引用格式：胡习兵，吴子为，向杰，等. T型钢连接梁柱节点恢复力模型研究[J]. 工业建筑，2025，55(10)：212-218. HU Xibing，WU Ziwei，XIANG Jie，et al. Research on the Restoring Force Model for T-Stub Connected Beam-Column Joints[J]. Industrial Construction，2025，55(10)：212-218 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25012002

T型钢连接梁柱节点恢复力模型研究*

胡习兵[1]　吴子为[1]　向　杰[1]　李东东[2]　周　权[2]

（1. 中南林业科技大学土木工程学院，长沙　410004；2. 中铁城建集团有限公司，长沙　410208）

摘　要　为研究T型钢连接梁柱节点的抗震性能，对2个T型钢连接梁柱节点试件进行了低周往复加载试验，得到了该类连接节点的滞回曲线、骨架曲线和破坏模式等力学指标。根据骨架曲线的形状特点，提出了该类节点的简化骨架曲线模型，采用机构分析法和小变形叠加原理，确定了简化骨架曲线模型的力学参数计算方法。通过对试验数据进行回归统计，得到了节点的滞回规则表达式，并提出了该类节点的恢复力模型。通过将理论模型计算结果与试验测试数据进行对比，验证了模型的有效性。研究结果表明：T型钢连接梁柱节点是典型的半刚性节点，具有良好的抗震性能，节点的恢复力模型具有较高的计算精度，可用于该类节点的抗震性能分析与评估。

关键词　T型钢连接梁柱节点；低周往复试验；滞回曲线；骨架曲线；恢复力模型

Research on the Restoring Force Model for T-Stub Connected Beam-Column Joints

HU Xibing[1]　WU Ziwei[1]　XIANG Jie[1]　LI Dongdong[2]　ZHOU Quan[2]

(1. *College of Civil Engineering*, *Central South University of Forestry and Technology*, *Changsha* 410004, *China*; 2. *China Railway Urban Construction Group Corporation Limited*, *Changsha* 410208, *China*)

Abstract: To investigate the seismic performance of T-stub connected beam-column joints, quasi-static loading tests were conducted on two T-stub joint specimens. Key mechanical indicators, including hysteretic curves, skeleton curves, and failure modes, were obtained. Based on the shape characteristics of the skeleton curves, a simplified skeleton curve model was proposed for this joint type. The mechanical parameter calculation method for the simplified model was established through mechanism analysis and the small deformation superposition principle. By performing regression analysis on experimental data from this study and joint test data from existing literature, the hysteretic rule expression was fitted and the restoring force model for such joints was developed. The validity of the proposed model was verified through a comparative analysis between theoretical calculations and experimental results. Research findings demonstrate that T-stub connected beam-column joints exhibited typical semi-rigid connection behavior with favorable seismic performance. The established restoring force model demonstrated high computational accuracy, making it suitable for seismic performance analysis and evaluation of this type of joint.

Keywords: T-stub connected beam-column joint; quasi-static loading test; hysteresis curve; skeleton curve; restoring model

* 湖南省自然科学基金项目(2023JJ31013)；湖南省教育厅科研重点项目(23A0205)。

第一作者：胡习兵，博士，副教授，主要从事钢结构抗震性能研究研究。

通信作者：吴子为，16224469362@qq.com。

收稿日期：2025-01-20

T 型钢连接梁柱节点是钢框架结构中一种典型的半刚性连接节点，节点在传递梁端弯矩的同时，会产生一定的转角变形[1]，在地震过程中具有较高的耗能能力，因而在工程中得到了广泛应用[2]。

国内外研究者对该类梁柱连接节点的力学性能展开了大量研究。舒兴平等[3]采用机构分析法得到了 T 型钢梁柱连接节点的弯矩-转角关系。计算表明，T 型钢翼缘厚度与长度、梁高、竖向螺栓间距及柱翼缘厚度对节点性能有显著影响。李黎明等[4]提出了外套管式梁柱连接节点 T 型钢连接做法的三参数弯矩-转角曲线方程与计算方法，但其研究未考虑受弯时中性轴的偏移。夏永强等[5]推导了 T 型钢连接节点的初始转动刚度计算公式，研究表明，T 型钢梁柱半刚性连接的转角主要源于受拉侧 T 型钢翼缘板的变形。李泽深等[6]探讨了节点参数对 T 型钢连接梁柱节点破坏模式、延性和滞回性能的影响。节点初始刚度、极限荷载与变形能力主要受 T 型钢几何参数、螺栓数量和梁高的影响较大，受柱翼缘厚度与螺栓直径影响较小。王新华等[7]通过试验，对端板连接节点的力学性能和破坏模式进行研究。此类连接的破坏模式与初始刚度和传统螺栓节点相近，且在全生命周期内保有不低于 85% 的承载力。孙海粟等[8]通过对 T 型钢连接件进行低周往复试验，研究了构件尺寸对抗震性能的影响。试验结果表明，通过增加 T 型钢翼缘厚度，可在保持良好延性的同时，显著提升节点的刚度、承载力与耗能能力。Piluso 等[9]通过组件法建立了 T 型钢连接件在循环作用下的恢复力模型。Latour 等[10]以能量耗散为基准建立了 T 型钢连接件的恢复力模型。周超等[11]根据有限元和理论分析，简化得到 T 型钢连接件初始抗弯刚度力学模型。夏心红等[12]通过有限元实体模型和组件法，拟合了外伸端板半刚性连接形状系数的实用计算式。杨娜等[13]提出了冷弯薄壁型钢板螺栓连接梁柱节点的恢复力简化模型。郭健等[14]结合试验拟合数据，提出了钢混端板螺栓连接节点的恢复力模型。

恢复力模型是通过对滞回曲线简化得到的数学模型，能反映研究对象在不同受力阶段加载和卸载时的承载能力和滞回规则，是进行弹塑性时程分析的关键力学模型。目前，对 T 型钢连接梁柱节点的低周往复试验研究成果较少，缺乏合适的恢复力模型。本文通过低周往复试验和理论分析方法，对 T 型钢连接梁柱节点的力学性能进行了深入研究，提出了该类节点的恢复力模型。

1　试验概况

1.1　试件设计

基于 GB 50017—2017《钢结构设计标准》[15]和 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》[16]设计了 2 个 T 型钢连接梁柱节点试件，如图 1 所示，试件的相关截面尺寸见表 1。试件钢材材质为 Q355B，加劲肋与端板厚度为 8 mm，采用 10.9 级 M16 的高强度螺栓连接，并依据 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》[17]的相关要求施加了 100 kN 预紧力。试件设计时，依据 T 型钢连接件截面尺寸对节点初始刚度的影响，考虑了不同 T 型钢连接件尺寸的变化。

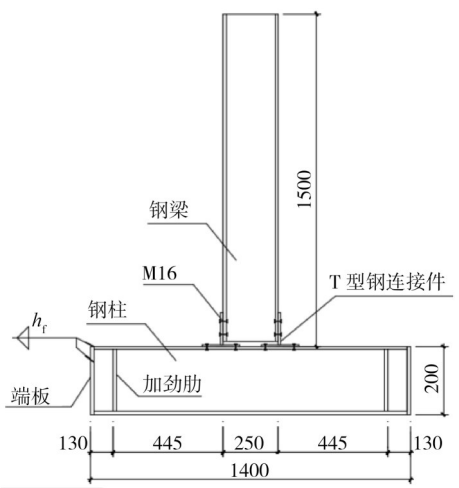


图 1　试件尺寸　mm

Fig. 1　Detailed sizes of specimens

表 1　截面尺寸

Table 1　Component sizes　mm

节点	梁截面	柱截面	T 型钢截面
TJ-1	H300×150×6×6	H250×6×10×200	T200×200×7×9
TJ-2	H300×150×6×6	H250×6×10×200	T150×150×8×12

注：T 型钢腹板宽度为 150 mm。

根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》[18]的相关要求，对该节点的同一批钢材进行了相应的材性试验，

其力学指标测试结果见表2。

表2 钢材力学参数

Table 2 Mechanical parameters of steels

试件编号	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa
GBC-1	5.77	360.12	511.25
GBC-2	5.69	368.45	527.71
GBC-3	5.74	355.23	493.79
平均值	5.73	361.26	510.91

注：t为材性试件的厚度；f_y为材性试件屈服强度；f_u为材性试件屈服强度。

1.2 加载方案

为方便试验加载，将钢柱平行于地面，通过压梁、螺杆和垫块固定于反力箱顶板上，采用悬臂梁式加载方案。测试时，使用10 t电液伺服作动器在梁端施加水平往复荷载，节点荷载-位移曲线的数据由MTS系统自动采集。在节点梁端上下翼缘布置了2个位移计，以测量节点区梁上下翼缘位移差值，如图2所示。试验加载装置布置如图3所示。

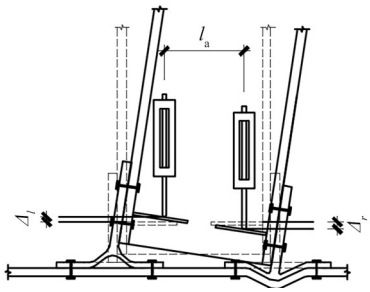


图2 转角测量示意

Fig. 2 Schematic diagram of angle measurement

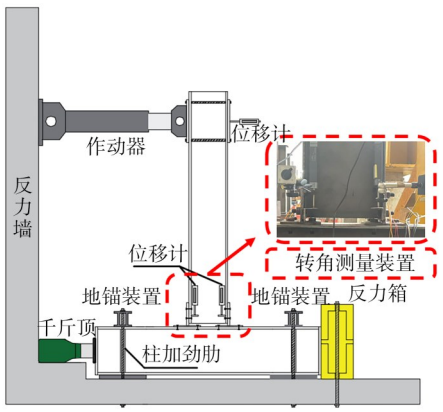


图3 试验加载装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the test loading device

由图2可测得T型钢连接梁柱节点的相对转角θ，如式(1)所示。

$$\theta = \frac{\Delta_r - \Delta_l}{l_a} \tag{1}$$

式中：Δ_l和Δ_r分别为梁固定端内侧左右翼缘板的竖向位移；l_a为2个位移计的距离。

试验采用位移控制加载制度，试件屈服前，按每级0.2δ_y逐级加载至屈服位移δ_y（屈服位移由理论计算确定），每个荷载循环2次，加载速度为0.02 mm/s。进入屈服状态后，按每级1倍屈服位移δ_y逐级加载，每个荷载循环3次，如图4所示。

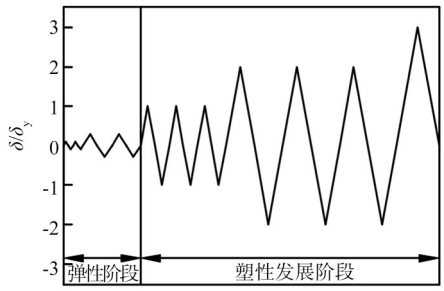


图4 试验加载方案

Fig. 4 Test loading scheme

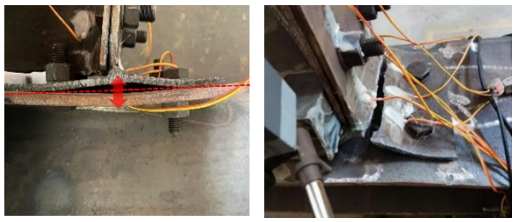
1.3 试验结果分析

1.3.1 试验现象及破坏形态

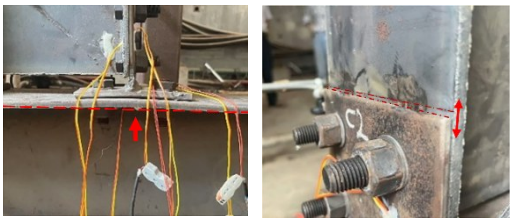
试件从加载到破坏一般可分为4个阶段：弹性受力阶段、T型钢翼缘屈服变形阶段、高强螺栓连接部位的摩擦滑移阶段、节点破坏阶段。2个试件由于节点设计参数的不同，在试验过程中表现出了一定的差异。

加载初期，T型钢连接件通过螺栓与梁和柱紧密相连，试验数据呈线性变化趋势。随位移持续增加，T型钢翼缘和柱翼缘等部分逐步发生塑性变形。TJ-1试件在24.32 mm位移加载阶段时，T型钢翼缘发生塑性变形，与柱翼缘发生脱离，如图5(a)所示；随梁端位移增大，T型钢翼缘塑性变形逐步增大，当位移达到27.03 mm时，T型钢连接件产生滑移现象，T型钢翼缘与腹板连接处出现细小裂缝，柱翼缘出现较小的屈曲变形；当位移达到36.53 mm时，T型钢连接件的塑性发展达到极限，T型钢翼缘与腹板处的裂缝扩展，导致最终发生断裂，如图5(b)所示。

TJ-2试件位移达到12.58 mm时，柱翼缘发生小变形；当位移达到24.63 mm时，柱翼缘和T型钢翼缘产生较明显的变形，如图5(c)所示；当位移达到24.36 mm时，T型钢连接件产生滑移现象，如图5(d)所示。后续由于试件滑移而终止加载。



（a）TJ-1 连接件翼缘变形　（b）TJ-1 连接件翼缘断裂



（c）TJ-2 柱翼缘屈曲　（d）TJ-2 连接件滑移

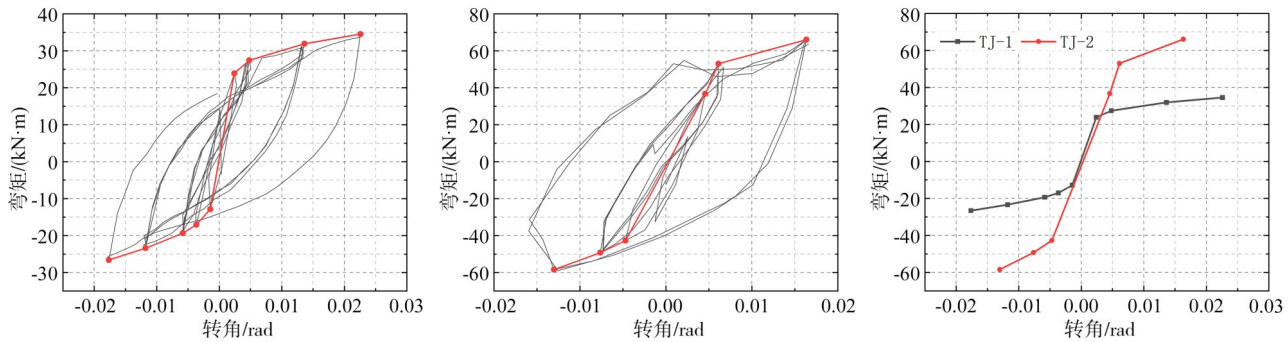
图 5　节点破坏形态

Fig. 5　The failure pattern of joint

从 2 个试件的破坏形态差异可以看出：T 型钢连接件翼缘厚度增加，其连接件翼缘抗弯能力增强，承载力增大，弯曲变形减小。

1.3.2　节点滞回曲线与骨架曲线

滞回曲线与骨架曲线能够反映节点在循环荷载作用下的抗震性能变化情况，节点的弯矩-转角试验测试滞回曲线如图 6 所示，其试验测试力学指标见表 3。可以看出：1）T 型钢连接梁柱节点滞回曲线饱满，具有良好的耗能能力和抗震性能；2）节点初始转动刚度较大，2 个试件的初始转动刚度平均值为 8948 kN·m/rad，节点属于典型的半刚性连接节点[1]，随梁端位移增大，节点转动刚度退化较为明显；3）T 型钢翼缘厚度对节点的承载能力和抗震性能影响明显。



（a）节点 TJ-1 滞回曲线　（b）节点 TJ-2 滞回曲线　（c）骨架曲线对比

图 6　节点滞回曲线与骨架曲线

Fig. 6　Hysteresis curves and skeleton curves of joints

表 3　节点力学参数

Table 3　Mechanical parameters of joints

构件编号	加载方向	M_y/(kN·m)	θ_y/rad	M_u/(kN·m)	θ_u/rad
TJ-1	正向	23.8868	0.00242	34.5268	0.02257
	负向	12.8478	0.00144	23.3814	0.01178
TJ-2	正向	36.6814	0.00457	66.05392	0.01634
	负向	42.7063	0.00471	49.2366	0.00764

注：M_y 为节点的屈服强度；θ_y 为节点的屈服转角；M_u 为节点的极限强度；θ_u 为节点的极限转角。

2　节点骨架曲线简化模型

根据 T 型钢连接梁柱节点试验测试骨架曲线特征，可将其骨架曲线简化为双折线模型，如图 7 所示。

图中，OA 段表示节点处于弹性阶段，节点的初始转动刚度为 R_{ke}，A 点分别对应于节点的屈服弯矩 M_y 和屈服转角 θ_y。AB 段表示节点屈服后的力学特征，节点屈服后的转动刚度为 R_{kp}。

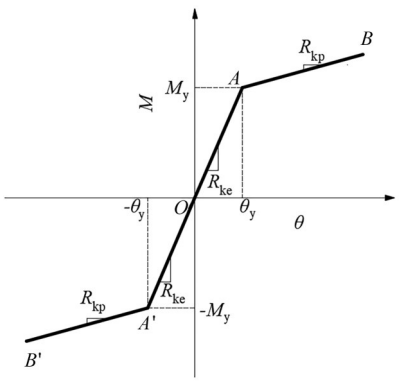


图 7　骨架曲线简化模型

Fig. 7　Skeleton curve simplified model

2.1　初始转动刚度（R_{ke}）

T 型钢连接节点的初始转动刚度可由式（2）得出。

$$R_{ke} = \mathrm{d}M_e/\mathrm{d}\theta_e \tag{2a}$$

$$\theta_e = \Delta_e/(h_b + t_{tw}) \tag{2b}$$

式中：M_e为节点弹性弯矩；θ_e为节点在M_e作用时的转角；h_b为梁截面高度；t_{tw}为T型钢腹板厚度；Δ_e为T型钢连接节点在弯矩作用下的水平位移。

根据小变形叠加原理，节点水平位移Δ_e可假定为图8中所示的4个位移叠加：受拉区高强螺栓的受拉变形值Δ_{bl}、柱翼缘变形所引起的节点水平位移Δ_{cf}、T型钢翼缘变形所引起的水平位移Δ_{tf}、T型钢腹板拉压所引起的水平位移差Δ_{tw}。具体计算方法详见文献[3]。

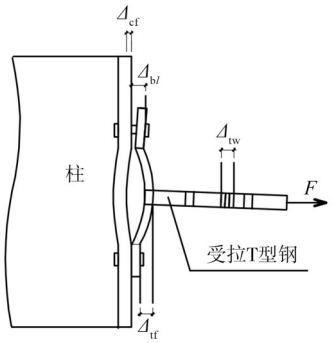


图8 节点受力模型及初始水平位移组成

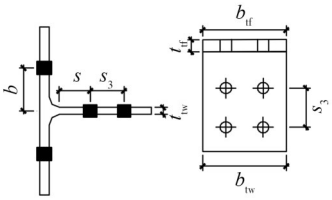
Fig. 8 Mechanical model and the constituents of initial horizontal displacement

将各小变形位移值计算式代入式(2)，可得节点的初始转动刚度计算式为：

$$R_{ke} = (h_b + t_{tw})^2/U \tag{3a}$$

$$U = \frac{t_{cf} + t_{tf}}{\alpha m E A_b} + \frac{\beta b^3}{6E(I_{cf} + I_{tf})} + \frac{s_3 + 2s}{\psi EA} \tag{3b}$$

式中：m为受拉高强螺栓个数；A_b为高强螺栓截面积；E为钢材杨氏模量；t_{cf}为柱翼缘厚度；t_{tf}为T型钢翼缘厚度；α为系数，取0.6061；b为T型钢腹板中线至邻近腹板处螺栓孔的距离；β为系数，取2.5027；I_{cf}为柱翼缘假设计算截面的截面惯性矩；I_{tf}为T型钢翼缘假设计算截面的截面惯性矩；ψ为系数，取0.7407；A为T型钢腹板的截面积；s_3和s的意义见图9。



注：b_{tf}为T型钢翼缘板长度；b_{tw}为T型钢腹板长度；t_{tf}为T型钢翼缘板厚度。

图9 T型钢连接件几何参数

Fig. 9 Geometric parameter of the T-stub connection

2.2 屈服弯矩(M_y)

T型钢连接梁柱节点屈服形态有多种可能[4]，如：T型钢翼缘受弯屈服、受拉螺栓屈服和两者同时屈服等。

根据节点参数和传力特点，可以得到不同屈服模式时节点的屈服弯矩计算表达式(由于单独螺栓受拉屈服对应于节点脆性破坏模式，在节点设计时应避免，故本文不考虑该屈服模式)。通过分别计算，取较小值作为其屈服弯矩值：

$$M_{y1} = \frac{2f_y h_{be} b_{tf} t_{tf}}{\sqrt{4g_y^2/t_{tf}^2 + 3}} \tag{4a}$$

$$M_{y2} = \left(\frac{b_{tf} t_{tf}^2 f_u}{4} + mN_t^b c\right) \times 2h_{be}/(a + c) \tag{4b}$$

其中 $N_t^b = (\pi d_e^2/4) f_t^u$

式中：g_y为两屈服点之间的距离；h_{be}为梁截面高度加T型钢腹板厚度；N_t^b为螺栓的极限抗拉强度；d_e为螺栓的有效直径；a为螺栓中心至T型钢外边缘的距离；c为受拉梁翼缘中心至螺栓中心的距离。

2.3 屈服后转动刚度(R_{kp})

根据文献[19]的试验与有限元分析结果，节点屈服后的转动刚度可按式(5)计算。

$$R_{kp} = \alpha R_{ke} \tag{5}$$

式中：α取值可为1/60~1/20，具体取值根据试件尺寸定义。

3 滞回规则的确定

3.1 T型钢连接梁柱节点的滞回规则

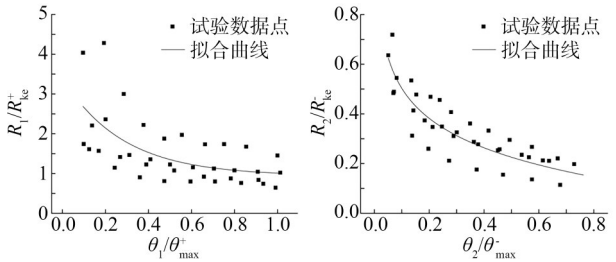
为建立T型钢连接梁柱节点的恢复力模型，需确定T型钢连接梁柱节点的滞回规则。

结合本文试验和文献[8]中相关试验数据，得到了节点的加载刚度和卸载刚度的数据分布，如图10所示。通过对相关数据进行曲线拟合，得到了节点各阶段刚度与初始转动刚度间的计算表达式：

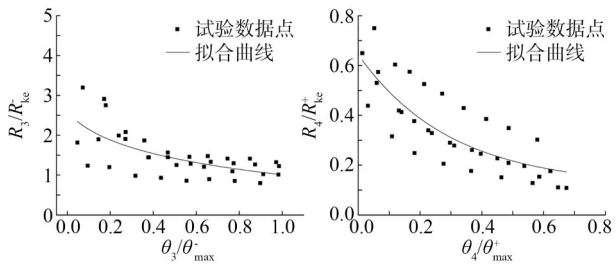
$$\frac{R_1}{R_{ke}^+} = 0.93915 + 2.46624e^{-3.57764\frac{\theta_1}{\theta_{max}^+}} \tag{6a}$$

$$\frac{R_2}{R_{ke}^-} = 0.10715 - 0.16829\ln\left(\frac{\theta_2}{\theta_{max}^-} - 0.00507\right) \tag{6b}$$

$$\frac{R_3}{R_{ke}^-} = 1.08076 - 0.68832\ln\left(\frac{\theta_2}{\theta_{max}^-} - 0.11225\right) \tag{6c}$$



（a）负向卸载



（b）正向卸载

图 10　节点刚度退化规律

Fig. 10　Stiffness degradation laws of joints

$$\frac{R_4}{R_{ke}^+} = 0.11646 + 0.52731e^{-3.32026\left(\frac{\theta_1}{\theta_{max}^+}\right)} \tag{6d}$$

式中：R_{ke}^+为节点正向初始转动刚度；R_{ke}^-为节点负向初始转动刚度；R_1为节点正向屈服后卸载转动刚度；R_2为节点正向屈服卸载后反向加载时的转动刚度；R_3为节点反向屈服后卸载转动刚度；R_4为节点反向屈服卸载后正向加载时的转动刚度。

根据节点的简化骨架曲线模型和滞回规则，则节点的恢复力模型如图 11 所示。

3.2　模型验证结果

为验证本文所提恢复力模型的计算精度，对

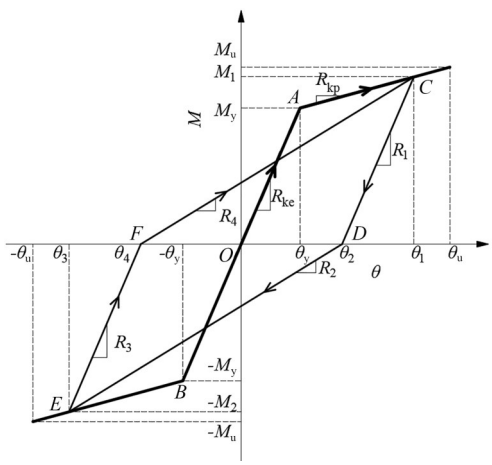


图 11　T 型钢连接节点恢复力模型

Fig. 11　Restoring model of T-stub connected joints

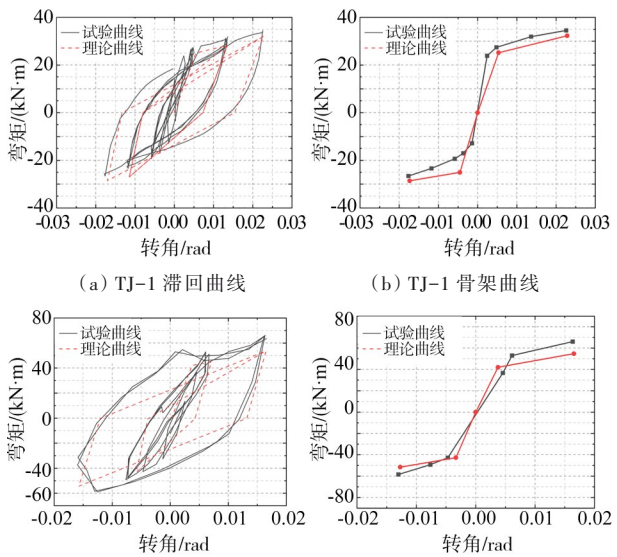
TJ-1、TJ-2 节点进行了计算和对比，如表 4 和图 12 所示。由于 TJ-2 试件在最后一级加载时，T 型钢连接件与钢梁间发生滑移，导致其弯矩-转角曲线发生错动，恢复力模型计算结果与本文试验结果存在一定的误差。但从整体的对比结果可以看出，本文提出的恢复力模型与试验结果吻合较好。

表 4　模型验证结果

Table 4　Model validation results

试件	$R_{ke,\omega}$	$M_{y,\omega}$	$R_{kp,\omega}$	$R_{1,\omega}$	$R_{2,\omega}$	$R_{3,\omega}$	$R_{4,\omega}$
TJ-1	1.213	1.042	0.892	0.942	0.913	1.087	1.124
TJ-2	1.132	0.868	0.924	1.032	0.842	0.793	0.736

注：该误差分析为理论模型中的特征值“初始刚度 R_{ke}、屈服弯矩 M_y、强化刚度 R_{kp}、正向卸载刚度 R_1、正向加载刚度 R_2、负向卸载刚度 R_3、负向加载刚度 R_4”与试验数据的误差。



（a）TJ-1 滞回曲线　（b）TJ-1 骨架曲线

（c）TJ-2 滞回曲线　（d）TJ-2 骨架曲线

图 12　恢复力模型曲线与试验曲线对比

Fig. 12　Comparison of restoring force model curves and test curves

4　结　论

经过本文试验研究与理论分析，可以得出以下结论：

1）T 型钢连接梁柱节点为半刚性连接节点，具有良好的抗震性能。在循环荷载作用下，节点表现出良好的延性与变形能力，其滞回曲线饱满，耗能机制明确，具有良好的耗能能力。

2）简化的骨架曲线与恢复力模型，能够较为精准地描述节点在循环荷载作用下的特征值。采用机构法求解节点的承载力特征值，并根据试验数据拟合出节点的滞回规则的数学表

达式,通过算例对比,验证了模型的有效性和适用性,可为同类节点在复杂荷载作用下的非线性分析与抗震性能评估提供参考。

参 考 文 献

[1] 陈惠发. 钢框架稳定设计[M]. 周绥平,译. 上海:世界图书出版公司,1999.

[2] 胡习兵. 半刚性连接平面钢框架结构弹塑性分析及抗震性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[3] 舒兴平,胡习兵. T型钢半刚性连接节点的承载力分析[J]. 钢结构,2005,20(5):35-40.

[4] 李黎明,陈以一,李宁,等. 外套管式梁柱节点弯矩-转角关系控制参数研究[J]. 工程力学,2010,27(7):126-130.

[5] 夏永强,肖南. T形钢连接梁柱半刚性节点初始转动刚度计算公式[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(10):1935-1942.

[6] 李泽深,李秀梅,郑小伟,等. T形钢连接梁柱半刚性节点滞回性能试验研究及数值分析[J]. 建筑结构学报,2014,35(7):61-68.

[7] 王新华,孙乐乐,王培军. T形方颈单边螺栓连接钢梁-方钢管柱节点试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2024,26(12):12-23.

[8] 孙海粟,布欣,王新武,等. T型钢连接钢框架梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(6):164-169.

[9] PILUSO V, RIZZANO G. Experimental analysis and modelling of bolted T-stubs under cyclic loads[J]. Journal of Constructional Steel Research,2008,64(6):655-669.

[10] LATOUR M, PILUSO V, RIZZANO G. Cyclic modeling of bolted beam-to-column connections: component approach[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011,15(4):537-563.

[11] 周超,牟星,周艳,等. T形件初始抗弯刚度简化计算研究[J]. 工业建筑,2024,54(7):153-158.

[12] 夏心红,方辉,舒兴平,等. 钢结构梁柱半刚性连接性能数值分析研究[J]. 工业建筑,2025,55(2):138-145.

[13] 杨娜,钟延营,彭雄. 冷弯薄壁型钢钢板-螺栓梁柱节点滞回性能与恢复力简化模型研究[J]. 工业建筑,2011,41(增刊1):247-250.

[14] 郭健,黄频,冷巧娟,等. 方钢管钢骨混凝土柱与钢梁端板螺栓连接节点恢复力模型研究[J]. 工业建筑,2016,46(7):173-177.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程:JGJ 82—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[18] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[19] 翁庆莲. 钢框架梁柱T型钢连接节点的本构模型研究[D]. 南宁:广西大学,2015.