

圆形空心混凝土柱的抗震性能

范建军

江苏中谊抗震工程股份有限公司

摘要:对四根圆形空心钢筋混凝土柱进行了准静态反向横向荷载试验,以研究其抗震性能。研究了壁厚比和约束结构对其抗震性能的影响,并检验了圆形空心混凝土柱抗震延性设计要求的适用性。试验结果表明,单层横向钢筋的圆形空心混凝土柱具有有限的延性,其位移延性随着壁厚比的增加而提高。带有横梁的两层横向钢筋使圆形空心混凝土柱具有优异的抗震性能。然而,与内部和外部横向钢筋数量相等的竣工柱相比,内部横向钢筋数量较少的设计柱表现出更好的响应。此外,对于圆形空心混凝土柱的延性设计,广泛使用的横向钢筋体积比抗震设计要求似乎是保守的。

关键词:空心混凝土柱;反向横向荷载;抗震性能;壁厚比;约束结构

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.18.016

一、引言

圆形空心混凝土柱在高海拔和大跨度的桥梁中越来越受欢迎,这是因为圆形空心混凝土柱提高了结构效率,减少了柱子对地震响应的质量贡献,并且与尺寸相似的实心柱相比^[1],由于混凝土材料和自重的大幅减少,成本和施工难度也随之降低。在过去的几十年里,一些研究集中在空心混凝土柱(HCCs)的抗压行为方面。较少研究圆形空心混凝土柱的抗震性能^[2]。

基于此为了研究圆形空心混凝土柱的抗震性能,特别是壁厚比和约束配置对圆形空心混凝土抗震性能的影响,并研究当前空心混凝土抗震延性设计要求的适用性,设计了四个圆形截面的大型柱单元,并在轴向荷载和反向循环侧向荷载的组合下进行了试验。

二、实验方案

(一)圆形空心混凝土柱

为了研究圆形空心混凝土柱的抗震性能,本文设计并测试了四个圆形截面的试验柱。根据中国桥梁工程实践中使用的圆形混凝土墩的设计参数,以及对壁厚和热轧带肋箍筋类型的限制^[3],本研究采用了1:3的比例。因此,所有的柱子单元被设计成具有相同的外径1000 mm,长宽比为3.85。试验柱的轴向荷载比为6%,代表了地震地区实心桥柱的典型值。并使用总截面面积1600 kN的相同恒定轴向荷载,对应于基于净截面面积的9-18%的轴向荷载比。

考虑到约束钢筋配置会影响空心柱的约束效果,从而会影响其延性能力,将四个柱子单元分为两组。两个柱子单元,S1和S2,为了便于施工,设计了单层横向钢筋放置在靠近混凝土外壁表面,壁厚比(t/d)分别设为0.1和0.125。另外两个柱子单元S3和S4设计了两层横向钢筋,用串联的方式连接,以增强约束效果,其t/d为0.2,代表了用两层横向钢筋约束。

(二)试验方法

为了监测塑性变形的发展,在柱基上方和基脚内的纵向钢筋上安装了应变仪。横向钢筋上也安装了应变片,以监测约束引起的应变。纵向和横向钢筋的测量布局如图1所示。在该图中,1-10代表纵向钢筋的位置,而N、S、E、W、NW、SW、NE和SE代表横向钢筋和桁架的位置。应用串联式LVDT来测量加载点的横向位移。柱子在力的控制下进行测试,直到极端纵向钢筋的第一次屈服,然后转为位移控制,达到规定的延性水平。与第一次屈服相对应的位移被确定为测试期间测量的推拉加载方向的平均值^[4]。测试顺序包括25、50、75和100%的理论屈服力 F_y 的单个循环,理论屈服力是根据柱子截面的弯矩分析,使用非线性有限元分析程序OpenSees计算的。之后,测试顺序包括三个周期,S1和S2柱的延性水平为1、1.5、2、3、4,S3和S4柱为1、1.5、2.5、3.5,直到发生故障。

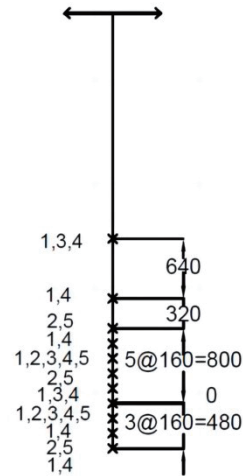


图1 纵向和横向钢筋的测量布局

三、结果与讨论

(一)破坏模式及裂缝发展情况

在低循环反向荷载的初始阶段,横向荷载是在荷载控制下施加的,而轴向力保持不变。所有柱单元的失效模式均为挠曲失效。且所有立柱单元的损坏进度相似。在发生的顺序中,最显著的观察结果是保护层混凝土开裂、纵向钢筋屈服、保护层混凝土初始剥落、核心混凝土压碎、纵向钢筋屈曲和断裂。单元S1和单元S2的最终破坏状态以内部混凝土墙压碎为特征。单元S3和单元S4的极限破坏状态以外部纵向钢筋断裂或外部混凝土墙附近的约束混凝土破碎为特征。与柱单元S3和S4相比^[5],柱单元S1和S2承受基于净截面面积的相对较高的轴向荷载比,在较小的横向位移下,柱单元S3与S2经历了纵向钢筋屈曲。同时在 $1/2F_y$ 之前没有明显的损伤。在侧向荷载 $V=3/4F_y$ 时首次观察到最初的弯曲裂缝。裂缝间距约为200 mm,如图2(a)所示。当外部拉伸纵向钢筋屈服

时，柱子被认为达到了屈服状态，此时西面和东面的许多新的水平裂缝从柱子底部一直发展到1500 mm的高度。纵向钢筋屈服后，在位移控制下施加侧向荷载。如图2 (b) 所示，现有的挠性裂缝延伸到南北两面，并以大约30° 的角度向水平轴倾斜。在下一级荷载期间，裂缝稳定发展，只有少数新的斜向裂缝形成。主要的实验现象的特点是柱底的弯曲裂缝扩大，如图2 (c) 所示。

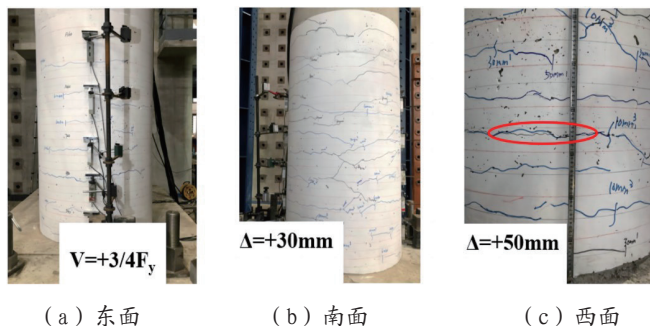


图2 混凝土破坏情况

(二) 混凝土破碎情况

随着横向位移的增加，发现柱底的覆盖混凝土有轻微的剥落，如图3所示。当S1和S2柱的侧向位移达到60 mm时，柱子的承载力达到峰值，之后开始迅速下降。混凝土大范围剥落后，柱子内侧的核心混凝土立即被压碎。由于S3和S4柱的核心混凝土受到了更好的约束效果，随着位移振幅的增加，覆盖混凝土剥落和核心混凝土破碎的程度逐渐增加，导致S3和S4柱的反应更加稳定。



图3 东面S4柱混凝土

(三) 横向荷载-位移响应

S1-S4柱的横向荷载-位移滞回曲线见图4。S1柱和S2单元在延性为3.0时达到承载力的峰值，并立即下降到峰值的80%以下。然而，S3和S4柱在延性为3.5时达到了承载力的峰值，并且在接下来的两个荷载等级中，承载力保持在峰值的80%以上。与S1和S2柱相比，S3和S4柱表现出更稳定的横向荷载-位移响应。

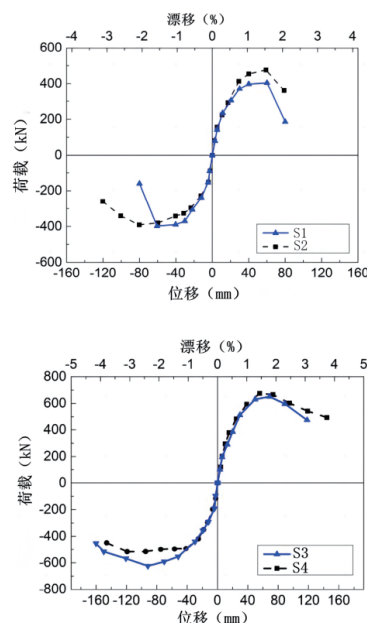


图4 试验柱横向荷载位移比较

表1为所有柱子的位移延展性。在该表中，屈服位移 Δ_y 被定义为对应于极端拉伸纵向钢筋第一次屈服的测量位移，而极限位移 Δ_u 被定义为对应于荷载能力下降到峰值的80%或极端拉伸纵向钢筋经历断裂的位移，以先发生者为准。位移延展性 μ_Δ 被定义为 Δ_u / Δ_y 的比率。如图所示，柱单元S1和S2呈现有限的延性反应，而柱单元S3和S4呈现延性反应^[6]。因此，为试验柱选择的体积配筋率足以确保延性行为。当圆形空心混凝土柱用单层横向配筋加固时，随着 t/d 从0.1增加到0.125，位移延性增加了约37%。当圆形空心混凝土柱用两层横向钢筋加固时，与S3柱相比，S4柱的位移延展性增加了16%。S4柱位移延展性的增加主要是由于其更好的约束效果，因为内外层横向配筋率是S3和S4柱的唯一测试变量。

表1 试验柱的位移延性

类别	t/d	轴向荷载比	屈服位移(mm)			极限位移(mm)			位移延性		
			东	南	西	东	南	西	东	南	西
S1	0.1	0.063	20	20	20	70	70	70	3.5	3.5	3.5
		0.176 ^a									
S2	0.125	0.063	18	20	19	75	107	91	4.2	5.4	4.8
		0.145 ^a									
S3	0.2	0.063	22	18	20	110	152	131	5.0	8.4	6.7
		0.094 ^a									
S4	0.2	0.064	16	18	17	120	145	132	7.5	8.1	7.8
		0.1 ^a									

(四) 归一化的累积耗散能量

测试期间圆形空心混凝土柱所吸收的能量是由负载-位移滞后曲线所包围的区域来定义的。图5为所有测试柱的累积能量耗散情况。如该图所示，如果加载点的侧向位移小于60mm，所有柱子的能量耗散能力几乎相同。之后，S3和S4柱的累积耗能明显增加，因为两层横向钢筋对核心混凝土和内侧混凝土墙提供了更好的约束效果。对于用单层横向钢筋加固的柱子，随着壁厚比从0.1增加到0.125，累积能量耗散增加。对于用两层横向钢筋加固的柱子，S4柱呈现出更好的能量耗散能力。从这个角度来看，在抗震设计中，以4:9的内外圆环量比加固的圆形空心混凝土柱是首选。

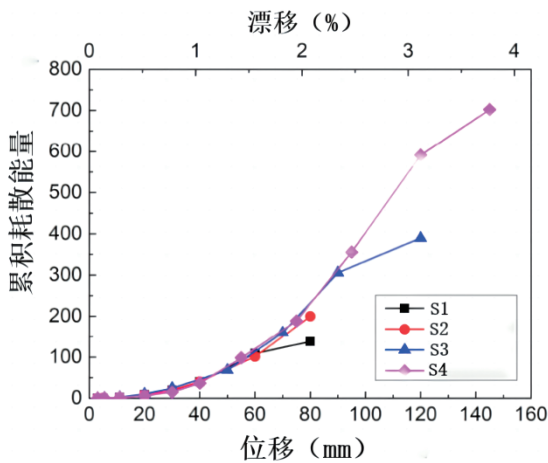


图5 累积能量耗散

(五) 内外侧横向配筋率的影响

图6为东面S3和S4的柱子在柱高480 mm时，在推动方向上的内部和外部横向钢筋的约束引起的应变和拉力。外侧横向钢筋、内侧横向钢筋和桁架的约束引起的应变随着延展性水平的增加而增加。根据图中可观察

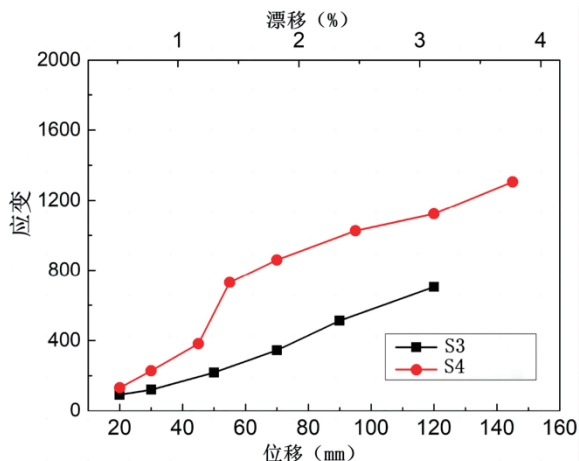


图6 S3、S4柱圆环内层应变

到，S4柱的内层钢筋所产生的应变总是大于S3柱的应变，但仍低于屈服应变。这意味着S4柱内层的利用率比S3柱的更充分。此外，内层横向配筋的数量可以进一步优化。且两根柱子的内层所产生的约束诱发需求都小于外层的需求。一般来说，在保持相同体积横向配筋率的情况下，减少内层横向配筋量是合理的。

四、结论

以壁厚比和约束配置为试验参数，对四根圆形空心混凝土柱进行了反向准静态侧向加载试验。比较和分析了柱子的地震行为，包括破坏模式、滞后特性、位移延展性、能量耗散能力。可以得出以下结论。

(1) 单层横向钢筋的圆形空心混凝土柱的破坏特点是混凝土内壁破碎。相反，有两层横向钢筋的圆形空心混凝土柱的破坏特点是外部拉伸纵向钢筋的断裂或靠近外部混凝土墙的封闭混凝土的破碎。

(2) 与S1柱相比，S2柱在最大有用延性水平上形成了较高的约束诱发的横向应变，这验证了单层横向配筋的圆形空心混凝土柱的约束效应随着壁厚的增加而改善。对于S3和S4柱，在塑性铰链区域内，对内层横向钢筋产生的需求小于外层横向钢筋，验证了使用较少的内层横向钢筋是合理和有效的。考虑到S3和S4柱的内侧横向钢筋没有达到屈服应变，因为外侧受拉纵向钢筋断裂或约束混凝土在外侧混凝土墙附近被压碎，内侧横向钢筋的数量可以进一步减少和优化。

参考文献

[1] 陈光明, 陆奕辰, 谢攀, 滕锦光, 余涛, 向宇, 成形, 李召兵, 胡福南, 刘伟楠. FRP-混凝土-钢双壁空心桥墩分析及设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35 (02): 12-38.

[2] 赵均海, 樊军超, 胡壹, 张冬芳. 复式钢管混凝土结构研究现状与发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42 (01): 1-15.

[3] 程晨, 李鲲, 范霏然, 陈娟, 杜国锋. 内置空心钢球的圆截面钢管混凝土柱抗震性能试验[J]. 世界地震工程, 2020, 36 (04): 42-52.

[4] 张向冈, 杨健辉. 钢管再生混凝土结构受压与抗震性能研究进展[J]. 混凝土, 2017 (11): 50-53.

[5] 王宏伟, 卢德辉, 周云. 圆、方形空心钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34 (02): 129-136.

[6] 胡波, 王建国. FRP约束混凝土柱的研究现状与展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26 (03): 96-104.