

门式刚架半刚性节点连接性能研究^{*}

杨文伟^{1,2} 张文淑^{1,2}

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 门式刚架中普遍采用的端板类连接是典型的半刚性节点连接。采用转动弹簧模拟端板连接节点的半刚性, 推导了半刚性连接在荷载作用下的内力计算式; 讨论了半刚性连接对门式刚架内力的影响; 对 02SG518-1《门式刚架轻型房屋钢结构图集》给出的门式刚架横梁截面, 通过数值计算, 比较了其在半刚性连接和刚性连接时的内力。分析表明, 半刚性门式刚架受连接柔性的影响, 会使斜梁的杆端负弯矩减小, 而跨中正弯矩相应增加, 按刚性连接设计不符合实际受力情况, 其结果将高估由梁端传到柱的负弯矩而低估梁的跨中正弯矩, 门式刚架的半刚性连接对结构受力有明显影响, 在分析和设计中, 应考虑半刚性的影响。提出的方法计算工作量少, 方便实用。

关键词: 结构工程; 钢结构; 内力计算; 半刚性节点; 门式刚架; 弯矩-转角关系

DOI: 10.13206/j.gjg201708005

RESERARCH ON PERFORMANCE OF THE SEMI-RIGID JOINTS IN PORTAL FRAMES

YANG Wenwei^{1,2} ZHANG Wenshu^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, the Ministry of Education of China, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The end-plate connection, which has been widely used in portal frames, is a typical semi-rigid connection. The paper simulated the semi-rigid joints of the end-plate connections by using the rotary springs, deduced the formula for calculating the internal force of the semi-rigid connection under loads, and discussed the influence of the semi-rigid connections on the internal force of the portal frames. According to the numerical calculation of the cross-section of various crossbeams, which were included in 02SG518-1, the inertial force of those sections with semi-rigid connections and rigid connections were compared. It was shown that, due to the flexibility of the connections, the negative moment of the ends of inclined beams decreased while the positive moment of the mid-span of inclined beams increased. Therefore, the design for the portal frame with rigid connections could not meet the requirements of actual stress situation. The results would overestimate the negative moment which was transferred from the ends of the beams to the columns, while underestimate the positive moment of the mid-span of the beams. The semi-rigid connections of the portal frames had a significant influence on the structure force, as a result, the effect of the semi-rigid connection should be taken into account in the analysis and design. The proposed method was convenient for calculation and application.

KEY WORDS: structural engineering; steel structure; internal force calculation; semi rigid joints; portal frame; moment rotation relationship

1 概 述

在传统的结构设计计算中, 钢结构梁柱节点被假定为铰接或刚接的理想连接模式。理想铰接的假定意味着梁与柱之间没有弯矩的传递, 其转动是相互独立的; 理想刚接的假定则意味着当刚架变形时, 相邻梁柱之间不会产生相对转动, 其夹角保持不变。在实际工程中, 采用理想连接模型的假定在很多情况下是不合理的, 也不能正确反应结构的实际工作情况, 计算结果误差较大。因为所谓的刚接总是具有一定的柔性^[1]; 而所谓铰接也具有一定的刚度^[2-4], 绝大多数钢结构梁柱节点是半刚性的。国内外学者对钢结构半刚性节点连接进行了大量的研究工作, Chen 等首先建立了能够模拟半刚性连接的

弯矩转角方程, 并给出了该方程中各参数在不同连接形式下的取值^[3]; 王燕等推导了几种常见高强螺栓端板连接的初始刚度, 指出各种半刚性连接的初始刚度主要与连接件的抗弯刚度、板厚以及螺栓的分布位置有关, 设计中可根据连接的受力情况调整连接件的几何尺寸以提高或降低连接的初始刚度^[5]。郑延银的研究表明, 在通常情况下, 梁柱焊接刚性节点的初始转动刚度在 $6 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 左

^{*} 国家自然科学基金项目(50808096); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2015-173)。

第一作者: 杨文伟, 男, 1978 年出生, 博士研究生。

Email: yangwenwei@lzu.edu.cn

收稿日期: 2017-04-21

右,而高强螺栓连接节点的初始转动刚度为 $(2 \sim 10) \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$,约是焊接刚性节点的 $1/6 \sim 1/30$,充分说明了高强螺栓连接节点的半刚性特征^[6]。

2 半刚性节点连接的模型

过去国内外研究者已做了大量的连接试验,获取了大量的 $M-\theta$ 数据,利用这些数据,已经建立了多种能够模拟半刚性连接的弯矩-转角($M-\theta$)模型的计算式,本文采用的是 Kishi 和 Chen 幂函数三参数模型^[3]:

$$\theta = \frac{M}{R [1 - (M/M_u)^n]^{1/n}} \quad (1)$$

式中: R 为初始连接刚度; M_u 为连接的极限弯矩承载力; n 为曲线的形状参数。

考虑到目前整体结构大多按弹性方法设计,节点的弯矩-转角关系仍处在弹性阶段,可以假设节点的弯矩转角服从线性关系:

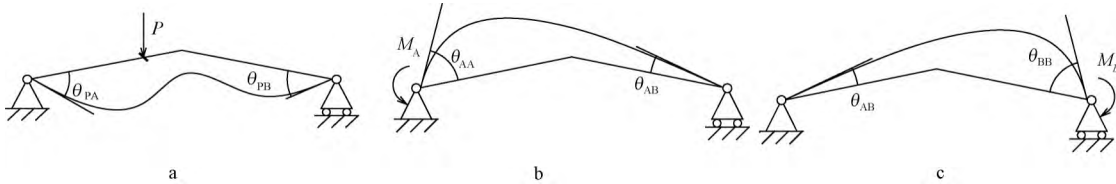


图2 简支斜梁

$$\begin{aligned} \theta_{\gamma A} &= \theta_{AP} + \theta_{AA} + \theta_{AB} \\ \text{其中 } \theta_{PA} &= \frac{Pab(l+b)}{6EI \cos \beta} \\ \theta_{AA} &= \frac{M_A l}{3EI \cos \beta} \\ \theta_{AB} &= \frac{M_B l}{6EI \cos \beta} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: β 为斜梁的水平夹角。

将式(4)代入式(3)得:

$$\begin{aligned} M_A &= R_{KA} (\theta_{PA} + \theta_{AA} + \theta_{AB}) = \\ R_{KA} \left\{ \frac{Pab(l+b)}{6EI} - \frac{M_A l}{3EI} - \frac{M_B l}{6EI} \right\} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \quad (5) \\ \text{令 } \alpha_A &= \frac{EI}{lR_{KA}}, \alpha_B = \frac{EI}{lR_{KB}}, M_{FA} = -\frac{Pab^2}{l^2}, M_{FB} = \frac{Pa^2b}{l^2} \end{aligned}$$

则式(5)可化为:

$$2M_A (3\alpha_A \cdot \cos \beta + 1) + M_B = -2M_{FA} + M_{FB} \quad (6)$$

同理对于 B 端可得:

$$2M_B (3\alpha_B \cdot \cos \beta + 1) + M_A = -M_{FA} + 2M_{FB} \quad (7)$$

联立(6)、式(7)两式解得:

$$M = R \cdot \theta \quad (2)$$

本文在此基础上,进行门式刚架半刚性节点连接性能的研究。

3 半刚性连接在荷载作用下的内力分析

利用连接的初始刚度,图1所示斜梁在集中荷载 P 作用下,端弯矩为:

$$M_A = R_{KA} \theta_{\gamma A} \quad (3a)$$

$$M_B = R_{KB} \theta_{\gamma B} \quad (3b)$$

式中: R_{KA} 、 R_{KB} 分别为 A、B 二端点的初始刚度。

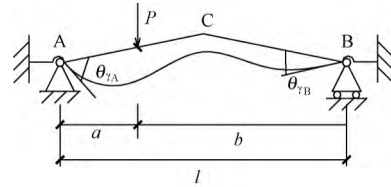


图1 半刚性斜梁

根据叠加原理,图1半刚性连接斜梁可等效为图2所示简支斜梁,即:

$$M_A = \frac{2\alpha_B \cos \beta \cdot M_{FB} - (4\alpha_B \cos \beta + 1) M_{FA}}{12\alpha_A \alpha_B \cos^2 \beta + 4\alpha_A \cos \beta + 4\alpha_B \cos \beta + 1} \quad (8)$$

$$M_B = \frac{(4\alpha_A \cos \beta + 1) M_{FB} - 2\alpha_A \cos \beta \cdot M_{FA}}{12\alpha_A \alpha_B \cos^2 \beta + 4\alpha_A \cos \beta + 4\alpha_B \cos \beta + 1} \quad (9)$$

式(8)、式(9)也同样适用于在均布荷载和其他分布荷载作用下的半刚性连接,只需将公式中的 M_{FA} 和 M_{FB} 换成在相应荷载作用下的固端弯矩。

4 半刚性连接对门式刚架受力的影响

如图3所示半刚性连接门式刚架,节点 E 为刚性连接节点。取梁柱节点连接的初始刚度 $R_{KC} = R_{KD} = R$,刚架坡度 $1:10$, $l=h$,各杆件 EI 相同。忽略钢架柱的轴向变形和柱顶水平位移。

利用力法可作出梁柱刚性连接门式刚架(图4)弯矩图如图5所示,其中梁端弯矩 $M'_{CE} = M'_{DE} = 0.06ql^2$,跨中弯矩 $M'_{跨中} = 0.07ql^2$ 。

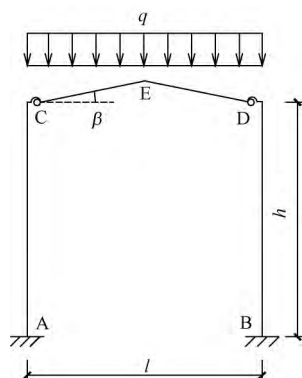


图3 半刚性连接门式刚架

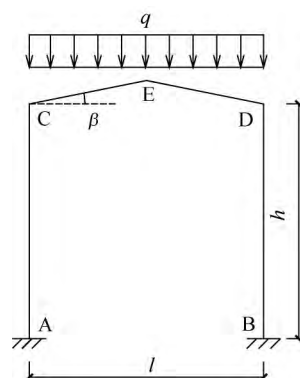


图4 刚性连接门式刚架

由已推得的式(8)、式(9)可得梁柱半刚性连接 门式刚架杆端弯矩如下:

$$M_{CE} = \frac{2\alpha \cos \beta \cdot 0.06ql^2 - (4\alpha \cos \beta + 1) \cdot (-0.06ql^2)}{12\alpha^2 \cos^2 \beta + 8\alpha \cos \beta + 1} = \frac{1}{2\alpha \cos \beta + 1} \cdot 0.06ql^2 = \eta M'_{CE} \quad (10)$$

$$M_{DE} = \frac{2\alpha \cos \beta \cdot 0.06ql^2 - (4\alpha \cos \beta + 1) \cdot (-0.06ql^2)}{12\alpha^2 \cos^2 \beta + 8\alpha \cos \beta + 1} = \frac{1}{2\alpha \cos \beta + 1} \cdot 0.06ql^2 = \eta M'_{DE} \quad (11)$$

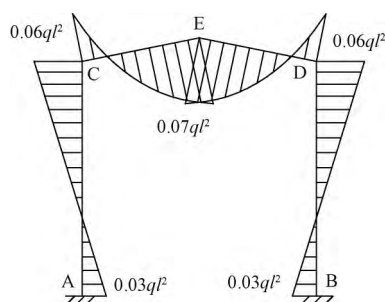


图5 刚性连接门式刚架弯矩

对于梁柱半刚性连接门式刚架斜梁的跨中弯矩,可先求柱顶对其水平推力:

由于忽略了柱顶水平位移,故柱顶只有一个角位移 θ ,由位移法知:

$$M_{CA} = 4i\theta \quad (12)$$

其中 $i = \frac{EI}{l}$

式中: i 为柱的线刚度。

柱顶角位移由两部分组成:一是斜梁对柱顶的水平推力 F 引起的角位移;二是柱顶弯矩引起的角位移。即:

$$\theta = \frac{M_{CA}l}{EI} - \frac{Fl^2}{2EI} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)中,得:

$$M_{CA} = 4 \frac{EI}{l} \left(\frac{M_{CA}l}{EI} - \frac{Fl^2}{2EI} \right) = 4M_{CA} - 2Fl \quad (14)$$

$$F = \frac{3M_{CA}}{2l} \quad (15)$$

则刚架横梁跨中弯矩为:

$$M_{跨中} = \frac{1}{8}ql^2 - M_{CE} + F \cdot \frac{l}{2} \tan \beta = \frac{1}{8}ql^2 - \left(1 - \frac{3}{4} \tan \beta\right) M_{CE} \quad (16)$$

以02SG518-1《门式刚架轻型房屋钢结构图集》给出的门式刚架横梁截面为例,计算节点半刚性连接对门式刚架梁端、跨中弯矩的影响分别如图6、图7所示。图6中 $\eta = M_{端}/M'_{端}$ 为半刚性连接门式刚架与刚性连接门式刚架斜梁梁端弯矩之比,图7中 $\xi = M_{跨中}/M'_{跨中}$ 为半刚性连接门式刚架与刚性连接门式刚架斜梁跨中弯矩之比。

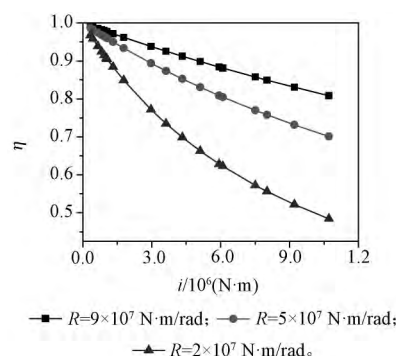


图6 半刚性连接对梁端弯矩的影响

由图6、图7可以看出,斜梁的端弯矩随着连接初始刚度的减弱、斜梁线刚度的增加而减小,而跨中弯矩相应增加。因此,对半刚性连接的门式刚架按刚性设计是不符合实际受力情况的,其结果将高估由梁传到柱的负弯矩而低估梁的跨中弯矩,其最大误差可达50%以上。

(下转第14页)

- [2] HERNING G ,GARLOCK M ,RICLES J. An Overview of Self-Centering Steel Moment Frames [J]. Structures Congress ,2009 ,341: 1 - 9.
- [3] GARLOCK M , RICLES J , SAUSE R , et al. Post-Tensioned Seismic Resistant Connections for Steel Frames [C]//Structural Stability Research Council Conference Workshop. Rolla Missouri: Structural Stability Research Council ,1998.
- [4] RICLES J , SAUSE R , GARLOCK M , et al. Post-Tensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames [J]. Journal of Structural Engineering , 2001 ,127(2) : 113 - 121.
- [5] KIM H , CHRISTOPOULOS C. Friction Damped Post-Tensioned Self-Centering Steel Moment-Resisting Frames [J]. Journal of Structural Engineering , 2008 , 134(11) : 1768 - 1779.
- [6] LIN Y C , RICLES J M , SAUSE R. Earthquake Simulations on Self-Centering Steel Moment Resisting Frame with Web Friction Devices [C]// Structures Congress 2009. Reston , Virginia: American Society of Civil Engineers , 2009.
- [7] RICLES J M , SAUSE R , LIN Y , et al. Self-Centering Moment Connections for Damage-Free Seismic Response of Steel MRFs [C]//Structures Congress 2010. Reston , Virginia: American Society of Civil Engineers , 2010.
- [8] LIN Y C , SAUSE R , RICLES J. Seismic Performance of a Large-Scale Steel Self-Centering Moment-Resisting Frame: MCE Hybrid Simulations and Quasi-Static Pushover Tests [J]. Journal of Structural Engineering 2013 , 139(7) : 1227 - 1236.
- [9] LIN Yingcheng , RICHARD Sause , JAMES M , et al. Seismic Performance of Steel Self-Centering Moment-Resisting Frame: Hybrid Simulations Under Design Basis Earthquake [J]. Journal of Structural Engineering , 2013 , 139(11) : 1823 - 1832.
- [10] MAHBOBEH M A , MOHAMMAD R B , SHANABEDDIN Torabi-an. Design and Analytical Evaluation of a New Self-Centering Connection with Bolted T-Stub Devices [J]. Advances in Materials Science & Engineering , 2013(4) : 1 - 12.
- [11] 潘振华 , 潘鹏 , 叶列平 , 等. 自复位钢框架节点有限元模拟及参数分析 [J]. 建筑结构学报 , 2011 , 32(3) : 35 - 42.
- [12] 王一帆 , 李启才. 抗滑移系数对摩擦型自复位梁柱节点抗震性能的影响 [J]. 苏州科技学院学报(工程技术版) , 2013 (1) : 34 - 37.
- [13] 张爱林 , 张艳霞 , 刘学春. 震后可恢复功能的预应力钢结构体系研究展望 [J]. 北京工业大学学报 , 2013 , 39(4) : 507 - 514.
- [14] ZHANG Ailin , ZHANG Yanxia , LI Rui , et al. Cyclic Behavior of a Prefabricated Self-Centering Beam-Column Connection with a Bolted Web Friction Device [J]. Engineering Structures , 2016 , 111: 185 - 198.
- [15] 庄茁 , 由小川 , 廖剑晖 , 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社 , 2009.
- [16] 马晓峰. ABAQUS 6.11 有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社 , 2013.
- [17] 曹金凤 , 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答 [M]. 北京: 机械工业出版社 , 2010.
- [18] 张艳霞 , 费晨超 , 宁广 , 等. 半刚接自复位装配式钢框架拟动力试验模拟分析 [J]. 钢结构 , 2016 , 31(9) : 16 - 19.

(上接第 28 页)

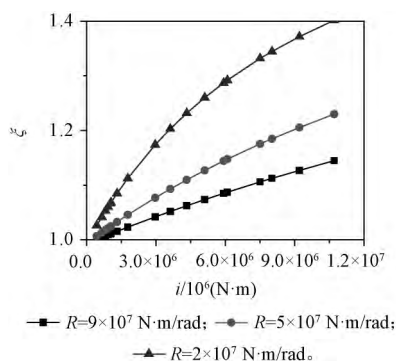


图 7 半刚性连接对梁跨中弯矩影响

5 结束语

本文推导了半刚性连接门式刚架在荷载作用下的内力计算式 , 讨论了半刚性连接对刚架内力的影响 , 并对 02SG518 - 1 给出的门式刚架横梁截面进行了半刚性连接内力分析。通过分析表明 , 门式刚架受连接柔性的影响 , 会使斜梁的杆端负弯矩减小 ,

而跨中正弯矩要相应增加 , 按理想连接设计不符合实际受力情况。其结果将高估由梁端传到柱的负弯矩而低估梁的跨中正弯矩。门式刚架的半刚性连接对结构受力性能有明显的影响 , 在分析和设计中应考虑半刚性连接的影响。

参考文献

- [1] 刘坚 , 潘澎 , 李东伦 , 等. 考虑楼板影响的钢结构半刚性连接节点弯矩 - 转角分析模型 [J]. 钢结构 , 2015 , 30(9) : 23 - 24.
- [2] 李国强 , 沈祖炎. 钢框架弹塑性静动力反应的非线性分析模型 [J]. 建筑结构学报 , 1991(4) : 51 - 59.
- [3] CHEN W F , LUI E M. Stability Design of Steel Frames [M]. Boca Raton: CRC Press , 1992.
- [4] CHEN W F , KIM S E. Practical Advanced Analysis for Semi-Rigid Frame Design [J]. Engineering Journal , 1996 , 33(4) : 86 - 92.
- [5] 王燕 , 李华军 , 厉见芬. 半刚性梁柱节点连接的初始刚度和结构内力分析 [J]. 工程力学 , 2003 , 20(6) : 65 - 69.
- [6] 郑延银. 高层建筑钢结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社 , 2000.