

连墙件布置对脚手架整体稳定承载力的影响

秦桂娟¹,刘海军¹,贾连光¹,张学峰²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建七局第一建筑有限公司,辽宁 沈阳 110042)

摘 要 目的 研究不同连墙件布置对悬挑脚手架整体稳定承载力的影响,为专项方案设计提供依据. 方法 对扣件节点采用半刚性连接,利用有限元分析软件 ANSYS 模拟脚手架的第一阶失稳模态以及临界荷载,分析不同连墙件布置对脚手架整体稳定承载力的影响. 结果 从有限元分析软件 ANSYS 模拟中得到不同连墙件布置下的第一阶失稳模态以及临界荷载,当连墙件布置为两步两跨时整体稳定承载力比两步三跨提高 4.728%,比三步三跨提高 62.65%. 当连墙件布置为两步三跨时整体稳定承载力比三步三跨提高 60.79%. 结论 当施工处于 100m 以上时,连墙件应优先采用两步两跨或两步三跨,不宜采用三步三跨. 当脚手架搭设需要减小连墙件间距时,减小竖向间距比减小纵向间距对架体稳定承载力的提高更有效.

关键词 悬挑脚手架;整体稳定承载力;半刚性;连墙件

中图分类号 TU731.2

文献标志码 A

Influence of Arrangement of Tie Members on Overall Stability of Scaffolds

QIN Guijuan¹, LIU Haijun¹, JIA Lianguang¹, ZHANG Xuefeng²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. No. 1 Company of China Seventh Engineering Bureau . LTD, Shenyang, China, 110042)

Abstract: The purpose is to study the overall stability of cantilevered scaffold and its influence of different tie member arrangement, so as to provide the basis for the design of special program. The semi-rigid coupler connection was used to calculate the scaffold, and the finite element analysis software ANSYS was used to simulate the first-order buckling mode and critical buckling load of scaffold, and analyze the influence of different tie member arrangements on the overall stable bearing capacity of scaffolds. The first-order buckling mode and critical buckling load of different tie members arrangements are obtained from the ANSYS simulation. When the tie members is arranged as two lift height and two longitudinal spacing, the overall stable bearing capacity is 4.728 % higher than that of two lift height and three longitudinal spacing, It is 62.65 % higher than that of the three lift height and three longitudinal spacing. When the tie member is arranged as two lift height and three longitudinal spacing, the overall stable bearing capacity is 60.79% higher

收稿日期:2019-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51578346);辽宁省自然科学基金项目(2013020143)

作者简介:秦桂娟(1963—),女,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构研究.

than that of three lift height and three longitudinal spacing. when the construction is more than 100 meters, the tie member should have the priority of two lift height and two longitudinal spacing, or two lift height and three longitudinal spacing, and should not be used the three lift height and three longitudinal spacing. when the spacing between the tie member needs to be reduced. Reducing the vertical spacing is more effective than reducing the longitudinal spacing to improve the stability bearing capacity of the scaffold.

Key words: cantilevered scaffold; overall stability bearing capacity; semi-rigid; tie member

工字钢悬挑脚手架是一种采用工字钢作为荷载承力钢梁的悬挑脚手架,工字钢悬挑脚手架一般分为上部架体和悬挑工字钢梁两个部分,其上部架体是由立杆、大横杆、小横杆、连墙件等通过直角扣件连接而成的空间结构体系. 与传统落地式钢管脚手架所不同的是,立杆底端通过定位件立在工字钢梁上,通过工字钢梁将上部架体上的所有荷载传到建筑物主体结构上^[1-4].

随着高层建筑的数量越来越多,其所受荷载也越来越复杂,高层施工脚手架坍塌事故时有发生,其主要原因大都是整体失稳. 因此,对悬挑脚手架稳定性的研究尤为重要. 秦桂娟等^[5]研究了连墙件为矩形和菱形两种布置方式分别对架体系统杆件的受力和节点变形影响,得出连墙件的菱形布置比矩形布置的架体各杆件受力和变形更加均匀合理,在脚手架的设计中应该优先考虑. 李树一等^[6]针对连墙件受力,提出悬挑式脚手架整体倾覆模型,按此模型计算时,连墙件的受力与所处的位置有关,越靠近顶部的连墙件受力越大,与实测值的规律相符. 近年来,对脚手架的研究虽然取得了一定的成果^[7-12],但大多数集中在对脚手架稳定承载能力的研究以及对扣件节点半刚性连接的探讨^[13-23],对于连墙件为菱形布置的研究却非常少,尤其是连墙件为菱形布置对脚手架整体稳定承载力的研究尚未涉足. 笔者研究发现连墙件为菱形布置对脚手架整体稳定承载力的影响较大,因此采用有限元分析软件 ANSYS 对两步两跨、两步三跨、三步三跨的脚手架模型进行模拟,分析连墙件为菱形布置对脚手架整体稳

定性的影响,为专项方案设计提供依据.

1 架体模型的选取和荷载计算

1.1 架体模型的选取

悬挑式钢管脚手架剖面图如图 1 所示,其中上部架体的连墙件按照规范优先采用菱形布置,连墙件的布置立面图如图 2 所示,图中符号“×”代表连墙件的布置位置.

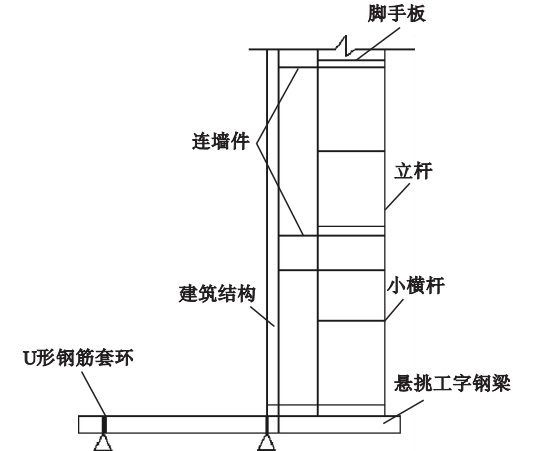
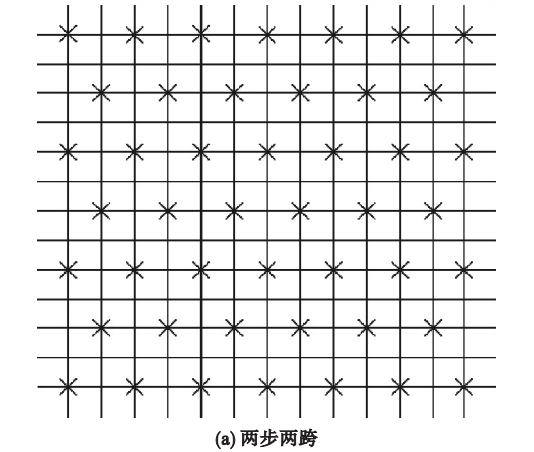


图 1 悬挑式钢管脚手架

Fig. 1 Cantilever steel tubular scaffold



(a) 两步两跨

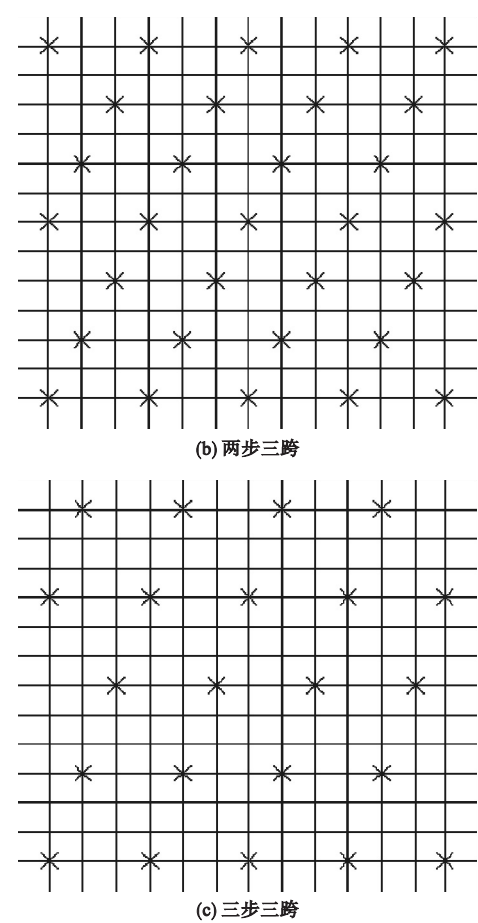


图2 连墙件布置立面图

Fig. 2 Elevation of tie member arrangements

1.2 水平风荷载标准值计算

随着建筑结构高度的增加,风荷载作用不断增强,风振的影响不可忽略.因此计算作用于脚手架上的水平风荷载标准值时,除了考虑基本风压、风荷载体形系数、风压高度变化系数之外,还需考虑风振系数 β_z 的影响.计算式如下:

$$\omega_k = \beta_z \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \omega_0.$$
 (1)

式中: ω_k 为风荷载的标准值; β_z 为风振系数; μ_z 为风压高度变化系数; μ_s 为风荷载体型系数; ω_0 为风荷载的基本风压.

1.2.1 风振系数

风振系数是风速脉动时对建筑结构产生的压强,指风对建筑物作用是不规则的,风压随风速、风向的紊乱变化而不停地发生改变.风振系数计算参照文献[7]中的公式:

$$\beta_z = 1 + 2g \cdot I_{10} \cdot B_z \cdot \sqrt{1 + R^2}.$$
 (2)

式中: g 为峰值因子,取2.5; I_{10} 为10m高度名义湍流强度,对应C类地区取0.23; B_z 为脉动风荷载的背景分量因子; R 为脉动风荷载的共振分量因子.根据文献[7],风振系数取值见表1.

表1 风振系数

Table 1 Wind vibration coefficients

离地面或海平面高度/m	风振系数
100	2.88
200	2.71
300	2.57
400	2.76

1.2.2 风压高度变化系数

风压高度变化系数随离地面高度增大而增大,其变化规律与地面粗糙度以及风速轮廓线直接有关.以沈阳地区为例,根据文献[7],风压高度变化系数取值见表2.

表2 风压高度变化系数

Table 2 Height change coefficient of wind pressure

离地面或海平面高度/m	风压高度变化系数
100	1.50
200	2.03
300	2.43
400	2.46

1.2.3 风荷载体型系数

风荷载体型系数是风作用在建筑物表面上所引起的实际压力或吸力与来流风的速度压的比值,主要与建筑物的体型尺度有关.根据文献[8]可知,脚手架的风荷载体型系数 $\mu_s = 1.3 \varphi$,文中有限元模型的步距和跨距分别取1.5 m,钢管规格为 $\phi 48.3 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$,由文献[9]中所给公式计算得到脚手架所处100~400 m高度处的挡风系数 $\varphi = 0.897$,从而得出风荷载体型系数 $\mu_s = 1.1657$.

1.2.4 风荷载标准值

以沈阳地区为例,基本风压 $\omega_0 =$

0.4 kPa,按式(1)计算得出脚手架所处高度 100~400 m 的风荷载标准值,结果见表 3.

表 3 风荷载标准值

Table 3 Standard value of wind load

高度/m	风荷载标准值/kPa
100	2.014 3
200	2.265 1
300	2.911 9
400	3.165 8

1.3 竖向荷载计算

脚手架竖向荷载标准值按文献[8]取值,结果见表 4.

表 4 竖向荷载标准值

Table 4 Standard value of vertical load

类别	标准值/Pa
木脚手板	0.35
密目式安全立网	0.01
栏杆与挡脚板	0.17
钢管每米长质量	3.97
混凝土结构荷载	3.0

2 风荷载作用下架体有限元模拟

2.1 有限元模型参数

笔者的研究对象选为由立杆、大横杆、小横杆、连墙件等通过直角扣件连接而成的悬挑式钢管脚手架,各杆件均选用梁单元 Beam188 进行建模,钢管规格为 $\phi 48.3\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$,弹性模量取 $E=2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,材料质量密度为 $D=7\,850\text{ kg/m}^3$,有限元模型参数见表 5.

表 5 有限元模型参数

Table 5 Parameters of finite element model m

步距	跨距	横距	建筑结构距内立杆距离	扫地杆高度
1.5	1.5	1.05	0.4	0.2

2.2 半刚性有限元模型的建立

由于脚手架杆件之间的扣件连接是介于刚接与铰接之间的半刚性连接,在 ANSYS 有限元分析方法中,扣件连接采用弹簧单元

Combin 14 来模拟.半刚性节点的设置方法是在节点位置设置 3 个重合节点^[10],分别代表 X、Y、Z 方向的小横杆、立杆、大横杆,采用一个重合节点的 Combin14 弹簧单元 KEYOPT(4) 来约束 X 方向上的转动,采用另一个重合节点的 Combin14 弹簧单元 KEYOPT(6) 来约束 Z 方向上的转动,分别给这两个 Combin14 弹簧单元赋予转动刚度,转动刚度按照文献[11]的规定取 $35\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$.最后耦合重合节点 X、Y、Z 三个方向的平动自由度和 Y 方向的转动自由度,以两步两跨为例,建立的半刚性有限元模型如图 3 所示.

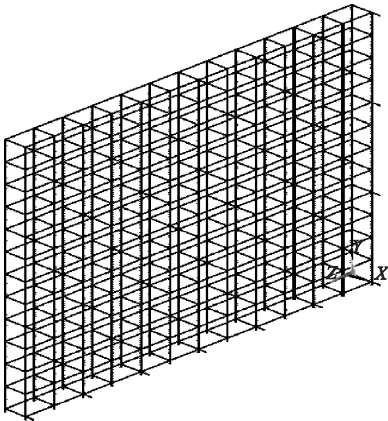


图 3 半刚性有限元模型

Fig. 3 Semi-rigid finite element analysis model

2.3 约束及荷载施加

2.3.1 施加约束

脚手架内外立杆与悬挑工字钢的底部连接视为铰接,约束三个方向的平动自由度,即 $UX、UY、UZ$,而连墙件与主体结构的连接视为刚性连接,约束三个方向的平动自由度和转动自由度,即 $UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ$ (见图 4).

2.3.2 施加荷载

除考虑脚手架均布自重和中间、顶层位置处脚手板传来的施工荷载外,还将脚手架所在不同高度处的风荷载转化成等效线荷载施加在架体外排杆件上(见图 5).

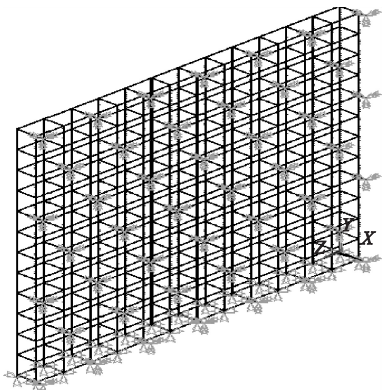


图 4 施加约束

Fig. 4 Impose constraints

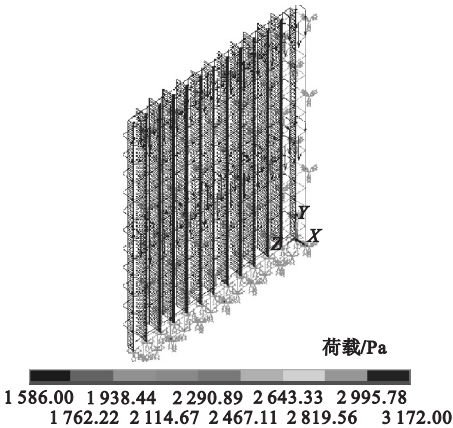


图 5 施加荷载

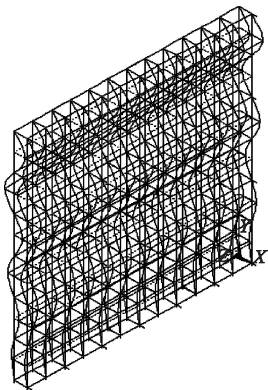
Fig. 5 Impose loads

3 连墙件布置对脚手架整体稳定性能分析

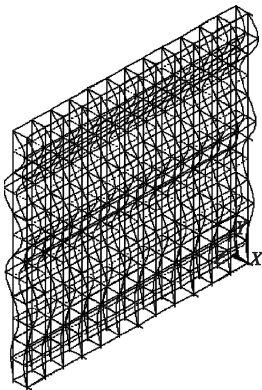
连墙件采用菱形布置,对两步两跨、两步三跨、三步三跨的脚手架模型进行特征值屈曲分析,分别得到第一阶失稳模态以及临界荷载,通过第一阶失稳模态和临界荷载,对比分析连墙件布置对脚手架整体稳定性的影响.

3.1 第一阶失稳模态

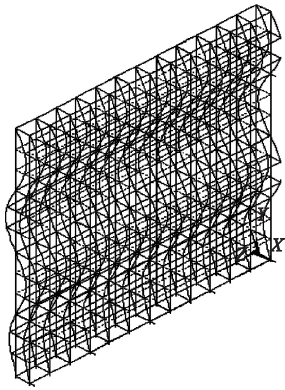
除考虑自重、施工荷载、风荷载,在脚手架每根立杆的顶端施加竖向力 $F = 1\text{ kN}$,求得特征值,然后经过多次迭代,当特征值达到 1 时停止计算,得到的两步两跨、两步三跨、三步三跨的第一阶失稳模态如图 6 所示. 由图可知,两步两跨、两步三跨、三步三跨的架体达到稳定极限状态的特征值分别为 1.008、1.009、1.008,然后通过软件查得与其对应的立杆临界荷载分别为 28.519 kN、27.239 kN、10.679 kN. 对于不同的连墙件布置形式,架体能够承担的临界荷载各有不同,但其失稳模态基本一致,都沿垂直主体结构方向的横向框架发生失稳变形.



(a) 两步两跨失稳变形图



(b) 两步三跨失稳变形图



(c) 三步三跨失稳变形图

图 6 第一阶失稳模态

Fig. 6 First buckling modes

3.2 稳定承载力

在脚手架所处 100 ~ 400 m 高度,对半刚性脚手架进行特征值屈曲分析,分别得到连

墙件布置为两步两跨、两步三跨和三步三跨的临界荷载,结果见表 6. 将这三种连墙件布置的临界荷载作对比分析,得到脚手架所处

高度与临界荷载的变化曲线(见图7)。

表6 不同高度处脚手架的临界荷载

Table 6 Critical loads of scaffold at different height

脚手架所处 高度/m	临界荷载/kN		
	两步两跨	两步三跨	三步三跨
100	28.591	27.239	10.679
200	28.172	26.812	10.284
300	27.883	26.360	9.915
400	27.395	25.987	9.441

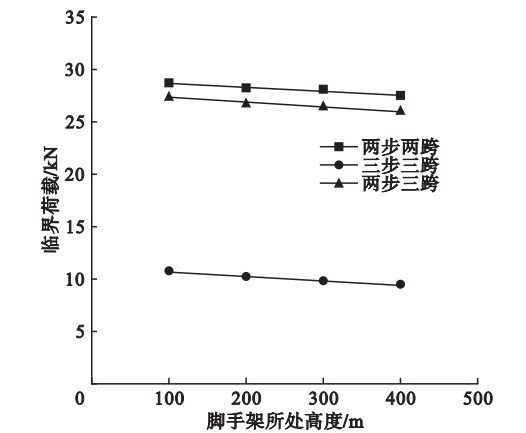


图7 脚手架所处高度与临界荷载变化曲线

Fig. 7 The change curves of scaffold height and critical loads

由表6可知,在步距和跨距相同的情况下,临界荷载随着脚手架所处高度的增加而降低。当架体的连墙件从两步两跨增加到两步三跨,架体的临界荷载从28.591 kN下降到27.239 kN,架体能够承担的临界荷载下降了4.728%;当架体的连墙件从两步两跨增加到三步三跨,架体的临界荷载从28.591 kN下降到10.679 kN,架体能够承担的临界荷载下降了62.65%;当架体的连墙件从两步三跨增加到三步三跨,架体的临界荷载从27.239 kN下降到10.679 kN,架体能够承担的临界荷载下降了60.79%。

由图7可知,当脚手架所处100~400 m高度,连墙件布置为两步两跨的临界荷载高于两步三跨和三步三跨,并且在步距和跨距相同的情况下,两步两跨的临界荷载略高两

步三跨,说明减小连墙件纵向间距对脚手架的整体稳定承载力有提高,但提高幅度很小。同时两步三跨的临界荷载明显高于三步三跨,说明减小连墙件竖向间距对脚手架的整体稳定承载力有大幅度的提高。

4 结 论

(1)当连墙件采用菱形布置时,脚手架发生变形最大的位置是在架体顶层步距内,无论连墙件布置为两步两跨、两步三跨还是三步三跨,都沿垂直主体结构方向的横向框架发生失稳变形。

(2)减小连墙件的竖向间距可以有效提高架体的整体稳定承载力,而减小连墙件的纵向间距也会提高架体的整体稳定承载力,但提高幅度很小。

(3)在高层建筑施工中,当施工处于100 m以上时,为了确保脚手架安全,连墙件应优先采用两步两跨布置或两步三跨布置,其整体稳定承载力才能保证,而不宜采用三步三跨布置。

参考文献

[1] 张文喜. 高层建筑施工中悬挑式脚手架的设计与应用[J]. 工程质量, 2011, 29(1): 32-35.
(ZHANG Wenxi. Design and calculation for cantilever scaffold in high-rise building [J]. Construction quality, 2011, 29(1): 32-35.)

[2] 何晖, 曾凡奎, 李宝平. 高层建筑施工悬挑脚手架研究进展[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(1): 1-7.
(HE Hui, ZENG Fankui, LI Baoping. Research progress of cantilevered scaffolding in high-rise building construction [J]. Journal of Xi'an university of technology, 2015, 35(1): 1-7.)

[3] HUANG Yuelin, CHEN Weifan. A monitoring method for scaffold-frame shoring systems for elevated concrete formwork[J]. Computers and structures, 2012, 3(78): 681-690.

[4] LI Dahua, WANG Anhui, CHEN Yanmei. Design and construction of high-formwork and large span formwork supports system [J]. Advanced materials research, 2012, 461: 589-592.

[5] 秦桂娟, 徐婉婷. 超高层建筑施工扣件式钢管脚手架连墙件布置研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(6): 1023-1031.
(QIN Guijuan, XU Wanting. Research on

- arranging tie members of steel tubular scaffold with couplers in super high-rise building construction[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31 (6): 1023 - 1031.)
- [6] 李树一,宋建学. 悬挑式脚手架连墙件内力计算模型研究[J]. 科技信息, 2016, 3: 122 - 124.
(LI Shuyi, SONG Jianxue. Study on the tie members internal force calculation model of cantilevered scaffold [J]. Science and technology information, 2016, 3: 122 - 124.)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构设计荷载规范: GB50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(The Ministry of Development of the People's Republic of China. Loading code for design of building structure: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
(The Ministry of Development of the People's Republic of China. Safety technical specifications of construction fastener type steel pipe scaffold. JGJ130—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [9] 秦桂娟,任嘉智. 超高层建筑施工脚手架连墙件风载作用分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 306 - 312.
(QIN Guijuan, REN Jiazhi. Wind load analysis on scaffold tie member in super high-rise building construction [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31 (2): 306 - 312.)
- [10] 周威,殷晨波. 自由落体冲击下模板支撑系统的动力分析[J]. 工业建筑, 2011, 41 (1): 19 - 22.
(ZHOU Wei, YIN Chenbo. Dynamic analysis of formwork support system by freely falling shocking [J]. Industrial architecture, 2011, 41 (1): 19 - 22.)
- [11] 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.
(The Ministry of Development of the People's Republic of China. Technical code for temporary support structures in construction: JGJ300—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)
- [12] CHEN Zhihua, LU Zhengran, WANG Xiaodun, et al. Research on the bearing capacity of steel tubular formwork support with coupler without X-bracing based on the partially-sway single post stability theory [J]. Engineering mechanics, 2010, 27(11): 99 - 105.
- [13] TURKER T, KARTAL M E. Assessment of semirigid connections in steel structures by model testing [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 65(7): 1538 - 1547.
- [14] LU Z R, SUI X M, CHEN Z H. Bearing capacity of fastener steel tube full hall formwork support base on stability of pressed pole with multiple point restraint against rotation [J]. Applied mechanics and materials, 2012 (166): 1404 - 1415.
- [15] PENG Juilin, YEN T. Analytical and experimental bearing capacities of system scaffolds [J]. Journal of Zhejiang university (science A), 2010, 10(1): 82 - 92.
- [16] CHANDRANGSU T, RASMUSSEN K J R. Investigation of geometric imperfections and joint stiffness of support scaffold systems [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(4): 576 - 584.
- [17] LIU Hongbo, ZHAO QiuHong, WANG Xiaodun. Experimental and analytical studies on the stability of steel tube and coupler scaffolds without X-bracing [J], Engineering structures, 2010, 32(4): 1003 - 1015.
- [18] 孙逸夫,陈燕. 步距和斜撑对满堂扣件式钢管脚手架承载力影响的试验研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2016, 24(2): 36 - 41.
(SUN Yifu, CHEN Yan. Test of the effect of pace and scaffold bracing on bearing capacity of fastener steel tube full hall scaffold [J]. Journal of Anhui jianzhu university, 2016, 24 (2): 36 - 41.)
- [19] 何夕平,王璜. 工字钢悬挑钢管外脚手架受力机理和安全性分析研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
(HE Xiping, WANG Huang. Analysis of force mechanism and safety of i-steel cantilever external scaffold [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016.)
- [20] 陈剑波. 扣件式钢管脚手架整体稳定性的 ANSYS 分析 [J]. 水力与建筑工程学报. 2011, 9(6): 105 - 108.
(CHEN Jianbo. Analysis on overall steady state load-bearing capacity of steel tubular scaffold with couplers based on ANSYS [J]. Journal of hydraulic and architectural engineering, 2011, 9 (6): 105 - 108.)
- [21] FU W Q, ZHANG C W, SUN L, et al. Experimental investigation of a base isolation system incorporating MR dampers with the high-order single step control algorithm [J]. Applied sciences, 2017(4): 344.
- [22] ZHANG C W, LI L Y, OU J P. Swinging motion control of suspended structures: principles and applications [J]. Structural control and health monitoring, 2010, 17(5): 549 - 562.
- [23] XU H B, ZHANG C W, LI H, et al. Real-time hybrid simulation approach for performance validation of structural active control systems: A linear motor actuator based active mass driver case study [J]. Structural control and health monitoring, 2014, 21(4): 574 - 589.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)