

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.011

多腔钢管混凝土 T 形柱 H 型钢梁 装配节点抗震性能研究

郭建营, 张传琪, 完海鹰, 陈安英

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章基于滑移耗能思想,提出一种可以控制损伤并实现震后修复的多腔钢管混凝土 T 形柱 H 型钢梁装配节点;通过改变上下连接板件的厚度与腹板连接方式改变连接处刚度,对 6 个试件进行模拟分析,得到相应的滞回曲线、骨架曲线、力学性能指标及转动能力。研究表明:合理控制翼缘连接盖板厚度可以转移塑性铰、保护节点核心区,使节点具有及时修复的功能;腹板连接件可以提高节点的刚度、承载力及延性;腹板连接件不宜过大,应该与翼缘保持一定的缓冲距离。

关键词:多腔钢管混凝土 T 形柱;装配式节点;滞回曲线;骨架曲线;转动能力

中图分类号:TU398.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)11-1506-05

Nonlinear finite element analysis of seismic performance of multi-cavity concrete-filled steel tube T-column H-beam assembled joints

GUO Jianying, ZHANG Chuanqi, WAN Haiying, CHEN Anying

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:In order to control the damage and realize the post-earthquake repair, an assembled joint of multi-cavity concrete-filled steel tube T-column H-beam is proposed based on the idea of slip energy dissipation. By changing the thickness of the upper and lower connecting plates and the connection mode of the web to change the joint stiffness, the hysteresis curve, skeleton curve, mechanical indexes and rotational capacity of six specimens were obtained through the simulation analysis. The results show that the reasonable control of the thickness of flange connecting cover plates can transfer the plastic hinge and protect the core region of the joint, so the joint can be repaired in time. The web connector can improve the stiffness, bearing capacity and ductility of the joint. The web connector should not be too large and should maintain a certain buffering distance from the flange.

Key words:multi-cavity concrete-filled steel tube T-column; assembled joint; hysteresis curve; skeleton curve; rotational capacity

钢结构与混凝土结构相比具有轻质高强的优点,随着绿色建筑的发展及装配结构的广泛应用,装配式钢结构节点及其研究成为一个热点课题。文献[1]采用构件法,以“T 形件”作为基础,对各个构件的刚度进行求解,并提出在负弯矩作用下

端板与半刚性钢管混凝土接头的初始刚度计算公式;文献[2]进行带“保险丝”的高强钢节点低周往复试验,结果表明,高强钢具有优异的弹性变形能力,“保险丝”连接板具有控制节点应力、保护节点框架的作用,具有优异的抗震性能;文献[3]根据

收稿日期:2023-03-08;修回日期:2023-04-24

基金项目:安徽省高校协同创新资助项目(GXXT-2019-005)

作者简介:郭建营(1964—),男,河南许昌人,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

完海鹰(1960—),男,满族,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:wanyh8858@163.com.

是否有削弱段及削弱段的位置,设计 3 种带悬臂梁的 Z 形装配式拼接节点,并通过静力试验与有限元模拟研究节点的破坏模式与受力性能,试验结果与模拟计算值吻合良好,Z 形节点拥有良好的力学性能;文献[4]对支管受拉、受压圆钢管混凝土 Y 形节点在不同失效方式下的受力特性与破坏机制进行分析,并根据其不同失效方式下的破坏机制和受力状况,建立一个合理的计算模型,给出支管截面形状为圆形或矩形的圆钢管混凝土 Y 形节点极限承载力的计算公式,并进行试验验证;文献[5]对 4 根圆套圆空心钢管混凝土柱与钢梁单边螺栓端板连接节点进行拟静力测试,并对端板形状、柱横截面的空心率等因素进行研究;文献[6]对采用单侧高强度螺栓连接的钢管混凝土柱节点进行拟静力加载与有限元分析,并对比分析其滞回曲线和失效模式,以验证有限元分析模型的正确性;文献[7-8]利用 ABAQUS 软件对钢管混凝土 L 形柱-H 型钢梁 Z 字形节点试验数据进行验证,得到结构的荷载-位移曲线、骨架曲线、破坏模式及力学性能指标。随着高层装配式住宅的发展,同时为了尽可能地利用室内空间、提升建筑美感,异形柱也应运而生。本文将异形柱与装配式钢结构节点结合,基于滑移耗能思想,提出一种多腔钢管混凝土 T 形柱 H 型钢梁装配式节点,通过建立的有限元模型对该节点 6 个试件的抗震性能指标进行对比分析。

1 装配式节点设计与有限元模型

1.1 装配式节点构造

该节点由带悬臂梁段多腔钢管混凝土 T 形柱、普通梁段及连接件组成。悬臂梁和多腔钢管混凝土 T 形柱在工厂提前焊接预制,连接件由高强螺栓、腹板连接件和翼缘连接板构成。T 形柱 H 型钢梁装配式节点构造模型如图 1 所示。

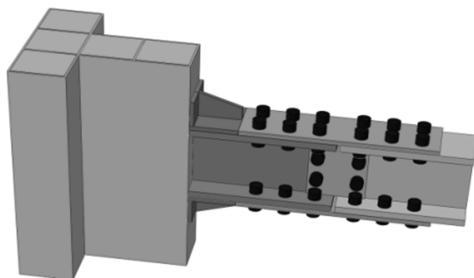


图 1 T 形柱 H 型钢梁装配式节点构造模型

1.2 试件设计

T 形柱由 5 个腔体组成,每个腔体为边长

150 mm 的正方形,钢管厚度为 5 mm。梁采用 H 型钢,规格为 H200 mm×150 mm×12 mm×18 mm;螺栓采用 10.9 级 M24,钢材采用 Q345B。梁长为 1 350 mm,柱高为 3 000 mm。设计 6 个试件,研究连接件厚度与连接方式对节点力学性能的影响。试件盖板厚度与腹板尺寸见表 1 所列。

表 1 试件盖板厚度与腹板尺寸

试件编号	盖板厚度/mm	腹板尺寸
BASE	12	
BASE-GB1	14	
BASE-GB2	16	
BASE-GB3	18	
BASE1	12	140 mm×160 mm×6 mm
BASE2	12	140 mm×114 mm×6 mm

1.3 材料本构模型

混凝土本构模型采用混凝土塑性损伤模型,塑性参数取值见表 2 所列。表 2 中, σ_{b0}/σ_{c0} 为混凝土的双轴受压与单轴受压极限压强比。钢材本构模型采用弹-塑性强化模型,钢材弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,其他力学性能参数取值见表 3 所列。

表 2 混凝土材料塑性参数取值

参数	膨胀角/(°)	偏心率	σ_{b0}/σ_{c0}	形状系数	黏性系数
数值	30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

表 3 钢材部分力学性能参数取值

材料名称	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	极限应变/ 10^{-2}
螺栓	900	1 000	0.05
连接件	235	350	0.13
其余钢材	345	520	0.20

1.4 网格划分、接触定义及边界条件

网格划分采用实体单元 C3D8R,考虑摩擦及螺杆与孔壁接触,摩擦系数为 0.3;钢管与混凝土摩擦系数^[9]为 0.25。有限元模型如图 2 所示。

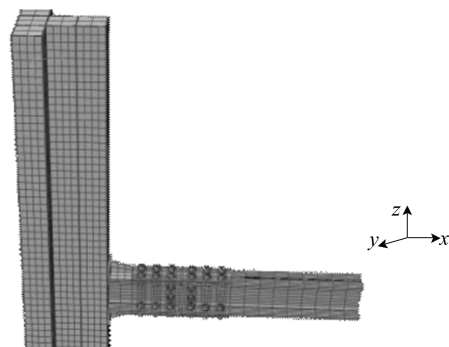


图 2 T 形柱 H 型钢梁装配式节点有限元模型

采用耦合约束将柱顶与柱底截面分别耦合至形心参考点,限制参考点 x 、 y 、 z 3 个方向的平动自由度,允许柱顶与柱底发生转角位移。对钢梁施加侧向约束,限制沿 y 方向的位移与转角,防止钢梁发生平面外失稳破坏。

1.5 加载制度

将钢梁截面耦合至形心参考点,控制层间位移角 θ ,将低周往复荷载作用于参考点。在 $\theta=0.00375$ rad、 $\theta=0.00500$ rad、 $\theta=0.00750$ rad 下循环 6 次,在 $\theta=0.010$ rad 下循环 4 次,在 $\theta=0.015$ rad、 $\theta=0.020$ rad 下循环 2 次,然后以 $\theta=0.010$ rad 的增量加载,每级加载循环 2 次。加载制度下的梁端位移、层间位移角变化如图 3 所示,假定梁端荷载降至峰值承载力的 85% 时,结构就会发生失效。螺栓预紧力为 225 kN,柱端轴压比为 0.2。

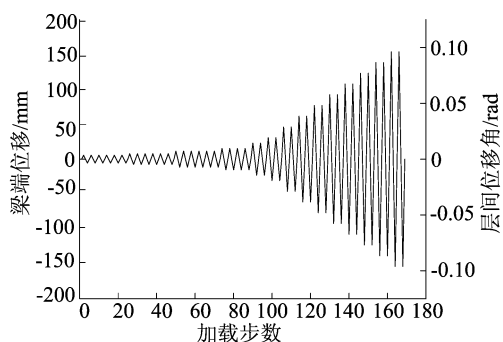


图 3 加载制度下的梁端位移、层间位移角变化

2 数值分析结果

2.1 节点受力过程

受力过程分 4 个阶段：① 弹性阶段,拼接部分未产生滑移,节点仅有微小的整体性转动；② 滑动阶段,连接件与梁产生滑动,当孔壁与螺栓接触挤压后滑动减小；③ 强化阶段,连接件出现塑性变形,栓杆与孔壁之间的挤压力增大,材料进入强化阶段；④ 承载力下降阶段,盖板大面积弯曲,达到极限承载力,普通梁段第 1 排螺栓处盖板出现颈缩,最外排螺栓孔部分区域产生塑性变形,节点承载力降低。除悬臂梁螺栓处部分区域产生塑性变形,梁柱大部分区域保持弹性状态,无明显损坏。

2.2 滞回曲线

6 个试件的滞回曲线如图 4 所示。加载初始阶段节点处于弹性状态,滞回曲线保持直线。当位移逐渐增大,连接件产生滑动,曲线斜率逐渐减

小,出现微弱捏缩现象,节点承载力增速减慢。节点屈服前滞回曲线呈饱满梭形,此时位移荷载较小,螺杆与孔壁承压受力较小,耗能主要由盖板塑性变形承担。加载后期,螺栓孔壁挤压、摩擦滑移和盖板塑性变形共同耗能,盖板进入强化阶段,螺杆与孔壁之间的挤压力增加,节点刚度增加,承载力逐渐增大;承载力达到峰值后逐渐下降,当盖板大面积达到极限应变,产生严重弯曲现象时,承载力下降至峰值的 85%,认为节点破坏、不适于继续承载。从图 4 可以看出:试件 BASE1、BASE2 滞回曲线最饱满,这是由于腹板连接件使得刚度增加,摩擦力增加,耗能能力增强;试件 BASE-GB1、BASE 滞回曲线较为饱满,表明抗震能力良好;随着盖板厚度持续增大,滞回曲线捏缩逐渐明显,使悬臂梁端更多区域进入塑性变形。因此,为了保护节点核心区,实现震后快速修复,建议连接盖板厚度取 12~14 mm。

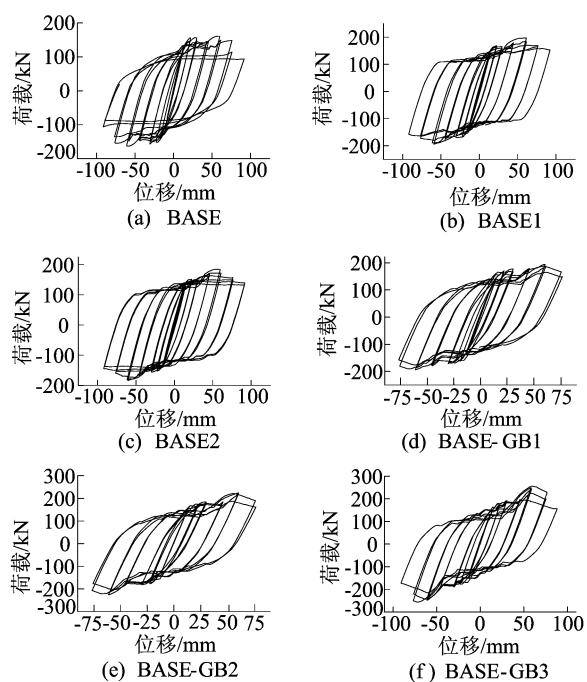


图 4 6 个试件的滞回曲线

2.3 骨架曲线

6 个试件的骨架曲线如图 5 所示。由图 5 可知,节点受力可以分为 4 个状态,即弹性状态、滑移状态、承载力强化状态与承载力下降状态。弹性状态时骨架曲线为直线,试件曲线的斜率大致相近,试件的初始刚度一致;进入滑移状态后骨架曲线斜率逐渐减小,6 个试件的曲线斜率稍有差异;滑移增加使螺杆与孔壁接触挤压,节点进入承载力强化状态,骨架曲线斜率逐渐平稳;盖板大面积进入塑

性阶段,产生严重弯曲现象,节点承载力逐渐降低至峰值承载力 85% 以下,结构失效、发生破坏。

以试件 BASE-GB1 为例,在梁端位移 9.5 mm ($\theta=0.006$ rad) 之前,节点大致保持弹性状态,骨架曲线为直线,然后出现明显滑移,曲线斜率逐渐减小。在梁端位移 21.4 mm ($\theta=0.014$ rad) 时,节点屈服,曲线斜率继续减小;钢结构大震作用下的弹塑性层间位移角限值为 0.020 rad,说明连接件的滑移耗散能量使节点具有震后修复的功能。在梁端位移 45.4 mm ($\theta=0.030$ rad) 时,栓杆与孔壁之间的挤压力增大,曲线斜率逐渐增大,试件承载力缓慢提高,此时梁截面均未见明显塑性变形。在梁端位移 61.5 mm ($\theta=0.040$ rad) 时,节点达到峰值承载力。在梁端位移 78.3 mm ($\theta=0.051$ rad) 时,节点承载力下降到峰值的 85%,不适于继续承载,节点破坏。

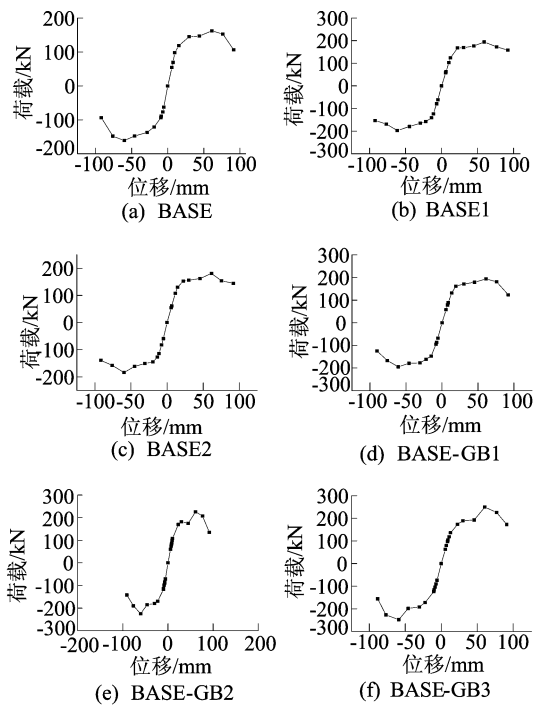


图 5 6 个试件的骨架曲线

2.4 性能指标

6 个试件的力学性能指标取值见表 4 所列。表 4 中: P_y 为屈服荷载; Δ_y 为屈服位移; P_u 为极限荷载; Δ_u 为极限位移; u 为位移延性系数, $u = \Delta_u / \Delta_y$ 。由表 4 可知,随着盖板厚度增加,节点刚度、屈服荷载与极限荷载增大,延性降低。试件 BASE、BASE-GB1 延性较好,试件 BASE-GB2、BASE-GB3 的位移延性系数均未超过 3.0,说明盖板厚度不宜过大。试件 BASE1、BASE2 与

BASE 相比,屈服荷载和极限荷载增加,延性保持良好。

试件 BASE1 的承载力与延性均优于 BASE2,原因是当腹板面积过大、与翼缘接触顶紧时,荷载会更多地通过腹板传递给悬臂梁,使核心区提前进入塑性,削弱翼缘盖板的耗能保护作用。因此,腹板面积不宜过大,应与翼缘保持一定的缓冲距离。

节点初始刚度 $K_0 = M_j / \phi$, M_j 为初始弯矩, ϕ 为梁柱相对转角。根据文献[10], $K_0 \geq 25EI_b / l$ (E 为材料的弹性模量, I_b 为节点连接件的截面刚度, l 为计算长度) 属于刚性连接,试件 BASE-GB2、BASE-GB3 加载下 K_0 均大于 $25EI_b / l$,节点属于刚性连接。

表 4 6 个试件的力学性能指标取值

试件编号	加载方向	P_y / kN	P_u / kN	Δ_y / mm	Δ_u / mm	u
BASE	正	132	162	22.8	81.1	3.5
	负	125	161	21.4	79.3	3.6
BASE-GB1	正	165	194	23.2	80.4	3.4
	负	160	194	21.3	76.3	3.5
BASE-GB2	正	181	225	29.8	79.7	2.6
	负	175	224	27.1	76.0	2.8
BASE-GB3	正	189	249	33.0	83.6	2.5
	负	189	248	29.4	79.8	2.7
BASE1	正	168	194	24.4	84.7	3.4
	负	158	197	22.4	77.8	3.4
BASE2	正	153	180	24.0	75.7	3.1
	负	146	184	22.0	76.9	3.4

2.5 转动能力

6 个试件转动能力的模拟结果见表 5 所列。

表 5 6 个试件转动能力的模拟结果 单位: rad

试件编号	加载方向	θ_u	θ_y	θ_p
BASE	正	0.052 8	0.014 8	0.037 9
	负	0.051 6	0.014 0	0.037 6
BASE-GB1	正	0.052 3	0.015 1	0.037 2
	负	0.049 7	0.013 9	0.035 8
BASE-GB2	正	0.051 9	0.019 4	0.032 5
	负	0.049 5	0.017 7	0.031 8
BASE-GB3	正	0.054 4	0.021 5	0.032 9
	负	0.051 9	0.019 1	0.032 8
BASE1	正	0.055 1	0.015 9	0.039 3
	负	0.050 7	0.014 6	0.036 1
BASE2	正	0.049 2	0.015 6	0.033 6
	负	0.050 0	0.014 3	0.035 7

(下转第 1572 页)

- Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 116: 102-122.
- [20] 范辰, 张琼思, 陈一鸣. 新零售渠道整合下生鲜供应链的定价与协调策略[J]. 中国管理科学, 2022, 30(20): 118-126.
- [21] 刘墨林, 但斌, 马崧萱. 考虑保鲜努力与增值服务的生鲜电商供应链最优决策与协调[J]. 中国管理科学, 2020, 28(8): 76-88.
- [22] 洪雅兰. 有限产能下双渠道供应链的合作广告研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2021, 43(1): 45-57.
- [23] ZHANG J H, XIE J X. A game theoretical study of cooperative advertising with multiple retailers in a distribution channel[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2012, 21(1): 37-55.
- [24] 王淑云, 姜樱梅, 牟进进. 基于新鲜度的冷链一体化库存与定价联合决策[J]. 中国管理科学, 2018, 26(7): 132-141.
- [25] ZHANG Y, RONG F, WANG Z. Research on cold chain logistic service pricing based on tripartite Stackelberg game[J]. Neural Computing and Applications, 2018, 32(1): 213-222.
- [26] ROCKAFELLAR T, URYASEV S. Conditional value-at-risk for general loss distributions[J]. Journal of Banking & Finance 2002, 26(7): 1443-1471.
- [27] 杨兴林, 朱陈陈. 基于均值-CVaR 的供应链协调保险契约机制[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 63-69.
- [28] 曲优, 关志民, 叶同, 等. 基于混合 CVaR 的供应链绿色研发广告决策与协调机制研究[J]. 中国管理科学, 2018, 26(10): 89-101.
- [29] 谢家平, 梁玲, 杨光, 等. 互补型闭环供应链的收益共享与成本共担契约协调优化[J]. 中国管理科学, 2018, 26(8): 94-105.

(责任编辑 朱晓临)

(上接第 1509 页)

表 5 中: θ_u 为极限转角, 即 Δ_u 对应的试件转角; θ_y 为屈服转角, 即 Δ_y 对应的试件转角; θ_p 为塑性转角, $\theta_p = \theta_u - \theta_y$ 。当 $\theta_p \geq 0.03 \text{ rad}$ 时符合对刚节点的设计规定。由表 5 可知, 节点的塑性转动能力在正向与负向大致相同, 试件具有良好的转动能力。

3 结 论

本文基于滑移耗能思想, 提出一种多腔钢管混凝土 T 形柱 H 型钢梁装配节点, 并对其抗震性能指标进行数值模拟研究, 得到以下结论:

1) 多腔钢管混凝土 T 形柱 H 型钢梁装配节点的滞回曲线呈饱满的梭形, 抗震性能良好。节点在正、负向具有相似的力学性能与优异的转动能力, 具有震后可修复功能。

2) 腹板连接件可以提高节点初始刚度、屈服荷载与极限荷载, 同时使节点具有良好的延性。腹板连接件面积不宜过大, 应该与翼缘保持一定的缓冲距离。

3) 增大翼缘连接盖板厚度, 节点屈服荷载与极限荷载增加, 延性降低。建议连接盖板厚度取 12~14 mm, 使节点具有可靠的承载力与优异的变形能力。

[参 考 文 献]

- [1] 王冬花, 王静峰. 负弯矩作用下半刚性钢管混凝土组合节点

初始刚度计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(9): 1231-1236.

- [2] 胡阳阳, 林旭川, 吴开来, 等. 带“保险丝”连接板的焊接高强度钢梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊 1): 143-148.
- [3] 张爱林, 郭志鹏, 刘学春, 等. 悬臂梁段不同拼接方式下延性节点静力性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(5): 770-779.
- [4] 左金洲, 王静峰, 邢文彬, 等. 圆钢管混凝土 Y 形节点极限承载力计算方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 216-222.
- [5] 王静峰, 郭翔, 张娜, 等. 单边螺栓连接圆中空夹层钢管混凝土柱节点拟静力试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(8): 1095-1101.
- [6] 霍永伦, 王静峰, 郭磊, 等. 单边高强度螺栓连接圆形 CFDST 柱组合节点抗震试验与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(2): 222-229, 235.
- [7] 吴桐宇, 刘学春, 陈学森. 钢管混凝土 L 形柱-H 型钢梁 Z 字形节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊 1): 101-108.
- [8] 刘学春, MYONG HAK I, 陈学森, 等. L 形钢管混凝土柱-H 型钢梁 Z 字形拼接节点抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(23): 61-68.
- [9] 徐礼华, 刘胜兵, 温芳, 等. T 形钢管混凝土组合构件抗弯性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 117-120, 132.
- [10] Eurocode 3: design of steel structures: part 1-8: design of joints: EN 1993-1-8: 2005[S]. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2005: 63.

(责任编辑 张淑艳)