



方钢管约束型钢混凝土短柱抗震性能试验研究

周绪红¹, 刘界鹏^{1,2}, 张素梅³

- (1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃兰州 730000;
- 2. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院, 黑龙江哈尔滨 150090;
- 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘要:进行了3个剪跨比为1.5的方钢管约束型钢混凝土短柱和1个相同用钢量的型钢混凝土对比试件的拟静力试验研究,试件的主要变化参数为轴压比(0.3,0.4和0.5)。试验结果表明:轴压比为0.3的方钢管约束型钢混凝土柱的破坏模式为弯曲破坏,而轴压比为0.4和0.5的方钢管约束型钢混凝土柱的破坏模式为剪切破坏和粘结破坏相结合。相同用钢量条件下,方钢管约束型钢混凝土短柱的受剪承载力、延性、层间变形能力和耗能性能明显优于型钢混凝土柱。随轴压比的增加,方钢管约束型钢混凝土短柱的受剪承载力提高,但延性和极限变形能力降低。对钢管的弹塑性应力分析结果表明:水平荷载施加过程中,发生弯曲破坏试件的钢管不屈服,而发生剪切破坏试件的钢管在下降段屈服。

关键词:方钢管约束型钢混凝土;短柱;轴压比;拟静力试验;抗震性能

中图分类号:TU528.59 TU317.1 **文献标志码:**A

Seismic behavior of square tubed steel reinforced concrete short columns

ZHOU Xuhong¹, LIU Jiepeng^{1,2}, ZHANG Sumei³

- (1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
- 2. Architectural Design and Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
- 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The seismic behavior of square tubed steel reinforced concrete (STSRC) short columns was studied by testing three STSRC columns and one common SRC column under combined axial constant compression and lateral cyclic load. The main test parameter was the axial load ratio (0.3, 0.4 and 0.5). The test results indicate that the failure mode of the column with the axial load ratio 0.3 is flexure failure, while the failure mode of the two columns with the axial load ratio 0.4 and 0.5 respectively is combined shear failure and bond failure. The shear strength, ductility, deformation ability and energy dissipation ability of a STSRC short column are remarkably higher than that of a common SRC column on condition that the steel ratio of the column is the same. The shear strength of the STSRC short columns increase as the axial load ratio increase, while the ductility and ultimate deformation ability decrease as the axial load ratio increase. The results from elasto-plastic analysis on the steel tube indicated that, during the lateral load being applied procedure, the steel tube do not yield for the STSRC columns with flexural failure and the steel tube yield after the peak load point for the STSRC columns with shear failure.

Keywords: square tubed steel reinforced concrete; short column; axial load ratio; quasi-static test; seismic behavior

基金项目:国家自然科学基金项目(50708027)。

作者简介:周绪红(1956—),男,湖南南县人,工学博士,教授。E-mail:zxh@lzu.edu.cn

通讯作者:刘界鹏(1978—),男,山东青岛人,工学博士,副研究员。E-mail:liujp@hit.edu.cn

收稿日期:2009年1月

0 引言

型钢混凝土柱具有承载力高, 抗火和抗震性能好等特点, 在高层建筑和大型重载工业厂房中广泛应用。为保证型钢与混凝土共同工作, 型钢混凝土柱中必须设置由纵筋或箍筋形成的钢筋笼^[1-4], 但型钢混凝土柱的配筋构造较为复杂, 在工程设计阶段必须给予细致的考虑, 否则将使施工十分困难^[5]。研究表明, 即使在有效配置箍筋的条件下, 型钢混凝土柱在较高轴压比条件下其延性仍然难以满足抗震要求^[5-6], 因此在抗震工程中应严格限制型钢混凝土柱的轴压比^[1-2]; 对于剪跨比小于 1.5 的型钢混凝土短柱, 即使限制其轴压比, 其抗震性能仍难以满足工程抗震要求, 因此在工程实践中应避免采用^[7]。

文献[8]试验结果表明, 在钢筋混凝土短柱外设置钢管以代替箍筋, 钢管不承担纵向荷载, 形成钢管约束钢筋混凝土短柱, 可有效提高短柱的延性和变形能力^[8-9], 满足工程抗震要求; 文献[10]试验结果表明, 钢管约束钢筋混凝土中长柱具有优越的抗震性能。

针对型钢混凝土柱的不足, 结合钢管约束钢筋混凝土柱抗震性能优越的特点, 本文建议在工程实践中可将型钢混凝土柱中的钢筋笼由外包钢管替换, 钢管只对核心混凝土起约束作用, 不承担竖向荷载, 从而形成钢管约束型钢混凝土柱。在钢管约束型钢混凝土柱中, 由于未设置由纵筋和箍筋形成的钢筋笼, 有利于核心混凝土的浇筑, 保证混凝土的质量; 且钢管对核心混凝土的约束作用可有效提高柱的轴压比限值, 并有效提高短柱的弹塑性层间变形能力。

目前国内外对钢管约束型钢混凝土柱的研究尚未见报道。本文以轴压比为变化参数对方钢管约束型钢混凝土短柱的抗震性能进行试验研究和理论分析, 根据试验结果和理论分析结果建立了方钢管约

束型钢混凝土柱的斜截面受剪承载力公式, 并提出了设计建议。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验以框架柱为研究对象。试验研究的主要参数为轴压比。本文共进行了 4 个试件的试验研究, 其中包括 3 个剪跨比为 1.5 的方钢管约束型钢混凝土短柱试件和 1 个相同剪跨比的型钢混凝土对比试件。试验中将试件的两加载端用刚性混凝土梁固定, 以模拟柱的两端嵌固模型, 刚性加载梁的截面为 500mm × 300mm × 800mm。图 1 为试件的几何尺寸和型钢尺寸。为防止钢管在端部由于混凝土受压外鼓而造成钢管焊缝撕裂, 在钢管端部对其加强, 加焊了两个高度为 20mm, 厚度为 6mm 的钢板加强环, 两个加强环的间距为 100mm。钢管在距端部 15mm 处断开, 以保证不直接承受竖向荷载。试件的具体参数详见表 1。方钢管约束型钢混凝土柱试件的总用钢量(包括型钢和钢管)与型钢混凝土对比试件的总用钢量(包括型钢和钢筋)相同。

1.2 加载和测量装置

假定柱为两端固端模型, 首先对柱施加竖向轴力, 然后在柱顶端施加反复作用的水平荷载, 以模拟地震作用。试验采用日本建研式加载装置, 加载装置示意图 2a。加载装置主要由 L 形大梁、四连杆机构、反力架和伺服作动器等组成。四连杆机构可使 L 形大梁在垂直方向和水平方向自由移动, 而不发生转动, 从而实现了柱顶为嵌固端的边界条件。水平荷载由固定于反力墙上的水平作动器施加, 竖向荷载由安装在分配梁上的 1 台 2500kN 油压千斤顶施加。千斤顶由油泵通过溢流阀供油, 在试验中实时保持轴力的稳定。千斤顶上设 1 个 2000kN 的压力传感器, 用以测量轴力。水平反复荷载由液压伺服作动器施加, 作动器的最大静态加载值为 630kN,

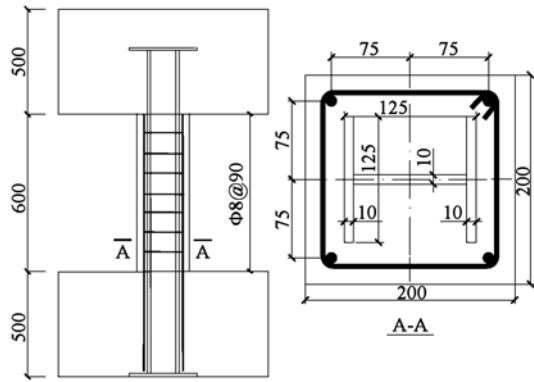
表 1 试件基本参数

Table 1 Parameters and test results of test specimens

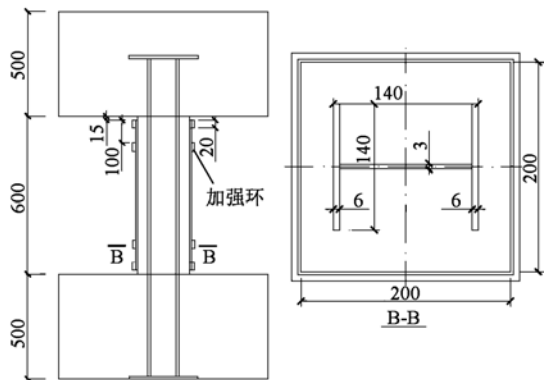
试件编号	t /mm	D/t	f_{cu}^{10} /MPa	f_{co} /MPa	f_y /MPa	t_f /mm	t_w /mm	f_f /MPa	f_w /MPa	纵筋		箍筋		N /kN	n_0
										配筋	屈服强度 /MPa	配筋	屈服强度 /MPa		
SSRC-70-5-1.5	—	—	75.1	56.4	—	9.64	9.64	296	296	4 Φ 10	392	Φ 8@90	363	1365	0.5
STSRC-70-5-1.5	3.00	66	75.1	56.4	254	5.76	3.00	254	291	—	—	—	—	1365	0.5
STSRC-70-4-1.5	3.00	66	75.1	56.4	254	5.76	3.00	254	291	—	—	—	—	1092	0.4
STSRC-70-3-1.5	3.00	66	75.1	56.4	254	5.76	3.00	254	291	—	—	—	—	819	0.3

注: ①SSRC 为型钢混凝土; STSRC 为方钢管约束型钢混凝土; 70 为混凝土强度 C70; 5 为试件的轴压比 0.5, 1.5 为剪跨比 1.5。

② D 为边长, t 为钢管厚度, D/t 为钢管宽厚比; f_{cu}^{10} 为边长为 100mm 的混凝土立方体抗压强度; f_{co} 为混凝土轴心抗压强度; f_y 为钢筋屈服强度; N 为试件轴压力; n_0 为轴压比, $n_0 = N/(A_c f_{co} + A_a f_a)$, A_c 为核心混凝土净面积, A_a 和 f_a 分别为型钢的总面积和型钢屈服强度; t_f 和 t_w 分别为型钢翼缘和腹板厚度; f_f 和 f_w 分别为型钢翼缘和腹板屈服强度。



(a) 对比试件 SSRC-70-5-1.5



(b) 方钢管约束型钢混凝土试件

图1 试件几何尺寸及构造

Fig.1 Details of specimens

最大行程为 500mm。分配梁与 L 形大梁间设有辊轴,以使它们之间能自由滑动。由于四连杆机构不能承担水平方向和垂直方向荷载,所以荷载平力 P 和竖向力 N 即为试件所受的剪力和轴力。

图 2b 为试验测量装置。试验的量测内容为荷载-位移曲线和钢管应变变化,因此测量装置包括位移测量装置和应变测量装置。位移测量装置由 2 个水平位移传感器组成,用于测量水平位移,位移传感器的布置位置为柱端刚性梁中部和底部。水平位移

传感器固定在延伸杆上,延伸杆通过螺栓固定在底部柱端梁上,可以保证位移传感器所测位移为柱顶相对于柱底的位移,而不包含整个试件的刚体位移。钢管的应变由应变片测得,在每个试件的钢管跨中四面分别布置了 1 个应变花,即每个试件布置 4 个应变花。

1.3 加载制度

水平荷载的施加采用荷载-位移双控制的方法,即试件屈服前,采用荷载控制分级加载,直至试件屈服,对应于每个荷载步循环 1 次;试件屈服后,采用位移控制,取屈服位移的倍数为级差进行控制加载,对应于每个荷载步循环 2 次。

2 试验主要结果分析

2.1 破坏模式

图 3 为方钢管约束型钢混凝土短柱的破坏照片。由图 3a 可见,试件 SSRC-70-5-1.5 出现了明显的纵向通长粘结裂缝,裂缝位置基本位于型钢翼缘位置处;由于混凝土浇筑过程中有一肢箍筋在振捣过程中脱离了原位置而与其相邻的下面一肢箍筋靠近,造成此处的箍筋间距增大了 1 倍,因此在峰值荷载后,混凝土保护层脱落,纵筋迅速失稳,导致承载力迅速下降,延性较差。

由图 3b 可见,与对比试件 SSRC-70-5-1.5 轴压比相同的方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件 STSRC-70-5-1.5,表面产生了很多裂缝,既有纵向粘结裂缝,又有交叉斜裂缝,此试件的破坏模式为粘结破坏与剪切破坏相结合。在峰值荷载后,试件端部混凝土被压溃,导致钢管与加载梁接触而受压屈曲,钢管外鼓。

由图 3c 可见,轴压比为 0.4 的方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件 STSRC-70-4-1.5 发生了严重的

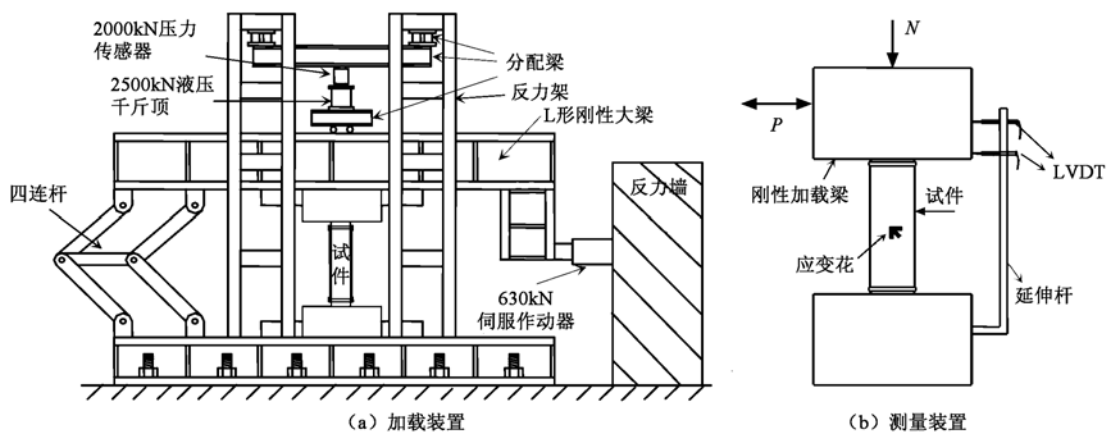


图2 试验加载及测量装置

Fig.2 Schematic of test set-up and instrumentation layout

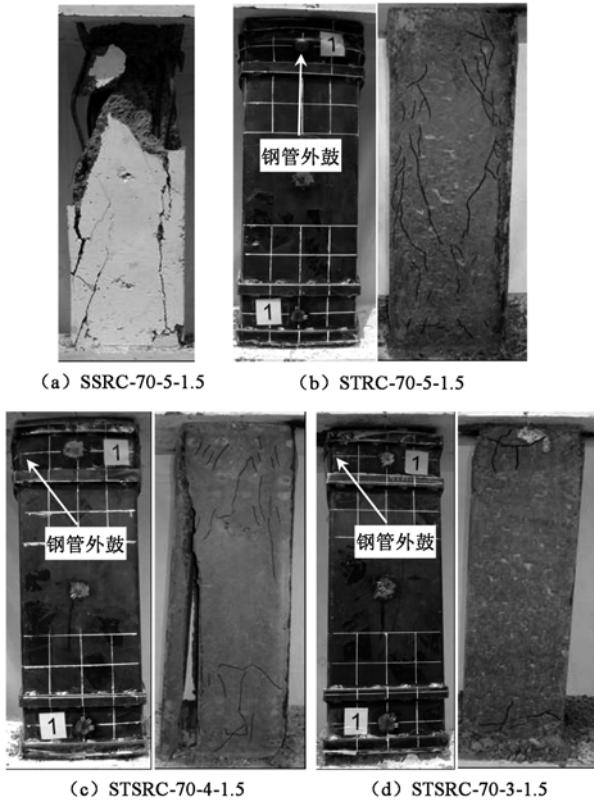


图3 试件的破坏照片

Fig. 3 Failure photograph of specimens

粘结破坏,型钢翼缘外侧的混凝土整体剥落,且试件表面也有明显的交叉斜裂缝,其破坏模式也是粘结破坏与剪切破坏相结合。

由图3d可见,轴压比为0.3的方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件 STSRC-70-3-1.5,并无明显的粘结破坏和剪切破坏出现,只是在柱端部产生了保护层剥落和少量的混凝土开裂,试件为弯曲破坏模式。

由本组试件的破坏模式可见,无论是普通型钢混凝土还是方钢管约束型钢混凝土短柱,试件都有可能发生粘结破坏,因此在工程实践中应在型钢翼缘外侧设置抗剪连接件以避免粘结破坏的发生,从而提高柱的承载力、延性和耗能性能。

2.2 滞回特性

图4为方钢管约束型钢高强混凝土短柱的荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线。由图4a可见,试件 SSRC-70-5-1.5 的滞回性能较差,峰值荷载后承载力迅速下降,没有充分发展塑性变形,耗能性能较差。

图4b为与对比试件 SSRC-70-5-1.5 轴压比相同的方钢管约束型钢混凝土短柱试件 STSRC-70-5-1.5 的滞回曲线。由图中可见,试件 STSRC-70-5-1.5 的滞回曲线饱

满,耗能性能较好,峰值荷载后承载力下降较为缓慢,具有较好的延性。

图4c为轴压比为0.4的方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件 STSRC-70-4-1.5 的滞回曲线。由图中可见,试件的滞回曲线非常饱满,耗能性能优越,峰值荷载后承载力下降非常缓慢,延性很好。

图4d为轴压比为0.3的方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件 STSRC-70-3-1.5 的滞回曲线。由图中可见,试件的滞回曲线饱满,但与轴压比为0.4和0.5的试件相比,滞回曲线稍有捏缩;峰值荷载后承载力下降缓慢,延性很好。

图5为试件的骨架曲线对比。由图5可见,相同用钢量和轴压比条件下,方钢管约束型钢高强混凝土短柱的承载力明显高于型钢高强混凝土对比试件。相对于对比试件,方钢管约束型钢混凝土短柱的受剪承载力提高了22.76%,且方钢管约束型钢高强混凝土的延性和耗能性能也远高于型钢高强混凝土对比试件。随轴压比的提高,方钢管约束型钢高强混凝土短柱的水平承载力提高,但延性有降低的趋势;试件轴压比由0.3增加至0.5,试件延性系数由8.15降低至5.85。

2.3 层间变形与延性

图6为型钢混凝土短柱与方钢管约束型钢高强混凝土短柱的荷载 P -层间位移角 R 骨架曲线对比。图中破坏点是指承载力下降至峰值荷载的85%时所对应的点^[11],此处的位移为极限位移 $\Delta_{0.85}$;当试件

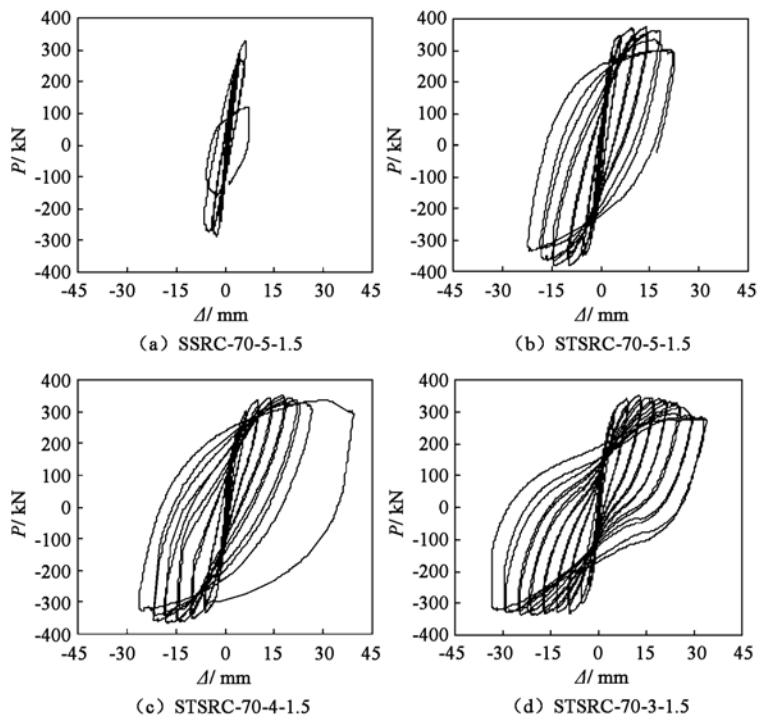
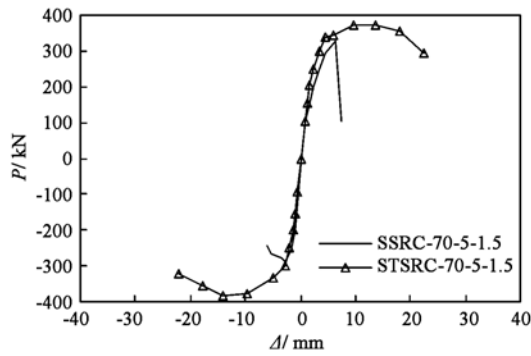
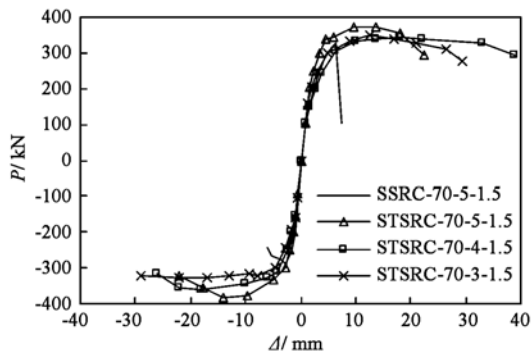


图4 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 4 $P-\Delta$ hysteretic curves of specimens



(a) 钢管约束的影响



(b) 轴压比的影响

图5 骨架曲线

Fig. 5 Envelopes of specimens

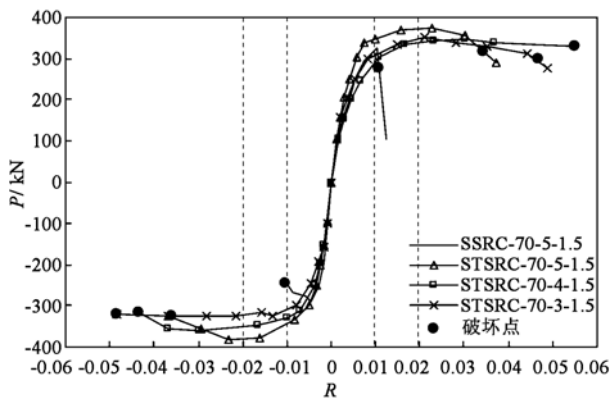


图6 试件的荷载-层间位移角骨架曲线

Fig. 6 Lateral load vs. drift ratio envelopes of specimens

的承载力未下降至 85% 时已经破坏,不能继续加载,则取最大位移为极限位移 $\Delta_{0.85}$ 。

由图 6 可见,剪跨比为 1.5 的型钢高强混凝土短柱试件的变形能力较差,试件的极限层间位移角只能达到 1% 左右,刚刚满足 GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》^[12] 对钢筋混凝土框架-剪力墙或框架-核心筒结构弹塑性层间位移角 1/100 的要求,但不满足抗震规范对钢筋混凝土框架结构弹塑性层间位移角 1/50 的变形能力要求。因此剪跨比为 1.5 以下的型钢混凝土短柱应避免在有抗震要求的框架结构中采用。与对比试件相同轴压比的方钢管约束

型钢高强混凝土短柱的层间变形能力较好,极限层间位移角接近 4%,抗震性能优越。由图 6 可见,3 个方钢管约束型钢高强混凝土短柱的变形能力均较好;随轴压比的增加,试件的极限变形能力降低,但都能满足现行抗震规范对混凝土框架柱的弹塑性变形能力要求。

表 2 为各试件的屈服点、位移延性系数和极限层间位移值。由表中可见,方形截面型钢高强混凝土短柱的极限层间位移角为 1.06% (1/94),满足现行抗震规范对钢筋混凝土框架-剪力墙或框架-核心筒结构弹塑性层间位移角 1/100 的要求,但规范中规定的是结构的平均弹塑性层间位移角限值。在实际工程中,由于结构的质量中心和刚度中心一般并不重合,且结构的质量和刚度也不可能完全对称,因此结构在水平地震作用下的扭转不可避免,这将导致结构的边柱和角柱的层间位移角大于平均层间位移角,则在框架-剪力墙或框架-核心筒结构中框架边柱和角柱的层间弹塑性变形能力应该大于 1/100。

根据本文的试验结果,剪跨比为 1.5 的型钢混凝土柱试件的极限层间变形能力也刚超过 1/100 的限值(1/94),并不能保证结构在罕遇地震作用下的不倒塌。因此对于型钢混凝土短柱,在框架-剪力墙结构或框架-核心筒结构的边柱和角柱中应避免采用。由表 2 可见,相同轴压比的方钢管约束型钢高强混凝土短柱的极限层间位移角达到 3.5%,变形能力较好。型钢混凝土短柱的位移延性系数为 2.10,而相同轴压比的方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件的位移延性系数为 5.85,明显优于型钢高强混凝土短柱。由表中可见,随轴压比的增加,方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件水平承载力明显提高,但延性系数降低,而所有 3 个试件的极限层间变形能力都较好。本文进行的方钢管约束型钢混凝土短柱的最大试验轴压比为 0.5,则其设计轴压比为 0.8^[6],即在设计轴压比为 0.8 的高轴压比条件下,方钢管约束型钢混凝土短柱仍然具有良好的抗震性能,满足结构抗震设计要求。

表 2 试验主要阶段结果

Table 2 Test results during primary stage

试件编号	P_y /kN	Δ_y /mm	P_u /kN	P_y/P_u	$\Delta_{0.85}$ /mm	$R_{0.85}$	μ_Δ
SSRC-70-5-1.5	270.7	3.02	307.5	0.88	6.33	1.06%	2.10
STSRC-70-5-1.5	310.5	3.59	377.5	0.82	21.00	3.50%	5.85
STSRC-70-4-1.5	274.8	4.18	360.2	0.76	(32.50)	(5.42%)	(7.77)
STSRC-70-3-1.5	260.8	3.48	338.5	0.77	28.50	4.75%	8.19

注: P_y 和 Δ_y 分别为采用屈服弯矩法计算得到的屈服荷载及相应位移; P_u 为试验得到的试件峰值承载力; $R_{0.85}$ 为荷载下降至峰值荷载 85% 时的层间位移角; μ_Δ 为位移延性系数; 括号内表示承载力未下降至峰值荷载的 85%。

2.4 钢管应力

根据试验中由应变花测得的钢管纵向应变、环向应变和 45° 方向的应变, 采用弹塑性应力-应变分析方法^[13], 对水平荷载施加全过程中的钢管应力状态进行了分析, 分析中忽略核心混凝土对钢管的径向压应力, 利用平面应力状态时的应力-应变关系, 求出各级荷载下钢管中的纵向平均应力 σ_v 、环向平均应力 σ_h 、剪应力 τ 和折算应力 σ_z 。

图 7 为钢管受剪面和非受剪面示意图。图 8 为钢管受剪面的水平荷载-钢管应力关系曲线。图 8a 为轴压比 0.3 的方钢管约束型钢混凝土短柱试件 STSRC-70-3-1.5 的钢管应力曲线。

由图 8a 可见, 水平荷载施加前, 由于粘结和摩擦作用, 钢管中有一定的纵向压应力, 而随往复水平荷载的施加, 钢管与混凝土之间的粘结被破坏, 因此纵向平均应力逐渐降低。水平荷载开始施加阶段, 钢管中的环向平均应力很小, 而随水平荷载的逐渐增大钢管中的环向平均应力也逐渐增大, 峰值荷载前, 钢管的环向平均应力达到最大, 而峰值荷载后环向平均应力则逐渐减小; 试件的破坏模式并非为剪切破坏, 这是由于核心混凝土部分并未发生整体剪切变形, 钢管并未起到箍筋的作用以限制核心混凝土在主拉应力方向的开裂, 因此钢管中的环向平均拉应力在峰值荷载后并未继续增大。竖向荷载施加完毕后, 钢管中的剪应力为 0, 而随水平荷载的继续施加, 剪应力逐渐增大, 峰值荷载处剪应力达到最大, 峰值荷载后剪应力基本保持不变, 这是由于试件并未发生整体剪切破坏, 因此钢管中的剪应力不会在下降段继续增大。由图中的折算应力曲线可见, 钢管在荷载-位移曲线的下降段并未屈服。

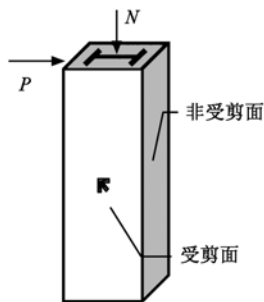
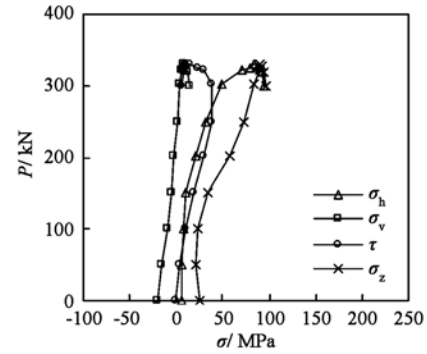
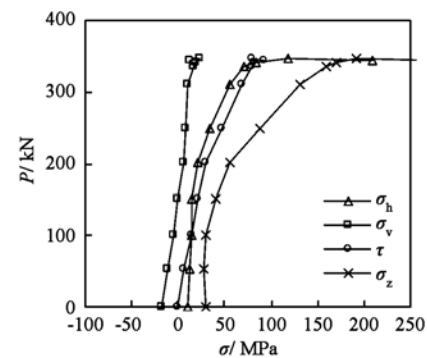


图 7 钢管受剪面示意图
Fig. 7 Sheared web of tube

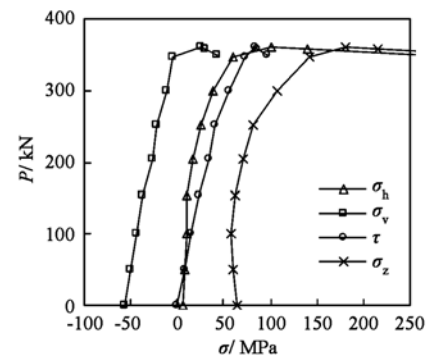
图 8b 为轴压比 0.4 的方钢管约束型钢混凝土短柱试件 STSRC-70-4-1.5 的钢管应力曲线。随水平荷载的逐渐增大, 钢管中的环向平均应力逐渐增大, 峰值荷载后钢管的环向平均应力也逐渐增大, 结合此试件的破坏模式可知, 由于试件发生了剪切破坏, 峰值荷载后试件的剪切变形持续增加, 因此外包钢管约束核心混凝土沿主拉应力方向的裂缝持续增大,



(a) STSRC-70-3-1.5



(b) STSRC-70-4-1.5



(c) STSRC-70-5-1.5

图 8 水平荷载-受剪面钢管应力关系曲线

Fig. 8 Lateral load vs. stress of sheared web of steel tube

因此钢管中的环向平均应力持续增大, 直至钢管屈服。由剪应力变化曲线可见, 峰值荷载前, 钢管的剪应力持续增加; 峰值荷载后试件的整体剪切变形持续增大, 导致钢管中的剪应变持续增大, 但由于钢管在峰值荷载后已经屈服, 因此钢管中的剪应力不再继续随剪应力的增加而增大。

图 8c 为轴压比 0.5 的方钢管约束型钢混凝土短柱试件 STSRC-70-5-1.5 的钢管应力曲线, 由于此试件的破坏模式也为剪切破坏, 因此其钢管的剪应力发展过程与轴压比为 0.4 的试件基本相同。

由钢管应力分析结果可见, 钢管跨中在水平荷载施加过程中应力状态变化由试件的破坏模式决定, 当试件不发生剪切破坏时, 钢管并未屈服, 钢管

中的环向平均拉应力和剪应力在峰值荷载后不再继续增大;当试件为整体剪切破坏时,试件的钢管在峰值荷载后屈服,这是因为峰值荷载后核心混凝土部分剪切变形迅速增大,而外包钢管则限制剪切变形的迅速增大,因此钢管在峰值荷载点后逐渐屈服。

由试验结果可见,即使方钢管约束型钢高强混凝土短柱试件的破坏模式为剪切破坏,试件仍具有较好的延性,这是因为在核心混凝土发生剪切破坏后,外包钢管能够限制沿主拉应力方向的斜裂缝迅速开展;峰值荷载后钢管中的拉应力逐渐增加,钢管中拉力的增加弥补了核心混凝土部分在发生斜截面开裂后的受剪承载力的降低,从而使得试件在峰值荷载后承载力不会发生迅速下降,提高了试件的延性和变形能力。

3 结论

(1)相同用钢量条件下,方钢管约束型钢混凝土短柱的受剪承载力、延性、极限层间变形能力和耗能性能高于型钢混凝土柱。

(2)钢管约束型钢混凝土柱中可不设由纵筋和箍筋形成的钢筋笼,柱只由核心型钢、核心混凝土和外包薄壁钢管组成。

(3)方钢管约束型钢混凝土和普通型钢混凝土短柱均易发生型钢翼缘外侧与混凝土之间的粘结破坏,因此在工程实践中可在型钢翼缘外侧设置抗剪连接件,通过此构造措施避免混凝土与型钢翼缘的粘结破坏,提高柱的承载力和抗震性能。

(4)随轴压比的增加,方钢管约束型钢混凝土短柱的受剪承载力提高,而延性和极限层间变形能力有所降低。但在设计轴压比为0.8的高轴压比条件下,方钢管约束型钢混凝土短柱依然具有优越的抗震性能。

(5)随轴压比的增加,方钢管约束型钢混凝土短柱的破坏模式由弯曲破坏转化为剪切破坏,但发生剪切破坏的试件仍具有良好的延性和弹塑性变形能力。

参 考 文 献

[1] JGJ 138—2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. (JGJ 138—2001 Technical specification for steel reinforced concrete composite structures[S]. (in Chinese))
[2] YB 9082—2006 钢管混凝土结构技术规程[S].

(YB 9082—2006 Technical specification of steel-reinforced concrete structures[S]. (in Chinese))
[3] Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structure[S].
[4] ANSI/AISC 341-05 Seismic provisions for structural steel buildings[S].
[5] 叶列平,方鄂华. 钢管混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 1-12. (Ye Lieping, Fang Ehua. State-of-the-art of study on the behavior steel reinforced concrete structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 1-12. (in Chinese))
[6] 贾金青,徐世焯. 钢管高强混凝土短柱轴压力系数限值的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 14-18. (JIA Jinqing, XU Shilang. The limit values of axial compression ratio of steel reinforced high-strength concrete short columns [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(1): 14-18. (in Chinese))
[7] 赵鸿铁,张素梅. 组合结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
[8] Tomii M, Sakino K, Xiao Y, Watanabe K. Earthquake resisting hysteretic behavior of reinforced concrete short columns confined by steel tube [C]// Proceedings of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin: Harbin Architectural and Civil Engineering Institute, 1985: 119-125.
[9] 肖岩. 套管钢筋混凝土结构的发展与展望[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 8-12. (Xiao Yan. Development and prospects of tubed reinforced concrete column structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 8-12. (in Chinese))
[10] Zhang Sumei, Liu Jiepeng. Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(9): 1194-1207.
[11] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. (JGJ 101—96 Specification of testing methods for earthquake of resistant bulidings[S]. (in Chinese))
[12] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. (in Chinese))
[13] Zhang Sumei, Guo Lanhui, Ye Zaili, Wang Yuyin. Behavior of steel tube and confined concrete high strength concrete for concrete-filled RHS tubes [J]. Advances in Structural Engineering, 2005, 8(5): 101-116.