

构配件缺陷对混凝土浇筑期模板支撑体系 受力性能影响

陆征然¹,李健均¹,林冰²,郭超¹,张姝³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国建筑股份有限公司技术中心,北京 100037;
3. 沈阳城市建设学院土木工程学院,辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 研究混凝土浇筑期内构配件性能缺陷对模板支撑体系受力性能的影响。方法 模拟搭建一个扣件式模板支撑体系,利用 Python 脚本驱动 ABAQUS 进行随机有限元分析。考虑构配件性能缺陷条件与空间位置分布,分析不同混凝土浇筑路径下的模板支撑体系体系受力性能。结果 在加载过程中有性能缺陷的构配件自身承载能力降低,导致周围立杆轴力突增;立杆所受最大轴力值受混凝土浇筑路径的影响较小。结论 构配件有性能缺陷会造成部分立杆的实际受力值大于现行规范的要求值,在模板支撑体系的设计和计算中,应当将构配件性能缺陷的不利影响加以充分考虑。

关键词 模板支撑体系;混凝土浇筑期;构配件性能缺陷;扣件转动刚度;随机有限元分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Influence of Defects in Components on Mechanical Performance Analysis of Formwork Support System During Concrete Placement

LU Zhengran¹, LI Jianjun¹, LIN Bing², GUO Chao¹, ZHANG Shu³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China State Construction Technical Center, Beijing, China, 100037; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction Institute, Shenyang, China, 110167)

Abstract: The effect of component components defects on the mechanical performance of a formwork support system during concrete placement is studied. A fastener-type formwork support system was simulated, and ABAQUS was driven by Python programs for random finite element analysis. The mechanical properties of a formwork support system under different concrete placement paths were analyzed with performance defect conditions and component spatial location distribution. In formwork support system, the bearing capacity of the components with performance

收稿日期:2022-04-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52008269);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1907121);辽宁省自然科学基金项目(2022-KF-13-02)

作者简介:陆征然(1982—),女,教授,博士,主要从事组合结构及工程结构可靠度等方面研究。

defects decreases during load loading, and the axial force of the surrounding vertical posts increases abruptly. The maximum axial force of vertical posts is less affected by concrete placement path. Because of component performance defects, the actual force value of some vertical posts will be greater than the current code. The adverse effects of component performance defects should be fully considered in the design and calculation of the formwork support system.

Key words: formwork support system; period of concrete placement; defects of component performance; rotational stiffness of fasteners; stochastic finite element analysis

近年来,模板支撑体系的倒塌事故时有发生。有调查表明,绝大多数事故是由混凝土浇筑期模板支撑体系的失稳破坏而导致^[1-2]。谢楠等^[3]实地搭设了模板支撑体系并研究了混凝土浇筑期间杆件内力的变化规律。L. Liu 等^[4]利用有限元软件模拟了模板支撑体系在不同浇筑方式下产生的最大侧移,发现当混凝土对称浇筑时,模板支撑体系稳定性更好。模板支撑体系是一种临时结构,构配件由于反复循环使用,其截面几何特征、力学性能、约束功能等均会有明显下降^[5]。H. Zhang^[6-7]、贾莉等^[8]研究发现构配件经长时间使用后大多存在钢管管径减小、管壁变薄、材料弹性模量改变以及扣件转动刚度降低等现象,降低了模板支撑体系的可靠度,其中钢管壁厚和转动刚度对模板支撑体系承载性能影响最大。

综合以上研究,笔者利用 ABAQUS 软件,构建一个扣件式模板支撑体系的有限元模型,利用 Python 编写本程序进行随机有限元分析,考察不同混凝土浇筑路径下,模板支撑体系内部各立杆的受力状态。将计算结果分别与不考虑构配件性能缺陷条件下模板支撑体系中立杆轴力计算值以及利用规范计算得到的立杆轴力标准值进行对比,为模板支撑体系在实际工程中的设计和使用提供参考。

1 模板支撑体系搭建

为分析混凝土浇筑期模板支撑体系受力性能,参照文献[9]模拟搭建了一个扣件式模板支撑体系,通过吊装钢渣加载的方式模拟混凝土的浇筑过程,在此过程中,测试各立

杆轴力的变化。

试验中使用的主要构配件:钢管,外径 \times 壁厚为 $48\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$;用于连接钢管的扣件材料为可锻铸铁,且其转动刚度满足规范的要求,不小于 $35\text{ (kN}\cdot\text{m)/rad}$ ^[10]。模板支撑体系的搭设参数如下:立杆步距 1.2 m , 8 层;间距均为 0.9 m ;扫地杆高度为 0.2 m 。顶部模板为厚 12 mm 的多层板,主、次龙骨均为木质,截面宽 \times 高分别为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$, $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。主龙骨放置在立杆顶部的 U 型托上,次龙骨按照 300 mm 的间距铺设在主龙骨之上。支撑体系在竖向和水平向分别设置剪刀撑,如图 1 所示。立杆编号方式为 lgMN , M 和 N 分别代表立杆所在的排数及其在该排中的位置,如第 2 排序号为 1 的立杆记为 $\text{lg}21$ 。

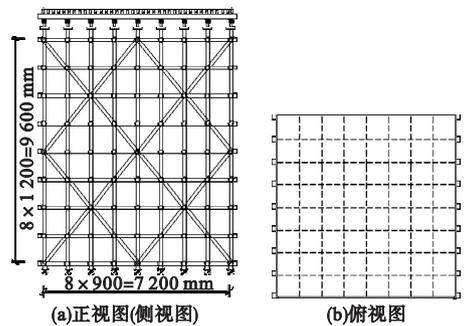


图 1 文献[9]中搭设的模板支撑体系示意图

Fig. 1 The formwork support system erected in the literature^[9]

2 有限元模型建立与验证

2.1 有限元模型建立

利用 ABAQUS 软件建立前述模板支撑体系的有限元模型,有限元模型的所有参数与原型试验一致。所有杆件以及次龙骨均采

用 beam 单元,模板、主龙骨以及底托均采用 shell 单元。连接杆件之间节点(即直角扣件)不是刚性连接或铰接,而是具有局限的刚性连接,是一种介于刚性连接和铰接之间的半刚性节点。采用弹簧单元 COMBIN14 模拟直角扣件的半刚性性质。钢材采用理想弹塑性本构模型,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。在边界条件设置上,立杆底部与地面铰接,将主龙骨与底托在 x, z 方向固定,使荷载可以从模板传递至下方杆件。立杆与底托间采用“tie”方式绑定,底托与主龙骨、次龙骨、模板间采用“接触”方式。模板支撑体系有限元模型如图 2 所示。

荷载的施加模式为分步加载,将模板覆盖区域分为 64 个面积相同的正方形。原型试验中采用 S 型路径混凝土浇筑方式(见图 3(a))进行加载,每一步将荷载施加到两个正方形上,共进行 32 步,1~32 代表荷载施

加的先后顺序,箭头为加载路径走向。笔者另设置两种混凝土浇筑路径,如图 3(b)、图 3(c)所示。

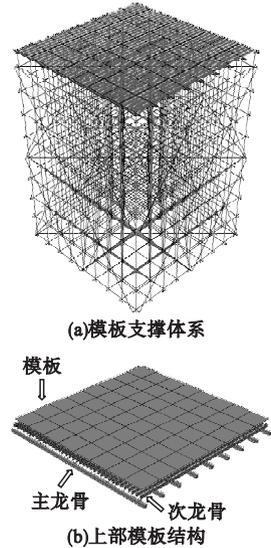


图 2 模板支撑体系有限元模型

Fig. 2 The finite element model of formwork support system

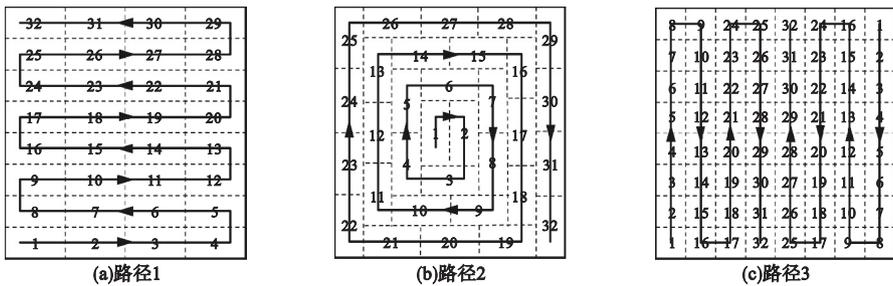


图 3 混凝土浇筑路径

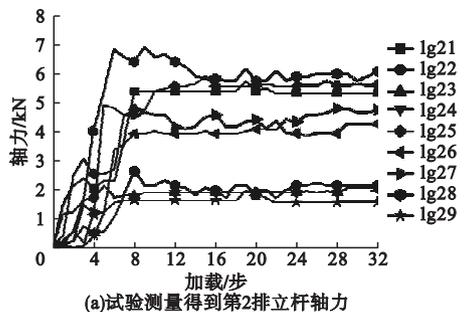
Fig. 3 The pouring path of concrete

2.2 有限元计算与试验测试结果对比

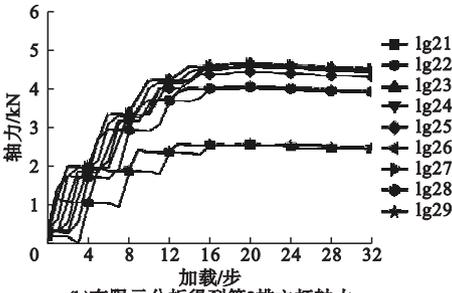
由于应变片金属丝断裂、个别主龙骨翘起等客观原因,文献[9]的试验测试中,没有给出全部杆件轴力数据。因此,笔者仅选取典型的立杆,在混凝土浇筑路径 1 中,将前述原型试验测得和通过有限元计算得到的杆件轴力进行对比,分别如图 4 和 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出,试验值和有限元计算结果均较好地反映了在混凝土浇筑过程中模板支撑体系中立杆的受力状态。有限元结果中,lg26 的轴力有两次明显突增,这是由于荷载加载时两次经过立杆上方且相间

隔时间较长,lg22~lg26 与 lg21 的轴力变化规律类似;lg27、lg28、lg29 在一次轴力突变后增加至最大值,原因在于两次荷载加载的时间间隔较小。在实测中,除 lg22 轴力有些



(a) 试验测量得到第 2 排立杆轴力

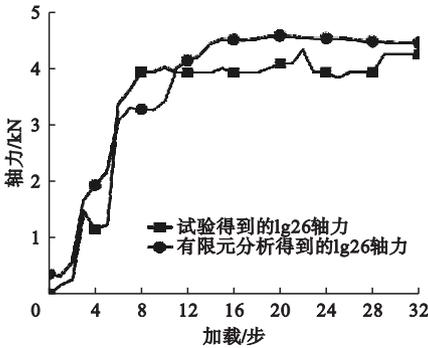


(b)有限元分析得到第2排立杆轴力

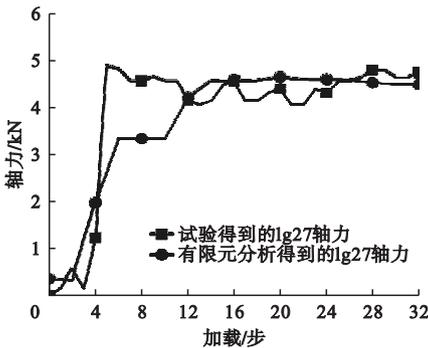
图4 试验与有限元分析得到立杆轴力

Fig. 4 The axial forces obtained from test and finite element analysis for posts

许波动外,lg21、lg23 ~ lg26 轴力变化趋势均出现两次轴力突增情况,lg27 ~ lg29 轴力在一次突然增大后变化较小。



(a)lg26所受轴力对比图



(b)lg27所受轴力对比图

图5 典型立杆轴力对比

Fig. 5 The comparison of typical axial forces for posts

在模板支撑体系中选出有代表性立杆,立杆的最大轴力误差值如表1所示。从图4、图5及表1可以看出,试验测试与有限元计算得到的立杆轴力变化趋势符合较好,大多数轴力误差在10%以内,可以证明,建立的有限元模型能够较为精确地获得混凝土浇

筑过程中模板支撑体系的受力状态。

表1 有代表性立杆最大轴力值的对比

Table 1 The comparison of the maximum axial force for typical posts

杆号	最大轴力/kN		误差/%
	试验值	有限元值	
lg18	3.57	3.37	5.60
lg48	4.85	4.91	1.20
lg67	5.36	5.51	2.80
lg79	2.70	2.92	8.10
lg87	4.10	4.53	10.50

3 有限元模拟分析

3.1 构配件性能参数确定

分别选取钢管壁厚与扣件转动刚度作为构配件在几何特征、约束功能方面的代表性参数^[6-7]。文献[11]对实际施工中大量周转使用的钢管与扣件进行测量,经统计分析得到钢管的壁厚服从正态分布,其均值和标准差分别为3.08 mm、0.22 mm。文献[12]通过对大量扣件进行测量和统计,得到扣件拧紧力矩的均值和标准差分别为37.15 N·m、15.23 N·m。文献[13]通过有限元计算得出当拧紧力矩为40 N·m,扣件转动刚度为19.867 4 (kN·m)/rad,说明实际施工中扣件的转动刚度大多难以达到现行规范的规定值。文献[14]在对模板支撑体系极限承载力的研究中,将扣件的转动刚度取值定为15.17 (kN·m)/rad,得到了较好的计算结果。为了更好地将随机有限元计算结果与前述试验结果进行对比,并充分参考规范^[10]与文献[14]的取值,选取钢管截面48 mm × 3.5 mm、扣件转动刚度25 (kN·m)/rad为构配件原始性能指标,值为100%。

按照分布均值及90%置信区间确定壁厚t的取值为3.500 mm(100%)、2.758 mm(78.8%)、2.328 mm(66.5%)。结合文献[13-14]使用的扣件转动刚度,确定扣件的转动刚度以20%的梯度折减:22.5 (kN·m)/rad(90%)、17.5 (kN·m)/rad(70%)、

12.5 (kN·m)/rad(50%)。由于缺乏对于具有缺陷性能的构配件数量(或占比)的调查数据,笔者按照立杆总数的60%与40%两个占比等级进行设定,考察不同缺陷立杆占比对承载性能的影响。将表1中构配件性能与立杆占比进行组合,共形成18种搭设工况,如表2所示。

表2 工况汇总

Table 2 The summary of working conditions

工况	占比60%		工况	占比40%	
	t/mm	F/(kN·m·rad ⁻¹)		t/mm	F/(kN·m·rad ⁻¹)
1	3.500	22.5	10	3.500	22.5
2	3.500	17.5	11	3.500	17.5
3	3.500	12.5	12	3.500	12.5
4	2.758	22.5	13	2.758	22.5
5	2.758	17.5	14	2.758	17.5
6	2.758	12.5	15	2.758	12.5
7	2.328	22.5	16	2.328	22.5
8	2.328	17.5	17	2.328	17.5
9	2.328	12.5	18	2.328	12.5

3.2 随机有限元抽样规则制定

为了有效地模拟实际搭设中具有不同程度性能缺陷的构配件在空间位置分布上的随机性,笔者基于 Python 语言编写脚本程序,驱动 ABAQUS 有限元软件,在不同立杆占比条件下,在不同壁厚、扣件转动刚度两个性能指标缺陷耦合情况下,对模板支撑体系进行随机有限元分析,每种工况循环 1 000 次,计算相应工况下的体系承载力(见图6)。

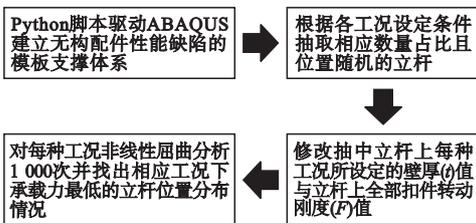


图6 随机有限元分析流程

Fig. 6 The flowchart of stochastic finite element analysis

3.3 有限元计算结果

将表2中给出的18种工况在考虑有性能缺陷构配件位置随机分布的情况下,进行有限元分析,得到各工况下的模板支撑体系承载力。部分结果如表3所示。

表3 部分工况下体系承载力计算结果分布统计

Table 3 The statistics results of the bearing capacity in some working condition

工况	轴力均值/N	标准差	工况	轴力均值/N	标准差
1	25 493.94	3.90	10	25 808.98	4.66
5	21 611.42	24.63	14	22 953.42	38.79
6	18 977.81	46.99	15	20 994.40	73.88
9	18 191.08	59.62	18	20 150.92	104.98

对比表3中第9、18组工况可以看出,第18组工况承载力分布的标准差更大,数据较为分散,说明有性能缺陷的立杆数量越少,有性能缺陷的构配件空间位置分布对模板支撑体系的承载力影响越大。将1、5、6组工况与10、14、15组工况数据一一对比,也可得到相同结论。

为了更好地体现构配件性能缺陷对模板支撑体系受力性能的影响,选取承载力均值最低的搭设工况9,对该工况进行1 000次循环计算,找到稳定承载力最低的一组,即可获得第9组搭设工况下、具有缺陷的构配件在空间上的最不利位置分布,如图7所示。

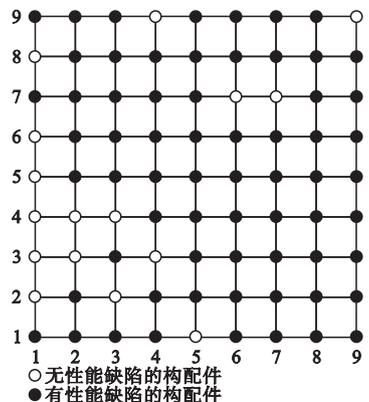


图7 第9组工况下的构配件不利空间位置分布

Fig. 7 The unfavorable spatial location distribution of components under No. 9 working condition

3.4 有构配件性能缺陷的立杆最大轴力

按照图7所示构配件空间位置分布以及图3中的混凝土浇筑路径1,对第9组搭设工况下的模板支撑体系的受力性能进行有限元分析,得到了典型立杆轴力随加载步长变化的规律(见图8)。图9为有、无构配件性能缺陷下模板支撑体系立杆轴力的对比结果。

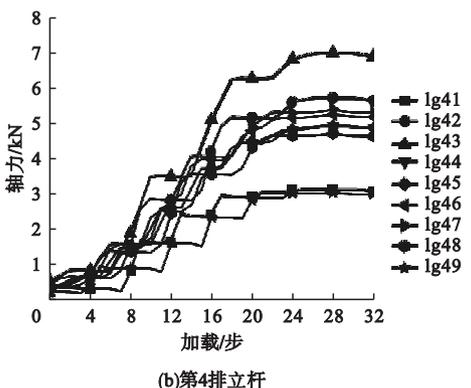
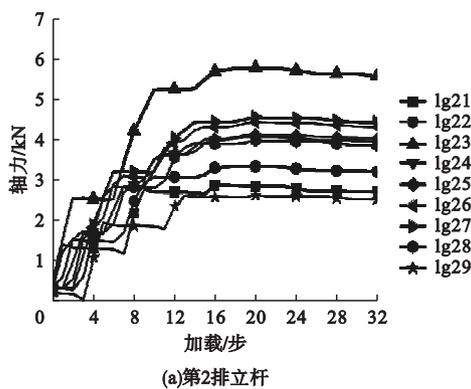
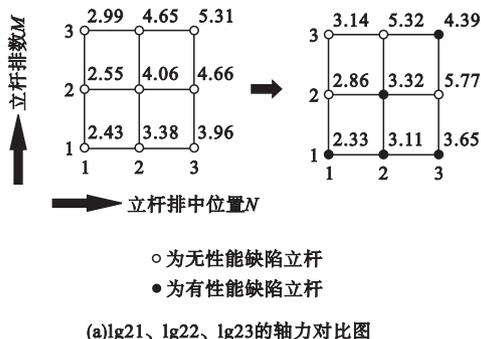
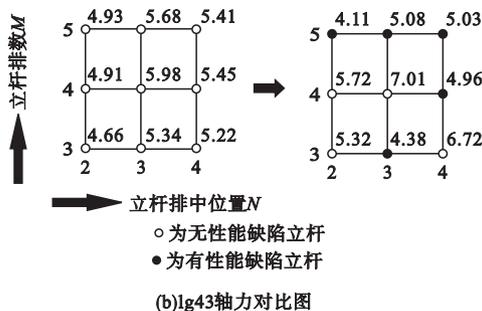


图8 第9组工况下模板支撑体系立杆轴力图

Fig. 8 The axial force of posts under No. 9 working condition



(a)lg21、lg22、lg23的轴力对比图



(b)lg43轴力对比图

图9 有、无构配件性能缺陷下模板支撑体系立杆轴力对比

Fig. 9 The axial force comparison of formwork support system with and without defects in component

从图9(a)中可以看出,对于有性能缺陷的立杆lg22,其最大轴力与不考虑缺陷条件下相比,减小了22.24%。然而,与之相邻的立杆lg21和lg23(自身无性能缺陷),最大轴力则分别增加10.61%和19.23%。由此说明,当某根立杆(如lg22)由于壁厚减小、与其连接扣件的转动刚度降低等原因导致其自身承载能力下降时,其实际承担的荷载将减小,而原本由其承担的上部荷载将被重新分配给与之相邻的其他立杆上(如lg21和lg23),由此,将导致其他立杆轴力的大幅增加。

从图9(b)中可以看出,混凝土浇筑过程中,考虑构配件性能缺陷时,lg43的最大轴力值为7.01 kN;对于相同的浇筑过程,不考虑构配件性能缺陷时,最大轴力值为5.98 kN,前者与后者相比,立杆最大轴力的数值增加了17%。说明在构配件性能有缺陷的条件下,模板支撑体系内部立杆所承受的最大轴力会显著增大。

3.5 不同浇筑路径下的立杆最大轴力的变化

对图3给出的三种浇筑路径下,部分搭设工况下模板支撑体系中出现的最大轴力值进行统计和整理,如表4所示。

分析表4可知,在3种浇筑方式下,模板支撑体系中出现的立杆最大轴力数值不同,

浇筑方式1和2方式下,立杆最大轴力普遍大于浇筑方式3下。对于第9组搭设工况,三种浇筑方式下立杆最大轴力数值相差最大:浇筑方式1下的立杆最大轴力比浇筑方式3中大1.4%;浇筑方式2下立杆最大轴力比浇筑方式3下大2.8%。由此可见,对于具有构配件性能缺陷的模板支撑体系,在不同的浇筑路径下,模板支撑体系所受最大轴力值有所不同,但差距较小。

表4 部分工况中不同浇筑路径下模板支撑体系内部出现最大轴力值

Table 4 The maximum axial force of the formwork support system in different concrete pouring paths in some working condition

工况	最大轴力/kN			工况	最大轴力/kN		
	路径1	路径2	路径3		路径1	路径2	路径3
4	6.53	6.53	6.53	13	6.13	6.14	6.05
7	7.14	7.11	7.09	15	6.18	6.26	6.17
8	7.81	7.81	7.80	16	7.40	7.28	7.28
9	7.01	7.11	6.91	18	6.87	6.81	6.80

4 有限元计算结果与规范的对比

现行规范^[15]在计算模板支撑体系立杆标准值时,将作用在模板上部的荷载分为恒荷载、活荷载和风荷载,而活荷载又包括施工活荷载与振捣混凝土时产生的荷载。笔者仅对施工完成后立杆的轴力进行研究,故选取恒荷载以及施工活荷载作为计算荷载,以规范^[16]给出的面积承载法进行立杆轴力计算。

工况9条件下出现最大轴力的立杆为lg55,图10为其轴力随加载步数变化的曲线与规范计算值的比较结果。

由图10可以看出,在加载过程中,考虑构配件性能缺陷后,模板支撑体系中立杆的最大轴力比不考虑、考虑施工活荷载情况下得到的轴力标准值分别大61.3%和37.7%。不考虑构配件性能缺陷时,模板支撑体系中立杆的最大轴力,比不考虑、考虑施工活荷载的轴力规范要求值分别大23%和5.5%。

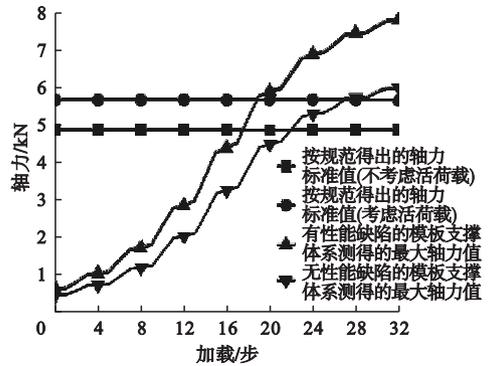


图10 立杆轴力对比图

Fig. 10 The comparison of axial force for posts

由此可以说明,当构配件普遍存在性能缺陷的条件下,部分立杆的实际受力值要大于按现行规范要求的杆件轴力标准值。因此,在模板支撑体系的设计和计算中,应当将构配件性能缺陷的不利影响加以充分考虑。

5 结论

(1)在模板支撑体系中,在考虑构配件性能缺陷及其随机空间位置分布情况下,性能下降的立杆因为其承载能力变弱导致所承担轴力变小,原本由其承担的荷载会转移至周围的立杆上,导致体系内部立杆所承受的最大轴力显著增大。

(2)在考虑构配件性能缺陷及其随机空间位置分布情况下,不同的混凝土浇筑路径对模板支撑体系承载力的影响较小。

(3)无论是否考虑施工活荷载,立杆所受轴力高于规范要求。由构配件性能缺陷导致的部分立杆轴力变化,会使体系内部所受最大轴力远大于规范所要求轴力标准值。

参考文献

- [1] 何芳东,张潇,张伟,等. 模板支撑体系坍塌事故规律[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 137-145. (HE Fangdong, ZHANG Xiao, ZHANG Wei, et al. Collapse accident law of formwork support system [J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35(4): 137-145.)
- [2] BUITRAGO M. Structural failures in cast-in-

- place reinforced concrete building structures under construction [J]. Handbook of materials failure analysis, 2018; 153 - 170.
- [3] 谢楠. 混凝土浇筑期高大模板支架工作状态的试验测试[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊1): 85 - 89.
(XIE Nan. In-situ test of working state of high falsework during concrete placement [J]. Engineering mechanics, 2011, 28 (S1): 85 - 89.)
- [4] LIU L, WANG J C, WANG B, et al. Research on influence of concrete pouring sequence on stability of high-formwork support system [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 33(7) 580 - 583.
- [5] 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.
(YUAN Xuexia. Study on reliability of formwork-supporting system during building construction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [6] ZHANG H, CHANDRANGSU R, RASMUSSEN R J R. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems [J]. Structural safety, 2010, 32(6): 393 - 401.
- [7] ZHANG H, RASMUSSEN K, ELLINGWOOD B R. Reliability assessment of steel scaffold shoring structures for concrete formwork [J]. Engineering structures, 2012, 36: 81 - 89.
- [8] 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. Overall stability test and finite element analysis of fastener type steel pipe full hall scaffold [J]. Journal of building structures, 2017, 38(6): 114 - 122.)
- [9] 谢楠, 郝鹏, 尹智宏, 等. 混凝土浇筑期高大模板支撑体系的受力性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊2): 164 - 169.
(XIE Nan, HAO Peng, YIN Zhihong, et al. Research on performance of high formwork support system during concrete placement [J]. Engineering mechanics, 2012, 29 (S2): 164 - 169.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工临时支撑结构技术规范: JGJ300—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for temporary supporting structure of building construction: JGJ300—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)
- [11] 郝鹏. 混凝土浇筑期的高大模板支架受力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
(HAO Peng. Research of the performance of high formwork support during the period of concrete pouring [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.)
- [12] 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.
(CHENG Jiajia. Computation and analysis of reliability on high-formwork support system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.)
- [13] 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.)
- [14] 敖鸿斐, 李国强. 双排扣件式钢管脚手架的极限稳定承载力研究[J]. 力学季刊, 2004(2): 213 - 218.
(AO Hongfei, LI Guoqiang. Investigation of overall load-bearing stability capacity of tube-and-couple scaffolds [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2004(2): 213 - 218.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工模板安全技术规范: JGJ162—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for safety of building construction formwork: JGJ162—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.)
- [16] 中国建筑科学研究院. 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范: JGJ 130—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(China Academy of Building Research. Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction: JGJ 130—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 范丽婷)