

文章编号: 1000-4750(2015)02-0105-09

型钢混凝土异形柱-钢梁空间边节点的 抗震性能及影响因素分析

陈宗平^{1,2}, 徐金俊¹, 薛建阳²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西, 南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西, 南宁 530004)

摘 要: 为了研究型钢混凝土异形柱-钢梁空间边节点的抗震性能, 以配钢形式、加载角度和轴压比为变化参数, 通过1个平面节点和9个空间节点的拟静力试验, 获取其滞回关系, 并在此基础上探讨了该类新型空间节点的抗震行为。研究表明: 实腹式配钢试件在骨架曲线的上升段为最陡, 承载能力最大, 刚度退化最轻, 但T形钢桁架试件在耗能能力和延性性能上为最优; 该类空间节点的抗震性能在不同加载角度下具有一些区别, 45°试件的骨架曲线包围了其余加载角度下的骨架曲线, 同时该角度的节点抗剪承载力为最大, 耗能能力较之0°和60°的更强, 但略比30°的低, 而位移延性在平面节点上表现为最佳; 提高轴压比可增强型钢混凝土异形柱边节点的受剪承载力和耗能能力, 同时轴压比的增大对试件的初期刚度较为有利而后期刚度退化较快。

关键词: 型钢混凝土异形柱; 空间节点; 边节点; 抗震性能; 影响因素

中图分类号: TU398.9; TU317.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0744

SEISMIC BEHAVIOR AND INFLUENCE FACTOR ANALYSIS ON 3D SIDE JOINTS COMPOSED OF STEEL REINFORCED CONCRETE SPECIAL-SHAPED COLUMNS AND STEEL BEAMS

CHEN Zong-ping^{1,2}, XU Jin-jun¹, XUE Jian-yang²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Chinese Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: In order to research the influence relationship between the mechanical behavior under an earthquake action and a steel form, the loading angle, axial compression ratio, one plane side joint and nine space side joints composed of SRC special-shaped columns and steel beams were tested under low frequency cyclic loading. The hysteretic relationships between load and displacement were obtained. Based on these, the aseismic behavior of space joints was discussed. The results show that there are steepest skeleton curves, largest bearing capacity, and lightest stiffness degradation for specimens with solid-web steel. However, the specimens with T-shaped steel form are the optimal in energy dissipation capacity and ductility performance. There are some of the differences in aseismic behaviors of these space joints under different loading angles. The skeleton curves under the rest of loading angles are surrounded by those curves under the loading angle of 45 degrees. The shear capacity under 45degrees is the largest and its energy dissipating capacity is stronger than those under 0 degree and 60 degrees, but lower than that under 30 degrees. The displacement ductility of a plane joint is the best. With the increase of

收稿日期: 2013-08-14; 修改日期: 2013-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908057, 51268004); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放课题项目(2012ZDX10); 广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2012005)

通讯作者: 陈宗平(1975—), 男, 广西玉林人, 教授, 工学博士, 博导, 主要从事再生混凝土结构、钢-混凝土组合结构、异形柱结构体系等研究(E-mail: zpchen@gxu.edu.cn).

作者简介: 徐金俊(1986—), 男, 浙江绍兴人, 博士生, 主要从事异形柱结构和再生混凝土结构的研究(E-mail: jjxu_concrete@163.com); 薛建阳(1970—), 男, 河南洛阳人, 教授, 工学博士, 博导, 主要从事钢-混凝土组合结构、古建筑结构的抗震等研究(E-mail: jianyang_xue@163.com).

axial compression ratios, the shear bearing capacity and energy dissipation capacity of the SRC side joints of a special-shaped column frame can be enhanced and it is good for the initial stiffness but leads to be a phenomenon of a rapid late-stiffness degradation.

Key words: SRC special-shaped column; space joint; side joint; seismic behavior; influence factor

型钢混凝土异形柱(SRC special-shaped column 简称 SRCSSC)结构一方面秉承了异形柱结构的优势, 另一方面又因其内置的型钢可增强柱构件的承载性能、改善变形性能和延性指标, 克服了钢筋混凝土异形柱结构承载能力低、抗震性能不良的缺陷, 具有显著的优越性^[1-6]。节点作为框架结构的传力枢纽, 其性能的好坏直接影响框架的屈服机制^[7], 因此型钢混凝土异形柱框架节点也不例外。目前, 就该类节点的研究现状而言, 多以平面框架梁柱节点为侧重点进行试验和理论研究, 如万云芳^[8]对 3 个截面为 T 形的内置钢管和工字型钢混凝土异形柱-钢筋混凝土梁进行循环反复荷载试验; 又薛建阳等^[9]开展了 9 个中间层边节点、4 个中间层角节点和 4 个中间层中节点的抗震性能试验。上述研究均表明 SRC 异形柱框架平面节点的承载能力较好, 地震延性较之 RC 异形柱大大提高, 节点的变形能力和滞回性能得到改善。然而实际水平地震作用于结构时, 结构的地震反应具有二维双向性; 同时框架节点不仅联系着上下柱, 而且也维系了水平方向多个梁体, 因而真实的节点作为一个三维空间受力体而存在, 由此可知, 平面节点并不能完全反应其真实的受力状况。向平^[10]与文献[8]以同样的配钢形式完成了 4 个空间边节点的拟静力试验, 其所实现的双向加载方式为两个竖向作动器分别在 T 形柱腹板处的 RC 梁端和一个翼缘处的 RC 梁端进行加载, 而剩余一翼缘为无梁状态, 就实际结构来看, 该节点模型并非真正意义上的空间节点, 其受力模式也

不能真正反映边节点的地震响应。王妮等^[11]通过变换水平加载角度实现了十形 SRCSSC-钢梁(SB)空间节点的双向受力, 结果指出型钢混凝土异形柱空间节点的抗震性能指标良好。迄今为止, 型钢混凝土异形柱框架空间边节点在强震作用下的各项抗震性能指标尚不明确, 且各指标与相关影响参数之间的关系也处于空白, 这给型钢混凝土异形柱框架结构更为准确的工程设计与性能评估带来一定的困难, 因此开展这方面的研究显得尤为必要。

本文以柱截面配钢形式、加载角度和轴压比为主要影响因素, 通过正交设计法对 10 个 SRCSSC-SB 边节点试件进行拟静力试验, 包括 1 个平面节点与 9 个空间节点, 探讨了相关抗震性能指标与各影响因素之间的变化规律, 旨在为型钢混凝土异形柱结构的力学性能研究和工程设计提供科学参考。

1 试验简介

1.1 试件设计及加载方式

试件选取异形柱框架中间层边柱三维节点为研究对象, 考虑柱截面配钢形式、水平荷载与柱截面形心之间的夹角(即加载角度)以及轴压比为影响因素, 采用 1:2 的缩尺模型进行正交设计。上下柱反弯点之间距离为 1600mm, 三个方向梁的反弯点至柱肢端部的距离均为 900mm, 其型钢混凝土 T 形异形柱的截面配钢(筋)形式与焊接成型的钢梁截面尺寸见图 1, 各试件的设计参数见表 1。

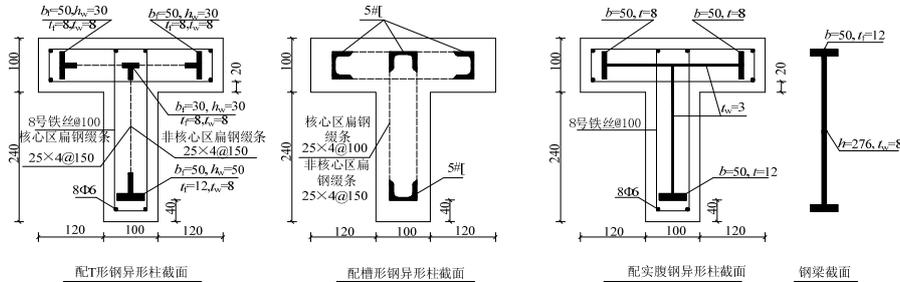


图 1 试件柱、梁截面几何尺寸及配钢(筋)形式

Fig.1 Cross-section physical dimensions and steel forms of column and beam

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	配钢形式	$\theta/(^\circ)$	n	$\rho_{ss}/(\%)$	$\rho_s/(\%)$	$\rho_{sw}/(\%)$				$\rho_{sv}/(\%)$
						JCY	JCY	CX	CY	
TJ-1	槽钢	0	0.5	4.78	0	0.95	1.18	0.63	0.79	0
TJ-2	槽钢	30	0.3	4.78	0	0.95	1.18	0.63	0.79	0
TJ-3	实腹式	30	0.3	4.90	0.39	0	0	0	0	0.31
TJ-4	T形钢	30	0.3	4.26	0.39	0.50	0.51	0.33	0.34	0.31
TJ-5	T形钢	45	0.5	4.26	0.39	0.50	0.51	0.33	0.34	0.31
TJ-6	T形钢	45	0.3	4.26	0.39	0.50	0.51	0.33	0.34	0.31
TJ-7	槽钢	45	0.3	4.78	0	0.95	1.18	0.63	0.79	0
TJ-8	槽钢	45	0.5	4.78	0	0.95	1.18	0.63	0.79	0
TJ-9	实腹式	45	0.3	4.90	0.39	0	0	0	0	0.31
TJ-10	T形钢	60	0.5	4.26	0.39	0.50	0.51	0.33	0.34	0.31

注：JCY(Y)为水平腹杆在节点核心区 X 或 Y 方向柱肢的体积含钢率；CX(Y)为水平腹杆在非节点核心区(也即柱)X 或 Y 方向柱肢的体积含钢率； θ 为加载角度； $n=N/f_c A$ 为轴压比； ρ_{ss} 为纵向型钢含钢率； ρ_s 为纵向配筋率； ρ_{sw} 为水平腹杆体积含钢率； ρ_{sv} 为横向体积配箍率。

为了准确模拟节点在实际地震作用下的受力性能，并能反映其P-Δ效应，采用柱端加载的方式进行试验。试验通过试件柱截面工程轴与水平荷载之间的夹角变化予以实现地震波沿不同方向作用于框架节点，试件的加载概况见图2。



图2 加载概况

Fig.2 Summary of loading

试验采用荷载-位移双控加载制度进行空间节点的加载，首先通过液压千斤顶施加柱顶轴压力并保持恒定不变，水平加载分为荷载控制和位移控制两个阶段。荷载控制阶段以5kN作为荷载步长，每级循环加载一周；型钢达到屈服后转入位移控制阶段，以屈服位移为位移增量，每级位移循环三次，直到荷载下降到极限值的85%后，试验结束。

1.2 滞回曲线

通过试验采集系统获取柱顶水平荷载P和水平位移Δ，所得荷载-位移滞回曲线如图3所示。

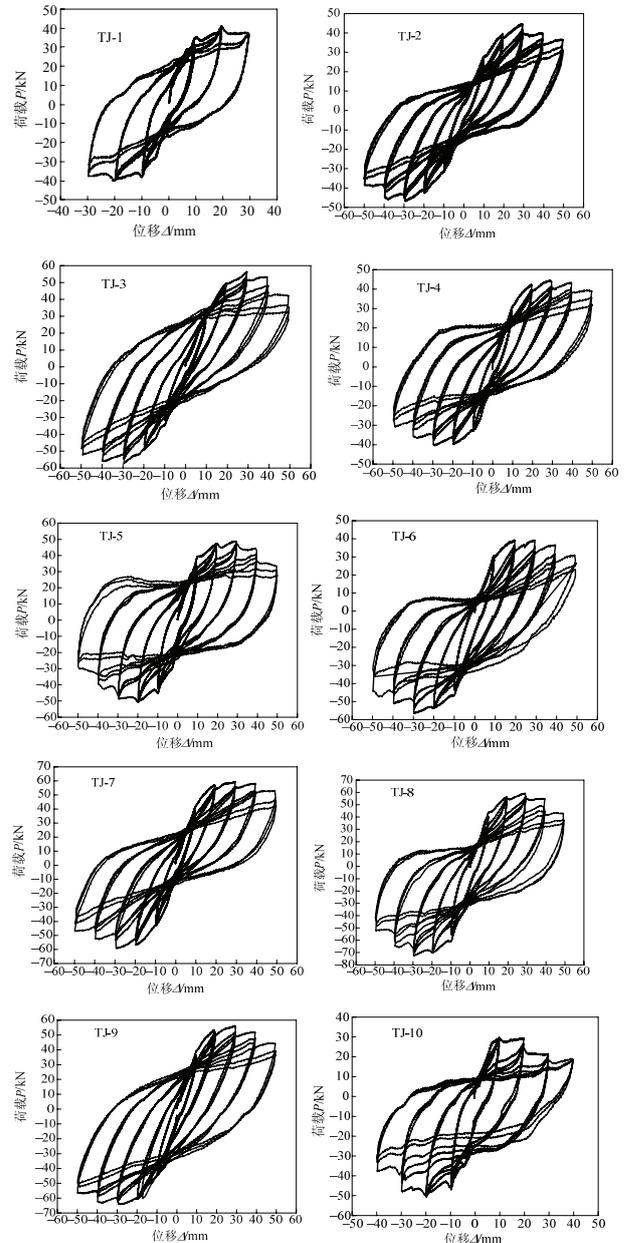


图3 试件的滞回曲线

Fig.3 Hysteretic curves of specimens

2 抗震性能指标及影响因素分析

试验影响因素分析可以找出各因素对试验结果的影响程度。为了深入了解配钢形式、加载角度和轴压比对型钢混凝土异形柱-钢梁空间边节点抗震性能的影响，基于实测滞回曲线，以下分别从试件的骨架曲线、极限承载力、刚度退化、耗能能力和延性系数方面予以研究探讨。

2.1 配钢形式的影响

SRC 异形柱截面配钢形式是影响该类节点承载能力和抗震性能的一个关键因素, 图 4 为配钢

形式对 SRCSSC-SB 边节点抗震性能指标的影响。归纳各指标受柱截面配钢形式的影响, 得到如下规律:

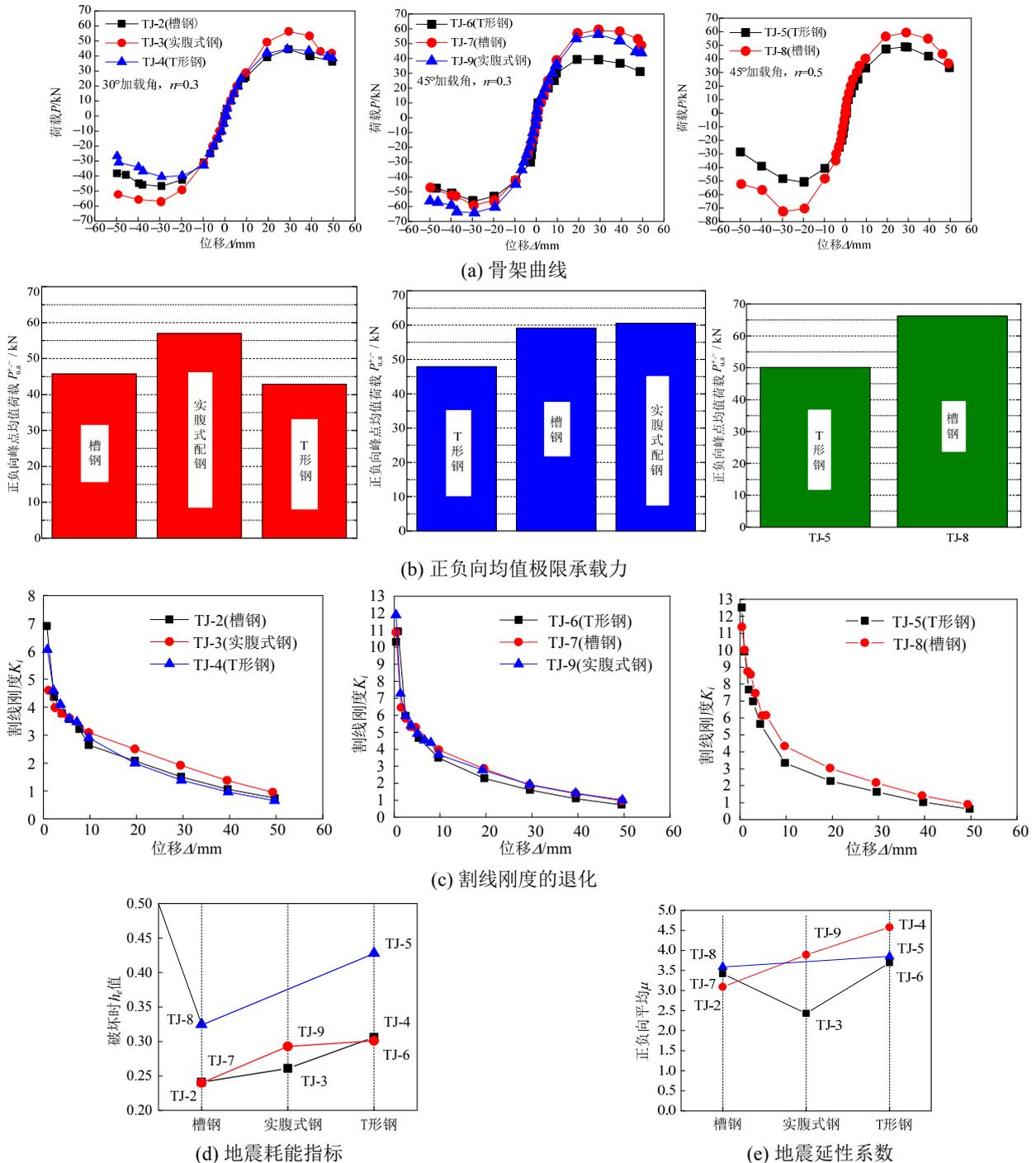


图 4 配钢形式对 SRCSSC-SB 节点抗震性能指标的影响

Fig.4 Influence of steel form on seismic performance indexes of SRCSSC-SB joints

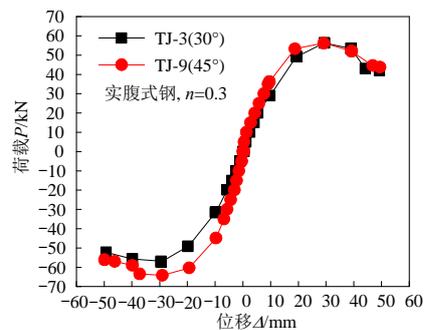
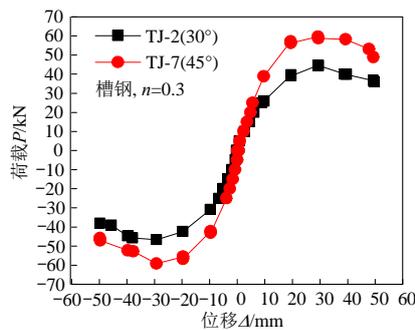
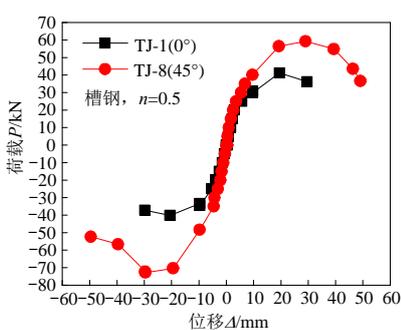
1) 图 4(a)为在相同加载角度、同一轴压比下试件的骨架曲线随三种截面配钢形式的变化情况。由图可知, 初始时刻的骨架曲线相互重合且线性状态明显, 配钢形式对该阶段的性能影响不大。此时由于荷载水平较低, 在试件开裂前节点

核心区处于弹性工作状态, 试件抵抗水平荷载以节点区的混凝土抗剪为主, 钢材发挥的抗剪作用较少; 但进入弹塑性状态后, 配钢形式对其骨架曲线的影响颇大, 总体而言, 实腹式配钢试件的骨架曲线更陡, 其次为槽钢桁架试件, 最后为配 T

形钢桁架试件。在节点核心混凝土开裂后, 出现上述骨架曲线不同发展走势的原因如下: 随着保护层混凝土逐渐破坏, 内置的型钢开始发挥主导抗剪作用, 因而配钢率越大则试件的抗剪能力越强。由表 1 可知, 实腹式配钢试件的柱截面配钢率为最大, 其次为槽钢桁架试件, 最小为 T 形钢桁架试件, 因此, 配钢率越大也即导致骨架曲线越陡。

2) 图 4(b)为在相同加载角度、同一轴压比下试件的极限承载力随三种截面配钢形式的变化情况, 图中 P_{ua}^{+-} /kN 表示试件的正负向极限承载力取均值后的代表值, 下同。由图可见, SRCSSC-SB 空间边节点的抗剪承载能力按柱截面配钢形式的不同可排列为: 实腹式配钢试件大于槽钢桁架试件, 配槽钢桁架试件的大于 T 形钢桁架试件。通过比较各组试验数值可知, TJ-3 试件的极限承载力是 TJ-2 的 1.25 倍, 并高于 TJ-4 试件的 33%; TJ-9 试件的极限承载能力较之 TJ-7 提高 2.29%, 比 TJ-6 试件的承载力提高 26.3%; TJ-8 试件的极限承载力则大致为 TJ-5 试件抗剪承载力的 1.32 倍。与前述骨架曲线的分析类似, 空间边节点的抗剪承载能力与柱截面配钢率具有很大的相关性, 若在一定范围内提高其配钢率, 则有利于型钢混凝土异形柱边节点抵抗水平荷载。然而通过分析柱截面配钢率与其截面配钢形式可知, 实腹式配钢试件的配钢率是槽钢桁架试件的 1.025 倍, 两者几乎接近, 同时又是 T 形钢桁架试件配钢率的 1.15 倍, 如此说明在配钢率相差不大的条件下, 实腹式配钢的异形柱-钢梁空间边节点拥有更好的抗剪承载能力。

3) 图 4(c)为在相同加载角度、同一轴压比下试件的割线刚度退化随三种截面配钢形式的变化, 其中 $K_i = (|+P_{ji}| + |-P_{ji}|) / (|\Delta_{ji}| + |-\Delta_{ji}|)$, P_{ji} 为第 j 次加载位移时第 i 次加载循环的峰值点荷载,



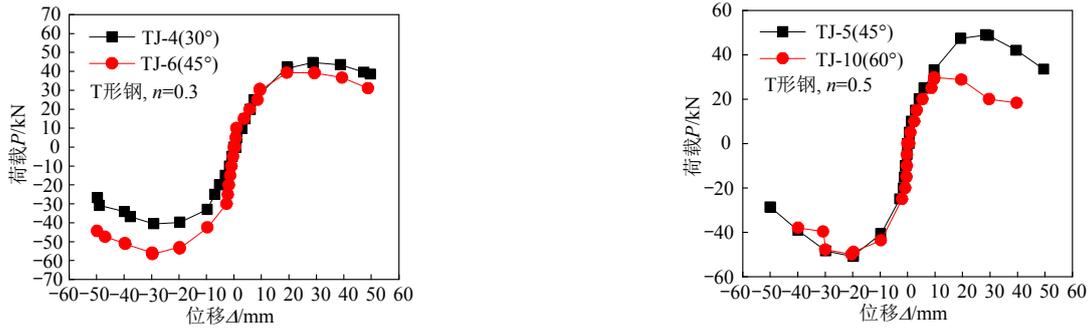
Δ_{ji} 为第 j 次加载位移时第 i 次加载循环的峰值点位移, 下同。就加载全过程而言, 同级位移下 T 形钢桁架试件的刚度退化比槽钢桁架试件的稍快, 而实腹式配钢试件的刚度退化为三种配钢形式中最好。

4) 图 4(d)为在相同加载角度、同一轴压比下试件破坏时的等效粘滞阻尼系数随三种截面配钢形式的变化。由图可见, 虽然 T 形钢桁架试件的柱截面配钢率为最小, 但同条件下其 h_e 值在三类配钢形式中为最大, 而实腹式配钢试件的耗能能力则介于 T 形钢桁架试件与槽钢桁架试件之间。究其原因在于 T 形钢桁架试件的截面配钢与配筋具有对混凝土较好的约束能力与嵌固作用, 其不仅拥有型钢骨架与内部混凝土的拉结效应, 更具有型钢骨架外围钢筋笼骨架的嵌套作用, 使得型钢的保护层混凝土破坏情况相对较轻, 因此, 混凝土的裂面效应使得骨料的摩擦耗能较大; 而槽钢桁架试件由于仅存在槽钢骨架对核心混凝土的约束, 其保护层混凝土一旦破坏后, 有效截面面积便很快减小, 比较而言, 则不利于地震能量的耗散。

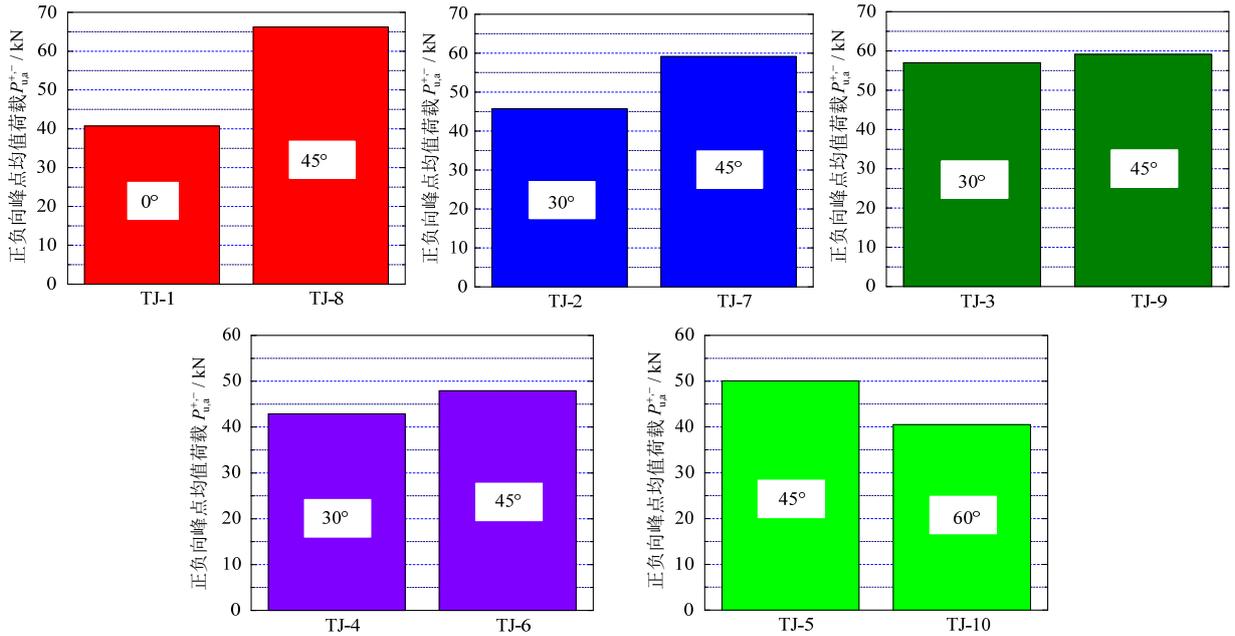
5) 图 4(e)为在相同加载角度、同一轴压比下试件的位移延性系数随三种截面配钢形式的变化。由图可见, 三类配钢形式试件的地震延性系数在很大程度上与前述地震能量耗散系数相似, 即 T 形钢桁架试件的位移延性系数为最优, 除 TJ-3 试件外, 槽钢桁架试件的 μ 值为最小。

2.2 加载角度的影响

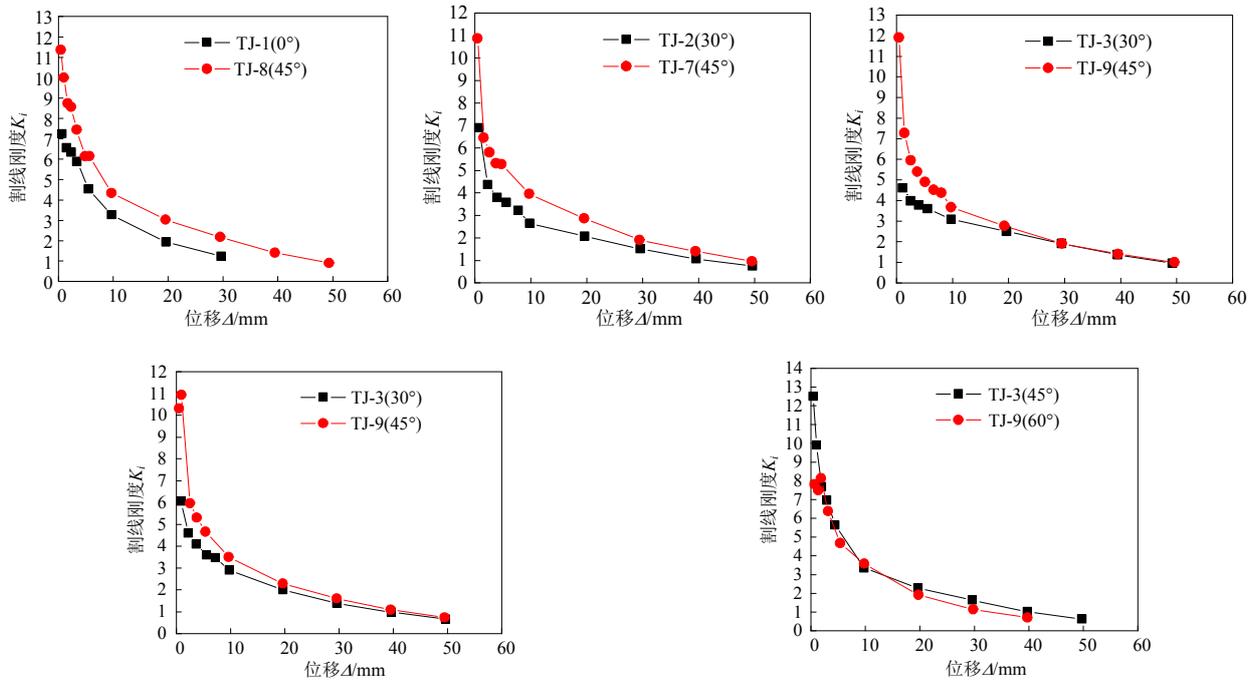
加载角度的变换是一种近似实现实际地震作用于型钢混凝土异形柱框架结构的模拟方式, 且能保证其节点的空间双向受力行为, 同时也是探讨 SRCSSC-SB 边节点抗震性能好坏的主控因素。图 5 所示为加载角度对 SRCSSC-SB 边节点各抗震性能指标的影响, 经比较分析后, 具有如下规律:



(a) 骨架曲线



(b) 正负向极限承载力均值



(c) 割线刚度的退化

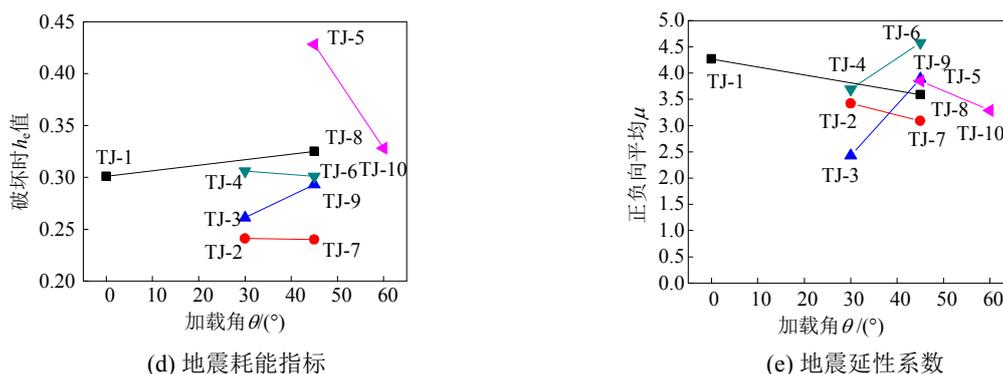


图 5 加载角度对 SRCSSC-SB 节点抗震性能指标的影响

Fig.5 Influence of loading angle on seismic performance indexes of SRCSSC-SB joints

1) 图 5(a)为在同类配钢形式、同一轴压比下试件的骨架曲线随加载角度变换的变化情况。从图中可见,在同一对比组下,除去曲线初始时刻具有相互重合外,45°加载角时的骨架曲线基本包围了 0°、30°和 60°加载角度下的骨架曲线,而且这种骨架曲线的囊括程度在平面节点上显得更加充分。

2) 图 5(b)为在同类配钢形式、同一轴压比下试件的极限承载能力随加载角度变换的变化情况。经各组试件的极限承载力比较,发现 45°角试件的 TJ-8 是平面节点的 1.63 倍,其余 45°加载时的空间节点承载力各自比 30°加载试件的抗剪承载力提高 29.34%、3.75%和 11.8%,同时也比 60°加载的空间节点大 23.66%。由此说明 SRC 异形柱空间边节点在双向受力中能够最大限度地发挥材料性能的加载角度为 45°地震作用,此时节点的抗剪承载力不比平面节点的差;同时也表明了在该类节点的抗震分析中,45°地震作用方向可作为 SRC 异形柱框架结构的主要验算方向。

3) 图 5(c)为在同类配钢形式、同一轴压比下试件的割线刚度退化随加载角度变换的变化规律。由图不难发现,0°加载的平面节点全过程刚度退化均比 45°试件的严重,而 30°角试件的初始刚度退化较之 45°荷载作用方向的严重,但随着位移幅值的提高,两者的刚度退化水平具有趋于一致的态势;对于 60°和 45°试件,在加载前期,前者的刚度退化亦较为明显,但在试件进入弹塑性发展阶段后,45°试件的刚度退化略好于 60°加载试件。

4) 图 5(d)为在同类配钢形式、同一轴压比下试件破坏时的等效粘滞阻尼系数随加载角度变换的变化规律。由图可见, SRCSSC-SB 边节点的等

效粘滞阻尼系数随加载角度的增加具有起伏变化的状况。然而就 45°的空间节点与平面节点对比来看,前者优于后者;对于 30°和 45°的对比组,即使 45°的 h_e 值较之 30°的小,但其减小幅度也不大;而对于 45°和 60°为一组时,45°试件的耗能能力远大于 60°加载的试件,其增幅为 30.49%。

5) 图 5(e)为在同类配钢形式、同一轴压比下试件位移延性系数随加载角度变换的变化规律。由图可见,平面节点地震延性比同组的空间节点要好。这与节点的破坏模式有关,平面节点的破坏以延性能良好的弯曲型破坏为主,而空间节点的破坏主要为延性较差的剪切斜压模式,相比之下,两者的延性差距就十分明显。总体来看,45°加载的试件延性比 30°加载时的略好,并且也优于 60°加载角的试件。这可能是由于在加载角度为 45°的情况下,节点核心区的受力比其余加载角时更为均匀并有利于材料性能的充分发挥所致。

2.3 轴压比的影响

节点可被视为柱子的一部分,而轴压比作为控制柱延性的重要指标,其必然对节点产生相关影响,研究合理的轴压比取值范围对型钢混凝土异形柱框架节点的抗震行为具有深远意义。图 6 表示轴压比对 SRCSSC-SB 边节点各抗震性能指标的影响,从中归纳后可找出如下规律:

1) 图 6(a)为在同类配钢形式、相同加载角度下试件的骨架曲线随轴压比增大的变化规律。由图可见,对于配 T 形钢桁架、加载角度为 45°的两试件,正向加载时高轴压比的 TJ-5 节点骨架曲线包围低轴压比的 TJ-6 节点骨架曲线,但反向加载时则相反;另一组配槽钢桁架且同为 45°加载角的两试件,正向的骨架曲线由较低轴压比试件囊括了较高轴压比试件,而反向时亦相反。可见,轴

压比对骨架曲线的整体影响不甚明显, 但对比各组曲线的下降段, 发现轴压比高的下降曲线略比轴

压比低的降幅大, 这表明随着轴压比的提高, SRC 异形柱框架空间边节点的变形能力有所降低。

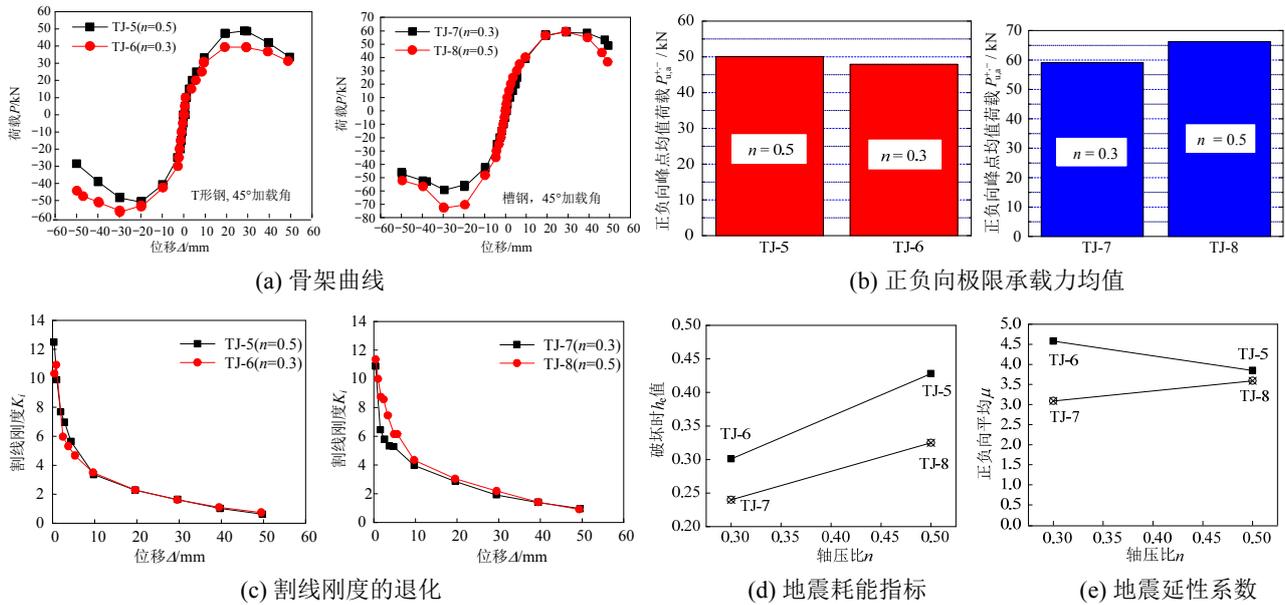


图6 轴压比对 SRCSSC-SB 节点抗震性能指标的影响

Fig.6 Influence of axial compression ratio on seismic performance indexes of SRCSSC-SB joints

2) 图 6(b)为在同类配钢形式、相同加载角度试件极限承载能力随轴压比增大的变化趋势。通过比较可知, TJ-5 试件比 TJ-6 试件的极限承载力提高达 4.51%, TJ-8 的极限抗剪能力较 TJ-7 的增大 11.94%。因此, 在合理范围内通过提高柱轴压比可增加型钢混凝土异形柱边节点的抗剪承载能力。

看, 部分试件的地震延性系数得到相反的趋势, 这可能与试验轴压比的取值样本量较少有关, 有待在数值模拟中进行拓展分析。

3 结论

3) 图 6(c)为在同类配钢形式、相同加载角度试件割线刚度退化随轴压比增大的变化趋势。由图可见, 在加载初期, 轴压比大的试件刚度退化比小轴压比的轻, 说明提高轴压比可有利于型钢混凝土异形柱空间边节点的抗弹性侧移能力; 而试件在接近破坏时, 小轴压比的空间边节点具有略为更大的抗侧刚度, 但两者的差距不是太大。

(1) 配钢形式和加载角度对型钢混凝土异形柱-钢梁空间边节点的骨架曲线影响较大: 前者主要表现在试件进入弹塑性状态后, 实腹式配钢试件的骨架曲线更陡, 其次为槽钢桁架试件, 最后为 T 形钢桁架试件; 后者则表现在 45°加载角时的骨架曲线基本包围了 0°、30°以及 60°加载角度下的骨架曲线。轴压比对骨架曲线的整体影响不甚明显, 但较高轴压比试件的下降段略比轴压比低的快, 表明随着轴压比的提高, 其最终的变形能力有所降低。

4) 图 6(d)为在同类配钢形式、相同加载角度下试件破坏时的等效粘滞阻尼系数随轴压比增大的变化趋势。由图可知, 随着试件轴压比的提高, 其地震耗能能力也得到加强。

(2) 在配钢率相差不大的前提下, 实腹式配钢的异形柱-钢梁空间边节点拥有更好的抗剪承载能力; 在 45°加载角度下的空间边节点抗剪能力要优于其余加载角度的节点; 提高柱轴压比可增加 SRC 异形柱边节点的受剪性能。

5) 图 6(e)为在同类配钢形式、相同加载角度下试件的位移延性系数随轴压比增大的变化趋势。对于试件 TJ-5 与试件 TJ-6, 其位移延性系数随着轴压比的增大而减小; 而对于 TJ-7 和 TJ-8 两试件, 当轴压比增大后, 其位移延性却有所增大。通常情况下, 结构的延性随轴压比的增加会呈现降低的现象^[12-14], 但就本次试验所得结果来

(3) T 形钢桁架试件的刚度退化比槽钢桁架试件的快, 而实腹式配钢试件的刚度退化为三种配钢形式中最好; 45°加载角试件的刚度退化总体为最轻; 轴压比的增大对型钢混凝土异形柱-钢梁空间边节点的初期刚度较为有利而后期刚度退化较快。

(4) 就节点的耗能而言, 最好为 T 形钢桁架试件, 其次为槽钢桁架试件, 最差为实腹式配钢试件; 45°试件的耗能能力较 0°和 60°的强, 但略比 30°的低; 随着试件轴压比的提高, 其地震耗能能力也得到加强。

(5) T 形钢桁架节点的位移延性性能最优, 槽钢桁架节点的延性最小; 发生弯曲型破坏的平面节点地震延性要好于同类中以剪切斜压破坏为主的空间节点, 45°加载角下的试件延性比 30°加载时的略好, 同时也优于 60°加载角的试件; 位移延性存在对轴压比不敏感的状况, 这可能与轴压比的取值较少有关。

参考文献:

- [1] 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 study on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 53—61. (in Chinese)
- [2] Xue J Y, Chen Z P, Zhao H T, Gao L, Liu Z Q. Shear mechanism and bearing capacity calculation on steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Steel and Composite Structures, 2012, 13(5): 473—487.
- [3] Tokgoz S, Dundar C. Test of eccentrically loaded L-shaped section steel fibre high strength reinforced concrete and composite columns [J]. Engineering Structure, 2012, 38(5): 134—141.
- [4] Zuo, Z L, Cai J, Yang C, Chen Q J, Sun G. Axial load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars [J]. Engineering Structures, 2012, 37: 88—98.
- [5] 薛建阳, 高亮, 刘祖强, 赵鸿铁. 空腹式型钢混凝土异形柱中框架抗侧刚度试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 34—40, 46.
Xue Jianyang, Gao Liang, Liu Zuqiang, Zhao Hongtie. Experimental study on lateral stiffness of lattice steel reinforced concrete middle frame with special-shaped columns [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 34—40, 46. (in Chinese)
- [6] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 马付彪. 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, Ma Fubiao. Study on bond slip behavior of SRC special-shaped columns under cyclic reversed loading [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 211—218. (in Chinese)
- [7] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989: 23—24.
- Tang Jiuru. Seismic resistance of joints in reinforced concrete frames [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989: 23—24. (in Chinese)
- [8] 万云芳. 低周反复荷载作用下钢骨混凝土 T 形柱节点抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
Wang Yunfang. Study on the anti-seismic behavior of joints between SRC special shaped columns and reinforced beams under low cyclic reversed loading [D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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. Experiment research on joints of steel reinforced concrete special-shaped column and reinforced concrete beam under double-direction low-cyclic reversed loading [D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- [11] 王妮, 陈宗平, 张士前, 陈宇良. 型钢混凝土异形柱中节点受力性能试验及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊 1): 102—109.
Wang Ni, Chen Zongping, Zhang Shiqian, Chen Yuliang. Experimental research and FEA on mechanical behavior of interior joint between SRC special shaped column and steel beam [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Suppl 1): 102—109. (in Chinese)
- [12] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 165—167.
Zhao Hongtie. Steel and concrete composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2001: 165—167. (in Chinese)
- [13] 王丹, 吕西林. T 形、L 形钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 39—44, 106.
Wang Dan, Lü Xilin. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled steel T-section and L-section columns [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 39—44, 106. (in Chinese)
- [14] 曹云中, 干钢, 唐锦春. 轴压比对空间异形柱框架抗震性能的影响[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 17—19.
Cao Yunzhong, Gan Gang, Tang Jinchun. Influence to aseismic performance of 3D-frame with special-shaped columns by axial compression ratio [J]. Building Structure, 2008, 38(11): 17—19. (in Chinese)