

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.01.015

薄壁方钢管混凝土柱劲化设计及轴压性能探讨

郑新志

(华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对于薄壁方形钢管混凝土柱, 有效且经济地提高柱的承载力、刚度和延性, 增强其抵抗局部屈曲的能力是目前的一项重要研究课题。据此, 进行8个薄壁方形钢管混凝土轴压试件的研究, 比较普通薄壁钢管混凝土柱与劲化薄壁钢管混凝土柱的轴压极限承载力、延性性能、局部屈曲模态及相应耗钢量, 研究表明: 劲化设置在增加较少用钢量的情况下, 使钢管壁对核心混凝土的约束作用相对于普通钢管混凝土柱和单纯加设约束拉杆的钢管混凝土柱更趋均匀, 提高了整体约束效应, 混凝土强度得以提高, 本构关系明显改善。从而增加了钢管混凝土柱的轴压承载力和延性, 改变了钢管的局部屈曲变形状态, 其实用效益与经济效益极其可观, 具有良好推广价值。

关键词: 薄壁钢管混凝土柱; 带约束拉杆; 劲化带; 轴压承载力; 延性; 经济效益

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 01-0094-09

Stiffened Design and Experimental Study of Axial Compressive Performance on Thin-walled CFT Square Columns

ZHENG Xinzhi

(College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Currently for the thin-walled rectangular (square) CFT columns, it is an important research subject to increase its stiffness and ductility, enhance its resistance to local buckling capability effectively and economically. Accordingly, researches on axial compression performance of 8 thin-walled square CFT columns are undertaken to compare ultimate bearing capacity, ductility, local buckling mode of stiffened concrete filled thin-walled steel tubular column and corresponding steel consumption with ordinary concrete filled thin-walled steel tube. Compared with ordinary CFT column and CFT column only setted with binding bars, researches show that stiffened set can make confinement effect of the tubular wall to core concrete more uniformly in less enhancement of steel consumption situation. It improves the overall binding effect to improve the strength of concrete, thus constitutive relationship was improved. So that axial compression bearing capacity and ductility of

收稿日期: 2013-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50818180); 亚热带建筑科学国家重点实验室资助项目(X2TJ-C709025z)

作者简介: 郑新志, 男, 1973年生, 讲师, 博士研究生, 主要从事高层建筑结构研究.

E-mail: zxz7303@126.com.

CFT column are increased, deformation state of local buckling are changed, its benefit and the economic benefit is considerable with good promotion value.

Keywords: Thin-walled CFT column; Binding bar; Stiffener; Axial bearing capacity; Ductility performance; Economic benefit

0 前言

减小钢管混凝土柱的钢管壁厚度可大量降低耗钢量,降低工程造价,促进节约型、经济型社会和谐发展。但薄壁钢管不利于对内填混凝土的约束作用,如果片面减小钢管混凝土柱的钢管壁厚度,盲目偷工减料,柱的刚度和延性会大大降低,抵抗局部屈曲会明显减弱,甚至危及建筑物安全,造成生命和财产重大损失。对于薄壁方形钢管混凝土柱,有效且经济地提高柱的刚度和延性,增强其抵抗局部屈曲的能力是目前的一项重要研究课题。

方形钢管混凝土柱由于与墙体的协调性,目前在建筑工程中的应用极为广泛。方形钢管混凝土柱的钢管对内填混凝土也有一定的约束作用,和混凝土柱相比,具有承载力和变形能力好的特点;和钢结构相比,防火性能优越^[1,2]。

方形钢管混凝土柱钢管对内填混凝土的约束作用主要集中于柱角区域,侧面约束取决于钢管壁的平面外刚度^[3]。常用的钢管混凝土柱由于钢管壁的宽厚比较大,因而侧边的约束力较小(见图1),对柱的承载力和变形能力的改善很难达到预期效果,常用加大钢管壁厚度的措施可以提高侧面约束力,从而提高柱的承载力和变形能力,但大幅度提高钢材用量,经济性极差^[4]。

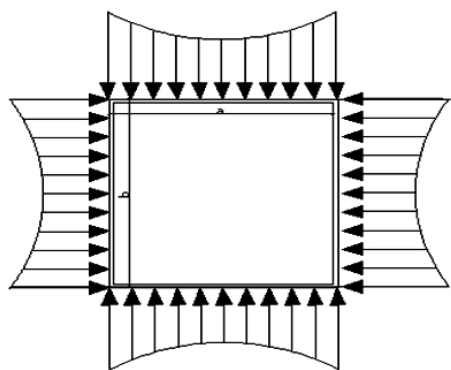


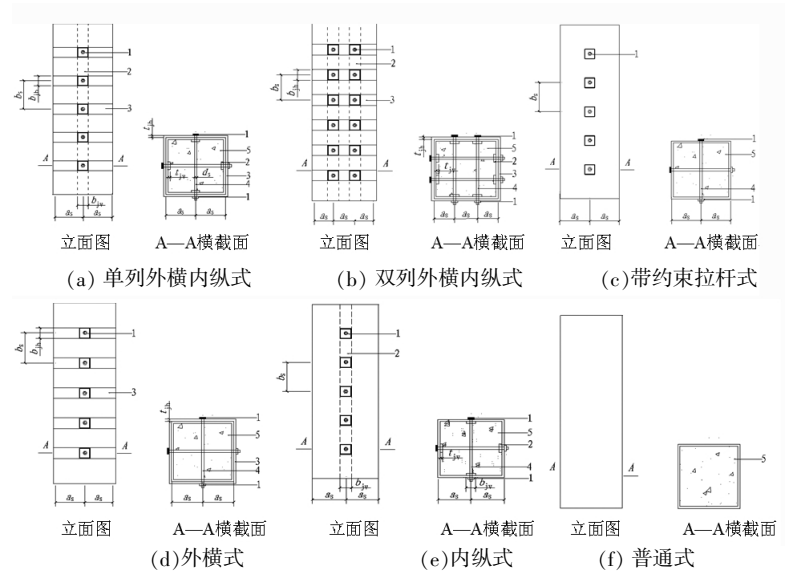
图1 方形钢管混凝土柱核心混凝土受约束力示意图
Fig.1 Binding force diagram of core concrete in filled quadrangle steel tube column

针对一般方形钢管混凝土柱(见图2f)约束机理的缺陷,华南理工大学蔡健等^[5-8]提出了带约束拉杆钢管混凝土柱(见图2c),其特点是在钢管混凝土柱中沿纵向每隔一定间距的横截面上设置横向水平约束拉杆(钢筋),以提高钢管在四个边中部对核心混凝土的约束作用,从而改善钢管混凝土柱构件的力学性能^[6]。通过大量的试验和理论研究,探明了带约束拉杆方形钢管混凝土柱的约束机理,提出了该柱的设计方法和构造措施^[7,8]。

作为劲化方形截面钢管混凝土柱系列研究的一部分,本文通过试验和有限元理论相结合,研究劲化带布置方式、劲化带截面宽厚比对劲化方形截面钢管混凝土本构关系的影响,以期找出影响劲化方形截面钢管混凝土柱轴压性能的规律,为后续研究提供基础,为工程应用提供参考。

1 劲化设计

约束拉杆的设置能极大改进方形钢管混凝土柱的力学性能,但约束拉杆之间区域仍然会出现弹塑性局部屈曲现象,对内填混凝土的约束作用受到削弱,对于钢管混凝土柱尤其是薄壁方形钢管混凝土柱,仅加设约束拉杆尚有不足。据此,本文提出劲化钢管混凝土柱的设计(见图2: C1、C4、C5、C6、C8、C9)。通过对普通薄壁方形钢管混凝土柱加设劲化带与约束拉杆,即为本文所述劲化薄壁方形钢管混凝土柱。其劲化作用主要体现在3个方面:①是增加钢管混凝土柱的刚度;②是增强柱子抵抗局部屈曲的能力;③是提高其延性性能。劲化方形钢管混凝土柱凭借劲化带与约束拉杆的和谐搭配,在增加极少用钢量又不增加施工难度,影响施工进度,最大限度的减缓约束拉杆之间弹塑性屈曲,提高侧面约束能力,改善柱的力学性能。图2a为单列外横内纵式劲化薄壁钢管内填混凝土柱的立面图和平面图(图2b, C1)为双列外横内纵式劲化薄壁钢管内填混凝土柱的立面图和平面图(图2d, C4、C5、C6)为外横式劲化薄壁钢管内填混凝土柱(图2e, C8)为内纵式劲化薄壁钢管内填混凝土柱(C9)。



1:螺母; 2:纵向劲化带;3:横向劲化带;4:拉杆;5:混凝土
图 2 方形截面钢管混凝土柱构造形式

Fig.2 Structural styles of square section CFST column

2 试验概况

试验设计了 10 个 1:6 比例的非劲化与劲化方形截面钢管混凝土短柱试件做轴压承载力试验 (见图 3)。主要考虑的试验参数为劲化带设置方式和劲化带截面宽厚比, 见表 1。试件的形状如图 3 所示。表 1 中所有试件的截面边长为 200 mm, 高

度为 600 mm, 钢管壁厚为 3.75 mm。试件 C4、C5、C6 为劲化带截面宽厚比变化的双列内纵外横式短柱, 试件 C7、C8、C9 和 C10 为劲化带设置方式不同的对比短柱, 其中 1 个不设约束拉杆(试件编号为C10)。试验在华南理工大学结构试验室进行, 加载仪器采用结构试验室内 CSS-254 型 15 000 kN 长柱压力试验机(见图 4)。



图 3 试件制作

Fig.3 Specimens in the making



图 4 试件加载

Fig. 4 Test setup for loading & measuring

表 1 劲化带约束拉杆方形钢管混凝土短柱轴压承载力试验参数

Table 1 Parameters for specimens of stiffened square CFT columns with Binding Bars

试件编号	$a_s \times b_s \times d_s$ /mm	$b_{jh} \times t_{jh}$ /mm	$b_{je} \times t_{je}$ /mm	劲化带布置方式
C1	24×4.75	24×4.75	24×4.75	单列内纵外横式
C4	66.7×85.7×8	30×4.75	30×4.75	双列内纵外横式
C5	66.7×85.7×8	25×5.73	25×5.73	双列内纵外横式
C6	66.7×85.7×8	37.5×3.75	37.5×3.75	双列内纵外横式
C7	100×100×8	--	--	--
C8	100×100×8	24×4.75	--	外横式
C9	100×100×8	--	24×4.75	内纵式
C10	--	--	--	--

表 1 中 a_s , d_s 分别为约束拉杆横向间距和约束拉杆纵向间距(每边设一个拉杆时横向间距指拉杆到钢管角部的距离), d_s 为约束拉杆直径, 试件高度为 600 mm。 t 为钢管壁厚, b_{jh} , t_{jh} 为横向劲化带宽度和厚度, b_{jv} , t_{jv} 为纵向劲化带的宽度和厚度, 见图 2 所示。

方形钢管由四块钢板通过焊接拼接而成, 焊缝采用坡口焊形式, 焊缝设计按现行《钢结构设计规范》进行。在拼接钢板前, 预先在钢板设置拉杆处机械冷钻成孔, 孔径较拉杆直径大 3 mm, 以便

拉杆穿过。拉杆通过其端部的垫块与钢管围焊连成一体。钢管及拉杆均在工厂(广州文冲船厂) 加工制作完成后, 运到华南理工大学结构试验室采用商品混凝土一次浇筑完成。

钢板和拉杆(钢筋)的材料特性按《GB228-87 金属拉伸试验方法》规定的方法进行拉伸试验确定。混凝土立方试块强度 由相同条件下成型养护的 150mm 立方试块按标准试验测得, 测试方法按《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81-85)进行。试验得到的材料特性见表 2。

表 2 材性试验结果
Table 2 Material properties of specimens

混凝土	3.75 mm 厚钢板		4.75 mm 厚钢板		5.73 mm 厚钢板		7.96 直径拉杆	
f_{cu} /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa
49.3	229	307	235	303	226	288	324	510

安装试件时先确定试件截面形心的位置, 然后以形心为坐标原点确定试件截面的坐标系。试件安装时, 先将柱脚放在压力机平台的中心, 然后加两块厚度 20 mm 的 300 mm×300 mm 的钢板, 试件底部用水泥砂浆找平; 试件安置对中, 顶部用水泥砂浆找平, 然后再放上一块 20 mm 厚的钢板, 用水平尺再次找平; 将放好试件的压力机平台缓慢移动到压力机下, 这样试件就可直接安放在试验机加荷板之间进行加载试验。轴心加载试件通过加载板直接加载到截面的形心处。荷载由压力机自带的压力传感器直接读取, 加载级别由计算机控制, 开始阶段采用荷载控制的加载方式, 加载速度为 2 kN/s。当荷载-位移曲线由直线变为曲线以后改为位移控制的加载方式, 加载速度控制为 0.3 mm/s^[9,10]。

3 试验现象

图 5 为各试件的破坏形态。加载初期所有试件处于弹性工作阶段, 荷载-位移曲线为一一直线段。对于不设置约束拉杆的方形钢管混凝土试件, 达到极限荷载后, 柱中偏上处钢管边长中部向外迅速鼓起, 承载力迅速下降导致试件破坏。带约束拉杆方形钢管混凝土试件达到极限荷载后, 在柱中处或柱中偏上处、横向两排约束拉杆之间钢管边长中部逐渐向外鼓起, 承载力缓慢下降至极限承载力的 70%左右, 柱中处钢管短边才开始逐渐向外鼓起, 承载力缓慢下降直至试件破坏。所有带约束拉杆方形钢管混凝土试件与不设约束拉杆方形钢管混凝土试件相比, 表现出较好的延性和较高后期承载力; 带约束拉杆方形钢管混凝土



图 5 各试件的破坏形态
Fig.5 Collapse forms of the specimens

试件钢管局部向外鼓起变形较不设约束拉杆形方钢管混凝土试件小,且迟出现;劲化带约束拉杆方钢管混凝土试件与普通带约束拉杆钢管混凝土试件相比,表现出较好的延性和较高后期承载力;带约束拉杆方钢管混凝土试件钢管局部向外鼓起变形较不设约束拉杆方钢管混凝土试件小,且迟出现;劲化带宽厚比越小的试件钢管局部向外鼓起变形越小,越迟出现。

4 承载力对比

劲化方形截面钢管混凝土短柱的轴压承载力公式可表示为:

$$N_u=f_aA_a+f_{iv}A_{iv}+f_{ec}A_c$$
(1)

式中, f_a 和 A_a 分别为方形截面钢管的纵向抗压强度和截面积; f_{iv} 和 A_{iv} 分别为纵向劲化带的抗压强度和截面积; f_{ec} 和 A_c 分别为管内核心混凝土的抗压强度和截面积^[11]。

采用 ABAQUS 建立分析模型。钢材采用理想的三折线模型,混凝土采用混凝土损伤塑性本构模型,内填混凝土采用六面体一阶减缩积分单元 C3D8R,以克服剪切锁死的问题。外围的钢板采用一阶四边形通用壳体单元 S4R。钢板与混凝土之间接触面切向用有限滑动的库伦摩擦来考虑两个表面之间的相互作用^[12]。

各试件试验实测、有限元、理论计算的极限承载力结果见表 3。

表 3 试验实测、有限元、理论计算的极限承载力对比
Table 3 Ultimate bearing capacity comparison of test and theoretical calculation, finite element

试件 编号	$h_{jh} \times t_{jh}$ /mm	$h_{jv} \times t_{jv}$ /mm	N_{uc} /kN	N_{uf} /kN	N_{ue} /kN	N_{uc}/N_{uc10}	N_{uf}/N_{uf10}	N_{ue}/N_{ue10}	N_{uc}/N_{uf}	N_{uc}/N_{ue}
C1	24×5	24×5	3 289	3 250	3 200	1.232 3	1.221 8	1.190 5	1.012 0	0.9846
C4	30×5	30×5	4 059	4 017	4 060	1.580 0	1.569 1	1.568 8	1.010 5	1.0107
C5	25×6	25×6	4 140	4 053	4 156	1.611 5	1.583 2	1.605 9	1.021 5	1.0254
C6	37.5×4	37.5×4	3 976	4 072	3 993	1.547 7	1.590 6	1.542 9	0.976 4	0.9806
C7	—	—	2 812	2 790	2 765	1.094 6	1.089 8	1.068 4	1.007 9	0.9910
C8	24×5	—	3 114	3 100	3 022	1.212 1	1.210 9	1.167 7	1.004 5	0.9748
C9	—	24×5	3 093	2 940	2 841	1.204 0	1.148 4	1.097 8	1.052 0	0.9663
C10	—	—	2 569	2 560	2 588	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.003 5	1.0109

表 3 中: N_{uc} 、 N_{uf} 、 N_{ue} 分别为理论计算、有限元、试验实测的极限承载力, N_{uc10} 、 N_{uf10} 、 N_{ue10} 分别为理论计算、有限元、试验实测的试件理论计算的极限承载力。

对各试件荷载-轴向变形曲线、极限承载力,及钢材用量进行了对比,对比结果见表 4。

由图 6 和表 4 可见,劲化带的设置可以提高柱子的极限承载力和延性性能,同时明显减少钢

表 4 各试件的极限承载力及钢材用量
Table 4 Ultimate bearing capacity and steel consumption of the specimens

试件编号	G /kg	Gr /kg	t_z /mm	N_z /mm	N_e /mm	G_i /kg	G_s /kg	P /%
C1	21.589	6.818	5.904	2 982	3 200	9.910	3.093	12.89
C4	27.969	13.198	7.720 7	3 525	4 060	19.530	6.331 7	22.64
C5	27.969	13.198	7.720 7	3 525	4 156	20.618	7.420 2	26.53
C6	27.969	13.198	7.720 7	3 525	3 993	18.762	5.564 0	19.89
C7	15.560	0.790	4.218	2 600	2 765	3.491	2.702	15.08
C8	19.328	4.557	5.268	2 834	3 022	7.389	2.832	13.14
C9	17.821	3.050 0	4.847	2 738	2 841	4.678	1.628	8.64
C10	14.771	0	4	2554	2588	—	—	—

注: G 为试件所需钢材用量, Gr 为相对于对比试件 C10 需增加的耗钢量, t_z 为试件耗钢量可以折算成普通方钢管混凝土柱的钢管厚度, N_z 为厚度为 t_z 的普通方钢管的钢管混凝土柱的承载力, N_e 为试件的试验测定承载力, G_i 为普通方钢管混凝土柱达到该试件承载力相对于试件 C10 需增加的耗钢量, G_s 为试件相对于普通方钢管混凝土柱可以节约的钢材用量, P 为试件相对于普通方钢管混凝土柱可以节约钢材用量的百分比。

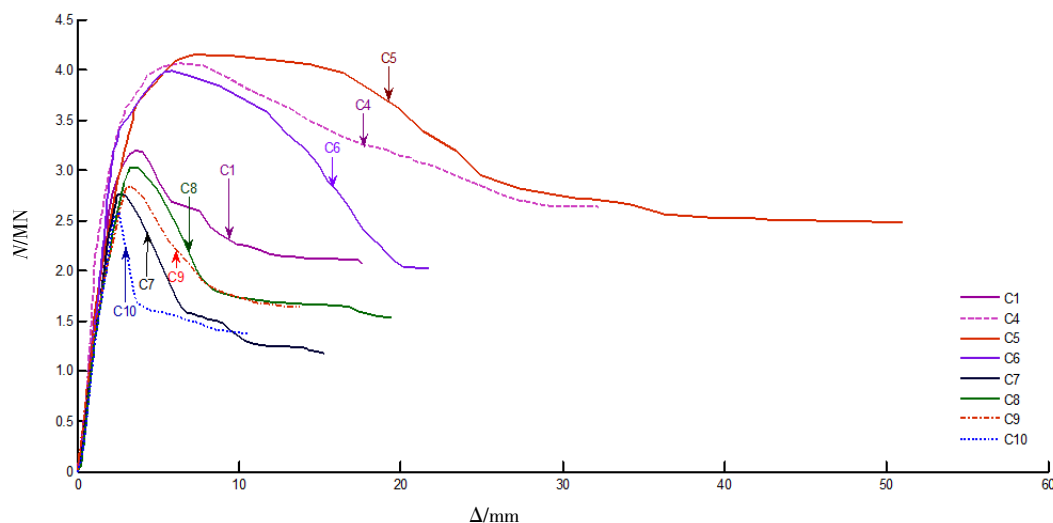


图 6 荷载-纵向位移曲线

Fig.6 Curves of load-longitudinal displacement

材用量,由计算结果,加设相同截面的劲化带的情况下,减小宽厚比可以提高柱子的承载力。

5 有限元分析对比

5.1 钢管约束应力分布及屈服模式

图 7 给出了试件达到极限承载力时试件各组件的 S11 应力分布情况。

由图 8 可看到,达极限荷载时, C1 劲化带与约束拉杆的设置使应力峰值从各边中部分散到了侧边四分点处。C4、C5、C6 劲化带与约束拉杆的

设置使应力峰值从各边中部分散到了侧边六分点处。C8 劲化带与约束拉杆的设置使应力峰值从各边中部分散到了侧边中点两侧的 1/4 处。C7、C9 在约束拉杆位置及毗邻区使应力峰值从各边中部分散到了侧边中点两侧的 1/4 处,但其余位置高应力相互藕断丝连,峰值转移效果欠佳。由于纵向劲化带设置的影响, C9 的峰值应力相对于 C7 有所减小,但整体效果不甚明显。C10 由于未设置纵向劲化带和约束拉杆,柱体整个高度中部应力峰值明显。C7、C9 由于横向未设置横向劲化带,容易造成沿柱体纵向的峰值应力不易分散,造成

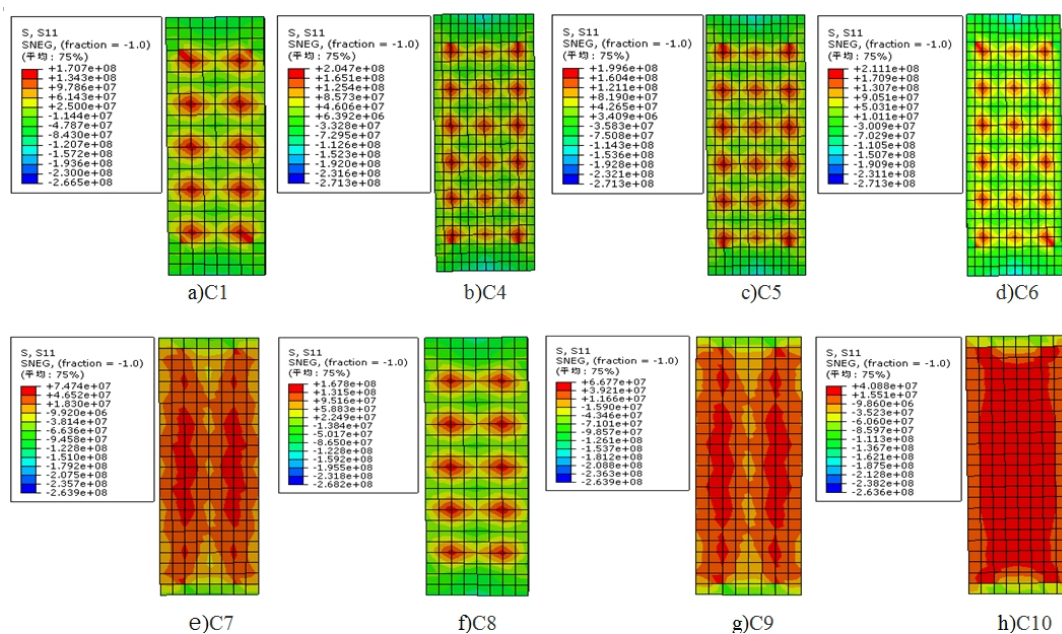


图 7 钢管应力 S11 分布图

Fig.7 S11 stress distribution diagram of steel pipes

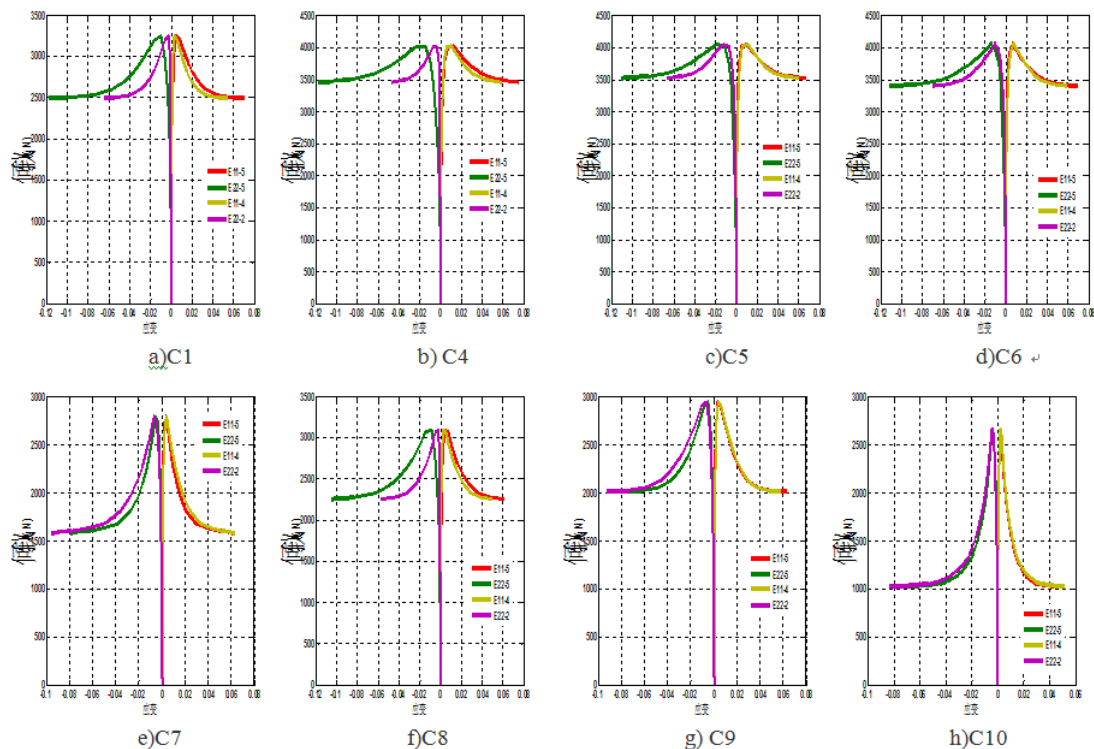


图8 控制测点应变有限元分析对比图

Fig.8 Stress comparison of control point by FEM

柱体中部过早外鼓。C7、C8 由于纵向未设置纵向劲化带容易造成柱体截面侧边横向峰值应力的连通，加速边长方向中部的屈曲变形，从而证明了约束拉杆劲的确需要纵向劲化带和横向劲化带的配合。由约束拉杆中间中心区压应力分布可以看出，C6、C4、C5 钢管壁受到劲化带和约束拉杆协同约束作用呈递增趋势，表明劲化带宽厚比的减小有助于对核心混凝土约束作用的发挥。C10 柱体

侧边中间大部进入高应力状态，势必造成柱体中部过早进入屈服。

5.2 控制测点应变有限元分析

对控制测点应变进行了有限元分析，结果见图 9。由图可以看出：C1 试件 5 号测点的横向应变大于 4 号测点的横向应变，5 号测点的纵向应变大于 2 号测点的纵向应变，证明纵横向劲化带同

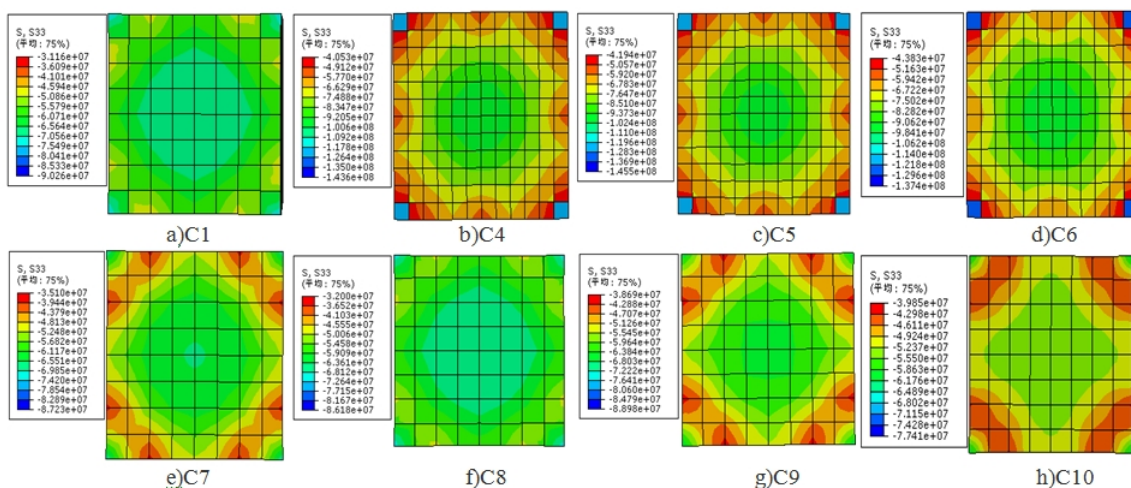


图9 约束拉杆中间混凝土应力中部分布图

Fig.9 stress distribution diagram of concrete section between binding bars

时设置时,使钢管应力 S11、S22 峰值由区隔边缘线中部向区隔中心重分布,避免了应力在区隔边缘线的集中;C4、C5、C6 试件 5 号测点的横向应变大于 4 号测点的横向应变,5 号测点的纵向应变大于 2 号测点的纵向应变,证明纵横向劲化带同时设置时,使钢管应力 S11、S22 峰值由区隔边缘线中部向区隔中心重分布,避免了应力在区隔边缘线的集中;C8 试件测点的应变发展规律与 C1 接近,表明横向劲化带单独设置时,可产生趋近于纵横向劲化带同时设置所产生的效果;C7、C10 的 5 号测点始终小于 4 号测点的横向应变,5 号测点的纵向应变与 2 号测点的纵向应变基本一致,所以整体屈服变形必然是中间先出现外鼓;C9 使 5 号测点和 4 号测点的横向应变差异相对于 C7 有所减小,5 号测点和 2 号测点的纵向应变差异基本不变,未能使钢管应力 S11、S22 重分布,导致钢管的整体屈服变形减缓,但历程不会根本改变;与 C4、C5、C6 试件相比,C4 试件横向应变和纵向应变的差异最为明显,说明合理的纵向劲化带和横向劲化带截面的优化组合对于改变局部屈曲的分布和历程有重要影响,以后会进一步加以探索和研究。

5.3 混凝土应力有限元分析

图 8 表示出钢管混凝土柱试件在约束拉杆中间混凝土应力 S33 分布图。由图 8 有限元分析可以看出:C1 由于设置了横向劲化带,核心混凝土应力高于 C7、C8、C9、C10,应力分布均匀协调;C4、C5、C6 试件由于设置了劲化带,混凝土应力有较大增加,整个截面在高应力状态下,角部应力最大,应力变化梯度最多,分布更加均匀协调,核心混凝土应力显著增大。随着劲化带宽厚比的减小,约束拉杆之间的周边侧向约束应力增大之间的周边侧向约束应力增大,混凝土的应力值增加,两排约束拉杆中间的混凝土的应力值分布趋于相近,整体上较单轴强度有较大幅度提高;C7 由于设置了约束拉杆,核心混凝土应力有所增加,应力分布趋于均匀,核心混凝土有小部分高应力区;C8 由于设置了横向劲化带,应力分布明显均匀协调,变化梯度极小;C9 由于设置了纵向劲化带,混凝土应力进一步提高,核心混凝土始终高应力区扩大,但提高程度受限,总体分布规律与 C7 接近;无约束拉杆试件 C10 在角部约束作用大,随着向中间过渡,约束作用迅速降低,反映在分

布上为角部和核心区的混凝土应力值较大,较之单轴强度有所提高,核心混凝土应力最小,应力分布最不均匀,核心混凝土始终未形成高应力区。可见,劲化带对改善约束拉杆对核心混凝土约束作用是有效的,使钢管对核心混凝土的约束作用大小沿周边更加均匀,全面提高了钢管对核心混凝土的约束效应。

6 结语

通过对 8 个薄壁钢管混凝土短柱试件轴压性能分析,得到主要结论如下:

(1) 在轴压荷载作用下,由于设置劲化带,约束拉杆的约束作用由点状约束转变为线状约束,得以均匀分散到钢管混凝土柱的钢板,钢板的侧向变形受到劲化带线状约束,大大延缓或甚至避免钢管在达到屈服前失稳性的局部屈曲,使得极限承载力有较大幅度提高,试件表现出良好的塑性和延性。

(2) 单设纵向劲化带未能使钢管应力重分布,可使钢管的整体屈服变形减缓,但屈服历程不会根本改变;单设横向劲化带能使钢管应力重分布,但容易造成柱体截面侧边横向峰值应力的连通,加速边长方向中部的屈曲变形。

(3) 单设横向劲化带可以使钢管应力峰值由区隔边缘线中部向区隔中心重分布,避免了应力在区隔边缘线的集中,对柱的承载力和延性,以及钢管局部屈曲变形历程的改善效果比单设纵向劲化带要好。

(4) 纵横向劲化带同时设置时,初始屈服点由侧边中心发生分散和转移,屈服历程发生根本改变;劲化带宽厚比对带约束拉杆薄壁方形钢管混凝土试件的轴压性能影响显著。试验可得,随着劲化带宽厚比的减小,钢管混凝土试件的承载力增大,试件发生局部屈曲时对应的纵向应变增大,延性系数增大。

(5) 劲化带横截面面积相同时,宽厚比越小,提高方形截面钢管混凝土短柱的轴压承载力和变形能力的效果越好。

参考文献:

- [1] Liang QQ, Uy B. Theoretical study on the post-local buckling of steel plates in concrete-filled box columns[J]. Computer and Structure, 2000, 75 (5): 479-490.

- [2] UyB. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(3): 341-352.
- [3] Jian Cai, Zhen Qiang He. Axial load behavior of square CFT stub column with binding bars. Journal of Constructional Steel Research[J]. 2006, 62 (5): 472-83.
- [4] Han L H. Zhao X L. Tao Z. Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns [J]. Steel and Composite Structures An International Journal, 2001, 1 (1): 51-74.
- [5] Jian Cai, Yue-Ling Long. Axial load behavior of rectangular CFT stub columns with binding bars [J]. Advances in Structural Engineering. 2007, 10(5): 551-565.
- [6] 何振强. 带约束拉杆方形钢管混凝土短柱受压性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [7] 龙跃凌. 带约束拉杆矩形钢管混凝土短柱受压性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
- [8] 孙刚. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱的力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
- [9] 王力尚, 钱稼茹. 钢管高强混凝土柱轴心受压承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 37 (7): 46-49
- [10] 陈德明. 带约束拉杆异形钢管混凝土柱力学性能的基础研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2000
- [11] 蔡健, 郑新志. 带约束拉杆方形钢管混凝土柱偏压性能[J]. 建筑结构学报, 2014, 28 (3): 25-35.
- [12] Hibbitt, Karlson, Sorenson. ABAQUS Version 6.4: Theory manual, users' manual, verification manual and example problems manual[M]. Hibbitt, Karlson and Sorenson Inc, 2003.