

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.024

半刚性节点取值对高大模板支撑体系极限承载能力的影响

叶 凯^a, 赵祎强^b, 刘纲^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:随着经济的发展,扣件式模板支架应用的越来越广泛。然而由于施工缺陷扣件式模板支架的直角扣件达不到进一步相应规范要求,由此引发的安全事故越来越严重。直角扣件是介于刚接和铰接的半刚性节点,资料表明半刚性节点的取值对其极限承载力有一定的影响。文中运用特征值屈曲分析,结合数值分析方法,进一步探究与极限承载力的关系。研究表明,拧紧力矩较小时,初始转动刚度值的变化对承载力影响非常显著,性扣件式模板支撑体系的极限承载力值随半刚性值的增大呈非线性增大。

关键词:高大模板;半刚性节点;数值模拟;屈曲分析;极限承载力

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0130-04

The impact analyse between ultimate bearing capacity with semi-rigid node of fasteners template scaffold

Ye Kai^a, Zhao Yiqiang^a, Liu Gang^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. The Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: With the development of economy, fasteners template scaffold are more and more widely used. Duing to the construction, defects, however, right-angle fastener of fasteners template scaffold can not meet the corresponding requirement specification, which lead more and more safety accidents. Right-angle namely called Semi-rigid nodesis between that of rigid connection and hingedconnection. Existing data show that the value of semi-rigid nodes have a certain influence on the ultimate bearing capacity. Using eigenvalue buckling analysis and numerical analysis methods, this paper explore further the relationship between semi-rigid nodes and ultimate bearing capacity. Studies have shown that the initial rotational stiffness has a very significant effect on bearing capacity when tightening torque is small, and moreover, ultimate bearing capacity of the fasteners template scaffold increases non-linearly with the increase of semi-rigid.

Key words: tall template; semi-rigid nodes; numerical modeling; buckling analysis; ultimate bearing capacity

我国常用的钢管模板支架有扣件式支架、门式模板支架体系已有 40 多年历史,仍作为主导支架使用。由于其搭设灵活,装拆方便,钢管周转率高,在脚手架、碗扣式支架、插销式支架等,但扣件式钢管

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金(51578095);重庆市自然科学基金(CSTC2012JJA30006)

作者简介:叶凯(1991-),男,主要从事结构健康检测与控制研究,(E-mail)20141613079@cqu.edu.cn。

刘纲(通信作者),男,教授,(E-mail)gliu@cqu.edu.cn。

今后较长时间内仍将占主导地位。在建筑工程施工中,尤其是在高层住宅、超高层建筑、空间结构及大跨结构中,扣件式钢管模板支撑体系应用越来越普遍。

随着经济的快速发展,大跨度、高净空混凝土结构大量出现,模板及其支架的施工难度越来越大,其安全性问题尤为突出。例如,2008年7月,轨道交通两路口换乘车站工程支架发生垮塌,造成1死15伤;2009年8月,铜梁县金江水泥有限公司熟料罐内部施工支架发生坍塌,导致7人死亡的严重事故,此外因高大模板支撑体系过大变形导致的施工事故更是不胜枚举。为了避免扣件式模板支架工程事故再次发生,2003年建设部和国家工商局等单位联合发布了《关于开展建筑施工所用钢管、扣件专项整治的通知》^[1]。尽管《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》已经经历过两次大规模修订,近年来在我国许多省市发生的扣件式高大模板支撑架坍塌事件仍层出不穷。这些事故背后不容忽视的因素就是施工缺陷,而直角扣件的施工问题会影响扣件式脚手架的安全性。直角扣件连接着水平杆和立杆,普遍是将其作为半刚性节点。

国内外学者在半刚性节点研究方面取得了丰硕成果,其中多数学者针对节点的分析采用了有限元方法,但其计算比较繁琐,导致工程人员难以接受。Lui等^[3]运用指数模型拟合试验 $M-\theta_r$ 数据获得了比较好的结果,但对于 $M-\theta_r$ 曲线出现突变的情况,该模型的精度不能满足工程需要。Jones等提出一种实用性更好的三次B样条函数模型,但拟合曲线模型过程中需要大量的样本数据;Frye等^[4]发表了采用多项式函数拟合而成的几种半刚性节点模型的论文;Chen修正了Lui的指数模型,其模型可以用来取代试验数据得到 $M-\theta_r$ 曲线;其它的指数模型还包括Chen等^[4]三参数、Yee等^[5]四参数模型。这些节点半刚性模型普遍应用在普通钢结构中,国外普遍应用门式模板支撑体系^[6-9],考虑节点半刚性特征时,英国、美国、德国、澳大利亚等国的脚手架规范都给出了具体的模型,基本上都是线性模型。国内对扣件式模板支撑结构的扣件节点试验研究较多,近年来袁雪霞等^[10]、范小周^[11]根据试验结果进行了拟合,由不同扣件的拧紧力矩得到相应的关系式。

分析脚手架极限承载力的理论有不少,其中特征值屈曲分析理论是一种实用的方法。通过特征值屈曲分析,得出半刚性节点取值与极限承载力的关

系,能深化对扣件式脚手架施工过程中直角扣件存在人为缺陷对其安全性的影响程度的认知,进一步推进科学施工的理念,为新型城镇化的持续建设提供一定的技术支撑。

1 特征值屈曲分析理论

ANSYS对扣件式高大模板支架的极限承载力求解提供了特征值(线性)屈曲分析。

特征值屈曲分析属于欧拉屈曲分析范畴,在设定的荷载、边界约束等情况下,计算出结构相应的特征值。为了得到各阶模态特征值,在线弹性范围求解 $\{P_0\}$ 的荷载一位移关系,即

$$\{P_0\} = [K_e]\{u_0\} \quad (1)$$

假定产生很小的位移,任意情况下 $(\{P\}, \{u\}, \{\sigma\})$ 的增量平衡方程满足下式:

$$\{\Delta P\} = [[K_e] + [K_e(\sigma)]]\{\Delta u\} \quad (2)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为应力; $[K_e]$ 为线弹性刚度矩阵; $\{u_0\}$ 为载荷状态 $\{P_0\}$ 的位移; $[K_e(\sigma)]$ 为某应力 $\{\sigma\}$ 下的初始应力刚度矩阵。

假设采用荷载为 $\{P_0\}$ 的线性函数作为加载方式,即

$$\{P\} = \lambda\{P_0\}, \{u\} = \lambda\{u_0\}, \{\sigma\} = \lambda\{\sigma_0\} \quad (3)$$

则推导出:

$$[K_e(\sigma)] = \lambda[K_e(\sigma_0)] \quad (4)$$

进而得到增量平衡方程,即

$$\{\Delta P\} = [[K_e] + \lambda[K_e(\sigma)]]\{\Delta u\} \quad (5)$$

当结构承载力为屈曲载荷 $\{P_{cr}\}$ 时,在 $\{\Delta P\} \approx 0$ 的状态下,整体结构产生的变形为 $\{\Delta u\}$, 在前屈曲范围内得到增量平衡方程,即

$$[[K_e] + \sigma[K_e(\sigma)]]\{\Delta u\} = \{0\} \quad (6)$$

因为假设的位移 $\{\Delta u\}$ 不能为零,则

$$\det[[K_e] + \lambda[K_e(\sigma)]] = 0 \quad (7)$$

如果有限元整体模型中有 n 个自由度,通过求解式(7)得到一系列的特征值 $(\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_n)$, 通常 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \cdots \leq \lambda_i \cdots \leq \lambda_n$, 通过特征值 $\lambda_{\min} = \lambda_1$ 求得临界屈曲荷载 P_{cr} 。

线性屈曲分析采用了小变形假设条件,计算快捷方便,没有考虑初始几何缺陷、塑性变形和非线性的影响,因此,线性屈曲分析得到的计算结果往往高估了结构的承载能力,但其结果可为非线性屈曲分析提供参考依据,属于结构整体稳定临界荷载上限值。

2 高大模板有限元模型的建立

采用 ANSYS 建立某典型模板支架模型,考虑不同的半刚性节点取值。

2.1 有限元模型的建立

计算模型的基本假定如下:水平杆与立杆之间半刚性连接;剪刀撑与立杆之间铰接连接,模板支架四周无约束;立杆支座底部与地面铰接,立杆顶部为自由端。采用文献[10-11]的相关数据,建立的模型几何尺寸如下:5 跨×5 跨×8 步,纵距和横距均采用 0.6 m,步距 0.9 m,扫地杆高度为 0.4 m,顶部伸出长度 0.55 m,在计算模型四周每隔 5 跨 4 步设置一道竖向剪刀撑。

根据扣件式模板支架各种构件的受力特点,水平杆和立杆都采用 BEAM188 单元模拟,剪刀撑采用 LINK8 单元模拟,立杆与水平杆之间的半刚性连接采用 COMBIN7 弹簧单元模拟。

所有钢管都采用 Q235 结构钢,其抗拉、抗压和抗弯强度设计值为 205 N/mm²,钢材弹性模量为 2.061 0⁵ N/mm²,密度为 7.851 0⁻⁶ kg/mm³,泊松比为 0.3,钢材的本构关系采用 ANSYS 双线性 BISO 模型,材料的屈服采用 Von-Mises 屈服准则。

利用 ANSYS 中的 CP 命令对立杆和纵横杆节点进行 UX、UY、UZ 和 ROTZ 的耦合,ROTX 和 ROTY 通过 COMBIN7 单元模拟其半刚性效应。剪刀撑与立杆之间的耦合采取类似的方法处理,以便实现旋转扣件的铰接效应。

整体计算模型如图 1 所示。

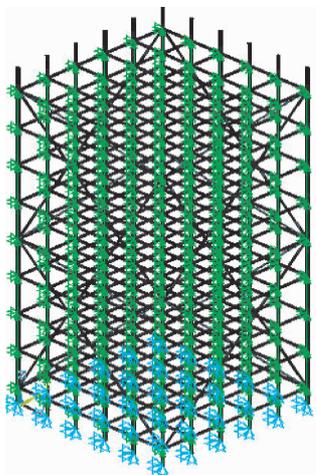


图 1 三维模型图

2.2 半刚性节点取值

在扣件式模板支撑结构中主要考虑的力学缺陷

为水平杆与立杆相连的半刚性节点,由于节点的半刚性主要影响整体结构中构件两端的约束程度,用特征值屈曲分析即可。采用如图 1 所示的计算模型,除值半刚性值改变外,其他基本假设同前所述,对架体进行线性屈曲承载力分析。节点的半刚性值 K 分别为:10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180,190,200,210,220,300,400,500,600,700(单位:kN·m/rad)。

3 建模结果与分析

第一阶屈曲模态变形图如图 2 所示,半刚性值与极限承载力之间的关系曲线如图 3 所示。

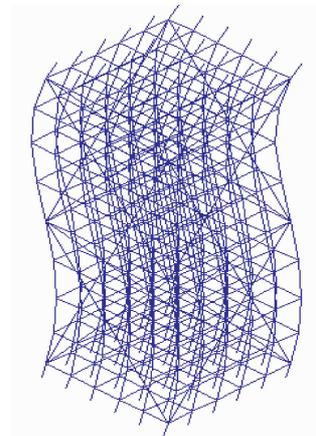


图 2 三维屈曲模态变形图

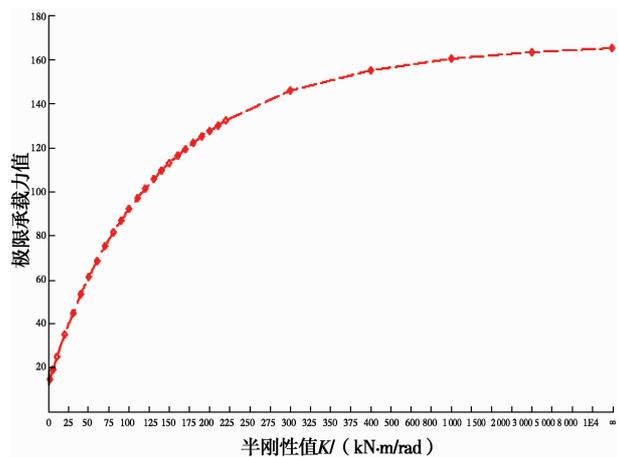


图 3 半刚性值与极限承载力之间的关系曲线

由图 2~图 3 可知:

1) 在扣件式模板支撑结构中半刚性值为 10 kNm/rad 时,该模板支撑体系的极限承载力为 24.75 kN,而当节点刚度无穷大时,其极限承载力达到了 165.15 kN,架体的承载力值提高了约 5.68 倍,说明扣件螺栓的拧紧力矩较小时,初始转动刚度

值的变化对承载力影响非常显著。

2)扣件式模板支撑体系的极限承载力值随半刚性值的增大呈非线性增大,这与文献[12]结论一致。当初始转动刚度值在 $10\sim 150$ kNm/rad变化时,架体的极限承载力变化显著,几乎呈线性增长。当初始转动刚度值增加到 150 kNm/rad以后,继续增加转动刚度,架体的极限承载力增加缓慢(初始转动刚度值由 150 kNm/rad增加到 600 kNm/rad时,架体的极限承载力从 101.48 kN增加到 145.69 kN,初始转动刚度值增加到原来的4倍,极限承载力仅仅增加了 44.21 kN),说明扣件式模板支撑结构的转动刚度较大(接近于刚接)时,初始转动刚度值的变化对扣件式模板支撑体系的极限承载力影响不明显了。

3)试验表明,扣件式模板支撑体系中的扣件节点半刚性值在 25 kNm/rad左右,有限元分析的极限承载力为 42.36 kN,大于试验结果,这是由于试验时,水平杆与立杆的连接存在偏心(不在同一平面内),而且杆件在搭设过程中,并不是理想水平的、竖直的,存在材料缺陷和几何参数偏差。

4)采用刚性连接的节点时,架体的极限承载力为 165.15 kN,远远大于试验结果,说明在计算扣件式模板支撑体系的极限承载力时,考虑节点半刚性十分必要。

4 结 论

基于 ANSYS 有限元软件建立了高大模板支架的有限元模型,通过设定不同的半刚性节点的取值,得到了高大模板的极限承载力。结果表明,在计算扣件式模板支撑体系的极限承载力时,考虑节点半刚性十分必要。扣件螺栓的拧紧力矩较小时,初始转动刚度值的变化对承载力影响非常显著。扣件式模板支撑体系的极限承载力值随半刚性值的增大呈非线性增大。

参考文献:

- [1] 胡长明,刘洪亮,曾凡奎,等.扣件式钢管高大模板支架研究进展[J].工业建筑,2010(2):1-6.
- [2] Chen W F, Lui E M. Effects of joint flexibility on the behavior of steel frames [J]. Computers & Structures, 1987,26(5): 719-732.
- [3] Lui E M, Chen W F. Behavior of braced and unbraced semi-rigid frames [J]. Int. J. Solids Structures, 1988, 24(9): 893-913.
- [4] Chen W F, Kim S E. LRF Steel Design using Advanced Analysis [C]. CRC Press, Boca-Raton, New York, FL, 1997.
- [5] Yee Y L, Melchers R E. Moment-rotation curves for bolted connections [J]. J Struct Engrg, ASCE, 1982, 112:615-635.
- [6] Wu F S, Chen W F. A design model for semi-rigid connections [J]. Engrg Struct, 1990, 12(2):88-97.
- [7] Shi G, Atluri S N. Static and dynamic analysis of space frames with nonlinear flexible connections [J]. Int J Numer Methods in Engrg, 1989, 28: 2635-2650.
- [8] Chen W F, Kishi N. Semi-rigid steel beam-to-column connections: Database and modeling [J]. J Struct Engrg, ASCE, 1989, 115(1): 105-119.
- [9] Ang K M, Morris G A. Analysis of three-dimensional frames with flexible beam-column connections, Can [J]. J Civil Eng, 1984, 11, 245-254.
- [10] 袁雪霞,金伟良,鲁征,等.扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J].土木工程学报,2006(5):43-50.
- [11] 范小周.扣件式钢管高大模板支撑体系广义初始缺陷及性能分析[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [12] 胡长明.扣件联接钢结构的试验及其理论研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.

(编辑 陈移峰)