

# 屈曲约束型波形板异形柱-梁连接节点抗震性能研究

张爱林<sup>1,2</sup>, 张礼恪<sup>1</sup>, 姜子钦<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京市高层和大跨度预应力  
钢结构工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:** 为发展波形板钢异形柱的配套梁柱节点, 并满足结构震后功能修复和抗倒塌性能的需求, 本文提出一种具有可恢复功能屈曲约束型波形板异形柱-梁连接节点。通过有限元软件 ABAQUS 对 3 组节点算例进行拟静力分析, 研究关键构造参数对节点抗震性能的影响, 并提出节点承载力简化计算公式。结果表明, 新型节点属于半刚性连接节点, 具有良好的耗能能力和延性, 可以有效实现塑性铰外移, 并能实现震后功能恢复。减少翼缘螺栓数量, 节点的屈服荷载和极限荷载分别下降 34.3% 和 39.3%, 耗能机制以翼缘盖板摩擦滑移耗能为主, 累积耗能减少 38.2%。螺栓孔洞形式主要影响节点的极限荷载和耗能能力, 建议悬臂梁翼缘采用长圆孔螺栓形式, 有利于提升节点的耗能能力。建议翼缘盖板厚度取梁高的 1/20~1/16, 狗骨削弱率取 0.6~0.8, 此时节点具备足够承载能力且耗能性能良好。提出的节点屈服荷载计算公式精度较高, 可为节点设计提供参考。

**关键词:** 波形板异形柱; 梁柱节点; 可恢复功能; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号: TU352.11, TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0013-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240318001

## Study on Seismic Behavior of Buckling-Restrained Type Prefabricated Corrugated Plate Steel Special-Shaped Column-Beam Joint

ZHANG Ailin<sup>1,2</sup>, ZHANG Like<sup>1</sup>, JIANG Ziqin<sup>1,2\*</sup>

(1. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Technology Research Center of High-Rise and Large-Span Prestressed

Steel Structure, Beijing 100124, China)

\*Corresponding author: jzqb2010@163.com

**Abstract:** To develop beam-column joints with corrugated plate special-shaped column and meet the requirements for earthquake resilience and collapse resistance, this paper proposes a buckling-restrained type earthquake-resilient prefabricated corrugated plate steel special-shaped column-beam joint (BEPSCSJ). By using the finite element software ABAQUS, the pseudo-static analysis of 3 groups of models is carried out to study the influence of key structural parameters on the seismic performance of BEPSCJJs, and a simplified calculation formula for the joint bearing capacity is proposed. The results show that BEPSCJJs belong to semi-rigid connection joints, which

收稿日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(52078013)

作者简介:

张爱林(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事大跨度预应力与高层装配式钢结构方面的研究。E-mail: zhangal@bjut.edu.cn。

张礼恪(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式钢结构方面的研究。

通信作者:

姜子钦(1988—), 男, 博士, 教授, 主要从事高层装配式和高性能钢结构体系方面的研究。E-mail: jzqb2010@163.com。

have good energy dissipation capacity and ductility, and can effectively transfer plastic hinge and achieve post earthquake functional recovery. Reducing the number of flange bolts results in a 34.3% and 39.3% decrease in the yield load and ultimate load of the joint, and the energy dissipation mechanism is mainly friction and sliding energy dissipation of the flange cover plates (FCPs), with a cumulative energy dissipation reduction of 38.2%. The type of bolt holes mainly affects the ultimate load and energy dissipation capacity of the joint. It is suggested to use long slotted hole bolt form for cantilever beam flange, which is conducive to improving the energy dissipation capacity of the joint. When the thickness of the FCPS ranges from 1/20~1/16 of the beam height, and the dog bone weakening rate ranges of the FCPS from 0.6~0.8, the joint can have sufficient bearing capacity and good energy dissipation. The proposed formula for calculating the yield load of joint has high accuracy and can provide reference for the design of the joint.

**Keywords:** corrugated plate steel special-shaped column; beam-column joint; earthquake resilience; seismic performance; finite element analysis

钢异形柱结构能有效避免柱角突露,增加室内使用面积,具有自重轻、平面布置灵活的优点<sup>[1]</sup>。然而,常规钢异形柱存在受压屈曲临界力小、抗侧能力弱等问题,并且在截面高度较大时需要匹配较厚的腹板,钢材使用效率偏低,故而限制了其在高层建筑中的应用<sup>[2]</sup>。波形板是一种典型的省材板件形式,具有面外刚度大的特点,已经被广泛应用于工字形构件<sup>[3]</sup>和剪力墙<sup>[4]</sup>中。JIANG等<sup>[5]</sup>将波形板作为核心方钢管与翼缘钢板的连接件形成一种高性能波形板异形柱,波形板作为新型异形柱的腹板能有效增强异形柱的整体稳定性,进而节约钢材。为促进新型波形板钢异形柱的工程应用,有必要提出其配套的节点形式。

钢结构体系中节点的性能直接影响结构整体的安全性、可靠性和适用性。随着可恢复功能结构的提出,结构抗震的研究重点逐渐由抗倒塌设计向可修复设计转变<sup>[6]</sup>。基于损伤控制理念,在钢结构梁柱节点中设置易于更换的耗能构件是实现钢结构体系震后功能恢复的重要途径。FARRUKH等<sup>[7]</sup>设计了一种盖板拼接节点,通过盖板孔洞螺栓滑移实现耗能,并有效地转移了梁端塑性铰。邵铁峰等<sup>[8]</sup>提出一种角钢连接梁段的节点形式,角钢作为集中耗能部件起到了“保险丝”的作用,但是在大变形下,角钢的抗剪承载力不足,节点由剪切变形引起的挠度明显。张浩等<sup>[9]</sup>提出了一种带可更换低屈服点耗能梁段的钢框筒结构,该结构主要通过耗能梁段的剪切塑性变形耗散地震能量,震后残余变形小,具有良好的震后功能可恢复性。张爱林等<sup>[10-11]</sup>提出了一系列可修复功能钢结构梁柱节点,通过试验和有限元模拟研究关键构造参数对节点性能的影响。结果表明,节点的塑性损伤可控制在翼缘盖板上,便于震后修复。上述研究表明,在节点中设置可更换构件能有效利用耗能构件集中耗散地震能量,实现损伤控制,避免主体结构发生损伤。然而,在较大的层间位移角下,可更换耗能构件会发生受压屈曲,节点的承载能力下降明

显,刚度退化严重<sup>[12]</sup>。

设置屈曲约束构造可以解决受压构件发生屈曲导致承载力下降的问题。基于屈曲约束设计理念,SABBAGH等<sup>[13]</sup>提出了一种带有垂直加劲肋连接件的钢框架梁柱节点。研究表明,该节点展现出良好的耗能能力,并且连接件未发生屈曲破坏。FENG等<sup>[14]</sup>提出了一种屈曲约束翼缘盖板连接的钢框架梁柱节点。试验研究表明,该节点具有良好的承载能力与耗能能力,有效实现了屈曲约束设计理念。潘建荣等<sup>[15]</sup>提出了一种可更换屈曲约束耗能板的钢框架梁柱节点。试验研究表明,该节点具有稳定的承载能力和耗能能力,震后可以实现结构功能恢复。将屈曲约束的设计理念运用到钢结构梁柱节点可以提升节点的延性和抗震性能<sup>[16]</sup>。为提升此类节点工程实用性,应简化屈曲约束构造形式,并结合模块化设计,在保证节点可靠性的同时,提高节点的可更换性与震后可恢复性。

波形板钢异形柱通过引入波形板提高异形柱构件的整体稳定性,进而实现结构自重控制和材料成本节约。为发展波形板异形柱的配套节点,并满足震后功能修复和抗倒塌性能的需求,本文基于损伤控制和屈曲约束的设计理念,提出一种可恢复功能屈曲约束型波形板异形柱-梁连接节点。运用有限元软件ABAQUS对3组节点算例进行拟静力分析,研究关键构造参数对节点破坏模式和抗震性能的影响。

## 1 新型节点构造

波形板异形柱框架结构体系是一种抗侧承载能力优异的新型钢框架结构体系。为推广其使用,本文提出了一种适用于新型结构体系的可恢复功能屈曲约束型波形板异形柱-梁连接节点,该节点由带悬臂梁段的波形板异形柱、中间梁段及两者之间的连接装置组成。带悬臂梁段的波形板异形柱由方钢管柱、钢板、波形板、节点域加强件、悬臂梁段焊接而成,其中节点域加强件由

槽钢焊接外伸端板制成;中间梁段为H型钢梁;连接装置包括上翼缘盖板、下翼缘盖板、约束型腹板连接件及高强螺栓群。其中,约束型腹板连接件在平腹板基础上设置与梁翼缘平齐的约束板,并在约束板下部设置三角形加劲肋以增强其约束刚度。节点的详细构造如图1所示。为简化分析,本文仅对波形板异形柱一肢的配套节点进行研究。

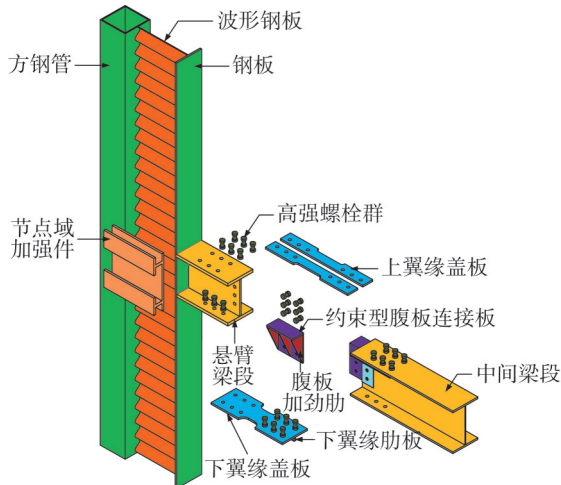


图1 新型节点装配图

Fig. 1 Assembly diagram of the joint

新型节点各部件可实现标准化设计和工业化生产,各部件间仅通过高强螺栓连接,装配效率高。悬臂梁段与中间梁段的翼缘连接采用上翼缘盖板内置、下翼缘盖板外置的连接形式,可有效解决上翼缘盖板与楼板的碰撞干涉、无法更换等问题。同时,下翼缘盖板通过设置下翼缘肋板增强其面外刚度,宜在结构装配过程中优先安装,该构造可起到临时承托中间梁段的作用,能有效提高施工效率并减少大型吊装设备的运行时间。通过设置腹板约束板和下翼缘肋板分别起到对上、下翼缘盖板的屈曲约束作用,能有效限制翼缘盖板受压时产生鼓曲变形,

避免节点承载力严重下降,提高节点的延性。通过增大悬臂梁段截面及设置节点域连接件对节点梁柱连接区进行加强,同时配合翼缘盖板狗骨削弱,将塑性铰转移到可更换的翼缘盖板上,震后通过更换翼缘盖板便可恢复建筑正常使用功能。

## 2 算例设计及模型建立

### 2.1 节点算例设计

为研究关键构造参数对节点抗震性能的影响,共设计3组节点算例,如表1所示。其中,CSCJS系列算例改变节点构造参数,CSCJT系列算例改变翼缘盖板厚度,CSCJR系列算例改变翼缘盖板狗骨削弱率。各算例异形柱尺寸相同,长度均为3000mm,由截面为200mm×10mm的方钢管、截面为200mm×12mm的钢板及波形板组成,波形板长度为200mm,厚度为2mm,波长为150mm,波幅为20mm;悬臂梁段采用长度为500mm、截面为300mm×200mm×12mm×24mm的H型钢;中间梁采用长度为1500mm、截面为300mm×200mm×6mm×12mm的H型钢;为避免中间梁段转动时与悬臂梁段发生挤压碰撞,两梁段间设置了20mm的间隙;上、下翼缘盖板的狗骨削弱率相同,上翼缘盖板未削弱段宽度为下翼缘盖板未削弱段宽度的0.4倍;下翼缘肋板的厚度与翼缘盖板相同,削弱段高度为下翼缘肋板厚度的3倍,狗骨削弱率与翼缘盖板相同;约束型腹板连接件由厚度为10mm的L形件焊接3块厚度为8mm的三角形肋板制成。翼缘螺栓和腹板螺栓均采用10.9级M22摩擦型高强螺栓。悬臂梁段翼缘螺栓孔采用横向长圆孔时,螺孔平直段长度为10mm。考虑到该节点采用上翼缘盖板内置,下翼缘盖板外置的连接形式,上翼缘盖板的截面面积小于下翼缘盖板。为使上、下翼缘盖板的承载力接近,下翼缘盖板和下翼缘肋板采用Q235钢,上翼缘盖板及其余构件采用Q355钢。算例CSCJS1的尺寸详图如图2所示。

表1 算例参数

Table 1 Parameters of models

算例名称	屈曲约束构造	节点域形式	悬臂梁翼缘螺孔	翼缘单侧螺栓数量	翼缘盖板厚度/mm	狗骨削弱率
CSCJS1	设置	加强型	长圆孔	8	18	0.8
CSCJS2	未设置	加强型	长圆孔	8	18	0.8
CSCJS3	设置	槽钢型	长圆孔	8	18	0.8
CSCJS4	设置	加强型	长圆孔	4	18	0.8
CSCJS5	设置	加强型	圆孔	8	18	0.8
CSCJT1~4	设置	加强型	长圆孔	8	14、16、18、20	0.8
CSCJR1~4	设置	加强型	长圆孔	8	16	0.6、0.7、0.8、0.9

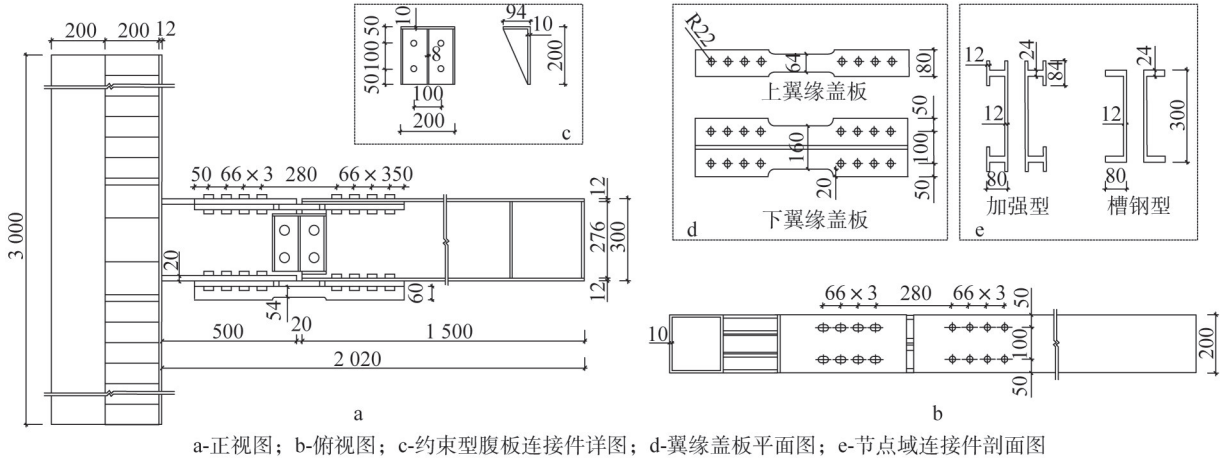


图2 算例CSCJS1详细尺寸  
Fig. 2 Detailed dimensions of model CSCJS1

### 2.2 有限元模型

采用有限元分析软件ABAQUS建立节点的有限元模型,模型各部件均采用三维实体单元C3D8R模拟。对模型的节点拼接区和节点域进行网格加密,翼缘盖板沿厚度方向划分为四层单元,其余构件沿厚度方向至少划分为两层单元。钢材本构采用双折线模型,弹性模量 $E_s$ 取206 GPa,泊松比为0.3,屈服后强化段切线模量与弹性模量之比为2%。根据高强螺栓直径,按《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[17]</sup>对各模型螺栓施加预紧力。节点中焊接连接采用绑定约束模拟,各板件间的接触设置为摩擦接触,摩擦系数取0.45;螺栓杆与螺栓孔壁、悬臂梁与中间梁之间设置为硬接触。节点有限元模型如图3所示。

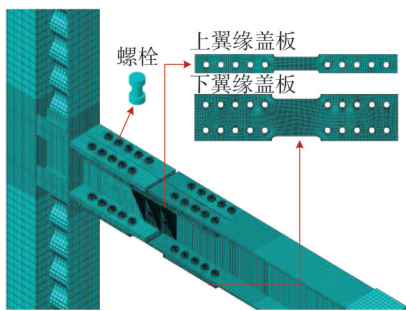


图3 节点有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of joint

在波纹板异形柱上、下柱端设置刚性垫块,并在其截面形心处设置铰接边界条件,同时在柱顶端施加轴压比为0.3的轴压力并保持恒定;在中间梁段端部设置刚性垫块,对其中心位置采用位移控制加载,规定位移向下为正,同时对中间梁设置侧向约束,防止钢梁发生面外失稳。加载制度参考美国AISC抗震规范<sup>[18]</sup>推荐的加载制度并进行简化,如图4所示。

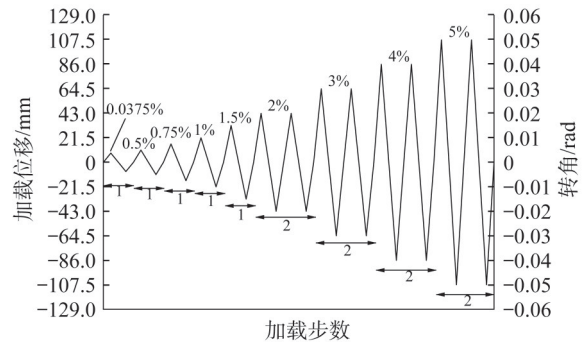


图4 加载制度  
Fig. 4 Loading system

## 3 有限元模拟结果及分析

### 3.1 破坏模式对比

图5为算例CSCJS1在节点转角达到0.05 rad时的应力云图。从图中可以看到,上、下翼缘盖板均已进入塑性,但未发生明显的屈曲变形。悬臂梁段、中间梁段和波形板异形柱的应力仍保持在弹性范围内。悬臂梁段与中间梁段之间留有20 mm的缝隙,使得中间梁可以发生较大转动,并且梁段间未发生接触挤压。

算例CSCJS2未设置屈曲约束构造,如图6所示,达到0.05 rad转角时,翼缘盖板发生明显的屈曲变形,节点承载力下降,主体构件的整体应力值偏小。同时,翼缘盖板失稳后,腹板拼接板节点拼接处承担的弯矩增加,导致腹板拼接板部分区域进入塑性。

算例CSCJS5节点域设置为槽钢型,如图7所示,此时节点域处的槽钢翼缘和大面积的波形板进入塑性,对震后功能恢复造成不利影响。

其余算例破坏形态与CSCJS1类似。上述结果表明,通过削弱翼缘盖板可将塑性铰转移至梁段拼接处,保证了主体构件不发生破坏。屈曲约束构造有效限制了翼

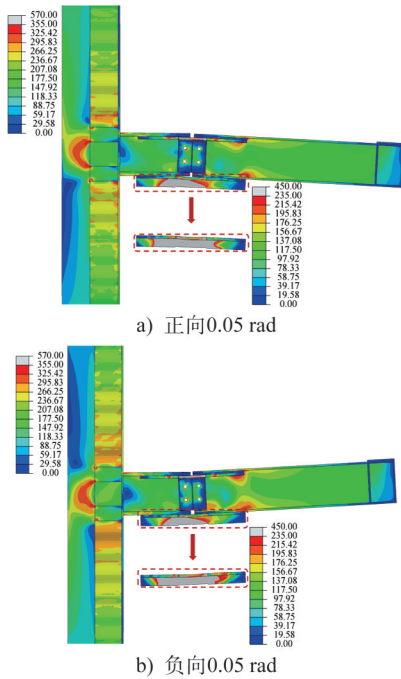


图5 算例 CSCJS1 应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress contour of model CSCJS1 (unit:MPa)

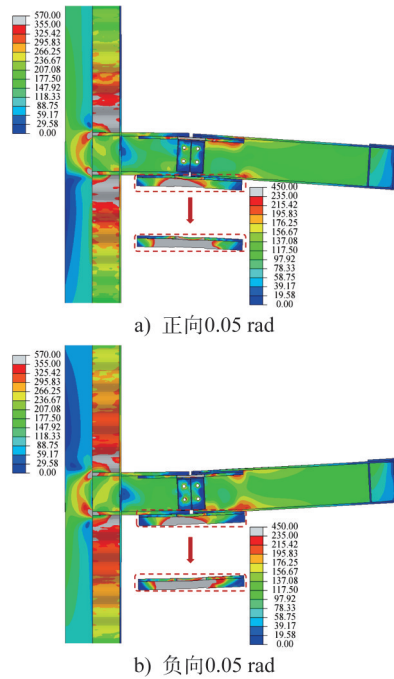


图7 算例 CSCJS5 应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Stress contour of model CSCJS5 (unit:MPa)

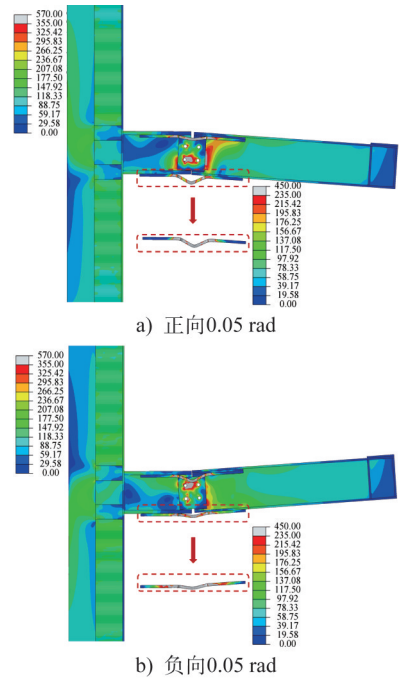


图6 算例 CSCJS2 应力云图(单位:MPa)

Fig. 6 Stress contour of model CSCJS2 (unit:MPa)

缘盖板屈曲变形,更换翼缘盖板即可实现震后恢复。设置节点域加强件能有效避免节点域发生破坏,满足震后可修复的需求。

### 3.2 滞回曲线对比

图8a)为设置不同构造措施算例的滞回曲线。从图中可以看到,各算例的滞回曲线基本对称。其中,算例

CSCJS1的滞回曲线稳定饱满,呈纺锤形。算例CSCJS2由于未设置屈曲约束构造,翼缘盖板失稳后,各级荷载逐渐下降,滞回曲线斜率逐渐减小,刚度不断退化。算例CSCJS3在加载后期节点域进入塑性,并且塑性损伤不断累积,导致其耗能和承载力相较于算例CSCJS1出现一定程度降低。算例CSCJS4的翼缘螺栓数量偏少,翼缘盖板较早发生滑移,导致节点屈服荷载偏低,滞回曲线较为扁平且捏缩严重。算例CSCJS5的悬臂梁段螺栓孔洞采用圆孔,螺杆与螺孔更容易发生挤压,使得其在0.04 rad和0.05 rad转角时的承载力都大于算例CSCJS1的承载力。同时,算例CSCJS5翼缘盖板的滑移量较小,主要通过翼缘盖板产生塑性损伤进行耗能,其滞回曲线呈梭形。

由图8b)和图8c)可以看到,CSCJT和CSCJR系列算例的滞回曲线形状基本一致,均呈现为较为饱满的纺锤形。增大翼缘盖板厚度或增加狗骨削弱率,节点的承载力上升,但滞回曲线饱满程度变化并不明显。

### 3.3 骨架曲线对比

CSCJS系列算例的骨架曲线如图9a)所示,各算例的骨架曲线在弹性阶段为直线且基本吻合。随着加载位移增大,算例CSCJS2在翼缘盖板屈曲后骨架曲线出现明显的下降段;算例CSCJS4的翼缘螺栓数量偏少,其屈服荷载和极限荷载均较小。其它算例在进入弹塑性阶段后,节点承载力呈现缓慢上升趋势,其中算例CSCJS3在加载后期由于节点域出现塑性,相较于算例CSCJS1,其

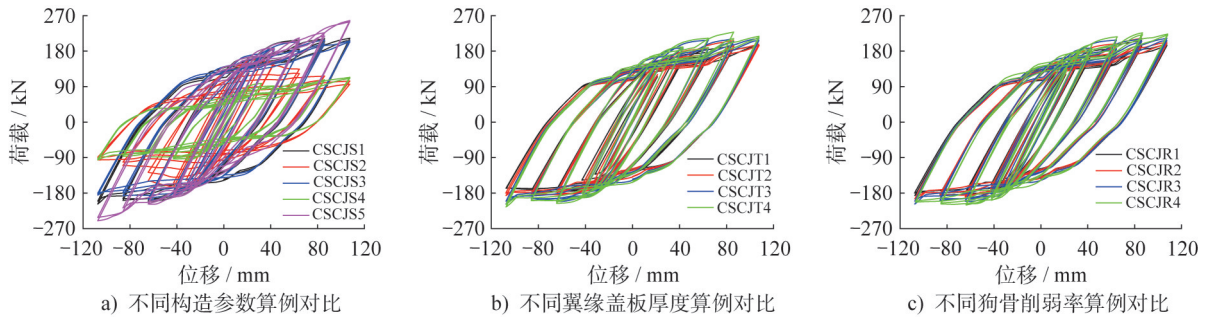


图8 算例滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of models

承载力出现一定程度降低。算例 CSCJS5 的悬臂梁翼缘采用圆形螺孔,螺栓杆与孔壁间的挤压接触较早,其骨架曲线在节点屈服后一直增长,节点的极限承载力最大。

由图 9b) 和图 9c) 可以看到,增加翼缘盖板厚度或狗骨削弱率,节点的初始刚度和承载力增大,其中翼缘盖板厚度的影响程度更大。

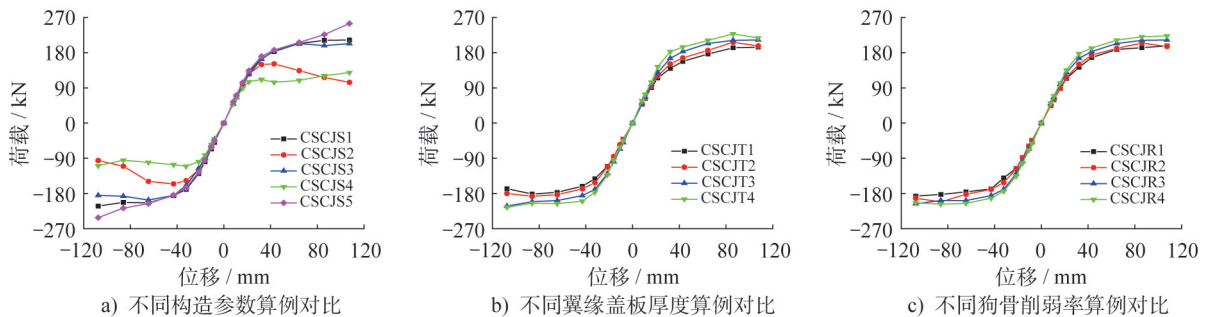


图9 算例骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of models

### 3.4 延性和耗能能力对比

采用最远点法<sup>[19]</sup>确定各算例的屈服点,计算各算例的位移延性系数如表 2 所示。从表中可以看到,设置屈服约束构造的节点算例其延性系数均大于 3.0,说明此类节点延性较好。算例 CSCJS4 的位移延性系数最大,可见减少翼缘螺栓数量可以提高节点延性。但相较于算例 CSCJS1,算例 CSCJS4 的屈服荷载和极限荷载分别下降 34.3% 和 39.3%。

对比图 10 和表 2 中各算例的累积耗能可知,算例 CSCJS1~5 在加载初期耗能相差不大,后三个加载级耗能的差异较为明显。其中,算例 CSCJS1 主要通过翼缘盖板塑性变形和板件间摩擦滑移相结合的双重机制进行耗能,其总耗能最高;算例 CSCJS2 在翼缘盖板屈曲后,节点承载力下降,滞回环包围面积减少,总耗能量相较于算例 CSCJS1 减少 23.9%;算例 CSCJS3 在节点域进入塑性后,其承载力出现降低,其累积耗能相较于算例 CSCJS1 减少 3.9%;算例 CSCJS4 主要以翼缘盖板摩擦滑移进行耗能,并且其承载能力小于算例 CSCJS1,导致其累积耗能减少 38.2%;算例 CSCJS5 通过翼缘盖板塑

性变形和板件间摩擦滑移双重耗能,其总耗能相较于算例 CSCJS1 减少 6.3%,主要是由于悬臂梁段螺栓孔为圆孔,翼缘盖板的滑移量较小,滑移耗能相对较少。同时,对比 CSCJT 和 CSCJR 系列算例的累积耗能可知,增加翼缘盖板厚度或狗骨削弱率,节点的累积耗能均呈现上升趋势,其中增加翼缘盖板厚度对节点累积耗能的提升幅度更大。

计算各算例最大加载级的等效黏滞阻尼系数<sup>[20]</sup>,如表 2 所示。其中,算例 CSCJS4 在加载后期以翼缘盖板摩擦滑移耗能为主,其等效黏滞阻尼系数相较算例 CSCJS1 出现了下降。算例 CSCJS5 因悬臂梁段螺栓孔为圆孔,导致其滑移耗能相对较少但极限荷载最大,其等效黏滞阻尼系数在最大加载级下最小,其余算例的等效黏滞阻尼系数在最大加载级下基本为 0.3 左右,耗能能力较好。当翼缘盖板厚度或狗骨削弱率过大时,等效黏滞阻尼系数出现了下降趋势。因此,建议翼缘盖板厚度取值为  $h_b/20 \sim h_b/16$  ( $h_b$  为梁高),狗骨削弱率为 0.6~0.8,此时节点具备足够承载能力且耗能性能良好。

表2 节点延性和耗能能力指标

Table 2 Ductility and energy dissipation indicators of models

算例	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	极限位移/mm	极限荷载/kN	延性系数	累积耗能/kJ	等效黏滞阻尼系数/%
CSCJS1	27.3	153.5	107.5	212.7	4.0	178.7	32.3
CSCJS2	26.3	136.8	43.0	151.6	1.7	136.0	35.3
CSCJS3	28.4	150.1	107.5	203.4	3.8	171.7	29.2
CSCJS4	19.8	100.9	107.5	129.2	5.5	110.4	26.6
CSCJS5	27.1	153.7	107.5	254.9	4.0	167.5	22.1
CSCJT1	25.3	122.5	86.0	181.5	3.4	171.5	35.7
CSCJT2	26.8	138.4	86.0	187.2	3.2	175.6	32.9
CSCJT3	27.3	153.5	107.5	212.7	4.0	178.7	32.3
CSCJT4	28.1	168.7	86.0	228.4	3.1	183.6	28.7
CSCJR1	26.5	127.8	107.5	197.7	4.1	171.6	34.0
CSCJR2	27.6	136.7	86.0	204.1	3.1	173.5	31.5
CSCJR3	27.3	153.5	107.5	209.3	4.0	178.7	32.3
CSCJR4	27.3	163.8	107.5	212.7	4.0	180.1	29.8

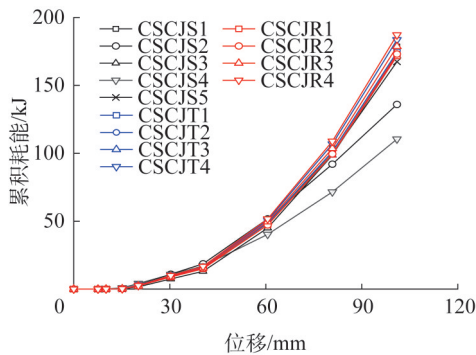


图10 累积耗能曲线

Fig. 10 Accumulative energy dissipation curves

### 3.5 节点分类

参照欧洲规范<sup>[21]</sup>对节点的刚度和强度进行分类。根据各节点算例的骨架曲线,按照无侧移框架和有侧移框架得到节点的刚度分类曲线,如图11a)和b)所示。其中, $M_p$ 为中间梁全截面塑性弯矩,最大塑性转角理论值 $\theta_p = M_p l_b / (E_s I_b)$ , $I_b$ 为中间梁截面惯性矩, $l_b$ 为梁总长度。从图中可以看到,按节点刚度进行分类,所有节点算例都属于半刚性连接节点。基于节点连接强度分类,算例CSCJS4由于翼缘连接螺栓较少,其承载能力由螺栓滑移控制, $M/M_p$ 处于0.25~1.0之间,为欠强连接。其余算例均属于全强度连接节点,翼缘盖板强度得到充分发挥。

## 4 承载力简化计算方法

由前述分析可知,翼缘连接螺栓数量足够时,节点承

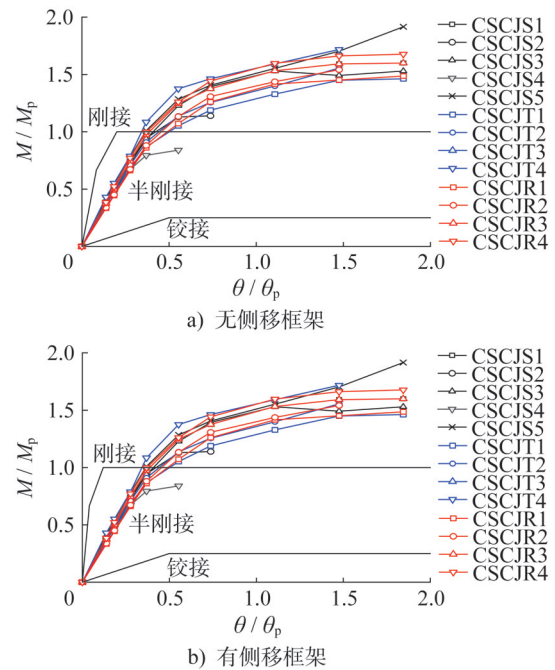


图11 节点刚度分类曲线

Fig. 11 Stiffness classification curves of joints

载力由翼缘盖板控制。此时,节点屈服荷载 $P_y$ 为翼缘盖板屈服时所对应的梁段荷载,可按式(1)计算。式中, $I_{cov}$ 为上、下翼缘盖板组合截面惯性矩; $f_{y,cov1}$ 和 $f_{y,cov2}$ 分别为上、下翼缘盖板屈服强度; $h_{cov1}$ 和 $h_{cov2}$ 分别为上、下翼缘盖板外边缘至翼缘盖板组合截面中和轴的竖向距离; $l_{mb}$ 为中间梁长度; $\xi$ 为修正系数,取1.25,考虑了腹板对节点拼接区的抗弯贡献,以及偏保守地以翼缘盖板边缘纤维屈服计算节点的屈服荷载。

$$P_y = \min\left(\frac{\xi I_{cov} f_{y,cov1}}{h_{cov1} L_{mb}}, \frac{\xi I_{cov} f_{y,cov2}}{h_{cov2} L_{mb}}\right) \quad (1)$$

用式(1)计算表1中所有算例的屈服荷载值,并与模拟值进行对比,如图12所示。算例CSCJS4的屈服荷载由螺栓滑移控制,式(1)求得的屈服荷载误差较大。其余算例屈服荷载计算值与模拟值的误差基本在5%以内,计算公式的精度较高。

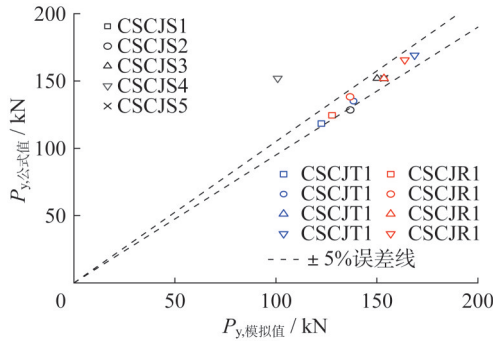


图12  $P_y$ 理论公式精度

Fig. 12 Theoretical formula accuracy of  $P_y$

## 5 结论

本文提出了一种可恢复功能屈曲约束型波形板异形柱-梁连接节点,共设计了3组节点算例,对其滞回性能进行模拟分析,得到以下主要结论:

(1) 可恢复功能屈曲约束型波形板异形柱-梁连接节点属于半刚性节点,具有良好的耗能能力,可以有效实现塑性铰外移,使主体构件免于发生破坏,且只需更换翼缘盖板及螺栓群即可恢复其使用功能。通过设置腹板约束板和下翼缘肋板能有效避免上、下翼缘连接盖板受压时发生屈曲,提高节点的延性。设置节点域加强件能有效避免节点域发生破坏,有利于实现震后可修复功能。

(2) 翼缘连接盖板上的螺栓数量直接影响节点的滑移荷载和滑移时刻。翼缘连接盖板上的螺栓数量较少时,节点的屈服荷载和极限荷载明显较小,耗能机制以翼缘连接盖板摩擦滑移耗能为主,耗能能力较差。螺栓孔洞形式主要影响节点的极限荷载和耗能能力。建议悬臂梁翼缘的螺栓孔采用长圆孔形式,有利于实现翼缘连接盖板塑性变形和板件间摩擦滑移相结合的双重耗能,提升节点的耗能能力。

(3) 翼缘螺栓数量足够时,节点的承载能力和耗能能力由翼缘盖板控制。建议翼缘盖板的厚度取  $h_b/20 \sim h_b/16$  ( $h_b$  为梁高),狗骨削弱率取  $0.6 \sim 0.8$ ,此时节点可具备足够承载能力且耗能性能良好。

(4) 所提出的新型节点屈服承载力简化计算方法精度较高,可为节点设计提供理论依据。

## 参考文献:

- [1] 张爱林,于劲,李健,等.低周反复荷载作用下T形截面钢异形柱-钢梁节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(7):118-126.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2011.07.017.  
ZHANG Ailin, YU Jin, LI Jian, et al. Experimental research on seismic behavior of steel specially shaped column with T-shaped section to steel beam connections under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 118-126. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.07.017. (in Chinese)
- [2] 陈志华,杜颜胜,吴辽,等.矩形钢管混凝土结构研究综述[J].建筑结构,2015,45(16):40-46,76.DOI:10.19701/j.jzjg.2015.16.009.  
CHEN Zhihua, DU Yansheng, WU Liao, et al. Review of the research on rectangular concrete-filled steel tube structures[J]. Building Structure, 2015, 45(16): 40-46, 76. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.16.009. (in Chinese)
- [3] 童乐为,赵珍珠,左国稷,等.波纹腹板钢梁疲劳性能研究现状与未来发展思考[J].建筑结构学报,2023,44(9):124-134.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0606.  
TONG Lewei, ZHAO Zhenbei, ZUO Guoji, et al. Current situation and future development consideration of research on fatigue behavior of corrugated-web steel girders[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 124-134. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0606. (in Chinese)
- [4] 余玉洁,赵风涛,郭风琪.钢管混凝土柱-横肋波纹板剪力墙抗侧性能分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(12):1243-1253.DOI:10.11784/tdxbz202003048.  
YU Yujie, ZHAO Fengtao, GUO Fengqi. Analysis of lateral resisting behavior of horizontally corrugated steel plate shear wall with concrete-filled steel tube frame[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(12): 1243-1253. DOI: 10.11784/tdxbz202003048. (in Chinese)
- [5] JIANG Z Q, NIU Z Y, ZHANG A L, et al. Design method of axial compression stability for cross-section corrugated plate steel special-shaped column[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 194: 111243. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111243.
- [6] 吕西林,陈云,毛苑君.结构抗震设计的新概念:可恢复功能结构[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):941-948.DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.07.001.  
LYU Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural seismic design: Earthquake resilient structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 941-948. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2011.07.001. (in Chinese)
- [7] FARROKHI H, DANESH F, ESHGHI S, et al. A modified moment resisting connection for ductile steel frames (Numerical and experimental investigation)[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10): 2040-2049. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.019.
- [8] 邵铁峰,陈以一.采用耗能角钢连接的部件可更换梁试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(7):38-45.DOI:10.14006/j.

- jzjgxb.2016.07.005.  
SHAO Tiefeng, CHEN Yiyi. Experimental study on steel H-beams with replaceable energy dissipation angle[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(7): 38-45. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.07.005. (in Chinese)
- [9] 张浩, 连鸣, 苏明周, 等. 带可更换低屈服点耗能梁段-端板连接的钢框筒结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 28-42. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.20200211.002.  
ZHANG Hao, LIAN Ming, SU Mingzhou, et al. Experimental study on seismic behavior of steel framed-tube structure with end-plate connected replaceable shear links made of low yield point steel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(7): 28-42. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.20200211.002. (in Chinese)
- [10] ZHANG A L, LI S H, JIANG Z Q, et al. Design theory of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web beam-column joint[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 665-673. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.088.
- [11] 姜子钦, 牛子尧, 张爱林, 等. 翼缘盖板外置型可恢复功能装配式钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(6): 138-147, 159. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0754.  
JIANG Ziqin, NIU Ziyao, ZHANG Ailin, et al. Experimental study of earthquake-resilient prefabricated steel frame with external flange cover plates[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(6): 138-147, 159. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0754. (in Chinese)
- [12] LIU C Y, WU J, XIE L Q. Seismic performance of buckling-restrained reduced beam section connection for steel frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 181: 106622. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106622.
- [13] SABBAGH A B, CHAN T M, MOTTRAM J T. Detailing of I-beam-to-CHS column joints with external diaphragm plates for seismic actions[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88: 21-33. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.006.
- [14] FENG Y L, WEN H, JIANG Q, et al. Experimental and numerical investigations of beam-to-column joints with a double-core buckling-restrained connector [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104225. DOI: 10.1016/j.job.2022.104225.
- [15] 潘建荣, 陈鹏, 胡方鑫, 等. 可更换屈曲约束耗能板的钢框架梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增刊2): 180-187. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2023.S2.0018.  
PAN Jianrong, CHEN Peng, HU Fangxin, et al. Experimental study on seismic behavior of steel beam-to-column joints with replaceable buckling-restrained fuse plates[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44 (Suppl. 2): 180-187. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2023.S2.0018. (in Chinese)
- [16] 冯玉龙, 朱毅, 种迅, 等. 屈曲约束型钢框架节点抗震性能研究综述[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(12): 1-11, 21. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.12.001.  
FENG Yulong, ZHU Yi, CHONG Xun, et al. Research review on the seismic performance of buckling-restrained steel frame joints[J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(12): 1-11, 21. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.12.001. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [18] American Institute of Steel Construction. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 341-16[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [19] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.  
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192. (in Chinese)
- [20] 王燕, 倪延顺, 杨怡亭. 过焊孔衬板对梁柱节点断裂性能影响的试验研究和力学性能分析[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(3): 48-59, 66. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.03.006.  
WANG Yan, NI Yanshun, YANG Yiting. Experimental and analytical research on the influence of weld backing bars on fracture properties of beam-to-column joints[J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(3): 48-59, 66. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.03.006. (in Chinese)
- [21] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-8: Design of Joints: EN 1993-1-8[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.