

焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压性能试验研究

陈 誉, 黄 勇

(华侨大学 土木工程学院, 福建厦门 361021)

摘要:通过对18根焊接不锈钢方管混凝土短柱模型试件的轴压试验,观察了各试件的破坏现象,分析了混凝土强度、试件高宽比和钢管板件宽厚比试件轴压承载力的影响,得到了荷载-位移曲线、荷载-应变曲线及柱截面应变强度分布曲线。根据试验现象,试件的破坏模式可以归为两类:一类为钢管在整个柱表面范围内发生局部凸曲,靠柱中焊缝破坏;另一类为局部凸曲未能发展到整个柱表面,在端部或者端部附近焊缝破坏。试验结果表明:混凝土强度越高,试件的轴压承载力越大,但钢管对核心混凝土的约束作用相对减小;焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力随试件高宽比的增大而增大,随钢管板件宽厚比的减小而减小;试件截面的角部存在应力集中现象,即截面角部的应力大于截面其余部位的应力;焊接不锈钢方管混凝土短柱具有很好的变形能力,其破坏属于延性破坏,具有良好的安全储备;焊缝强度是影响焊接不锈钢方管混凝土短柱承载力的一个主要因素。

关键词:焊接不锈钢方管混凝土短柱;混凝土强度;高宽比;宽厚比;静力试验;轴压性能

中图分类号:TU392.3 TU317.1 **文献标志码:**A

Experimental research on static behavior of welded concrete-filled stainless steel square stub columns under axial compression

CHEN Yu, HUANG Yong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper describes an experimental study on the ultimate axial strength of 18 weld concrete-filled stainless steel square stub columns. The paper observes the failure phenomena of all the specimens, analyzes the influences of concrete strength, ratio of height to width and ratio of width to thickness on the axial ultimate compression of the specimens and obtains columns load-deformation curves, load-strain curves and load strain intensity distribution curves. According to the experiment, the failure modes could be classified into two categories: in one failure mode, local buckling spreads to the whole surface of the stainless steel tube and weld damage occurs in the middle of the column; in the other mode, local buckling does not spread to the whole surface of the column and weld damage occurs at the end of the weld or around the end. Analysis of the experimental results shows: axial compressive ultimate capacity of the specimens increases as concrete strength increases, while the steel tube exerts less restrictive influence on the core concrete; axial compressive ultimate capacity of the specimens decreases as the ratio of height to width increases or the ratio of width to thickness decreases; under axial compression these columns have a stress concentration at the corners, in other words, the stress at the cross section of the corner is greater than that in other places; the columns have a good plastic deformation capacity, and the damage is ductility damage, so the columns have a good safety margin; the ultimate capacity of weld seam is the main factor that affects the ultimate compressive capacity of columns.

Keywords: welded concrete-filled stainless steel square stub columns; concrete strength; ratio of height to width; ratio of width to thickness; static experiment; axial compression behavior

基金项目:国家自然科学基金项目(51008133, 51278209),福建省自然科学基金计划项目(2012J01219)。

作者简介:陈誉(1978—),男,湖北公安人,工学博士,副教授。E-mail:kinkinging@163.com

收稿日期:2011年11月

0 引言

在不锈钢管中填充混凝土形成不锈钢管混凝土结构,可有效减少不锈钢用量,从而降低工程造价^[1]。不锈钢方管混凝土结构具有外观好、耐久性好、维护费用低、承载力高、抗震性能好、耐火性能好以及相对经济等优点^[2]。采用焊接工艺增加了此种结构的灵活性,其方形截面形式更易于加工,适用于大截面并与其他构件的连接。因此,这种新型组合结构在海洋平台、海岸建筑和桥梁以及一些对耐久性要求较高的重要建筑中具有较好的应用前景。

目前,国内外学者对不锈钢方管混凝土构件开展了初步的研究工作,并取得了一些研究成果。文献[3]通过 19 个方形和矩形的不锈钢管混凝土轴压短柱试验研究,分析了不锈钢管混凝土轴压短柱的破坏模式和承载力。文献[4]基于 ABAQUS 有限元对薄壁不锈钢方管混凝土轴压构件进行了非线性有限元分析,共进行了 60 个算例的分析。文献[5]进行了 6 个不锈钢方管混凝土和 2 个不锈钢方管的轴压构件试验研究,分析了试件约束效应系数对试件的荷载-位移曲线的影响。文献[6]进行了 9 个方形不锈钢方管混凝土短柱的试验研究,并给出了其承载力计算公式。文献[7]进行了 24 个不锈钢方管混凝土短柱和 12 个不锈钢空方管柱的轴压试验研究以及有限元参数分析,将回归出的承载力公式与试验值进行对比分析。文献[8]进行了 6 个方形不锈钢空钢管和 6 个不锈钢方管混凝土柱的轴压和偏压试验研究以及 4 个不锈钢管混凝土梁的受弯试验研究,将不锈钢空钢管和不锈钢方管混凝土的力学性能进行了对比分析。目前国内外研究所涉及的不锈钢方管混凝土结构中不锈钢方管均为热成型,而针对焊接不锈钢方管混凝土短柱,国内外还鲜见试验和理论研究。为此,本文通过焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压性能试验研究,分析焊接不锈钢方管混凝土短柱的轴压力学性能、破坏模式及承载力,以及混凝土强度、高宽比和宽厚比等参数对焊接不锈钢方管混凝土短柱承载力的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

为分析混凝土强度、柱高宽比和钢管板件宽厚比三参数对焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力的影响,试验共设计 18 个不锈钢方管混凝土轴压短柱试件,管材均为 SUS304 型号不锈钢,采用工厂预制,实验室浇筑混凝土。试件编号及参数见表 1,试

件缩尺比例均为 1:3。不锈钢方管壁厚设计值均为 1 mm。试件编号分别按柱的截面形式,混凝土强度,截面宽度和高宽比进行命名,如 S300635,S 代表方形截面,30 代表内灌混凝土强度等级为 C30,06 代表截面边长为 6 cm,35 代表试件高宽比为 3.5。

表 1 试件基本参数

Table 1 Parameters of stub columns

试件编号	混凝土 强度等级	壁厚 t/mm	柱高 H/mm	边长 B/mm	高宽比 H/B
S200630	C20	1.0	180	60	3.0
S200635	C20	1.0	210	60	3.5
S200640	C20	1.0	240	60	4.0
S200830	C20	1.0	240	80	3.0
S200835	C20	1.0	280	80	3.5
S200840	C20	1.0	320	80	4.0
S201030	C20	1.0	300	100	3.0
S201035	C20	1.0	350	100	3.5
S201040	C20	1.0	400	100	4.0
S300630	C30	1.0	180	60	3.0
S300635	C30	1.0	210	60	3.5
S300640	C30	1.0	240	60	4.0
S300830	C30	1.0	240	80	3.0
S300835	C30	1.0	280	80	3.5
S300840	C30	1.0	320	80	4.0
S301030	C30	1.0	300	100	3.0
S301035	C30	1.0	350	100	3.5
S301040	C30	1.0	400	100	4.0

1.2 材性试验

试验前在同批不锈钢管管材上取样实施材料性能试验,具体测量结果见表 2。混凝土材性试验采用标准试块,试验结果见表 3。

表 2 不锈钢材性试验结果

Table 2 Results of tensile tests of stainless steel

试样编号	f_y/MPa	f_u/MPa	\bar{f}_y/MPa	\bar{f}_u/MPa	E_s/MPa
1	240	370			2.03×10^5
2	280	458	258	409	1.98×10^5
3	253	399			2.01×10^5

表 3 混凝土材性试验结果

Table 3 Results of concrete compressive strength tests

试块编号	边长/mm	f_{cu}/MPa	\bar{f}_{cu}/MPa	E_s/MPa
C30-1	150	28.91		2.95×10^5
C30-2	150	30.02	29.43	2.99×10^5
C30-3	150	29.36		3.01×10^5
C20-1	150	21.16		2.55×10^5
C20-2	150	23.43	22.74	2.58×10^5
C20-3	150	23.62		2.59×10^5

1.3 加载装置和测试方案

试验选用 500 kN 液压拉压试验机施加轴压力。在试验中追踪测量焊接不锈钢方管混凝土短柱在轴压力作用下的应变分布、柱的整体变形,观察焊接不锈钢方管混凝土短柱的破坏现象,据此分析焊接不锈钢方管混凝土短柱的极限轴压性能。

试验测试包括荷载、应变和柱端位移。荷载的测量选取量程 2000 kN 的荷载传感器,应变的测量选用单向应变片及三向应变花,位移的测量选用量程 100 mm 的位移,测点布置见图 1。1#~6#测点为应变测点,其中 3#、5#和 6#测点为三向应变片测点,1#和 4#测点为单向应变片测点,7#和 8#测点为位移测点。

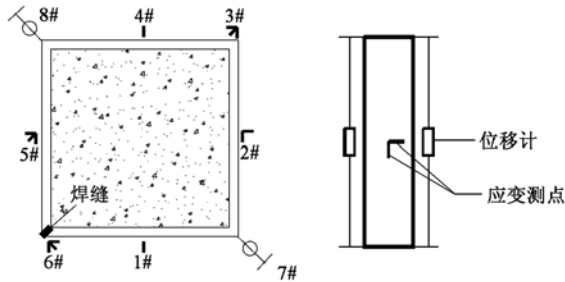


图 1 位移和应变测点布置

Fig. 1 Arrangement of displacement and strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏现象及破坏模式

试件共同的破坏现象如下:荷载加到 100 kN 与 140 kN 之间时,间或有混凝土碎裂的声音,随着荷载继续增大,柱端钢管先出现局部屈曲,但发展缓慢,然后柱中部也相继出现屈曲,且发展较端部快,发生屈曲的部位随荷载的增大较快地鼓凸,柱表面钢管一般出现 3~5 处局部凸曲,随后柱角部焊缝撕裂,混凝土被压碎,荷载不再增加,试件破坏。试件表面的凸曲是由于轴向压力和混凝土膨胀引起的横向拉力共同作用使得钢管局部的屈曲所致,压碎的混凝土有很大的挤压流动性。

试验中出现的主要破坏模式有:1)模式一:钢管在整个柱面范围内都发生局部凸曲,焊缝靠中部破坏,试件 S200635、试件 S200630 和试件 S300630 均属于此类破坏模式,如图 2a 所示;2)模式二:局部凸曲未能发展到整个柱表面,端部或者端部附近的焊缝率先破坏,试件 S200835、S300835、S300640 等均属于此类破坏模式,如图 2b 所示。

破坏模式一中整个柱身受力比较均匀,材料较充分发挥其性能,是一种理想的破坏模式;破坏模式二中柱表面的部分钢管未进入屈曲阶段,未能充分发挥材料的力学性能,且焊缝靠近端部破坏,这在实际工程中,将导致结构节点处首先破坏,降低了结构的整体承载能力及其抗震性能,工程中应尽量避免。

2.2 荷载-位移曲线

图 3 给出了试件的荷载-位移的关系曲线,图中的纵坐标 P 为施加在试件上的轴向荷载,以压力为



(a) 模式一(试件 S200635)

(b) 模式二(试件 S300640)

图 2 试件破坏情况

Fig. 2 Failure modes of stub columns

正;横坐标 Δ 为柱端的相对位移,以压缩变形为正。

由图 3 可知,在荷载较小时, $P-\Delta$ 曲线几乎呈线性,试件均处于弹性工作阶段,其变形也较小,当荷载继续增大后, $P-\Delta$ 曲线不再呈线性,试件开始进入弹塑性工作阶段,荷载达到最大值后,曲线不再上升而是近乎水平,出现明显的屈服平台,试件进入塑性流幅阶段,此时位移发展较快,位移增大到一定值后,柱破坏失去承载能力,曲线突降,很少出现强化阶段,其中试件 S301040 与试件 S300830 在加载过程中达到最大荷载后,荷载下降形成新的平衡并能继续承担一定的荷载,表明其具有较好的延性。总体而言,焊接不锈钢方管混凝土短柱具有很好的变形能力和塑性,其破坏属于延性破坏,具有良好的安全储备。除了混凝土等级 C20 且边长为 60 mm 的试件外,随着试件高宽比的增大,承载力和延性基本呈现下降趋势。

2.3 荷载-应变曲线

在轴压力作用下柱截面会发生三向变形,本文量测了不锈钢管表面的纵向和横向应变,图 4 给出了各柱中不锈钢管壁上的荷载-应变曲线,图中横坐标为横向应变 ε_1 和纵向应变 ε_2 (以压应变为负,拉应变为正),纵坐标为荷载值。

由图 4 可知,在荷载较小时无论是纵向应变还是横向应变跟荷载保持线性发展,这表明柱在加载初期近似弹性工作。加载初期纵向、横向应变同时发展,但纵向应变一般均大于横向应变,荷载-应变曲线中的纵向应变曲线初始斜率小于横向应变曲线初始斜率,这是由于轴压力作用下柱以轴向变形为主,荷载达最大值后,两个方向应变均迅速发展,以混凝土等级 C30 边长为 60 mm 试件为例,纵向极限应变为 0.025,横向极限应变为 0.015,其它试件纵向极限应变均大于横向极限应变。当两个方向的应变达到极限应变时,荷载不再继续增大保持在最大值附近,最终试件由于横向应力超过焊缝抗拉强度导致焊缝破坏。从应变发展上看,高宽比大的试件延性较差。

从各试件的荷载-应变曲线可以看出,荷载达到

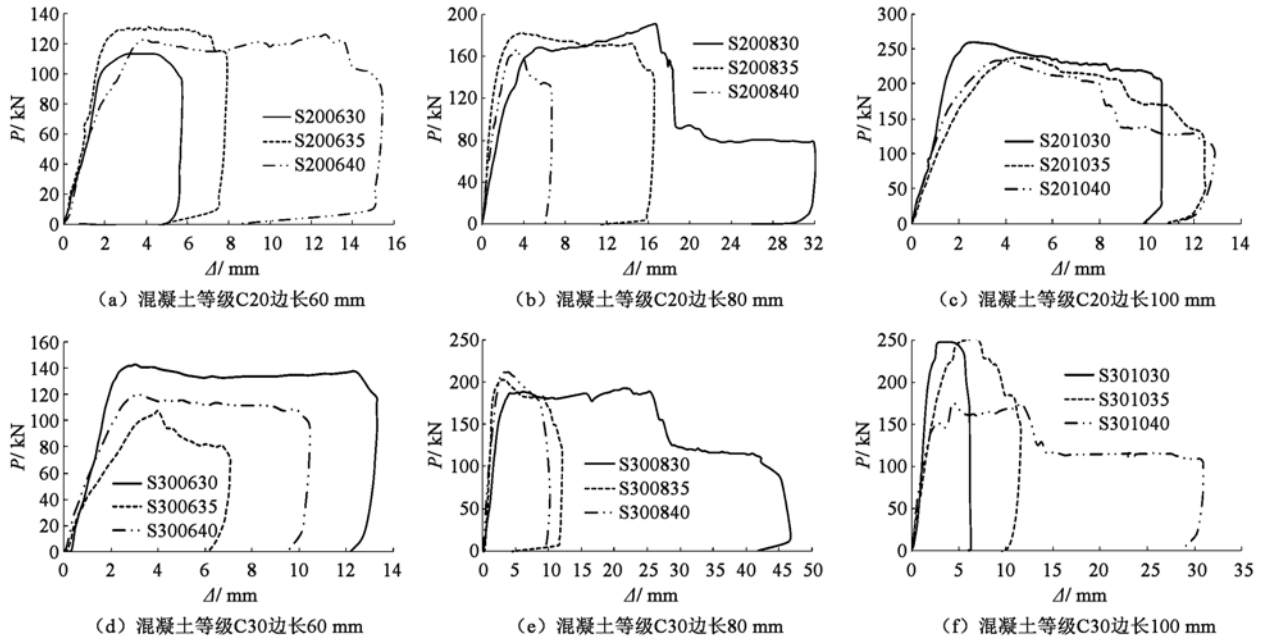


图3 荷载-位移曲线

Fig. 3 Curves of load versus displacement

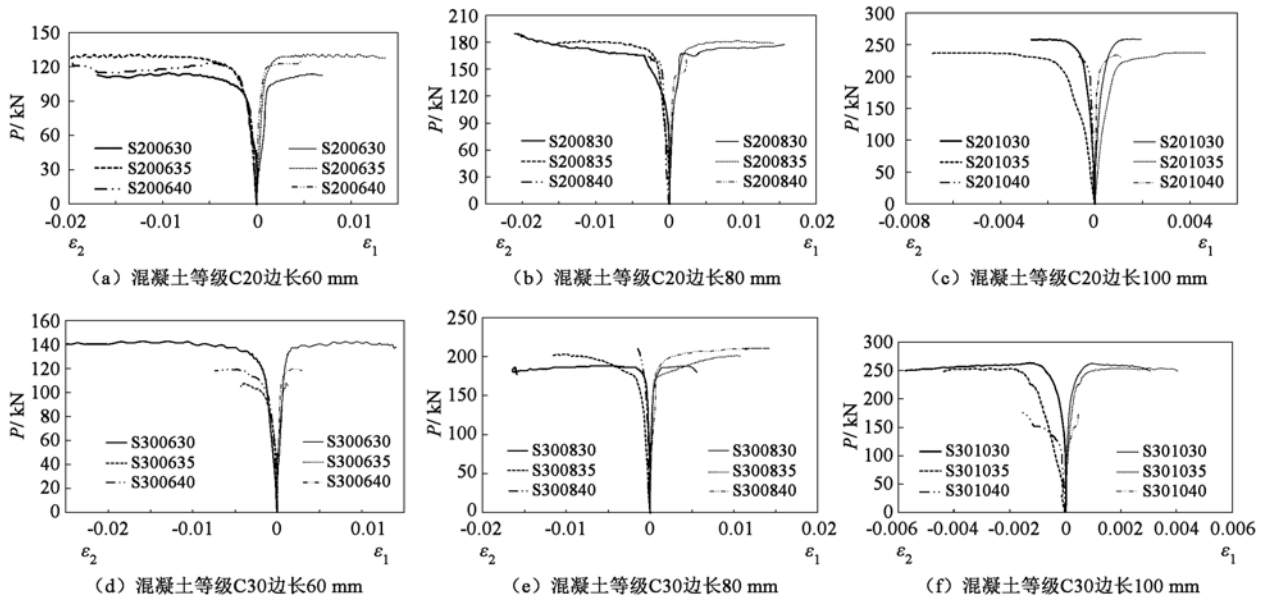


图4 荷载-应变曲线

Fig. 4 Curves of load versus strain

最大值后,试件进入塑性工作阶段并能维持很长一段时间。可见,不锈钢混凝土短柱在轴压力作用下,具有很好的变形能力。

2.4 应变强度分布

采用应变强度使弹性和弹塑性状态下的应变具备可比性。应变强度的表达式为:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1)$$

式中: ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为第一、第二和第三主应变。

通过应变测点的数据分析,了解柱截面的应变强度分布规律,应变强度的计算参考文献[9-10]。

图5给出了试件三向测点的应变强度分布,横坐标为测点编号(图1)。其中,3#和6#测点位于角部,5#测点位于管壁中部。由图5可知在荷载较小时各测点应变强度均匀分布,随着荷载增大,试件进入弹塑性工作阶段,在极限荷载作用下试件 S200635、S200835 和 S300630 的角部3#或者6#测点极限应变达到0.011,5#测点极限应变仅仅达到0.005左右;其余试件的角部3#或者6#测点极限应变达到0.0025,5#测点极限应变仅为0.0015左右。角部应变强度均大于中部的应变强度,应力在角部出现集中现象,导致角部焊缝在柱表面钢管屈曲后开裂,柱失去继

续承载的能力。这也使得焊缝强度成为影响不锈钢方管混凝土短柱承载力的一个主要因素。

3 轴压承载力对比

3.1 试验与理论值比较

不锈钢方管混凝土短柱的理论轴压承载力等于混凝土的理论轴压承载力与加不锈钢方管的理论轴拉承载力之和。理论计算值与试验值的对比如表 4 所示。由于试件 S301040 试验时数据采集因接触问题导致测量结果失真,表 4 未列入。

由表 3 可知,各试件承载力的试验值与理论值比值均小于 1,说明柱的理论分析模型还不完善,不锈钢的抗压性能远不如其抗拉性能,用其抗拉屈服强度计算柱的理论承载力将比实际承载力大。

除了上述分析模型的原因以外,还主要存在以下影响因素:1)实际加工过程中柱存在较多缺陷,尤其是试验过程中所表现出来的不锈钢连接焊缝,在混凝土破坏后就迅速撕裂从而失去约束作用;2)由于不锈钢管壁薄,且表面光滑,细微局部屈曲使得不锈钢管与混凝土黏结破坏后,钢管发生失稳破坏,使其轴压承载力小于理论值,而在加载后期混凝土压溃膨胀使钢管壁主要承受横向拉力,由于焊缝的承载力较低,在不锈钢管抗拉强度未能成分发挥的情况下,焊缝发生破坏,混凝土失去约束,这也使得试验承载力比理论承载力低。

3.2 影响轴压承载力的因素

3.2.1 混凝土强度

轴压承载力与混凝土等级的关系曲线如图 6 所示。图中,S1035 系列为比较试件 S201035 与试件 S301035 的混凝土等级对轴压承载力的影响,其余类

表 4 理论计算值与试验值比较

Table 4 Comparison of measured value with theoretical model calculated result

试件编号	P_{uc}/kN	P_{ut}/kN	P_{ut}/P_{uc}
S200630	144	114	0.79
S200635	144	131	0.91
S200640	144	126	0.88
S200830	228	190	0.83
S200835	228	182	0.80
S200840	228	166	0.73
S201030	331	258	0.78
S201035	331	237	0.72
S201040	331	233	0.70
S300630	168	142	0.85
S300635	168	107	0.64
S300640	168	117	0.70
S300830	271	190	0.70
S300835	271	203	0.75
S300840	271	211	0.78
S301030	398	261	0.66
S301035	398	252	0.63
S301040	398	—	—

注: P_{uc} 、 P_{ut} 为试件轴压承载力理论计算值和试验值。

似。由图 6 可以看出,混凝土强度对焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力有较大的影响,焊接不锈钢方管混凝土短柱的轴压承载力随混凝土强度的提高而增大。由表 3 可知,混凝土实际抗压强度从 22.74 MPa 增大到 29.43 MPa 时,试验值与理论值的平均比值从 0.79 降到 0.71,故随混凝土强度提高,不锈钢方管对混凝土的约束影响逐渐减小。

3.2.2 柱高宽比

柱高宽比对焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力的影响关系曲线如图 7 所示。S2008 系列为比较试件 S200830、S200835 和 S200840 的高宽比对轴压承载力的影响,其余类似。由图 7 可知,焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力随高宽比的增大而减小。

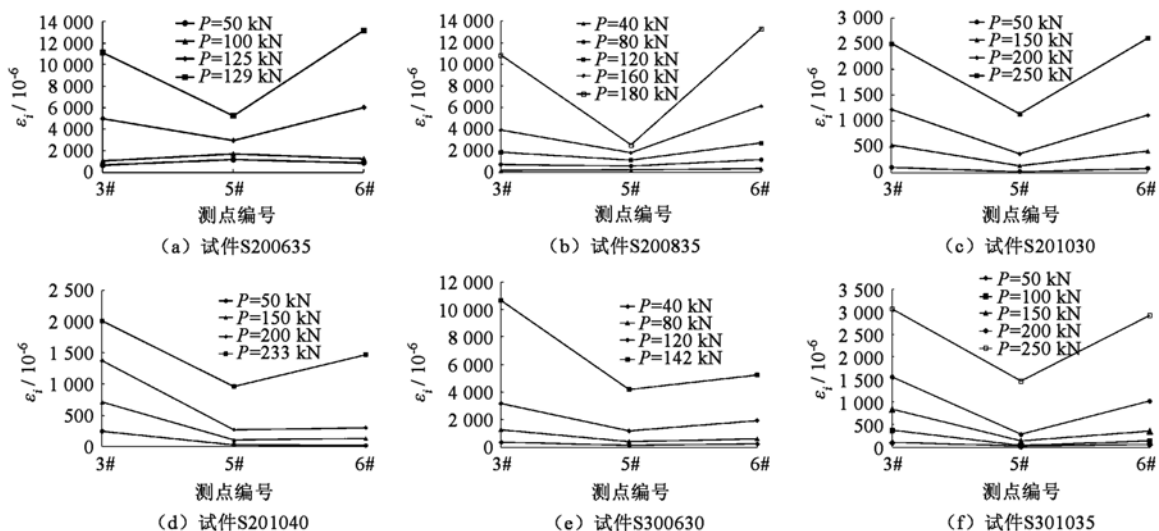


图 5 应变强度分布

Fig.5 Strain versus spot of joints

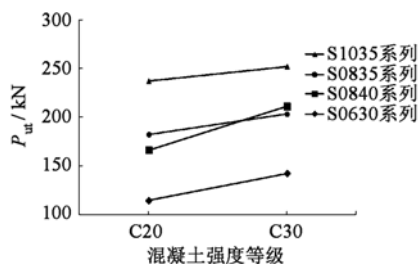


图6 混凝土强度与承载力关系曲线

Fig. 6 Effect of concrete strength on ultimate capacity

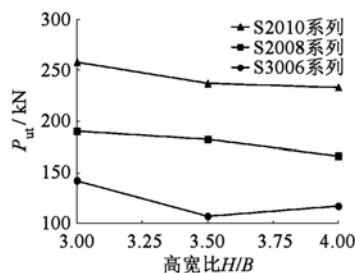


图7 高宽比与承载力关系曲线

Fig. 7 Effect of ratio of height to width on ultimate capacity

3.2.3 板件宽厚比 B/t

柱板件的宽厚比对焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力的影响关系曲线如图8所示。S2030系列为比较试件 S200630、S200830、S201030 的宽厚比对轴压承载力的影响,其余类似。由图8可知,焊接不锈钢方管混凝土短柱轴压承载力随不锈钢管板件宽厚比的增大而增大。

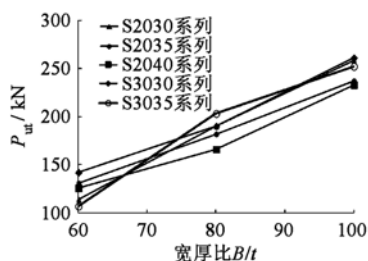


图8 宽厚比与承载力关系曲线

Fig. 8 Effect of ratio of width to thickness on ultimate capacity

4 结论

1) 焊接不锈钢方管混凝土短柱具有很好的变形能力,其破坏属于延性破坏,具有良好的安全储备。

2) 在轴向荷载作用下不锈钢方管角部出现集中应力现象,这导致角部焊缝应力在柱表面钢管屈曲后达到其强度而撕裂破坏,致使柱失去继续承载的能力。这也使得焊缝强度成为决定焊接不锈钢方管混凝土短柱承载力的一个主要因素。

3) 焊接不锈钢方管混凝土短柱的轴压承载力随

混凝土强度的提高、柱高宽比的减小以及不锈钢管板件宽厚比的增大而增大。

4) 随混凝土强度提高,不锈钢方管对混凝土的约束影响逐渐减小。

参 考 文 献

- [1] 廖飞宇,陶忠. 不锈钢管混凝土的发展综述[J]. 工业建筑, 2009, 39(4): 114-118. (LIAO Feiyu, TAO Zhong. The state-of-the-art of concrete filled stainless steel tubular structures [J]. Industrial Construction, 2009, 39(4): 114-118. (in Chinese))
- [2] 王元清,袁焕鑫,石永久. 不锈钢结的应用和研究现状[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 1-12. (WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu. A reviews of current applications and research of stainless steel structure[J]. Steel Construction, 2010, 25(2): 1-12. (in Chinese))
- [3] Ellobody E, Young B. Experimental investigation of concrete filled cold formed high strength stainless steel tube columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 484-492.
- [4] Ellobody E. Nonlinear behavior of concrete filled stainless steel stiffened slender tube columns[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(3): 259-273.
- [5] Lam D, Wong K K Y. Axial capacity of concrete filled stainless steel columns[C]// Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium. New York: ASCE, 2005: 20-24.
- [6] Roe W. Behaviour and design of concrete filled stainless steel columns [D]. Wollongong, Australia: University of Wollongong, 2006: 8-14.
- [7] Gjerding Smith A. Strength and deformation behaviour of short concrete filled stainless steel columns [D]. Kensington, Australia: University of New South Wales, 2004: 1-12.
- [8] Asgar T. Behaviour and design of concrete filled square hollow columns using stainless steel sections [D]. Wollongong, Australia: University of Wollongong, 2005: 10-20.
- [9] 陈誉,赵宪忠,陈以一. 平面 K 型圆钢管相贯搭接节点有限元参数分析与极限承载力计算公式[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 30-36. (CHEN Yu, ZHAO Xianzhong, CHEN Yiyi. Parametric analysis and design equation of ultimate capacity for unstiffened overlapped CHS K-joints[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(4): 30-36. (in Chinese))
- [10] 陈誉,彭兴黔. 空间 KK 型双弦杆圆钢管搭接节点有限元参数分析与极限承载力计算公式[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 37-45. (CHEN Yu, PENG Xingqian. Finite element parametric analysis and design formula of ultimate capacity for overlapped CHS KK-joint with two chords [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 37-45. (in Chinese))