

文章编号: 1673-9469(2015)01-0001-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-9469.2015.01.001

自复位梁腹板耗能钢框架节点抗震性能分析

史三元, 王帅, 王鹏飞, 白佳楠

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 提出一种自复位钢框架梁柱节点, 该自复位钢框架节点的特点是梁柱接触面能够在地震荷载发生时打开和关闭, 梁柱通过槽钢与高强螺栓连接在一起, 沿梁长方向设置预应力钢绞线以提供恢复能力。通过 Ansys 建立类型节点并施加低周往复荷载, 模拟该类型节点在地震作用下的运动轨迹, 通过对 $M-\theta_r$ 和骨架曲线的分析得出该框架梁柱节点的抗震能力良好。

关键词: 自复位; 预应力; 钢框架节点; $M-\theta_r$ 曲线

中图分类号: TU391

文献标识码: A

The analysis of joint seismic performance for self-centering steel frame with web energy consumption

SHI San-yuan, WANG Shuai, WANG Peng-fei, Bai jia-nan

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: A kind of self-centering steel frame beam-column joint is proposed. The characteristics of self-centering steel frame joint is that the interface between beam and column is able to open and close under seismic load, and the beam and column are connected by the channel steel and high strength bolts. Prestressed steel strand along the beam length direction is set to provide resilience. This paper uses Ansys to simulate the low cycle loading, and simulate the type of node trajectory under the action of earthquake motion. It is concluded that the seismic resistance of the frame beam-column joints is good through the analysis of $M-\theta_r$ and skeleton curve and the seismic performance for self-centering steel frame with web energy consumption is worth further study.

Key words: self-centering; prestressing; steel frame joint; $M-\theta_r$ curve

我国的抗震设防目标要求是“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”即在遭遇小震作用时, 建筑物一般不会损坏, 在相应基本烈度的地震作用下, 建筑物不发生严重损坏; 在遭受高于本地区设防烈度的罕遇地震作用时, 建筑物不致倒塌或发生危及生命的严重破坏^[1]。但由于地震作用震动方向的不确定和比人们认知的更加复杂, 结构所遭受的地震作用可能会比房屋的抗震设防烈度高得多。都江堰和汶川按现行规范的设防烈度是 7 度, 但在 2008 年汶川地震中, 都江堰烈度为 9 度, 汶川烈度为 11 度, 远超超震设防烈度^[2], 建筑物几乎全部损毁, 虽然有少数房子没有倒塌, 但其中大部分框架节点出现“残留变形”而不能继续使用。“残留变形”过大的建筑物往往无法修复到正

常使用状态, 最终只能拆除。

虽然焊接节点能够承受更大的塑性变形, 但是往往在地震后残余变形较大, 即使花费再多的费用, 也很难恢复到以前的状态, 因此有些在地震中并未倒塌的房屋也会因为这个原因而推倒重建。为了解决这类问题, 我们采用一种自复位腹板耗能钢结构。

1 节点构造概述及工作原理

1.1 自复位腹板耗能节点构造

因为耗能装置位置并不完全对称, 所以能量耗散的不同取决于梁相对柱旋转是以梁哪个翼缘末端为支点。为了能够使能量耗散不因旋转点的

收稿日期: 2014-09-23

作者简介: 史三元(1959-), 男, 河北乐亭人, 教授, 从事钢结构和岩土工程。

不同而不同,一个新的设计产生,在梁腹板上设计并安装摩擦装置,这样的装置被称为腹板摩擦装置(WFD)。在槽钢和梁腹板间是铜质摩擦板,并且梁上的螺栓孔配置与槽钢相同。这些摩擦板能够在铜质摩擦板和梁腹板之间制造一个摩擦面。随着梁相对于柱发生转动,摩擦装置开始耗能。在这个设计中将带有一字螺栓孔的槽钢以梁腹板为对称面对称焊接在柱上。

WFD节点中的两个槽钢与柱翼缘焊接,并且通过摩擦型高强螺栓将这两片槽钢和梁腹板夹紧,从而使梁在移动时产生摩擦力。梁腹板上的孔槽是为了在梁柱连接节点打开或关闭时可以容纳高强螺栓发生轻微的滑动。该节点将加强板(加筋肋)设计焊接在柱翼缘内表面与槽钢上下翼缘平行位置,为了防止柱翼缘因预应力钢绞线孔而产生的疲劳破坏。

1.2 自复位腹板耗能节点的工作原理

节点张开后,梁柱连接处的弯矩 M 由轴向力 P 和摩擦力 F_f 共同承担,公式如下^[3]:

$$M = Pd_2 + F_f r \quad (1)$$

式中 d_2 - 预应力合力中心到梁端旋转中心的距离, r - 摩擦力到梁端旋转中心的距离。

旋转中心位于与柱翼缘有压力作用的梁的接触面上,轴向力 P 主要由钢绞线拉力 T 提供。如果考虑楼板与框架梁的相互作用,轴向力 P 还将包括楼面梁传递的压力 F_{fd} 。

$$P = T + F_{fd} \quad (2)$$

钢绞线拉力 T 由下述公式得到。其中 T_0 为钢绞线的初始拉力, K_d, K_s , 分别为梁和钢绞线的轴向刚度。

$$T = T_0 + \theta_r [2d_2 k_d k_s / (k_d + k_s)] \quad (3)$$

理论上,在循环荷载作用下的自复位腹板耗能结构的 $M - \theta_r$ 的曲线^[4]如图1所示。从0-1节点处如同传统的焊接节点具有初始刚度。 M_{IG0} 为消压弯矩, W_b 为截面受拉边缘的弹性抵抗矩, M_{Ff} 代表摩擦件提供的弯矩。一旦节点处克服了即将到来的裂缝时,弯矩就会到达 M_{IG0} 。在 M_{IG0} 被克服后,相对转角逐渐增大,钢绞线应力、框架

梁的压缩量随之增加,直至3点钢绞线屈服。在2到4的卸载过程中 θ_r 保持恒定,节点弯矩因反向摩擦力的作用,首先下降 $2M_{Ff}$,从4继续卸载到5,转角 θ_r 变为0,节点重新闭合。继续卸载,从5下降到6,当弯矩变为0时,节点处的梁柱接触面重新处于压紧状态,结构在正向或反向加载时节点的关系保持对称。

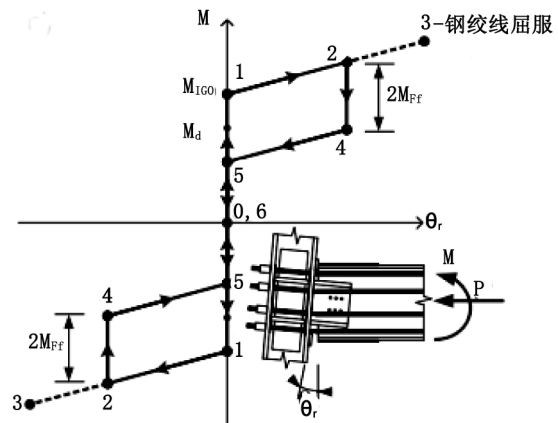


图1 理想条件下的 $M - \theta_r$ 曲线

Fig.1 $M - \theta_r$ curve under ideal conditions

2 Ansys 计算模型建立

本文通过自复位腹板耗能钢结构梁柱节点在低周循环荷载下的数值模拟分析,详细介绍了 ANSYS 建模及分析的全过程。通过对节点进行循环加载模拟,得到该类型节点在循环加载作用下的 $M - \theta_r$ 滞回曲线和骨架曲线,确定该试件是否具有自复位能力,抗震性能是否良好,并验证有限元分析的正确性。

2.1 模型参数

模型(如图2)几何尺寸如表1(单位:mm)。

槽钢:高×长×肢宽×厚:200×200×130×15;材质为Q345B;接触面钢丝刷除锈处理。螺栓:8.8级摩擦型高强螺栓,直径19mm;材质为16锰钢。螺栓水平间距70mm,竖向间距100mm。钢绞线采用双折线模型 $7\phi 15.2$,单根钢绞线的预应力为120kN。

表1 模型参数表

Tab.1 Table of the model parameters

构件	截面形状	材料	截面尺寸 $H \times B \times t_1 \times t_2$	长度
钢梁	焊接 H 形	Q345B	400 × 300 × 10 × 15	1 900
钢柱	焊接 H 形	Q345B	400 × 400 × 14 × 21	1 800

本文采用实体建模的方法。由于框架为对称结构,可以取一半的框架进行计算^[5]。本模型主体结构采用 Solid92 单元,钢绞线采用 Link10 单元,接触对采用 Conta174 和目标单元 Targe170 模型如图 2。

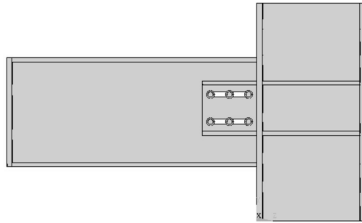


图2 模型图

Fig.2 The figure of model

材料的弹性模量 $E = 2e11 \text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.3$ 材料密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$,线膨胀系数为 $1e-5$ 。

Solid92 单元不需要定义实常数,只有模拟预应力拉索的 Link10 单元需要定义实常数,钢绞线的横截面积为 $1.81 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

2.2 预应力施加方法

钢绞线预应力的常用施加方式可分为两种^[6]:(1) 降温法。先为钢绞线设定一个初始温度,并给定一个温度下降值,根据热胀冷缩原理,使钢绞线产生一个收缩变形。此初始应变将使钢绞线产生预拉作用,这个预拉作用即为模型的预拉力。钢筋的降温值公式为 $\Delta T = P / (\alpha \times E \times A)$ 。式中 ΔT - 钢绞线的温度下降值; P - 所产生的预拉力大小; E - 钢绞线的弹性模量; A - 钢绞线的横截面积; α - 钢绞线的线性膨胀系数。

(2) 初始应变法。给钢绞线设定一个初始拉力,放松后使钢绞线产生收缩变形。此初始应变将使钢绞线产生一个预拉作用。初始应变的公式为 $\varepsilon = P / EA$ 。

式中 ε - 钢绞线的初应变; P - 预拉力施加值; E - 钢绞线的弹性模量; A - 钢绞线的截面面积。

模型的高强螺栓使用直接施加预紧单元来施加预紧力,但预应力钢绞线采用的是降温法。

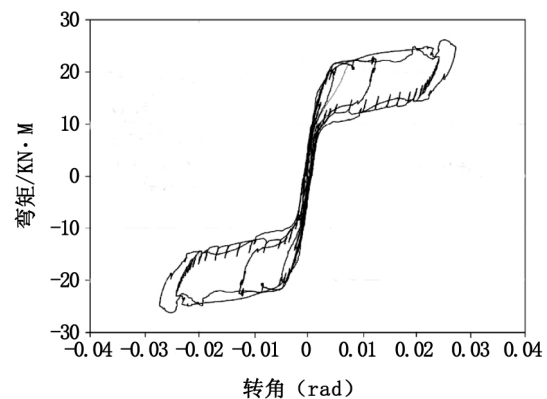
相较于初始应变法,降温方法比较简单,可以同时在不同位置设定不同的预紧力即能够对应力损失进行模拟;初始应变法通常不能考虑预应力损失,否则每个单元的实常数各不相同,工作量较大。因此,对高强螺栓施加预紧力采用直接施加 PRETS179 单元,对于预应力钢绞线采用降温法加载,初始预拉力为 110 kN,转化为温度为 -331°C 。

2.3 加载控制

通过施加低周循环荷载来模拟地震作用。循环加载方案:通过对梁端施加位移荷载进行控制,即先在梁端施加向上的 5 mm 的位移荷载,再反向施加 5 mm 位移荷载,这就是一个加载周期,其中包含有四个荷载步。然后将位移量加至 10 mm,之后每次增加 10 mm。采用同种方法直到试件被破坏。试件破坏的形式有两种:一是转角过大,允许转角范围 $0.02 - 0.05 \text{ rad}$ 。二是螺栓滑移^[8]。本文以转角为参照,最终相对位移角目标为 3%。

2.4 计算结果

按上述方法施加循环荷载后,提取 $M - \theta_r$ 滞回曲线进行分析(如图 3)可以看出:纵坐标为梁端产生弯矩 $M(\text{kN} \cdot \text{m})$,横坐标为框架梁与框架柱之间的相对位移角 $\theta_r(\text{rad})$ 。当 $M < 10 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 时,即裂缝张开之前,节点刚度较大, $M - \theta_r$ 关系曲线基本呈线性。当梁开始与柱产生裂缝时,梁与柱相对位移角达到 1% 左右,弯矩增长趋势变缓。梁与柱脱离后,节点刚度主要由预应力钢绞线及框架梁提供。在每一个循环中,当弯矩为 0 时相对位移角也回到 0 点,说明节点具有较好的自复位能力。随着在 Y 方向位移的逐渐增大,节点处所受正弯矩也逐渐增大,节点张开角度逐渐增大,当弯矩达到最大值 $28 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 时,相对位移角 θ_r 最大,此时相对转角最大值小于 3%。反之,当梁端所受弯矩为负弯矩时,梁的转动轨迹类似,相对转角的最大值依然小于 3%。

图3 $M - \theta_r$ 滞回曲线Fig.3 The hysteresis curve of $M - \theta_r$

由图 4 骨架曲线可知:在开始施加荷载时,结构具有较好的刚度,随着梁在 Y 方向位移的增加,梁柱接触面间的缝隙逐渐增大,槽钢接触面摩擦

的增大及梁本身的塑性破坏,节点刚度变化趋势逐步平稳,刚度逐渐减小。不同于现浇结构的是,随着 Y 方向位移的逐渐增大,节点刚度的减小,即使 Y 方向加载到100 mm时,节点仍未出现负刚度,屈服后刚度仍然稳定,未出现下降段。

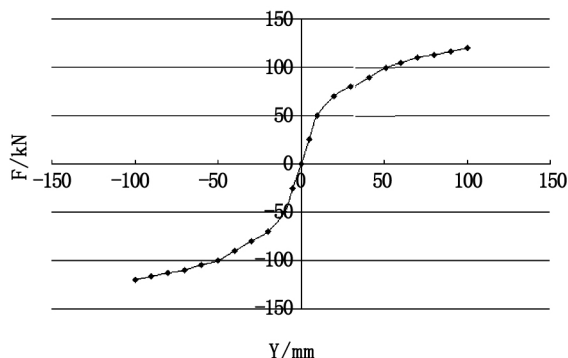


图4 骨架曲线

Fig. 4 The skeleton curve of model

3 结论

1) 相对转角最大值小于加载控制中所提到的3%,在ANSYS模拟的地震荷载作用下,该自复位节点在地震荷载作用下耗能能力良好。

2) 当模型在 Y 方向位移荷载达到100 mm时,模型屈服后的刚度达到稳定,能够减小震后结构的残余变形和提升结构的抗震能力,也说明结构的抗震能力良好。

参考文献:

[1] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].

- [2] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念体系——可恢复功能结构[J]. 同济大学学报, 2011, 39(7): 941-948.
- [3] 郭彤, 宋良龙. 自定心钢框架抗震性能研究进展[J]. 地震工程与工程震动, 2010, 30(5): 49-56.
- [4] YING CHENG LIN, JAMES RICLES, RICHARD SAUSE. Earthquake simulations on a self-centering steel moment resisting frame with web friction devices [C]. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October Beijing 2008, 12-17.
- [5] 奚敏. 双腹板、顶底角钢半刚性节点的 Ansys 数值模拟分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [6] 付永强, 张小水, 胡成. 预应力混凝土结构施加预应力的 Ansys 模拟[J]. 工程与建设, 2008, 22(6): 784-786.
- [7] 蒋成良, 李启才. 钢绞线预应力的改变对自复位钢框架性能影响[J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2013, 26(3): 28-31.
- [8] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架边节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 29-37.
- [9] 周书敬, 薄涛, 史三元. 混合算法在轻钢结构优化设计中的应用[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(2): 71-74.

(责任编辑 刘存英)