

文章编号: 1000-4750(2012)05-0086-07

圆、矩形钢管混凝土短斜柱力学性能试验研究

任庆新, 郭俊峰, 贾连光, 刘 泓

(沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 该文对 6 个圆钢管混凝土短斜柱、10 个矩形钢管混凝土短斜柱进行了竖向荷载作用下的试验研究, 探讨了倾斜角度对圆、矩形钢管混凝土短斜柱抗压力学性能的影响, 建议了圆、矩形钢管混凝土短斜柱强度承载力计算式。结果表明: 1) 随着倾斜角度的增加, 圆、矩形钢管混凝土短斜柱极限承载力和刚度均有下降的趋势; 2) 建议的极限承载力计算式计算结果与试验结果总体上较为吻合, 可用来预测圆、矩形钢管混凝土短斜柱的截面强度。

关键词: 钢管混凝土; 短柱; 斜柱; 力学性能; 圆形截面; 矩形截面

中图分类号: TU317.1; TU398⁺.9 **文献标志码:** A

TESTS ON INCLINED CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR STUB COLUMNS WITH CIRCULAR AND RECTANGULAR SECTIONS

REN Qing-xin, GUO Jun-feng, JIA Lian-guang, LIU Hong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Tests on six inclined concrete-filled steel tubular stub columns with circular sections and ten inclined concrete-filled steel tubular stub columns with rectangular sections subjected to longitudinal loading were carried out to study the influence of different angle of inclination on the compressive mechanical properties, and a simplified formula is suggested for calculating the member capacity. The test results show that the compressive strength and the stiffness both decrease with the increase of the angle of inclination. Generally, the formula can reasonably evaluate the ultimate bearing capacity of inclined concrete-filled steel tubular stub columns, and the calculated results show good agreements with the experimental results.

Key words: concrete-filled steel tube; stub column; inclined column; mechanical property; circular section; rectangular section

钢管混凝土正被越来越广泛地应用于高层和超高层建筑、大跨和超大跨桥梁中, 取得了良好的经济效果和建筑效果^[1-4]。随着钢管混凝土结构应用范围的不断扩大, 钢管混凝土斜柱已出现在一些典型工程中, 如北京国家体育场、广州新电视塔、四川广电中心、北京南站及河北开元环球中心等, 但以往的研究大多集中在直柱方面, 斜柱方面涉及

较少, 尤其是试验研究。

刘创等^[5]对国家体育场工程的矩形钢管永久模板混凝土斜柱(矩形截面)的施工过程进行了分析和探讨。郭彦林等^[6]揭示了广州新电视塔细腰段(圆形截面)群柱失稳破坏的机理。金刚等^[7]采用预应力悬挑梁和钢管混凝土斜柱(圆形截面)方式进行了铁岭体育馆的钢屋盖及大悬挑平台结构设计。傅剑平

收稿日期: 2010-08-19; 修改日期: 2010-10-28

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20080440397); 辽宁省博士启动基金项目(20091064); 建设部科技计划项目(2009-K2-11); 沈阳建筑大学省级重点实验室开放基金项目(JG200709)

通讯作者: 任庆新(1978—), 男, 河南卫辉人, 副教授, 博士, 从事钢与混凝土组合结构和混合结构、结构加固研究(E-mail: renqingxin@sjzu.edu.cn).

作者简介: 郭俊峰(1983—), 男, 内蒙古太旗人, 硕士生, 从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: psarsenic@163.com);

贾连光(1961—), 男, 河北武邑人, 教授, 硕士, 院长, 从事钢结构研究(E-mail: syjlg@163.com);

刘 泓(1962—), 女, 辽宁锦州人, 工程师, 学士, 从事结构试验研究(E-mail: cehliu@sjzu.edu.cn).

等^[8]进行了钢管混凝土斜柱(圆形截面)抗剪环-环梁节点受力性能试验研究,结果表明与相同条件直柱环梁节点没有明显区别。任庆新等^[9]进行了钢管混凝土斜柱(方形截面)轴压工作机理分析,初步揭示了钢管和混凝土的组合作用及破坏特点。周晓飞等^[10]采用钢管混凝土斜柱(圆形截面)支撑进行了上海港国际客运中心综合客运楼钢结构设计。金振士等^[11]介绍了世博演艺中心劲性钢管斜柱(矩形截面)内的混凝土施工质量控制技术。方小丹等^[12]对采用钢管混凝土斜柱(圆形截面)的广州西塔进行了抗震设计。Han 等^[13]进行了钢管混凝土短斜柱(方形截面)的试验研究,并建议了承载力计算公式。

综上所述,目前有关钢管混凝土斜柱的研究大多集中在施工控制和结构设计方面,且工程建设标准中尚缺乏钢管混凝土斜柱直接的设计规定,有必要对钢管混凝土斜柱进行试验研究,分析其破坏形态及倾斜角度对其承载力的影响。鉴于此,本文在方钢管混凝土短斜柱试验研究的基础上,进行了6个圆钢管混凝土短斜柱、10个矩形钢管混凝土短斜柱在竖向荷载作用下力学性能的试验研究,探讨了倾斜角度对圆、矩形钢管混凝土短斜柱抗压力学性能的影响,建议了圆、矩形钢管混凝土短斜柱强度承载力计算式。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

参考某实际工程,按照约束效应系数相等的原则,共设计了16个试件,试验参数为倾斜角度,试件的高宽(径)比取为3,详细设计情况见表1。

表1 试件参数及力学指标

Table 1 Parameters of specimens and mechanical properties

截面类型	序号	试件编号	倾斜角度(θ) / (°)	试验值/kN	平均值/kN	SI
圆形	1	ic1-1	0	3458	3466	1
	2	ic1-2	0	3474		
	3	ic2-1	9	3439	3333	0.96
	4	ic2-2	9	3227		
	5	ich1-1	9	772	763	0.22
	6	ich1-2	9	754		
矩形	7	ir1-1	0	2895	2949	1
	8	ir1-2	0	3003		
	9	ir2-1	9	2870	2787	0.95
	10	ir2-2	9	2705		
	11	ir3-1	9	2773	2735	0.93
	12	ir3-2	9	2698		
	13	irh1-1	9	484	505	0.17
	14	irh1-2	9	525		
	15	irh2-1	9	512	499	0.16
	16	irh2-2	9	485		

试件高度为600mm,钢管壁厚为3.72mm,圆钢管混凝土短斜柱直径为200mm,矩形钢管混凝土短斜柱长边为200mm,短边为150mm。SI为强度系数,定义详见后文。编号ic代表圆钢管混凝土短斜柱,ich代表圆钢管短斜柱;ir代表矩形钢管混凝土短斜柱,irh代表矩形钢管短斜柱,编号-前面的数字分别代表不同组,编号-后面的数字分别代表同一组的不同试件。矩形截面构件中ir2、irh1为两组沿矩形截面强轴倾斜的短斜柱,ir3、irh2为两组沿矩形截面弱轴倾斜的短斜柱。

圆钢管混凝土短斜柱的钢管由一块钢板卷制焊接而成,矩形钢管混凝土短斜柱的钢管由四块钢板拼焊而成。首先按所要求的长度做出空钢管,并保证钢管两端截面的平整。钢管上下两端分别设有边长为250mm和300mm、厚度为20mm的方形盖板,浇灌混凝土前先将下端的盖板焊好,另一端等混凝土浇灌之后再焊接,盖板及空钢管的几何中心对中。钢材材性按国家标准GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》的有关规定将钢板做成标准试件进行拉伸试验,测得3.72mm厚钢板的屈服强度、抗拉强度、弹性模量及泊松比分别为:380.6N/mm²、519.1N/mm²、1.92×10⁵N/mm²和0.282。

钢管中浇灌自密实混凝土,按C60进行设计,水胶比为0.34,砂率为0.48,配合比为水:196kg/m³;水泥:440kg/m³;粉煤灰:143kg/m³;砂:738kg/m³;石:800kg/m³。采用原材料如下:普通硅酸盐水泥;河砂,中砂;石灰岩碎石,石子粒径5mm~25mm;II级粉煤灰;普通自来水;高效减水剂的掺量为胶凝材料质量的1%。混凝土坍落度为268mm,坍落流动度为373mm,混凝土浇灌时内部温度为22℃,比环境温度约低1℃。L形仪实验测得新拌混凝土平均流速为51mm/s。

灌注混凝土时先将焊好的钢管竖立,然后从顶部灌入混凝土,没有采用任何振捣方式。自然养护两周后,凿去柱顶的浮浆层,并用高强混凝土将混凝土表面与钢管表面抹平,然后再焊上另一盖板。

混凝土立方体抗压强度和弹性模量分别由同条件下成型养护的立方体试块和棱柱体试块测得。混凝土立方体试块达到28d时抗压强度为62.1N/mm²,弹性模量为33700N/mm²,试验时的立方体抗压强度为74.4N/mm²。

1.2 试验装置

短直柱试验在5000kN压力试验机上进行,将

试件直接放在压力机上进行一次压缩试验,量测装置示意如图 1(a)所示。短斜柱试验在 5000kN 反力架上进行,量测装置示意如图 1(b)所示。

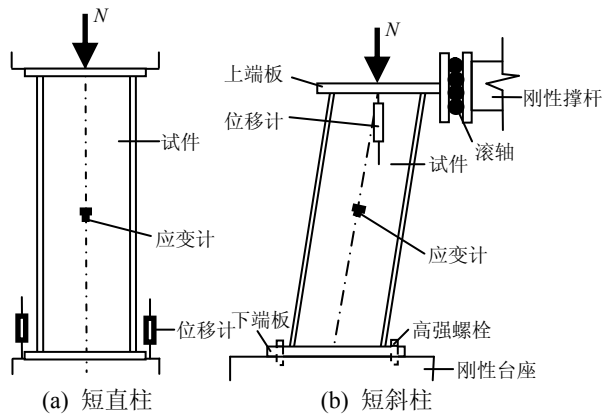


图 1 量测装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring apparatus

短斜柱的下端通过高强螺栓与刚性台座相连,模拟嵌固边界条件;上端侧面设置了可保证试件能沿竖向移动、而限制其发生水平位移的刚性侧向支撑。竖向压力 N 采用固定于反力架横梁上的 5000kN 千斤顶施加。

为了准确测量试件的变形,在每个试件钢管外中截面处四面沿轴向及环向各设一个电阻应变片,同时沿竖向还设置了两个电测位移计以测定试件的竖向变形。以上数据均采用 IMP 数据采集系统自动采集。

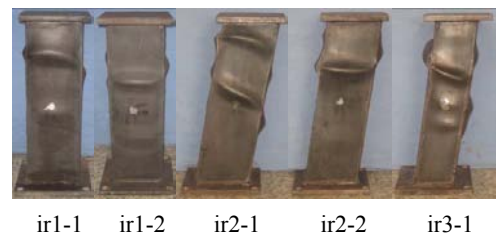
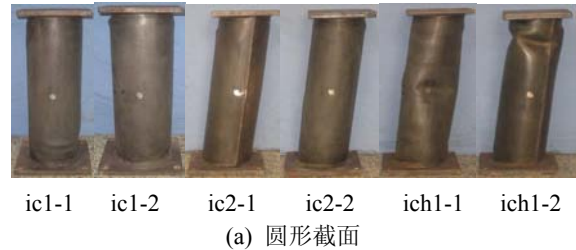
1.3 加载制度和测试方法

正式加载前先进行预加载,预加载值约为预计极限荷载的 15%,加到预定值后持荷 2min~3min,然后卸载。正式加载采用分级加载制。在小于 60% 预计极限荷载范围内,每级荷载约为预计极限荷载的 1/10;超过此范围后,每级荷载约为预计极限荷载的 1/20。每级荷载的持荷时间约为 2min,接近破坏时缓慢连续加载。当加载到试件接近破坏时,荷载增加缓慢甚至下降,而位移增加却很大,达到下列条件之一时即停止加载:① 当荷载降低到峰值荷载的 65%以下;② 钢管焊缝发生破坏。以上数据均由 IMP 数据采集系统自动采集。

1.4 试验现象与试验结果

试件破坏形态如图 2 所示。在受荷初期,试件未有可见变形。圆截面短柱有整体变粗的趋势,端部由于端板的约束,变粗程度较小,试验后期钢管混凝土短直柱、短斜柱均发生斜剪破坏,而钢管短斜柱倾斜方向两侧外鼓、其它方向两侧内凹;矩形

截面钢管混凝土短柱接近极限荷载时(未达极限荷载)便有 1 处~2 处微鼓,极限荷载后发展加快,破坏处四面钢管均向外凸曲,破坏截面几乎与轴线垂直,总体上仍属斜剪破坏;钢管短柱长边发生外鼓、短边发生内凹破坏,破坏截面同样有与轴线垂直的趋势;矩形截面短柱钢管的局部凸曲程度较圆形截面严重。



(b) 矩形截面

图 2 试件的破坏形态

Fig.2 Damage shapes of specimens

图 3 给出了圆形截面和矩形截面短柱的竖向荷载(N_v)-竖向位移(Δ)关系曲线。由图 3 可知,圆形和矩形钢管混凝土斜柱与同类钢管混凝土直柱相比,竖向荷载-竖向位移关系曲线线形类似,分为弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段、水平阶段及卸载阶段。从曲线上看,斜柱的刚度及承载力较直柱有稍许降低,斜柱填充混凝土后其刚度及承载力提高程度明显。圆形截面试件竖向荷载-竖向位移曲线线形较矩形截面试件饱满。

图 4 给出其中 6 组试件的竖向荷载(N_v)-纵向应变(ϵ_l)关系曲线与竖向荷载(N_v)-横向应变(ϵ_t)关系曲线,图 4 中 ϵ_y 为钢材屈服应变(屈服强度与弹性模量的比值),且纵向应变为正,横向应变为负。荷载-应变关系曲线的线形与荷载-位移曲线相似,基本呈上升、下降或平缓的趋势,仍然分为弹性阶段、弹

塑性阶段、下降阶段、水平阶段及卸载阶段。可以看出,加荷初期荷载-应变曲线有较好的线性增加关系,此后荷载-应变曲线呈非线性增加关系,直至达到极限荷载。随后荷载随变形的发展而快速下降,接着进入平缓段,在此阶段,应变发展很快,但荷载的降低幅度则趋于平缓。

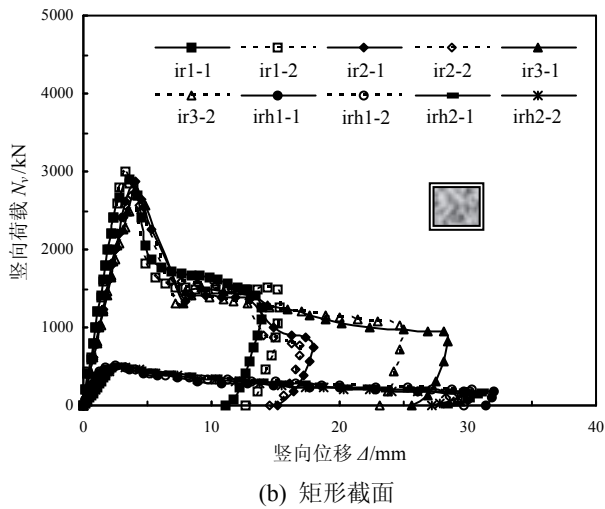
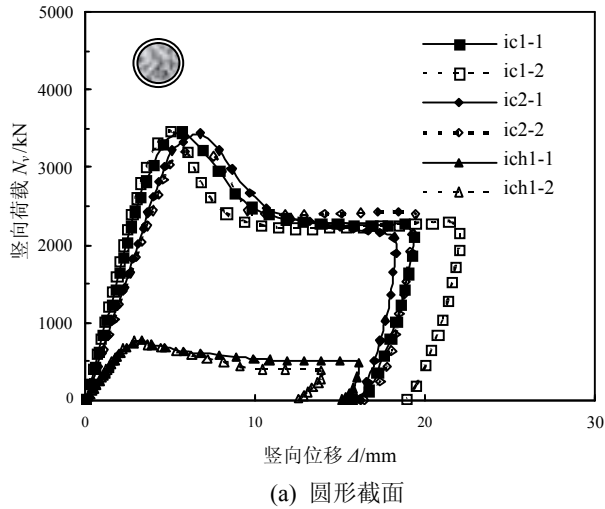


图 3 $N_v-\Delta$ 关系曲线
Fig.3 Relationship of load-displacement

1.5 试验结果分析

1) 强度系数

参照文献[13]定义强度系数 SI 计算式为:

$$SI = \frac{N_{ue}}{N_{ues}} \quad (1)$$

其中: N_{ue} 为圆(矩形)钢管混凝土(钢管)短斜柱平均极限承载力; N_{ues} 为圆(矩形)钢管混凝土短直柱平均极限承载力。

按以上方法计算获得的 SI 值列于表 1, 不同试件的 SI 值比较如图 5、图 6 所示。由图 5 及表 1 的

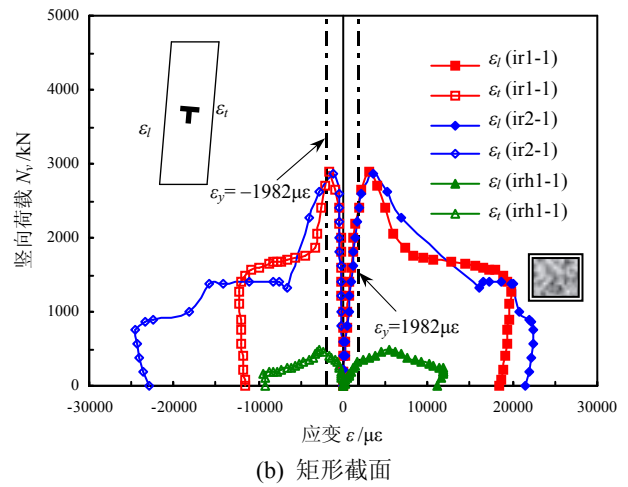
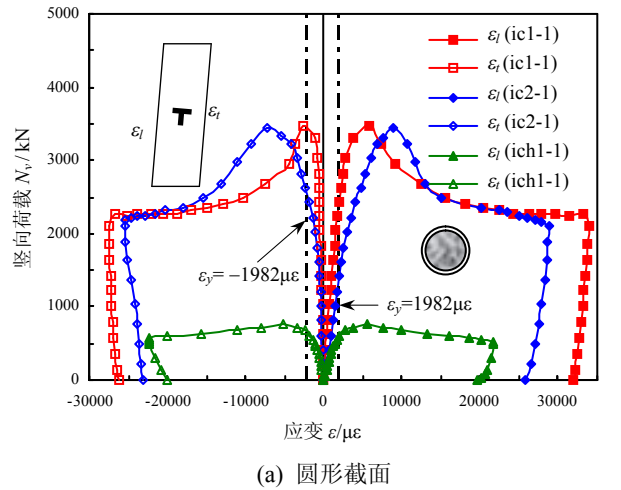


图 4 $N_v-\epsilon$ 关系曲线

Fig.4 Relationship of load-strain

数据可知: 当倾斜角度为 9° 时, 圆钢管混凝土短斜柱平均极限承载力(3333kN)比圆钢管混凝土短直柱平均极限承载力(3466kN)下降 3.8%, 沿强轴倾斜的矩形钢管混凝土短斜柱平均极限承载力(2787kN)比矩形钢管混凝土短直柱平均极限承载力(2949kN)下降 5.5%, 沿弱轴倾斜的矩形钢管混凝土短斜柱平均极限承载力(2735kN)比矩形钢管混凝土短直柱平均极限承载力下降 7.3%。由图 6 及表 1 的数据可知: 灌注混凝土后, 圆钢管混凝土短斜柱平均极限承载力(3333kN)比圆钢管短斜柱平均极限承载力(763kN)提高 336.8%, 沿强轴倾斜的矩形钢管混凝土短斜柱平均极限承载力比相应的矩形钢管短斜柱平均极限承载力(505kN)提高 451.9%, 沿弱轴倾斜的矩形钢管混凝土短斜柱平均极限承载力比相应的矩形钢管短斜柱平均极限承载力(499kN)提高 448.1%。对于矩形钢管混凝土短斜柱及矩形钢管短斜柱来说, 沿强轴倾斜或沿弱轴倾斜, 对其极限承载力没有影响。

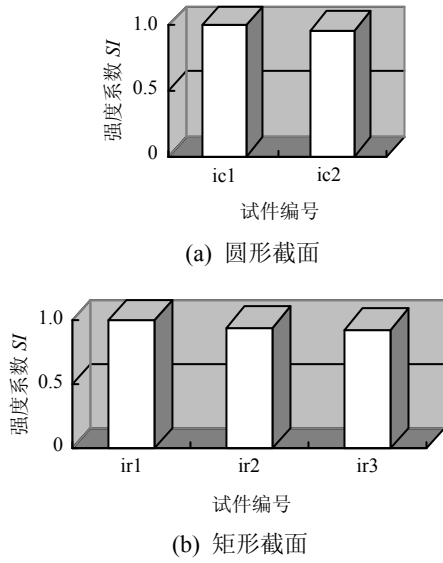


图 5 倾斜角度对 SI 值的影响
Fig.5 Influence of inclined angle on SI

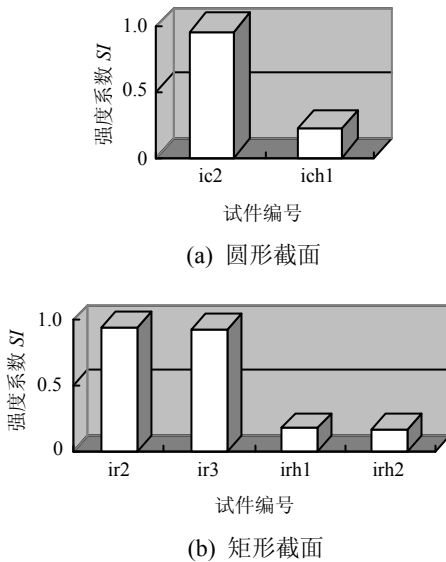


图 6 是否填充混凝土对 SI 值的影响
Fig.6 Influence of with or without infilling concrete on SI

2) 平均应变

参照文献[13]定义平均应变 $\bar{\epsilon}_u$ 计算式为:

$$\bar{\epsilon}_u = \Delta_u / H \quad (2)$$

其中: Δ_u 为与极限承载力对应的竖向位移; H 为柱高。图 7、图 8 给出了圆、矩形钢管混凝土短斜柱和钢管短斜柱各自的平均应变 $\bar{\epsilon}_u$ 。由图 7 可知, 圆截面试件的平均应变都比相应矩形截面试件的平均应变大, 且斜柱的平均应变略大于直柱的平均应变, 对于矩形短斜柱, 沿弱轴倾斜的平均应变略大于沿强轴倾斜的平均应变。由图 8 可知, 钢管混凝土短斜柱的平均应变也大于同类截面钢管短斜柱

的平均应变, 管内填充混凝土可以有效延迟钢管的局部屈曲。

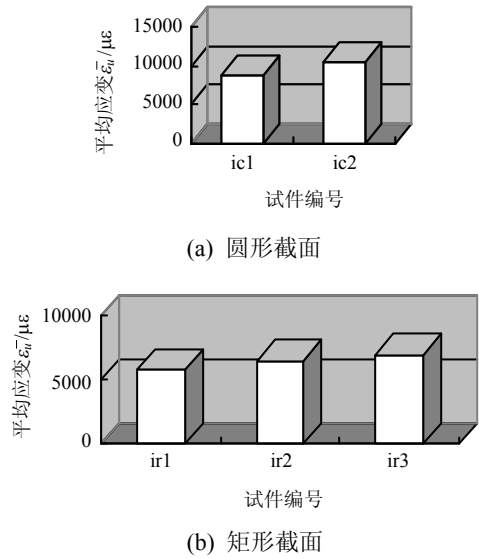


图 7 倾斜角度对平均应变 $\bar{\epsilon}_u$ 的影响
Fig.7 Influence of inclined angle on average strains ($\bar{\epsilon}_u$)

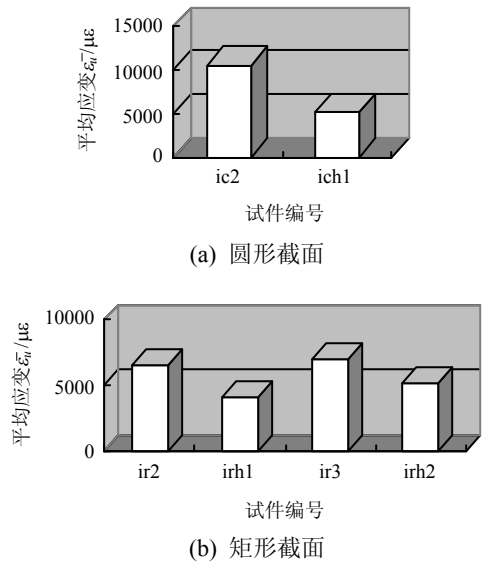


图 8 是否填充混凝土对平均应变 $\bar{\epsilon}_u$ 的影响
Fig.8 Influence of with or without infilling concrete on average strains ($\bar{\epsilon}_u$)

2 承载力计算

对钢管混凝土短斜柱进行受力分析可知, 短斜柱与短直柱相比最大不同是短斜柱不仅受到竖向压力作用, 还要承担水平剪力作用, 二者合力即为垂直于横截面的轴向压力。本文借用文献[14-15]提供的各类钢管混凝土计算规程轴压承载力计算式对本次试验构件横截面强度承载力进行了计算, 然后根据竖向压力和轴向压力的关系确定竖向压

力。方程如下：

$$N_v = N_{uo} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

其中： N_v 为钢管混凝土短斜柱的竖向压力； N_{uo} 为钢管混凝土短柱的轴压承载力。

本文对圆、矩形钢管混凝土短斜柱竖向极限承载力 N_v 进行了验证，给出了各规程计算结果与试验结果比较的平均值 μ 和均方差 σ ，如表 2 所示。由表 2 可知，在进行圆钢管混凝土短斜柱竖向极限承载力计算时，DL/T5085-1999 的计算结果与试验

结果最为吻合，而 AIJ(1997)、AISC(2005)、BS5400、DBJ13-51-2003 的计算结果略低于 DL/T5085-1999，ACI(2005)的计算结果则最偏于安全。在进行矩形钢管混凝土短斜柱竖向极限承载力计算时，DBJ13-51-2003 的计算结果与试验结果最为吻合，ACI(2005)、AIJ(1997)、AISC(2005)、CECS159:2004 的计算结果次之，而 BS5400 的计算结果则更偏于安全。

表 2 试件承载力计算值与试验值比较

Table 2 Comparisons of ultimate strength between calculated results on different codes and test results

试件 编号	试验	ACI(2005)			AIJ(1997)		AISC(2005)		BS5400(2005)		DBJ13-51-2003		DL/T5085-1999	
	N_{ue}/kN	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	
ic1-1	3458	2143	0.62	2774	0.80	2698	0.78	2423	0.70	2881	0.83	3089	0.89	
ic1-2	3474	2143	0.62	2774	0.80	2698	0.77	2423	0.70	2881	0.83	3089	0.89	
ic2-1	3439	2117	0.62	2740	0.80	2665	0.77	2393	0.70	2845	0.83	3051	0.89	
ic2-2	3227	2117	0.66	2740	0.84	2665	0.81	2393	0.73	2845	0.87	3051	0.92	
平均值和均方差	ACI(2005)		AIJ(1997)		AISC(2005)		BS5400(2005)		DBJ13-51-2003		DL/T5085-1999			
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ		
	0.63	0.020	0.81	0.020	0.78	0.018	0.71	0.015	0.84	0.020	0.90	0.015		
试件 编号	试验	ACI(2005)			AIJ(1997)		AISC(2005)		BS5400(2005)		DBJ13-51-2003		CECS159:2004	
	N_{ue}/kN	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}	
ir1-1	2895	2154	0.74	2534	0.87	2528	0.87	1902	0.66	2798	0.97	2446	0.84	
ir1-2	3003	2154	0.72	2534	0.84	2524	0.84	1902	0.63	2798	0.93	2446	0.81	
ir2-1	2870	2127	0.74	2503	0.87	2497	0.87	1878	0.65	2763	0.96	2416	0.84	
ir2-2	2705	2127	0.79	2503	0.92	2497	0.91	1878	0.69	2763	1.01	2416	0.89	
ir4-1	2773	2127	0.77	2503	0.90	2493	0.90	1878	0.67	2763	0.98	2416	0.87	
ir4-2	2698	2127	0.79	2503	0.92	2493	0.92	1878	0.69	2763	1.02	2416	0.90	
平均值和均方差	ACI(2005)		AIJ(1997)		AISC(2005)		BS5400(2005)		DBJ13-51-2003		CECS159:2004			
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ		
	0.76	0.029	0.89	0.032	0.89	0.030	0.67	0.023	0.98	0.026	0.86	0.032		

3 结论

本文进行了圆、矩形钢管混凝土短斜柱力学性能的试验研究和理论分析，在本文研究参数范围内可得到如下结论：

(1) 圆、矩形钢管混凝土短斜柱与圆、矩形钢管混凝土短直柱的荷载-位移关系曲线类似，破坏截面有垂直于轴线的趋势。

(2) 圆、矩形钢管混凝土短斜柱的极限承载力、刚度均低于圆、矩形钢管混凝土短直柱的极限承载力、刚度。

(3) 采用建议的极限承载力计算式对圆、矩形钢管混凝土短斜柱竖向极限承载力进行计算，计算结果与试验结果总体上较为吻合，可用来预测圆、矩形钢管混凝土短斜柱的截面强度。

参考文献：

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures——theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构——试验、理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Han Linhai, Tao Zhong, Wang Wenda. Advanced composite and mixed structures——testing, theory and design approach [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 陶忠, 于清. 新型组合结构柱——试验、理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Tao Zhong, Yu Qing. New types of composite columns —— experiments, theory and methodology [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [4] Han Linhai, Yao Guohuang, Zhao Xiaoling. Tests and calculations of hollow structural steel (HSS) stub

- columns filled with self-consolidating concrete (SCC) [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(9): 1241–1269.
- [5] 刘创, 汪蛟, 叶军, 等. 国家体育场矩形钢管混凝土斜柱施工工艺[J]. *施工技术*, 2006, 35(11): 9–11.
Liu Chuang, Wang Jiao, Ye Jun, et al. Construction techniques of the national stadium rectangle concrete inclined column [J]. *Construction Technology*, 2006, 35(11): 9–11. (in Chinese)
- [6] 郭彦林, 刘禄宇, 王永海, 等. 广州新电视塔细腰段整体模型稳定性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(8): 43–53.
Guo Yanlin, Liu Luyu, Wang Yonghai, et al. Experimental investigation of the waist portion of the Guangzhou new TV tower [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(8): 43–53. (in Chinese)
- [7] 金刚, 陆秀丽, 丁洁民, 等. 铁岭体育馆的钢屋盖及大悬挑平台结构设计[J]. *建筑结构*, 2008, 38(9): 37–39, 70.
Jin Gang, Lu Xiuli, Ding Jiemin, et al. Structure design of steel roof and a large overhang platform in Tieling gymnasium [J]. *Building Structure*, 2008, 38(9): 37–39, 70. (in Chinese)
- [8] 傅剑平, 方长建, 黄宗瑜, 等. 钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(5): 34–41.
Fu Jianping, Fang Changjian, Huang Zongyu, et al. Experimental research on mechanical behavior of inclined steel tube confined concrete column-ring beam joint with shear ring bars [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(5): 34–41. (in Chinese)
- [9] 任庆新, 郝贵强, 韩林海, 等. 钢管混凝土斜柱轴压工作机理的初步分析[C]. 第 17 届全国结构工程学术会议论文集, 湖北, 武汉, 2008.
Ren Qingxin, Hao Guiqiang, Han Linhai, et al. Primary research on tilted concrete-filled steel tubular columns under axial compression [C]. *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Structural Engineering*, Wuhan, Hubei, 2008. (in Chinese)
- [10] 周晓飞, 沈忠贤, 石晶, 等. 上海港国际客运中心综合客运楼钢结构设计[J]. *建筑结构*, 2009, 39(增刊): 436–439.
Zhou Xiaofei, Shen Zhongxian, Shi Jing, et al. Steel structure design of terminal observation building in Shanghai port international cruise terminal [J]. *Building Structure*, 2009, 39(Supp.): 436–439. (in Chinese)
- [11] 金振士, 周晓莉, 薛文杰. 世博演艺中心劲性钢管斜柱内的混凝土施工质量控制技术[J]. *建筑施工*, 2009, 31(11): 931–932.
Jin Zhenshi, Zhou Xiaoli, Xue Wenjie. Quality control technology for construction of concrete filled in inclined rigid steel tube column for performing arts center of shanghai world expo [J]. *Building Construction*, 2009, 31(11): 931–932. (in Chinese)
- [12] 方小丹, 韦宏, 江毅, 等. 广州西塔结构抗震设计[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(1): 47–55.
Fang Xiaodan, Wei Hong, Jiang Yi, et al. Seismic design of the Guangzhou west tower [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(1): 47–55. (in Chinese)
- [13] Han Linhai, Ren Qingxin, Li Wei. Tests on inclined, tapered and STS concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(10): 1186–1195.
- [14] 韩林海, 杨有福. 矩形钢管混凝土轴心受压构件强度承载力的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(4): 22–31.
Han Linhai, Yang Youfu. Study on axial behavior capacity of concrete-filled-steel-tube columns with rectangular section [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(4): 22–31. (in Chinese)
- [15] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Han Linhai, Yang Youfu. *Advanced concrete filled steel tubular structure technology* [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)