

基于随机有限元的模板支撑体系井字架结构可靠性研究

陆征然¹, 郭超^{*2}, 张茂胜¹, 李帼昌²

(1. 沈阳建筑大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 扣件是模板支撑体系核心构件,其工作特性对体系承载性能具有显著影响.基于蒙特卡罗法基本原理,利用 Python 脚本驱动 ABAQUS 进行模板支撑体系非侵入式随机有限元分析,得出在井字架结构的任意位置上,随机出现不同数量的扣件失效对体系承载力可靠性的影响.结果表明,扣件失效概率增大将导致其屈曲承载力下降的幅度及概率显著增加.当扣件失效概率为 0.183 时,井字架结构的屈曲荷载比例系数超过 0.8 的概率为 90%.当扣件失效概率达到 0.199 时,其屈曲荷载比例系数超过 0.8 的概率仅为 50%.上述成果进一步说明基于所有扣件完好条件下的模板支撑体系确定性分析不符合实际,且偏于不安全.此外,当扣件失效数量服从二项分布时,模板支撑体系井字架结构的屈曲荷载比例系数 λ 服从正态分布.

关键词: 随机有限元;可靠性;蒙特卡罗;模板支撑体系;扣件失效

中图分类号: TU731.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201801012

0 引言

扣件式钢管模板支撑体系是一种最常用的模板支撑体系,如何分析此类结构体系在工程实际中的可靠度,直接关系到施工质量及安全^[1-5].

模板支撑体系的节点直角扣件是连接水平杆与立杆的重要构件,扣件的拧紧力矩和扣件质量是保证结构稳定的重要因素.大量的现场调查及检测数据表明,扣件质量低下及扣件拧紧力矩达不到要求的现象非常普遍^[6-8].此外,随着模板支撑体系构配件周转使用次数的增多,扣件承载能力下降.并且,在整个建筑结构施工期间,模板支撑体系受到的上部施工荷载形式较为复杂,在较长的使用期间内,将出现部分扣件松脱、滑移、断裂或者螺栓变形、拉断等情况,以上因素均将导致扣件发生失效的概率增大^[9-11].2011年汕尾市区在建工商银行汕尾市分行综合楼工地发生建筑施工坍塌事故,造成 6 死 7 伤,直接经济损失约 1 000 万元,被当地称为汕尾建市以来最大的安全生产事故.分析事故原因,除了结构体系搭设不符

合要求外,由于部分钢管脚手架扣件的拧紧力矩、扭转刚度达不到规范的要求,导致了在施工过程中梁底支撑扣件脱落破坏,从而引发整体脚手架体系的坍塌.

伴随着可靠度理论的发展,近些年来,国内外学者对施工期混凝土结构的可靠度进行了较为广泛和深入的研究.但对于模板支撑体系这种临时结构的可靠性研究较少.主要研究成果如下:徐伟等^[12]对上海环球金融中心工程整体钢平台模板体系进行了动力可靠性分析,提出了多自由度体系动力可靠度的简化计算公式,并得到了整体钢平台模板体系动力可靠度的区间估计.刘飞等^[13]提出了脚手架荷载和抗力的概率模型,结合工程实例对脚手架进行了可靠度计算,并研究了脚手架搭设过程中的人为错误发生及其影响规律.徐军平^[14]通过对模板支架的有限元分析,明确了体系可靠性分析采用半刚接的计算模式更能符合施工实际与工程需要,并进行了模板支架结构体系可靠度分析和敏感度分析.孙作功^[15]基于工程实

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308255,51678375);中国博士后科学基金资助项目(2016M601337,2016M601341);辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划资助项目(LJQ2014059);辽宁省自然科学基金资助项目(20170540741).

作者简介: 陆征然(1982-),女,博士,副教授,E-mail: luzhengranglovel@126.com;郭超*(1980-),男,博士,副教授,E-mail: guochaoglovel@126.com.

例,分别对扣件式满堂脚手架、落地式钢管脚手架和附着式升降脚手架建立二维或三维模型,给出计算假定,运用 SAP2000 分析计算了结构杆件最不利内力,确定结构的主要失效模式,建立各失效模式的功能函数,计算结构主要失效模式的可靠指标.鲁征^[16]采用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)数值模拟及插值法相结合的方法,建立了扣件式模板支架稳定系数的分布概率模型,并进行了相应的可靠度分析. Gross 等^[17]认为施工阶段是结构最关键的时期,并分析了模板支撑架设计中需考虑的各种施工荷载,提出应该采用极限状态方法进行模板支撑架设计. Zhang 等^[18-20]通过对碗扣式模板支撑体系进行实地调研与相关试验得到了相应的统计参数,将初始几何缺陷、荷载偏心、节点刚度等因素加以考虑并应用于有限元模型中,采用蒙特卡罗模拟法得到了体系抗力的统计参数;此外还应用一次二阶矩法讨论了模板支撑体系的荷载对可靠指标的影响. Reynolds^[21]研究了碗扣式模板支撑体系,对荷载、U 形托进行了调研试验并建立了有限元模型,采用蒙特卡罗模拟法得到了支撑体系抗力的统计参数,结合荷载抗力系数设计法(LRFD),提出了基于设计目标可靠指标的分项系数设计方法.上述研究表明:由于施工期荷载形式复杂、多样且随机性较强,越来越多的学者注重对施工期模板支撑体系工作状态、荷载作用效应及可靠性进行研究.然而,以上学者对于施工期模板支撑体系的可靠性研究,均基于模板支撑体系各节点完好、体系结构确定条件下的分析,没有对当出现部分扣件松脱、滑移、断裂或者螺栓变形、拉断,进而导致模板支撑体系中任意位置上随机出现不同数量的直角扣件失效情况下的结构体系可靠性进行深入的研究.

本文基于蒙特卡罗法的基本理论,结合非侵入式随机有限元技术,以组成模板支撑体系的“最基本单元”井字架结构为研究对象,考察由具有不同失效概率的直角扣件组建的井字架结构,当在其任意位置上随机出现不同数量扣件失效条件下的结构可靠性,为后续施工期模板支撑体系在考虑扣件失效条件下的可靠性分析奠定基础.

1 模板支撑体系井字架结构随机有限元分析流程

如图 1 所示,选择典型模板支撑体系中的井

字架结构作为模型.其搭设参数如下:立杆步距,立杆纵、横向间距均为 1.5 m,扫地杆高度为 0.2 m,立杆伸出顶层水平杆的高度为 0.3 m.

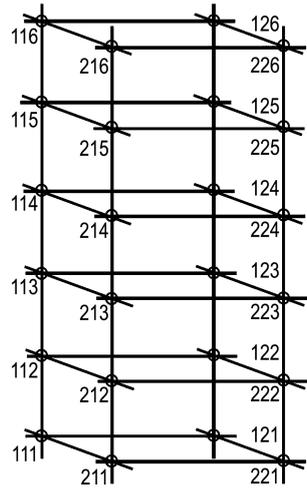


图 1 模板支撑体系井字架结构模型

Fig. 1 Derrick frame model of formwork support system

非侵入式随机有限元分析的基本思想是基于 MC 原理,将确定性有限元分析与随机分析过程分离.其中,确定性有限元分析通常采用通用有限元软件实现.具体分析步骤如下:

步骤 1 随机变量概率配点.利用统计回归分析确定井字架结构模型中扣件失效数量的统计特征值.在此基础上,得出能够与上述统计特征值概率同分布的伪随机数作为随机变量的概率配点,并且,将概率配点映射到井字架结构模型中随机变量空间,确定井字架结构随机有限元模型(SFEM)的输入参数.

步骤 2 建立初始确定性 FEM.在上述随机变量概率配点的基础上,在输入随机变量样本空间的数学期望值处,利用 ABAQUS 构建包括材料非线性、几何非线性、边界条件非线性的 FEM,并生成供 Python 脚本驱动程序调用的模型文件.

步骤 3 利用 Python 脚本驱动主程序,将随机变量概率配点作为输入参数导入到 FEM 文件中,并驱动 ABAQUS 进行随机有限元分析.

步骤 4 利用 Python 脚本驱动主程序输出上述随机有限元分析结果,并通过比较分析确定控制性输出随机变量,得出井字架结构模型在不同数量的扣件发生失效条件下,相应的非线性屈服承载力,以其作为计算模板支撑体系可靠性指标的控制性随机变量.

步骤 5 利用 MATLAB 统计工具箱,对上述控制性随机变量进行统计分析,得出控制性随机变量的概率分布模型,并计算可靠度指标,作为模板支撑体系的可靠度指标。

利用统计分析回归输出控制性随机变量的概率分布函数,从而得到计算模型的统计特征值与目标可靠度.非侵入式随机有限元法突出的优点在于:无须修改有限元源代码,将常规商业有限元软件视为黑箱子而直接调用,从而实现了概率分析及设计与商业有限元软件的有机结合,基于非侵入式随机有限元的模板支撑体系非线性屈曲可靠度分析流程如图 2 所示。

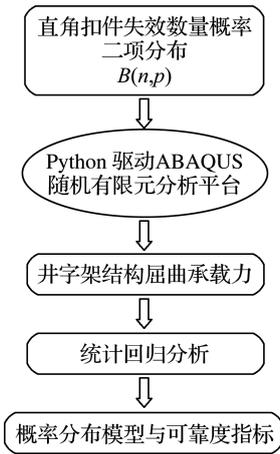


图 2 模板支撑体系井字架结构随机有限元分析流程

Fig. 2 SFE analysis process of derrick frame in formwork support system

2 构配件材料性能试验

为了获得井字架结构模型中钢管的力学性能参数,首先对钢管进行了材料性能试验.试验中所用的钢管及扣件均取自施工现场,并随机抽取 3 根钢管加工成弧形试件,进行材料性能试验,得到的测试数据如表 1 所示。

表 1 钢管的材料性能

Tab. 1 Material behavior of the steel tubes

编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/ MPa	断后伸长率/ %	面积收缩率/ %	断后标距/ mm
1	455.45	403.40	1.75×10^5	10.00	44.14	55.00
2	418.95	350.45	1.76×10^5	13.76	39.27	56.88
3	436.35	370.90	2.02×10^5	14.92	42.01	57.46
均值	436.92	374.92	1.84×10^5	12.89	41.81	56.45

3 模板支撑体系井字架结构随机有限元分析

3.1 直角扣件失效数量的概率分布

将模板支撑体系井字架结构中直角扣件的数量作为离散型随机变量,并按照图 1 所示的方法将每个扣件进行编号.同时,假定直角扣件失效数量的概率服从 $B(n, p)$ 的二项分布,其相应的概率分布函数 $P(x)$ 为

$$P(x) = C_n^x p^x (1-p)^{n-x} \quad (1)$$

$$C_n^x = \frac{n!}{x! (n-x)!} \quad (2)$$

其中 p 为直角扣件的失效概率,且随着模板支撑体系构配件周转次数的增多而增大, n 为在一批扣件中进行抽检的样本数量。

3.2 模板支撑体系井字架结构有限元模型参数

采用有限元软件 ABAQUS 建立模板支撑体系井字架结构的三维模型.在截面设置中,钢管的外径取 48 mm,壁厚取 3.5 mm.采用理想化弹塑性模型模拟钢管材料的本构模型,相应的材料性能参数按照表 1 取值.对于直角扣件的半刚性性质,采用弹簧单元 Spring2 模拟.当扣件完好时,认为其螺栓的拧紧力矩符合规范要求,对其转动刚度的设置可参考文献[22]中对于直角扣件转动刚度特性的研究成果,将弹簧刚度取为 $19 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$.直角扣件连接处,其余方向上的平动自由度均采用耦合约束;在随机有限元分析过程中,当随机选取的扣件发生失效时,将其弹簧刚度设为 0,其余方向上的平动约束也相应地设为 0,即假定直角扣件的失效将导致原本由此扣件连接各杆件间失去了所有的约束.立杆最底端采用固定约束。

3.3 随机有限元分析结果

首先,在所有扣件保持完好的状态下,对井字架结构进行了考虑初始缺陷及材料非线性屈曲分析,得到其单根立杆的屈曲承载力为 $10\,432 \text{ N}$ 。

在此基础上,考虑具有不同的扣件失效概率,分别对井字架结构进行扣件失效数量为 1~5 个条件下的 1 000 次非线性屈曲随机有限元分析(即在式(1)中,对应 p 的数值分别取为 0.183, 0.199, 0.215, 0.225, 0.226),得到了每种条件下屈曲承载力(N_{cr})的频率直方图如图 3 所示。

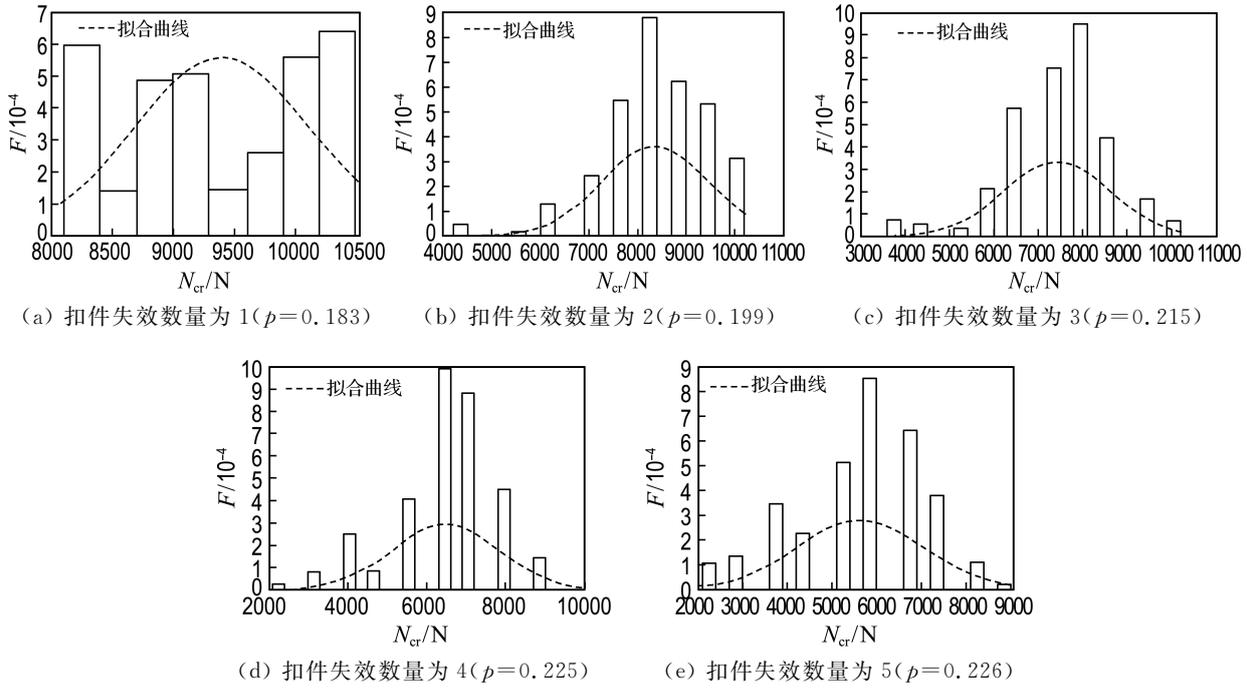


图 3 不同扣件失效数量下井字架结构屈曲承载力频率直方图

Fig. 3 Frequency histogram of derrick frame buckling capacity under different fastener failure numbers

以所有扣件保持完好条件下的屈曲承载力为基础,将不同扣件失效数量条件下的井字架结构屈曲承载力进行单位化,得到屈曲荷载比例系数 λ ,并绘制相应的 λ 频率直方图,如图 4 所示。

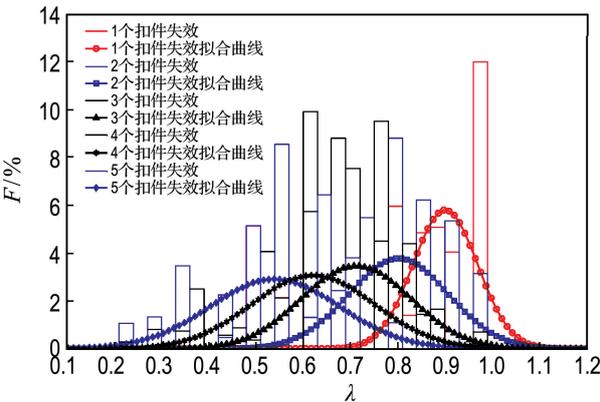


图 4 不同扣件失效数量下井字架结构屈曲荷载比例系数频率直方图

Fig. 4 Frequency histogram of derrick frame buckling load scaling coefficient under different fastener failure numbers

从图 4 中可以看出,在不同扣件失效数量条件下,井字架结构的屈曲承载力均服从正态分布,其概率密度函数 $f(x)$ 为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

相应的数学期望和方差如下:

$$E(x) = \mu \quad (4)$$

$$Var(x) = \sigma^2 \quad (5)$$

5 种条件下井字架结构屈曲承载力正态分布函数相应的参数如表 2 所示。

表 2 屈曲承载力正态分布函数参数

Tab. 2 Parameters of buckling capacity with normal distribution function

失效扣件数量	μ (数学期望)	σ (标准差)	σ^2 (方差)
1	0.900 905	0.068 696	0.004 719 15
2	0.802 083	0.105 490	0.011 128 10
3	0.712 530	0.114 901	0.013 202 20
4	0.621 119	0.129 809	0.016 850 40
5	0.540 070	0.136 955	0.018 756 70

此外,得到的不同扣件失效数量下的井字架结构屈曲破坏模式分别如图 5(a)~(f) 所示。

各种不同条件下的井字架结构屈曲荷载比例系数的累积概率密度函数如图 6 所示,相应的可靠度指标如图 7 所示。

从图 6、7 中可以看出,随着扣件失效概率的

增加,井字架结构的屈曲承载力与假定全部扣件完好条件下计算所得承载力相比,其降低的程度及概率逐步增大.若要保证屈曲荷载比例系数大于0.8的概率超过90%,则应当保证在井字架结构中扣件的失效数量不超过1个,即其扣件的失效概率应小于0.183.若要保证屈曲荷载比例系

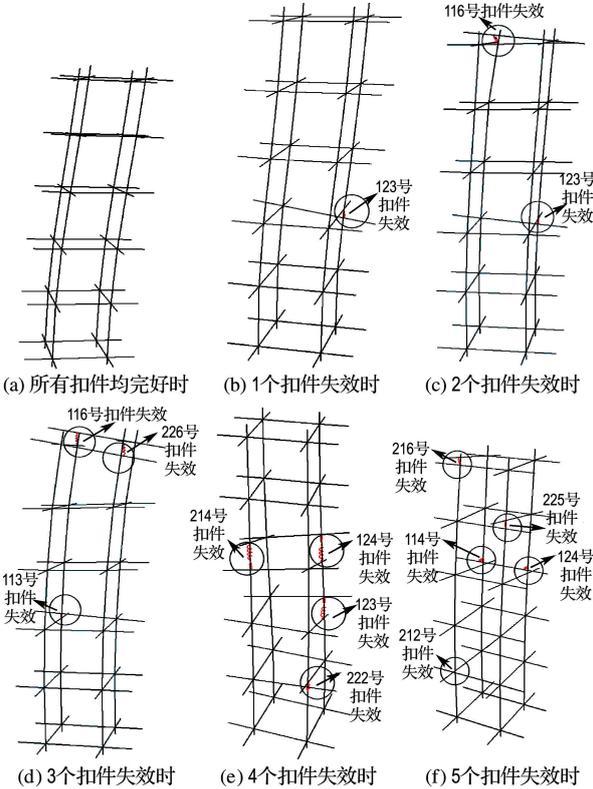


图5 不同扣件失效数量下井字架结构屈曲破坏模式

Fig. 5 Buckling failure modes of derrick frame with different fastener failure numbers

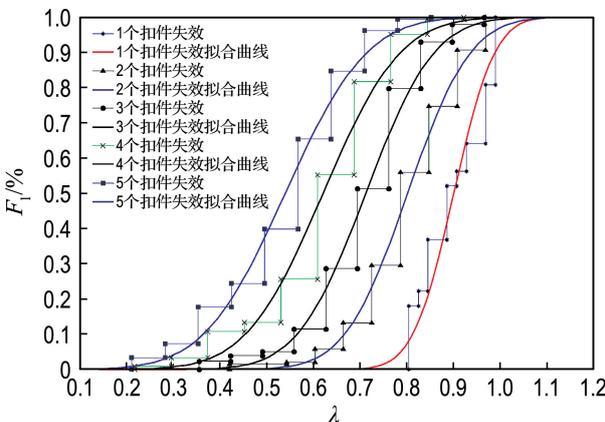


图6 屈曲荷载比例系数累积概率密度

Fig. 6 Cumulative probability density of buckling load scaling coefficient

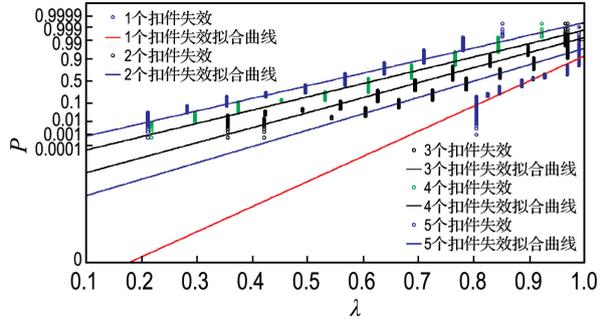


图7 屈曲荷载比例系数可靠度

Fig. 7 Reliability of buckling load scaling coefficient

数大于0.6的概率超过90%,则至少应当保证在井字架结构中扣件的失效数量不超过2个,即其扣件的失效概率应小于0.199.而当扣件的失效概率达到0.199时,井字架结构的屈曲荷载比例系数超过0.8的概率仅为50%.

4 结论

(1)模板支撑体系中,直角扣件的失效概率对其承载性能影响显著.基于所有扣件均保持完好状态下的体系结构确定性分析,与工程实际情况不符,偏于不安全.并且,当实际工程中多种不利因素导致扣件完好率降低(即其失效概率增加)时,结构承载力显著下降的概率较大.

(2)在假定扣件的失效数量服从不同参数下的二项分布时,模板支撑体系井字架结构的屈曲承载力均服从正态分布.

(3)通过对不同条件下的井字架结构屈曲荷载比例系数进行统计回归分析可以看出:与所有扣件保持完好条件下的结构相比,当直角扣件失效概率为0.183时,其屈曲荷载比例系数超过0.8的概率为90%;而当直角扣件失效概率为0.199时,其屈曲荷载比例系数超过0.8的概率仅为50%.

参考文献:

[1] 贾莉,刘红波,陈志华,等.扣件式钢管满堂脚手架整体稳定试验与有限元分析[J].建筑结构学报,2017,38(6):114-122.
 JIA Li, LIU Hongbo, CHEN Zhihua, et al. Experimental research and FEA on bearing capacity of full hall steel tube and coupler scaffold support system [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6):114-122. (in Chinese)

- [2] LIU Hongbo, ZHAO Qihong, WANG Xiaodun, *et al.* Experimental and analytical studies on the stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing [J]. **Engineering Structures**, 2010, **32**(4):1003-1015.
- [3] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, *et al.* Theoretical analysis and experimental research on stability behavior of structural steel tube and coupler falsework with X-bracing [J]. **Advanced Steel Construction**, 2010, **6**(4):949-962.
- [4] 庄金平,蔡雪峰,林曾忠,等. 超高跨模板支撑体系现场实测及承载力公式修正方法探讨[J]. 工业建筑, 2011, **41**(9):94-99.
ZHUANG Jinping, CAI Xuefeng, LIN Zengzhong, *et al.* Site measurement and discussion on modifying method of bearing capacity formula of super high or large-span form strut system [J]. **Industrial Construction**, 2011, **41**(9):94-99. (in Chinese)
- [5] 郑莲琼,蔡雪峰,庄金平,等. 高大模板扣件式钢管支撑体系现场实测与分析[J]. 工业建筑, 2013, **43**(7):96-100.
ZHENG Lianqiong, CAI Xuefeng, ZHUANG Jinping, *et al.* On-site measurement and analysis of super high or large-span formwork support with fastener steel tube [J]. **Industrial Construction**, 2013, **43**(7):96-100. (in Chinese)
- [6] 林璋璋,张奕,杨俊杰. 多层模板支撑体系受力实测及有限元分析[J]. 工业建筑, 2013, **43**(2):94-98.
LIN Zhangzhang, ZHANG Yi, YANG Junjie. Analysis of multi-story formwork supporting system by detection and FEM [J]. **Industrial Construction**, 2013, **43**(2):94-98. (in Chinese)
- [7] 谢楠,梁仁钟,王晶晶. 高大模板支架中人为过失发生规律及其对结构安全性的影响[J]. 工程力学, 2012, **29**(S1):63-67.
XIE Nan, LIANG Renzhong, WANG Jingjing. Occurrence of human errors in high falsework and influence on structural safety [J]. **Engineering Mechanics**, 2012, **29**(S1):63-67. (in Chinese)
- [8] 谢楠. 高大模板支撑体系的安全控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
XIE Nan. **Safety Control of High Formwork Support System** [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [9] 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.
- HU Changming. Studies on experiment and theory of steel construction connected with fasteners [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 陆征然,郭超,温永钦,等. 偏心荷载作用下扣件式钢管满堂支体系承载性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, **56**(1):20-27.
LU Zhengran, GUO Chao, WEN Yongqin, *et al.* Study of bearing capacity of fastener steel tubular full hall formwork support system under eccentric load [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2016, **56**(1):20-27. (in Chinese)
- [11] 谢楠,付小辉,王立峰,等. 扣件式高大模板支架的概率极限状态设计法研究[J]. 工程力学, 2016, **33**(10):68-75,104.
XIE Nan, FU Xiaohui, WANG Lifeng, *et al.* Design method of load and resistance factor for high falsework with couplers [J]. **Engineering Mechanics**, 2016, **33**(10):68-75,104. (in Chinese)
- [12] 徐伟,孙旻,骆艳斌,等. 上海环球金融中心整体钢平台模板体系动力可靠性分析[J]. 建筑技术, 2008, **39**(5):336-338.
XU Wei, SUN Min, LUO Yanbin, *et al.* Analysis on dynamic reliability of integral steel platform formwork system in Shanghai global finance center project [J]. **Architecture Technology**, 2008, **39**(5):336-338. (in Chinese)
- [13] 刘飞,邹翔. 扣件式钢管脚手架结构的可靠度分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, **31**(5):25-28.
LIU Fei, ZOU Xiang. Reliability analysis on steel tubular scaffold with couplers [J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 2010, **31**(5):25-28. (in Chinese)
- [14] 徐军平. 基于使用功能的模板支架可靠度分析[D]. 上海:同济大学, 2003.
XU Junping. Reliability analysis of steel tubular support based on the use function [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [15] 孙作功. 扣件式钢管脚手架应用及可靠度分析[D]. 上海:同济大学, 2003.
SUN Zuogong. Application & reliability analysis of steel tubular scaffold with couplers [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [16] 鲁征. 扣件式脚手架及模板支架施工期安全性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

- LU Zheng. Safety analysis for fasten-style tubular steel scaffold and bearing framework in the building construction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [17] GROSS J L, LEW H S. Analysis of shoring loads and slab capacity for multistory concrete construction [J]. **Journal of the American Concrete Institute**, 1986, **83**(3):533.
- [18] ZHANG Hao, CHANDRANGSU T, RASMUSSEN K J R. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems [J]. **Structural Safety**, 2010, **32**(6):393-401.
- [19] ZHANG Hao, RASMUSSEN K J R, ELLINGWOOD B R. Reliability assessment of steel scaffold shoring structures for concrete formwork [J]. **Engineering Structures**, 2012, **36**:81-89.
- [20] ZHANG Hao, RASMUSSEN K J R. System-based design for steel scaffold structures using advanced analysis [J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2013, **89**:1-8.
- [21] REYNOLDS J. Advanced analysis and reliability-based design of steel scaffolding systems [D]. Sydney: University of Sydney, 2014.
- [22] 陈志华, 陆征然, 王小盾. 钢管脚手架直角扣件刚度的数值模拟分析及试验研究[J]. **土木工程学报**, 2010, **43**(9):100-108.
- CHEN Zhihua, LU Zhengran, WANG Xiaodun. Numerical analysis and experimental study of the stiffness of right angle couplers in tubular steel scaffolds [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, **43**(9):100-108. (in Chinese)

Reliability study of derrick frame in formwork support system based on stochastic finite elements

LU Zhengran¹, GUO Chao^{*2}, ZHANG Maosheng¹, LI Guochang²

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The fastener is the core component of the formwork support system and its working characteristic has a significant influence on the bearing capacity of the system. The non-intrusive stochastic finite elements analysis of formwork support system is conducted through Python script process driving the ABAQUS main progress based on the Monte Carlo theories. The influence of random occurrence of fastener failure with different number at any position on the reliability of system is obtained. The analysis results show that the increase of the failure probability of the fastener will lead to a significant increase in the magnitude and probability of the decrease of the buckling capacity. When the failure probability of the fastener is 0.183, the probability of the buckling load scaling coefficient of the derrick frame reaching more than 0.8 is 90%, and that probability will reduce to 50% if the failure probability of the fastener is 0.199. The above results also illustrate that the deterministic analysis of formwork support system based on the integrity of all fasteners is not practical and unsafe. When the distribution of the fastener failure number obeys binomial distribution, the buckling load scaling coefficient λ of the derrick frame in formwork support system will obey normal distribution.

Key words: stochastic finite elements; reliability; Monte Carlo; formwork support system; fastener failure