

文章编号: 1673-9469(2019)03-0001-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.001

双向加载情况下工字形 SRC 柱抗震性能数值分析

吴平川^{1, 2}, 付青青¹, 申彦利^{1, 2}, 习旺³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省装配式结构工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038; 张家口公路施工管理处, 河北 张家口 075000)

摘要: 为了研究工字形 SRC 柱在双向水平加载下的抗震性能, 采用纤维模型对已有试验进行数值模拟, 验证了纤维模型的适用性。基于此模型, 考察了轴压比、配钢率、型钢强度等参数对工字形 SRC 柱在双向水平加载下的承载力、耗能及延性的影响, 并与单向水平加载下的情况进行了对比。结果表明: 轴压比对工字形 SRC 柱的抗震性能影响显著, 随着轴压比的增大, 柱子承载力先增大后减小, 而滞回耗能和延性则随轴压比的增大逐步降低; 配钢率对工字形 SRC 柱的抗震性能有一定影响, 随配钢率的增大, 柱的承载力、耗能及延性均有明显增长; 承载力、耗能及延性均随型钢强度的增加而得到一定改善, 但增幅较小。此外, 双向加载下 SRC 柱的承载力、耗能及延性均较单向水平加载的低。

关键词: 工字形 SRC 柱; 纤维模型; 双向水平加载; 数值模拟; 抗震性能

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Numerical Simulation Analysis of Seismic Performance of H-shaped SRC Column under Bidirectional Loading

WU Pingchuan^{1, 2}, FU Qingqing¹, SHEN Yanli^{1, 2}, XI Wang³

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038; 2. Technology Innovation Center for Prefabricated Construction of Hebei, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038; 3. Zhangjiakou Highway Administration Office, Hebei Zhangjiakou, 075000)

Abstract: In order to study the seismic performance of H-shaped SRC column under bidirectional horizontal loading, the fiber model is used to simulate the existing tests, and the simulation results applicability the correctness of the model. Based on this model, the effects of axial compression ratio, steel ratio and steel strength on the bearing capacity, energy dissipation and ductility of H-shaped SRC column under bidirectional horizontal loading are investigated, and compared with those under unidirectional horizontal loading. The results show that the axial compression ratio has a significant influence on the seismic performance of H-shaped SRC column. As the axial compression ratio increases, the bearing capacity of the column first increases and then decreases, while the energy dissipation and ductility gradually decrease with the increase of the axial compression ratio; The steel ratio has a certain influence on the seismic performance of H-shaped SRC column, and the The bearing capacity, energy dissipation and ductility of the column increase obviously with the increase of the steel ratio; The bearing capacity, energy dissipation and ductility are all improved slightly with the increase of steel strength. In addition, the bearing capacity, energy dissipation and ductility of the SRC column under bidirectional loading are lower than those under unidirectional horizontal loading.

Key words: H-shaped SRC column; fiber model; bidirectional horizontal loading; numerical simulation; seismic performance

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51378169)

作者简介: 吴平川 (1979-), 男, 河北曲周人, 博士, 副教授, 主要从事结构抗震方面的研究。

研究证实,地面运动与结构地震反应都是多维的,因此在结构体系的设计应用时往往需要考虑多维层次下的地震作用。例如角柱在双向水平作用下的抗震性能将严重降低^[1],表明仅考虑单向加载形式,而忽略双向弹塑性效应,会与实际不符^[2]。为此,国内外学者相继开展了双向加载情况下结构的抗震性能研究。试验研究方面,国内学者邱法维^[3]研究了 RC 柱在双向不同加载路径下的破坏特点,比较了 RC 柱在不同的双向加载路径下的累积滞回耗能和损伤情况。李宏男^[4]进行了不同轴压比下单、双向循环加载下 RC 柱的拟静力试验,表明双向循环加载下柱的水平峰值荷载及延性有较大降低。江见鲸^[5]对不同轴压比 RC 柱进行了不同加载路径下的拟静力试验研究,结果表明,加载路径对柱的承载力和延性有明显影响,柱内存在明显的双轴耦合作用。李忠献^[6]对 RC 短柱在低周往复荷载作用下的抗震性能试验研究表明,双向加载降低了试件的延性和承载力,但使得试件累积滞回耗能显著增加。数值模拟方面,杜宏彪等^[7-8]通过试验建立了 RC 柱构件斜方向的截面恢复力模型和纵筋粘结滑移恢复力模型。吕大刚^[9]采用 OPENSEES 纤维模型讨论了轴压比等参数对 RC 柱抗震性能的影响规律。曲博闻^[10]采用有限元模拟分析研究了不同加载路径、轴压比等对 RC 柱的受力机理以及承载力和极限位移等指标变化规律的影响。国外方面, Komada^[11]对型钢混凝土柱(以下简称 SRC 柱)在 2 个方向作用下的弹塑性性状进行了研究。结论表明:在双轴加载下,工字形 SRC 柱要早于十字形 SRC 柱达到屈服承载力与极限承载力。Uehara^[12]通过 4 根 SRC 柱研究了配钢形状对其在单、双向加载下的影响,结果表明,内配十字型 SRC 柱在双向加载下的耗能能力较内配工字型 SRC 柱的强。

综上,国内外已经对钢筋混凝土柱在双向水平加载下的抗震性能进行了充分的研究,但对双向加载作用下工字形 SRC 柱抗震性能的研究还很不充分,特别是国内方面更少,因此有必要对双向水平加载作用下的 SRC 柱做进一步研究。为此,本文采用纤维模型对国外已有内配工字形截面 SRC 柱在双向加载下的抗震性能进行了模拟,模拟结果验证了模型的正确性。基于此模型,考察了轴压比、配钢率、型钢强度等参数对 SRC 柱在双向水平加载下的承载力、耗能及延性方面的影响,并与单向水平加载下的情况进行了对比。

1 基于纤维模型的已有试验的数值模拟

本文采用 SeismoStruct 软件对文献 [11] 和文献 [12] 中的 SRC 柱在单、双向水平加载下的几种工况进行了模拟,截面尺寸见图 1,其它材料、配筋等参数见文献 [11] 和文献 [12]。

1.1 纤维模型

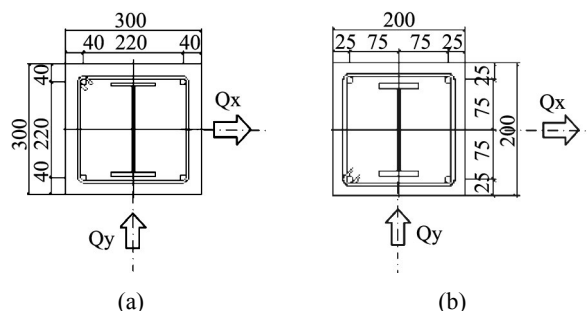


图 1 截面尺寸及配筋(单位: mm)

Fig.1 Cross-section size and reinforcement(unit: mm)

混凝土采用 Mander^[13]等人提出的混凝土单轴非线性约束模型,型钢和钢筋均采 Menegotto-Pinto 模型^[14],不考虑型钢混凝土之间的滑移。

纤维模型单元采用柔度力法单元,在单元截面上分为 5 个积分点,并划分成 300 个纤维。然后对模型施加荷载和约束,柱底端采用固定端约束,加载方式是在柱顶施加轴向荷载并保持不变,然后在柱顶 x 、 y 方向施加位移时程。通过所建模型可以得出在不同加载路径下柱的荷载-位移滞回曲线,所建模型及加载历程如图 2。

1.2 模拟结果与试验结果对比

图 3 为文献 [11] 和文献 [12] 在单、双向往复加载下试件柱底剪力-位移角滞回曲线的模拟结果与试验结果对比图。

从图 3 可以得出:模拟的滞回曲线与试验曲线吻合较好。试件 HAO、HBO、HA4、HB4 的最大承载力分别与试验的承载力相差 9%、7.5%、2%、3%,误差都在 10% 以下,延性分别相差 6.1%、5%、3.2%、1.5%,误差相差不大,构件的滞回耗能相差 13.1%、11%、9.1%、8.4%,总体而言,利用纤维模型能较好地模拟工字形 SRC 柱双向加载的滞回受力特性。

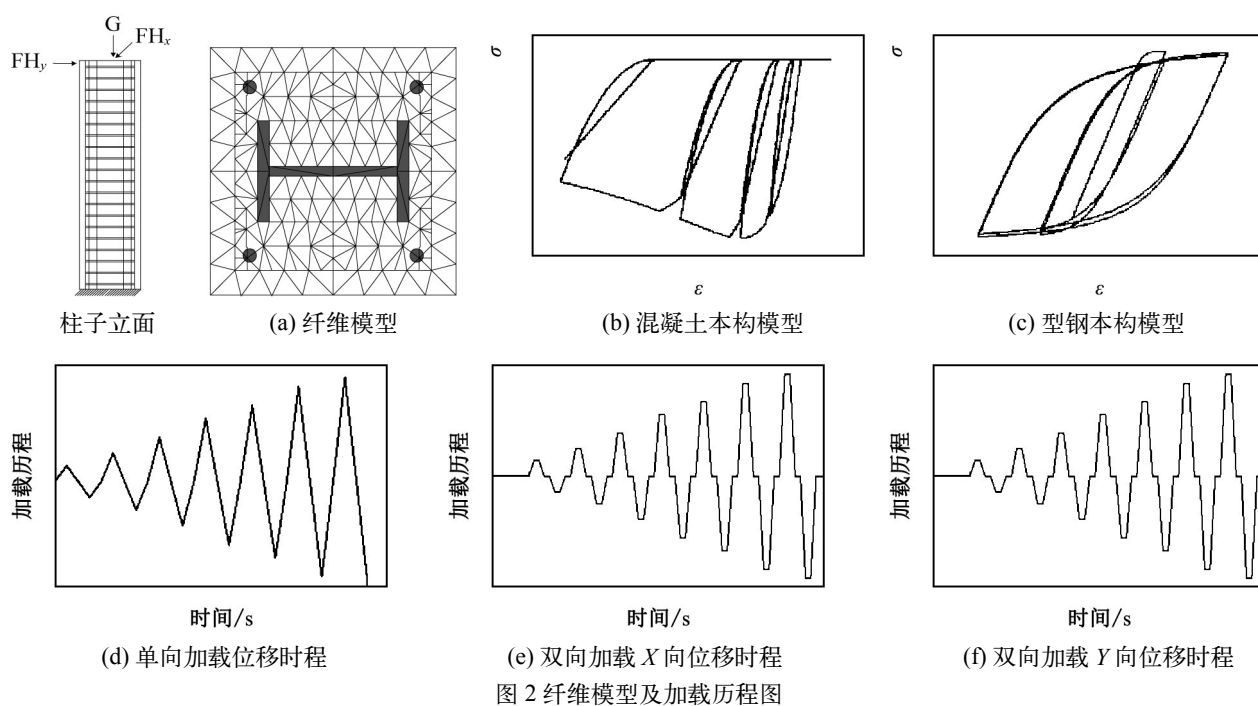
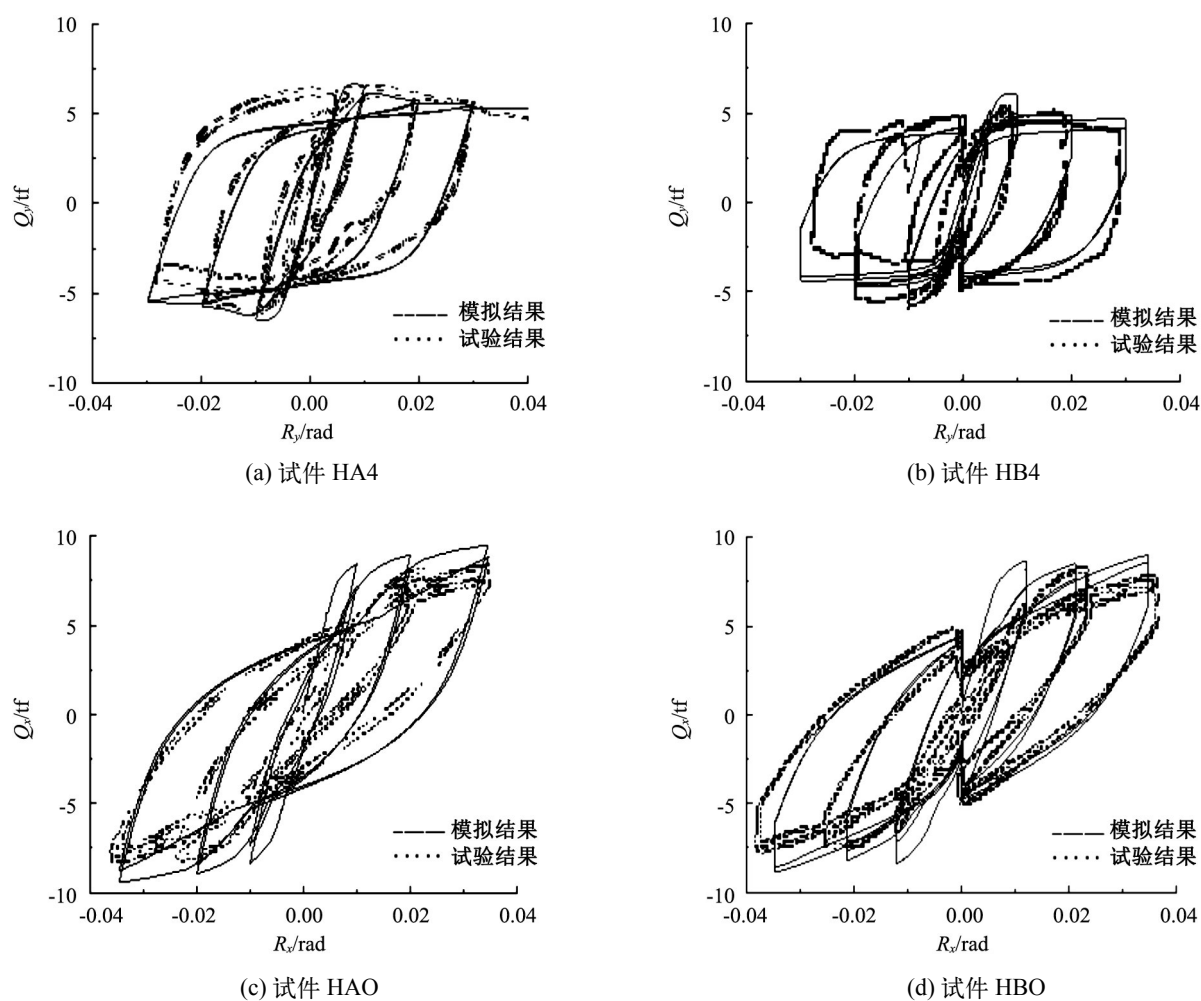
图2 纤维模型及加载历程图
Fig.2 finite model diagram and loading scheme

图3 试验结果与模拟结果的对比

Fig.3 Comparison between test results and simulation results

2 工字形 SRC 柱在单、双向水平作用下模型参数分析

基于纤维模型能有效地模拟工字形 SRC 柱在双向水平作用下的抗震性能,采用该模型分析了单、

双向加载下,轴压比、配钢率及型钢强度对工字形 SRC 柱承载力、耗能及延性的影响。柱子的截面尺寸、配筋(图 4(a)),加载路径采用了“一”字型和“八”字型的型式,两种加载路径见图 4(a)和图 4(b),柱的设计参数如表 1,钢材材料参数见表 2。

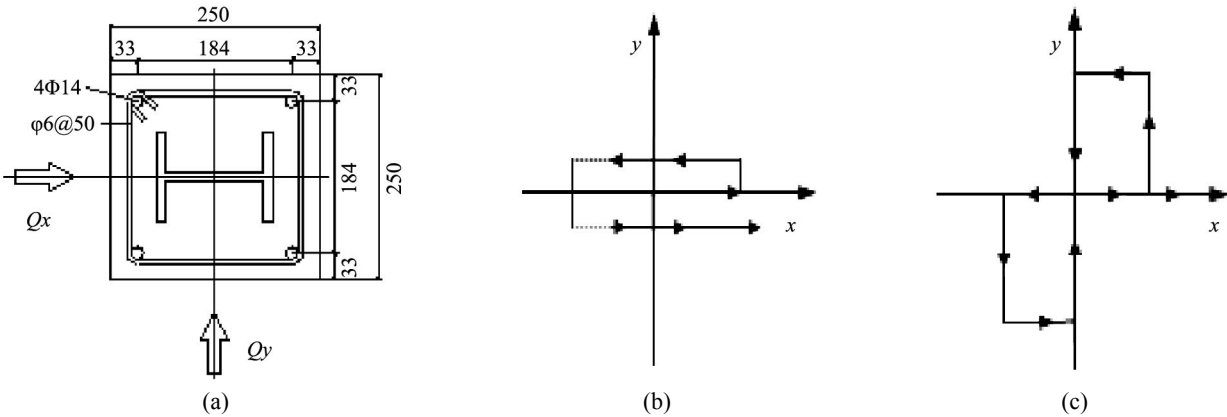


图 4 工字形 SRC 柱的截面尺寸、配筋及加载路径 (单位: mm)

Fig.4 Cross-section size, reinforcement and loading path of H-shaped SRC column(unit: mm)

表 1 柱的设计参数

Tab.1 Design parameters of column

柱截面尺寸 $b \times h/(\text{mm} \times \text{mm})$	柱高 H/mm	轴压比	配钢率 /%	型钢 强度等级	混凝土 强度等级	纵筋 配置	箍筋 配置
250 × 250	1 000	0 ~ 0.6	6	Q235	C30	4B14	A6@50
250 × 250	1 000	0.3	4 ~ 8	Q235	C30	4B14	A6@50
250 × 250	1 000	0.3	6	Q235、Q345、Q390、Q420	C30	4B14	A6@50

表 2 钢筋及钢材的材料参数

Tab.2 Material parameters of rebar and steel

钢材	型号	屈服强度 /MPa	弹性模量 /MPa
型钢	Q235	235	2.1×10^5
	Q345	345	2.1×10^5
	Q390	390	2.1×10^5
	Q420	420	2.1×10^5
纵筋	HRB335	355.5	2.0×10^5

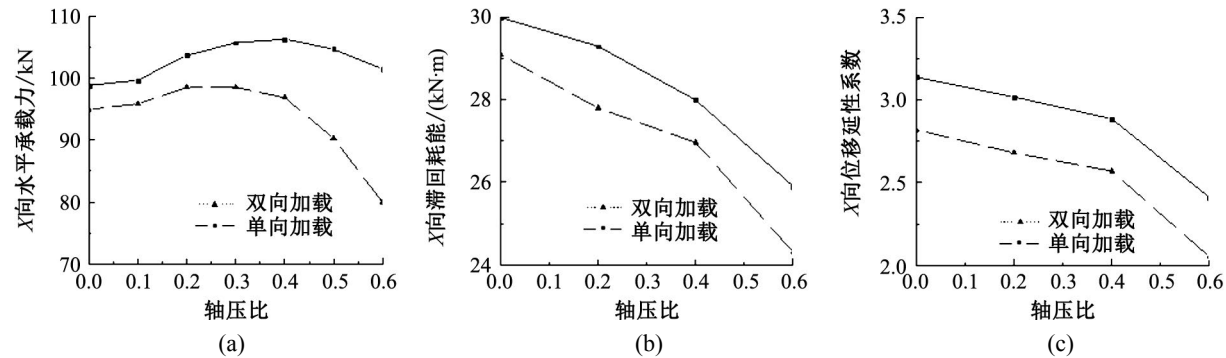


图 5 轴压比对工字形 SRC 柱在 X 方向抗震性能的影响曲线

Fig.5 The influence curve of the axial compression ratio on the seismic performance of the internally H-shaped SRC column in the X direction

2.1 轴压比的影响

图 5 描述了在单、双向水平加载下轴压比对工字形 SRC 柱 X 方向抗震性能的影响。

由图 5 可以看出,无论是单向加载还是双向加载, X 方向上的承载力随轴压比变化趋势基本一致。当轴压比约为 0.3 时,达到最大,后期承载力开始下降,且在双向加载下承载力下降的幅度较单向加载的大;在两种加载方式下,滞回耗能均随轴压比的增大而减小,且双向加载情况下,滞回耗能较单向低;柱的延性均随轴压比的增大而降低,且在轴压比约为 0.3 ~ 0.5 时,下降的幅度缓慢,但轴压比大于 0.5 ~ 0.6 后,延性降幅增加。原因在于,轴压比增大,破坏由延性破坏逐渐变为脆性破坏,导致柱体延性降幅增加。结合图 5 可看出,工字形 SRC 柱的抗震性能总体均随轴压比的增大,向不利方向发展;此外,双向加载下的工字形 SRC 柱所对应的 X 方向水平承载力、滞回耗能及延性均比单向加载低。

2.2 配钢率的影响

图 6 为单、双向水平加载下配钢率对工字形 SRC 柱在 X 方向抗震性能的影响。

由图 6 可知,在两种加载路径下,内配工字形 SRC 柱在 X 方向承载力均随配钢率的增大而增加,且两者增长的趋势是一致的,但双向加载路径下的 X 方向承载力低于单向加载;配钢率对柱子 X 方向滞回耗能有一定影响,随配钢率的增大,滞回耗能均显著增加;配钢率明显对 SRC 柱延性有明显影响,配钢率增大,两种加载方式下柱子的延性均呈上升趋势,但增幅不同,在配钢率为 5% ~ 7% 时,延性增幅最大。此外,双向加载下柱的延性系数较单向加载低。

2.3 型钢强度的影响

图 7 描述了单、双向水平加载下型钢强度对工字形 SRC 柱在 X 方向抗震性能的影响。

由图 7 可以看出,随型钢强度的增大,无论是单向还是双向,柱子水平抗震承载力、耗能能力及延性也随之增强,其中 Q420 比 Q235 柱子在 X 方向的承载力分别增加了 27.5%、17.1%,由此可见,提高型钢强度可较为明显地改善内配工字型柱的抗震性能,但耦合作用使得双向加载下 X 方向抗震承载力、耗能能力及延性均较单向加载小。

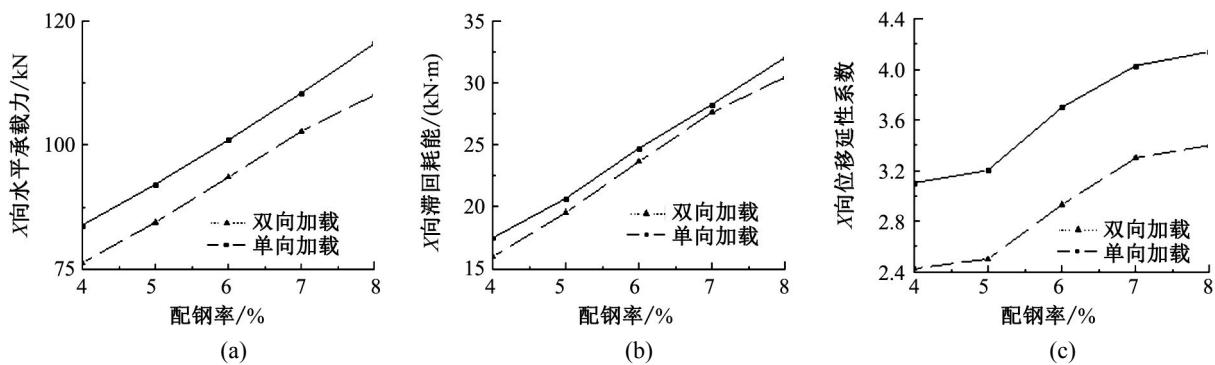


图 6 配钢率对工字形 SRC 柱在 X 方向抗震性能的影响曲线

Fig.6 The influence curve of steel ratio on the seismic performance of the H-shaped SRC column in the X direction

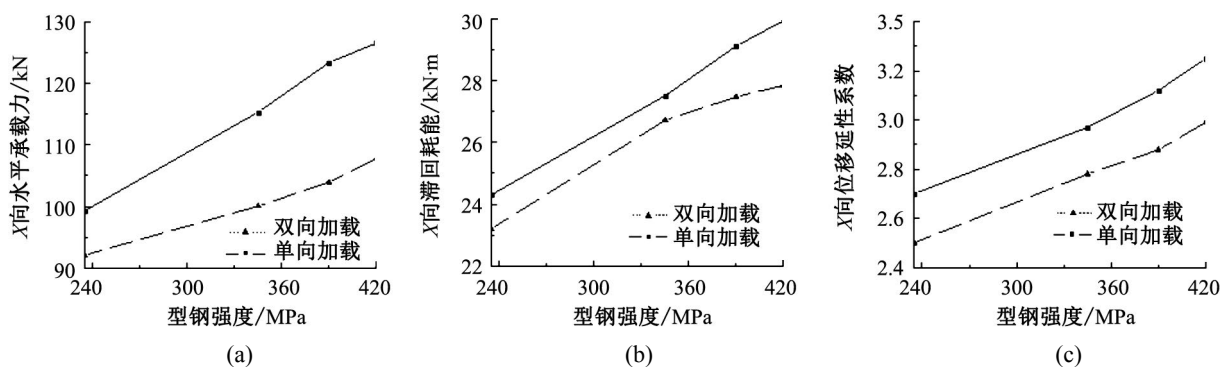


图 7 型钢强度对工字形 SRC 柱在 X 方向抗震性能的影响曲线

Fig.7 The influence curve of steel strength on the seismic performance of H-shaped SRC column in the X direction

3 结论

1) 轴压比对工字形 SRC 柱的抗震性能影响显著,随着轴压比的增大,柱子承载力先增大后减小,特别在大轴压比作用下,双向加载的承载力下降较为明显,而滞回耗能和柱体延性则随轴压比的增大逐步降低。

2) 配钢率对工字形 SRC 柱的抗震性能有一定影响,提高配钢率可在一定程度上改善工字形 SRC 柱的抗震性能。随配钢率的增大,柱体延性、承载力及耗能均有明显增长,其中配钢率对柱体延性的影响较承载力、耗能更为明显。

3) 随着型钢强度的增加,内配工字形 SRC 柱的抗震承载力、耗能及延性均得到明显改善。

4) 双向水平加载下 SRC 柱的承载力、耗能及延性均较单向水平加载的低,仅考虑单向作用,明显高估工字型 SRC 柱的承载能力、耗能能力及延性。在抗震设计中应考虑这一因素。

参考文献:

- [1] SHEPHERD R, PLUNKETT A W. Damage Analyses of Imperial Country Services Building[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1983, 109(7): 1711-1726.
- [2] RODRIGUES H, AREDE A, VARUM H, et al. Experimental Evaluation of Rectangular Reinforced Concrete Column Behavior Under Biaxial Cyclic Loading[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2013, 42(2): 239-259.
- [3] 邱法维, 李文峰, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土柱的双向拟静力实验研究[J]. 建筑结构学报, 2001(5): 26-31.
- [4] 李宏男, 王强, 李兵. 钢筋混凝土框架柱多维恢复力特性的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002(5): 728-732.
- [5] 康洪震, 江见鲸. 不同加载路径下钢筋混凝土框架柱抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2003(5): 71-75.
- [6] 李忠献, 尉迪, 高营. 不同加载路径 RC 短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(2): 55-59.
- [7] 杜宏彪. 双向压弯钢筋混凝土的抗震性能[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(4): 47-52.
- [8] 王海波, 陈伯望, 沈蒲生. 双向压弯钢筋混凝土柱的非线性分析[J]. 计算力学学报, 2006(4): 502-507.
- [9] 吕大刚, 李雁军, 王震宇. 双向水平加载下钢筋混凝土柱抗震性能的数值模拟[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(2): 414-419.
- [10] 曲博闻. 水平双向加载下钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [11] KOMADA Katsutoshi. Elasto-Plastic Behavior of Composite Members under Biaxial Bending Part 1 Object of Research, Test Results[J]. Architectural Institute of Japan, 1991(21648): 1709-1710.
- [12] UEHARA Hiroshi. Influence of the shapes of encased steel sections on biaxial flexural behaviors of composite columns[J]. Architectural Institute of Japan, 1993(21765): 1683-1684.
- [13] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [14] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending[C]//Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures, LISBON, 1973: 15-22.

(责任编辑 王利君)