文章编号:1674-2974(2026)03-0035-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026022

摩擦型腹板自复位梁柱节点初始转动刚度研究

周凌宇[1,2],许磊[1,2],陈浩[3],阳凡[3],王其良[3],方蛟鹏[1,2†],贺学军[1,2]
[1. 中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075;
2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心(中南大学),湖南 长沙 410075;
3. 湖南建设投资集团有限责任公司,湖南 长沙 410029]

摘 要:为精准考量自复位节点的初始转动刚度和明确连接件间摩擦对初始转动刚度的贡献,设计了一种摩擦型腹板自复位梁柱延性节点.该节点由摩擦腹板、预应力索、上下狗骨形翼缘连接板、黄铜摩擦片、高强度摩擦型螺栓构成.设计了两种不同尺寸的狗骨形翼缘连接板和不同预应力的预应力索,并通过试验得到节点弯矩-转角及各组件的相关材性数据.随后,基于欧洲规范EC3中组件法相关原理,推导得到该节点初始转动刚度计算公式.引入Iwan模型表征摩擦的力学行为,将摩擦腹板中的摩擦等效为组件法中的弹簧模型.试验结果与计算公式对比分析表明,二者吻合良好且摩擦腹板对转动刚度的贡献不可忽略.

关键词:自复位节点;初始转动刚度;摩擦腹板;组件法;Iwan模型
中图分类号:TU398.9 **文献标志码**:A

Research on initial rotational stiffness of self-centering beam-column joints with friction web

ZHOU Lingyu[1,2], XU Lei[1,2], CHEN Hao[3], YANG Fan[3], WANG Qiliang[3],
FANG Jiaopeng[1,2†], HE Xuejun[1,2]
[1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. China National Engineering Laboratory of High-Speed Railway Construction Technology (Central South University), Changsha 410075, China;
3. Hunan Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410029, China]

Abstract: To accurately consider the initial rotational stiffness of self-centering joints and determine the contribution of friction between the connectors to the initial rotational stiffness in structural analysis, a friction web self-centering beam-column ductile joint was designed. The joint is composed of friction web, prestressed cables, upper and lower dog-bone flange connection plates, brass friction plates and high-strength friction bolts. Two different sizes of dog-bone flange connection plates and different prestressed cables were designed, and the bending moment-rotation angle of the joint, along with the relevant material data of each component, was obtained from the test. Then, a calculation formula of initial rotational stiffness is obtained based on the component method defined in

* **收稿日期**:2025-03-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978662),National Natural Science Foundation of China(51978662)
作者简介:周凌宇(1973—),男,湖南长沙人,中南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: jiaopengfang@163.com

EC3. To represent the friction of the friction web as an equivalent spring in the component method, the Iwan model is introduced to describe the mechanical behavior of friction. Comparison between the test results and the calculated values shows good agreement, indicating that the contribution of the friction web to the rotational stiffness cannot be ignored.

Key words: self-centering joints; initial rotational stiffness; friction web; component method; Iwan model

对于钢框架结构,可通过合理的设计方案保障其在大震下的安全性,但大震后结构残余变形大,影响其正常使用[1-2]. 为解决这一难题,国内外学者提出了自复位结构技术[3-4]. 自复位结构是一种可恢复性的结构形式,能有效减小结构残余变形[5-8],其工作机理是通过自身特殊的构造与机制,使梁柱经历大变形后恢复至接近原位,有效减小结构的残余变形,从而避免传统节点在地震后可能出现的较大永久性变形累积.

Lin 等[9]提出了自复位抗弯框架(self-centering moment-resisting frame)梁柱节点连接,该梁柱节点连接在地震作用下,通过角钢的塑性变形耗散地震能量,并通过预应力索的预应力作用使结构回到初始位置,从而减少了主体结构的破坏. Jiang 等[10]基于损伤控制的思想,提出了一种狗骨弱化法兰盖板自复位预应力装配式钢梁柱节点(self-centering pre-stressed prefabricated steel beam-column joint, SPPSJ),并通过对设计的三组试件进行循环加载试验,得到节点的滞回曲线、骨架曲线和累积耗能曲线,利用数值分析验证了试验结果可靠性,最终得出SPPSJ具备良好的承载力、抗震能力及震后自复位能力,并可通过预应力索实现节点震后重置. Yang 等[11]提出一种无黏结后张力筋的自复位RCS接头,试验研究了自复位RCS节点的力学性能、滞回曲线、耗能能力以及自复位能力等,试验研究表明,其具有良好的瞬时恢复力和耗能能力. 卢啸等[12]提出了摩擦型自复位现浇梁柱节点,该节点是利用在削弱区域设置具有自复位和耗能能力的摩擦自复位连接件,达到减小残余变形以及将损伤集中在削弱梁段的目的. 郭彤等[13]提出了摩擦式自复位预应力混凝土框架梁柱节点形式,并进行了低周往复加载试验,得出该梁柱节点具有震后自动复位和耗能能力强的特点.

目前,自复位梁柱节点的研究集中于自动复位能力及节点摩擦耗能能力,而对自复位梁柱节点初始转动刚度及摩擦构件对节点转动刚度的影响等研究鲜少.

为研究自复位结构节点的初始转动刚度及确定摩擦耗能构件在初始转动刚度中贡献大小,本文设计了一种摩擦型腹板自复位梁柱节点,并对节点进行了现场低周往复加载试验,得到自复位节点弯矩-转角曲线;同时基于欧洲规范组件法原理[14]建立初始转动刚度力学模型,利用力学模型对试件进行初始转动刚度的理论计算,将试验值与理论初始转动刚度对比,以验证力学模型的准确性.

1 试验概况

1.1 试件设计

该摩擦型腹板自复位梁柱节点如图1所示,考虑了预应力索、摩擦腹板以及狗骨形连接板对节点的贡献.

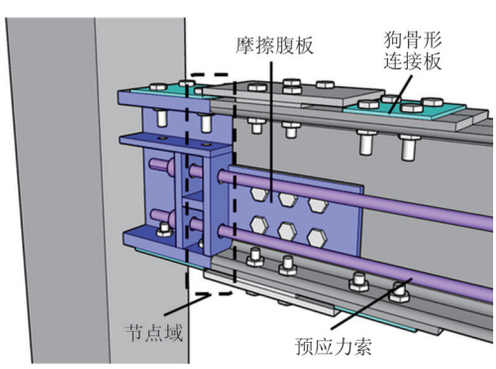


图1 节点构造

Fig.1 Joint detailing

整体试件模型如图2所示,由型钢混凝土柱、悬臂短梁和钢梁构成. 悬臂短梁是用钢板焊接而成的槽钢,尺寸为 320 mm×90 mm×12 mm×28 mm

(高×腿宽×腰厚×腿厚),长度为0.44 m,钢材强度为Q355B,悬臂短梁上预留直径为30 mm的孔,用以锚接预应力索;在悬臂短梁上焊接有钢板,钢板钢材强度同悬臂短梁,尺寸为312 mm×154 mm×14 mm;钢梁材质是热轧槽钢,型号为32b,长度为2 m,钢梁腹板处设有长圆形螺栓孔,尺寸为170 mm×22 mm. 悬臂短梁与型钢混凝土柱通过焊接连接,焊缝为全熔透角焊缝,焊缝等级为一级.悬臂短梁与钢梁的连接为梁柱节点连接,二者的连接部件有上下翼缘狗骨形连接板、预应力索、黄铜摩擦片、高强度摩擦型螺栓以及摩擦腹板.上下翼缘连接板螺栓孔直径为22 mm,悬臂短梁连接板和黄铜摩擦片共6个螺栓孔,分上下两行排列,螺栓孔直径为22 mm,间距为70 mm. 高强度摩擦型螺栓强度等级均为10.9级. 为准确分析基于组件法原理的梁柱节点初始转动刚度,试验设计了核心区段宽度分别为60 mm和40 mm的两种狗骨形连接板和预应力分别为130、150 kN两种预应力索.以上各组件均在工厂预制完成,然后在现场吊装组合.

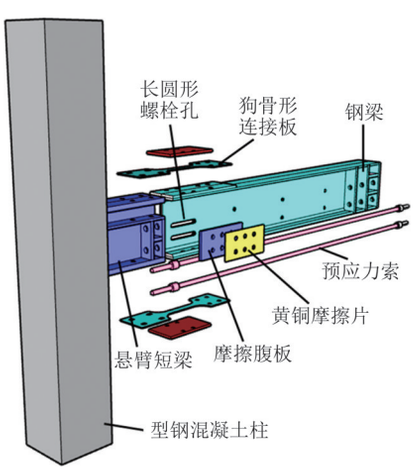


图2　整体试件模型

Fig.2　Full-scale specimen model

1.2　节点工作机理

节点安装时,先将预应力索张拉至130 kN或150 kN,从而提高节点初始转动刚度. 当梁体承受地震竖向往复荷载时,其工作机理如图3所示,梁将绕梁翼缘边缘旋转(图3中O点所示). 在地震力P作用下,钢梁腹板与黄铜摩擦片发生相对滑动产生摩擦力F_f以实现耗能;同时预应力索的轴向拉力F_P与狗骨形连接板的轴向压力$F_{c,1}$、拉力$F_{c,2}$共同形成弯矩,抵抗地震力P产生的弯矩. X_1为钢梁作用点与转动中心的距离.

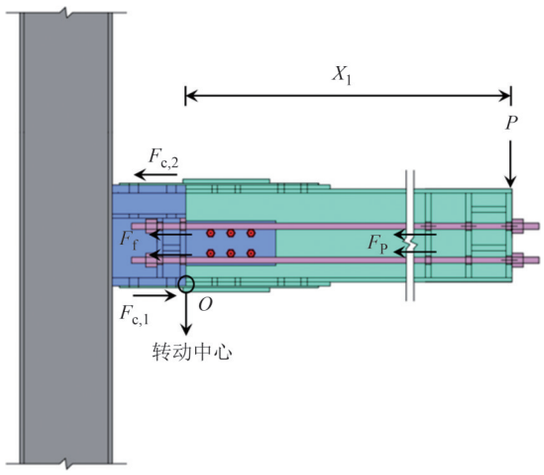


图3　节点工作机理

Fig.3　Joint behavior mechanism

当地震外力消失后,预应力索提供的预紧力会将节点恢复到初始位置.

1.3　试件制作和材料性能

节点域中上下狗骨形翼缘连接板采用强度等级为Q235B级钢,悬臂短梁钢板采用强度等级为Q355B级钢,悬臂短梁钢板与钢梁腹板通过高强度摩擦型螺栓连接,钢梁腹板的螺栓孔为长圆孔,在柱连接板与钢梁之间内置了黄铜摩擦片,其工作机理是通过两接触面产生的摩擦抵抗外荷载,为计算摩擦腹板的刚度,可根据Iwan模型[15]相关原理建立弹簧模型,并通过该模型确定所需的相关力学性能指标. 摩擦腹板、预应力索、狗骨形连接板等组件尺寸、钢材材性及摩擦腹板力学性能指标分别如图4、表1和表2所示.

1.4　试验装置

加载试验装置如图5所示. 考虑到在实验室条件下,为方便试件的安装、加载和数据采集,采用平装法安装试件. 为了在加载过程中方便试件的安装和避免试件发生整体性失稳,试验设计了柱端三角挡板、柱底铰接点和连接头等,为试件提供反力和约束. 后将型钢混凝土进行固定且距离地面490 mm. 在钢梁悬臂端顶部水平设置了油压作动器,并按照美国规范[16]的加载方案施加周期性水平荷载,所有试件均加载至0.003 75 rad(0.375%的层位移),共进行周期性加载4次. 在本试验中,该加载过程属于准静态加载试验.

试验模拟了节点在地震作用下的变化过程,因此测量内容包含了节点在正反两个方向上的周期性

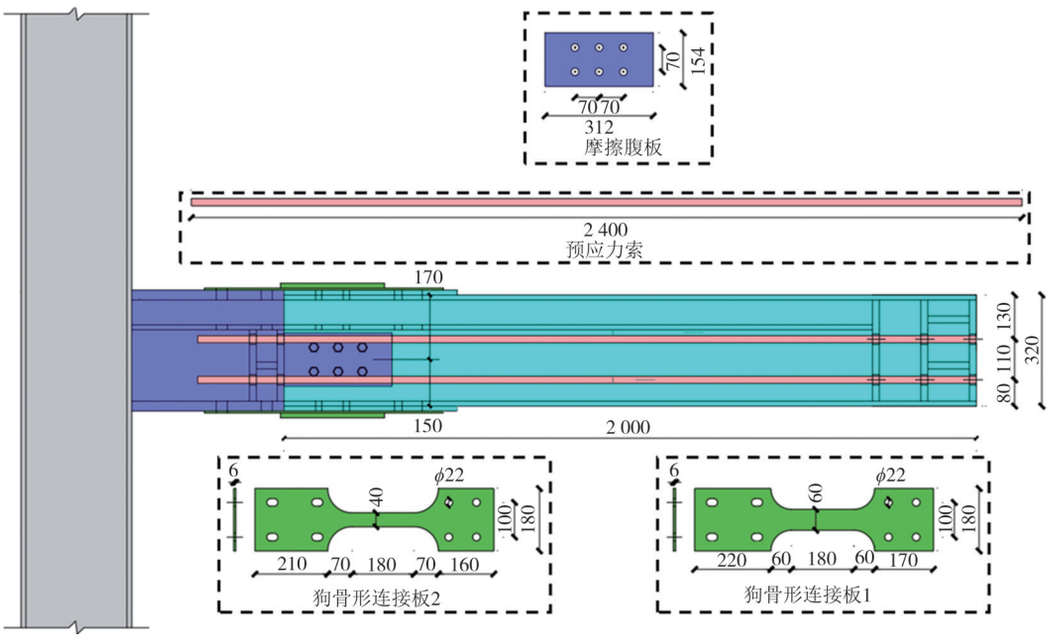


图 4 试件详图(单位:mm)

Fig.4 Specimen detail(unit:mm)

表 1 钢材材性

Tab.1 Steel properties

组件类别	弹性模量/MPa	尺寸
狗骨形连接板 1	2.03×10^5	180 mm×60 mm×60 mm×6 mm
狗骨形连接板 2	2.04×10^5	180 mm×40 mm×70 mm×6 mm
预应力索	1.96×10^5	ϕ21.6 mm×2 400 mm
黄铜摩擦片	1.26×10^5	300 mm×120 mm
钢梁	2.05×10^5	—

表 2 摩擦腹板力学性能指标

Tab.2 Mechanical parameters of friction web connections

力学性能指标	取值
滑动摩擦系数μ	0.49
接触微凸体曲率半径R/m	3.01×10^{-5}
接触微凸体高度h/m	6×10^{-6}
接触微凸体高度均方根σ/m	2.473×10^{-6}
表面粗糙度参数β	0.025
钢梁腹板泊松比ν_1	0.23
黄铜摩擦片泊松比ν_2	0.34
名义接触面积A_n/m^2	0.048
钢梁腹板布氏硬度	168.2

侧向位移.

2 力学模型

根据欧洲规范 EC3 中对组件法理论的描述可知,任何节点都可以简化为受压区、受拉区和受剪区[17]. 如果能使各区域组件之间的相互作用得到表征,则组件法适用于任意节点及任意荷载条件. 首先,需要将各节点进行拆分,简化并建立相应的弹簧模型;然后,计算出各组件的弹簧刚度;最后,将各组件的弹簧模型进行组装得到整体节点的转动刚度和抗弯承载力.

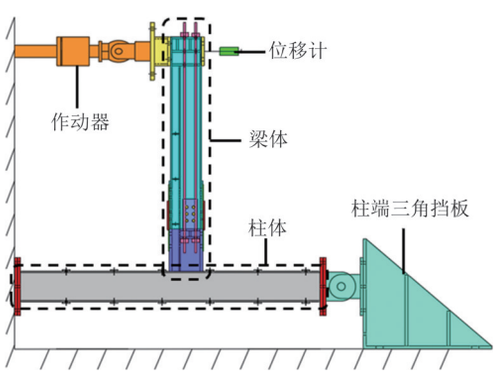


图 5 加载试验装置

Fig.5 Test loading setup

2.1 弹簧模型的简化

根据组件法原理建立该自复位梁柱节点的初始转动刚度力学模型,整体节点模型简化如图 6 所示. 图中,K_{fa}代表狗骨形上翼缘连接板抗拉刚度,K_P代表预应力索抗拉刚度,K_{fr}代表摩擦腹板抗拉等效弹簧刚度.

2.2 计算假定

对模型的初始转动刚度做以下计算假定:1)节

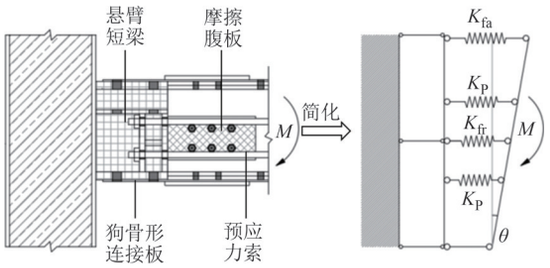


图6　模型简化

Fig.6　Model simplification

点转动过程中满足平截面假定;2)节点转动中心位于钢梁受压翼缘边缘;3)各组件处于弹性状态且变形为小变形;4)仅考虑节点受拉区变形,不考虑受压区变形.

2.3　节点初始转动计算模型

节点域在地震力 P 形成的弯矩 M 作用下时,根据弯矩平衡原理,其弯矩–转角关系为:

$$\begin{cases} M = \sum_j F_j Z_j \\ F_j = K_j Z_j \theta \end{cases} \tag{1}$$

整理式(1)得:

$$K_{rs} = \frac{M}{\theta} = \sum_i K_j Z_j^{\,2} \tag{2}$$

式中:M、K_{rs}、K_j、θ、F_j、Z_j分别为作动器施加的外力产生的弯矩、节点总转动刚度、节点域各组件刚度、节点转动角度、预应力索经张拉后的预应力、预应力索形心与节点转动中心的距离.

3　节点各组件刚度计算

3.1　狗骨形连接板抗拉刚度

连接板形状为狗骨形,其变形对节点转动变形有着重要作用,翼缘连接板受到拉力从而发生轴向变形,变形包括核心区及渐变段轴向变形,分别用 K_{ca}、K_{ts} 表示核心区及渐变段的抗拉刚度,具体形状见图7.

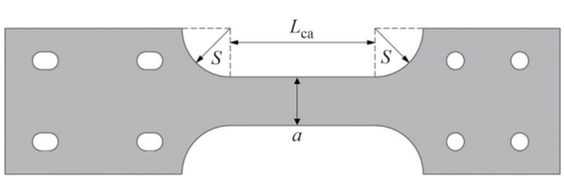


图7　狗骨形连接板

Fig.7　Dog-bone flange plate

根据材料力学相关知识,狗骨形翼缘连接板核心区抗拉刚度为:

$$K_{ca} = \frac{E_{ca} A_{ca}}{L_{ca}} \tag{3}$$

式中:E_{ca}为核心区钢材的弹性模量;A_{ca}为核心区钢材的有效截面面积;L_{ca}为核心区钢材的有效长度.对于渐变段抗拉刚度,由积分可得其抗拉刚度为:

$$K_{ts} = E_{ca} t / \int_0^S \frac{\mathrm{d}x}{(a + S - \sqrt{S^2 - x^2})} \tag{4}$$

式中:S为渐变段弧度半径;a为核心段翼缘连接板宽度;t为翼缘连接板厚度.

翼缘连接板核心区与渐变段之间为串联关系,对式(4)积分并结合式(3)可得到狗骨形连接板抗拉刚度计算式:

$$\begin{cases} K_{fa} = 1 / \left(\dfrac{L_{ca}}{E_{ca} A_{ca}} + \dfrac{\lambda}{E_{ca} t} \right) \\ \lambda = (1 + \xi) \left[\pi + 2\arctan\left(\dfrac{\xi}{\sqrt{1 + 2\xi}} \right) \right] / \sqrt{1 + 2\xi} \\ \xi = \dfrac{S}{a} \end{cases} \tag{5}$$

3.2　预应力索抗拉刚度

在节点域中的4根预应力索对整体节点转动刚度有着突出贡献,在弯矩作用下,4根预应力索发生轴向变形,同时预应力索已张拉至150、130 kN,考虑预应力对初始转动刚度的增强作用,根据材料力学相关知识可知,其抗拉刚度为:

$$K_p = \frac{E_p A_p}{L_p} + \frac{F_p}{L_p} \tag{6}$$

式中:E_p为预应力索弹性模量;A_p为预应力索有效截面面积;L_p为预应力索有效长度;F_p为对预应力索施加的预应力.

3.3　摩擦连接腹板等效刚度

节点域钢梁腹板中,连接板和钢梁腹板通过6个高强度摩擦型螺栓连接,螺栓孔为长圆孔,连接板内置黄铜摩擦片,通过对高强度摩擦型螺栓施加相应预应力,使黄铜摩擦片与钢梁腹板间产生摩擦.

3.3.1　Iwan模型

为了准确描述结合面摩擦产生的力学行为,引入Iwan模型.Iwan模型是描述结合面非线性力学行为的典型模型,最早被用于表征土木结构的弹塑性迟滞特性.自Segalman[18]定义了连接界面滑移力密度分布函数后,Iwan模型便被广泛用于连接界面黏滑行为的建模.

Iwan模型由线性弹簧元件和库仑摩阻片两个基

本单元按照串联或并联的形式组成.对于随机的粗糙面,其接触问题可简化为刚性平面与球形弹性体(微凸体)间的接触,如图8所示,微凸体高度h随机分布,c为法向接触间距,各微凸体所受法向力为其高度h的函数.根据库仑摩擦定律,摩擦副间的摩擦力与法向力成正比,因此结合面的切向接触问题可采用串-并联单元描述.该模型由若干Jenkins单元并联构成,每个Jenkins单元由弹性系数为k的弹簧与临界滑移力为q_i的库仑摩擦片串联而成,如图9所示.

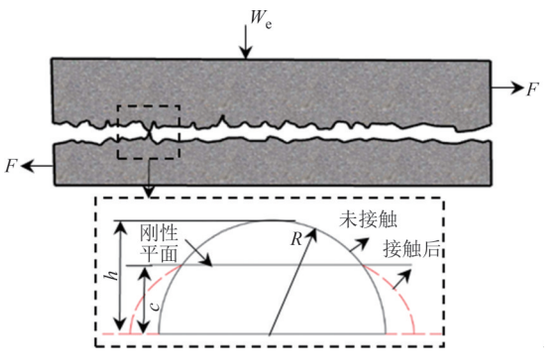


图8 摩擦腹板接触模型

Fig.8 Model of frictional web contact

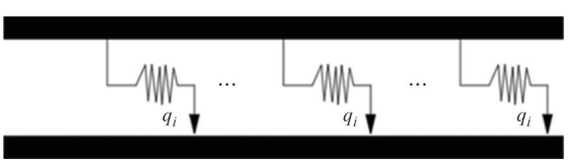


图9 Iwan模型串-并联简化

Fig.9 Series-parallel simplification of Iwan model

Iwan模型工作原理如下:在切向荷载F的激励下,Jenkins单元产生形变.若单个Jenkins单元切向荷载F_i较小,未超过摩阻片阈值q_i,此时弹簧发生弹性形变,此阶段称之为微滑移阶段;反之,若单个Jenkins单元切向荷载F_i超过摩阻片阈值q_i,此阶段称之为宏滑移阶段.

其数学表达式可表示为如下:

$$\begin{cases} F_i = kx, 0 \leqslant x \leqslant q_i/k \\ F_i = kx, x > q_i/k \end{cases} \tag{7}$$

式中:x为滑移速度;k为弹簧弹性常数;q_i为摩阻片临界力阈值.

由于接触面微凸体高度是随机分布的,因此可类比假定摩阻片滑动阈值也为随机分布的,其摩阻片临界滑移力分布函数可假定为$\chi(q)$,由此体系的切向力与两结合面间滑移位移的关系式可由式(8)得到:

$$F(x) = kx\int_{kx}^{+\infty}\chi(q)\mathrm{d}q + \int_0^{kx} q\chi(q)\mathrm{d}q \tag{8}$$

结合变换式:

$$\begin{cases} x = \sigma x^* \\ q = k\sigma\delta \\ \chi^*(\delta) = k^2\sigma^2\chi(q) \end{cases} \tag{9}$$

式(9)中σ为微凸体高度分布方均根,σ的量纲为长度,因此可知x、δ为无量纲量,$\chi^*(\delta)$的量纲是力.

将式(9)代入式(8)得:

$$F(x^*) = x^*\int_{x^*}^{+\infty}\chi^*(\delta)\mathrm{d}\delta + \int_0^{x^*}\delta\chi^*(\delta)\mathrm{d}\delta \tag{10}$$

对式(10)求一阶导数,得到结合面的切向刚度K_{fr}为:

$$\begin{cases} K_{\mathrm{fr}} = n \cdot K_{\mathrm{f}} \\ K_{\mathrm{f}} = \dfrac{1}{\sigma}\cdot\dfrac{\mathrm{d}F(x^*)}{\mathrm{d}x^*} = \dfrac{1}{\sigma}\cdot\int_{x^*}^{+\infty}\chi^*(\delta)\mathrm{d}\delta \end{cases} \tag{11}$$

式中:n表示摩擦腹板上的高强度摩擦型螺栓个数.

由此可知,计算结合面切向刚度K_{fr}的关键在于确定分布函数$\chi^*(\delta)$.因主要确定的是初始转动刚度,故仅确定处于弹性阶段时的分布函数.

3.3.2 弹性阶段临界滑移力分布函数的确定

摩阻片与钢梁腹板的接触问题可简化为刚性平面与高度随机分布的微凸体间的弹性接触,根据占旺龙等[19]提出的接合面切向响应模型方法,得到弹性阶段的分布函数为:

$$\chi^*(\delta) = \frac{2}{3}\mu A_{\mathrm{n}} E\beta\left(\frac{\sigma}{R}\right)^{\frac{1}{2}}\delta^{\frac{1}{2}}\zeta^*(\delta + c^*) \tag{12}$$

式中:μ为滑动摩擦系数;A_{n}为名义接触面积;E_{Z}为综合弹性模量;ζ^*为分布函数;c^*为法向接触间距c经无量纲化后得到;β为计算参数;R为微凸体曲率半径.

综合弹性模量E_{Z}可按式(13)计算:

$$E_{\mathrm{Z}} = \frac{2}{(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2} \tag{13}$$

式中:E_1、E_2为摩擦副的弹性模量;ν_1、ν_2为摩擦副材料的泊松比.

微凸体高度分布均方根σ可通过轮廓仪测量得到,而在统计学模型中用到的是σ_{a},其与σ之间的关系为:

$$\begin{cases} \dfrac{\sigma_{\mathrm{a}}}{\sigma} = \sqrt{1 - \dfrac{3.717\times10^{-4}}{\beta^2}} \\ \beta = \sigma R\eta \end{cases} \tag{14}$$

式中:η为微凸体分布密度.

分布函数ζ^*的计算式为:

$$\begin{cases}\zeta^{*}=\dfrac{\sigma}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\mathrm{a}}}\exp\left[-\dfrac{z^{*2}}{2}\cdot\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{\mathrm{a}}}\right)^{2}\right]\\ h^{*}=\dfrac{h}{\sigma}\\ c^{*}=\dfrac{c}{\sigma}\end{cases}\tag{15}$$

式中:h为微凸体高度;c为法向接触间距.

若微凸体发生完全弹性形变,由ZMC粗糙表面弹塑性接触模型可知,法向荷载w_{e}与微凸体法向变形量$\omega(\omega<\omega_{1})$存在以下关系:

$$\begin{cases}\omega=\left(\dfrac{3w_{\mathrm{e}}}{2ER^{1/2}}\right)^{\frac{2}{3}}\\ c=h-\omega\end{cases}\tag{16}$$

式中:ω_{1}为微凸体开始发生弹塑性变形时的临界法向变形量,$\omega_{1}=(\pi KH/E)^{2}R$,$K$为最大接触应力系数,$K=0.454+0.41\nu$,$\nu$为材料的泊松比,$H$为较软材料硬度值.

3.3.3　结合面切向刚度K_{fr}计算式

由上述Iwan模型介绍及表1、表2中材料材性及力学性能指标,将式(13)~式(16)依次代入式(12),再将式(12)代入式(11),经积分计算得到切向刚度的计算公式为:

$$K_{\mathrm{fr}}=\frac{1.068n\mu A_{\mathrm{n}}E_{\mathrm{Z}}}{\sigma}\times10^{-8}\tag{17}$$

4　初始转动刚度计算式及其验证

4.1　初始转动刚度计算式

初始转动刚度计算式如下:

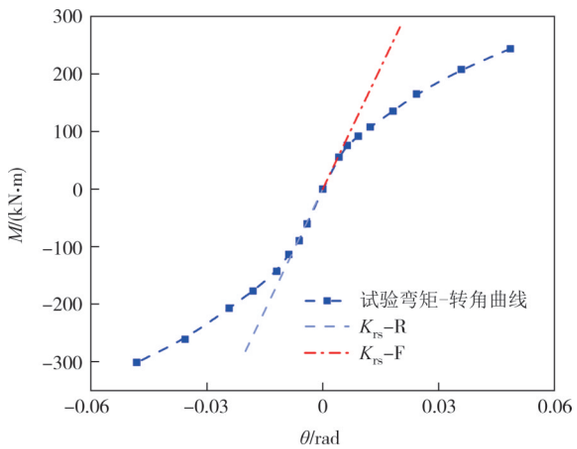
$$K_{\mathrm{rs}}=\sum_{i=1}^{n}K_{i}Z_{i}^{2}=\frac{Z_{\mathrm{ca}}^{2}}{L_{\mathrm{ca}}/E_{\mathrm{ca}}A_{\mathrm{ca}}+\lambda/E_{\mathrm{ca}}t}+\frac{2(E_{\mathrm{P}}A_{\mathrm{P}}+F_{\mathrm{P}})\sum_{i=1}^{n}Z_{\mathrm{Pi}}^{2}}{L_{\mathrm{P}}}+\frac{1.068n\mu A_{\mathrm{n}}E_{\mathrm{Z}}Z_{\mathrm{fr}}^{2}}{\sigma}\times10^{-8}\tag{18}$$

式中:Z_{ca}、Z_{Pi}、Z_{fr}分别为狗骨形连接板形心、预应力索形心、摩擦腹板形心到转动中心的距离.

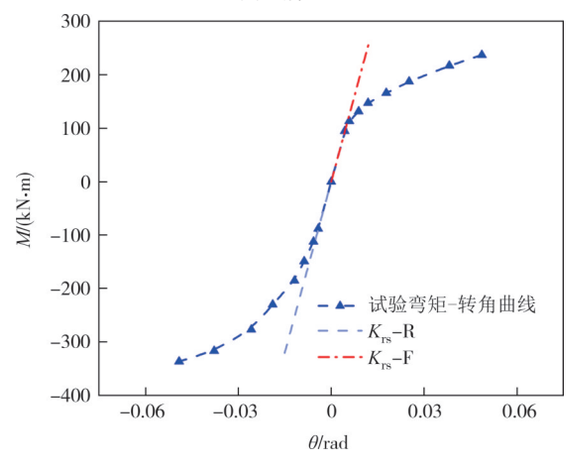
4.2　公式验证

为研究摩擦型腹板自复位梁柱节点在地震作用下的初始转动刚度及摩擦腹板对刚度的贡献,本文针对3个足尺自复位梁柱节点(试件FB1~FB3),进行低周往复加载试验,试验中考虑了不同条件(如不同尺寸狗骨形连接板和钢绞线预应力)下的弯矩-转角(M-θ)曲线,并根据M-θ曲线确定了3组试件节点正、反方向的初始转动刚度K_{rs}-R、K_{rs}-F,如图10所示.根据第2、3节中所给出的理论分析模型,对试验节点的梁端初始转动刚度进行计算.理论分析与试验结果对比如表3所示.

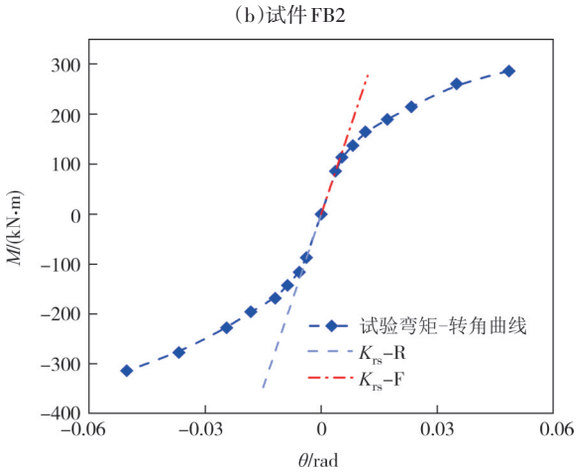
由表3可知,节点初始转动刚度的理论值与试验值的相对偏差值多数低于15%,且最大相对偏差



(a)试件FB1



(b)试件FB2



(c)试件FB3

图10　不同尺寸及预应力的初始转动刚度

Fig.10　Initial rotational stiffness with varying dimensions and prestress levels

仅为15.5%,说明利用组件法原理分析自复位结构初始转动刚度具有可行性;摩擦腹板在整个节点初始转动刚度中的贡献占比多数大于15%,其对初始转动刚度的贡献不可忽略.

表3 组件法分析结果与试验结果对比

Tab.3 Comparison between component method predictions and experimental results

试件编号	PFPC/kN	WDCP/mm	方向	CISJ/(kN·m·rad^{-1})	TEST/(kN·m·rad^{-1})	CTFR/%	FS/(kN·m·rad^{-1})	FR/%
FB1	130	40	F	15 293.4	13 238.1	15.5	3 046.2	23.0
FB1	130	40	R	16 183.7	14 913.6	8.5	3 912.6	26.2
FB2	130	60	F	18 916.5	20 609.2	−8.2	3 046.2	14.8
FB2	130	60	R	19 637.8	20 914.3	−6.1	3 912.6	18.7
FB3	150	60	F	19 228.5	22 243.2	13.6	3 046.2	13.7
FB3	150	60	R	20 119.1	22 853.6	−11.9	3 912.6	17.1

注:表中PFPC表示预应力索施加的预紧力;WDCP表示狗骨形翼缘连接板的宽度;CISJ代表组件法计算的初始转动刚度;TEST代表实际初始转动刚度;CTFR代表CISJ与TEST的相对偏差;FS代表摩擦腹板产生的初始转动刚度;FR代表摩擦腹板初始转动刚度在试件节点中初始转动刚度占比.

5 结 论

本文采用欧洲规范EC3组件法原理分析了摩擦型腹板自复位梁柱节点的力学性能,分析建立了节点力学模型,提出了基于组件法计算摩擦型腹板梁柱节点初始转动刚度的计算公式并与试验结果进行对比,得到以下结论.

1)通过试验结果与摩擦型腹板自复位节点初始转动刚度计算公式的对比发现,本文提出的利用组件法原理建立的力学模型及计算公式具有可行性,能为自复位结构节点力学性能的分析和计算提供依据,拓展了组件法的应用范围.

2)摩擦耗能作为自复位结构节点中的一种耗能方式,对于自复位节点的初始转动刚度的贡献至关重要,可在自复位结构节点中予以应用.

3)本文引用的Iwan模型相关原理为自复位结构节点中将摩擦转动刚度转化为准确数值提供了理论依据,可将其运用于工程中该类节点的转动刚度的研究.

参考文献

[1] 李扬,赵斌,强国平,等. 六层自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2025,58(1):1-11.
LI Y,ZHAO B,QIANG G P,et al. Shaking table test of a six-story self-centering reinforced concrete frame structure model[J]. China Civil Engineering Journal,2025,58(1):1-11.(in Chinese)

[2] 邱灿星,杜修力. 自复位结构的研究进展和应用现状[J]. 土木工程学报,2021,54(11):11-26.
QIU C X,DU X L. A state-of-the-art review on the research and application of self-centering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 11-26.(in Chinese)

[3] NIGEL PRIESTLEY M J. Overview of PRESSS research program [J]. PCI Journal,1991,36(4):50-57.

[4] 卢啸, 孙伟豪. 带摩擦型自复位节点的混凝土框架结构地震响应与易损性研究[J/OL]. 工程力学, 1-10(2024-03-21)[2025-03-14]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20240321.1502.012.
LU X,SUN W H. Study on seismic response and vulnerability of concrete frames with frictional self-centering joints [J/OL]. Engineering Mechanics, 2024: 1-10 (2024-03-21) [2025-03-14]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20240321.1502.012.(in Chinese)

[5] 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.
LÜ X L,CHEN Y,MAO Y J. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39 (7): 941-948.(in Chinese)

[6] 吕西林,武大洋,周颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报,2019, 40(2): 1-15.
LÜ X L, WU D Y, ZHOU Y. State-of-the-art of earthquake resilient structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 1-15.(in Chinese)

[7] 谢钦, 周臻, 卢璐, 等. 自复位摩擦耗能支撑的套管长度误差对多层结构地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊1):96-101.
XIE Q,ZHOU Z,LU L,et al. The effect of tube length tolerances of self-centering energy dissipative braces on seismic response of multistorey buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2014,47(Sup.1): 96-101.(in Chinese)

[8] 潘振华,潘鹏,邱法维,等. 具有自复位能力的钢结构体系研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊1): 403-410.
PAN Z H, PAN P, QIU F W, et al. Analysis of self-centering

steel structures' development [J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(Sup.1): 403-410.(in Chinese)

[9] LIN Y-C,RICLES J,SAUSE R,et al. Earthquake simulations on a self-centering steel moment resisting frame with web friction devices [C]//Structures Congress 2009. Austin, Texas, USA. American Society of Civil Engineers,2009:1-10.

[10] JIANG Z Q,CHEN M L,YANG Z S,et al. Cyclic loading tests of self-centering prestressed prefabricated steel beam-column joint with weakened FCP [J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113578.

[11] YANG Y M, YANG P, SHU Y, et al. Experimental study on seismic behavior of the self-centering RCS joint with replaceable buckling restrained dampers [J]. Engineering Structures, 2022, 261:114288.

[12] 卢啸,徐航,张雪敏. 摩擦型自复位梁柱节点的滞回与损伤性能研究[J]. 工程力学,2025,42(8):187-196.
LU X, XU H, ZHANG X M. Study on hysteresis and damage performance of self-centering frictional beam-column joint [J]. Engineering Mechanics,2025,42(8):187-196.(in Chinese)

[13] 郭彤,宋良龙,张国栋,等. 腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架梁柱节点的试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(6): 23-32.
GUO T, SONG L L, ZHANG G D, et al. Experimental study on beam-column connections of self-centering prestressed concrete frame with web friction devices [J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(6):23-32.(in Chinese)

[14] Design of steel structures, part 1-8: design of joints: EN 1993-1-8 (2005): Eurocode 3[S]. Belgium: Commission of European Communities, 2003.

[15] IWAN W D. A distributed-element model for hysteresis and its steady-state dynamic response[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966,33(4):893-900.

[16] Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360-16 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.

[17] 陈颖智,童乐为,陈以一. 组件法用于钢结构节点性能分析的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(3):81-89.
CHEN Y Z, TONG L W, CHEN Y Y. Research developments of component method for behavior of joints in steel structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(3): 81-89.(in Chinese)

[18] SEGALMAN D J. A four-parameter Iwan model for lap-type joints [J]. Journal of Applied Mechanics,2005,72(5):752-760.

[19] 占旺龙, 李卫, 黄平. 基于 Iwan 模型的接合面切向响应建模[J]. 力学学报, 2020, 52(2): 462-471.
ZHAN W L, LI W, HUANG P. Tangential response modeling of joint surface based on Iwan model [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(2):462-471.(in Chinese)