

文章编号: 1000-4750(2013)10-0086-07

实腹式型钢混凝土异形柱框架刚度与承载力试验研究

刘祖强¹, 薛建阳¹, 葛鸿鹏², 赵鸿铁¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西, 西安 710018)

摘 要: 通过 2 榀实腹式配钢的型钢混凝土(SRC)异形柱框架的低周反复加载试验, 获得其破坏特征和荷载-位移滞回曲线, 分析其刚度和承载力。结果表明, 实腹式配钢的 SRC 异形柱框架具有良好的抗震性能, 破坏机制为梁铰机制; 刚度退化由快到慢, 呈现出较好的规律性; 对 SRC 异形柱框架的弹性层刚度进行计算, 结果与试验结果符合较好; 承载力衰减随加载位移的增加而增大, 但当位移小于 $5\Delta_y$ 时, 同级位移下承载力衰减较小; 实腹式 SRC 异形柱框架的层间受剪承载力可采用柱底塑性铰法进行计算。

关键词: 实腹式型钢混凝土; 异形柱框架; 拟静力试验; 刚度; 承载力

中图分类号: TU398.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0430

EXPERIMENTAL STUDY ON STIFFNESS AND LOADING CAPACITY OF SOLID STEEL REINFORCED CONCRETE FRAME WITH SPECIAL-SHAPED COLUMNS

LIU Zu-qiang¹, XUE Jian-yang¹, GE Hong-peng², ZHAO Hong-tie¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. Northwestern Architectural Design Institutes Company Ltd, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: According to the experimental study on two frame models composed of reinforced concrete beams and solid steel reinforced concrete (SRC) special-shaped columns under low cyclic reversed loading, the failure pattern and load-displacement hysteretic loops were obtained, and the stiffness and loading capacity were analyzed. The results show that, solid SRC frames with special-shaped columns have excellent seismic performance, and the failure mechanism is the beam-hinged mechanism. The degradation speed stiffness of the structure changes from fast to slow, which shows good regulation. The elastic story stiffness of solid SRC frame with special-shaped columns is calculated, and the results are close to the test results. The strength degradation develops with the increase of displacement, but when the displacement is less than $5\Delta_y$, the loading capacity degradation is not obvious under the same displacement. The method of plastic hinge forming at the column bottom is applicable for the calculation of story shear capacity of solid SRC frame with special-shaped columns.

Key words: solid steel reinforced concrete; frame with special-shaped columns; quasi-static test; stiffness; loading capacity

收稿日期: 2012-06-17; 修改日期: 2012-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978217); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(2009G120110005); 陕西省留学人员科技活动择优项目(陕外专发[2010]26 号); 中建股份有限公司科技研发课题项目(CSCEC-2009-Z-31)

通讯作者: 薛建阳(1970—), 男, 河南人, 教授, 工学博士, 主要从事钢与混凝土组合结构及古建筑结构研究(E-mail: jianyang_xue@163.com).

作者介绍: 刘祖强(1984—), 男, 山东人, 讲师, 工学博士, 主要从事钢结构、钢与混凝土组合结构的研究(E-mail: liuzuqiang0081@126.com);

葛鸿鹏(1976—), 男, 陕西人, 高工, 硕士, 主要从事建筑结构的研究与设计(E-mail: ghp369@hotmail.com);

赵鸿铁(1939—), 男, 江苏人, 教授, 硕士, 主要从事钢与混凝土组合结构及工程结构的抗震研究(E-mail: zhaohongtie@hotmail.com).

型钢混凝土(SRC)异形柱框架结构作为一种新型结构体系,是由 SRC 异形柱和梁组成。在该结构中,一般角柱截面采用 L 形,边柱截面采用 T 形,中柱截面采用十形,填充墙与柱肢等厚,柱楞在室内不凸出,建筑美观,空间利用率高^[1]。已有研究表明, SRC 异形柱和钢筋混凝土异形柱相比,不仅承载力高,抗震性能好,而且梁柱节点的抗剪性能也得到显著改善^[2-6]。目前, SRC 异形柱框架的研究还处于初步阶段,仅文献[7]对 1 榀空腹式配钢的 T 形截面柱和钢筋混凝土梁组成的单跨两层框架进行了低周反复加载试验,结果表明 T 形截面 SRC 异形柱框架的抗震性能良好,能够满足抗震设防的要求。上述研究是针对空腹式配钢的异形柱框架进行的,而实腹式配钢的异形柱框架的相关研究尚未见报导,因此,本文通过两榀实腹式配钢的 SRC 异形柱框架的低周反复加载试验,对结构的刚度和承载力进行探讨和分析,为异形柱结构体系的推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

共设计两榀框架,分别为实腹式 SRC 异形柱边框架(SYBK)和实腹式 SRC 异形柱中框架(SYZK)。框架为两跨三层,跨度 2.4m,底层层高 1.6m,中间层和顶层 1.2m,缩尺比为 1:2.5。框架柱采用 SRC 异形柱,肢高 300mm,肢厚 100mm,肢高肢厚比为 3。框架梁采用钢筋混凝土梁,梁高 280mm,宽 100mm,为考虑楼板的作用,梁侧悬挑翼缘板,板厚 50mm,宽 300mm。试件具体尺寸及配钢如图 1 所示。

异形柱中配置实腹钢骨架,首先由相应规格的钢板焊接成具有一定形状的钢骨,然后将箍筋加工成 U 形或封闭的矩形与钢骨焊接成整体,最后将纵筋和箍筋绑扎在一起形成骨架(图 2)。梁中角部纵筋从柱中型钢两侧通过,并按规范要求锚固;中间纵筋通过角焊缝与焊接在型钢上的连接板连接。

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室进行,首先在柱顶施加竖向荷载至预定值,然后在顶层梁端施加低周水平反复荷载,试验装置如图 3 所示。竖向加载时,设计轴压比的取值:边框架角柱 0.2,边柱 0.4;中框架边柱 0.2,中柱 0.4。水平加载采用力-位移混合控制,试件屈服前采用力控制,荷载增量为 20kN~30kN,每级循

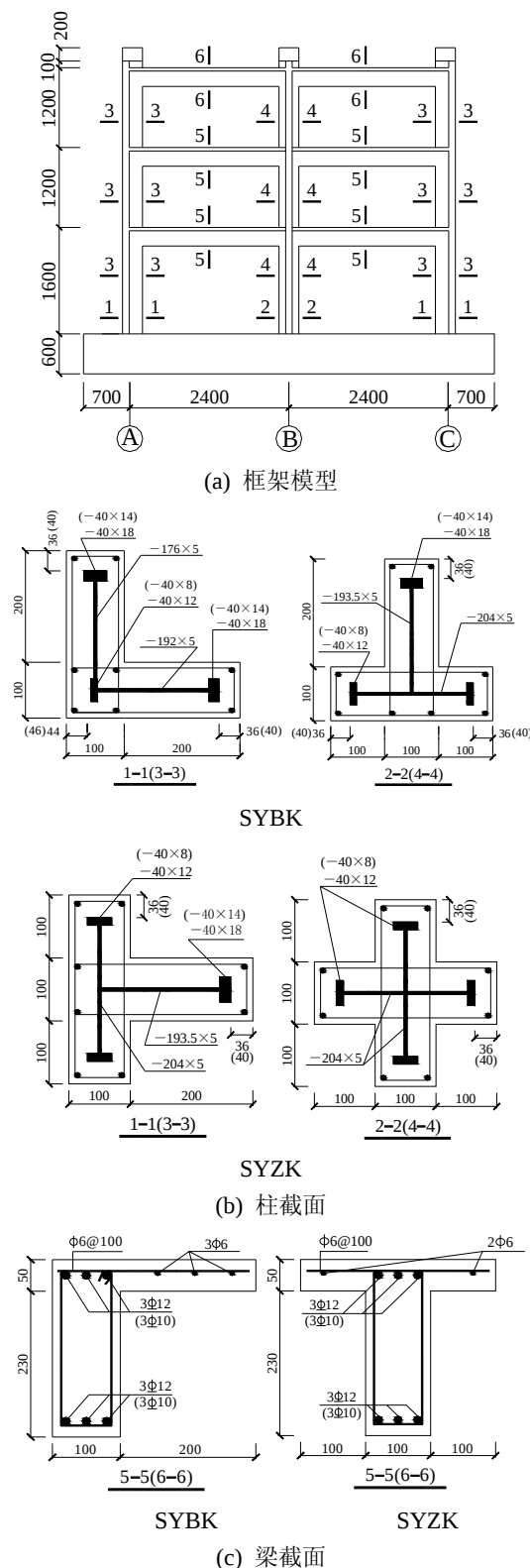
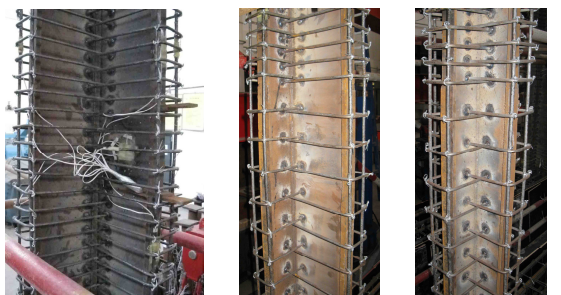


图 1 试件几何尺寸及配钢形式

Fig.1 Geometry and steel layout of specimens

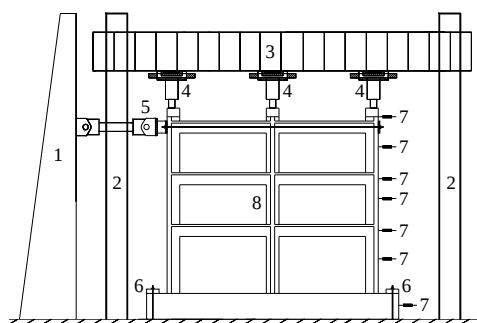
环 1 次,屈服后采用位移控制,以屈服位移的倍数逐级递增,每级循环 3 次,直至荷载下降到极限荷载的 85%左右或变形达到加载装置的极限要求时结束试验。



(a) 角柱(L形) (b) 边柱(T形) (c) 中柱(十形)

图2 钢骨架图

Fig.2 Steel skeleton



1、反力墙 2、反力钢架 3、反力梁 4、油压千斤顶
5、电液伺服作动器 6、压梁 7、电子位移计 8、试件

图3 加载装置

Fig.3 Test setup

1.2 破坏特征

实腹式 SRC 异形柱框架在低周水平反复荷载作用下表现为梁先出铰、柱后出铰(图4),符合“强柱弱梁”的抗震设计要求。其主要破坏特征为:

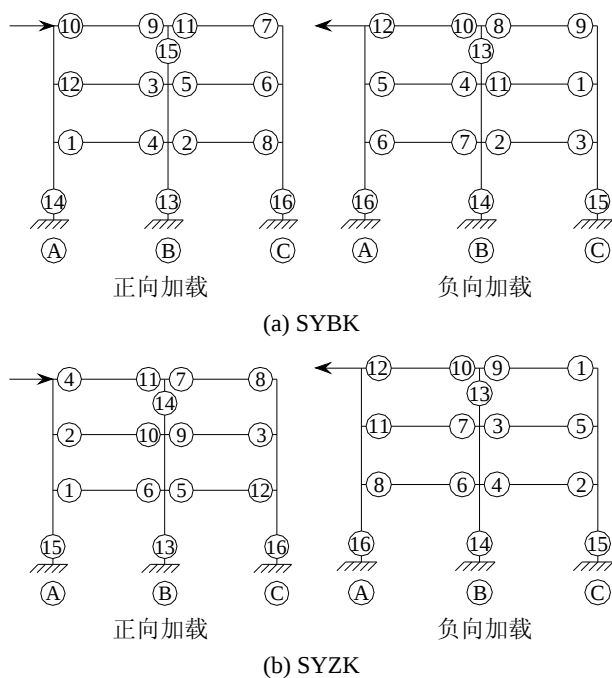


图4 框架塑性铰形成顺序

Fig.4 Subsequence of plastic hinges of frames

1) 梁端首先受弯开裂,随着荷载增大,裂缝逐渐增多,主要分布在梁端 1/3 跨度范围内,破坏时形成弯曲主裂缝,剪切斜裂缝少且未形成主斜裂缝。由于翼缘板的作用,梁顶部混凝土的破坏程度比梁底部轻得多。梁中纵向钢筋较早发生屈服,梁端塑性铰发展比较充分。

2) 底层柱下端和顶层中柱上端出现裂缝较多,混凝土破坏比较严重,柱内型钢屈服,形成塑性铰。其他各柱柱端裂缝较少,柱内型钢也没有发生屈服。沿各层柱高范围内基本没出现受剪斜裂缝,说明异形柱在配置实腹型钢后具有较好的抗剪性能。

3) 节点核心区的混凝土斜裂缝数量较少,且出现晚于梁柱裂缝。部分节点核心区在加载结束时混凝土破坏比较严重,主要是受梁端或柱端混凝土脱落的影响,核心区并没有发生剪切破坏。

试件的典型破坏形态如图5所示。



角柱柱脚

角节点



边柱柱脚

边节点

(a) SYBK



边柱柱脚

边节点



中柱柱脚

中节点

(b) SYZK

图5 试件破坏形态

Fig.5 Failure modes of specimens

1.3 滞回曲线

图 6 所示为两榀框架的荷载-顶点位移($P-\Delta$)滞回曲线。由图可知,两榀框架的滞回曲线基本对称,呈较饱满的梭形或弓形,表明实腹式 SRC 异形柱框架具有良好的抗震性能。由于 SYBK 的最后一级位移加载仅在正向进行,因此图形显得不对称,实际上在此之前循环加载形成的滞回曲线基本对称。

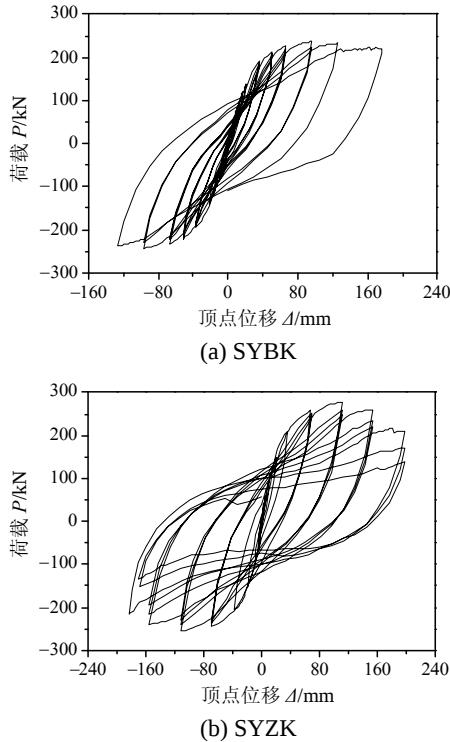


图 6 荷载-顶点位移滞回曲线

Fig.6 Load-top displacement hysteretic loops of specimens

2 刚度

2.1 弹性层刚度

本文按照文献[8]的方法对试验框架的弹性层刚度进行计算,并与试验实测值进行对比,如表 1 所示。试验实测值取第一级加载的正、负最大荷载绝对值之和与相应变形绝对值之和的比值。由表可

表 1 弹性层刚度的计算值 K_{ec} 与试验值 K_{et}

Table 1 Calculated results (K_{ec}) and test results (K_{et}) of elastic story stiffness

试件名称		$K_{ec}/(\text{kN/mm})$	$K_{et}/(\text{kN/mm})$	K_{ec}/K_{et}
SYBK	底层	42.2	55.9	0.755
	中间层	46.7	39.6	1.179
	顶层	57.9	42.5	1.362
	平均值	48.9	46.0	1.099
SYZK	底层	41.6	51.3	0.811
	中间层	44.3	46.0	0.963
	顶层	54.6	56.5	0.966
	平均值	46.8	51.3	0.912

知,部分计算值与实测值差别较大,主要是因为 SRC 异形柱框架在弹性阶段的层刚度较大,对位移值较为敏感,当实测位移出现较小的偏差,就会对初始刚度产生较大的影响,但计算值与实测值之比平均值为 1.005,说明两者符合较好。

2.2 刚度退化

在低周反复荷载作用下,实腹式 SRC 异形柱框架层刚度的退化共有两种情况,分别为层刚度随层间位移角的增大而减小,以及层刚度在相同层间位移角时随循环次数的增加而减小。

图 7 所示为加载过程中试件的层刚度与层间位移角的关系曲线。由图可知,各试件的层刚度退化速度均为先快后慢,这主要与试件的开裂过程有关,加载开始后,梁端裂缝出现较多且发展较快,导致层刚度退化速度快,随着加载的进行,试件逐渐屈服,基本不再出现新的裂缝,塑性不断发展,刚度退化速度减慢;各试件均出现初始层刚度在正负两个方向有一定差别,可能与试件制作过程中材料和尺寸存在偏差有关;由于试件各层在两个方向荷载作用下的破坏程度不同,导致其层间位移角在正负方向呈不对称发展,但在相同层间位移角时,各层刚度基本相同;在整个加载过程中,各试件的层刚度都比较接近,尽管底层层高较大,但由于对底层异形柱进行了加强,使得其刚度和上部两层相差不多。

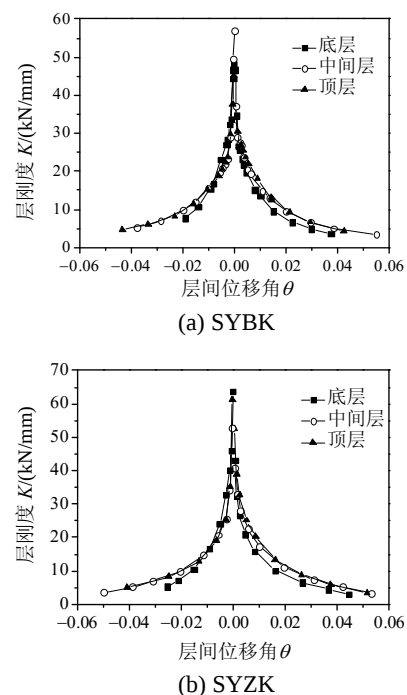


图 7 层刚度退化曲线

Fig.7 Curves of story stiffness degradation

(续表)

试件名称	λ_i	底层			中间层			顶层		
		正向	负向	平均	正向	负向	平均	正向	负向	平均
SYZK	λ_{y1}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	λ_{y2}	0.962	0.972	0.967	0.976	0.978	0.977	0.997	0.955	0.976
	λ_{y3}	0.928	0.955	0.942	0.963	0.954	0.959	0.983	0.933	0.958
	λ_{m1}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	λ_{m2}	0.914	0.963	0.939	0.947	0.932	0.940	0.937	0.923	0.930
	λ_{m3}	0.861	0.933	0.897	0.905	0.885	0.895	0.900	0.871	0.886
	λ_{u1}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	λ_{u2}	0.878	0.791	0.835	0.813	0.767	0.790	0.746	0.746	0.746
	λ_{u3}	0.750	0.711	0.731	0.663	0.678	0.671	0.568	0.651	0.610

注: λ_{yi} 、 λ_{mi} 和 λ_{ui} 分别表示屈服、峰值和破坏荷载时第 i 循环的层刚度降低系数。

3 承载力

3.1 层间受剪承载力分析

实腹式 SRC 异形柱框架在水平荷载作用下, 发生梁铰破坏, 属于非强梁弱柱型, 且框架柱以弯曲破坏为主, 这已被试验所证实。因此, 本文将采用柱底塑性铰法对实腹式 SRC 异形柱框架的层间受剪承载力进行分析^[10]。

框架为非强梁弱柱型时, 需首先判断节点类型。当:

$$\sum M_{by}^a < \sum M_{cy}^a \quad (2)$$

则为弱梁型节点, 否则为强梁型节点。式中, $\sum M_{by}^a$ 、 $\sum M_{cy}^a$ 分别表示同一节点处梁端和柱端的实际屈服弯矩之和, 即按实际配筋(钢)和材料强度标准值算得的屈服弯矩之和。

对于弱梁型节点, 梁端首先出现塑性铰, 与之相应的柱端则可能处于弹性状态, 也可能发生屈服, 故框架层间受剪承载力的计算较为复杂。

柱底塑性铰法假设在梁端发生屈服处, 柱底截面弯矩增大至发生屈服, 柱顶截面可能发生屈服, 也可能不发生屈服, 从而得到图 9 所示的三种柱底出现塑性铰的情况。

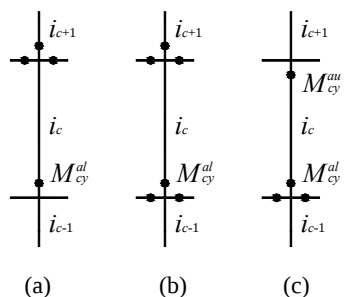


图 9 柱底塑性铰法

Fig.9 Method of plastic hinge forming at the column bottom

对于弱梁型节点的下柱端, 即下层框架柱的上

端, 当柱端实际的正截面承载力满足式(3)时, 则柱上端不出现塑性铰(图 9(a)、图 9(b)), 柱端弯矩可取 $\sum M_{by}^a \cdot i_c / (i_c + i_{c+1})$; 当不满足式(3)时, 则柱上端发生屈服(图 9(c)), 柱端弯矩取 M_{cy}^{au} 。

$$\frac{i_c}{i_c + i_{c+1}} \sum M_{by}^a < M_{cy}^{au} \quad (3)$$

式中: i_c 、 i_{c+1} 分别表示计算层及相邻上层柱的线刚度; M_{cy}^{au} 表示柱上端的实际屈服弯矩。

对于柱下端出现塑性铰, 而柱上端未出现塑性铰的情况(图 9(a), 图 9(b)), 柱的受剪承载力 V_{cy} 按下式计算:

$$V_{cy} = \left[M_{cy}^{al} + \frac{i_c}{i_c + i_{c+1}} \sum M_{by}^a \right] / h \quad (4)$$

式中: M_{cy}^{al} 表示柱下端的实际屈服弯矩; h 为层高。

对于柱上、下端均出现塑性铰的情况(图 9(c)), 柱的受剪承载力 V_{cy} 按下式计算:

$$V_{cy} = [M_{cy}^{au} + M_{cy}^{al}] / h \quad (5)$$

柱的受剪承载力确定之后, 则框架的层间受剪承载力 V_y 可按式进行计算:

$$V_y = \sum V_{cy} \quad (6)$$

利用上述方法对本文设计的两榀实腹式 SRC 异形柱框架的层间受剪承载力进行计算。对于框架梁, 由于采用钢筋混凝土梁, 梁端实际的正截面抗弯承载力 M_{by}^a 可按式计算^[11]:

$$M_{by}^a = f_{yk} A_s^a (h_0 - a_s') \quad (7)$$

式中: f_{yk} 为受拉纵向钢筋的强度标准值; A_s^a 为梁的受拉纵向钢筋的实配截面面积; h_0 为梁的截面有效高度; a_s' 为受压纵向钢筋合力点到截面受压边缘的距离。

对于框架柱, 由于实腹式 SRC 异形柱截面不规

则,且截面中配置的型钢和钢筋也不规则,导致其正截面抗弯承载力手算较为困难,难以给出合理的简化公式。文献[12]采用数值积分法编写计算机程序,给出了 SRC 异形柱的正截面承载力计算方法。利用该程序对本文试验框架中的实腹式 SRC 异形柱进行计算,取与试验时实际施加的轴压力相对应的弯矩作为其正截面抗弯承载力。

本文试验框架最终破坏是由底层柱破坏导致的,实测的结构水平承载力可以认为是底层的层间受剪承载力,因此这里对底层的受剪承载力进行计算,并与实测值进行比较,结果如表 4 所示。表中的试验值取实测的正、负方向承载力的平均值。由表可知, SRC 异形柱框架底层受剪承载力的计算值与试验值吻合很好,说明采用柱底塑性铰法计算 SRC 异形柱框架的层间受剪承载力是可行的。同时,计算层间受剪承载力的主要目的在于确定楼层的屈服强度系数,验算结构的弹塑性变形,判断薄弱层,而柱底塑性铰法对于薄弱层(如两榀试验框架的底层)受剪承载力的计算准确度是相当高的。

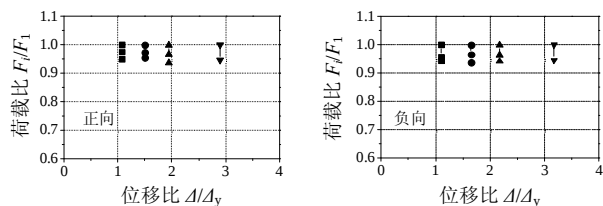
表 4 底层受剪承载力计算值 V_c 与试验值 V_t

Table 4 Calculated results (V_c) and test results (V_t) of bottom story shear capacity

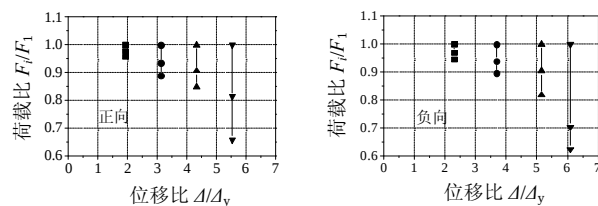
试件名称	V_c/kN	V_t/kN	V_c/V_t
SYBK	232.4	240.1	0.968
SYZK	265.9	266.0	1.000

3.2 承载力衰减

低周反复荷载作用下,结构在同一级位移时的承载力随循环次数的增加而不断减小的现象,称为承载力衰减。结构的承载力衰减一般采用同一级位移下第 i 次循环的最大荷载与第 1 次循环的最大荷载之比 F_i/F_1 表示。试验测得的各框架的 F_i/F_1 与 Δ/Δ_y (Δ 和 Δ_y 分别为框架整体的位移和屈服位移)的关系,如图 10 所示。由图可知,实腹式 SRC 异形柱框架的承载力衰减随着加载位移的增加而增加;当框架的位移在 $5\Delta_y$ 以内时,其承载力衰减较小, F_3/F_1 大于 0.8,但当框架的位移超过 $5\Delta_y$ 时,其承载力衰减迅速增加。



(a) SYBK



(b) SYZK

图 10 承载力衰减

Fig.10 Loading capacity degradation

4 结论

通过 2 榀实腹式 SRC 异形柱框架的低周反复加载试验,对其刚度和承载力进行分析,得出以下结论:

(1) 实腹式 SRC 异形柱框架的抗震性能好,破坏时梁先出铰,柱后出铰,符合“强柱弱梁”的抗震设计要求;

(2) 采用考虑 SRC 异形柱剪切变形及截面配钢的修正 D 值法对实腹式 SRC 异形柱框架的弹性层刚度进行计算,结果与试验结果符合较好;

(3) 刚度随层间位移角的增大及相同层间位移角时循环次数的增加而退化,退化速度由快到慢,呈现出较好的规律性;

(4) 采用柱底塑性铰法计算实腹式 SRC 异形柱框架的层间受剪承载力是可行的;

(5) 承载力衰减随加载位移的增加而增大,但在位移小于 $5\Delta_y$ 时,承载力衰减较小, $F_3/F_1 > 0.8$ 。

参考文献:

- [1] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 等. 反复荷载下型钢混凝土异形柱粘结滑移性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 211—218.
Ke Xiaojun, Chen Zongping, Xue Jianyang, et al. Study on bond slip behavior of SRC special-shaped columns under cyclic reversed loading [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 211—218. (in Chinese)
- [2] 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—61.
Chen Zongping, Xue Jianyang, Zhao Hongtie, et al. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 53—61. (in Chinese)
- [3] Cheng-Tzu Thomas Hsu. T-shaped reinforced concrete members under biaxial bending and axial compression [J]. ACI Structural Journal, 1989, 120(4): 453—467.

(参考文献[4]—[12]转第 107 页)

- static behavior of reinforced concrete composite T-beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 1—7. (in Chinese)
- [11] 薛伟辰, 杨新磊, 王蕴, 窦祖融. 现浇柱叠合梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(12): 9—17.
Xue Weichen, Yang Xinlei, Wang Yun, Dou Zurong. Experimental study on seismic behavior of different location frame connections with composite beams and cast-in-place columns [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(12): 9—17. (in Chinese)
- [12] 杨新磊, 薛伟辰, 王蕴, 窦祖融. 六层两跨现浇柱预制梁框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 25—32.
Yang Xinlei, Xue Weichen, Wang Yun, Dou Zurong. Experimental study on seismic behavior of six-story two-bay frame with precast beams and cast-in-place columns [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(6): 25—32. (in Chinese)
- [13] Inel M, Ozmen H B, Bilgin H. Re-evaluation of building damage during recent earthquakes in Turkey [J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 421—427.
- [14] Doğangün A. Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey [J]. Engineering Structures, 2004, 26(6): 841—856.
- [15] MacRae G A, Kimura Y, Roeder C W. Effect of column stiffness on braced frame seismic behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 381—391.

(上接第 92 页)

- [4] 黄承奎, 曲福来, 徐士弢. 钢筋混凝土不等肢异形柱抗剪承载力研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 197—201.
Huang Chengkui, Qu Fulai, Xu Shitao. Shear resistance study on specially shaped RC columns with different limb lengths [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 197—201. (in Chinese)
- [5] 薛建阳, 刘义, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 69—77.
Xue Jianyang, Liu Yi, Zhao Hongtie, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped column-beam joints [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 69—77. (in Chinese)
- [6] 向平. 钢骨混凝土异形柱钢筋混凝土梁节点低周反复荷载试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
Xiang Ping. Experimental research on joints of steel reinforced concrete special-shaped column and reinforced concrete beam under double-direction low-cyclic reversed loading [D]. Nanning: Guang Xi University, 2006. (in Chinese)
- [7] 杨涛, 张喜德. T 形截面钢骨混凝土异形柱框架抗震性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 33—37.
Yang Tao, Zhang Xide. Research on seismic behavior of frame with T-shaped SRC columns [J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2009, 31(2): 33—37. (in Chinese)
- [8] 高亮. 空腹式配钢的型钢混凝土异形柱中框架抗震性能及有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
Gao Liang. Experimental study and finite element analysis on seismic behavior of lattice steel reinforced concrete middle frame with special-shaped columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 肖建庄, 黄珏, 张建荣, 等. 高性能混凝土异形柱边框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 19—25.
Xiao Jianzhuang, Huang Jue, Zhang Jianrong, et al. Experimental study on seismic behavior of HPC side frame structure with specially-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 19—25. (in Chinese)
- [10] 魏琰, 李德虎. 钢筋砼框架层屈服抗剪强度的计算方法[J]. 建筑结构, 1987, 17(6): 1—6.
Wei Lian, Li Dehu. Computed method of field shear strength for RC frame [J]. Building Structure, 1987, 17(6): 1—6. (in Chinese)
- [11] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 2010.
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. 2010. (in Chinese)
- [12] 陈宗平. 型钢混凝土异形柱的基本力学行为及抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
Chen Zongping. Study on basic mechanical behavior and seismic performance of steel reinforced concrete special-shaped columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)