

考虑初始缺陷的扣件式 钢管模板支架极限承载力研究

王 兵¹, 胡长明², 葛召深³, 谭纪波¹

(1. 山东金柱集团有限公司, 山东 聊城 252000; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055;
3. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要:以扣件式钢管模板支架整体稳定性试验模型为计算模型, 结合材性试验和节点半刚性试验, 在有限元软件 ANSYS 中建立了具有材料多线性随动强化和节点半刚性的整架模型. 以实测缺陷为依据, 对架体进行一致缺陷模态法和随机缺陷模态法的缺陷非线性稳定分析, 结果证明了该有限元模型的正确性和一致缺陷模态法在分析扣件式钢管模板支架结构时的可行性, 并指出扣件式钢管模板支架结构应属于缺陷敏感结构. 通过对结构试验、一致缺陷模态法和随机缺陷模态法计算的结构失稳模态和荷载位移曲线的对比研究, 验证了扣件式钢管模板支架结构的脆性失稳破坏特征, 并得出了一些有意义的结论.

关键词:扣件式钢管模板支架; 初始缺陷; 一致缺陷模态法; 随机缺陷模态法

中图分类号: TU312⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)06-0792-07

扣件式钢管脚手架结构在我国的使用始于上世纪 60 年代初期, 目前其使用量仍占总量的 60% 以上^[1]. 近年来, 由于大量模板坍塌事故的发生, 该领域的安全问题逐渐被社会各界所关注, 相关研究取得了不少建设性的成果. 我国关于模板支架结构稳定性的研究主要集中于其力学缺陷, 比如弹性模量、强度极限、节点刚度等的不均匀性^[2-4], 而关于几何缺陷的研究则较少. 杆件的初始弯曲、初始偏心、以及杆件的缺失等几何缺陷是我国建筑工程中一个普遍存在且被长期忽视的问题.

几何缺陷实质上亦是以附加应力的形式促使构件截面的一部分提前进入屈服, 从而导致该区域的刚度提前消失, 而降低稳定承载能力. 因此, 几何缺陷也可以认为是力学缺陷的一种表现形式. 缺陷的存在还使得结构的失稳一般都呈弹塑性状态, 而非简单的弹性稳定问题. 因此, 实际结构稳定承载能力的确定, 应该计及几何缺陷和力学缺陷, 对整体结构作弹塑性二阶(或严格意义上的几何非线性)分析. 简言之, 实际结构稳定承载能力的确定是一个计及缺陷的非线性问题.

扣件式钢管模板支架受载时结构位移较大, 非线性(几何非线性、材料非线性)的影响十分明显, 典型的破坏形式为失稳破坏^[5]. 而且其构件表现为以受压为主, 但是, 当结构因受压稳定性不足而破坏时, 很有可能会表现出脆性破坏的特征, 比如由钢管组成的网架结构就可能会发生脆性失稳. 脆性失稳具有突发性, 所以比塑性破坏危险^[6]. 因此, 扣件式钢管模板支架结构体系的整体稳定是研究、设计过程中必须解决的问题. 而在其稳定分析中, 缺陷稳定分析是一项十分重要而又困难的问题, 也是该结构体系计算中迫切需要而尚未得以完全解决的问题. 因此, 如何定量地寻求一种比较全面、客观而又方便地确定扣件式钢管模板支架结构的稳定性以及缺陷影响的方法是该类结构设计与应用中必须深入研究和亟待解决的课题, 具有很重要的工程意义.

1 模板支架稳定性分析

模板支架作为具有半刚性节点的有侧移框架结构^[7], 其在弹性阶段和弹塑性阶段的几何非线性方

收稿日期: 2012-03-19 修改稿日期: 2012-11-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50978219)

作者简介: 王 兵(1981-), 男, 山东聊城人, 工程师, 主要从事土木工程施工技术研究.

程组的解析解往往是很难求得的. 在目前情况下,更多的是采用以数值计算为主,试验为辅的研究方法. 目前工程上常用的稳定分析方法有两种,即特征值(线性)屈曲分析和非线性稳定分析. 特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度. 但是,非线性和初始缺陷等因素使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲. 因此,特征值屈曲分析经常得出非保守结果,通常不能用于实际的工程分析. 非线性稳定分析用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求得使结构开始变得不稳定时的临界载荷,可应用各种非线性技术,还可以跟踪结构的后屈曲行为,因而可用于对实际结构的设计或计算. 本文所有非线性稳定分析都是在通用有限元分析软件 ANSYS 上完成,并取第一个临界点处的荷载值作为结构的临界荷载.

1.1 有限元模型的建立

为了能够精确的研究初始缺陷对架体临界荷载的影响,模型中全部采用实测截面尺寸,钢管外径 48 mm,壁厚 3.21 mm,采用 beam188 三维有限应变梁单元模拟,该单元能够模拟杆件的受弯、侧移和扭转稳定等问题. 考虑到扣件连接时,立杆、水平杆、剪刀撑等相互间均不在一个平面内,在两个杆件(如立杆和水平杆)的连接处,将需要连接的两个点的相对间距设置为 4.8 cm,以保持杆件接触并避免杆件交叉. 而为了描述节点的半刚性特征,在水平杆与立杆的接触处,引入一个弹簧单元 combin14 以模拟扣件对节点扭转的约束(如图 1),其抗扭刚度系数采用文献[8]的实测数据,两个节点在其它方向上的位移采用 CP 命令约束. 而对于剪刀撑由于其旋转扣件抗扭刚度几乎为零,在建立模型时,立杆和剪刀撑节点之间也引入一个弹簧单元 combin14,但其扭转刚度取一极小值,其它方向同样采用 CP 命令约束. 与地面接触处采用铰接,顶部采用弹簧,以模拟反力杆和加载梁对架体顶部的约束.

钢材的强度指标参照材料性试验结果,取屈服强度为 330 MPa,弹性模量 1.94×10^5 MPa,极限强度为 390 MPa,考虑材料的非线性,采用 ANSYS 多线性随动强化模型来模拟钢材的本构关系,应力-应变曲线如图 2 所示,材料的屈服遵循 Von-Mises 屈服准则及相关流动法则.

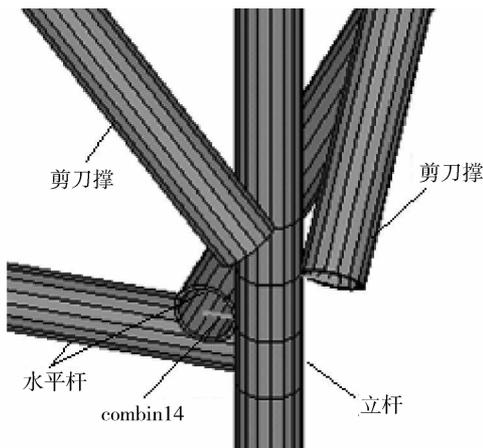


图 1 节点示意图

Fig.1 Sketch of node

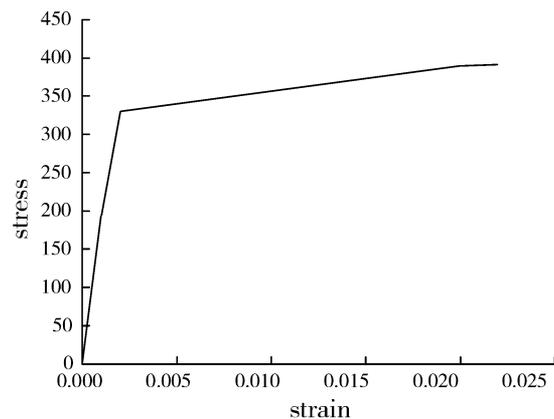


图 2 钢材的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of the steel materia

在有限元计算模型中,分为节点区(广义节点)和杆件,每个扣件采用两个节点模拟,每个节点区根据不同的扣件数采用数量不等的节点,图 1 可视为一个广义节点. 每步杆件分为两个单元. 考虑材料非线性和几何非线性,对于几何非线性,考虑大变形效应,即采用大变形,小应变假定. 对于材料非线性采用以上定义的多线性随动强化模型. 非线性求解采用基于全牛顿-拉普森法的弧长法,采用力收敛准则. 以下所有的非线性分析均做相同处理,所有的有限元计算都是在通用有限元分析软件 ANSYS 上完成. 对理想模型进行双非线性分析,临界荷载为 141.60 kN. 而模型试验值为 85 kN. 由此,可以认为扣件式钢管模板支架是一个缺陷敏感性结构.

1.2 一致缺陷模态法

一致缺陷模态法^[9]认为结构的最低阶临界点所对应的屈曲模态为结构的最低阶屈曲模态,结构按

该模态变形将处于势能最小状态,所以对于实际结构来说,在加荷的最初阶段即有沿着该模态变形的趋势,如果结构的缺陷分布形式恰好与最低阶屈曲模态相吻合,这将对其受力性能产生最不利影响.一致缺陷模态法就是用最低阶屈曲模态来模拟结构的最不利几何缺陷的分布.并认为最低阶屈曲模态所对应的临界荷载就是该结构的最小临界荷载.采用这种缺陷形式主要面临两个问题,一是如何确定初始缺陷的模式;二是如何确定缺陷的最大值 R . 其中第二个问题主要由施工水平、工人素质、材料质量等因素决定.本文根据实测节点位置偏差 R 取为 26 mm. 而对于第一个问题,在应用中有两种提取模态的方法,一种是采用最低阶特征值屈曲模态;另一种是采用屈曲模态的精确形式,即先求出理想结构的荷载位移全过程曲线,然后把屈曲前后两个邻近状态的位移之差作为屈曲模态,但 ANSYS 所采用的球面弧长法不一定能够跟踪到结构的后屈曲平衡路径,这时就无法提取屈曲模态的精确形式^[10],所以较为常用的还是最低阶特征值屈曲模态.

一致缺陷模态法是力图通过一次非线性计算就能够求出缺陷结构的最小临界荷载值,使计算量尽量少,这是它的显著优点.但是在模板支架结构稳定性分析中直接应用一致缺陷模态法仍存在着理论上的不足和操作上的困难^[11],但这些不足和困难对模板支架结构稳定性的影响有多大,是否可忽略不计以及该方法是否可行需要用随机缺陷模态法进行验证.

对理想模型进行特征值屈曲分析,利用 ANSYS 中 UPGEOM 命令提取最低阶屈曲模态中构件节点的位移,模拟结构的初始缺陷分布,修改模型形成缺陷结构,非线性计算临界荷载为 69.693 kN,与理想模型相比降低了 50.78%. 模型前 6 阶失稳模态如图 3 所示.

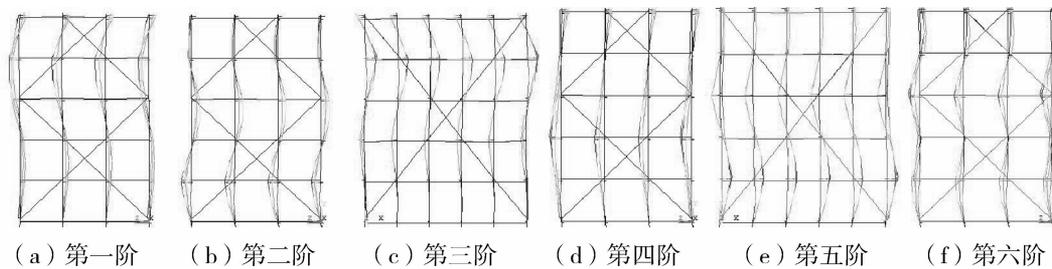


图3 模型失稳模态

Fig. 3 Failure mode of model

1.3 随机缺陷法

随机缺陷法^[9,12-14]认为结构的初始缺陷是随机的,结构的初始缺陷受各种因素如管理水平、材料质量、工人熟练程度等的影响,其大小和分布形式无法事先预知.然而,从概率统计角度来看,无论结构的缺陷分布如何复杂,全部节点的安装误差应该近似的服从正态分布.

1.3.1 基本假定

1) 由于影响实际结构初始安装误差的因素非常多,而且广义节点内各节点间的缺陷非常小,几乎为零,假定广义节点内各节点缺陷为零,结构各广义节点的位置偏差相互独立.

2) 目前无论是哪种随机缺陷法,均按照“ 2σ (二倍均方差)原则”确定统计参数,但模板支架缺陷的离散度^[10]非常大,与永久性结构有很大不同.我们检测了扣件式钢管模板支架试验模型 144 个节点区中的 48 个,最小值 14.8 mm,最大值 26 mm,大部分集中在 20 mm 左右.因此,可以假定每个节点的位置偏差符合一倍均方差范围内的正态概率密度函数,即每个节点的位置偏差随机变量为 RX ,其中随机变量 X 服从标准正态分布,计算结果表明该假定是可行的.

结构所有节点的位置偏差作为一个多维的独立随机变量,每个样本点对应着结构一种可能的初始缺陷分布模式.由此可以取出 N 个样本,以供非线性稳定分析和求得对应的临界荷载.节点缺陷分布之一如图 4 所示.

1.3.2 计算结果及分析

对修改后的缺陷结构进行双非线性分析,样本容量 $n=50$,缺陷的设计最大值 $R=26$ mm,计算最大

值为 95.205 kN,最小值为 76.693 kN,平均值为 85.636 kN,如图 5 所示.

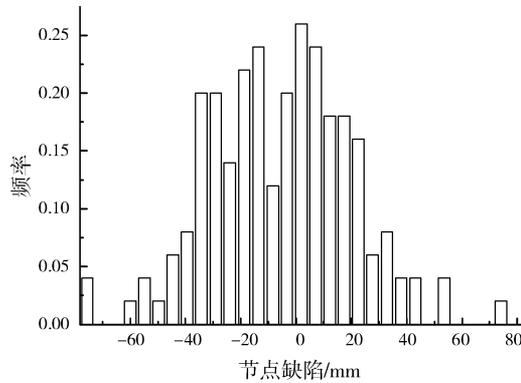


图 4 初始缺陷分布

Fig. 4 Distribution of initial imperfection

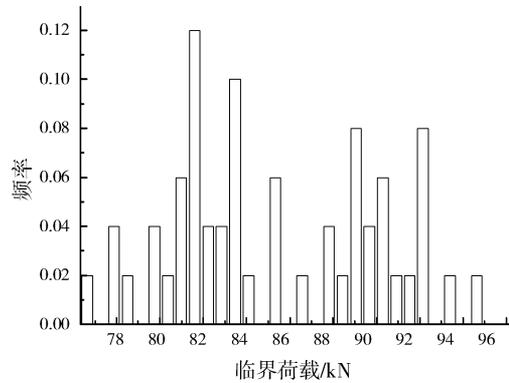


图 5 随机缺陷模型对应临界荷载分布规律

Fig. 5 Distribution of stochastic imperfection model's critical load

由图中可以看出,该图的形状特点与节点随机缺陷的分布情况大体相同,呈现中间高,两端低的特点,而且离散性比较大,可近似的认为临界荷载呈正态分布.采用 3σ 原则,设计临界荷载 $P_{cr} = \mu - 3\sigma = 71.509$,与理想模型相比降低了 49.5%,与一致缺陷模态法相比增大了 2.6%.因此,一致缺陷模态法计算的结构极限荷载可以认为是结构的最小临界荷载.

2 模板支架结构模型试验

2.1 试验概述

为了确定模板支架的整体受力性能以及各构造因素对架体稳定承载力的影响,进行了模板支架的整架试验.本试验由西安建筑科技大学设计并完成.为了考察不同参数设置(不同纵横距、步距和剪刀撑设置情况)对整架承载力的影响,共考虑 18 种搭设方案并选择 5 个不同工况进行了试验^[16].

为了研究初始缺陷对架体稳定承载力的影响,在试验过程中检测了架体部分杆件节点的偏移.考虑到工况 5 与实际工程最为接近,且检测试验数据较为完整,以上利用一致缺陷模态法和随机缺陷模态法进行的计算均是以工况 5 为模型.工况 5 的搭设情况如图 6 所示.立杆编号如图 7 所示.

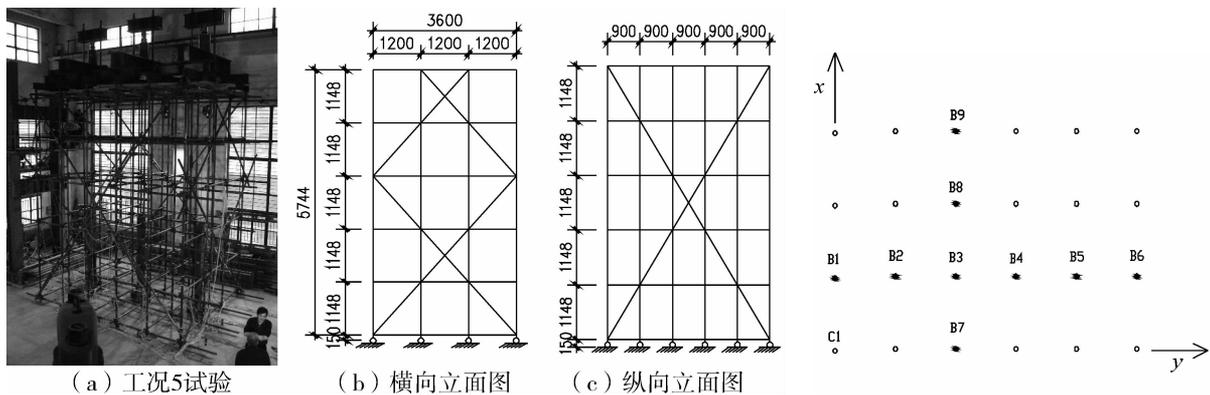


图 6 工况 5 模型图

Fig. 6 Model of test 5

图 7 立杆编号

Fig. 7 Numbering of the poles

2.2 试验结果与各缺陷计算方法计算结果对比

随机缺陷模态法计算结构临界荷载平均值为 85.636 kN,方差 4.709 kN,结构试验值为 85 kN.基本一致.一致缺陷模态法计算临界荷载为 69.693 kN,由 1.3 节计算可知,该临界荷载可以认为是模板支架结构的最小临界荷载.由于试验过程中未检测结构屈曲后性能,因此试验无法描绘出结构完整的荷

载位移曲线,其破坏形态如图 8 所示.一致缺陷模态法计算结构失稳模态如图 9 所示.部分节点荷载位移曲线如图 10~12 所示.随机缺陷计算最小及最大临界荷载对应失稳模态如图 13~14 所示,其计算的最小临界荷载对应的结构荷载位移曲线如图 15 所示.

通过以上计算分析,可以看出:

1) 试验的结构临界荷载在随机缺陷模态法计算的结构临界荷载范围以内,而且其失稳模态与荷载位移曲线基本一致,说明计算中采用的模型和基本假定与实际结构相比具有较好的可靠度.而且,一致缺陷模态法、随机缺陷模态法计算的结构失稳模态与试验中模型的失稳模态吻合较好,证明采用以上两种方法对结构进行缺陷非线性稳定分析,是计算模板支架结构最小临界荷载的有效方法,但由于随机缺陷法计算结构最小临界荷载需要进行的计算和分析过于复杂,一般可采用一致缺陷模态法进行计算.

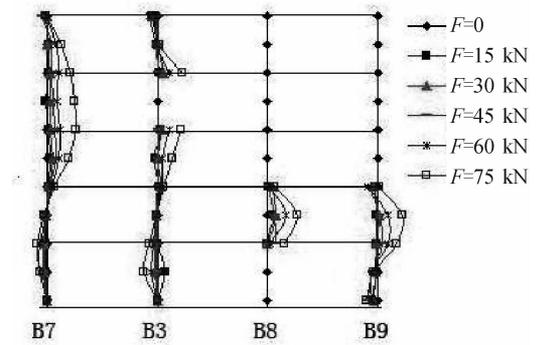


图 8 试验中结构失稳模态

Fig. 8 Failure mode of test model

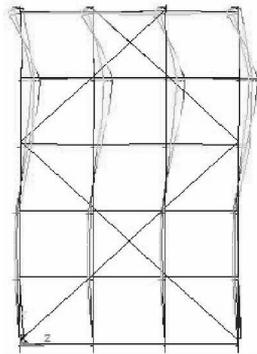


图 9 一致缺陷法计算结构失稳模态

Fig. 9 Failure mode from consistent model's imperfection method

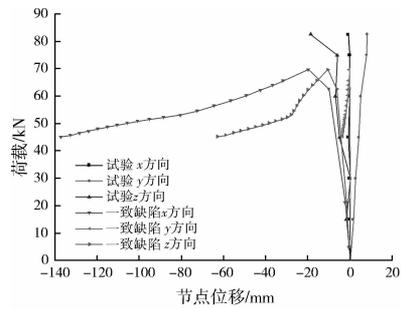


图 10 边立杆 B7 顶点荷载位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curve of B7's zenith

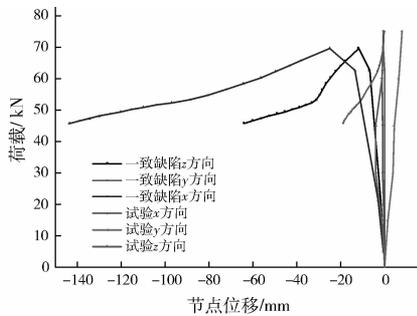


图 11 立杆 B3 顶点荷载位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curve of B3's zenith

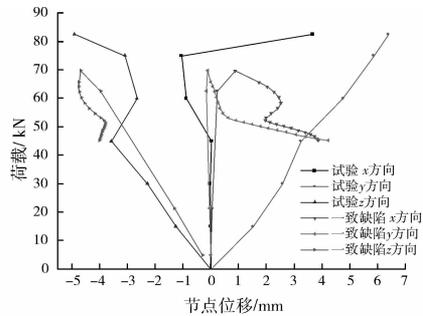


图 12 立杆 C1 顶点荷载位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curve of C1's zenith

2) 一致缺陷模态法、随机缺陷模态法计算的结构荷载位移曲线均表明结构在到达临界荷载后,整体刚度迅速降低,导致几乎在没有任何预兆的情况下结构突然失稳,这与试验中结构的突然失稳现象一致,验证了扣件式钢管模板支架结构的脆性失稳破坏特征.

3) 通过随机缺陷模态法计算可以看出,结构对顶部缺陷较为敏感,底部次之,中部最弱.对具有规律性的缺陷敏感,而杂乱无章的缺陷对其承载力影响较小.因此,在结构安装时应特别注意同一水平面内立杆的弯曲方向,应尽量避免立杆有规律性的在相同一侧弯曲或倾斜.

3 结 论

(1) 根据试验工况检测的初始缺陷,采用一致缺陷模态法和随机缺陷模态法对该工况进行了缺陷非

线性有限元分析,结果证明一致缺陷模态法在计算扣件式钢管模板支架结构整体稳定分析时,是一种非常有效的方法.

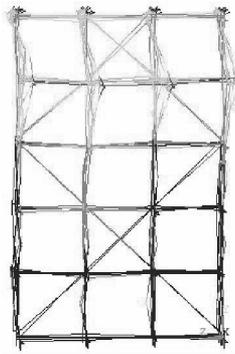


图 13 随机缺陷法计算最小临界荷载对应失稳模态

Fig. 13 Failure mode from the minimum critical load calculated by stochastic imperfection method

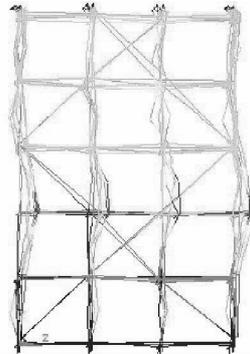


图 14 随机缺陷法计算最大临界荷载对应失稳模态

Fig. 14 Failure mode from the maximal critical load calculated by stochastic imperfection method

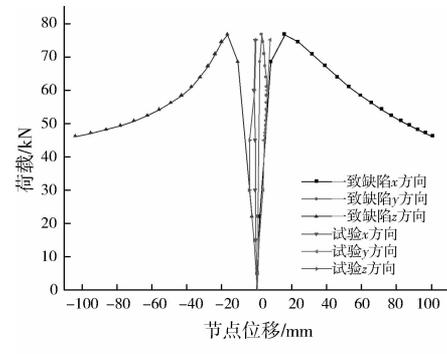


图 15 随机缺陷法计算最小临界荷载 B3 杆顶点荷载位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curve of B3's zenith from the minimum critical load calculated by stochastic imperfection method

(2)有限元模型在钢管材性试验的基础上,建立了钢材的多线性随动强化模型.并根据扣件与钢管的连接特点,建立了半刚性节点,一致缺陷模态法和随机缺陷模态法计算结果与试验结果的对比表明,该模型具有较好的可靠性.

(3)结构荷载位移曲线表明结构在到达临界荷载后,整体刚度迅速降低,导致几乎在没有预兆的情况下结构突然失稳,该特点与试验中结构的突然失稳现象一致,同时也与工程中出现的众多模板支架结构突然失稳倒塌现象吻合,验证了扣件式钢管模板支架结构的脆性失稳破坏特征.

(4)通过随机缺陷模态法计算可以看出,结构对顶部缺陷较为敏感,底部次之,中部最弱.对具有规律性的缺陷敏感,而杂乱无章的缺陷对其影响较小.因此,在结构安装时应特别注意同一水平面内立杆的弯曲方向,应尽量避免立杆有规律性的在相同一侧弯曲或倾斜.

参考文献 References

- [1] 糜嘉平. 我国模板脚手架行业取得的成就及发展前景[J]. 施工技术, 2009, 38(4): 16-18.
MI Jia-ping. Achievement and Development Prospect of Formwork and Scaffold Industry in China[J]. Construction Technology, 2009, 38(4): 16-18.
- [2] 方立新, 宣云干. 扣式连接结构的节点半刚性模型探讨[J]. 江苏建筑, 2008(1): 24-25, 35.
FANG Li-xin, XUAN Yun-gan. Study of the Mechanic Model in Semi-rigid Joist of Fastener-type Structure[J]. Jiangsu construction, 2008(1): 24-25, 35.
- [3] 敖鸿斐, 李国强. 双排扣件式钢管脚手架整体极限承载力研究[J]. 力学季刊, 2004, 25(2): 213-218
AO Hong-fei, LI Guo-qiang. Investigation of Over all Load bearing Stability Capacity of Tube-and-couple Scaffolds [J]. CHINESE QUARTERLY OF MECHANICS, 2004, 25(2): 213-218.
- [4] 张卫红, 刘建民, 朱国卫. 基于整架试验的扣件式钢管脚手架半刚性节点计算方法[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(1): 38-42.
ZHANG Wei-hong, LIU Jian-min, ZHU Guo-wei. A semi-rigid node calculation method for steel tubular scaffold with complete based on back-analysis of scaffold load-bearing experiments results[J]. Journal of Shangdong Jianzhu University, 2009, 24(1): 38-42.
- [5] 袁雪霞, 金伟良. 扣件式钢管脚支架稳定承载能力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 43-50.
YUAN Xue-xia, JIN Wei-liang. A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 43-50.
- [6] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
CHEN Shao-fan. Design theory of steel structure[M]. Beijing: Science Publishing, 2001.
- [7] 胡长明, 葛召深. 扣件式钢管模板支架静压变形特性的试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(2): 32-35.

- HU Chang-ming, GE Zhao-shen. A study on distortion characteristic of fastener-style tubular steel formwork-supports under Static Compression[J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(2): 32-35.
- [8] 张化振. 扣件式高大模板支架的节点半刚性和整体承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
ZHANG Hua-zhen. Semi-rigid Joint and Global Stability Capacity Research of High-formwork-supports with Couplers[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [9] 沈世钊, 陈 昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
SHEN Shi-zhao, CHEN Xi. Stability of net-shell structure[M]. Beijing: Science Publishing, 1999.
- [10] 陈 东, 赵才其, 王修信, 等. 板片空间结构的改进一致缺陷模态法[J]. *工业建筑*, 2007, 37(s): 504-507.
CHEN Dong, ZHAO Cai-qi, WANG Xiu-xin, et al. IMPROVED CONSISTENT IMPERFECT BUCKLING ANALYSIS METHOD FOR STABILITY ANALYSIS OF SHEET SPACE STRUCTURE[J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(s): 504-507.
- [11] 唐 敢, 马 军, 赵才其, 等. 板片结构稳定性分析的改进随机缺陷法[J]. *工业建筑*, 2004, 34(11): 10-13.
TANG Gan, MA Jun, ZHAO Cai-qi, et al. ADVANCED STOCHASTIC IMPERFECTIONS METHOD FOR STABILITY ANALYSIS OF SHEET SPACE STRUCTURE[J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(11): 10-13.
- [12] CEDERBAUM G, ARBOCZ J. On the reliability of imperfection-sensitive long isotropic cylindrical shells[J]. *Structural Safety*, 1996, 18(1): 1-9.
- [13] SCHENK C A, SCHUELLER G I. Buckling analysis of cylindrical shells with random geometric imperfections[J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2003, 38(7): 1119-1132.
- [14] OYESANYA M O. Influence of extra terms on asymptotic analysis of imperfection sensitivity of toroidal shell segment with random imperfection[J]. *Mechanics Research Communications*, 2005, 32(4): 444-453.
- [15] 尹凌峰, 黎德林, 赵惠麟. 基于缺陷分布变离散度空间网格的结构稳定性[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2007, 37(6): 1013-1017.
YIN Ling-feng, LI De-lin, ZHAO Hui-lin. Stability of spatial grid structure based on variable discrete degree of imperfection distribution. [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2007, 37(6): 1013-1017.
- [16] 胡长明. 扣件联接钢结构试验及其理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
HU Chang-ming. Studies on Experiment and Theory of Steel Construction Connected with Fasteners[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.

Study on ultimate bearing capacity of fastener-style tubular steel falsework with initial imperfection

WANG Bing¹, HU Chang-ming², GE Zhao-shen³, TAN Ji-bo¹

(1. Shandong Jinzhu Group CO., LTD, Liaocheng 252000, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: A FEM with material multilinear kinematic hardening and node semi-rigid was established in ANSYS simulate test model of fastener-style tubular steel falsework based on material characteristic and node semi-rigid experimentation. Based on the data of measured imperfection, both the consistent mode imperfection method and stochastic imperfection method were employed to analyze the stability of the imperfection model. The result proved the model's correctness and consistent mode imperfection method's feasibility. In analyzing the fastener-style tubular steel falsework, the paper points out that fastener-style tubular steel falsework should belong to imperfection-sensitive structure. The brittleness failure characteristic of fastener-style tubular steel falsework proved to be valid and several significant conclusion are deduced after the deformation mode and load-displacement curve of the test were analyzed consistent mode imperfection method and stochastic imperfection method all proved to be valid.

Key words: fastener-style tubular steel falsework; initial imperfection; consistent mode imperfection method; stochastic imperfection method