

钢骨钢管混凝土柱与钢梁空间节点抗震性能的非线性有限元分析

孙艳丽¹,董文天¹,刘娟¹,张正涛²

(1. 沈阳建筑大学商学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究钢骨方钢管混凝土柱与钢梁空间节点的抗震性能,为工程应用和进一步理论研究提供参考.方法 利用大型通用有限元分析软件 ABAQUS 研究钢骨方钢管混凝土柱-H型钢梁空间组合节点在不同的双向位移荷载加载比例、轴压比和钢骨强度下的抗震性能,通过有限元模拟,得到不同参数时梁端的荷载-位移曲线和骨架曲线;根据得到的曲线和数据,对节点的抗震性能进行深入分析.结果 某方向的梁端位移荷载固定不变,随着与其垂直方向的梁端位移荷载逐渐增大时,节点的极限承载力下降,构件耗能性能变差;轴压比为 0.2~0.5 时,随着柱顶轴力的增加,节点梁端承载力并没有产生明显变化;当轴压比大于 0.5 时,节点的承载力和延性迅速下降;随着钢骨强度的提高,节点的受力性能增强,但并不明显.结论 不同参数时钢骨方钢管混凝土柱-H型钢梁的滞回曲线均比较饱满,未出现明显的捏缩现象,表明节点能够有效地吸收地震能量,可广泛应用于实际工程中.

关键词 钢骨钢管混凝土柱;抗震性能;有限元分析;双向加载;轴压比;钢骨强度

中图分类号 TU398.9 文献标志码 A

Nonlinear FEM Analysis on Seismic Performance of Space Joint of Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced Concrete and Steel Beam

SUN Yanli¹, DONG Wentian¹, LIU Juan¹, ZHANG Zhengtao²

(1. School of Business, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to provide a reference for practical engineering application and further theoretical research through the analysis of space joint of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete. In this paper, the finite element analysis software ABAQUS is used to study the seismic performance of space joint under different bidirectional displacement load, ax-

收稿日期:2016-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(90815020);国家十三五重点研发计划项目(2016YFC0701402);辽宁省经济社会发展项目(2017lslktyb-146);辽宁省教育厅人文社会科学研究项目(WJZ2016005);中国建设教育协会教育教学科研立项课题(2015051)

作者简介:孙艳丽(1971—),女,副教授,主要从事建筑与土木工程方面研究.

ial compression ratio and strength of steel. The author gets load-displacement curves and skeleton curves in different parameters at the end of beam through the finite element simulation. At the same time, the hysteretic behavior of the joints is analyzed according to the curves and dates. In the case of a fixed displacement load at the end of one direction beam with increased at the vertical direction, the ultimate bearing capacity of joint decreases and energy dissipation becomes poor. Within range of smaller axial compression ratios, the bearing capacity of joint has increased with the increasing of axial compression force; however, in range of larger axial compression ratios, the ultimate bearing capacity of the joint has reduced. With the improvement of the strength of steel, the mechanical properties of joint do not change significantly. Hysteresis curves of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete are relatively full in different parameters, does not appear obvious pinch phenomenon. It shows that the plastic deformation ability of the component is strong and can be widely used in practical engineering.

Key words: steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete; seismic performance; finite element analysis; biaxial loading; axial compression ratio; strength of steel

钢骨钢管混凝土柱充分结合了钢管混凝土柱和钢骨混凝土柱的优点,具有较好的延性和较高的后期承载力.钢管内部混凝土处于三向围压状态,有效约束了混凝土的横向变形,改善了高强混凝土脆性较大的缺点;同时,由于核心钢骨的存在提高了柱子的极限承载力和变形性能,在地震发生时起到了第二道抗震防线的作用^[1-5].因此,钢骨钢管混凝土柱作为重载柱经常出现在高层建筑当中.梁柱节点作为各种结构构件的传力枢纽,承受着柱端、梁端传递的剪力、弯矩和轴力的作用,其受力模式十分复杂,对整个建筑物的抗载能力和稳定性有着至关重要的影响^[6].但是,目前国内外学者对钢骨钢管混凝土柱-钢梁节点,尤其是对其空间节点的研究还相对较少,严重阻碍了其在结构工程中的应用.大量的地震灾害均表明,节点发生的破坏远远大于预期估计,这主要是因为地震作用和结构响应是多维的,与平面节点的试验结论存在着较大的区别^[7].在上述情况下,对这种新型空间节点抗震性能的研究分析,无论是对于指导工程实践,还是为了进一步的理论研究,都具有十分重要的参考价值.基于此,笔者采用有限元分析软件 ABAQUS 对不同参数时钢骨钢管混凝土柱-H型钢梁组合构件进行了低周反复荷载作用下的非线性

有限元模拟,提取有限元计算结果并进行深入分析在不同的双向位移荷载加载比例、轴压比和钢骨强度下的节点抗震性能.研究表明,不同参数时钢骨方钢管混凝土柱-H型钢梁的滞回曲线均比较饱满,未出现明显的捏缩现象,说明节点能够有效地吸收地震能量,可广泛应用于实际工程中.

1 非线性有限元分析模型的建立

笔者采用的非线性有限元分析方法具有“全过程仿真”的特点,能够在计算机上按照构件真实的材料特性、边界约束、荷载工况等条件,模拟钢骨钢管混凝土柱-H型钢梁从初始受力到最终破坏的过程,可以比较全面的分析节点的受力机理及特性^[8].模型选取的是框架结构中上下柱与左右梁反弯点之间的梁柱单元,此外,为了节约计算时间提高计算效率,笔者采用 1/2 缩尺方式建模^[9].

1.1 试件设计

梁柱之间采用的是外加强环式连接方法,具有传力明确,构造简便,节点应力分布均匀和刚度较大的特点,在组合结构当中应用十分广泛^[9].模型中钢骨钢管混凝土柱的高度设置为 1 360 mm;钢管采用直径为 220 mm、壁厚为 4.5 mm 的 Q235 钢材;核心

钢骨采用 I10 工字型钢焊接而成^[10]; 混凝土强度选取 C60, 构件中钢梁采用屈服强度为 345 MPa 的 H 型钢材, 具体截面尺寸为 200 mm × 100 mm × 4.5 mm × 10mm; 钢梁与柱之间采用厚度为 8 mm 内外径之差为 60 mm 的加强环板焊接而成, 加强环板的屈服强度设为 420 MPa. 钢骨钢管混凝土柱和 H 型钢梁的具体截面尺寸如图 1 所示. 在有限元建模中, 混凝土的弹性模量取 33.23 GPa, 泊松比取 0.2; 钢材的弹性模量均取 206 GPa, 泊松比为 0.3.

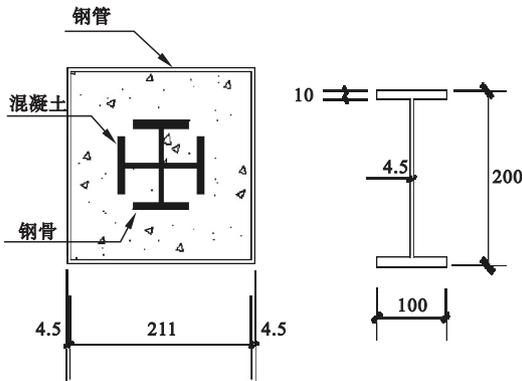


图 1 钢骨钢管混凝土柱和钢梁截面尺寸

Fig. 1 Cross section size of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete and steel beam

1.2 材料本构模型和参数

本构模型是对材料受力机理和性能变化宏观上的数学描述, 它表示在不同的外荷载情况下物质的应力 - 应变关系, 要想在 ABAQUS 里模拟节点的抗震试验, 必须确定构件所包含材料的本构关系. 核心混凝土考虑外部方钢管的约束效应^[11], 选用了 ABAQUS 中混凝土的损伤塑性模型, 考虑了在往复荷载作用下混凝土的刚度退化效应. 核心混凝土受压本构关系采用文献^[12]提出的本构关系模型, 受拉的应力 - 应变模型采用的是沈聚敏提出的模型, 混凝土损伤系数是根据 Sidiroff 能量原理经过推导得到的. 钢材是理想的弹塑性材料, 在多轴应力状态下满足 Von Mises 屈服准则, 考虑了钢材的包辛格效应, 其本构模型如图 2 所示^[8]. 图中

E_s 为钢材弹性模量.

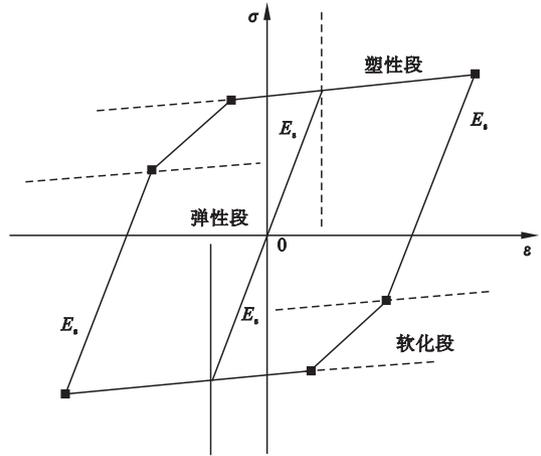


图 2 钢材部分的应力 - 应变关系

Fig. 2 The stress-strain relationship of steel

笔者在进行网格划分时, 采用 8 节点线性减缩积分实体单元, 该单元适用于模拟较大的网格屈曲, 能够进行大应变研究分析^[8]. 笔者建立了 12 组参数不同的钢骨钢管混凝土柱 - H 型钢梁节点模型, 不同构件的参数如表 1 所示.

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of the model

试件编号	X 向梁端 极限位移 荷载端/mm	Y 向梁端 极限移荷 载端/mm	钢骨 型号	轴压比
JD-1	50	0	Q235	0.3
JD-2	50	25	Q235	0.3
JD-3	50	50	Q235	0.3
JD-4	50	75	Q235	0.3
JD-5	50	50	Q235	0.2
JD-6	50	50	Q235	0.4
JD-7	50	50	Q235	0.5
JD-8	50	50	Q235	0.6
JD-9	50	50	Q235	0.7
JD-10	50	50	Q345	0.3
JD-11	50	50	Q390	0.3
JD-12	50	50	Q420	0.3

1.3 边界约束和加载制度

模型边界约束的定义对于其变形和受力有着十分重要的影响. 试件的边界条件是按照实际情况进行模拟: 梁端释放自由度, 不施加任何约束条件; 钢骨钢管混凝土柱的上端面约束 X、Y 方向的平动, 底部约束 X、Y、Z 三个方向的平动, 不限制柱端的转动自由度. 笔者共设置两

个加载步,首先对柱顶施加恒定的轴力,然后施加梁端的往复位移荷载,梁端的位移荷载是通过在梁端面设置参考点的方法实现的,每级荷载控制为 10 mm,加载到 50 mm 时停止^[9-12]. 模型的具体加载模式如图 3 所示.

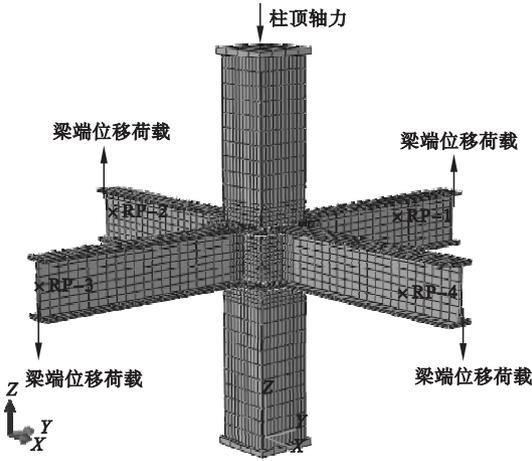


图 3 模型的加载方式

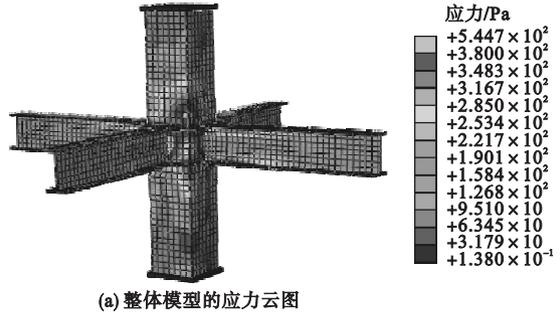
Fig. 3 The loading method of the model

2 计算结果及分析

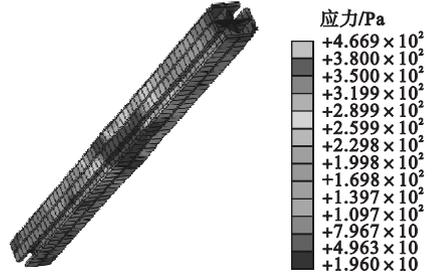
2.1 试件破坏形态

图 4 给出了典型试件 JD-3 的整体的破坏形态以及各个部件的破坏形态. 由图 4 可以看出,在梁端加载比例为 1:1 时,构件主要沿斜向 45° 方向产生变形,应力、应变主要集中在方钢管钢骨混凝土柱两个侧面交汇的地方,核心部分的柱子鼓突现象比较明显. 这与平面节点试验相比有很大的区别,表现出了在双向加载条件下的空间耦合作用^[13]. 因此,在实际工程中,空间节点不仅要验算沿梁方向的承载力,还需要分析柱子的斜向受力状况. 平面环板和钢梁、钢管焊接的部位,由于在正负应力反复变化的影响下,造成加强环处的应力和变形也比较明显,形成高应力区,成为构件最容易破坏的部位之一,在工程设计时应特别注意. 钢梁根部翼缘上的应力也比较集中,出现了较大的塑性变形,是影响梁端承载力的关键因素. 由图可见,节点模型在较大荷载下部分区域出现了应力集中,但

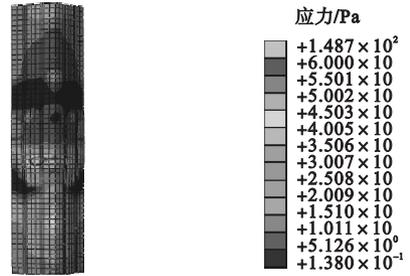
此范围并不是很大,说明试件具有很好的承载能力和延性,能够有效吸收地震释放的能量,适合于应用在大跨度和超高层建筑结构当中. 与平面节点相比,空间节点的受力状态发生较大变化,更能真实反应空间框架结构的变形和受力机理.



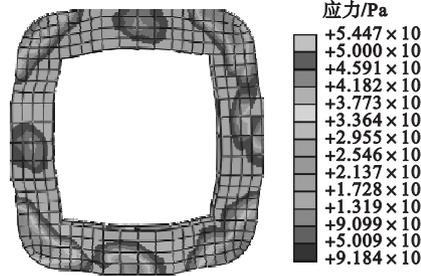
(a) 整体模型的应力云图



(b) 钢管的应力云图



(c) 核心混凝土的应力云图



(d) 加强环的应力云图

图 4 试件的应力云图

Fig. 4 The stress nephogram of specimens

2.2 不同等双向位移荷载时的受力分析

节点是结构设计中关键部位,为了保证

节点的受力和变形性能对于建筑物的整体安全性有十分重要的作用. 现有的组合节点研究大部分侧重于平面节点, 这与空间中柱节点的实际受力情形有很大的出入. 在多维地震荷载作用下, 节点的破坏模式往往比较复杂, 表现出很强的空间耦合作用. 由于实际地震中, 地震波并不一定沿梁方向按1:1比例入射. 因此, 笔者研究在双向位移荷载发生变化时, 节点受力的空间耦合作用^[14].

2.2.1 滞回曲线分析

通过提取节点的滞回曲线然后对滞回曲线展开相关研究反映出节点的强度、刚度、耗能能力和变形能力^[15]. 图5依次绘出了JD-1、JD-2、JD-3、和JD-4时梁端的荷载-位移曲线.

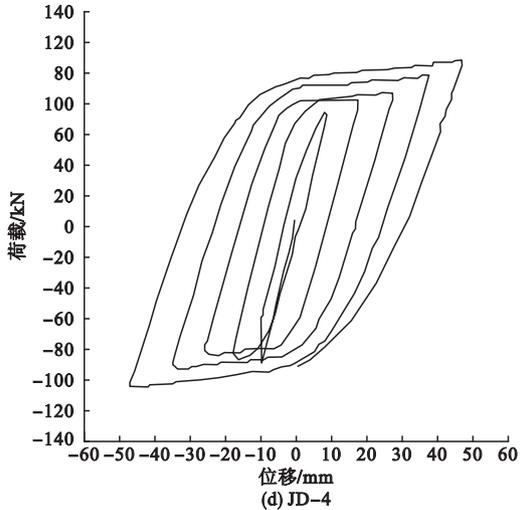
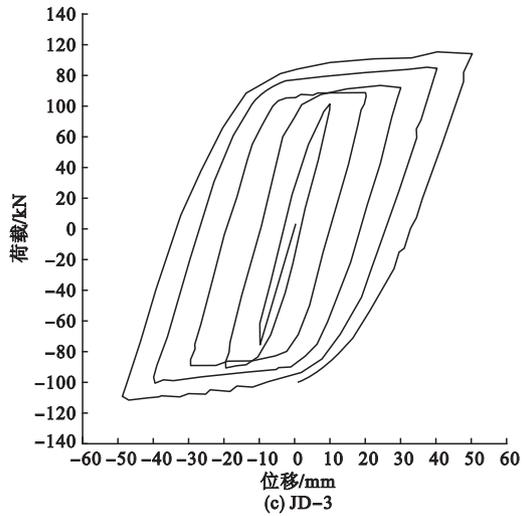
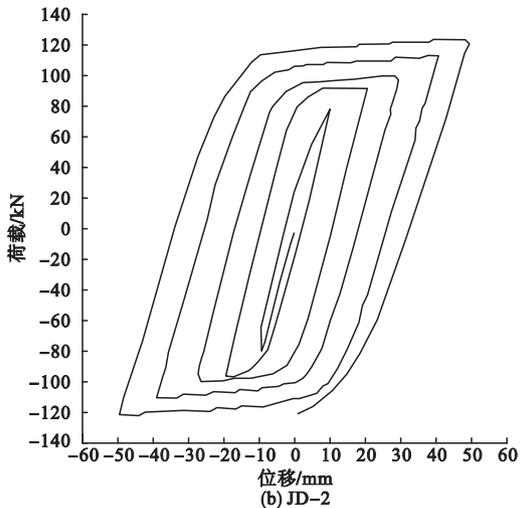
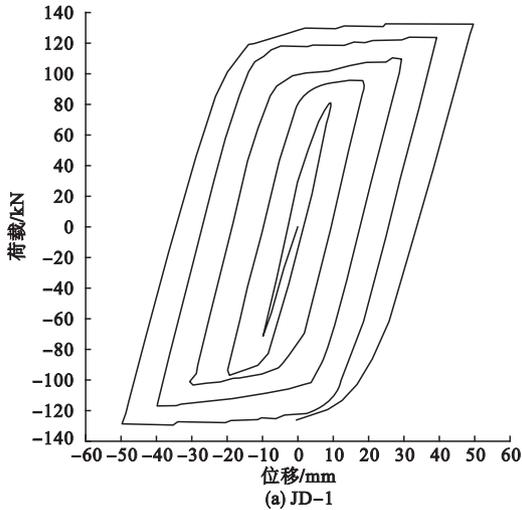


图5 不同等双向位移荷载时的滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curves of different biaxial displacement loading

通过对图5滞回曲线的分析可以看出, 在加载初期阶段, 滞回曲线沿近似的直线循环, 卸载之后形成的残余变形量较小, 随着梁端位移荷载的继续加大, 滞回环逐渐变成曲线, 也更加趋于饱满, 当型钢梁进入屈服阶段之后, 滞回曲线会进一步饱满, 承载力也会有一定程度上的提高, 但刚度出现明显下降. 不同参数时的滞回曲线的形状大致相同, 均呈现为饱满的方梭形, 且没有出现捏缩现象, 显示出了构件优越的耗能性能, 能够较大程度的吸收地震中释放的能量.

JD-1在Y方向的荷载为0, 其受力状态相当于理想的平面节点状态. 不同等双向

位移荷载对节点弹性阶段的影响较小,但对于节点屈服之后的性能影响较大.随着Y方向梁端位移荷载的逐渐增加,滞回曲线覆盖的面积逐渐减小,节点的承载力和刚度也出现了明显的下降,表现出了较强的空间耦合作用.因此,在实际工程中,空间节点的受力验算应按最不利方向荷载选取.图6给出了不同等双向位移荷载对节点承载能力的影响示意图.

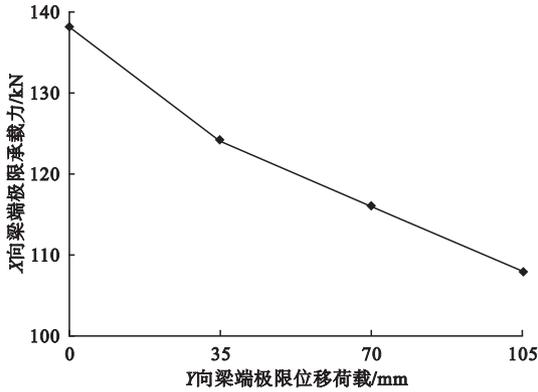


图6 不同等双向位移荷载对节点承载力的影响
Fig.6 Impact on bearing capacity of the joint of different biaxial displacement loading

2.2.2 耗能分析

可以通过结构耗能能力来评价结构的综合抗震性能指标,耗能能力越大,则在地震来临时,结构消耗和吸收的地震能量就越大,抗震性能越好^[16].笔者通过不同等双向位移荷载下等效黏滞系数 h_e 和耗能比 Ψ ^[17]的比较来综合评价节点的抗震性能(见表2).

表2 模型的耗能指标

Table 2 Energy consumption indicators of the model

试件编号	等效阻尼黏滞系数 h_e	耗能比 Ψ /%
JD-1	0.418	88.56
JD-2	0.400	88.89
JD-3	0.387	87.68
JD-4	0.377	87.52

笔者模拟4个节点的等效黏滞系数 h_e 的平均值为0.396,而通常情况下,钢筋混凝土节点的平均值为0.1,普通型钢混凝土节点约为0.3左右^[18-20],此类阶段的等效黏滞

阻尼系数比普通型钢混凝土节点的耗能能力有所提高,说明了钢骨钢管混凝土柱-钢梁节点良好的耗能能力.由表2的分析结果可知,随着Y向梁端位移荷载的增大,等效阻尼延性系数逐渐减小,JD-4与JD-1模型相比,耗能能力下降约10%,变化幅度比较明显,在工程设计时,应根据具体荷载情况进行合理验算,以确保达到设计要求.

2.2.3 刚度退化

试件刚度反映的是其抵抗变形的能力,合理的结构刚度对于建筑物的正常使用是十分重要的.随着梁端位移荷载的增大,构件产生残余变形为,刚度逐渐减小.笔者采用割线刚度描述构件的刚度变化情况,其计算公式为

$$K_i = \frac{|P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

式中: P_i 和 $-P_i$ 分别表示第*i*次循环过程中的峰值荷载; Δ_i 和 $-\Delta_i$ 分别表示峰值点所对应的位移.通过计算得出了JD-1、JD-2、JD-3和JD-4的刚度退化参数,如图7所示.

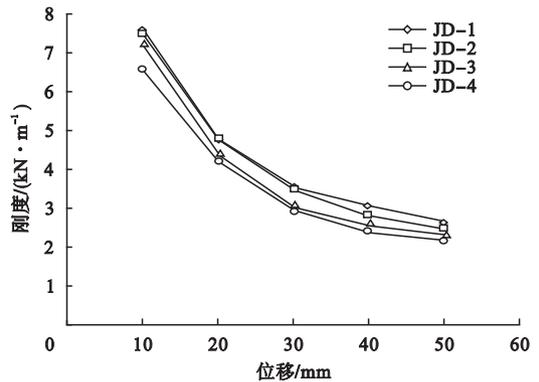


图7 不同等双向位移荷载时刚度退化

Fig.7 Stiffness degradation of different biaxial displacement loading

由图7可以看出,不同等双向位移荷载时节点的刚度退化趋势大致相同.在加载前期阶段,模型的刚度退化比较明显,位移荷载由10 mm增加到30 mm时刚度平均下降幅度约为55.1%;随着梁端位移荷载的进一步增大,刚度变化趋于平缓.Y方向梁端位移荷

载值较大时,模型的刚度值相对较小,空间耦合影响表现得就越明显,结果表明,平面节点试验不能精确的反映空间节点受力机理,相互之间存在一定程度上的差别. 四组模型的刚度值虽然都出现明显退化,但都保持了较高的水平,说明钢骨钢管混凝土柱与钢梁空间节点的受力性能较好,能够满足结构正常使用时的要求.

2.3 轴压比不同时的受力分析

图8为轴压比不同时试件的骨架曲线. 图9为轴压比对节点承载力的影响示意图. 由骨架曲线可以看出,空间节点在梁端竖向荷载的反复作用下,历经了弹性、开始屈服、达到极限荷载等阶段. 无论正向加载还是反向加载,钢骨钢管混凝土柱-钢梁节点均具有较高的承载能力,能够有效抵抗较大荷载的作用. 轴压比为0.2~0.5时,由于柱顶轴力改善了骨料之间的咬合作用,推迟了节点交叉裂缝的出现,使得节点梁端的极限承载力较高,并且随着轴力的增加没有发生显著的变化;在轴压比大于0.5时,由于柱顶轴力变得很大,空间节点在梁端位移荷载的作用下来回晃动,柱子的二阶偏心效应更加明显,柱子的失稳破坏较为严重,对节点受力性能带来较大的影响,造成节点梁端承载力迅速降低. 因此,笔

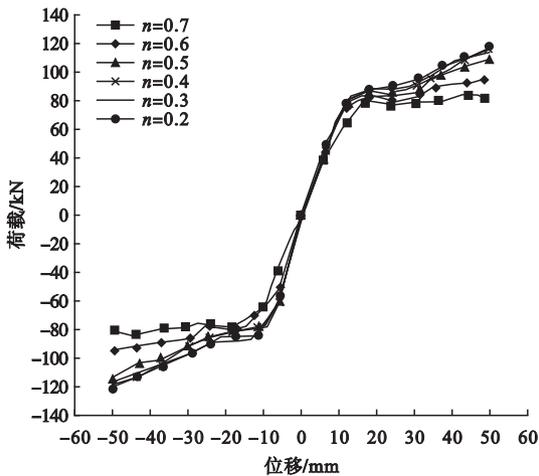


图8 不同轴压比时试件的骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves of specimens in different axial compression ration

者建议在实际设计时钢骨钢管混凝土柱-钢梁组合构件柱顶的轴压比控制在0.5左右,以保证工程质量的安全.

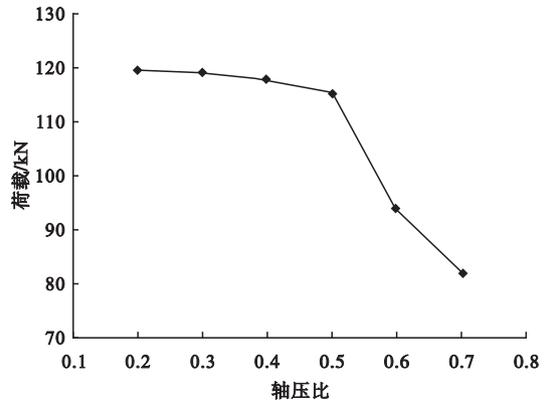


图9 轴压比对节点梁端承载力的影响

Fig. 9 Influence on bearing capacity of the joint of axial compression ration

2.4 钢骨强度不同时的受力分析

钢骨作为这种新型组合结构的第二道抗震防线,对于节点的受力性能有着十分重要的作用. 为了探究钢骨强度对节点受力性能的影响,笔者设计了4组模型,钢骨强度分别取为Q235、Q345、Q390和Q420. 图10为钢骨强度不同时模型的骨架曲线.

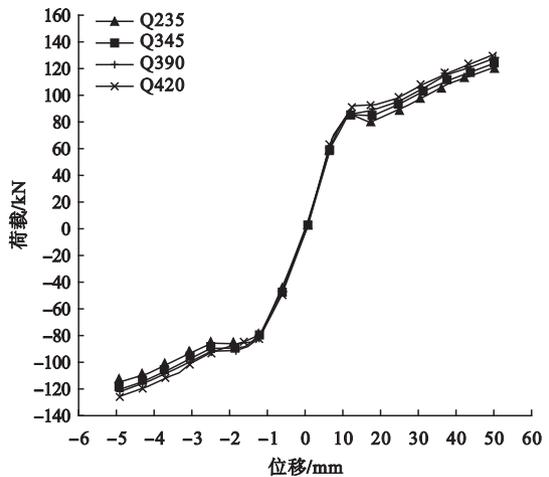


图10 钢骨强度不同时模型的骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of model in different steel strength

由图10可以看出,4组模型的受力性能

良好,在梁端极限位移荷载为 50 mm 时,骨架曲线没有出现明显的下降,远未达到节点屈服强度,这表明由于钢骨的存在,大大提高了节点的承载力和塑性变形能力.随着钢骨强度的提高,节点梁端的极限承载力逐渐增大,但影响并不明显,原因在于:钢骨钢管混凝土柱的强度较高,在小轴压比时,当节点达到较大荷载时,钢骨的破坏程度较小,并没有产生明显的影响.因此,在实际工程中,当轴压比和抗震烈度较小时,选用较低强度的内钢骨就能满足节点的受力性能.即使当较大地震来临时,由于钢骨自身的强度和塑性变形能力,当外部钢管混凝土受到较大破坏后,柱内钢骨也可继续承载,可作为结构抗震设防的第二道防线.

3 结 论

(1)不同参数时钢骨钢管混凝土柱-H型钢梁组合构件的滞回曲线均比较饱满,有良好的抗震性能,该类节点能够有效地吸收地震释放的能量,具有广泛的应用前景.

(2)某方向梁端的位移荷载固定不变,随着与其垂直方向的梁端位移荷载逐渐增大时,节点的极限承载力下降,构件耗能性能变差,表现出较强的空间耦合作用.

(3)在轴压比小于或等于 0.5 时,柱顶轴力的增大对节点承载力的无显著影响;当轴压比大于 0.5 时,随着柱轴压比的增加,梁端节点承载力迅速下降.建议实际工程中的轴压比应该控制在 0.5 左右.

(4)轴压比较小时,钢骨强度对空间节点的受力性能没有明显影响;当结构抗载能力要求不高和抗震设防烈度较小时,采用强度较低的钢骨就能满足构件的性能要求.

参考文献

[1] 刘立平,李英民,夏洪流,等.钢骨-钢管混凝土柱偏心受压力学性能试验[J].重庆大学学报,2012,35(4):52-58.

(LIU Liping, LI Yingmin, XIA Hongliu, et al. Experimental study on the mechanical behavior of eccentrically loaded steel tubular columns filled with structural steel and concrete [J]. Journal of Chongqing university, 2012, 35 (4):52-58.)

[2] 肖阿林.钢骨-钢管高性能混凝土轴压组合柱受力性能与设计方法研究[D].长沙:湖南大学,2009.

(XIAO Alin. Research on behavior and design method of steel-reinforced high-performance concrete filled steel tubular columns under axial load[D]. Changsha: Hunan University, 2009.)

[3] HE Yibin, XIAO Alin, XIA Dongzhou, et al. Ultimate strength of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete with limit equilibrium method[J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2005, 32:45-48.

[4] YU Guofeng, ZHAO Xudong, SUI Haiyu. Numerical analysis of square steel tubular columns filled with steel reinforced concrete subjected to eccentric load [J]. Advanced materials research, 2012, 446/447/448/449:922-925.

[5] XU Y, ZHANG Y. Nonlinear finite element analysis on seismic behavior of joints of criss-cross section column composed of core concrete-filled steel tube and steel beam in different axial compression ratio [J]. International forum on energy, environment and sustainable development, 2016, 75(46):68-74.

[6] 杨俊.型钢混凝土梁-钢骨钢管混凝土柱节点的设计与施工[D].南昌:南昌大学,2013. (YANG Jun. Design and construction of the joint for SRC beam with steel-reinforced concrete-filled steel tubular column [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.)

[7] 徐亚丰,金松.钢骨-圆钢管高强混凝土组合柱偏心受压有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(1):40-50.

(XU Yafeng, JIN Song. Finite element analysis on circular steel tube composite column filled with steel-reinforced high strength concrete under eccentric loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (1):40-50.)

[8] 徐亚丰,王越.碳纤维钢骨-钢管混凝土柱抗

- 震性能试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(4): 612-620.
(XU Yafeng, WANG Yue. Experimental study and nonlinear FEM analysis on seismic performance of CFRP steel tube composite columns filled with steel reinforced concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(4): 612-620.)
- [9] 徐亚丰, 陈谦, 朱绍杰. 复式钢管混凝土柱-钢梁空间节点有限元研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(1): 27-37.
(XU Yafeng, CHEN Qian, ZHU Shaojie. Finite element analysis on 3D joints of composite CFST column and steel beam [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(1): 27-37.)
- [10] 温宇平. 钢骨-钢管混凝土组合重载柱节点抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
(WEN Yuping. Research on seismic behavior of joints of heavy-load steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [11] 徐亚丰, 金松, 戴颖, 等. 钢骨-圆钢管高强混凝土组合长柱轴心受压分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(6): 703-709.
(XU Yafeng, JIN Song, DAI Ying, et al. Finite element analysis for circular steel tube composite slender column filled with steel-reinforced high-strength concrete under axial compression [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2016, 38(6): 703-709.)
- [12] 银英姿, 孙绍斐. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点的受力性能分析[J]. 钢结构, 2013, 12(28): 22-25.
(YIN Yingzi, SUN Shaofei. Analysis of the mechanical performance of steel beam to concrete-filled square steel tube column connections with outer stiffening ring [J]. Steel construction, 2013, 12(28): 22-25.)
- [13] 周慧. 空间组合节点抗震性能试验研究与理论分析[D]. 北京: 清华大学, 2011.
(ZHOU Hui. Experimental and theoretical study on 3D composite joints under bidirectional loading [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.)
- [14] 樊健生, 周慧, 聂建国. 空间钢-混凝土组合节点抗震性能试验研究进展[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 37-45.
(FAN Jiansheng, ZHOU Hui, NIE Jianguo. An overview of experimental research on seismic behavior of 3D composite steel-concrete joints [J]. Journal of building structures, 2011, 32(12): 37-45.)
- [15] 王海华. 钢梁-混凝土墙混合节点抗震性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
(WANG Haihua. Research on seismic behavior of the hybrid joint of steel beam and concrete wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.)
- [16] 何丽丽. 预压装配式预应力混凝土框架拟静力分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
(He Lili. Analysis of pseudo-static experiment of pre-stressed fabricated concrete frame [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.)
- [17] XU Y F, ZHU S J, XU P Y, et al. Seismic performance study on the joint of crisscross concrete-filled steel tube column-steel beam in different axial compression ratios [J]. Applied mechanics & materials, 2014, 578/579: 252-255.
- [18] XU Y F, ZHAI Z L, XU P Y. Analysis of seismic performance of the joint of cellular steel column and steel beam in different axial compression ratio [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 578/579: 244-247.
- [19] 彭忠. 中厚壁冷弯型钢梁柱节点抗震性能非线性有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
(PENG Zhong. Non-linear finite element analysis on seismic performance of medium thick-walled cold-formed steel beam-column joints [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.)
- [20] XU Y F, WANG Y, BAI S Y. Axial compression ratio on seismic performance of CFRP steel tube composite columns filled with steel reinforced concrete [J]. Applied mechanics & materials, 2013, 351/352: 687-691.