

T型件加强型箱型空间节点双向往复荷载滞回性能研究

金路,陈立平

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究 T 型件加强箱型空间节点考虑双向往复荷载作用下的滞回性能。方法 采用 ABAQUS 有限元软件对 7 组 25 个空间节点建立有限元模型,在四向钢梁端部施加两组反对称往复荷载进行全过程模拟。分析柱板厚度、梁截面高度及 T 型件各参数对空间节点受力性能的影响机理。结果 由于 T 型件参与空间节点整体传力,缓解了节点域应力集中,大部分节点因 T 型件与梁交汇端部全截面屈服形成塑性铰而破坏;T 型件翼缘宽度和腹板高度对节点延性和耗能能力影响显著。结论 T 型件加强型箱型空间节点在承受双向往复荷载作用时表现出良好的受力特性,可实现塑性铰外移且符合抗震设计要求;通过曲线拟合得到节点极限承载力表达式,计算结果与有限元模拟值误差在 5% 以内,可为 T 型件加强空间节点设计方法提供依据。

关键词 空间箱型节点;T 型件加强;滞回性能;承载能力;双向往复荷载作用

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Hysteric Behavior of Box Space Joints Reinforced by T Shape Stiffener Subjected to Bi-directional Cyclic Loads

JIN Lu, CHEN Liping

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The hysteresis behavior of box-space joints under bi-directional cyclic loads was studied in this paper. Seven groups of 25 spatial joints model was established by using the finite element software ABAQUS. Two groups of anti-symmetric reciprocating loads were applied at the end of four-way steel beam to simulate the whole process. The influence mechanism of column plate thickness, beam section height and T-shape parameters on the mechanical performance of spatial joints was analyzed. The results of research show that T-shaped stiffeners participates in the overall force transfer of the spatial joint, which relieves the stress concentration in the joint central area.

收稿日期:2021-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);兴辽英才计划项目(XLYC1807188);辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0678)

作者简介:金路(1982—),女,副教授,博士,主要从事高层与轻钢结构及装配式结构等方面研究。

Most of the joints are destroyed due to the plastic hinge formed by the full section yield at the intersection end of the T-shaped reinforcing plate and the beam. The flange width and web height of T-shaped parts have significant influence on the ductility and energy dissipation capacity. The T-plate reinforced box-space joint has good mechanical characteristics under bi-directional reciprocating load, which can realize the outward displacement of plastic hinge and meet the requirements of seismic design. The expression of the ultimate bearing capacity of the joint is obtained by curve fitting. The agreement between the expression and the finite element simulation is less than 5%, which can provide a basis for the design method of T-shaped reinforced spatial joints.

Key words: spatial box joint; T shape stiffener; hysteresis performance; bearing capacity; bi-directional reciprocating load

箱型柱因截面两个方向刚度相同、材料强度利用充分、结构自重轻等优点,广泛地应用于多高层钢结构中^[1-3]。为提高箱型柱-H型钢梁节点的刚度和抗扭能力,传统做法采用在节点域箱型柱内与梁上下翼缘对应处加焊横隔板,但在生产过程中由于隔板与壁板的四条焊缝施焊困难且焊接质量不宜保证,使得隔板式箱型节点制作过程费时费力^[4-6],因此笔者提出一种 T 型件外部加强型箱型柱-H型钢梁空间节点形式。

20 世纪 90 年代,新加坡学者 L. C. TING^[7]通过试验证明了大部分外加强型节点破坏是由于梁翼缘先屈服,较好地满足了“强节点弱杆件”的设计原则;R. GOSWAMI^[8]研究的外套环梁肋式连接节点抗震性能表明,节点破坏时塑性铰有外移趋势且节点强度较高,耗能能力较好。国内学者邵永松等^[9]的研究表明,T 型肋外加强节点在平面静力荷载作用下,塑性铰有效外移至梁翼缘与加劲肋连接端部。左恒等^[10]提出的装配式加强板式梁柱节点具有承载力高、刚度稳定、延性良好的力学性能。牟犇等^[11]研究表明加荷方式对外加强环式角柱节点刚度及承载力影响显著。

目前国内外学者对外加强型梁柱节点性能研究大多简化自平面框架的受力状态,而结构在实际服役中,钢框架中柱节点传力机理受四向框架梁及连接加劲肋刚度耦合影响^[12-14],特别是考虑双向往复荷载作用时,

节点受力更加复杂,是结构抗震的薄弱环节^[15-17]。针对此问题,笔者研究了 T 型件加强箱型空间节点在双向往复荷载作用下的滞回性能及破坏模式,得到该空间节点参数影响机制和承载力计算表达式,为节点设计方法提供依据。

1 有限元模型

1.1 几何模型

T 型件加强型空间节点采用箱型柱与 H 型钢梁焊接连接,分别在相邻钢梁之间与梁上、下翼缘平行处焊接 T 型件作为空间节点的外加强形式(见图1),钢梁翼缘宽度 b 和 T 型件角边长度 a 共同占据箱型柱宽 B 。定义 T 型件腹板高度 w 、翼缘宽度 d 、腹板厚度 t_{sw} 、翼缘厚度 t_{sf} 、角边长度 a 、翼缘长度 l ,其中 T 型件腹板厚度与钢梁翼缘等厚,该 T 型件可直接在 H 型钢的腹板处按设计参数沿折线切割而成(见图2)。

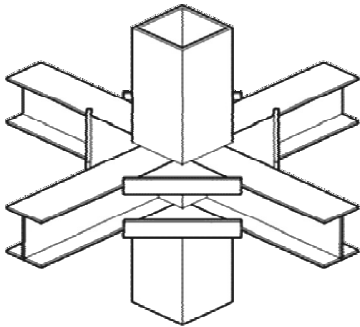


图1 T 型加强型箱型空间节点
Fig. 1 T shape stiffener box space joint

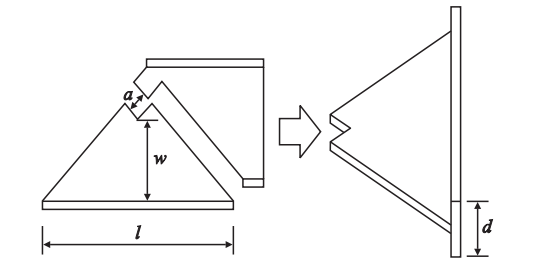


图2 T型件切割成型方式

Fig. 2 T-shape part cutting method

在框架结构反弯点位置处选取中柱节点作为几何模型,箱型空间节点钢梁长 $L=1\,250\text{ mm}$,箱型柱高 $H=1\,750\text{ mm}$,共对7组

25种工况节点进行滞回性能分析,试件编号及参数见表1。

1.2 模型参数

采用Abaqus有限元软件建模,节点钢材选用Q345B,本构关系为双线性模型,材料弹性模量 $E=2.06\times10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,屈服强度为373 MPa,抗拉强度为508 MPa。采用位移控制法,对四向梁端施加竖向反对称位移。取 $\Delta_y=12\text{ mm}$,位移 Δ_y 之前分三级加载, $1/3\Delta_y$ 和 $2/3\Delta_y$ 每级循环两次,之后按 $\Delta_y, 2\Delta_y, 3\Delta_y, \dots$ 加载,每级循环3次。

表1 试件编号及参数值

Table 1 The numbers and parameters of specimens												mm
试件组号	试件编号	箱型柱		H型钢梁				T型部件				
		B	t_c	h	b	t_w	t_f	w	d	t_{sw}	t_{sf}	a
1	T-SC1	250	8	250	150	8	12	150	80	12	8	50
	T-SC2	250	10	250	150	8	12	150	80	12	8	50
	T-SC3	250	12	250	150	8	12	150	80	12	8	50
	T-SC4	250	14	250	150	8	12	150	80	12	8	50
2	T-SC5	300	12	250	200	8	12	200	100	12	12	50
	T-SC6	300	12	300	200	8	12	200	100	12	12	50
	T-SC7	300	12	350	200	8	12	200	100	12	12	50
3	T-SC8	300	12	300	200	8	12	200	100	8	12	50
	T-SC9	300	12	300	200	8	12	200	100	10	12	50
	T-SC10	300	12	300	200	8	12	200	100	14	12	50
4	T-SC11	300	12	300	200	8	12	200	0	12	12	50
	T-SC12	300	12	300	200	8	12	200	40	12	12	50
	T-SC13	300	12	300	200	8	12	200	80	12	12	50
	T-SC14	300	12	300	200	8	12	200	120	12	12	50
5	T-SC15	200	12	300	150	8	12	200	100	12	12	25
	T-SC16	250	12	300	150	8	12	200	100	12	12	50
	T-SC17	300	12	300	150	8	12	200	100	12	12	75
	T-SC18	350	12	300	150	8	12	200	100	12	12	100
6	T-SC19	300	12	350	200	8	12	150	100	12	12	50
	T-SC20	300	12	350	200	8	12	250	100	12	12	50
	T-SC21	300	12	350	200	8	12	300	100	12	12	50
	T-SC22	300	12	350	200	8	12	350	100	12	12	50
7	T-SC23	300	12	300	200	8	12	200	100	12	8	50
	T-SC24	300	12	300	200	8	12	200	100	12	10	50
	T-SC25	300	12	300	200	8	12	200	100	12	14	50

选用Shell S4R单元,Tie约束建立有限元数值模型,箱型柱顶施加X、Z方向的平动约束,柱底施加X、Y、Z方向平动约束,箱型柱两向施加转动约束以实现柱端铰接,梁端施加约束保

证不发生平面外失稳。选用自由网格(进阶算法)划分模型单元,经试算,箱型柱和H型钢梁网格为40 mm、T型件网格为30 mm时能保证较高的计算精度且用时经济,有限元模型见图3。

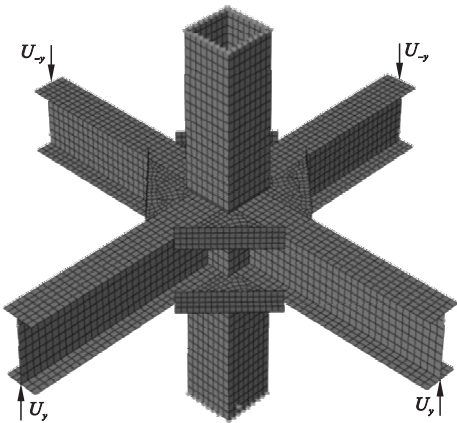


图 3 有限元模型
Fig. 3 Finite element model

1.3 有限元模型验证

对文献[11]已有试验的空间角柱节点进行有限元模拟验证。试件模型尺寸、钢材本构、加载方式及边界约束同试验条件。图 4 给出了角柱“西向梁、南向梁”滞回曲线的有限元计算结果与试验结果。从图中可以看出,二者变化趋势一致,各级荷载峰值点基本吻合。有限元峰值点弯矩值为 213 kN·m,相应试验值为 208 kN·m,偏差小于 5%,在允许误差之内。表明采用此方法建立有限元模型可以较好的模拟箱型柱-H 型钢梁空间节点的工作性能,能够准确捕捉节点受力特性。

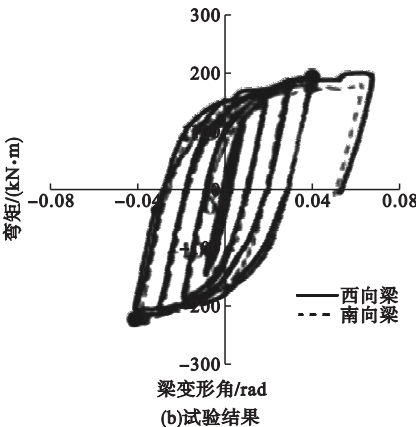
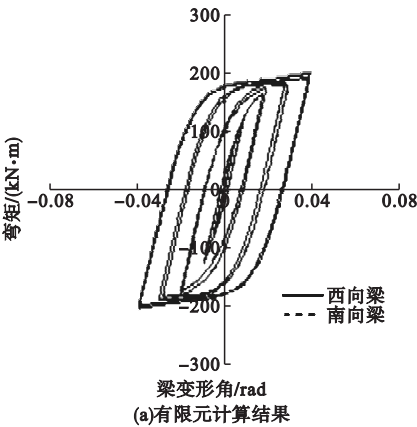


图 4 有限元结果与试验结果
Fig. 4 Finite element results and test results

2 节点传力机理

25 种工况空间节点有限元模拟结果表明,外加 T 型件可显著改变节点域应力传递路径,大部分应力迁移至节点域外侧 T 型件与梁截面

交汇端部,降低了节点域应力集中导致柱板屈曲破坏的可能,使得应力分布更加均匀合理。

2.1 T 型件翼缘宽度影响

第 4 组节点改变 T 型件翼缘宽度,在破坏时应力分布情况见图 5。

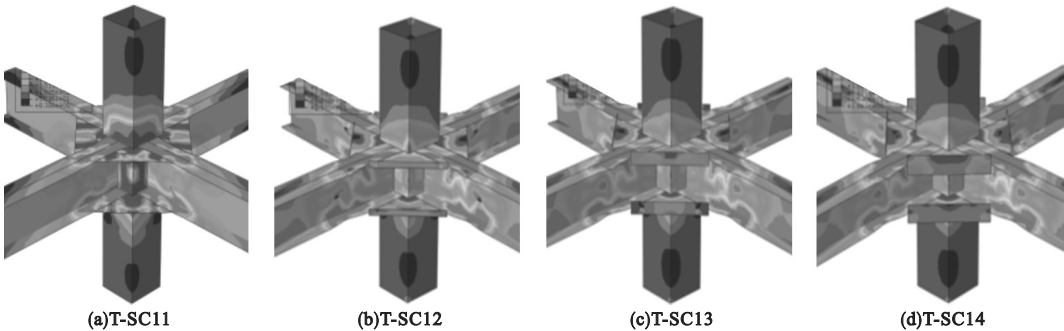


图 5 第 4 组试件破坏时刻应力分布云图
Fig. 5 Stress distribution of failure of the 4th group

当 $d=0$ 时,平板补强节点中心出现明显的应力集中现象,致使柱壁板屈曲严重丧失承载力(见图5(a))。逐渐增加T型件翼缘宽度,节点中心应力集中现象改善明显,塑性铰向外迁移,应力分布趋于合理,节点T-SC12~T-SC14均发生T型部件与梁交汇端部全截面屈服而破坏。

2.2 T型件腹板高度影响

第6组节点改变T型件腹板高度,在破

坏时应力分布情况见图6,其中试件T-SC7的T型件腹板高度 $w=200\text{ mm}$,与第6组试件共同分析腹板高度 w 的参数影响。由于T型件参与空间传力,缓解了节点处应力集中,随着腹板宽度由 150 mm 增加到 300 mm ,塑性铰出现位置逐渐远离节点域,全截面塑性屈服发生在加劲肋与节点交汇处,节点整体安全性提高且破坏模式符合抗震要求。

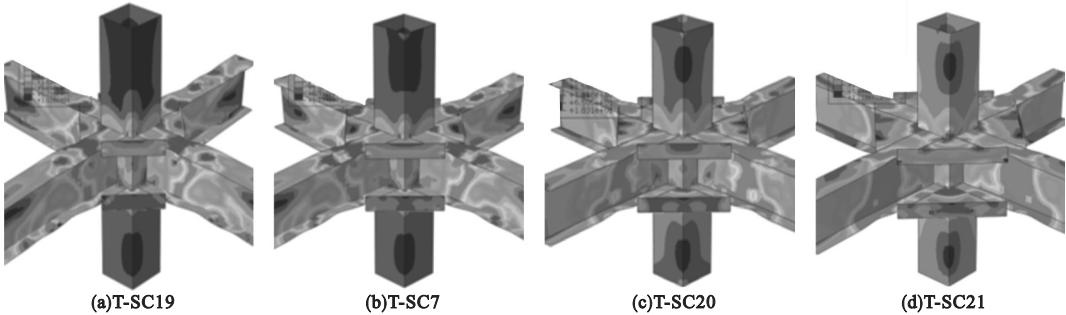


图6 第6组试件破坏时刻应力分布云图

Fig. 6 Stress distribution of failure of the 6th group

3 滞回性能

T型件加强箱型空间节点滞回曲线饱满呈梭形,正负向对称性好,表明此类空间节点具有较好的抗震性能和耗能能力。笔者以第4组、第6组节点试件为例进行分析。

3.1 滞回曲线

节点屈服之前,加载刚度与卸载刚度基本一致,没有残余塑性变形;随着梁端加载位移超过屈服,节点正负向加载均存在刚度退化现象(见图7)。

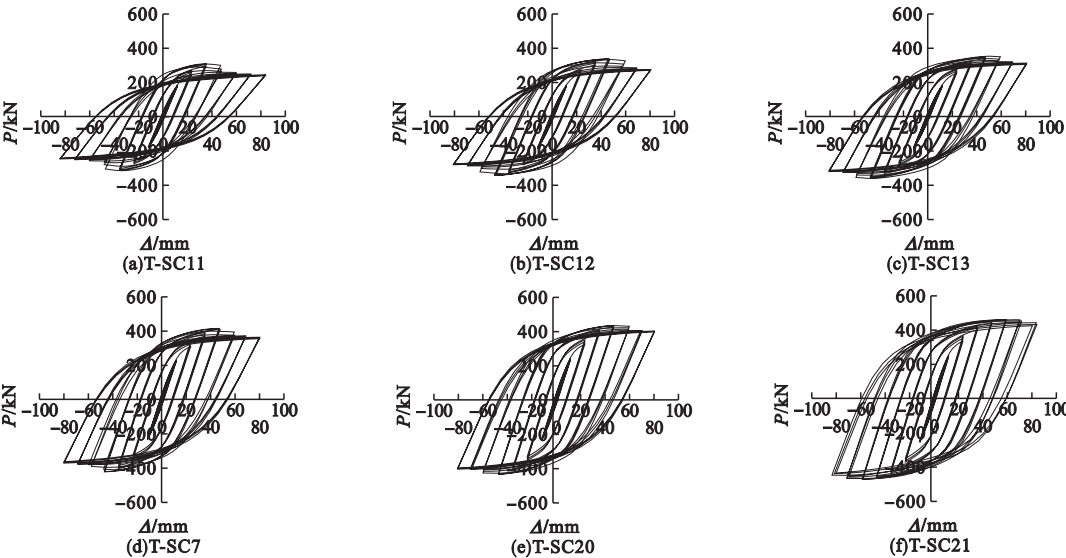


图7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves

T-SC11 ~ T-SC13; T-SC7、T-SC20 ~ T-SC21 曲线表明,增加 T 型件翼缘宽度和腹板高度,节点的滞回曲线愈加饱满,节点抗震性能提升明显。

3.2 骨架曲线

第 4 组、第 6 组节点骨架曲线见图 8。从图中可以看出,位移循环初期,正负向荷载与位移呈线性增长,随着循环位移增加,节点屈服且在节点域产生明显塑性变形,随后在

T 型件与钢梁交汇处出现全截面屈曲,节点丧失承载力。T 型件腹板宽度由 150 mm 增加到 350 mm,节点极限承载力提高了 29.7%; T 型件翼缘宽度由 0 增加到 80 mm,节点极限承载力提高了 17.1%;但当翼缘宽度由 80 mm 增加到 120 mm 时,节点极限承载力仅提高 0.4%。因此,笔者建议 T 型件最大翼缘宽度选取 80 mm 为宜。

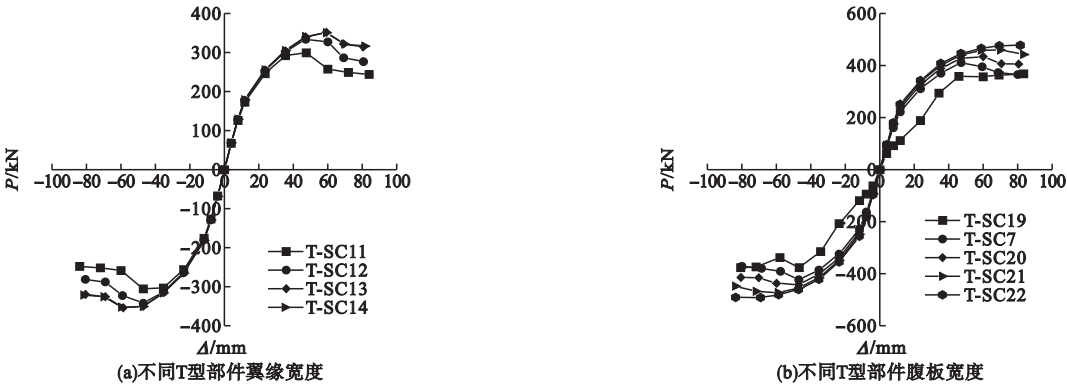


图 8 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves

3.3 刚度退化

第 4 组、第 6 组节点刚度退化曲线见图 9。从图中可以看出,腹板高度由 150 mm 增加到 200 mm,节点初始刚度提高

了 40.5%,但翼缘宽度由 0 增加到 120 mm,节点初始刚度仅提高了 2.3%。可见 T 型件翼缘宽度变化对节点初始刚度影响较小。

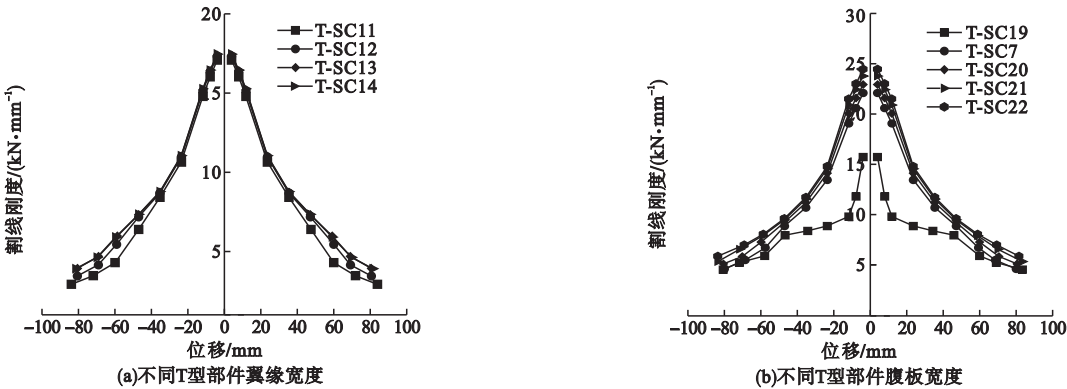


图 9 刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation curves

3.4 延性与耗能

第 4 组、第 6 组节点延性系数和耗能参数见表 2。其中位移延性系数 $\mu \geq 4.0$,等效

黏滞阻尼系数 $h_e \geq 0.2$,能量耗散系数 $E \geq 2.0$ 。反应节点具有良好的耗能性能,可避免试件脆性破坏。T 型件翼缘宽度由 0 增加到

120 mm,节点延性系数 μ 值和能量耗散系数 E 值分别提高了35.2%和9.5%,其中T-SC19腹板宽度为150 mm节点变形发展充分,节点延性达到13.4。第6组中,随着节点T型件腹板宽度增加,节点延性系数和能量耗散系数均有提高,节点抗震性能有显著增强。

表2 节点延性与耗能

Table 2 Ductility and energy consumption of joints				
组别	试件 节点	μ	h_e	E
4	T-SC11	5.4	0.3	2.1
	T-SC12	6.3	0.3	2.1
	T-SC13	7.3	0.4	2.3
	T-SC14	7.3	0.4	2.3
6	T-SC19	13.4	0.3	2.1
	T-SC7	9.3	0.4	2.3
	T-SC20	9.3	0.4	2.3
	T-SC21	9.5	0.4	2.4
	T-SC22	9.7	0.4	2.5

4 极限承载力

25个T型件加强箱型空间节点有限元计算的极限荷载值见表3。考虑柱板宽厚比 B/t_c 、梁高 h 、T型件翼缘宽度与柱板宽度比 d/B 、T型件腹板厚度与柱板厚度比 t_{sw}/t_c 、T型件角边长度 a 、腹板宽度 w 几个影响因素,不考虑箱型柱板宽厚比大于25、T型件翼缘厚与柱板厚绝对差值大于4 mm及T型件翼缘 $d=0$ 等构造不合理节点,采用曲线拟合待定系数,提出了T型件加强箱型空间节点极限荷载表达式:

$$f_u=0.1126\times\left(\frac{B}{t_c}\right)^{0.627}\times h^{0.908}\times\left(\frac{d}{B}\right)^{-0.037}\times\left(\frac{t_{sw}}{t_c}\right)^{0.369}\times a^{-0.213}\times w^{0.322}.$$

(1)

经比较,采用式(1)计算值与有限元模拟值最大误差在5%以内(见表3),符合允许误差要求,因此式(1)可计算该空间加强

型箱型节点的极限承载力。

表3 节点极限荷载计算结果

Table 3 Ultimate load calculation of joints			
试件 节点	有限元模拟 F_0/kN	式(1)计算 F_1/kN	$\left(\frac{F_1-F_0}{F_0}\right)/\%$
T-SC3	251.5	257.6	2.4
T-SC6	355.4	373.3	4.8
T-SC7	414.1	429.3	3.6
T-SC9	331.8	349.0	4.9
T-SC12	380.7	386.3	1.4
T-SC13	382.0	376.4	-1.5
T-SC14	383.1	370.7	-3.3
T-SC15	312.3	325.5	4.2
T-SC16	325.8	330.7	1.5
T-SC17	332.9	342.4	2.9
T-SC18	345.3	356.7	3.2
T-SC19	396.8	391.4	-1.4
T-SC20	485.1	462.3	-4.7
T-SC21	492.1	489.1	-0.6
T-SC22	511.0	514.0	0.6
T-SC23	382.3	373.3	-2.4
T-SC24	383.0	373.3	-2.6
T-SC25	384.1	373.3	-2.9

5 结论

- (1)T型件加强箱型空间节点在双向往复荷载作用下,大部分应力集中发生在T型件与H型钢梁上下翼缘处,节点塑性较外移至加劲肋与梁交汇处且全截面屈服破坏。
- (2)T型件加强节点滞回曲线饱满呈梭形,具有较好的抗震性能和耗能能力。增加T型件翼缘宽度与腹板高度对节点性能影响明显,建议T型件翼缘宽度取值80 mm为宜。
- (3)提出空间节点极限承载力表达式,计算结果与模拟值符合程度较好,误差均在5%以内,可用于T型件空间加强箱型节点承载力计算。

参考文献

- [1] 董新元,刘仲洋,毛会. 方钢管柱-H型钢梁顶底T型钢单向螺栓连接节点性能研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2020,38(1):48-54.
(DONG Xinyuan, LIU Zhongyang, MAO Hui. Study on performance of T-shaped steel one-way bolted joint of square-steel-tubular column and H-steel beam [J]. Journal of Hebei institute of architecture and civil engineering, 2020,38(1):48-54.)
- [2] KIM T, WHITTAKER A S, JGILANI A S. Cover-plate and flange e-plate steel moment-resisting connections [J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(4):474-482.
- [3] SHANMUGAM N E, TING L C, LEE S L. Behaviors of I-beam to Box-column connections stiffened externally and subjected to fluctuating loads [J]. Journal of constructional steel research, 1991, 20(2):129-148.
- [4] 孙艳丽,董文天,刘娟. 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[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(5):881-889.
(SUN Yanli, DONG Wentian, LIU Juan. Nonlinear FEM analysis on seismic performance of space joint of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete and steel beam [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017,33(5):881-889.)
- [5] BIAN Jinliang, CAO Wanlin, ZHANG Zongmin, et al. Cyclic loading tests of thin-walled square steel tube beam-column joint with different joint details [J]. Structures, 2020,25:386-397.
- [6] 孙艳丽,李坤. 沈阳市装配式住宅发展存在的问题及对策[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2019,21(3):269-273.
(SUN Yanli, LI Kun. Problems and countermeasures of prefabricated housing development in Shenyang [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(social science), 2019,21(3):269-273.)
- [7] TING L C, SHANMUGAM N E, LEE S L. Box-column to I-beam connections with external stiffeners [J]. Journal of constructional steel research, 1991, 8(3):209-226.
- [8] GOSWAMI R, MURTY C V R. Externally reinforced welded I-beam-to-box-column seismic connection [J]. Journal of engineering mechanics, 2010, 136(1):23-30.
- [9] 邵永松,金路,谢礼立. T型外部补强箱型节点加劲肋长度的确定[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(10):20-25.
(SHAO Yongsong, JIN Lu, XIE Lili. Determination for stiffener length of external T-stiffener box-column to I-beam connections [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2009, 41(10):20-25.)
- [10] 左恒,陶忠,刘贝. 新型法兰盘外环板式钢节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构,2019,49(11):82-86.
(ZUO Heng, TAO Zhong, LIU Bei. Experimental study on seismic performance of a new type of flange outer ring plate steel joint [J]. Building structure, 2019,49(11):82-86.)
- [11] 牟犇,武梦龙,牟在根. 外加强环式H型钢梁-方钢管角柱节点抗震性能[J]. 工程科学学报,2018,40(8):1005-1016.
(MOU Ben, WU Menglong, MOU Zaigen. Seismic performance of H-shaped steel beam-to-square steel corner column connection with external strengthened ring [J]. Chinese journal of engineering, 2018,40(8):1005-1016.)
- [12] 金路,陈立平,张岩. T型外补强箱型空间节点滞回性能研究[J]. 钢结构,2019,34(9):28-33.
(JIN Lu, CHEN Liping, ZHANG Yan. Research on hysteretic behavior of external T-stiffener box-column to I-beam space connections [J]. Steel construction, 2019,34(9):28-33.)
- [13] 徐善华,张宗星,苏超. 中性盐雾环境锈蚀H型钢柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(1):49-57.
(XU Shanhua, ZHANG Zongxing, SU Chao. Experimental study on seismic behavior of corroded H-shaped steel columns under neutral salt spray environment [J]. Journal of building structures, 2019,40(1):49-57.)
- [14] 王新武,布欣. T型钢连接钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑技术,2016,47(8):755-757.
(WANG Xinwu, BU Xin. Seismic performance test research on steel frame with T type steel connection [J]. Architecture technology, 2016, 47(8):755-757.)
- [15] 梁乘玮,王新武,布欣. 钢框架梁柱T型钢连接空间节点抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2018,48(5):162-168.
(LIANG Chengwei, WANG Xinwu, BU Xin. Research on seismic behavior of steel frame beam to column connection with T-stub [J]. Industrial construction, 2018, 48(5):162-168.)
- [16] 贺欢欢,王新武. 半刚性梁柱连接框架中柱节点有限元分析[J]. 钢结构,2017,32(11):32-36.
(HE Huanhuan, WANG Xinwu. Finite element analysis of semi-rigid beam to middle column connections [J]. Steel construction, 2017, 32(11):32-36.)
- [17] 武梦龙,闫洪生,李会文. 加载方式对方钢管角柱节点抗震性能影响有限元分析[J]. 工程建设,2017,49(11):19-23.
(WU Menglong, YAN Hongsheng, LI Huiwen. Finite element analysis of the influence of loading paths on seismic property of corner column of steel beam [J]. Engineering construction, 2017,49(11):19-23.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)