

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.S1.017

扣件式模板支架初始缺陷分类及缺陷敏感度分析

刘 谦¹, 姚 旋², 刘 纲²

(1. 攀枝花市公路管理处, 攀枝花 617000; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:针对扣件式钢管模板支撑体系坍塌事故频发的现状,分析初始缺陷对架体承载能力的影响及计算方法。按照初始缺陷的性质,将扣件式钢管模板支架常见缺陷分为力学缺陷、材料缺陷、搭设参数偏差和初始几何缺陷共4大类。根据某真型实验架体建立有限元模型,分别计算架体承载能力对4类初始缺陷的敏感程度。针对较为敏感的初始缺陷,提出通过在现行规范承载力验算公式中加入修正参数来考虑材料初始缺陷的方法,以提高扣件式钢管模板支架极限承载能力计算的精度。

关键词:扣件式钢管;模板支撑架;初始缺陷;敏感度

中图分类号:TU711 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)S1-0063-04

Fastener-style Formwork Support System Initial Imperfection Classification and Defect Sensitivity Analysis

Liu Qian¹, Yao Xuan², Liu Gang²

(1. Department of road management of Panzhihua, Panzhihua 617000, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: For the ultimate bearing capacity of steel tubular scaffold with couplers, influences and computation methods considering initial imperfections are analyzed in this paper. Initial imperfections are classified into four type defects: mechanical defects, material defects, erection parameters deviation and initial geometric imperfections, according to the characteristic of initial imperfections. Based on the experiment of a steel tubular scaffold, the sensitivity of ultimate bearing capacity to different type imperfections are addressed using linear and non-linear buckling analysis by ANSYS finite element software. The results show that mechanical defects, material defects and the initial geometric imperfections have significant influence on the ultimate bearing capacity. And for the material defects, a method through adding correction factor to the stability design formula based on measurement data from the construction site is recommended.

Key words: Fastener style steel pipe, template support frame, the initial imperfection, sensitivity

扣件式模板支架是一种临时结构,在搭设过程中存在随意性、易变性、欠严格性以及材料的各种初始缺陷,导致支架的实际承载能力与设计能力存在较大差异,易引发支架的坍塌等事故。扣件式钢管模板支撑体系坍塌事故的频繁发生,严重阻碍了我国建筑技术的可持续发展,成为我国建筑施工技术研究的一个软肋^[1-2]。

我国从上世纪80年代逐步对扣件式钢管模板支撑体系展开了系统研究。在扣件式钢管模板支架的计算理论方面,先后提出了单杆铰接法(规范法)、多层排架算法(也称为等代柱计算方法)、有侧移框架理论算法和考虑节点连接半刚性的计算方法。在试验研究方面,张健^[3]对有、无剪刀撑的两个真型扣件式模板支架进行了对比试验,通过测试得到的支架整体侧向位移、立杆轴力、剪刀撑应力、水平拉杆应力等研究了支架体系的整体稳定性能;胡长明^[4]开展了一系列扣件式钢管模板支撑体系的足尺试验,得到了5种特定工

况下的极限承载力和整体失稳变形模式;天津大学^[5-6]完成了15项真型扣件式钢管模板支架试验和多组扣件节点半刚性试验,得到了不同工况下扣件式模板支架的极限荷载。

以上研究成果为我国相关规范的制定提供了必要的理论基础和试验数据^[1]。但据不完全统计,在2013年全国建筑行业发生的34起死亡人数超过三人的较大事故中,扣件式钢管模板支撑体系坍塌事故发生了17起,占到事故总起数的50%,累积伤亡人数超过360人。坍塌事故原因分析表明,扣件式模板支撑体系存在的各种初始缺陷是导致架体坍塌的重要原因之一^[7]。但目前我国在扣件式模板支撑体系初始缺陷方面的研究较少,远不能满足实际应用的需求。

本文通过对扣件式钢管模板支撑体系常见初始缺陷的分类,分别计算支架极限承载能力对不同初始缺陷种类的敏感程度。针对对承载能力影响较大的材料缺陷,提出修正系数计算方法,以期提高有限元模型模拟实际架体极限承载能

收稿日期:2014-05-20

基金项目:重庆市自然科学基金(CSTC2012JJA30006);中央高校基本科研业务费 NO. CDJZR14205501

作者简介:刘 谦(1977-),男,博士生,主要从事道路、桥梁研究,(E-mail)295773224@qq.com。

力的精度。

1 初始缺陷分类

模板支架结构属于临时性结构,与普遍使用的普通钢结构相比,结构和构件的工程验收质量规定要求较低;生产者为了追求最大经济效益,刻意造成负偏差;加之钢管多次循环利用,导致其初始缺陷更为严重。按初始缺陷的力学性质可分为以下四类^[8-9]:

1) 力学缺陷

扣件式模板支撑结构所用钢管属于冷弯薄壁型钢范畴,残余应力对钢管受力的影响较小,可忽略不计。但连接立杆与横杆的直角扣件属于半刚性连接节点,该连接将直接影响架体的整体刚度,属于力学缺陷。

2) 材料缺陷

在钢管的加工过程中,可能出现麻点、划痕、裂纹、结疤、脱碳、偏析和夹杂等缺陷,表现在钢管的材料屈服强度、钢管外径、壁厚、材料密度和泊松比与设计值有一定的差异。

3) 搭设参数偏差

由于不同施工企业管理、架子工技术水平不同,所搭设的扣件式模板支架中的纵横距、扫地杆高度、步距、顶部伸出长度等搭设参数不能完全符合设计要求,存在一定范围内的偏差。

表 1 缺陷分类一览表

序号	项目	类别	序号	项目	类别
1	钢管外径偏差	②	15	底座平稳程度	②
	钢管壁厚偏差	②	16	支撑架立杆垂直度	④
3	钢管屈服强度	②	17	支撑架步距偏差	③
4	钢管材料密度	②	18	支撑架纵距偏差	③
5	钢管弹性模量	②	19	支撑架横距偏差	③
6	钢管泊松比	②	20	纵向水平杆高差	③
7	钢管两端面切割偏差	②	21	同跨内两根纵向水平杆高差	③
8	钢管外表面锈蚀深度	②	22	剪刀撑斜杆与地面的倾角偏差	③
9	钢管端部弯曲偏差	④	23	主节点处各扣件中心点相互距离	③
10	立杆初弯曲偏差	④	24	同步立杆上两个相隔对接扣件的高差	③
11	水平杆和斜杆初弯曲偏差	④	25	立杆上的对接扣件至主节点的距离	③
12	冲压钢脚手板板面挠曲	④	26	纵向水平杆对接扣件至主节点的距离	③
13	冲压钢脚手板板面扭曲	④	27	扣件的拧紧力矩偏差	①
14	可调支托变形	②	28	钢管的残余应力	①

注:表中圆圈内的数值 1、2、3 和 4 分别代表力学缺陷、材料缺陷、搭设参数偏差和初始几何缺陷。

4) 初始几何缺陷

实际工程结构的几何参数与理想完善结构之间存在的

差别称之为初始几何缺陷。在扣件式模板支架中,几何初始缺陷包括杆件的初弯曲、架体初侧移、结构的空间节点位置偏差、构件的截面尺寸偏差和节点初偏心等。

根据以上分类,将扣件式模板支撑体系中出现的各种初始缺陷进行归类,所得结果如表 1 所示。

2 有限元模型的建立

利用文献[5-6]已完成的某真型高支模试验的架体建立有限元模型。该实验架体的纵距和横距均为 0.6 m,步距为 0.9 m,扫地杆高度 0.4 m,顶部伸出长度 0.55 m。纵横向各搭设 5 跨,竖向搭设 8 步,并在架体四周每隔 5 跨 4 步设置一道竖向剪刀撑。实验架体的外围总尺寸为 3 m×3 m×8.15 m。

根据实验架体搭设情况,在有限元模型中设定立杆支座底部与地面铰接,立杆顶部为自由端;水平杆与立杆之间半刚性连接,且不考虑扣件连接节点偏心作用;剪刀撑与立杆之间铰接连接,模板支架四周无约束。

钢管的外径按实验取为 48 mm,壁厚取 3 mm,钢材特性按 Q235 结构钢取值。有限元模型中水平杆和立杆都采用 BEAM188 单元模拟,剪刀撑采用 LINK8 单元模拟,直角扣件的半刚性连接采用 COMBIN7 弹簧单元模拟,其弹簧刚度系数取 19.867 4 kN·m/rad。建立的有限元模型如图 1 所示。

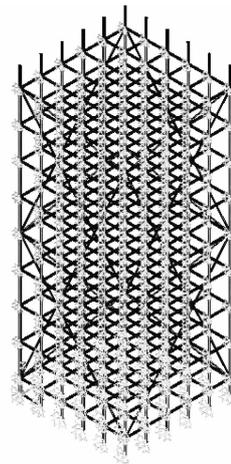


图 1 有限元三维模型图

3 初始缺陷对承载能力敏感度分析

3.1 力学缺陷计算分析

为讨论半刚性节点不同取值对支架整体极限承载能力的影响,取直角扣件所在节点的半刚性值 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)^[10-11]。计算得到半刚性值与极限承载力之间的关系曲线如图 2 所示。

从图 2 可知,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,当转动刚度值小于 150 kN·m/rad 时,架体的极限承载力变化显著,几乎呈线性增长。当初始转动刚度值超过 150 kN·m/rad 以后,再继续增加转动刚度,架体的极限承载力增加的速度变缓,如:初始转动刚度值由 150 kN·m/rad 增加到 600 kN·m/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,而极限承载力仅仅增加了 44.21 kN。

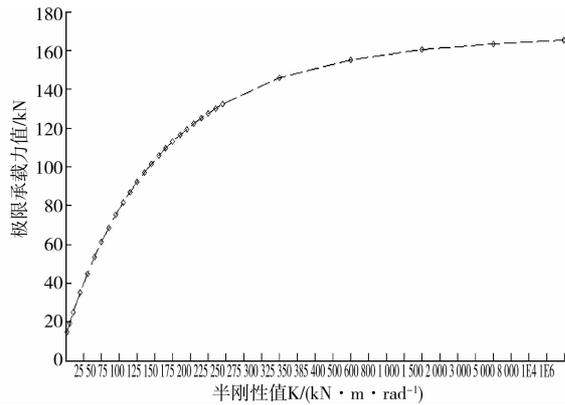


图 2 半刚性值与极限承载力之间的关系曲线

在扣件式模板支撑结构中半刚性值为 $10 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 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,表明直角扣件螺栓的拧紧力矩(半刚性值)对承载力影响十分显著。

3.2 初始几何缺陷计算分析

对于扣件式高大模板支撑体系,初始几何缺陷主要包括立杆局部初弯曲和架体初侧移,但支撑体系初始几何缺陷的计算尚无相关规范进行规定,故借鉴网壳结构体系的一致缺陷模态法计算支撑体系的极限承载力。考虑规范规定,取初始几何缺陷最大值 R 分别取 5 mm 、 10 mm 、 15 mm 、 20 mm 四种情况进行对比分析,得到极限承载能力如表 2 所示。

表 2 几何初始缺陷下的极限承载能力

缺陷值/mm	极限承载力 P_u/kN	$\frac{P_u - P_u^{(5)}}{P_u^{(5)}}$
5	33.25	—
10	31.17	-6.3%
15	29.54	-11.2%
20	28.16	-15.3%

由表 2 可知,初始几何缺陷增大将降低支撑体系的极限承载力,当 $R=10, 15, 20 \text{ mm}$ 与 $R=5 \text{ mm}$ 相比,极限承载力相应地下降了 6.3% 、 11.2% 、 15.3% 。如果与理想完整结构(不考虑任何初始缺陷)相比,架体的极限承载力将下降更多,故扣件式模板支撑体系对初始几何缺陷比较敏感,这与文献^[10]结论一致。

3.3 材料缺陷和搭设参数偏差计算分析

材料缺陷和搭设参数偏差需考虑的参数较多,根据文献^[9]现场调研统计,这些参数均符合正态分布,其均值和变异系数如表 3 所示。

根据建立的有限元模型,对表 3 中的参数采用 Anasys 软件中敏感度分析方法得出各参数对支撑体系极限承载力影响程度的大小,如图 3 所示。

在图 3 中,钢管壁厚、钢管外半径和步距对支撑体系极限承载力的影响较大,尤其是钢管壁厚,在敏感度饼状图中的面积超过了 50% 。在我国现行规范中,规定支撑体系采用的钢管壁厚为 3.6 mm ,允许偏差为 $\pm 0.36 \text{ mm}$,则在规范允许范围内,当钢管壁厚由 3.96 mm 降至 3.24 mm ,支撑体系

的极限承载力从 36.66 kN 降低到 34.22 kN ,极限承载力降低的百分比达到了 6.66% ,可见钢管壁厚严重影响架体极限承载力值。

表 3 材料缺陷和搭设参数统计表

输入参数	均值	变异系数
剪刀撑截面面积(AREA)	4.89 cm^2	0.1
扫地杆高度(B)	0.4 m	0.01
壁厚(BH)	3 mm	0.1
泊松比(BOSONBI)	0.3	0.03
钢管密度(GANGGUANMIDU)	$7850 \text{ kg}/\text{m}^3$	0.01
步距(H)	0.9 m	0.01
纵距(LA)	0.6 m	0.01
横距(LB)	0.6 m	0.01
顶部伸出长度(T)	0.55 m	0.01
弹性模量(TANXINGMOLIANG)	$206000 \text{ N}/\text{mm}^2$	0.03
外半径(WJ)	24 mm	0.01

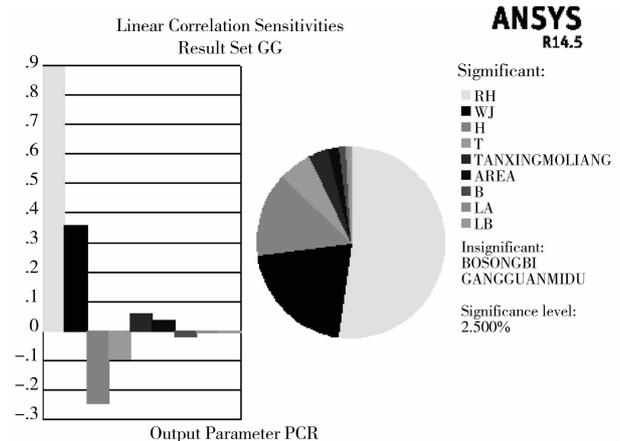


图 3 不同材料缺陷和搭设偏差对极限承载力的灵敏度图

4 材料初始缺陷的计算方法

对于力学初始缺陷对支撑体系极限承载能力的影响,在我国现行规范中,支撑体系极限承载能力的计算是通过考虑一定系数的单杆极限承载能力进行计算,因这些系数是通过整体支撑体系承载能力的实验得出的,所以规范给出的系数中已考虑了半刚性节点这种力学初始缺陷对支撑体系极限承载能力的影响。

对于几何初始缺陷,其计算方法较为复杂,故本文仅分析材料初始缺陷对支撑体系极限承载能力影响的计算方法。在材料缺陷中,钢管壁厚对支撑体系承载能力的影响占有所有材料缺陷和搭设参数偏差的 50% 以上,故可仅考虑该项初始缺陷的影响。因我国现行规范利用钢管截面面积来计算扣件式模板支架单杆的极限承载能力,故可采用修正现行规范公式的方法考虑钢管壁厚对支撑体系承载能力的影响。可通过现场实测钢管的壁厚,然后在规范公式中加入钢管壁

厚修正系数 η 进行单杆的实际极限承载力 F_{cr} 的计算:

$$F_{cr} = \eta \varphi f A \quad (1)$$

式中, φ 表示稳定系数; f 表示钢管强度设计值; A 表示钢管的公称面积。通过理论计算, 给出钢管壁厚修正系数 η 的值如表 4 所示。

表 4 钢管壁厚的影响系数 η

钢管壁厚/mm	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0
η	1.00	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.83

5 结 论

按照扣件式模板支撑体系中初始缺陷性质的不同, 将 28 种常见缺陷归类为 4 种不同的缺陷, 并通过敏感度分析研究了支撑体系极限承载能力对不同缺陷的敏感程度, 并提出了考虑影响较大的初始缺陷的计算方法。通过分析和模拟计算表明:

1) 28 种初始缺陷按照缺陷性质可分为力学缺陷、材料缺陷、搭设几何偏差和初始几何缺陷共 4 大类缺陷类型;

2) 建立了典型模板支撑架体的有限元模型, 通过模拟分析表明, 力学缺陷中半刚性节点由铰接变化为完全刚性连接时, 架体极限承载力值提高了约 5.68 倍; 材料缺陷中钢管壁厚由 3.96 mm 降低至 3.24 mm 时, 架体极限承载力降低 6.66%; 初始几何缺陷值由 5 mm 增加至 20 mm 时, 架体极限承载力将降低 15.32%;

3) 通过对现行规范承载力验算公式中加入修正参数, 可考虑钢管壁厚对扣件式模板支撑体系承载能力的影响。

参考文献:

- [1] 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范(JGJ130-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 袁雪霞. 建筑施工模板支撑体系可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [3] 张健, 蔡亮, 苗建伟, 等. 高支模真型试验的支架体系整体稳定性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27: 685-689.
- [4] 胡长明, 董攀, 沈勤, 等. 扣件式钢管高大模板支架整体稳定试验研究[J]. 施工技术, 2009, 38: 70-72.
- [5] 汪东. 扣件式钢管模板支架稳定承载力理论分析与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [6] 陆征然. 扣件式钢管满堂支承体系理论分析与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] Weesner L B, Jones H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 592-599.
- [8] Peng J L, Chan S L, Wu C L. Effects of geometrical shape and incremental loads on scaffold systems [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63: 448-59.
- [9] 郭建. 实测缺陷对扣件式钢管脚手架结构性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [10] Chan S L, Huang H Y, Fang L X. Advanced analysis of imperfect portal frames with semi-rigid base connections [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131: 633-640.
- [11] Liu H B, Zhao Q H, Wang X D, et al. Experimental and analytical studies on the stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing [J]. Engineering Structures, 2010, 32: 1003-1015.

(编辑 吕建斌)

(上接第 52 页)

- [15] Hastak M. Advanced automation or conventional construction process [J]. Automation in Construction, 1998, 7(4): 299-314.
- [16] Hastak M, Halpin D W. Assessment of life-cycle benefit-cost of composites in construction [J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(3): 103-111
- [17] Shapira A, Goldenberg M. AHP-based equipment selection model for construction projects [J]. J. Constr. Eng. Manage., 2005, 131(12): 1263-1273.
- [18] 张玉春, 何川. 基于人员疏散随机性的公路隧道火灾风险分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 113-118
- [19] 曹文贵, 翟友成, 张永杰. 新奥法隧道施工风险非线性模糊评判方法 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 105-112
- [20] 项贻强, 吴强强, 张婷婷. 基于 AHP-FCE 模型的桥梁设计风险评估研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(S): 275-280
- [21] Triantaphyllou E, Mann S. An evaluation of the eigenvalue approach for determining the membership values in fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 35: 295-301.
- [22] Lakoff G. Hedges: a study in meaning criteria and the logic of fuzzy concepts [J]. Journal of Philosophical Logic, 1997(2): 234-281.
- [23] Boender C G, de Graan J G, Lootsma F. Multicriteria Decision Analysis With Fuzzy Pairwise Comparisons [J]. Fuzzy Sets Syst, 1989, 29: 133-143.
- [24] Chen S J, Hwang C, Beckmann M, et al. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications [M]. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [25] Sugihara K, Ishi H. Fuzzy AHP with Incomplete Information [C]//IFSA/NAFIPS 2001 IEEE, 2001: 2730-2733.
- [26] 李凤伟, 杜修力, 张明聚, 等. 改进的 AHP 在明挖地铁车站施工期风险辨识中的应用 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(2): 167-172.
- [27] Xu Z. On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126: 683-687.
- [28] 许树柏. 实用决策方法—层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 10-12.

(编辑 胡英奎)