

实腹式型钢混凝土异形柱抗震性能试验及参数分析

张 波¹, 方 林¹, 金国芳¹, 李凯文²

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 无锡城市职业技术学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: 为研究实腹式型钢混凝土(SSRC)十字形异形柱的抗震性能,对 4 个不同轴压比、配钢率、加载方向的 SSRC 十字形异形柱进行了低周反复加载试验,分析了各试件的破坏形态、滞回性能、骨架曲线、位移延性。试验结果表明:当剪跨比较大时,试件发生弯曲破坏;试件的滞回曲线比较饱满;位移延性系数均大于 3,破坏位移角在 $1/28 \sim 1/16$ 之间。采用 ANSYS 对试件进行有限元分析,考虑型钢与混凝土之间的粘结滑移,分析比较了轴压比、配钢率及加载方向三个参数对试件承载力及延性的影响,有限元分析结果与试验结果吻合较好。试验及有限元分析均表明:SSRC 十字形异形柱具有良好的延性、塑性变形能力,可以应用于高抗震设防烈度区的多高层建筑中。

关键词: 实腹式型钢混凝土(SSRC); 十字形异形柱; 低周反复荷载试验; 抗震性能; 有限元参数化分析

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

Experimental Study and Parametric Analysis on Seismic Behavior of Solid-Web Steel Reinforced Concrete Cross-Shaped Column

ZHANG Bo¹, FANG Lin¹, JIN Guofang¹, LI Kaiwen²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi 214000, China)

Abstract: The seismic behavior of solid-web steel reinforced concrete (SSRC) cross-shaped column was investigated through low cycle reversed loading experiment of 4 column specimens with various axial compression ratios, steel ratios and loading directions. The failure process and pattern, load-displacement hysteretic curve and skeleton curve of columns together with ductility were analyzed. The experimental results show that the failure mode of SSRC specimens with large shear span ratio is bending failure. The hysteretic curves are relatively plump. The displacement ductility coefficients are larger than 3. The drift ratios vary from $1/28 \sim 1/16$. Furthermore a finite element analysis (FEA)

considering the interfacial bond-slip between steel and concrete was carried out to simulate the influence of different parameters including axial compression ratio, steel ratio and loading direction on SSRC bearing capacity and ductility. The numerical analysis results agree well with the experimental results. FEA and Test results indicate that SSRC have favorable ductility and plastic deformation, and can be adopted in the construction of high-rise buildings in high seismic fortification zones.

Key words: solid-web steel reinforced concrete (SSRC); cross-shaped column; low cycle reversed loading experiment; seismic performance; parametric finite element analysis

型钢混凝土(SRC)异形柱结构将型钢与异形柱结合起来,具有布置灵活、美观实用、增加房屋使用面积等优点。与普通混凝土异形柱相比,SRC 异形柱结构承载能力较高、抗震性能较好,同时克服了传统异形柱肢高肢厚比限制严格、轴压比限值低等缺陷,使 SRC 异形柱结构体系能够应用于抗震设防烈度较高地区的多高层建筑中,因此具有良好的应用前景^[1]。

SRC 异形柱结构体系主要有 L 形、T 形及十字形三种截面形式,根据配钢形式的不同,又主要分为实腹式和空腹式两种。目前,关于 SRC 异形柱的研究主要集中在国内,国外研究还很少见。现有报道中关于型钢混凝土 L 形和 T 形柱的研究已较为全面,而针对 SRC 十字形异形柱的研究工作仅主要集中在构件承载力、框架承载力和框架整体抗震性能等方面^[2-4],对构件抗震性能的研究还不多,只有文献[5]对 4 个空腹式型钢混凝土(LSRC)十字形异形柱的抗震性能进行过试验研究。实腹式型钢混凝土(SSRC)十字形异形柱抗震性能方面的研究还未见报道,因此对此类结构形式的研究很有必要。

收稿日期: 2014-08-01

基金项目: 江苏省第七批“六大人才高峰”项目(JY-060);江苏省第四期“333 工程”培养资助项目(BRA2012027)

第一作者: 张 波(1985—),男,博士生,主要研究方向为工程抗震与防灾、结构鉴定与加固。E-mail: hope_zb@163.com

基于此,文中设计制作了 4 个 SSRC 十字形异形柱试件,通过低周反复荷载试验和有限元分析,研究不同参数条件下 SSRC 十字形异形柱的抗震性能,为其工程应用提供试验依据和理论基础。

1 试验概况

共设计 4 个 SSRC 十字形异形柱试件,缩尺比例为 1:2,编号为 SSRC1~SSRC4,试件外部位移测点布置及截面尺寸见图 1。同时在试件柱脚内部的型钢(腹板和翼缘)、纵筋及箍筋均布置应变片,用来测量各部分的应变情况。试件混凝土强度等级均为 C50。各试件肢高为 360 mm,肢厚为 120 mm,肢高肢厚比为 3.0,水平加载点位置距柱底 1 170 mm,剪跨比均采用 3.25。纵筋选用 HRB400,箍筋选用 HPB300。试件钢骨由不同规格钢板焊接形成,材质为 Q235。设计变化参数有轴压比、配钢率及加载方向。试件配筋、配钢形式参照相关规范进行设计^[6-7]。

钢材及混凝土材料参数见表 1—2,试件基本信息详见表 3。表中,轴压比 $n=N/f_cA$, N 为轴压力实测值, f_c 为混凝土抗压强度设计值, A 为截面面积; B 表示板, F 表示翼缘, W 表示腹板,钢板长度均为 1 600 mm。

表 1 钢材材料性能

Tab.1 Properties of steel and reinforcement bars				
钢材	厚度(直径)/mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 $E_s/10^5$ MPa
钢板	4	353.7	493.7	2.06
	6	308.2	434.4	2.06
	8	316.9	457.0	2.06
	10	371.2	505.6	2.06
钢筋	(6)	460.0	570.9	2.10
	(10)	464.3	575.8	2.00

表 2 混凝土材料性能

Tab.2 Properties of concrete			
强度等级	抗压强度 平均值 f_{cu} /MPa	轴心抗压强度 平均值 f_c /MPa	弹性模量 $E_c/10^4$ MPa
C50	53.5	43.7	3.45

表 3 试件基本信息表

Tab.3 Design parameters of specimens											
试件编号	配钢率 $\rho_{ss}/\%$	轴压比 n	加载 方向	体积配箍率 $\rho_{sv}/\%$	箍筋 配置	钢板(厚/mm×宽/mm×数量/个)					
						腹板			翼缘		
SSRC1	5.69	0.3	工程轴	1.587	6@60	B1-W1	4×135×2	B1-W2	4×274×1	B1-F	8×60×4
SSRC2	5.69	0.5	工程轴	1.587	6@60	B2-W1	4×135×2	B2-W2	4×274×1	B2-F	8×60×4
SSRC3	7.78	0.3	工程轴	1.587	6@60	B3-W1	6×132×2	B3-W2	6×270×1	B3-F	10×60×4
SSRC4	7.78	0.3	45°	1.587	6@60	B4-W1	6×132×2	B4-W2	6×270×1	B4-F	10×60×4

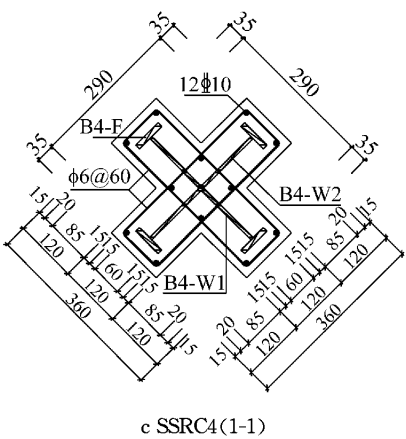
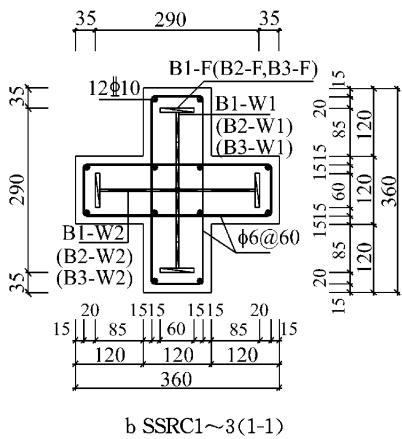
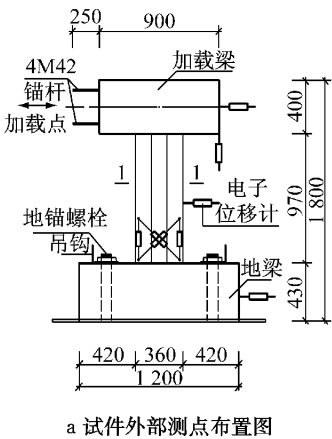


图 1 试件外部测点布置及截面示意图

Fig.1 Arrange of measuring instruments and cross section of specimens

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态及破坏机理

试件的剪跨比均为 3.25,从试验过程及破坏特征来看,所有试件的破坏形态均表现为弯曲破坏,如

图 2 所示,试件具体破坏过程见文献^[8]。

从破坏机理上来说,对 SSRC 十字形异形柱试件的破坏起控制作用的是纵向型钢。在水平裂缝出现之前,型钢与混凝土作为整体共同承载,变形协调一致;柱脚混凝土开裂后,逐渐退出工作,截面应力转移至纵筋及型钢,纵筋首先发生屈服,随后混凝土

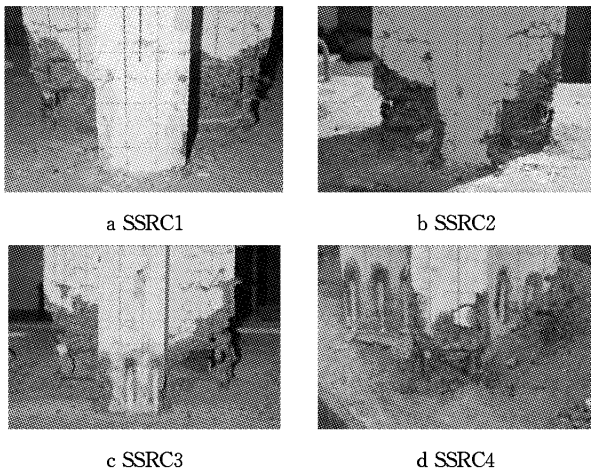


图2 试件的破坏形态

Fig.2 Failure patterns of specimens

压溃面积不断增大,截面内力主要由型钢承担,当型钢发生屈服时试件破坏。

2.2 滞回性能及骨架曲线

各试件滞回曲线如图3 a—3 d所示,图中 P_{\max} 为极限荷载值,横虚线表示其坐标值; n 为轴压比; ρ_{ss} 为配钢率;纵虚线数字表示极限位移角。这里仅选取具有代表性的纵筋、型钢的滞回曲线进行分析说明,如图3 e—3 f所示,从图3可以看出:

- (1) 各试件的滞回曲线基本呈饱满的梭形。
- (2) 对比试件 SSRC1 和 SSRC3,提高配钢率,

试件滞回环更丰满,极限变形、极限承载能力及荷载循环次数等方面均明显得到提高;达到峰值荷载后,试件骨架曲线的下降段较为平稳,试件塑性变形能力较好。

(3) 对比试件 SSRC1 和 SSRC2,低轴压比试件滞回曲线相对饱满,循环次数较多;提高轴压比,试件的骨架曲线下降段变陡峭,承载力下降较迅速。

(4) 试件 SSRC1~SSRC3 中仅与加载方向平行的柱肢柱脚端部纵筋、型钢翼缘发生屈服,而试件 SSRC4 两柱肢柱脚端部纵筋、型钢翼缘和腹板全部发生屈服。所有试件箍筋在试验过程中均处于弹性阶段,未发生屈服,限于篇幅,未将滞回曲线列出。

(5) 沿 45° 方向加载时,试件 SSRC4 在达到峰值荷载之前滞回性能良好,当超过峰值荷载之后试件承载力下降迅速,循环次数较其他试件明显减少,总体滞回性能较差。导致这种情况的原因有两种:一方面,试件沿 45° 加载时,两柱肢共同受剪,受力均匀,两柱肢的破坏几乎同时,破坏时柱肢中的纵筋基本都屈服,柱脚核心区混凝土基本都被压溃,纵向型钢屈服,试件迅速破坏,最终导致 SSRC4 在加载后期滞回性能较差;另一方面,试件达到极限荷载之后,柱脚与地梁交界处混凝土也有部分被压碎,使地梁对试件的约束能力下降。

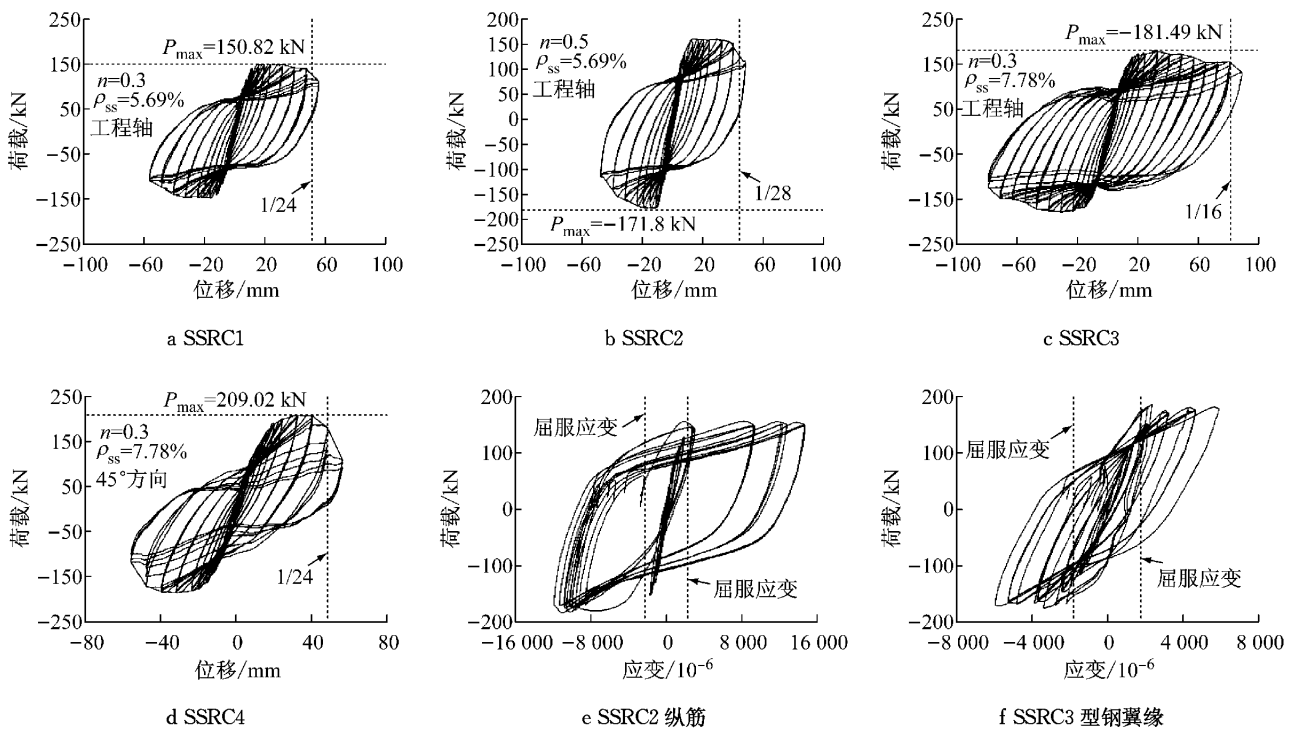


图3 滞回曲线

Fig.3 Hysteretic curves

此外,耗能能力作为评估试件抗震性能的重要指标,在文献[8]中进行详细论述,限于篇幅,本文只给出分析结果:各试件在破坏时的粘滞阻尼系数最小为 0.273,最大为 0.366,而普通钢筋混凝土矩形柱的粘滞阻尼系数大约为 0.1~0.2,普通钢筋混凝土异形柱的耗能能力较矩形柱更差,因此 SSRC 十字形异形柱试件具有更好的耗能能力。

2.3 位移延性系数

试件的延性采用延性系数来表示,即 $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$,其中 Δ_y 为屈服位移, Δ_u 为破坏位移。 Δ_y 由通用屈服弯矩法确定;开裂特征点以加载过程中肉眼所观察到的第一批裂缝出现为标志;破坏位移取水平荷载下降到最大荷载 85% 对应的位移值。

表 4 列出了各试件骨架曲线特征点的试验值,其中 P_{cr} 、 Δ_{cr} 为开裂荷载、位移; P_y 、 Δ_y 为屈服荷载、位移; P_m 、 Δ_m 为极限荷载、位移; P_u 、 Δ_u 为破坏荷载、位移; θ_y 、 θ_m 、 θ_u 为分别为屈服、极限、破坏位移角; $\bar{\mu}_{\Delta}$ 为平均延性系数。从表中可以看出:

(1) 试件 SSRC1~SSRC4 的平均延性系数均大

于 3,说明 SSRC 十字形异形柱具有良好的延性。

(2) 试件 SSRC1~SSRC4 的破坏位移角均大于 1/60,根据《混凝土异形柱结构技术规程》JGJ149—2006 规定^[6],罕遇地震作用下,钢筋混凝土异形柱结构的弹塑性层间位移角限值为 1/60。因此 SSRC 十字形异形柱具有良好的塑性变形能力。

(3) 随着轴压比的增大,试件的位移延性系数减小。当轴压力增大,试件混凝土截面的压应力和压应变增加,受压区高度增大,截面的极限变形能力变小,致使延性降低。

(4) 配钢率对试件的延性影响较大。配钢率由 5.69% 提高到 7.78% 时,试件的延性系数提高了约 14%。提高配钢率,使型钢对混凝土的约束作用增强,混凝土的极限变形能力提高,试件的塑性变形能力增强,延性提高。

(5) 试件 SSRC4 沿 45° 方向加载,虽然配钢率有了提高,但延性仍然相对较差。导致这种情况的原因在第 2.2 节已做过解释,这里不再赘述。

表 4 骨架曲线特征点试验值

Tab.4 Characteristic points of skeleton curves

试件 编号	方向	$P_{cr}/$ kN	$\Delta_{cr}/$ mm	$P_y/$ kN	$\Delta_y/$ mm	$P_m/$ kN	$\Delta_m/$ mm	$P_u/$ kN	$\Delta_u/$ mm	μ_{Δ}	$\bar{\mu}_{\Delta}$	θ_y	θ_m	θ_u
SSRC1	正向	138.80	12.16	126.69	10.09	150.82	20.0	128.20	50.98	5.05	5.12	1/122	1/45	1/24
	负向	-140.51	-12.03	-123.04	-9.07	-146.81	-32.21	-124.79	-47.03	5.19				
SSRC2	正向	145.06	13.30	130.50	8.49	154.58	32.51	131.39	44.24	5.21	5.07	1/143	1/45	1/28
	负向	-167.94	-15.00	-145.90	-7.92	-171.81	-19.48	-146.04	-39.00	4.92				
SSRC3	正向	147.83	11.96	153.12	13.02	181.49	32.29	154.27	81.44	6.25	5.82	1/96	1/37	1/16
	负向	-148.89	-12.14	-143.47	-11.42	-176.08	-31.79	-149.67	-61.52	5.39				
SSRC4	正向	171.08	16.21	172.56	16.55	209.02	32.36	177.67	48.77	2.95	3.34	1/78	1/37	1/24
	负向	-162.54	-16.02	-148.18	-13.33	-185.10	-31.65	-157.34	-49.67	3.72				

3 有限元模型

对试件低周反复加载进行数值模拟需进行大量试算,而不同参数对 SSRC 十字形异形柱抗震性能的影响规律通过骨架曲线便可得到简单直观的比较分析,因此在不影响结果的前提下,本节仅对试件在单调荷载作用下的受力情况进行模拟。

3.1 基本假定

混凝土及钢筋均按各向同性考虑;不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移;根据已有研究资料,型钢与混凝土的协同工作能力较差^[9],因此文中考虑型钢与混凝土的粘结滑移性能。

3.2 单元类型

混凝土单元采用实体单元 SOLID65 来模拟;钢

筋采用杆单元 LINK8 模拟;型钢钢骨部分采用壳单元 SHELL181 来模拟;型钢与混凝土之间的粘结性能通过 COMBIN39 单元来模拟。

3.3 材料本构模型

混凝土材料本构关系采用多线性等向强化模型 (MISO), SOLID65 单元将破坏区域分为压-压-压、拉-压-压、拉-拉-压、拉-拉-拉 4 种情况,混凝土在前两种情况下采用 William-Warnke 五参数破坏准则;后两种情况下,不再采用五参数破坏准则,即当混凝土应力超过极限抗拉强度时则在垂直拉应力的方向上发生开裂。

型钢、钢筋均采用双线性随动强化模型 (BKIN),单轴应力-应变关系采用理想弹塑性本构关系。钢材均采用 Von Mises 屈服准则、随动强化准则以及关联流动法则。

混凝土的单轴应力-应变关系曲线按《混凝土结构设计规范》GB50010—2010 确定^[10]。

3.4 型钢与混凝土粘结滑移的模拟

将型钢与混凝土连接面上的每一组对应节点,通过在法向、纵切向和横切向设置三个方向的单元长度为零的弹簧单元 COMBIN39 将其连接,来模拟型钢与混凝土间的粘结滑移作用,如图 4a 所示。COMBIN39 单元的非线性受力性质通过实常数 $F-D$ (荷载-位移)来定义。假定法向的相互作用只能承受压力而不抗拉, $F-D$ 曲线为过原点的折线,在第三象限的直线斜率近似取为混凝土的弹性模量;横切向的相互作用假定为刚度很大的弹簧, $F-D$ 曲线为过原点的斜率很大的直线,斜率近似取为混凝土的弹性模量,如图 4 b 和 4 c 所示。

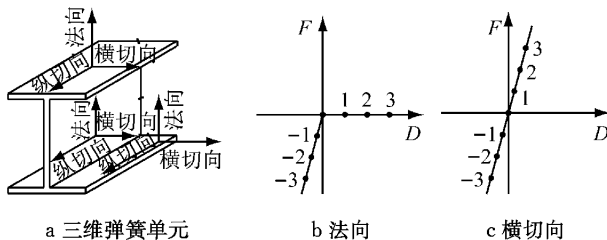


图 4 弹簧单元及 $F-D$ 曲线

Fig.4 Normal and horizontal $F-D$ curves

型钢与混凝土的粘结滑移主要体现在纵切向,具有很强的非线性。本文在试验数据的基础上,采用文献[11]提出的型钢与混凝土粘结性能本构关系计算方法。首先,确定特征粘结强度 $\bar{\tau}$ 和特征滑移值 S 的关系,即 $\bar{\tau} = \varphi(S)$,基本曲线模式如图 5 所示,图中, $\bar{\tau}_u$ 为特征极限粘结强度, S_u 为对应的滑移值, $\bar{\tau}_0$ 为初始粘结强度。该特征粘结强度是沿锚固长度的平均值;然后,建立位置函数 $\varphi(x)$ 来考虑沿锚固长度 (x) 的粘结应力 τ 与滑移 S 关系的变化,即 $\tau = \bar{\tau} \cdot \varphi(x)$;最后,计算不同位置处弹簧单元所占面积 A_x ,进而得到非线性弹簧单元在不同位置处的 $F-D$ 关系,即 $F = \bar{\tau} \cdot \varphi(x) \cdot A_x$,根据节点位置的不同,弹簧单元面积可分为中间节点、边节点和角部节点三种类型,计算方法如图 6 所示,图中 A 为面积。

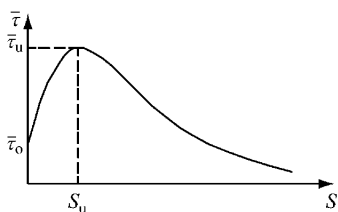


图 5 纵切向 $\bar{\tau} - S$ 基本模式曲线

Fig.5 Longitudinal $\bar{\tau} - S$ curve

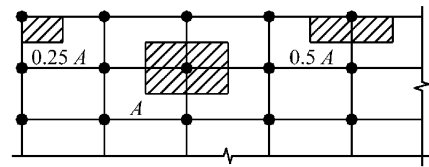


图 6 弹簧单元的面积划分示意图

Fig.6 Area distribution of spring element

对于型钢与混凝土横切向的 $F-D$ 关系,腹板和翼缘应分别考虑:假定型钢腹板与混凝土完全粘结,因此仍采用前述横切向 $F-D$ 关系;假定型钢翼缘横切向和纵切向的粘结作用相同,因此翼缘横切向同纵切向的 $F-D$ 关系^[12]。

3.5 模型的建立

有限元计算模型如图 7 所示。

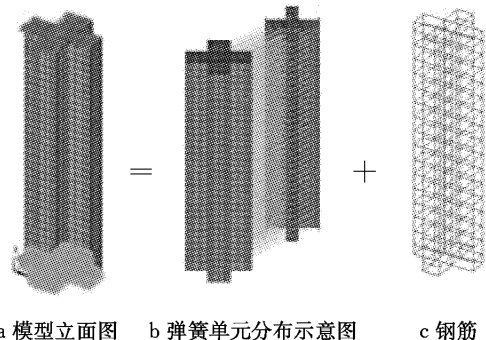


图 7 有限元分析模型

Fig.7 Finite element analysis model

计算模型采用分离式建模,利用切分方法切出钢筋、箍筋及型钢;复制型钢截面;将原型钢截面和复制截面通过非线性弹簧单元连接起来,以考虑型钢与混凝土的粘结滑移。纵筋、箍筋与混凝土共用节点,即不考虑他们之间的粘结滑移。将柱顶截面所有节点 X 方向的位移耦合到截面中心点,并在柱顶截面施加面荷载,在耦合点施加水平位移荷载。

4 承载力及延性影响因素分析

4.1 骨架曲线的对比

有限元计算值与试验极限承载力对比见表 5,其中 P_{TEST} 表示试验值, P_{FEA} 表示有限元计算值。

表 5 试件承载力试验值与计算值对比

Tab.5 Test and calculated results of bearing capacity

试件编号	P_{TEST}/kN	P_{FEA}/kN	P_{TEST}/P_{FEA}
SSRC1	148.82	162.15	0.92
SSRC2	163.20	162.08	1.01
SSRC3	178.79	177.33	1.01
SSRC4	197.06	219.05	0.90

试件的荷载-位移骨架曲线试验值和有限元分

析计算值对比如图 8 所示,图中 $P_{m,T}$ 为试验正负极限荷载, $P_{m,F}$ 为有限元极限荷载. 从图 8 及表 5 中可以看出,骨架曲线大体上吻合,有限元计算的试件极限承载力与试验值吻合较好,因此可以通过有限元分析方法对影响 SSRC 十字形异形柱承载力和延性的因素做进一步的研究. 此外,计算骨架曲线的初始刚度较试验值偏大,计算骨架曲线与试验骨架曲线仍存在一定差异,导致这种差异的主要原因有: (1) 试件地梁与静力台座之间有滑移,试验装置与试件之间存在空隙,试验与有限元模型中的理想约束情况存在差异,使试件的初始刚度降低. (2) 材料的本构关系及型钢与混凝土之间粘结滑移的本构关系均与实际情况存在一定的差异.

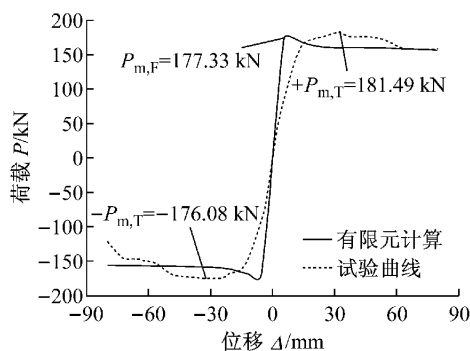


图 8 试件 SSRC3 计算与试验骨架曲线对比
Fig.8 Comparison of sketeton curves of SSRC3

4.2 轴压比的影响

已有研究表明,轴压比对试件的延性具有一定的影响. 在加载方向和配钢率不变的情况下,改变试件的轴压比,分别为 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8,建立有限元模型,计算得到各工况下 SSRC 十字形异形柱的骨架曲线,如图 9 所示,可以看出:

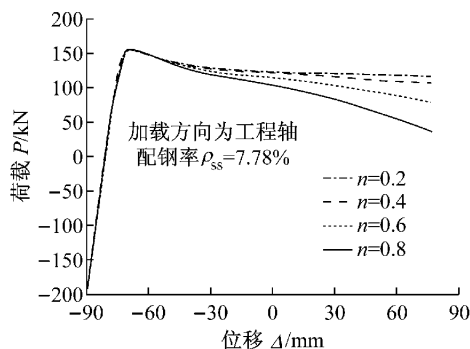


图 9 试件在不同轴压比下的骨架曲线
Fig.9 Skeleton curves of different axial compression ratios

- (1) 轴压比对试件的极限承载力影响不明显.
- (2) 轴压比对试件下降段的影响较为明显. 随

着轴压比的增大,试件骨架曲线下降段明显变陡,说明试件的延性逐渐减小,当轴压比超过 0.6 时,下降速度加剧.

4.3 配钢率的影响

在轴压比和加载方向不变的情况下,改变试件的配钢率,分别为 5.69%、6.74%、7.78% 和 9.82%,建立有限元模型进行计算,得到各工况下试件的骨架曲线如图 10 所示,可以看出:

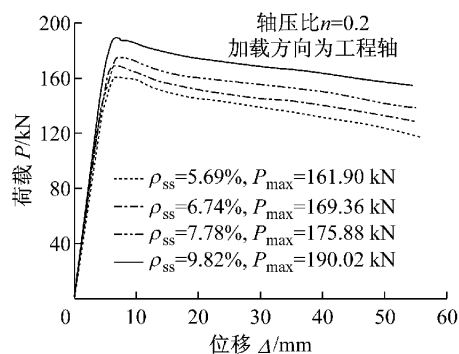


图 10 试件在不同配钢率下的骨架曲线
Fig.10 Skeleton curves of different steel ratios

- (1) 配钢率对试件的极限承载力影响明显,随着配钢率的增大,试件极限承载力得到提高.
- (2) 由有限元计算结果得到各工况下试件的延性系数分别为 5.82、6.41、7.27 和 7.83,因此当试件的配钢率提高时,一定范围内,试件的延性系数也随之增大.

4.4 加载方向的影响

在轴压比和配钢率不变的条件下,改变试件的加载方向,分别为沿工程轴、15°、30° 和 45°,建立有限元模型进行计算,得到各工况下试件的骨架曲线如图 11 所示,可以看出:

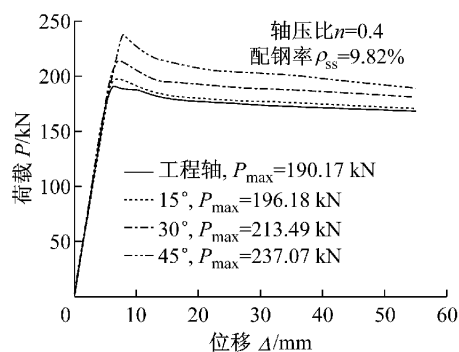


图 11 试件在不同加载方向的骨架曲线
Fig.11 Skeleton curves of different loading direction

- (1) 增大加载角,试件的极限承载力逐渐提高,沿 45° 方向加载时,试件的极限承载力最大.

(2) 随着加载角的增大,试件骨架曲线下降段逐渐变陡,试件的延性逐渐变差,沿 45° 方向加载时,试件下降段最为陡峭,延性相对最差。

5 结论

通过4个SSRC十字形异形柱试件的低周反复荷载试验及有限元参数分析,可以得到以下结论:

(1) 在轴向荷载和水平位移的共同作用下,剪跨比为3.25的SSRC十字形异形柱试件均发生弯曲型破坏。试件的滞回曲线均比较饱满,位移延性系数均大于3,极限位移角在 $1/28 \sim 1/16$ 之间,表明SSRC十字形异形柱具有良好的延性、塑性变形能力和耗能能力。

(2) 轴压比、配钢率及加载方向对试件的抗震性能均有影响。随着轴压比的提高,极限承载力有所提高,延性降低;随着配钢率的增大,极限承载力明显增大,延性增强;沿 45° 加载时,极限承载力提高,延性相对较差。

(3) 通过有限元参数分析,对比了轴压比、配钢率及加载方向对试件承载力及延性的影响,所得结论与试验结果吻合较好,因此可以通过有限元分析方法对SSRC十字形异形柱做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 陈宗平,薛建阳,赵鸿铁.实腹式型钢混凝土异形柱的受力性能研究[J].广西大学学报,2010,35(4):567.
CHEN Zongping, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie. Study on mechanical behavior of solid steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Guangxi University, 2010, 35 (4): 567.
- [2] 陈宗平,王妮,钟铭,等.型钢混凝土异形柱正截面承载力试验及有限元分析[J].建筑结构学报,2013,34(10):108.
CHEN Zongping, WANG Ni, ZHONG Ming, et al. Experimental study and finite element analysis on normal section bearing capacity of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (10): 108.
- [3] 刘祖强,薛建阳,倪茂明,等.实腹式型钢混凝土异形柱边框架拟静力试验及有限元分析[J].建筑结构学报,2012,33(8):23.
LIU Zuqiang, XUE Jianyang, Ni Maoming, et al. Quasi-static test and finite element analysis on solid-web steel reinforced concrete exterior frame with special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 23.
- [4] 薛建阳,刘祖强,葛鸿鹏,等.实腹式型钢混凝土异形柱中框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(11):82.
XUE Jianyang, LIU Zuqiang, GE Hongpeng, et al. Seismic behavior of solid steel reinforced concrete middle frame with special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 82.
- [5] 陈宗平,薛建阳,赵鸿铁,等.型钢混凝土异形柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2007,28(3):53.
CHEN Zongping, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 53.
- [6] 中华人民共和国行业标准.JGJ 149—2006 混凝土异形柱结构技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
Professional Standard of the People's Republic of China. JGJ 149—2006 Technical specification for concrete structures with specially shaped columns [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [7] 中华人民共和国行业标准.JGJ 138—2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
Professional Standard of the People's Republic of China. JGJ 138—2001 Technical specification for steel reinforced concrete composite structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [8] 张波,方林,金国芳,等.实腹式配钢的型钢混凝土十字形异形柱抗震性能试验研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2014,42(11):121.
ZHANG Bo, FANG Lin, JIN Guofang, et al. Seismic behavior of solid-web steel reinforced concrete cross-shaped column [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(11): 121.
- [9] 李俊华,李玉顺,王建民,等.型钢混凝土柱粘结滑移本构关系与粘结滑移恢复力模型[J].土木工程学报,2010,43(3):46.
LI Junhua, LI Yushun, WANG Jianmin, et al. Bond-slip constitutive relation and bond-slip resilience model of shape-steel reinforced concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 46.
- [10] 中华人民共和国国家标准.GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
National Standard of the People's Republic of China. GB 50010—2010 code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 李红,姜维山.型钢与混凝土粘结本构关系的试验研究[J].西北建筑工程学院学报,1995(3):16.
LI Hong, JIANG Weishan. An experiment investigation of bonding constitutive relation on steel shapes and concrete [J]. Journal of Northwest Institute of Architecture Engineering, 1995(3): 16.
- [12] 杨勇,郭子雄,聂建国,等.型钢混凝土结构ANSYS数值模拟技术研究[J].工程力学,2006,23(4):79.
YANG Yong, GUO Zixiong, NIE Jianguo, et al. Study on numerical simulation technology of steel reinforced concrete structures using ANSYS [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 79.