

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.01.002

外套筒式节点用于轻钢住宅的抗震性能分析

潘秀珍¹, 马俊¹, 杨水成², 刘辉³, 张鹏⁴, 田建勃¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 陕西省建筑科学研究院 工程抗震研究所, 陕西 西安 710082)

摘要: 论文以方钢管柱轻钢住宅结构为研究对象, 提出适用于其梁柱连接的节点——外套筒式节点, 运用 ANSYS 有限元软件, 深入分析了该节点在水平往复荷载作用下的抗震性能, 研究了套筒厚度对其抗震性能的影响, 并针对外套筒式节点存在的不足, 提出侧板加强方案, 以提高梁端抗弯和抗剪承载力。研究表明: 外套筒式节点有效提高了轻钢住宅结构节点域的抗弯和抗剪承载力, 侧板加强方案可以更好地满足“强柱弱梁, 节点更强”的抗震设计要求。

关键词: 轻钢住宅结构; 外套筒式节点; 侧板加强方案; 抗震性能

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)01-0007-10

Seismic behavior analysis of outer-shell connection used for light steel residential structure

PAN Xiuzhen¹, MA Jun¹, YANG Shuicheng², LIU Hui³, ZHANG Peng⁴, TIAN Jianbo¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. School of Mechanical and Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
3. CCCC First Highway Consultants co., LTD, Xi'an 710075, China;
4. Shaanxi Academy of Building Research Engineering Seismic Institute, Xi'an 710082, China)

Abstract: This paper presents a new connection protocol between beam and tube column of light steel residential structure—the external sleeve of node. The seismic performance under cyclic loading and the influence of the thickness of the sleeve on the seismic performance were studied deeply using the ANSYS finite element analysis software. Rational design suggestions and improvement measures were recommended for the new type protocol. One lateral plate strengthening protocol between beam and column was recommended based on the shortcomings of the sleeve nodes, which was used to enhance the moment and shear bearing capacity of beam. Results indicate that the bending and shear bearing capacity could be effectively improved by the outer-shell connection, and that the needs of “strong column weak beam, node stronger” seismic design requirements could be better meet by the lateral plate strengthening protocol.

Key words: light steel residential structure; outer-shell connection; lateral plate strengthening protocol; seismic behavior

目前国内外对于方钢管混凝土柱与 H 型钢梁的节点连接形式研究比较成熟, 常用的连接方式有内置横隔板、贯通横隔板和外加劲环板^[1-5]。当方钢管柱截面较大时, 浇筑混凝土、加焊内横隔板和加焊外加劲环板是十分方便的, 但当此类节点用于方

钢管柱轻钢住宅结构时, 柱截面一般较小, 再用这些连接方式就会给施工带来很大的困难。因此, 本文针对轻钢住宅的特点, 提出适用于其梁柱连接的节点——外套筒式节点^[6]。该节点内部不用浇筑混凝土, 不用焊接内隔板, 采用塞焊的形式紧贴柱外皮

收稿日期: 2018-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608441); 西安理工大学科技创新资助项目(2013CX026); 西安理工大学高层次人才引进人才启动基金资助项目(107-451115003); 中国博士后科学基金面上资助项目(2017M613174)

作者简介: 潘秀珍, 女, 副教授, 研究方向为钢结构。E-mail: panxiuzheng@163.com

焊接一矩形套筒,套筒厚度根据梁端极限抗弯、抗剪承载力确定,同时按照构造要求不得小于 12 mm。该节点是在梁柱连接的节点域处通过套筒对方钢管柱壁进行了加强,可以有效提高节点域的抗弯和抗剪承载力,以便更好地满足“强柱弱梁”的抗震设计要求。充分研究该类节点的抗震性能,对于轻钢住宅在我国的广泛推广有一定的促进作用^[7-10]。

1 有限元模型的建立

1.1 试件设计

根据文献[11]提供的试验研究数据,节点试件几何尺寸见图 1,方钢管柱的截面为 250 mm×250 mm×8 mm×8 mm, H 型钢梁为 H200 mm×150 mm×6 mm×9 mm。以梁柱的节点为中心,钢管柱上下各取 $L_c = 1.5\text{ m}$,左右钢梁各取梁长 $L_b = 1.5\text{ m}$,组成一个平面的十字形试件,套筒壁厚为 12 mm。钢管柱与 H 型钢梁等所用钢材为 Q235B。

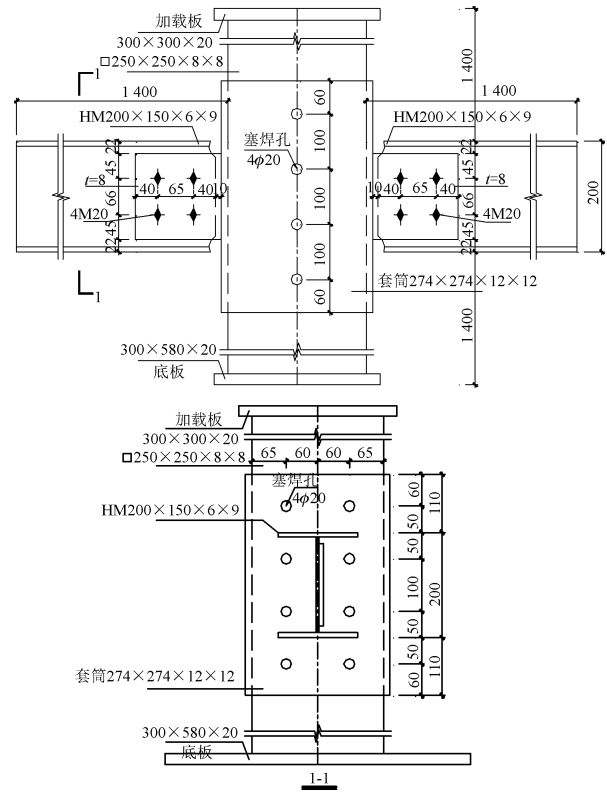


图 1 套筒式节点试件几何尺寸

Fig. 1 Geometry of outer-shell connection

1.2 材料本构关系和网格划分

本文运用 ANSYS 有限元软件进行建模,采用 solid45 实体单元;套筒与柱壁之间的作用主要为两者之间的摩擦力,摩擦系数取 0.45,因此套筒与钢管柱壁之间的相互作用通过设置接触对来模拟,接触单元采用三维面-面接触分析单元 CONTA174

和 TARGE170。钢材的本构关系采用多线性随动强化模型(MKIN),见图 2,其屈服强度、极限强度采用表 1 中列出的文献[11]中的材料性能试验值。所有焊缝连接和高强螺栓连接均认为是与钢材等强度的刚接。采用 Von Mises 屈服准则及相关的流动准则,弹性模量 $E = 2.06\text{E}5\text{MPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。

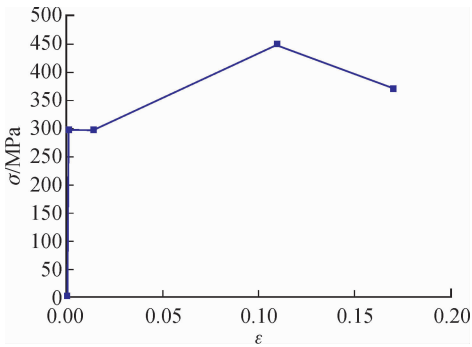


图 2 钢材的本构关系

Fig. 2 Steel constitutive relation

表 1 材性参数

Tab. 1 Material parameters

σ_y / MPa	σ_u / MPa	$\delta_y / \%$	$\delta_{st} / \%$	$\delta_u / \%$
296.25	449.49	0.144	1.483	11.003

建模时利用模型和荷载条件的对称性,按实际模型的 1/2 缩尺建模。本文在划分网格时考虑到节点区域的受力情况是主要研究对象,所以在节点区采用较小的网格尺寸,远离节点的区域则划分相对粗糙,网格尺寸较大,有限元模型见图 3。

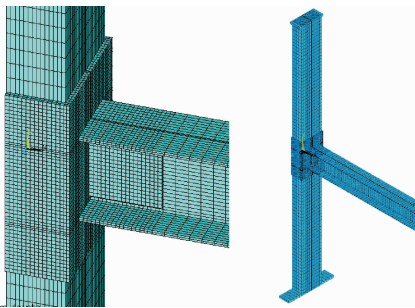


图 3 单元网格划分图

Fig. 3 Element mesh of picture

1.3 约束及加载

采用与文献[11]完全相同的边界约束条件和加载方式:约束上加载板 X、Z 方向的平动位移和下加载板的 X、Y、Z 三个方向平动位移的方法模拟柱上下端的铰接;为了保证模型在加载过程中不发生平面外失稳,对梁端施加 Z 方向的平动位移约束,以模拟侧向支撑的作用;在 $X=0$ 的平面上(即 YZ 平面)对所用节点施加反对称的位移约束;在柱顶施加

集中荷载 333 kN(依据对称性,荷载取一半);在梁端根据研究内容施加 Y 方向的往复位移荷载,采用位移控制。计算简图见图 4。

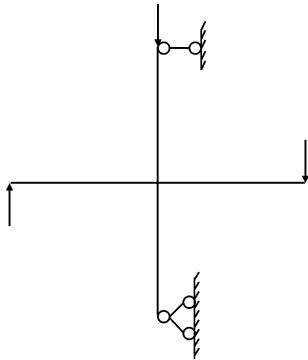


图 4 计算简图
Fig. 4 Calculation diagram

1.4 有限元分析的正确性验证

文献[11]做了尺寸及规格完全相同的两组试件 A-1、A-2,表 2 列出了有限元分析结果与试验结果的对比。

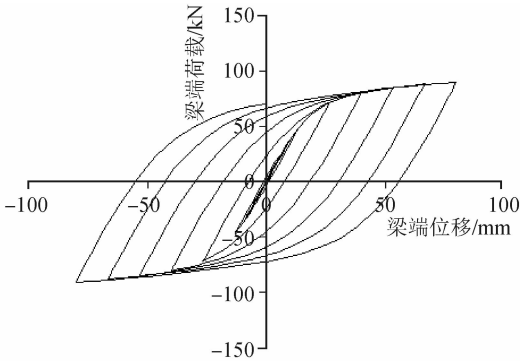
表 2 试验与有限元主要结果对比

Tab. 2 Main data in tests and finite element analysis

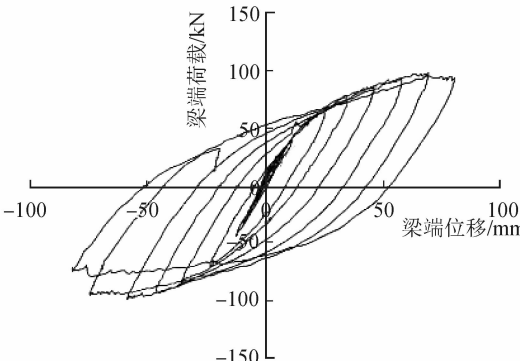
试件	梁自由端屈服位移/mm	梁自由端极限位移/mm	梁自由端极限荷载/kN
A-1	14.3	57.3	92
A-2	11.5	69.3	99
有限元	11.3	78.3	90

可以看出:有限元分析所得的极限荷载与试验所得的极限荷载吻合相对较好,最大误差在 10%以内;极限位移与试验 A-1 所得的结果相差较大,相差 36.6%,与试验 A-2 相差 12.8%;屈服位移与试验 A-1 所得的结果相差为 20.1%,与试验 A-2 相差 1.7%。总的来看,有限元软件的分析结果与试验 A-2 的结果更接近,说明有限元软件的分析结果达到了一定的精度,比较可靠。

图 5 给出了有限元模拟与 A-2 的滞回曲线比较:由于有限元模型没有考虑初始几何缺陷,而且采用的是理想弹塑性本构关系,因此有限元模拟的滞回曲线呈现为饱满的梭形,无捏拢现象,Bauschinger 效应较显著;在加载初期即在弹性阶段,滞回环还没有张开,滞回曲线基本为一条直线;随着荷载的不断增大,节点区域的梁上下翼缘开始屈服,每级循环荷载下的滞回曲线所包围的面积越来越大,各级循环荷载产生的残余变形也越来越大,说明节点域具有较好的耗能能力。



(a) 有限元滞回曲线



(b) 试件 A-2

图 5 套筒式节点 P-Δ 曲线

Fig. 5 Load-displacement curves for outer-shell connection

2 套筒厚度对节点抗震性能的影响分析

为了深入研究套筒厚度对节点抗震性能的影响,保持套筒高度、方钢管柱与 H 型钢梁的截面尺寸等截面几何参数不变,采用与文献[11]完全相同的约束条件、加载方式和材料本构关系,分别取六种不同套筒厚度进行竖向单向加载和水平循环加载方式下节点的受力性能分析,试件编号列于表 3。

表 3 模型编号明细表

Tab. 3 List of model numbers

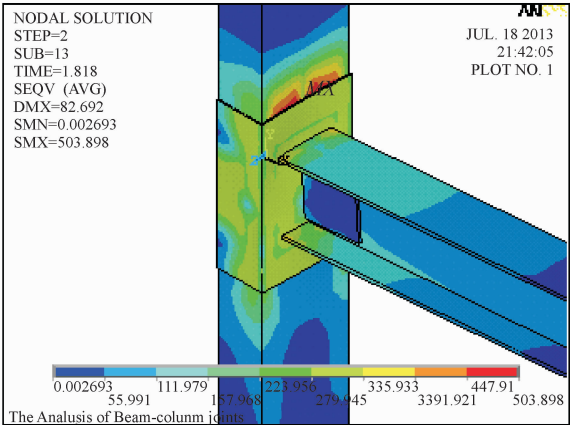
试件编号	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6
套筒厚度 t/mm	4	8	12	16	20	24

2.1 节点应力云图对比

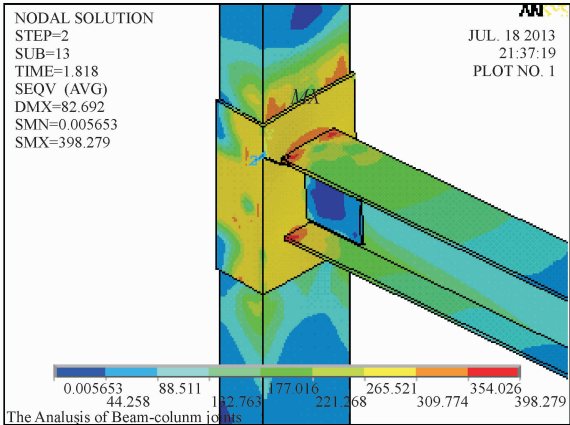
图 6 给出了往复荷载作用下节点达到极限承载力时的 Von Mises 应力云图,可以得出:当 t=4 mm 时,节点域破坏时与梁相连的套筒壁已经完全屈服,梁只有在根部的上、下翼缘处及很小的范围内达到屈服。这说明当套筒壁厚度过小时,套筒相对于梁的刚度太小,对钢梁的约束作用十分有限,比钢梁较早进入屈服变形阶段。随着外荷载的增加,套筒壁进入塑性变形阶段而钢梁还基本处于弹性阶段,节

点破坏是由套筒壁鼓出引起的。套筒与柱壁的连接处存在较高的应力分布,这会使柱因局部应力过大,

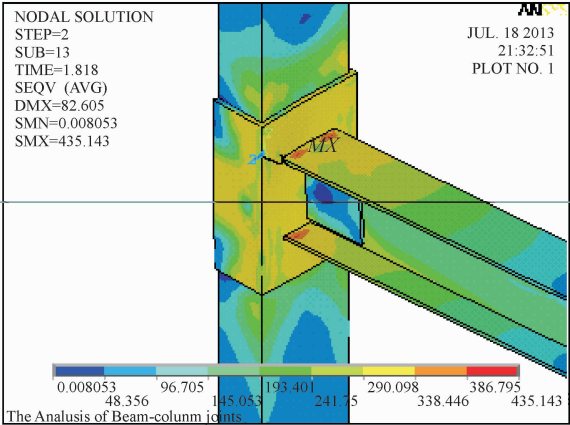
先于梁发生破坏,不满足抗震规范“强柱弱梁”的抗震要求,应避免套筒厚度过小。



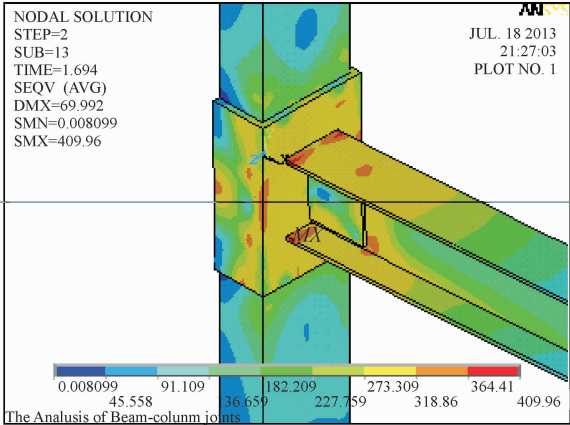
(a) $t=4\text{ mm}$



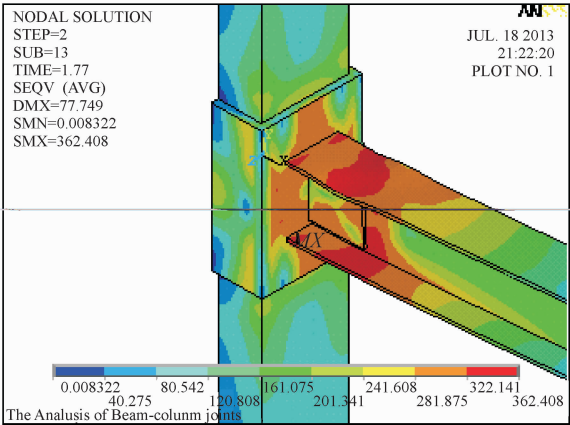
(b) $t=8\text{ mm}$



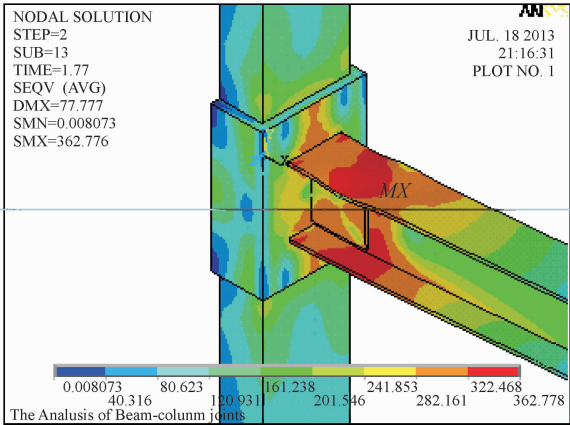
(c) $t=12\text{ mm}$



(d) $t=16\text{ mm}$



(e) $t=20\text{ mm}$



(f) $t=24\text{ mm}$

图 6 不同厚度的外套筒节点 Von Mises 应力云图

图 6 Von Mises stress nephogram of outer shell connection with different t 's

$t=8\text{ mm}$ 、 12 mm 、 16 mm 与 $t=4\text{ mm}$ 的应力云图相比,钢梁的上、下翼缘已经有很大一部分进入塑性变形阶段,且塑性变形区随套筒厚度的增加逐渐向梁自由端发展。随着 t 的增加,当荷载达到极限荷载时,钢梁与套筒几乎都进入到塑性变形阶段,说

明两者之间刚度相差不大,套筒对钢梁的约束作用较为合理,不会发生套筒先于钢梁屈服的情况,对材料的利用比较充分,也与“强柱弱梁”的设计原则相一致。节点破坏时梁根部翼缘产生翘曲。套筒与柱壁连接处的高应力区随着套筒厚度的增加逐渐减小。

当 t 增加到 20 mm、24 mm,节点域破坏时套筒几乎完全处于弹性变形阶段,而钢梁翼缘很大一部分已经产生翘曲,处于塑性变形阶段。套筒太厚使得套筒的刚度比钢梁的刚度大很多,对钢梁有较强的约束作用。节点破坏时只有钢梁产生较大塑性变形,而套筒只有弹性变形,使得整个节点的塑性变形能力减弱。套筒太厚不但会对整个节点的受力及变形能力产生不利影响,而且还浪费材料。

2.2 滞回曲线对比

水平循环荷载作用下 6 种不同套筒厚度的节点滞回曲线见图 7。可以看出,滞回曲线没有捏缩现

象,均为梭形。随着套筒厚度的增加,曲线变得越来越饱满,包围的面积越来越大。 $t=4$ mm 的滞回曲线较其他厚度的曲线包围的面积较小,这是因为套筒太薄,随着荷载的增加,节点进入屈服变形阶段以后,承载力迅速降低的缘故。 $t=20$ mm、24 mm 的滞回曲线基本相同,说明此时再增加套筒厚度已经对节点的滞回耗能性能没有多大帮助。从滞回曲线上可以看出卸载时曲线的刚度基本保持弹性,与初始加载时的刚度基本相同。正、反加载时节点的滞回曲线基本保持对称。

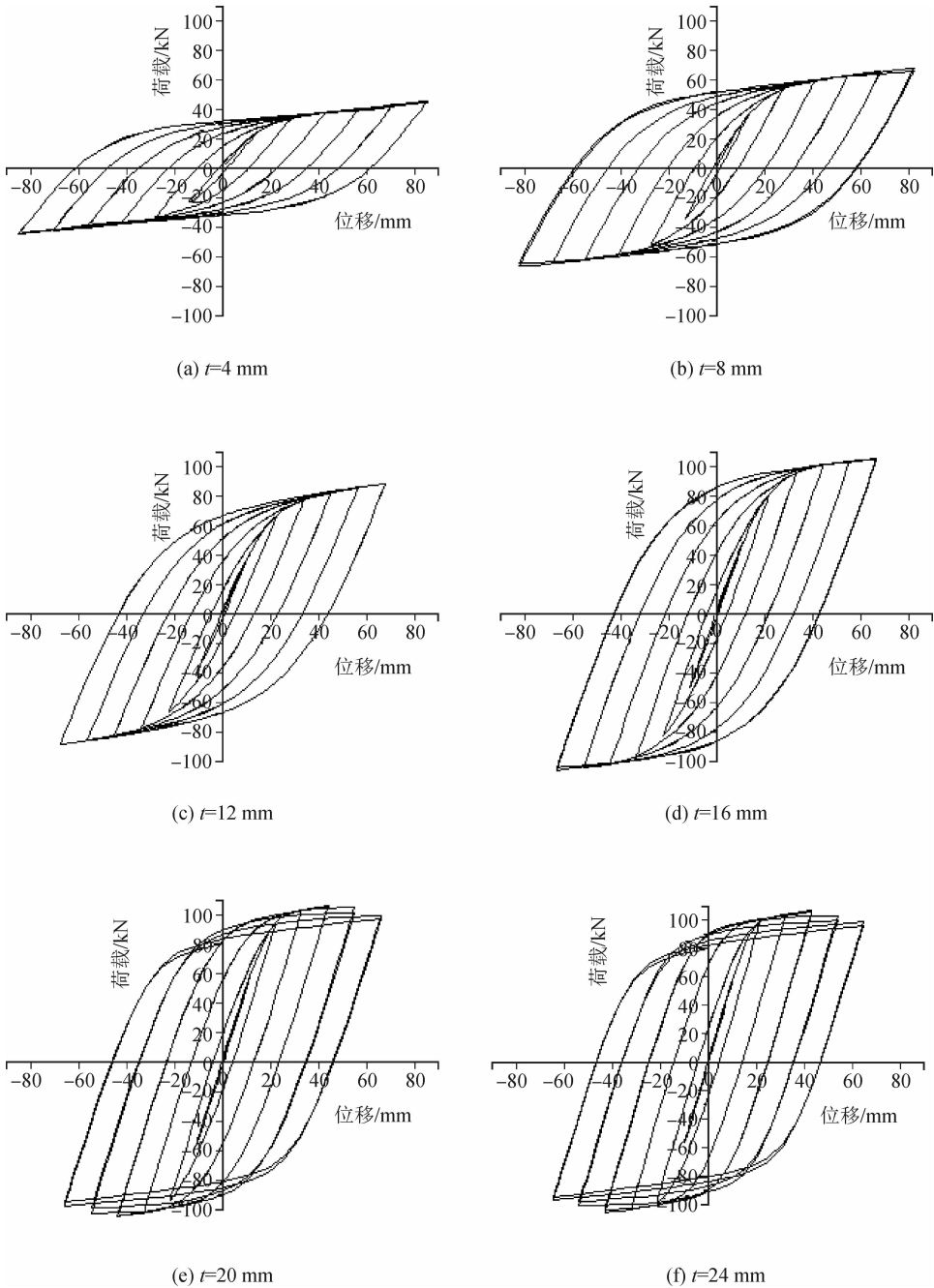


图 7 不同厚度的外套筒节点滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of outer shell with different t 's

2.3 骨架曲线对比

6 种不同套筒厚度的节点骨架曲线见图 8;在屈服以前, $t=4\sim 12\text{ mm}$ 时骨架曲线幅度差别较大, $t=16\sim 24\text{ mm}$ 骨架曲线基本完全重合;屈服以后 $t=4\sim 16\text{ mm}$ 骨架曲线形状很接近,基本按同一趋势发展,且无下降段, $t=20\sim 24\text{ mm}$ 骨架曲线基本重合,且有下降段; $t=4\sim 16\text{ mm}$ 节点模型屈服后,在荷载增加较小的情况下,位移急剧增加,说明节点具有较好的变形能力;正、反加载时节点的骨架曲线基本保持对称。

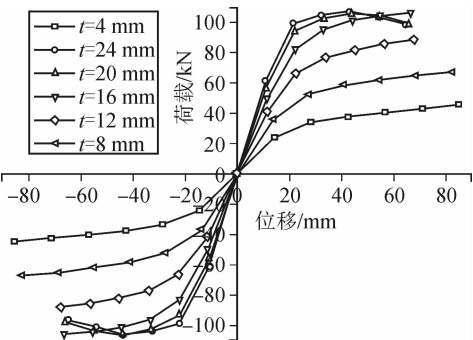


图 8 不同外套筒厚度节点的骨架曲线
Fig. 8 Skeleton curves of outer shell with different t 's

2.4 刚度退化对比

根据文献[12]的规定,用割线刚度表示结构或构件的刚度,模型 TH1~TH6 有限元分析结果的刚度退化曲线见图 9。可以看出:不同外套筒厚度节点的刚度退化曲线下降趋势基本相同,随着位移荷载的增加,曲线下降的比较平稳。在位移荷载为 1 倍的屈服位移 Δ 时,节点的整体刚度随着套筒厚度的增加而增加。

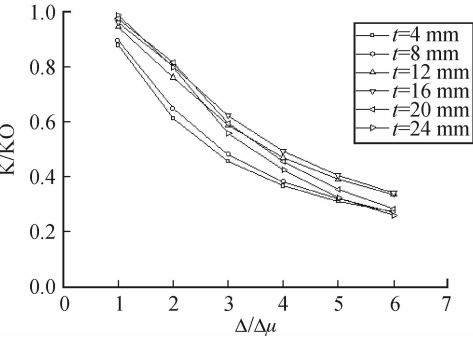


图 9 不同外套筒厚度节点的刚度退化曲线
Fig. 9 Stiffness degradation curves of outer shell with different t 's

从以上有限元分析结果可知,当套筒厚度 t 超过 12 mm 时,各项性能增加的幅度已经非常有限,套筒厚度不能太大,过大反而会对节点的受力及变形产生不利影响,可见套筒厚度 t 是影响节点抗震

性能的一个重要影响因素。当 $t=4\text{ mm}$,小于柱壁厚 8 mm 和梁翼缘板 9 mm 时,套筒的高应力区域开始逐渐扩散,并延伸到套筒两侧的套筒壁上,此时套筒有先于梁达到屈服破坏的趋势,不满足“强柱弱梁,节点更强”的抗震要求。

为了更好地满足抗震设计要求,论文在以上研究基础上提出方钢管柱轻钢住宅结构可以采用侧板加强式梁柱节点。

3 侧板加强方案用于外套筒式节点的抗震性能分析

侧板加强型节点的梁在节点区域连接处是变截面,梁端翼缘采用侧板加宽至与柱等宽,焊到柱的腹板上,以此增强节点区的强度和刚度。梁端所承受的弯矩主要由节点处翼缘的中部逐渐向两侧的加劲肋传递,并通过加劲肋最终传递给柱。这样一来使塑性铰远离柱翼缘表面,使其发生在远离柱的梁上,最终使梁发生塑性破坏。节点连接形式见图 10。

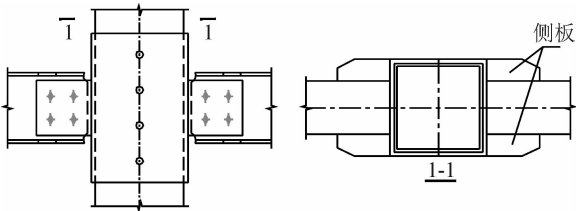


图 10 侧板加强式梁柱连接节点
Fig. 10 Adding side-plate protocol used for beam-column connection joint

3.1 侧板参数设计

为分析侧板长度对节点受力性能的影响,分别设计 5 个有限元模型。模型的梁、柱以及套筒截面尺寸不变,只改变侧板的长度,长度分别为 90 mm、110 mm、130 mm、150mm 和 170mm,模型编号为 CBC1~CBC5。其中 CBC2~CBC4 的侧板长度均在 $(1/2\sim 3/4)h=(1/2\sim 3/4)200=(100\sim 150)\text{mm}$ 范围内,CBC1 和 CBC5 为超限长度对比模型,侧板的坡度 $i=1:2$ 。侧板尺寸示意图见图 11。几何尺寸明细表见表 4。

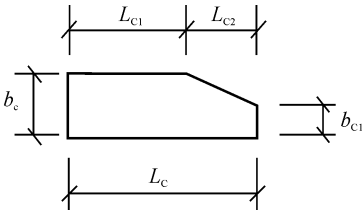


图 11 侧板尺寸示意图
Fig. 11 Schematic diagram of size

表 4 模型 CBC1~CBC5 侧板尺寸明细表
Tab. 4 List of size about CBC1~CBC5

试件 编号	L_c / mm	b_c / mm	L_{c1} / mm	L_{c2} / mm	b_{c1} / mm
CBC1	90	62	40	50	37
CBC2	110	62	60	50	37
CBC3	130	62	80	50	37
CBC4	150	62	100	50	37
CBC5	170	62	120	50	37
TH3	无侧板加强				

3.2 节点应力云图对比

图 12 示出了加侧板以后节点在往复荷载作用下达到极限承载力时的 Von Mises 应力云图。当侧板的长度 $L_c = 90$ mm 时,侧板先发生屈服变形,不能对梁柱节点起到保护作用;当 L_c 在 110~150 mm 范围内时,随着侧板长度的增加,塑性铰范围逐渐变小,说明对节点的保护作用逐渐增强;侧板长度超过 150 mm 后,应力云图基本没有什么变化。可见加侧板可以使塑性铰外移,对梁柱节点起到保护作用,满足“强柱弱梁”、“强节点,弱构件”的抗震设计原则。但当侧板长度过小时,对节点不利;侧板长度过长,对节点受力性能改变不大而且浪费钢材;可以看出侧板长度取在 $(1/2\sim 3/4)h$ 较为合理。

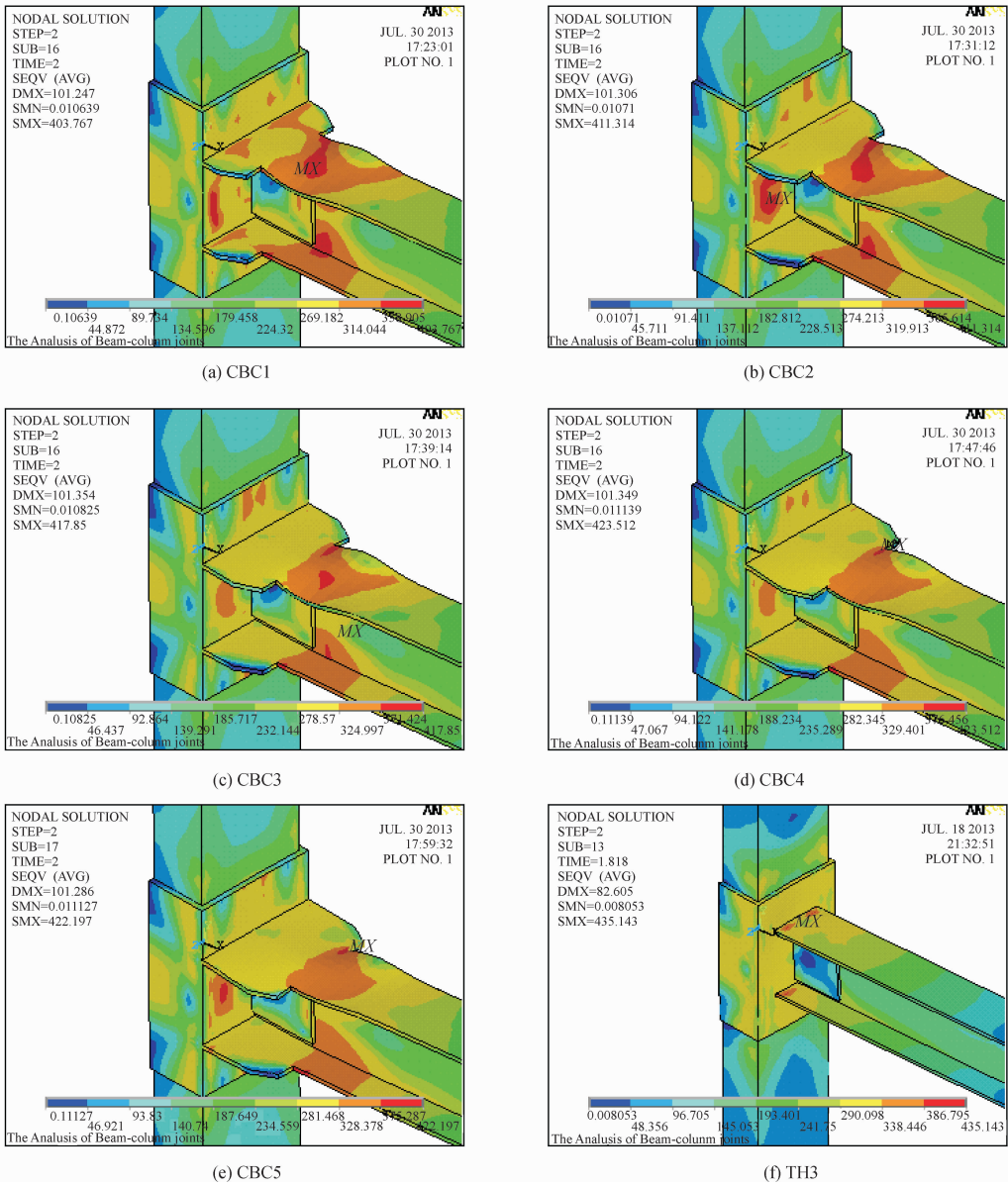


图 12 不同侧板长度的外套筒节点 Von Mises 应力云图
Fig. 12 Von Mises stress nephogram of outer shell with different L_c 's

3.3 滞回曲线对比

不同侧板长度节点在水平循环荷载作用下的滞回曲线见图 13。可以看出:滞回曲线没有捏缩现

象,均为梭形。节点加了侧板以后,滞回曲线所包围的面积比不加侧板的节点大很多,说明采用侧板对节点进行加强以后可以显著提高节点的耗能能力。

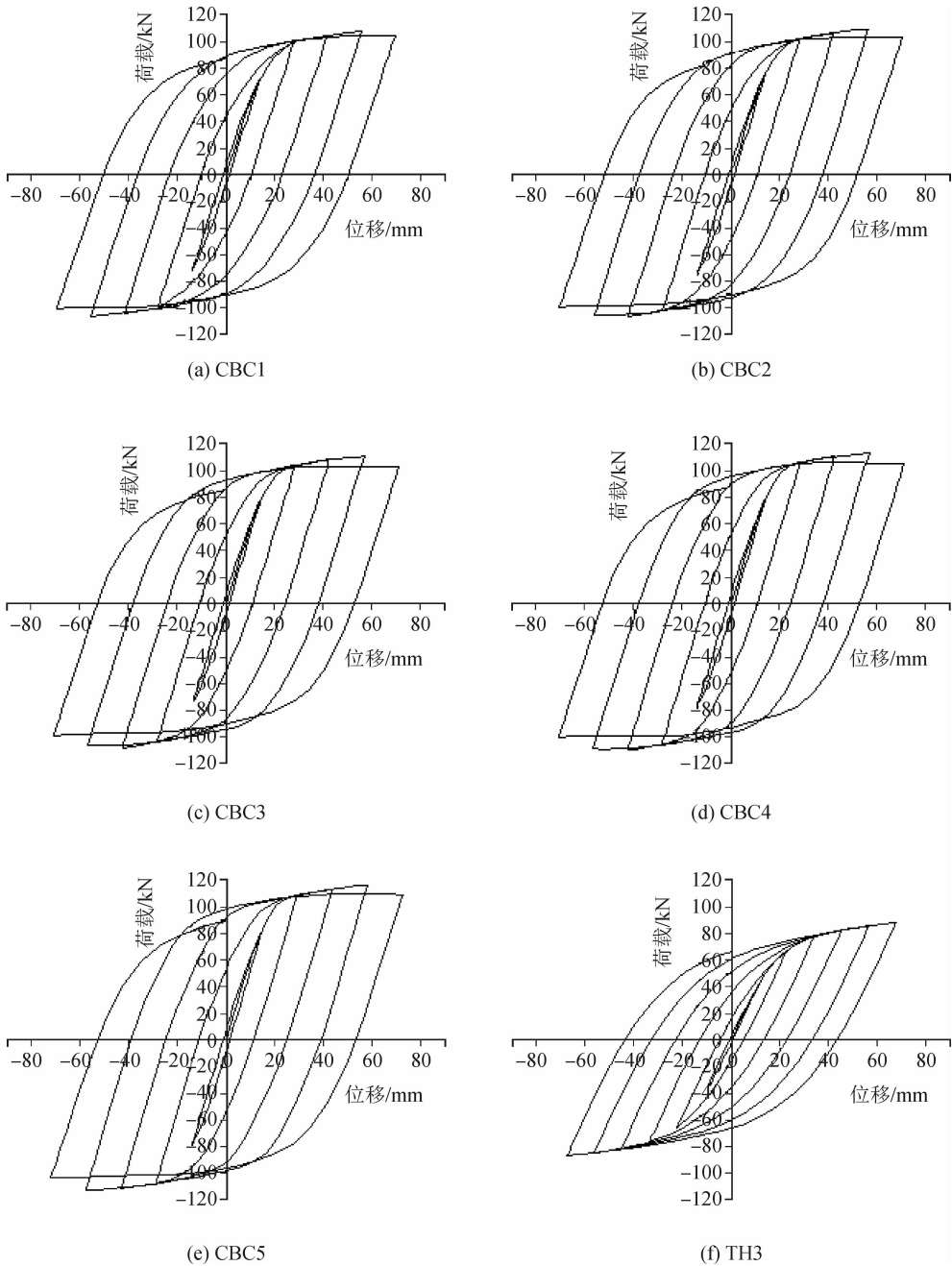


图 13 CBC1~CBC5 和 TH3 节点滞回曲线

Fig. 13 Hysteretic curves of CBC1~CBC5 and TH3

随着侧板长度的增加,滞回曲线的变化趋势基本相同,形状改变不大,这说明:虽然可以通过加侧板显著提高节点的耗能能力,但是不同侧板长度之间的区别不大,并不是侧板越长效果越好,选择合理的侧板长度不仅可以显著提高节点的受力性能,还可以减少节点用钢量。

3.4 骨架曲线对比

通过图 14 骨架曲线的对比可以得出:骨架曲线在屈服以前,加了侧板的模型曲线基本完全重合,TH3 曲线幅度较其他曲线差别较大;屈服以后 CBC1~CBC5 骨架曲线形状很接近,基本按同一趋势发展,且有下降段,极限荷载随着侧板长度的增加从 111 kN 增加到 121 kN,比没有加侧板的模型

TH3 最高增加 30%;节点模型屈服后,在荷载增加较小的情况下,位移急剧增加,说明节点具有较好的变形能力;正、反加载时节点的骨架曲线基本保持对称。总的来看,加了侧板后节点的屈服荷载、极限荷载得到了显著增强。

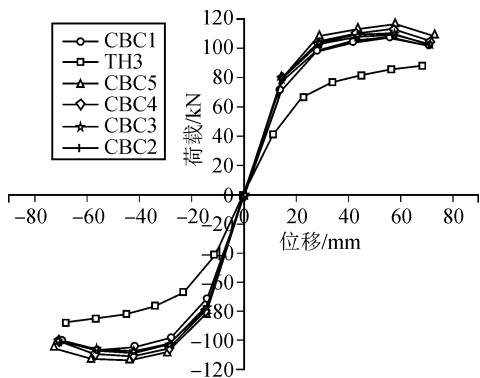


图 14 不同侧板长度节点的骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves of outer shell with different L_c 's

3.5 刚度退化对比

模型 CBC1~CBC6、TH3 的刚度退化曲线见图 15。可以看出:不同侧板长度节点的刚度退化曲线下降趋势基本相同,五条曲线近似重合。但与 TH3 的曲线相比,加了侧板后的节点刚度退化曲线明显下降较快。

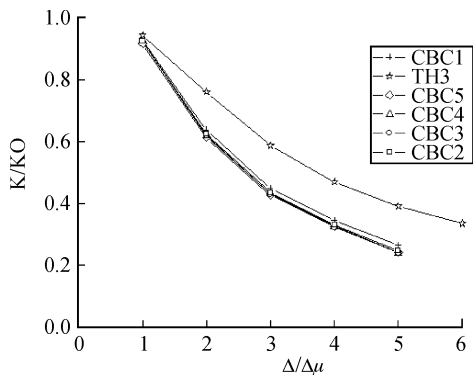


图 15 不同侧板长度节点的刚度退化曲线

Fig. 15 Stiffness degradation curves of outer shell with different L_c 's

4 结 论

论文运用 ANSYS 有限元软件对用于方钢管柱轻钢住宅结构的外套筒式连接节点进行了非线性有限元分析,将不同套筒厚度、不同侧板长度的有限元计算结果进行耗能能力、骨架曲线等方面的对比研究,得出以下结论,当然这些结论还有待于更多试验和理论分析的进一步验证。

1) 外套筒式节点用于轻钢住宅结构可以有效提高节点域的抗弯和抗剪承载力,具有较好的耗能能力。

2) 增加套筒厚度 t 可以显著增加外套筒式节点的屈服强度、极限强度、刚度以及节点延性,提高节点的耗能能力和整体抗震性能;但是套筒厚度过小,会比钢梁较早进入屈服变形阶段,不能有效提高承载力和耗能能力;套筒厚度增加到一定程度后,对节点的耗能能力和整体抗震性能的提高不大。因此套筒厚度不宜过小也不宜过大,给出以下设计建议:套筒厚度不应小于柱的壁厚,也不宜超过 2 倍柱壁厚。

3) 将节点用侧板加强以后,节点的屈服承载力、极限承载力和初始刚度均较没有加强的节点提高很多;加侧板可以使塑性铰外移,对梁柱节点起到保护作用;但当侧板长度过小时,对节点不利;侧板长度过长,对节点受力性能改变不大而且浪费钢材;侧板加强节点的刚度退化曲线下降较快;加侧板可以提高节点在各级位移荷载作用下的耗能能力。但当侧板长度达到一定值后,继续增加长度对改善节点的耗能性能和抗震性能的作用不大,反而会浪费钢材。因此建议侧板长度在 $(1/2 \sim 3/4)h$ 范围内取值较为合理。

参考文献:

- [1] 潘运成,黄炳生,杜志群. 方钢管柱-H 字钢梁套管加强式端板连接节点抗震性能分析[J]. 中国建筑金属结构, 2010,(9):28-31.
- [2] 赵兴龙,张秀华,刘晚成. H 型钢梁与方钢管柱连接框架抗侧移刚度有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(6):1119-1123.
ZHAO Xinglong, ZHANG Xiuhua, LIU Wancheng. Finite element analysis on lateral stiffness of frame connected with H-shaped steel beam and square steel tubular column[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2010, 26(6): 1119-1123.
- [3] 韩庆华,刘铭劼,芦艳. 方钢管柱-H 形钢梁铸钢连接节点力学性能分析[J]. 天津大学学报,2015,48(6):502-509.
HAN Qinghua, LIU Mingjie, LU Yan. Mechanical behavior analysis of cast steel joints connecting H-Shaped beam and square tube column[J]. Journal of Tianjin University, 2015, 48(6): 502-509.
- [4] 苏何先,陶忠,白羽,等. 钢结构柱壁套管式节点抗震性能试验[J]. 建筑结构,2015,45(3):48-52.
SU Hexian, TAO Zhong, BAI Yu, et al. Seismic behavior experiment on steel column joint with outer-

- sleeve[J]. Building Structure, 2015, 45(3): 48-52.
- [5] 万馨,刘志明,姜喜周.方钢管柱-焊接工字形钢梁钢框架隔板贯通式节点滞回性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(6): 65-69.
- WAN Xin, LIU Zhiming, JIANG Xizhou. Experimental study of hysteretic behavior of diaphragm-through joint of steel frame with square steel tube column and H-shaped steel beam[J]. Building Structure, 2014, 44(6): 65-69.
- [6] 汪胜辉,刘伟.套筒式圆钢管柱-钢梁连接节点力学性能研究[J]. 钢结构, 2015, 30(1): 21-24.
- WANG Shenghui, LIU Wei. Study on the mechanical properties of the sleeve joints of steel tubular column-steel beam[J]. Steel Constitution, 2015, 30(1): 21-24.
- [7] 刘芸,周翊,毛成超.套筒参数对 T 型管节点受力特征的影响研究[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(9): 116-122.
- LIU Yun, ZHOU Xuan, MAO Chengchao. Study on the influence of sleeve parameters on bearing capacity of T-joints[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(9): 116-122.
- [8] 李章韬,王俊平,曹勇.外套管钢管柱-H 型钢梁节点研究分析[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(10): 67-70.
- [9] 庄鹏,王燕,张茗玮.装配式方钢管柱与 H 型钢梁连接节点力学性能研究[J]. 青岛理工大学学报, 2016, 37(5): 7-12.
- ZHUANG Peng, WANG Yan, ZHANG Mingwei. Mechanics property analysis of prefabricated rectangular steel tube and H-steel-beam connection joint[J]. Journal of Qingdao Technology of University, 2016, 37(5): 7-12.
- [10] 张茗玮,王燕,舒慧.装配式钢管内套筒-T 型件梁柱节点力学性能分析[J]. 钢结构, 2015, 30(9): 12-17.
- ZHANG Mingwei, WANG Yan, SHU Hui. Mechanics property analysis of prefabricated inner sleeve-T section beam-column joint [J]. Steel Constitution, 2015, 30(9): 12-17.
- [11] 李自林,张聪,薛江,等.钢管混凝土组合结构全螺栓隔板贯通节点的抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(11): 116-123.
- LI Zilin, ZHANG Chong, XUE Jiang, et al. Experimental studies on all-bolts and diaphragm-through joint's aseismic behavior of concrete-filled steel tubular structure[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(11): 116-123.
- [12] 王燕,马强强,杨松森.装配式钢结构梁柱内套筒组合螺栓连接节点力学性能研究[J]. 天津大学学报, 2016, 49(增刊 1): 73-79.
- WANG Yan, MA Qiang, YANG Songsen. Mechanics property of beam-column connection joints using inner sleeve composite bolts in fabricated steel structure[J]. Journal of Tianjin University, 2016, 49(S1): 73-79.
- [13] 李黎明,陈以一,李宁,等.外套管式冷弯方钢管与 H 型钢梁连接节点的抗震性能[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(1): 67-71.
- LI Liming, CHEN Yiyi, Li Ning, et al. Seismic performance of outer-shell connection of cold-formed square tubular column and H-shaped steel beam[J]. Journal of Jilin University, 2010, 40(1): 67-71.
- [14] 徐斌,姚勇,邓勇军,等.新型薄壁方钢管梁柱节点试验研究及影响参数分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(3): 113-119.
- XU Bin, YAO Yong, DENG Yongjun, et al. Experiments and influence parameters analysis of new type of thin-walled square steel tube beam-column joint [J]. Industrial Construction, 2013, 43(3): 113-119.
- [15] KIM Y, SHIN K, KIM W. Effect of stiffener details on behavior of CFT column-to-beam connections[J]. International Journal of Steel Structures, 2008, 8(2): 119-133.
- [16] LI X, XIAO Y, WU Y. Seismic behavior of exterior connections with steel beams bolted to CFT columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(7): 1438-1446.
- [17] WU L, CHUNG L, WANG M, et al. Numerical study on seismic behavior of H-beams with wing plates for bolted beam-column connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(1): 97-115.
- [18] 佟道林,王明贵.钢管柱与 H 型钢梁套筒式连接节点试验研究报告[R]. 北京:中国建筑科学研究院, 2010.
- TONG Daolin, WANG Minggui. Experimental research report of outer-shell connection of square tubular column and H-shaped steel beam[R]. Beijing: China Academy of Building Research, 2010.
- [19] 姚谦峰,陈平.土木工程结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.

(责任编辑 王绪迪)