

方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点有限元分析

索楠¹, 秦敬韩¹, 王亮², 周小龙²

(1. 青岛能源设计研究院有限公司, 青岛 266024; 2. 青岛农业大学 建筑工程学院, 青岛 266109)

摘要:为研究新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点的抗震性能,通过 ABAQUS 有限元软件对该节点进行数值模拟,在验证建模方法准确性的基础上,对该节点的应力分布、塑性分布等进行分析,揭示了该节点的传力路径及破坏机制。在此基础上,进一步分析了盖板厚度及长度、狗骨段长度、狗骨削弱尺寸等参数对该节点抗震性能的影响规律,提出该节点的构造建议。结果表明:新型狗骨式钢梁套筒连接节点通过其构造形式有效将塑性铰外移至狗骨削弱梁截面,节点域基本保持弹性状态,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”抗震设计思想。其拉压力依次通过梁翼缘、盖板、套筒等构件传入节点核心区,剪力通过梁腹板、抗剪连接件、套筒等构件传入节点核心区,具有传力路径明确且可靠等优势。建议盖板厚度取 0.78~1.00 倍钢梁翼缘厚度,盖板长度取 1.8~2.0 倍钢梁翼缘宽度;狗骨段长度取 0.66~0.93 倍钢梁翼缘宽度,狗骨削弱尺寸取 0.55~1.67 倍钢梁翼缘厚度。

关键词:方钢管混凝土;狗骨式钢梁;套筒连接节点;抗震性能;有限元分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)04-0066-11

Finite element analysis of CFSST-dogbone steel beam sleeve joint

SUO Nan¹, QIN Jinghan¹, WANG Liang², ZHOU Xiaolong²

(1. Qingdao Energy Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266024, China;

2. School of Architecture and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: To study the seismic performance of a new concrete-filled square steel tube (CF-SST)-dogbone steel beam sleeve joint, the joint was numerically simulated using the ABAQUS finite element software. After verifying the accuracy of the modeling method, the stress and plastic distribution of the joint were analyzed, revealing the transmission path and failure mechanism of the joint. Based on this, the influence laws of the cover plate thickness and length, the length and weakening dimensions of the dogbone section on the seismic performance of the joint were further analyzed, and construction suggestions were proposed. The results show that the new dogbone steel beam sleeve joint effectively moves the plastic hinge outside to the dogbone weakened beam section through its construction form, and the node area remains in an elastic state, which meets the seismic design concept of “strong columns and weak beams, strong nodes and weak members.” The compressive and tensile forces are transmitted through the beam flange, cover plate and sleeve, etc. in sequence into the node core area, the shear forces are transmitted through the beam cover plate, shear con-

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023ME044)

作者简介: 索楠(1986—),男,内蒙古包头人。硕士,高级工程师,主要从事钢结构、钢与混凝土组合结构等方面的研究。

E-mail: 343861126@qq.com。

nection components and sleeve, etc. into the node core area, which has the advantages of clear transmission path and reliable transmission. It is suggested that the cover plate thickness be 0.78-1.00 times the thickness of the beam flange, and the cover plate length be 1.8-2.0 times the width of the beam flange, the length of the dogbone section be 0.66-0.93 times the width of the beam flange, and the dogbone weakening dimensions be 0.55-1.67 times the thickness of the beam flange.

Key words: concrete-filled square steel tubes; dogbone steel beam; sleeve joint; earthquake resistant behavior; finite element analysis

方钢管混凝土结构具有较高的承载力、良好的塑性和韧性、优异的抗震性能和耐火性能等优点,在多层和高层建筑中得到广泛应用。方钢管混凝土柱-钢梁节点承受着复杂的力学作用,在结构中起着传递和分配内力、确保结构整体性的关键作用。节点的性能直接影响着结构的安全可靠性,因此是方钢管混凝土结构中的重要技术之一。

学者们在研究对方钢管混凝土柱-钢梁节点进行了多方面的探索。QIN等^[1-2]通过抗震性能试验提出了节点的抗弯、抗剪承载力公式。WANG等^[3]进行了双层钢管混凝土柱钢梁的抗震性能研究,并提出了相应的设计建议。潘建荣等^[4]对节点构造方案进行了试验研究。姜子钦等^[5]研究了翼缘盖件外置型可恢复功能装配式钢框架抗震性能。宗周红等^[6]采用有限元非线性分析了方钢管混凝土梁柱连接节点的滞回性能和破坏机制。周天华等^[7]通过对带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点进行设计研究,提出了节点设计建议。吕西林等^[8]对方钢管混凝土柱与钢梁连接提出了设计方法。黄炳生等^[9]通过理论分析了节点的抗震性能和传力机制。徐桂根等^[10]通过试验研究发现了梁柱连接区焊缝断裂问题。陈庆军等^[11]对柱不贯通式节点的抗震性能进行试验研究,提出该节点形式的抗震设计建议。

本文提出一种新型方钢管混凝土柱-狗骨式套筒连接节点形式,该节点的设计特点为核心套筒的外延盖板,既可以作为临时支撑,也可以用于定位,从而便于各部件的快速安装和施工操作。此外,该节点还具有传力路径简单、震后易修复更换等优点。本文对新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点进行了低周往复循环加载有限元模拟,研究了盖板厚度、盖板长度、狗骨段长度、狗骨削弱尺寸等因素对节点抗震性能的影响,并探讨了其在屈服及破坏阶段的演化规律。

1 节点构造与设计

1.1 节点构造与施工流程

在综合评估现有节点形式优缺点的基础上,基于塑性铰外移理论,提出了一种新型狗骨式削弱连接节点。该狗骨式套筒连接节点由方钢管混凝土柱、狗骨式削弱钢梁和核心套筒3个部分组成。方钢管混凝土柱与H形狗骨式削弱钢梁通过核心套筒连接而成。狗骨式套筒连接节点的各部件均可在工厂进行预制,现场组装,具有安装工艺简单、装配化程度高的优点。节点安装之前,将核心套筒通过上下两侧角焊缝焊接至方钢管外部,核心套筒上外伸盖板与钢梁通过高强螺栓连接。施工现场进行钢梁吊装时,可将钢梁推至外伸部分,将梁腹板与抗剪连接件对准后通过高强螺栓与核心套筒进行连接^[12]。待节点组装完毕,再通过拧紧高强螺栓完成组装。方钢管混凝土柱-狗骨式套筒连接节点组成如图1所示。在施工现场进行节点安装时,新型狗骨式套筒连接节点的外伸盖板发挥了临时支撑的作用,有利于钢梁的安装和螺栓对中,且核心套筒在工厂中提前焊接,焊缝质量得以保证。

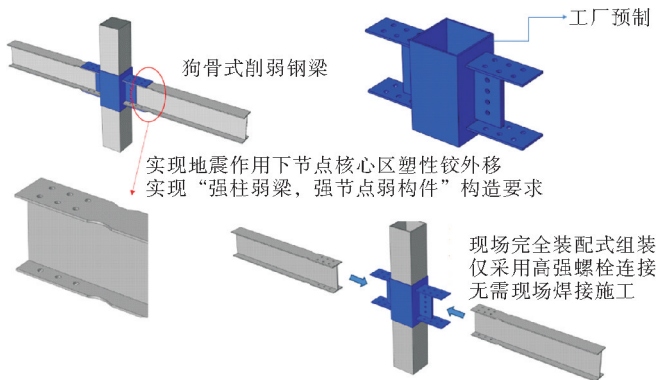


图1 方钢管混凝土柱-狗骨式套筒连接节点组成

1.2 节点设计原理

新型狗骨式套筒连接节点属于梁端削弱节点,其设计原理与加强型节点设计原理相似,如图2所示。梁端外荷载在钢梁某点处产生的弯矩 M 与该点到梁端的距离呈正相关。若钢梁截面无变化,则钢梁的抗弯承载力 M_u 保持不变,原塑性铰应产生在 M/M_u 值的最大处,即节点核心区。通过设置狗骨式钢梁截面,对钢梁进行削弱,使削弱段钢梁的强度降低,从而使得塑性铰由节点核心区转移到狗骨钢梁截面处,实现了塑性铰的外移。

选取中柱节点形式,H型钢梁尺寸 $300\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}\times 9\text{ mm}$,方钢管柱尺寸 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,螺栓等级为M22摩擦型高强螺栓。经验算,梁、柱的设计均满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[13]规定的“强柱弱梁,强节点弱构件”的设计要求。各部件间的螺栓孔间距满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[14]规定的尺寸要求。各部件尺寸见图3。

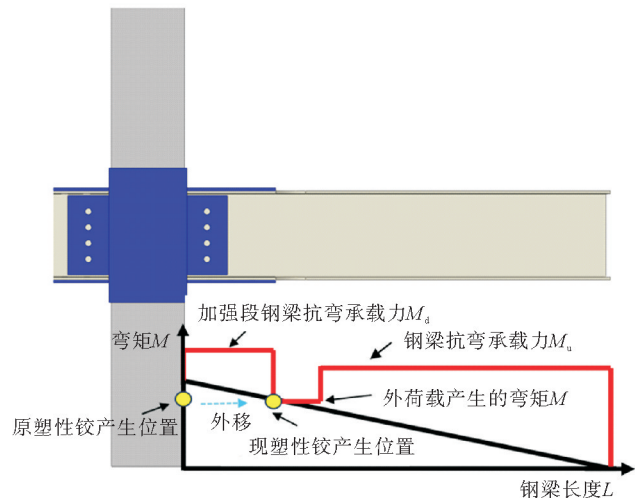


图2 狗骨式套筒连接节点设计原理

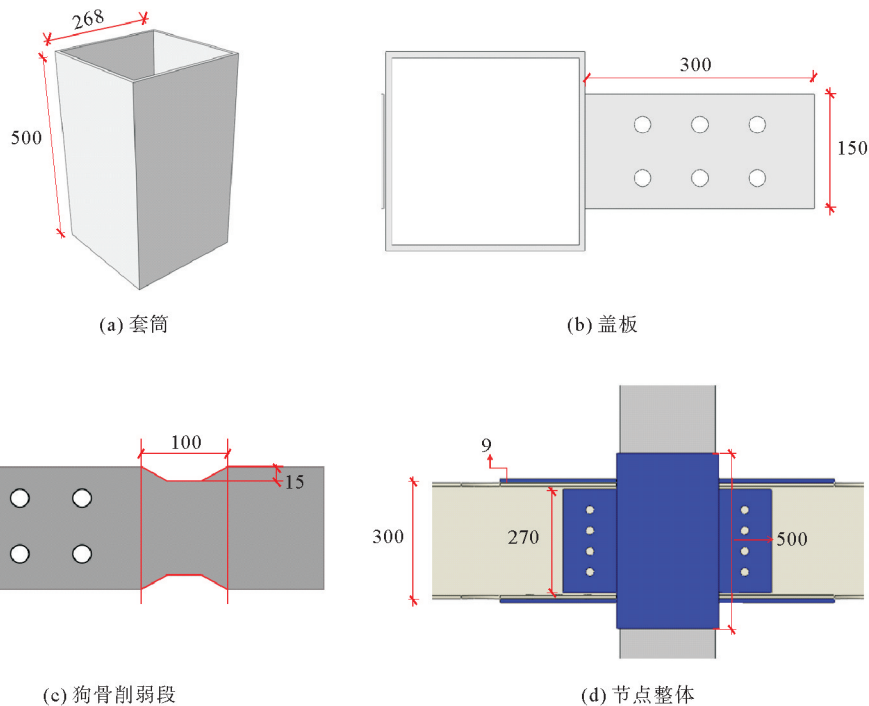


图3 各部件尺寸(单位:mm)

2 有限元模型建立及验证

2.1 材料本构关系

方钢管采用Q460高强钢,弹性模量为 $2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比为0.3,采用二折线本构;其余连接件及钢梁均采用Q355钢材,弹性模量为 $2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比为0.3,采用五折线本构。螺栓采用M22高强摩擦型螺栓,屈服强度为970 MPa,极限强度为1100 MPa,采用二折线本构。计算中所有钢材均使用Von-Mises屈服准则及相关联的流动法则。混凝土强度等级为C60,采用塑性损伤模型,本构关系采用韩林海^[15]建议的约束混凝土应力-应变曲线。

典型节点模型尺寸参数为钢管尺寸 250 mm×250 mm×8 mm、钢梁尺寸 300 mm×150 mm×6.5 mm×9 mm、盖板厚度 9 mm、盖板长度 300 mm、狗骨段长度 100 mm 以及狗骨削弱尺寸 15 mm。

2.2 模型建立

有限元模型的边界条件、网格划分及接触关系如图 4 所示,其中 U_1 、 U_2 、 U_3 为 x 、 y 、 z 方向上的位移, U_{R1} 、 U_{R2} 、 U_{R3} 为 x 、 y 、 z 方向上的转角。钢管、混凝土、盖板、抗剪连接件、钢梁以及螺栓均采用 C3D8R 实体单元,为了防止减缩积分单元变形时产生沙漏现象,对各单元采用沙漏增强模式。钢梁与钢管、套筒与钢管之间采用 Tie 约束,钢管与混凝土、盖板与钢梁、抗剪连接件与钢梁腹板之间均采用面面接触,法向采用硬接触,切向采用库伦摩擦,钢管与混凝土之间摩擦系数取 0.60,其余摩擦系数均取 0.35。

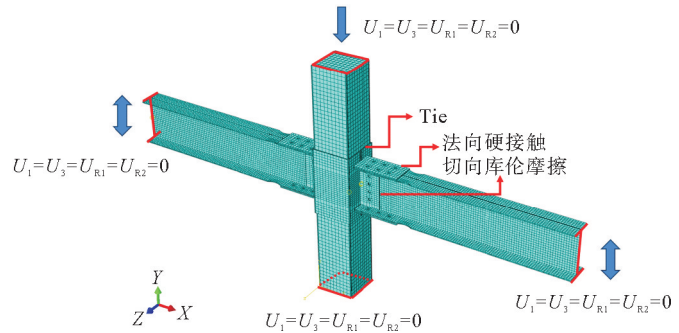


图 4 模型网格划分及边界条件

由于中柱节点截取自框架中梁柱反弯点位置,因此,柱顶、柱底以及梁加载位置均采用铰接边界。此外,为防止节点面外失稳,在节点核心区添加面外约束,即 $U_1=U_3=U_{R1}=U_{R2}=0$ 。在柱顶以及梁侧两端赋予 U_2 以及 U_{R3} 方向自由度,施加柱顶轴向荷载以及梁端往复荷载。

2.3 加载制度

柱顶轴力采用力加载,施加轴压比为 0.3。试件采用梁端加载,加载制度根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[16]采用位移加载,加载制度详见图 5 所示。

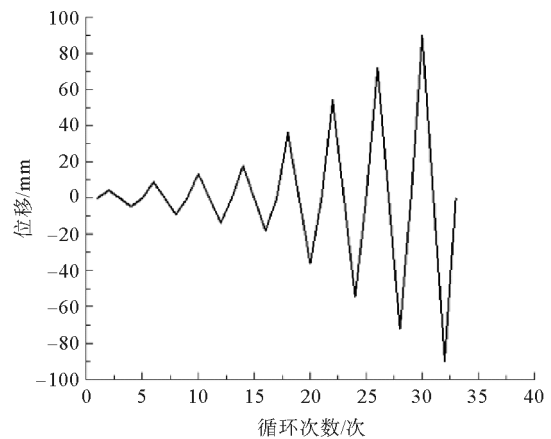


图 5 加载制度

2.4 有限元模型验证

为了验证有限元模型的准确性,对文献[17]和文献[18]试验进行有限元模拟分析。文献中试验节点与本文节点形式相似,因此,为验证上述建模方法准确性,验证模型单元选择、网格划分以及边界条件均与 2.2 节采用相同设置方式。图 6 为文献[17]试验得到的滞回曲线与有限元分析结果对比情况,图 7 为文献[18]试验得到骨架曲线与有限元分析结果对比情况。

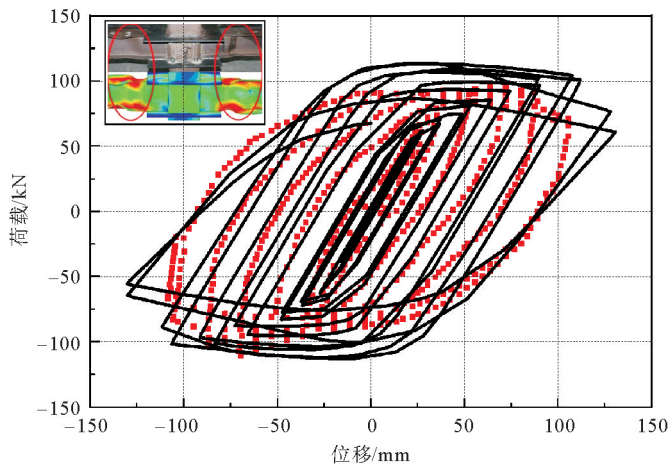


图 6 与文献[17]试验结果对比

· 试验; — 有限元模型

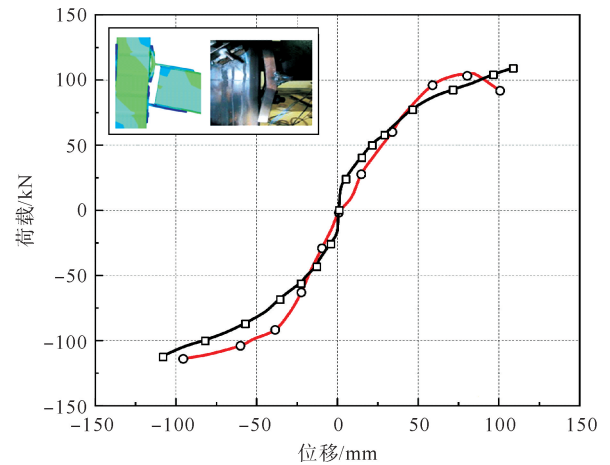


图 7 与文献[18]试验结果对比

○ 试验; □ 有限元模型

由图6和图7可知,本文采用的有限元建模方法与试验得到的滞回曲线以及骨架曲线对比吻合度较高;在破坏形态方面,能较好模拟出梁端塑性铰发展情况以及梁端连接件变形情况。说明本文采用的有限元建模方法具有较好的准确性,能够用于后续分析。

3 有限元模拟分析

3.1 典型节点破坏形态分析

图8为节点加载至4%层间位移角时等效塑性应变和Mises应力分布情况。由图8(a)可知,节点塑性铰位置集中在狗骨式钢梁截面,其他部位几乎保持弹性,最终破坏形式为梁端塑性铰截面破坏。从图8(b)可以看出,由于应力集中导致盖板与套筒边缘连接位置出现较大应力,故该位置可适当开设圆角来缓解应力集中现象。该现象也反映出盖板的构造尺寸是影响其塑性铰能否成功实现外移的关键因素,也是影响其破坏形式的关键参数。

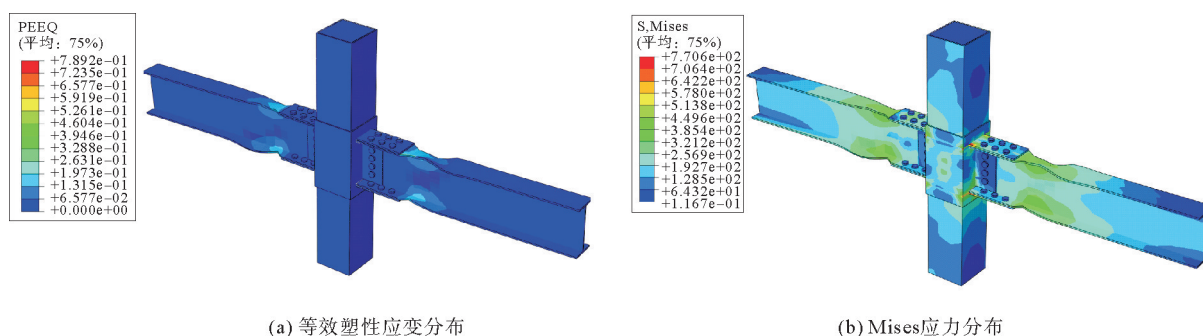


图8 典型节点破坏形态

3.2 应力分布

梁在往复荷载下,主要向节点域传递弯矩及竖向剪力,其中弯矩可等效为作用于梁上下翼缘的一对水平力偶,因此,根据节点受力情况,分别提取节点域各组件的水平应力(S_{11})以及竖向应力(S_{22})的分布情况做进一步分析。

图9为节点域连接件的应力分布情况,梁上下翼缘的水平拉压应力向螺栓孔位置传递,并通过螺栓传入上下盖板,再通过盖板边缘传入套筒内部。梁腹板的竖向剪应力向抗剪连接件的螺栓孔位置传递,并通过螺栓孔传入抗剪连接件,最后通过抗剪连接件传入套筒内部。整个传力路径较为明确,且通过合理构造设计,能达到传力可靠的基本要求。将上述水平拉压应力及竖向剪应力分布情况进行汇总,该新型节点的传力路径如图10所示。

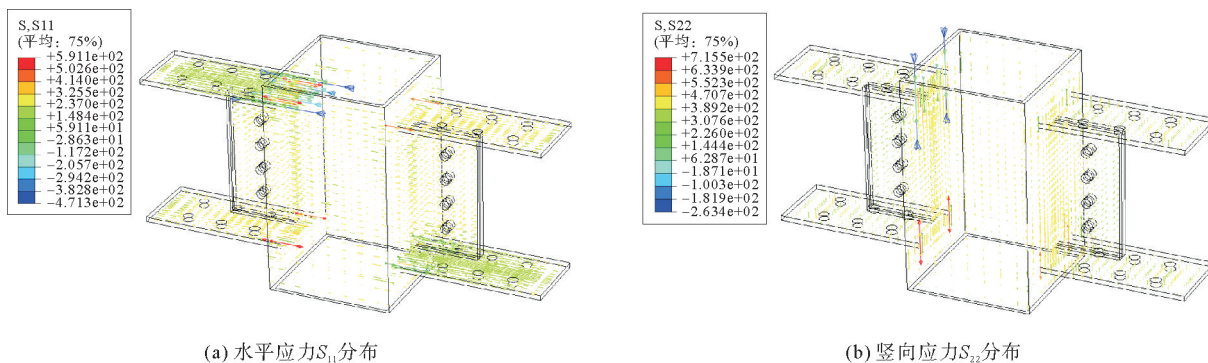


图9 节点域连接件应力分布情况

3.3 刚度划分

采用欧洲规范(EN1993)^[19]对新型狗骨式套筒连接节点进行刚度划分,如图11所示,其中 M 为节点弯矩

与梁全截面塑性受弯承载力的比值, θ 为节点转角与梁塑性转角的比值。

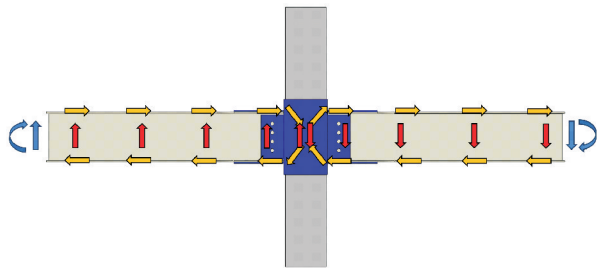


图 10 节点传力路径示意

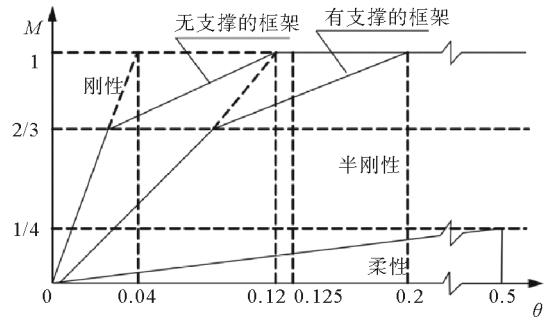


图 11 欧洲规范 EC3 节点分类

采用表 1 的划分方法对新型狗骨式钢梁套筒连接节点刚度进行划分,结果表明:新型节点既能传递一定的弯矩,又能产生一定的转动变形,属于半刚性连接节点。其中,节点初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 计算式如式(1)所示:

$$S_{j,ini} = M_e / \theta_e \tag{1}$$

式中: M_e 为 $M-\theta$ 曲线弹性段弯矩; θ_e 为弹性段弯矩 M_e 对应的转角。

表 1 节点刚度划分

刚度划分	无侧移结构	有侧移结构
刚性连接	$S_{j,ini} \geq 8E_b I_b / L$	$S_{j,ini} \geq 25E_b I_b / L$
半刚性连接	$8E_b I_b / L > S_{j,ini} > 0.5E_b I_b / L$	$25E_b I_b / L > S_{j,ini} > 0.5E_b I_b / L$
铰接	$S_{j,ini} \leq 0.5E_b I_b / L$	$S_{j,ini} \leq 0.5E_b I_b / L$

注: $E_b I_b$ 为钢梁抗弯刚度; L 为钢梁长度。

4 参数分析

新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点在构造形式不改变的情况下,影响其受力性能的主要因素包括盖板厚度、盖板长度、狗骨段长度以及狗骨削弱尺寸等。为研究新型节点的受力性能,设计了 4 组 13 个节点模型,对其进行参数分析,各模型具体参数列于表 2。

表 2 节点模型尺寸参数

单位: mm

编号	钢管尺寸	钢梁尺寸	盖板厚度	盖板长度	狗骨段长度	狗骨削弱尺寸
JD-1	250×250×8	300×150×6.5×9	9	275	100	15
JD-2	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	100	15
JD-3	250×250×8	300×150×6.5×9	9	325	100	15
JD-4	250×250×8	300×150×6.5×9	9	350	100	15
JD-5	250×250×8	300×150×6.5×9	7	300	100	15
JD-6	250×250×8	300×150×6.5×9	11	300	100	15
JD-7	250×250×8	300×150×6.5×9	13	300	100	15
JD-8	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	80	15
JD-9	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	120	15
JD-10	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	140	15
JD-11	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	100	5
JD-12	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	100	10
JD-13	250×250×8	300×150×6.5×9	9	300	100	20

4.1 盖板厚度的影响

当新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点中盖板长度为 300 mm,狗骨段长度为 100 mm,狗

骨削弱尺寸为 15 mm 时,对盖板厚度分别为 7、9、11、13 mm 的节点模型(JD-5、JD-2、JD-6、JD-7)进行计算。

本文采用等效黏滞阻尼系数 ζ_{eq} 来表示节点在地震作用下的耗能能力。 ζ_{eq} 的计算公式和计算示意图见图 12, $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线最后一级加载位移的第 1 循环的包络面积; $S_{(OBE+ODF)}$ 为图中 $\triangle OBE$ 和 $\triangle ODF$ 的面积总和。

骨架曲线是描述结构在循环荷载作用下的整体力-位移($P-\Delta$)关系的包络线,通常指在反复加载-卸载过程中,各滞回环的峰值点连线所形成的曲线。不同盖板厚度的骨架曲线见图 13,用能量等值法在骨架曲线上求出屈服位移 Δ_y ,峰值荷载 P_m ,85% P_m 为破坏荷载 P_u ,对应位移为破坏位移 Δ_u ,平均延性系数 μ 取节点模型的破坏位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值,各特征点的数值是取正负向循环的平均值。

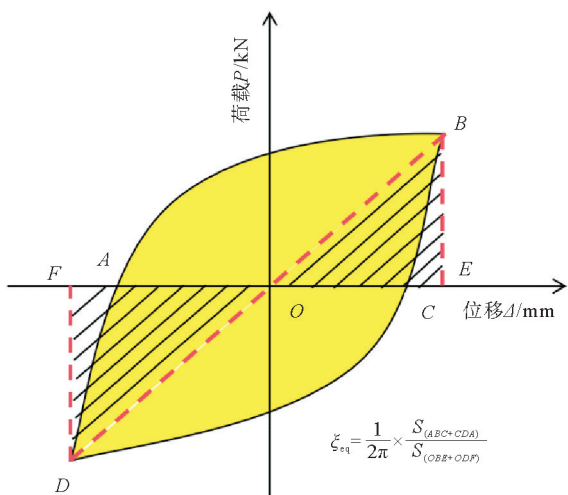


图 12 等效黏滞阻尼系数 ζ_{eq} 计算示意

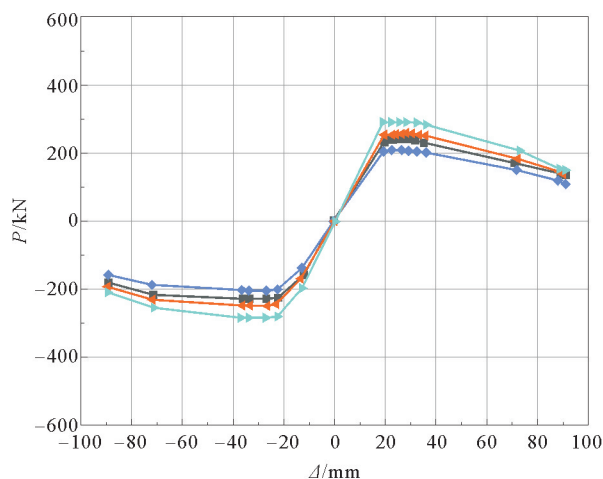


图 13 不同盖板厚度的骨架曲线
—■— JD-2; —◆— JD-5; —▲— JD-6; —▼— JD-7

由骨架曲线可得不同盖板厚度节点的黏滞阻尼系数及刚度退化曲线,如图 14、15 所示。由图 13—15 可知,节点 JD-2、JD-6、JD-7 的初始刚度相对于节点模型 JD-5 分别提升了 4.60%、13.78%、17.30%,极限承载力分别提升了 15.94%、25.23%、42.20%,屈服荷载分别提升了 12.45%、24.33%、37.60%,延性系数则分别降低了 13.64%、27.80%、39.10%。节点模型 JD-5、JD-2、JD-6、JD-7 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.514、0.508、0.498、0.439,呈下降趋势。可见,随着盖板厚度的增加承载能力不断提高,但导致节点外伸段强度增大,从而使梁变形增大、螺栓滑移现象加剧,塑性铰外移效果不理想,耗能能力降低。综上所述,由于盖板厚度为 11、13 mm 时,节点延性降低超过 20%,建议盖板厚度为钢梁翼缘厚度的 0.78~1.00 倍。

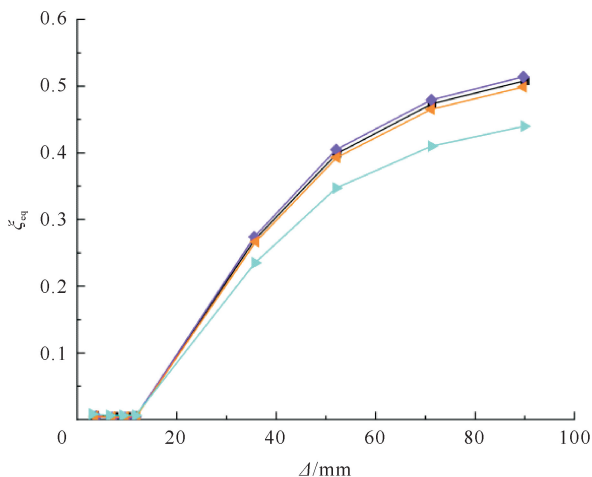


图 14 不同盖板厚度的黏滞阻尼系数
—■— JD-2; —◆— JD-5; —▲— JD-6; —▼— JD-7

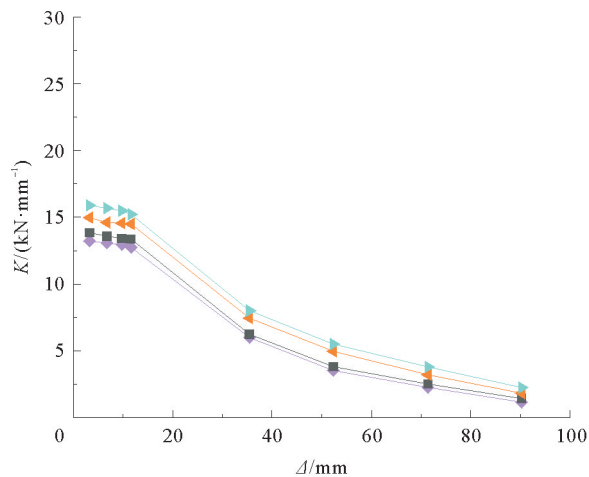


图 15 不同盖板厚度的刚度退化曲线
—■— JD-2; —◆— JD-5; —▲— JD-6; —▼— JD-7

4.2 盖板长度的影响

当新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点中盖板厚度为 9 mm,狗骨段长度为 100 mm,狗骨削弱尺寸为 15 mm 时,对盖板长度分别为 275、300、325、350 mm 的节点模型(JD-1—JD-4)进行计算。

图 16—18 分别为不同盖板长度节点模型的骨架曲线、黏滞阻尼系数及刚度退化曲线,由图可知,节点模型 JD-2、JD-3、JD-4 的初始刚度相对于节点模型 JD-1 分别提升了 10.02%、16.80%、32.27%,极限承载力分别提升了 10.20%、31.66%、52.21%,屈服荷载分别提升了 13.31%、25.24%、45.23%,延性系数则分别降低了 14.10%、25.70%、31.60%。节点模型 JD-1、JD-2、JD-3、JD-4 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.516、0.508、0.483、0.440,呈下降趋势。可见,盖板长度的增加可提高节点承载能力,但导致节点外伸段强度增大,从而使梁变形增大、螺

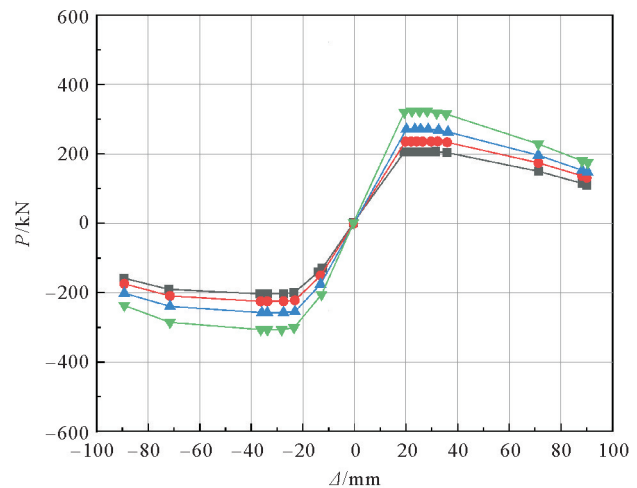


图 16 不同盖板长度的骨架曲线
 ■ JD-1; ● JD-2; ▲ JD-3; ▼ JD-4

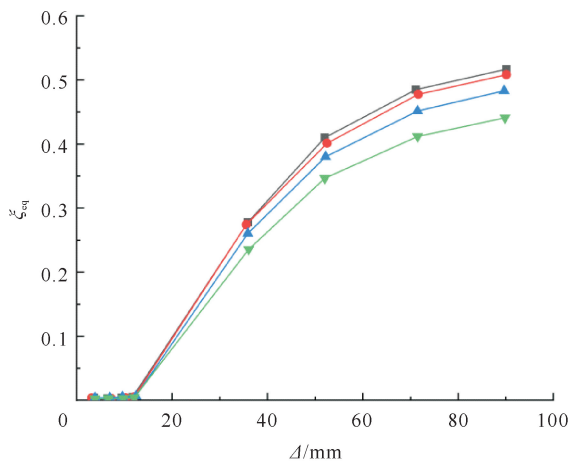


图 17 不同盖板长度的黏滞阻尼系数
 ■ JD-1; ● JD-2; ▲ JD-3; ▼ JD-4

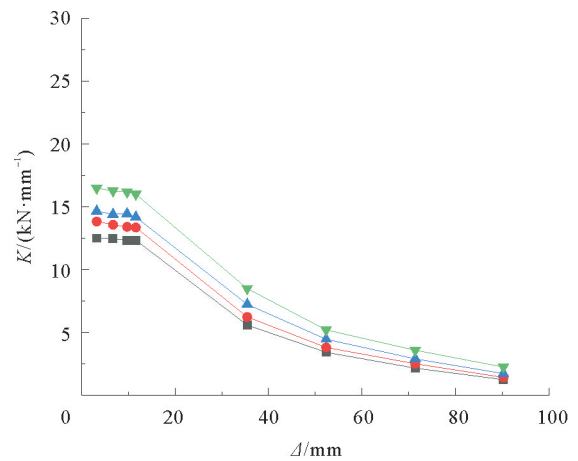


图 18 不同盖板长度的刚度退化曲线
 ■ JD-1; ● JD-2; ▲ JD-3; ▼ JD-4

栓滑移现象加剧,塑性铰外移效果不理想,耗能能力降低。综上所述,盖板长度为 325、350 mm 时,节点延性系数降低超过 20%,建议盖板长度为钢梁翼缘宽度的 1.8~2.0 倍。

4.3 狗骨段长度的影响

当新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点盖板厚度为 9 mm,盖板长度为 300 mm,狗骨削弱尺寸为 15 mm 时,对狗骨段长度分别为 80、100、120、140 mm 的节点模型(JD-8、JD-2、JD-9、JD-10)进行计算。

图 19—21 分别为不同狗骨段长度节点模型的骨架曲线、黏滞阻尼系数及刚度退化曲线,由图可知,节点模型 JD-9、JD-10 的初

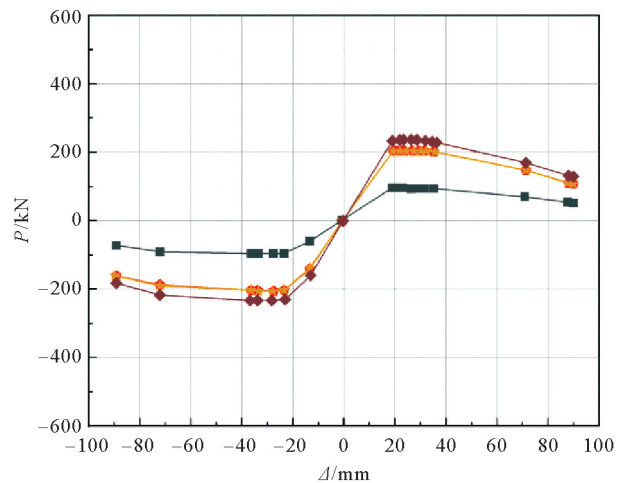


图 19 不同狗骨段长度的骨架曲线
 ● JD-2; ■ JD-8; ★ JD-9; ◆ JD-10

始刚度相对于节点模型 JD-2 分别提升了 3.70%、8.30%，极限承载力分别提升了 4.47%、12.25%，屈服荷载分别提升了 5.94%、23.12%，延性系数则分别降低了 3.64%、8.80%；节点模型 JD-8 相对于节点模型 JD-2 初始刚度下降了 36.49%，极限承载力下降了 48.56%，屈服荷载下降了 36.62%，延性系数降低了 25.10%。节点模型 JD-8、JD-2、JD-9、JD-10 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.443、0.508、0.512、0.528。可见，狗骨段长度适当增加可提高节点承载能力，但对塑性铰外移效果影响不大，耗能能力增大，而狗骨段长度过小为 8 mm 时会使节点工作能力显著下降。综上所述，建议狗骨段长度为钢梁翼缘宽度的 0.66~0.93 倍。

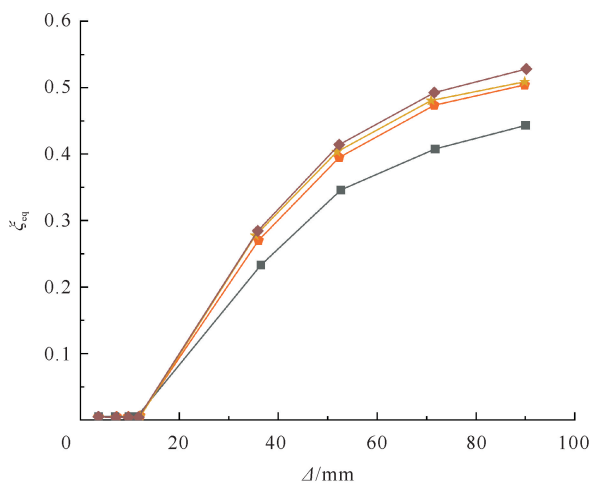


图 20 不同狗骨段长度的黏滞阻尼系数

—●— JD-2; —■— JD-8; —★— JD-9; —◆— JD-10

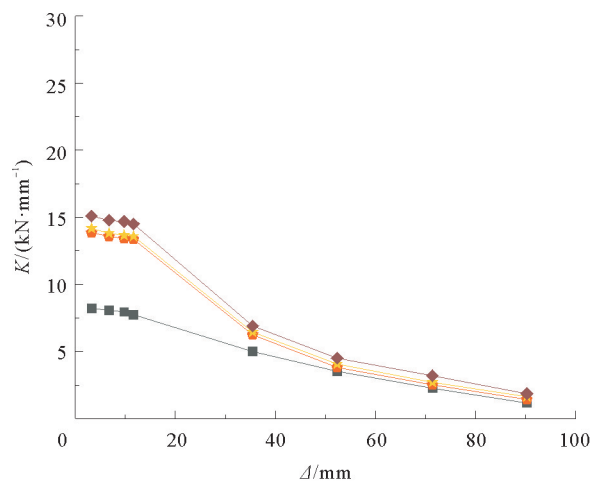


图 21 不同狗骨段长度的刚度退化曲线

—●— JD-2; —■— JD-8; —★— JD-9; —◆— JD-10

4.4 狗骨削弱尺寸的影响

对新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点盖板厚度为 9 mm，盖板长度为 300 mm，狗骨段长度为 100 mm 时，对狗骨削弱尺寸分别为 5、10、15、20 mm 的节点模型 (JD-11、JD-12、JD-2、JD-13) 进行计算。

图 22—24 分别为不同狗骨削弱尺寸节点模型的骨架曲线、黏滞阻尼系数及刚度退化曲线，由图可知，节点模型 JD-12、JD-11 的初始刚度相对于节点模型 JD-2 分别提高了 0.77%、7.24%，极限承载力分别提升了 11.42%、20.26%、屈服荷载分别提升了 12.94%、21.33%，延性系数则分别降低 13.61%、14.81%。JD-13 相对于节点模型

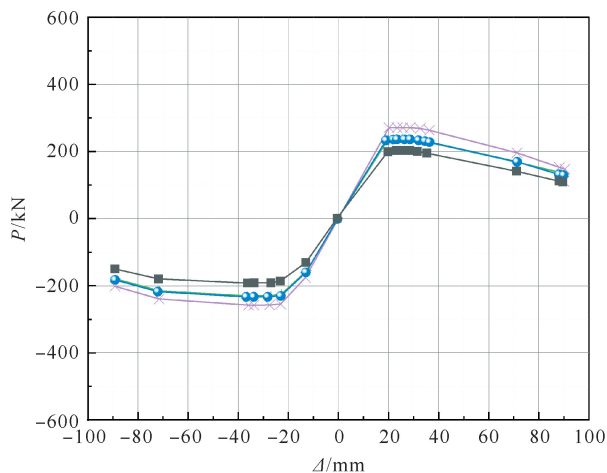


图 22 不同狗骨削弱尺寸的骨架曲线

—●— JD-2; —×— JD-11; —●— JD-12; —■— JD-13

JD-2 初始刚度下降了 8.69%，极限承载力下降了 23.21%，屈服荷载下降了 14.61%，延性系数下降了 16.13%。节点模型 JD-11、JD-12、JD-2、JD-13 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.488、0.493、0.508、0.464。可见，适当增加狗骨削弱尺寸，梁变形增大、塑性铰外移效果理想，耗能能力上升。狗骨削弱尺寸过度增大到 20 mm 时会使节点承载能力、延性等性能下降。综上所述，建议狗骨削弱尺寸为钢梁翼缘厚度的 0.55~1.67 倍。

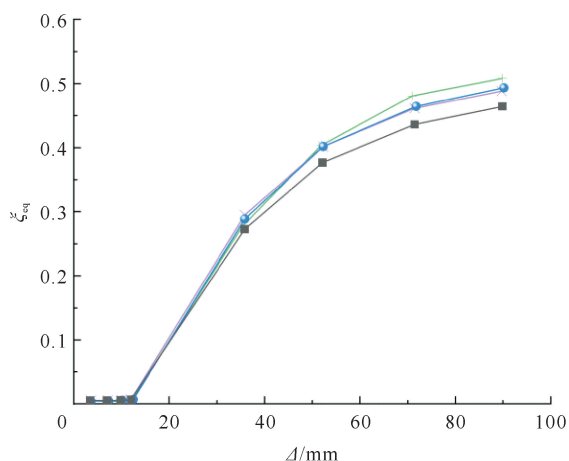


图23 不同狗骨削弱尺寸的黏滞阻尼系数
—●— JD-2; —×— JD-11; —●— JD-12; —■— JD-13

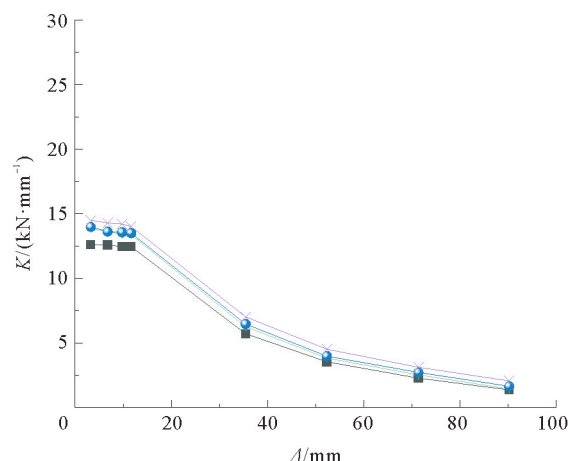


图24 不同狗骨削弱尺寸的刚度退化
—●— JD-2; —×— JD-11; —●— JD-12; —■— JD-13

5 结论

本文提出了一种新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点,介绍了节点设计原理以及组成。在此基础上,采用 ABAQUS 建立了节点的有限元分析模型,通过分析节点在往复荷载作用下应力分布、应变分布,揭示了节点破坏机制和传力路径。通过参数分析,研究了盖板长度、盖板厚度、狗骨段长度以及狗骨削弱尺寸等关键设计参数对节点抗震性能的影响规律,具体结论如下:

1) 新型方钢管混凝土柱-狗骨式钢梁套筒连接节点通过套筒增加节点域刚度和强度,采用狗骨式削弱梁截面能使塑性铰远离节点核心区,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的抗震设计理念。施工时,可将套筒、盖板以及抗剪连接件与方钢管壁在工厂提前焊接,实现现场全螺栓装配连接。

2) 节点耗能能力较强,按初始刚度划分属于半刚性节点。节点破坏机制为狗骨式削弱梁截面塑性铰破坏,节点核心区柱截面未发生明显塑性及混凝土损伤。水平拉压力传力路径为:梁翼缘→盖板→套筒;竖向剪力传力路径为:梁腹板→抗剪连接件→套筒。具有明确且可靠的传力路径。

3) 盖板厚度和狗骨段长度是节点抗震性能的主要影响因素,盖板厚度增大,节点的初始刚度和承载能力有较大提升,但延性性能和耗能能力下降,建议盖板厚度取 0.78~1.00 倍钢梁翼缘厚度;盖板长度增大,可以增强节点的转动能力,但会导致节点刚度退化速率加快,建议盖板长度取 1.8~2.0 倍的钢梁翼缘宽度。增大狗骨段长度不利于实现节点失效模式可控,建议狗骨段长度取钢梁翼缘宽度的 0.66~0.93 倍;增大狗骨削弱尺寸,节点的转动能力增大,但初始刚度和承载力下降,延性和耗能能力上升,建议狗骨削弱尺寸取梁翼缘厚度 0.55~1.67 倍。

参考文献(References):

- [1] QIN Y, CHEN Z H, YANG Q Y, et al. Experimental seismic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 93(2): 32-43.
- [2] QIN Y, CHEN Z H, WANG X D. Elastoplastic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 93(2): 88-96.
- [3] WANG Y, ZHANG D F, ZHAO J H, et al. Seismic performance of CFDST column to steel beam welded-bolted joint with slab[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 226: 109192.
- [4] 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(S2): 180-187. 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(S2): 180-187.
- [5] 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. 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.

- [6] 宗周红,葛继平,杨强跃.反复荷载作用下方钢管混凝土柱与钢梁连接节点的非线性有限元分析[J].建筑结构学报,2006,27(2):75-81.
ZONG Zhouhong,GE Jiping,YANG Qiangyue. Nonlinear finite element analysis of the concrete filled square steel tubular column to steel beam connections under low-cycle reversed loading[J]. Journal of Building Structures,2006,27(2):75-81.
- [7] 周天华,聂少锋,卢林枫,等.带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点设计研究[J].建筑结构学报,2005,26(5):23-29.
ZHOU Tianhua,NIE Shaofeng,LU Linfeng,et al. Design of concrete-filled square tube column and steel beam joint with internal diaphragms[J]. Journal of Building Structures,2005,26(5):23-29.
- [8] 吕西林,李学平,余勇.方钢管混凝土柱与钢梁连接的设计方法[J].同济大学学报,2002,30(1):1-5.
LU Xilin,LI Xueping,YU Yong. Design method for connections between concrete-filled square tubular columns and steel beams[J]. Journal of Tongji University,2002,30(1):1-5.
- [9] 黄炳生,杜培源,黄顾忠.方钢管混凝土柱-钢梁外隔板节点拟静力试验研究[J].土木工程学报,2012,45(5):49-57.
HUANG Bingsheng,DU Peiyuan,HUANG Guzong. Quasi-static experimental study of outer diaphragm connections between square concrete filled steel tube columns and steel beams[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(5):49-57.
- [10] 徐桂根,聂建国.方钢管混凝土柱内隔板贯通式节点核心区抗震性能的试验研究[J].土木工程学报,2011,44(8):25-32.
XU Guigen,NIE Jianguo. Experimental study of connections of concrete-filled square steel tubular columns with continuous diaphragms[J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(8):25-32.
- [11] 陈庆军,蔡健,杨平,等.节点区柱钢管不贯通式钢管混凝土柱-梁节点抗震性能[J].土木工程学报,2009,42(12):33-42.
CHEN Qingjun,CAI Jian,YANG Ping,et al. Seismic behavior of concrete filled steel tubular column-beam joints with discontinuous column tubes[J]. China Civil Engineering Journal,2009,42(12):33-42.
- [12] JGJ 82—2011,钢结构高强度螺栓连接技术规程[S].
JGJ 82—2011,Technical specification for high strength bolt connections of steel structures[S].
- [13] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].2024年版.
GB 50011—2010.Code for seismic design of buildings[S]. 2024 ed.
- [14] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017,Steel structure design standard[S].
- [15] 韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].2版.北京:科学出版社,2007.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures:Theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,2007.
- [16] JGJ/T 101—2015,建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015,Specification for seismic test of buildings[S].
- [17] 左斌.冷弯方钢管柱-H型钢梁不同外隔板形式节点拟静力试验研究[D].青岛:青岛理工大学,2014.
ZUO Bin. Pseudo-static experimental study of H-shaped beams to cold-formed square steel tube columns connections with different outer diaphragm[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2014.
- [18] 袁峥嵘.方钢管混凝土柱-钢梁T形件节点的性能研究[D].长沙:湖南大学,2013.
YUAN Zhengrong. The research on the mechanical performance of the square concrete filled steel tube with T-stub connector[D]. Changsha:Hunan University,2013.
- [19] Eurocode 3: Design of steel structures[S].

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)