.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

基于正交试验设计法,设计了12根薄壁圆钢管陶粒混凝土短柱试件.考虑柱端加劲肋板的影响后,试件的实际长径比在2.77~3.50^[1].以陶粒混凝土强度等级、钢管壁厚、偏心距为变化参数,参考相关文献中试件参数的取值范围,再结合常规结构设计的参数取值确定各试件的设计参数,详见表1.

试件采用钢管与核心陶粒混凝土同时承压的加载方式.为此,在试件两端焊接210 mm×210 mm×10 mm(厚)的方形封堵钢垫板(Q235钢),并沿环向每隔90°焊接1片60 mm×60 mm×5 mm(厚)的直角三角形加劲肋板,共4片.试件制作工序:将钢管两端打磨平整,在其一端焊接封堵钢垫板及加劲肋板,将钢管竖向直立,从开口端灌入陶粒混凝土,分层浇筑、振捣,每层厚度约为200 mm,当即将灌满钢管时,留出10 mm的找平段,待自然养护28 d后,以微膨胀水泥砂浆填充并抹平,养护2 d后,再焊接此端封堵钢垫板和加劲肋板.

1.2 材料力学性能测试

试件所用薄壁钢管为Q235直缝焊接钢管,参照GB/T 228—2010《金属材料室温拉伸试验方法》的相关规定,从钢管截取标准钢板试件,在正、反面沿纵、横向共粘贴4片应变片,通过拉伸实验测其基本力学参数,详见表2,可以看到2种壁厚钢管的力学参数有一定差异,但弹性模量和强度的差异不超过6%,在同批钢材正常波动范围之内,因此认为2种钢管材性基本一致.

表1 试件参数

试件编号	试件长度 H/mm	钢管外径 D/mm	钢管壁厚 t/mm	径厚比 D/t	偏心距 e_0/mm	$f_c/$ MPa	$f_y/$ MPa	A_c/mm^2	A_s/mm^2	含钢率 $a_{sc}/$ %	套箍系 数 ξ
SC-20-1-15	576	165	1.32	125.0	15	22.9	226.7	20 703.7	678.8	3.28	0.325
SC-20-1-30	577	165	1.32	125.0	30	22.9	226.7	20 703.7	678.8	3.28	0.325
SC-20-1-45	577	165	1.32	125.0	45	22.9	226.7	20 703.7	678.8	3.28	0.325
SC-20-2-15	575	165	2.05	80.5	15	22.9	214.1	20 333.0	1 049.5	5.16	0.483
SC-20-2-30	576	165	2.05	80.5	30	22.9	214.1	20 333.0	1 049.5	5.16	0.483
SC-20-2-45	575	165	2.05	80.5	45	22.9	214.1	20 333.0	1 049.5	5.16	0.483
SC-30-1-15	576	165	1.32	125.0	15	29.3	226.7	20 703.7	678.8	3.28	0.254
SC-30-1-30	576	165	1.32	125.0	30	29.3	226.7	20 703.7	678.8	3.28	0.254
SC-30-1-45	575	165	1.32	125.0	45	29.3	226.7	20 703.7	678.8	3.28	0.254
SC-30-2-15	576	165	2.05	80.5	15	29.3	214.1	20 333.0	1 049.5	5.16	0.377
SC-30-2-30	575	165	2.05	80.5	30	29.3	214.1	20 333.0	1 049.5	5.16	0.377
SC-30-2-45	576	165	2.05	80.5	45	29.3	214.1	20 333.0	1 049.5	5.16	0.377

注:(1)试件编号规则:SC(钢管混凝土)-陶粒混凝土设计强度等级-钢管壁厚(取整)-偏心距;(2)套箍系数 $\xi=f_y A_s/(f_c A_c)$;含钢率 $a_{sc}=A_s/(A_s+A_c)$;其中, A_c 为核心陶粒混凝土截面积, A_s 为薄壁圆钢管截面积, f_y 为钢管屈服强度实测平均值, f_c 为核心陶粒混凝土的轴心抗压强度实测平均值。

表2 薄壁钢管材料力学参数实测平均值

厚度 t/mm	弹性模量 $E_s/(\times 10^5 \text{ MPa})$	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	泊松比 μ	伸长率 $\delta/\%$
1.32	2.05	226.7	325.2	0.24	15
2.05	1.96	214.1	318.6	0.28	18

混凝土粗骨料采用页岩粉煤灰陶粒,测得其堆积密度为 726.5 kg/m^3 ,筒压强度为 6.12 MPa ,24 h 吸水率为 7.2% .细骨料采用细度模数为 2.6 的普通中砂,水泥为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥.按 JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术标准》,选取常用的强度等级 CL20 和 CL30 配制陶粒混凝土,具体配合比见表 3,测得 2 种陶粒混凝土的力学性能指标详列于表 4.

表3 陶粒混凝土的配合比

强度等级	水泥	陶粒	砂	水
CL20	413.4	625.5	613.1	189.5
CL30	405.2	620.5	613.1	158.3

表4 陶粒混凝土力学性能参数实测平均值

强度等级	立方体抗压强度 $f_{cu}/(\text{N/mm}^2)$	棱柱体抗压强度 $f_c/(\text{N/mm}^2)$	弹性模量 $E_c/(10^4 \text{ N/mm}^2)$
CL20	26.5	22.9	1.96
CL30	36.4	29.3	2.34

1.3 加载及测量方案

采用 3 000 kN 微机控制电液伺服压力试验机对试件施加偏心压力.试件两端设置带限位钢棒的 $\phi 50$ 钢辊轴模拟简支支承条件.试件两端的纵向位移、转角和柱中侧向挠度由电子位移计测得,电子位移计布置如图 1a 所示.钢管外表面的纵、横向应变由 8 对纵、横向布置的应变片分别测得,应变片具体布置如图 1b 所示.

采用荷载和位移混合控制的加载方式.首先进行预加载,检查仪表设备的工作状态,减少试验误差,然后进行正式加载.采用荷载控制方式,每级荷载为 15 kN,每级持荷 3 min,当荷载接近极限承载力预估值的 80%时,改为位移控制方式,加载速率控制在 1 mm/min .当试件承载力下降至其峰值荷载的 70%以下或试件侧向挠度达到 35 mm 以上时,停止加载,测试结束.

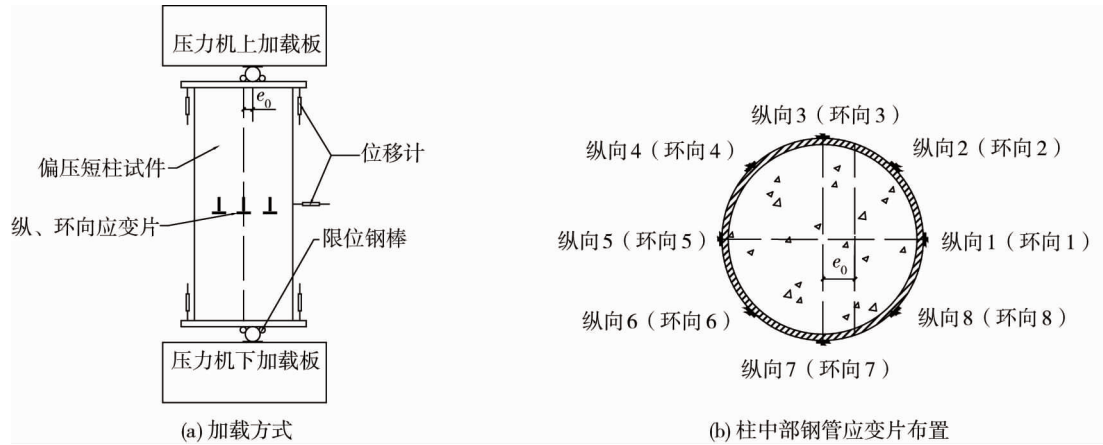


图1 试件加载方式和测量仪表布置

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及破坏形态

所有试件的破坏过程及形态相似:当荷载较小时,试件近似处于弹性阶段,试件表面无明显变化;当荷载增大至峰值荷载的70%~85%时,试件进入弹塑性阶段,侧向挠曲变形逐渐变得明显,试件受压区边缘钢管开始出现不明显鼓曲,钢管表面有少量铁屑剥落;达到峰值荷载时,试件中部附近钢管开始出现轻微的环形褶皱;随后试件承载力下降,侧向挠度快速增大.加载结束时,近轴力侧钢管自上而下出现多道环形褶皱,试件受拉侧钢管未出现开裂现象.各试件的破坏形态如图2所示.试验结束后,剖开钢管,可观察到内部陶粒混凝土受拉侧有多条细微横向裂缝,受压侧混凝土嵌入钢管褶皱环中,无明显碎裂现象,呈现出良好的塑性变形特征,如图3所示.

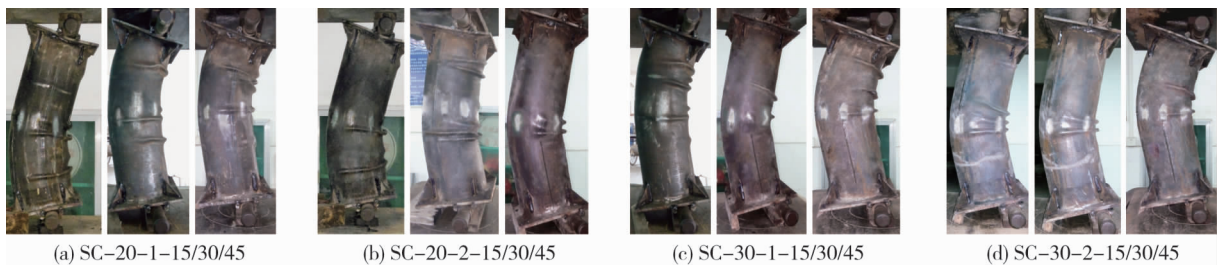


图2 试件破坏形态



图3 管内核心陶粒混凝土破坏细节

2.2 荷载-侧向挠度关系曲线

各试件实测的荷载-柱中侧向挠度关系曲线如图4所示.由图4可知:试件加载至破坏可分为3个阶段:(1)弹性阶段.柱中侧向挠度与荷载之间基本为线性关系,弹性极限荷载与峰值荷载的比值随套箍系数增大而增大、随偏心距的增大而减小.(2)弹塑性阶段.从70%~85%峰值荷载至峰值,荷载-挠度关系曲线斜率逐渐减小,挠度增大加快.(3)承载力下降阶段.随着承载力持续下降,侧向挠度迅速增大,直至试件破坏.

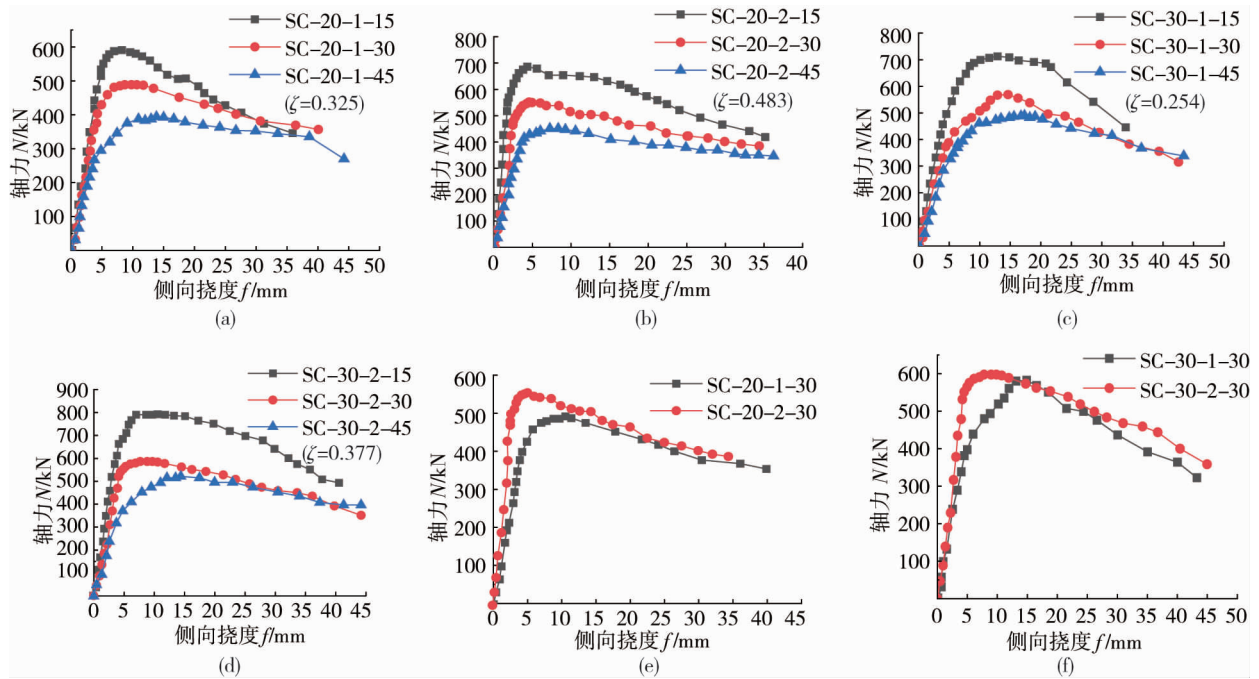


图 4 荷载-柱中侧向挠度关系曲线对比

1) 对比图 4a~图 4d 可知:套箍系数 ζ 相同时,偏心距越大,极限承载力越低,峰值荷载对应的侧向挠度越大,弹性阶段的曲线斜率也越小,但下降段越平缓.而且,在侧向挠度达到 35~40 mm 时,不同偏心距试件的剩余承载力相近,其原因是偏心距较小时,混凝土受压区范围较大,在峰值荷载之后,受压区外边缘部分陶粒混凝土出现软化,中性轴发生偏移,远离轴力,使得实际偏心距增大.

2) 对比图 4e 和图 4f 可知:当钢管壁厚由 1.32 mm 增至 2.05 mm 时,强度等级为 CL20 和 CL30 的试件的承载力分别提高了 12.6%和 3.5%,说明较低强度等级陶粒混凝土试件的承载力对钢管壁厚的变化更为敏感,这也表明了钢管壁厚与核心陶粒混凝土强度等级存在一定的匹配关系.

2.3 极限承载力分析

各试件的极限承载力实测值对比情况如图 5 所示.

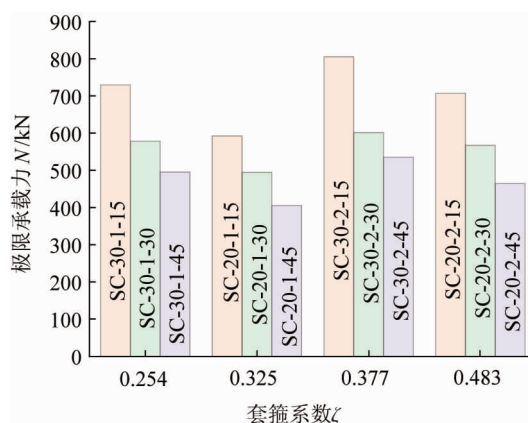


图 5 试件极限承载力柱状图对比

由图 5 可知:(1) 偏心距越大,试件的极限承载力越低;(2) 相同条件下,钢管壁厚由 1.32 增大为 2.05 mm 时,CL20 和 CL30 的陶粒混凝土试件的极限承载力分别提高 18%和 8%(平均值),可见极限承载力随钢管壁厚的增大而增大,但钢管壁厚增大对较高强度等级陶粒混凝土试件的极限承载力的提高率降低,这也反映了钢管壁厚与陶粒混凝土强度等级之间存在一定的匹配关系;(3) 钢管壁厚分别为 1.32 mm 和 2.05 mm 时,CL30 等级陶粒混凝土试件的极限承载力比 CL20 等级陶粒混凝土试件分别提高 11%和

20%(平均值),可见陶粒混凝土强度等级越高,试件的极限承载力越大;(4)在陶粒混凝土强度等级和偏心距相同的条件下,套箍系数越大,试件的极限承载力越高;(5)套箍系数的定义式实质上反映了钢管与核心混凝土在数量和物理强度上的匹配关系,表征了钢管对核心混凝土的约束能力,但由于偏心受压时,钢管对核心混凝土的约束作用弱于轴心受压,因此套箍系数由 0.254 增至 0.483 时,极限承载力的变化无明显规律性。

2.4 荷载-钢管纵向应变关系曲线

对称测点 2 和 8、3 和 7、4 和 6 的纵向应变实测值取平均,分别记作“纵 2-8”“纵 3-7”“纵 4-6”。以试件 SC-30-1-15, SC-30-1-30 及 SC-30-1-45 为代表,绘得典型的荷载-钢管纵向应变关系曲线如图 6 所示。

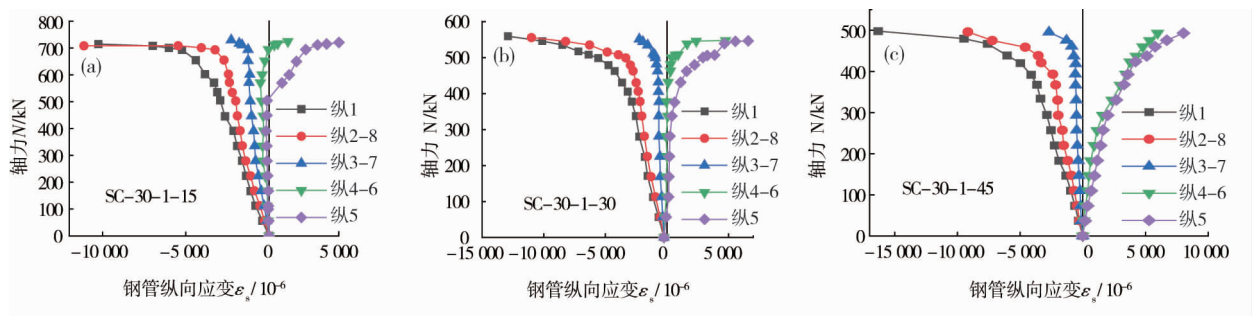


图 6 试件典型荷载-钢管纵向应变关系曲线

由图 6 可知:(1)在加载初期,各个试件柱高中点截面的钢管外周各点纵向应变随着荷载的增加基本呈线性增长,当达到极限荷载的 70%~85%之后,荷载-钢管纵向应变曲线斜率随荷载增大而持续减小;(2)当达到极限荷载时,受压边缘区域(纵 1)纵向应变约 $10\ 000 \times 10^{-6} \sim 16\ 000 \times 10^{-6}$,远超过薄壁钢管材性试验的屈服应变值 ($1\ 105 \times 10^{-6}$),受压区、受压区边缘处于不同的塑形形态,可知试件的破坏模式属于弹塑性破坏;(3)当轴力达到峰值荷载的 80%~90%后,偏心距较小(15 mm)的试件离轴力较远一侧的钢管纵向应变(测点 5)出现由压应变向拉应变过渡的现象,偏心距较大的试件(30, 45 mm)则无此现象.这说明小偏心距试件在接近峰值荷载时,因钢管受压较大一侧开始发生微小鼓曲,约束作用降低,导致该侧混凝土软化,中性层向离轴力较远一侧偏移。

2.5 荷载-钢管环向应变关系曲线

同上,取各试件对称测点的平均值,分别记作“环 2-8”“环 3-7”“环 4-6”。以试件 SC-30-1-15, SC-30-1-30 及 SC-30-1-45 为代表,绘得典型的荷载-钢管外表环向应变关系曲线如图 7 所示。

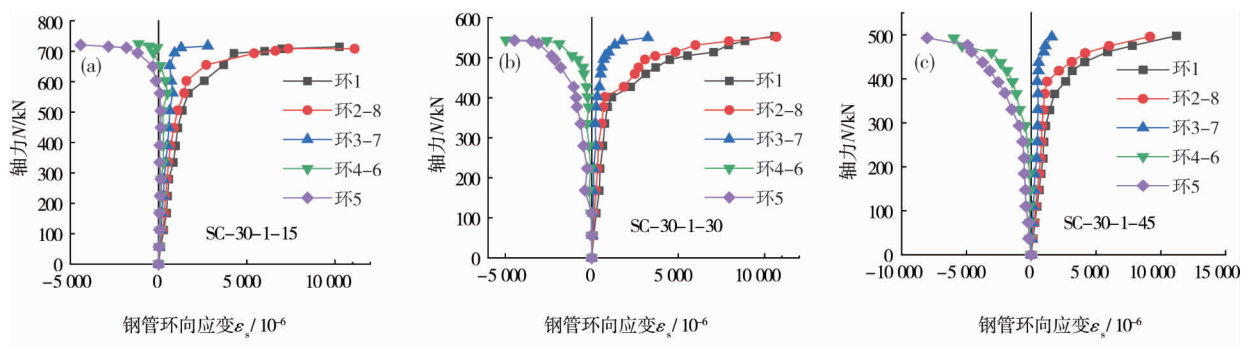


图 7 试件典型荷载-钢管环向应变关系曲线

由图 7 可知:(1)钢管外周各点的环向应变随荷载的增长速率不一致,离中性轴越近,环向应变的增长率和增幅越小,远轴力侧的环向应变以压应变为主,近轴力侧的环向应变以拉应变为主;(2)当荷载低于 80%峰值荷载时,各测点的环向应变增长曲线间距基本保持相等,说明基本符合平截面假定;(3)偏心

距较小($e_0 = 15 \text{ mm}$)的试件,荷载达80%~90%峰值荷载时,远轴力侧的钢管环向应变测点出现由拉应变向压应变转变的现象,说明临近峰值荷载时,中性层发生明显偏移,而偏心距较大($e_0 = 30, 45 \text{ mm}$)的试件则始终为压应变,说明中性轴的偏移量很小;(4)当达到极限荷载时,受压边缘区域(纵1)环向拉应变值达到 $9\,000 \times 10^{-6} \sim 12\,000 \times 10^{-6}$,同样远超薄壁钢管屈服应变值($1\,105 \times 10^{-6}$),泊松比约为0.7~1.0,说明在偏心受压区,薄壁钢管的套箍约束作用仍较强;(5)以60%~70%峰值荷载为分界点,在分界点之前,环向应变随荷载增大而线性增大,此后,环向应变随荷载呈非线性增长,应变增长不断加快。

2.6 延性分析

采用位移延性系数^[19]衡量试件的延性.根据图4的荷载-柱中侧向挠度曲线,采用能量等值法确定试件的屈服挠度 f_y ,极限挠度 f_u 取为试件承载力降至85%峰值荷载时的柱中侧向挠度值,位移延性系数 μ 的具体计算结果详见表5.

表5 试件位移延性系数计算表

试件编号	屈服挠度/mm	极限挠度/mm	位移延性系数
SC-20-1-15	5.520	17.574	3.184
SC-20-1-30	5.763	24.155	4.192
SC-20-1-45	7.282	39.165	5.379
SC-20-2-15	2.551	20.109	7.883
SC-20-2-30	3.443	17.827	5.178
SC-20-2-45	4.395	23.009	5.235
SC-30-1-15	7.220	24.567	3.403
SC-30-1-30	8.642	24.269	2.808
SC-30-1-45	9.057	29.141	3.217
SC-30-2-15	5.232	28.430	5.434
SC-30-2-30	5.213	23.840	4.573
SC-30-2-45	8.030	30.972	3.857

由表5可知:(1)试件的位移延性系数在2.81~7.89,平均值为4.53,91.8%的试件延性系数大于3.0,延性总体良好^[20],可满足抗震结构的延性要求;(2)钢管壁厚增大,约束效应增大,位移延性系数随之增大;(3)陶粒混凝土强度越高,变形能力降低,延性系数减小;采用较薄的钢管约束强度等级较高的陶粒混凝土,延性系数降低,其原因是陶粒混凝土强度越高,弹性模量增大,脆性增加,根据套箍系数的定义式,需要配合更强的约束作用方可保持良好延性,而较薄钢管的约束作用本身较弱,尤其在偏压作用下,截面横向变形不均匀,导致其约束作用进一步降低.

3 不同规范的承载力预测比较分析

国内外与钢管混凝土受压构件相关的规范、规程主要有我国CECS 28: 2012《钢管混凝土结构技术规程》、DBJ/T 13-51—2010《钢管混凝土结构技术规程》、DL/T 5085—1999《钢-混凝土组合结构设计规程》,美国American Institute of Steel Construction (AISC-LRFD-1999),英国British Standards Institutions (BS 5400-5: 2005).为了研究以上规范、规程对薄壁钢管约束陶粒混凝土柱偏心受压承载力预测的准确性,将本文12根试件的设计参数和材性参数代入这些规范、规程的正截面承载力计算公式中,得到不同的偏心受压承载力计算值,其与试验实测值的对比情况详见表6.

由表6对比可知:对于本文薄壁钢管约束陶粒混凝土偏心受压短柱试件,美国AISC-LRFD-1999和英国BS5400-5: 2005的计算误差较大,其原因是两种规范仅将钢管和核心混凝土各自的承载力进行叠加,未考虑两者之间的相互作用,使得计算值偏小;我国规程CECS 28: 2012的计算误差在3%左右,最接近试验实测值,而DL/T 5085—1999, DBJ/T 13-51—2010的平均误差在20%左右,偏于安全.因此,从准确的角度考虑,CECS 28: 2012可作为薄壁钢管约束陶粒混凝土短柱偏压承载力的预测公式.

表6 试件承载力计算值与试验值对比

试件编号	试验值	CECS 28: 2012		DBJ/T 13-51-2010		DL/T 5085-1999		AISC-LRFD-1999		BS 5400-5: 2005	
	$N_{u,t}$	$N_{c,e1}$	$N_{u,e1}/N_{u,t}$	$N_{c,e2}$	$N_{u,e2}/N_{u,t}$	$N_{c,e3}$	$N_{u,e3}/N_{u,t}$	$N_{c,e4}$	$N_{u,e4}/N_{u,t}$	$N_{c,e5}$	$N_{u,e5}/N_{u,t}$
SC-20-1-15	593	602.4	1.016	525.1	0.885	480.5	0.810	398.4	0.672	420.3	0.709
SC-20-1-30	495	480.1	0.970	412.7	0.834	386.1	0.780	306.1	0.618	350.2	0.707
SC-20-1-45	416	399.1	0.959	345.6	0.831	330.3	0.794	278.2	0.669	301.2	0.724
SC-20-2-15	708	658.4	0.930	490.5	0.693	540.3	0.763	346.4	0.489	493.8	0.697
SC-20-2-30	568	539.9	0.951	388.2	0.683	429.9	0.757	275.5	0.485	384.4	0.677
SC-20-2-45	465	448.4	0.964	324.6	0.698	350.4	0.754	224.2	0.482	325.2	0.699
SC-30-1-15	728	715.1	0.982	640.5	0.880	588.1	0.808	480.7	0.660	503.3	0.691
SC-30-1-30	579	549.8	0.950	498.5	0.861	470.2	0.812	385.8	0.666	398.9	0.689
SC-30-1-45	496	473.7	0.955	402.2	0.811	385.4	0.777	320.1	0.645	340.7	0.687
SC-30-2-15	806	773.9	0.960	583.2	0.724	607.4	0.754	421.6	0.523	531.6	0.660
SC-30-2-30	602	631.8	1.050	457.8	0.760	511.1	0.849	330.5	0.549	451.7	0.750
SC-30-2-45	536	524.7	0.979	380.4	0.710	423.5	0.790	296.1	0.552	382.4	0.713
$N_{c,e}/N_{u,t}$ 均值	—	—	0.972	—	0.781	—	0.787	—	0.584	—	0.700
$N_{c,e}/N_{u,t}$ 方差	—	—	0.001	—	0.006	—	0.001	—	0.006	—	0.001
变异系数	—	—	0.033	—	0.099	—	0.037	—	0.134	—	0.033

讨论:根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 版),估算出无钢管约束陶粒混凝土柱的偏压承载力,与之对比,当陶粒混凝土强度等级为 CL20 时,本文 3 种偏心距试件的承载力分别提高了 271%,337%,461%(1.32 mm 厚钢管)和 346%,392%,536%(2.05 mm 厚钢管);当陶粒混凝土强度等级为 CL30 时,3 种偏心距试件的承载力分别提高了 253%,292%,410%(1.32 mm 厚钢管)和 285%,304%,452%(2.05 mm 厚钢管),可见薄壁钢管约束仍可大幅提高陶粒混凝土受压构件的承载力,而强度等级较高的陶粒混凝土的承载力提高率有所下降。

4 结论

1) 薄壁钢管陶粒混凝土短柱试件失效后,薄壁钢管受拉侧无开裂现象,受压侧出现多道环形褶皱,钢管两侧均达到屈服强度,试件破坏模式为弹塑性破坏;内部陶粒混凝土发生较大的塑性变形,无明显碎裂现象,受压侧嵌入钢管褶皱中。

2) 薄壁钢管陶粒混凝土短柱的偏心受压承载力随陶粒混凝土强度等级和钢管壁厚的增大以及偏心距的减小而提高,但套箍系数与偏心受压承载力的关系不明显,需进一步研究和探讨。

3) 薄壁钢管陶粒混凝土短柱试件的位移延性系数平均值为 4.53,可达到抗震延性设计要求。延性系数随钢管壁厚的增大而增大,随陶粒混凝土强度等级的提高而减小。

4) 陶粒混凝土强度等级与钢管壁厚存在匹配性,建议较高强度等级的陶粒混凝土采用较厚的薄壁钢管进行约束,可获得较高的承载力和较好的延性。

5) 对本文薄壁钢管约束陶粒混凝土柱试件偏心受压承载力的预测,美国和英国的规范、规程误差较大,我国的 CECS 28: 2012《钢管混凝土结构技术规程》的平均误差在 3%左右,可作为薄壁钢管约束陶粒混凝土短柱偏压承载力的预测公式。

6) 相对于无钢管约束的同条件陶粒混凝土短柱,薄壁钢管约束陶粒混凝土短柱的偏压承载力平均有 253%~536%的提高。

参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.

- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 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.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [5] 中国工程建设标准化协会, 混凝土结构专业委员会. 钢管混凝土结构技术规程: CECS 28—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [6] UY B. Local and post-local buckling of concrete filled steel welded box columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(1/2): 47-72.
- [7] O'SHEA M D, BRIDGE R Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(11): 1295-1303.
- [8] BRADFORD M A, LOH H Y, UY B. Slenderness limits for filled circular steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(2): 243-252.
- [9] 王振山, 冯永建, 卢俊龙, 等. 不同约束形式的薄壁钢管混凝土柱轴心受压试验及承载力计算[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 18-28.
- [10] 张耀春, 王秋萍, 毛小勇, 等. 薄壁钢管混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(1): 22-27.
- [11] 张耀春, 曹宝珠. 轴心受压薄壁圆钢管混凝土柱临界径厚比的确定[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 170-174.
- [12] 傅中秋, 吉伯海, 孙媛媛, 等. 钢管轻集料混凝土偏心受压构件承载力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1961-1966.
- [13] 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.
- [14] 吉伯海, 周文杰, 王晓亮. 钢管轻集料混凝土中长柱轴压性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 118-123.
- [15] 丁发兴, 应小勇, 余志武, 等. 圆钢管轻骨料混凝土轴压短柱的力学性能分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2011, 28(3): 207-212.
- [16] 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, 42(11): 101-106.
- [17] 张素梅, 郭兰慧, 王玉银, 等. 方钢管高强混凝土偏压构件的试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 17-24.
- [18] ALMAMOORI A H N, NASER F H, DHAHIR M K. Effect of section shape on the behaviour of thin walled steel columns filled with light weight aggregate concrete: experimental investigation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2020, 13: e00356.
- [19] 陈宗平, 经承贵, 宁璠. 螺旋筋增强方钢管混凝土柱的轴压性能及参数分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 13-22.
- [20] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2013.