

基于响应面法的扣件式模板支架缺陷灵敏度分析

刘敏¹, 叶凯^{2a}, 杨吉云^{2b}

(1. 重庆第三建筑工程有限公司; 2 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 计算机工程学院, 重庆, 400030)

摘要:针对中国建筑施工中扣件式模板支架坍塌事故时有发生现状,采用响应面法对材料缺陷、制造误差和操作失误等多种初始缺陷进行了敏感度分析。采用有限元软件建立了典型模板支架的精细化有限元模型,分析了钢管壁厚、弹性模量和初始偏心等对模板支架极限承载能力的影响。通过多因素响应面分析,得出了典型扣件式模板支架对不同初始缺陷的敏感程度,为施工过程中有效控制模板支架坍塌事故提供了技术支持。

关键词:扣件式模板支架;初始缺陷;响应面法;数值模拟;灵敏度分析

中图分类号:U448.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0134-05

Imperfection sensitivity analysis for the tube and coupler formwork support system based on response surface method

Liu Ming¹, Ye Kai^{2a}, Yang Jiyun^{2b}

(1. The Third Construction Engineering Co LTD of Chongqing; 2a. School of Civil Engineering;

2b. School of Computer Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: In order to deal with frequent collapse accident of the template scaffold, response surface method is employed to conduct sensitivity analysis for initial defects including material defects, manufacturing error and mis-operation. The accurate finite element model of typical template scaffold is mode and the ultimate bearing capacity is analyzed with different thickness of tube wall, elasticity modulus and initial eccentricity. The sensitive amplitude of the ultimate bearing capacity to different initial defects is obtained and the result can provide technical support for effectively controlling collapse accident of template scaffold in structural constructions.

Key words: fastener scaffold; the initial imperfection; response surface method; numerical simulation; sensitivity analysis

中国使用扣件式钢管模板支架体系已有 40 多年历史,常见的钢管模板支架还有门式脚手架、碗扣式支架、插销式支架等,但扣件式钢管模板支架仍作为主导支架使用。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。由于其搭设灵活,装拆方便,钢管周转率高,在今后较长时间内

仍将占主导地位。

随着重庆市经济的快速发展,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

收稿日期:2015-11-10

基金项目:重庆建工集团科技创新项目(2015 年第 5 号);重庆市建设科技项目(城科字 2014 第 0005 号)

作者简介:刘敏(1977-),男,高级工程师,主要从事建筑施工管理研究,(E-mail)16138800@qq.com。

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]。值得注意的是,尽管《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》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。究其原因是忽略了架体存在各种各样的初始缺陷(包括钢管壁厚不足、旧钢管锈蚀、立杆初弯曲、架体垂直度、扣件力学缺陷等),而这正是导致扣件式模板支撑体系坍塌的主要原因。

在实际工程中,缺陷主要指由于施工技术、建设施工水平和材料的局限使得实际建成的结构与理想结构之间存在的偏差。近年来,不少学者对初始缺陷进行了研究:青岛建筑工程学院袁欣平等^[2-3]提出了纵横杆水平度和立杆垂直度的合理偏差限值;梁仁钟等^[4]通过数理统计分析发现钢管壁厚和初弯曲率基本符合正态分布;郭建等^[5]通过研究证明高支模中所用的管材缺陷符合经验正态分布;程佳佳等^[6]发现实际工程中高支模体系所采用的钢管壁厚很难达到规范要求,且变异系数很大。袁雪霞等^[7]得到了扣件式模板支架结构几何参数、搭设参数和扣件螺栓拧紧力矩的概率分析模型。

因为缺陷的大小和分布情况具有很大的随机性,到目前为止还没有合理地考虑各种缺陷的计算方法。显而易见的是,材料缺陷、搭设参数偏差等缺陷涉及到的影响因素太多,且经过实测后发现这些缺陷服从某种概率分布,所以采用基于数值模拟的概率分析比较合理。由于结构的单元和影响变量很多,建立显示的功能函数比较困难,本文将基于响应面法,采用 ANSYS-PDS 模块对扣件式模板支撑体系进行各种影响因素的敏感性分析。

1 响应面法敏感性分析原理

响应面法(Response Surface Method)是一种常用的近似技术,它通过对函数的一系列已知点进行拟合从而推测函数的变化趋势^[8]。响应面法可以直接利用现已广泛应用的确定性有限元分析程序,通过拟合的二次曲面来近似模拟真实结构响应曲面,具有较高的效率,一般都能满足实际工程的精度要求^[9]。响应面法的基本思想是通过有限次的试验来

回归拟合一个响应函数 Z 与基本变量 (X_1, X_2, \dots, X_n) 之间的解析表达式 $\bar{Z} = \bar{g}(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 以之代替不能明确表达的实际结构响应函数 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。

在结构功能函数中出现了 n 个基本随机变量时,响应面法通常取不含交叉项的二次多项式形式

$$Z = G(X') = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (1)$$

其中: $a, b_i, c_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为需要求解的待定系数。因为响应面法求得的极限状态曲面是近似的,因此需要进行多次迭代求解,具体操作步骤如下。

首先,采用二水平因子法和中心复合法等方法确定 $a, b_i, c_i (i=1, 2, \dots, n)$ 共 $2n+1$ 个待定系数。一般而言,采用二水平因子法,即以设计变量的均值为中心,方差的倍为变化范围,在范围内选取设计变量值。

其次,获取试验点后,采用相关分析程序求响应面函数,和试验点组合成 $2n+1$ 个样本点 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, z_i) (i=1, 2, \dots, 2n+1)$, 将样本点代入式(1),对此线性方程组展开求解,可解出响应面函数中所需的待定系数。

最后,根据式(1)的显示表达式,进行蒙特卡罗法的数值模拟计算,得出结构的失效概率。

综上所述,采用 ANSYS 进行响应面分析大体由两步组成:

1) 进行多次模拟循环,由输入变量空间中抽样点计算出相应的输出结果变量值;

2) 采取回归分析方式确定响应面方程的组成系数。获得响应面方程系数后,就可以直接利用这个近似的响应面方程代替真实有限元模型进行分析,从而节省了计算机的分析时间。

根据以上步骤,采用 ANSYS-PDS 模块中进行响应面的概率分析,具体步骤如图 1 所示。

2 扣件式脚手架模型

建立某典型模板支架模型,采用概率方法对各参数进行灵敏度分析。

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

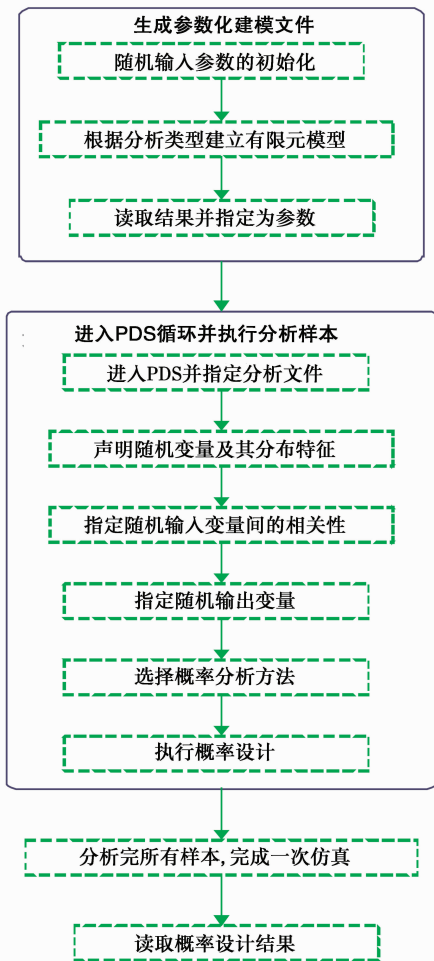


图 1 ANSYS-PDS 概率设计流程图

整体计算模型如图 2 所示：

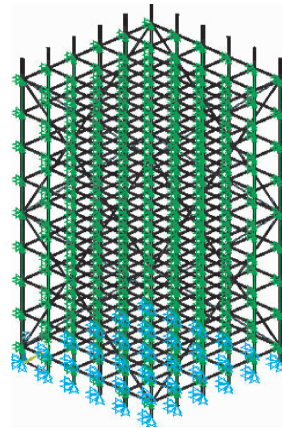


图 2 三维模型图

2.2 有限元参数化建模

架体的极限承载力 P_{cr} 为随机输出变量。分别讨论 11 个参数对架体极限承载能力的影响,即设置 11 个随机输入变量。

1)材料性能:钢材的弹性模量、材料密度、泊松比、钢管壁厚、外半径;

2)搭设参数:剪刀撑截面面积、扫地杆高度、立杆步距、纵距、横距、顶部伸出长度。

以上 11 个参数的分布都设为正态分布,其取值如表 1 所示。

表 1 基本随机输入变量统计参数

| 参数项 | 均值 | 变异系数 |
|-------------------------|---------|------|
| 剪刀撑截面面积/cm ² | 4.89 | 0.1 |
| 扫地杆高度/m | 0.4 | 0.01 |
| 壁厚/mm | 3 | 0.1 |
| 泊松比 | 0.3 | 0.03 |
| 钢管密度/kg/m ³ | 7 850 | 0.01 |
| 步距/m | 0.9 | 0.01 |
| 纵距/m | 0.6 | 0.01 |
| 横距/m | 0.6 | 0.01 |
| 顶部伸出长度/m | 0.55 | 0.01 |
| 弹性模量/N/mm ² | 206 000 | 0.03 |
| 外半径/mm | 24 | 0.01 |

几何尺寸如下:5 跨×5 跨×8 步,纵距和横距均采用 0.60 m,步距 0.90 m,扫地杆高度为 0.40 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 2.06×10^5 N/mm²,密度为 7.85×10^{-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。

3 计算结果及分析

3.1 计算过程和结果

调用 ANSYS-PDS 概率分析模块进行基于响应面法的概率设计分析,其响应面方程为一个二次多

项式函数(包括了二次交叉项)。

取样试算次数为 151 次(样本值见图 3),采用“向前逐步回归”的过滤技术以过滤很多不相关的或者独立的项次,从而提高响应面方程中系数的精确度更高。

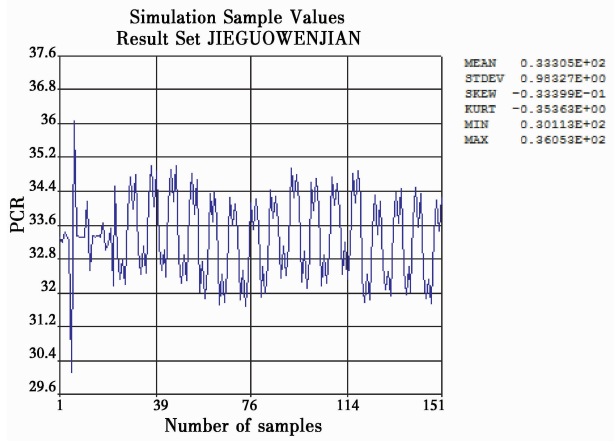


图 3 极限承载力 P_{cr} 样本值

确定响应面方程后,进行 1 000 000 次蒙特卡罗数值模拟,得到的支架极限承载能力值如图 4 所示。

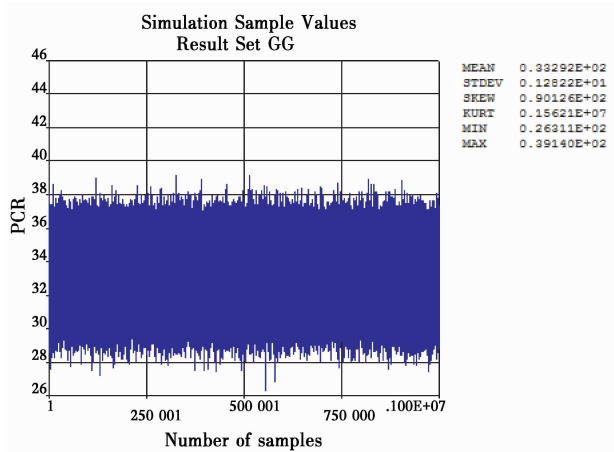


图 4 极限承载力 P_{cr} 的蒙特卡罗样本值

从图 4 可知,计算得到的架体极限承载力表现为一个随机分布的区域,该区域的上限值较单次计算得到的极限承载力值增加了 17.68%,下限值较单次计算得到的极限承载力值减少了 18.69%,考虑到各种材料缺陷和搭设参数偏差不可能同时达到最大或最小值,因此,由材料缺陷和搭设参数偏差引起架体极限承载力的波动幅度不会太大。

3.2 PDS 后处理

规定正的灵敏度相关系数表示输出变量极限承载力随输入变量增大而增加,负的灵敏度相关系数表示二者关系相反;正则化灵敏度 = 输入变量相关

系数的绝对值 ÷ 相关系数绝对值之和,则计算得到各随机变量的相关系数如表 2 所示,各随机变量对架体极限承载力值影响程度的大小如图 5 所示。

表 2 极限承载力对随机输入参数的灵敏度系数表

| 随机输入变量 | 灵敏度相 关系数 | 正则化灵 敏度/% |
|--------------------------|-------------|--------------|
| 壁厚(BH) | 0.884 | 52.81 |
| 外半径(WJ) | 0.343 | 20.49 |
| 步距(H) | -0.233 | 13.92 |
| 顶部伸出长度(T) | -0.095 | 5.68 |
| 弹性模量 (TANXINGMOLIANG) | 0.053 | 3.17 |
| 剪刀撑面积(AREA) | -0.034 | 2.03 |
| 扫地杆高度(B) | -0.018 | 1.08 |
| 横距(LA) | -0.007 | 0.42 |
| 纵距(LB) | -0.007 | 0.42 |
| 泊松比(BOSONGBI) | -0.003 | |
| 钢管密度 (GUANGGUANMIDU) | -0.001 | |

由表 2 以及图 5 可以知道,在影响扣件式模板支撑结构极限承载力值的各随机变量中,钢管壁厚(BH)、钢管外半径(WJ)、步距(H)对其影响很大,尤其是钢管壁厚的影响相当显著,在饼状图中占住了大部分,这与文献^[12]所给出的控制偏差密切相关,规范规定所采用钢管的壁厚为 3.6 mm,允许偏差为 ±0.36 mm,当钢管壁厚由 3.96 mm 降至 3.24 mm,其极限承载力从 36.66 kN 降低到 34.22 kN,其降低百分比达到 6.66%,可见钢管壁厚严重影响架体极限承载力值。

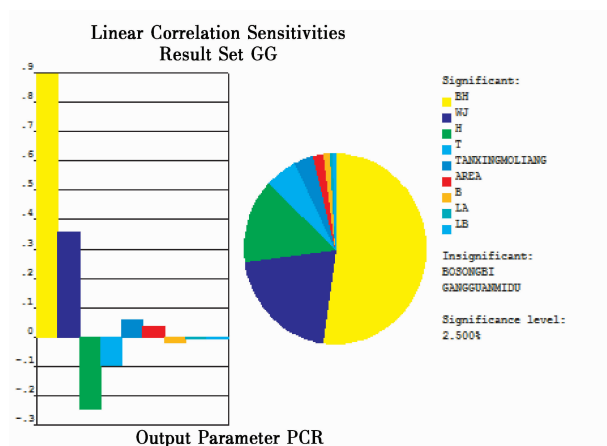


图 5 输入变量对极限承载力 P_{cr} 的灵敏度图

4 结 论

基于节点半刚性的有限元模型,讨论了材料缺陷和搭设参数偏差对扣件式模板支撑体系极限承载力的影响。采用随机有限元思想,在 ANSYS-PDS 模块上进行随机缺陷对架体极限承载力值的概率分析。分析结果表明,钢管壁厚、外半径、立杆步距等搭设参数偏差对模板支架的极限承载力影响很大。钢管壁厚的灵敏度为 52%,外半径的灵敏度为 20%,步距的灵敏度为 13%,顶部伸出长度的灵敏度为 5%,弹性模量的灵敏度为 3%,剪刀撑面积灵敏度为 2%,扫地杆高度为 1%。而钢材的泊松比、钢管密度等对其影响不是很明显。

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,2010,40(2):1-6.
- [2] 袁欣平.扣件式钢管脚手架纵向水平杆架设水平度偏差值的实测数据分析[J].青岛理工大学学报,1991,(1):14-17.
- [3] 袁欣平,陈肇彪.扣件式钢管脚手架立杆架设垂直度允许偏差值的确定[J].青岛建筑工程学院学报,1990,11(2):5-10.
- [4] 梁仁钟.高大模板支架的可靠性分析及安全性评价[D].北京:北京交通大学,2010.
- [5] 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.
- [6] 程佳佳.高大模板支撑体系可靠度分析与研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [7] 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.
- [8] Vojdani N. Distributed manufacturing control using fuzzy contract net [C] // Proceeding of IEEE International Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, 1996:1655-1659.
- [9] Wong F S. Uncertainties in dynamic soil-structure interaction [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014,110(2):308-324.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 中华人民共和国国家标准.建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

(编辑 吕建斌)