

装配式脚手架结构整体稳定承载力分析

Analysis of Overall Stability Bearing Capacity of Prefabricated Scaffold Structure

任雪萍, 刘琛, 张成

(天津市水利工程有限公司, 天津 300222)

摘要: 为提升脚手架搭建的稳定性, 提升建筑施工的安全性, 研究分析装配式脚手架结构整体稳定承载力。利用 ANSYS 有限元软件建模并计算分析装配式脚手架在不同节点连接刚度、高宽比、初始缺陷、集中荷载以及脚手架跨数等影响因素下的结构整体稳定承载力。软件计算仿真实验结果显示: 节点连接刚度与脚手架承载力呈正比例关系, 25 kN·m/rad 以后上升趋势较为缓慢; 高宽比、初始缺陷、集中荷载较大情况下脚手架稳定承载力呈下降趋势; 当集中应力出现在脚手架的脚手板上时, 对于脚手架的稳定承载力最大; 当脚手架跨数为 6 时, 其稳定承载力效果最佳。基于此, 在搭建装配式脚手架时需要适当调整初始缺陷、高宽比与跨数, 选取合适节点连接刚度。

关键词: 装配式; 脚手架; 结构整体; 稳定承载力; ANSYS 有限元软件; 集中荷载

中图分类号: TU974 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0001-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.001

REN Xueping, LIU Chen, ZHANG Cheng

(Tianjin Water Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to improve the stability of scaffold construction and enhance the safety of construction, this study analyzes the overall stability bearing capacity of assembled scaffold structure. ANSYS finite element software is used to model and calculate and analyze the overall stability bearing capacity of prefabricated scaffold under the influence factors of different joint stiffness, height-width ratio, initial defect, concentrated load and span number of scaffold. Software calculation results show that there is a positive proportional relationship between the joint stiffness and the scaffold bearing capacity, and the upward trend is relatively slow after 25 kN·m/rad. The stable bearing capacity of scaffolding decreases when the height-width ratio, initial defect and concentrated load are larger. When the concentrated stress appears on the scaffold foot plate, the stability of the scaffold bearing capacity is the largest; when the span of scaffold is 6, its stability bearing capacity effect is the best. Based on this, it is necessary to properly adjust the initial defects, height-width ratio and span number, and select the appropriate joint stiffness when building the fabricated scaffold.

Keywords: assembly; the scaffold; structural whole; stability bearing capacity; ANSYS finite element software; concentrated load

作者简介: 任雪萍 (1980—), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 土木建筑。

通信作者: 刘琛 (1994—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 土木建筑。

收稿日期: 2022-07-25

0 引言

建筑施工过程中常用的装配式脚手架通常为外挂式脚手架, 这种结构的脚手架多使用预制部件构建, 结合可靠连接完成整个脚手架的搭建。这种装配式施工工艺已经广泛应用于各类形式的

建筑结构

建筑施工领域,并取得可观的建筑施工效果。这种装配式施工方式具有环保性、高效率、高质量、节约成本等特点,在国内外各类建筑行业都积极推广并使用。近年来,我国建筑施工质量与水平呈现显著上升趋势,随着对建筑施工要求的不断提升,装配式施工与脚手架结构的应用越来越广泛^[1-2]。装配式脚手架通常使用插销工艺组装脚手架,该结构由底座、顶托、杆件等主要结构共同组成,在经济性与社会性方面获得明显成效。这种装配式脚手架主要钢材通常选用 Q345 钢,其中底座与顶托都具有灵活性,可根据现场施工需求随时调节、变动、找平,在该装配式脚手架之中,立杆发挥连接作用,横杆、斜杆、立杆之间还可通过多组 U 型卡件节点实现连接,按照 500 mm 规格实现节点模数的均匀分布。从目前学术界的研究结果来看,这些节点属于半刚性节点,具备抗弯强度^[3-5]。装配式脚手架是一种在施工过程中维护建筑结构稳定性的支撑结构,节点的类型除会直接影响脚手架的承载力外,施工现场环境、脚手架结构高宽比以及安装时产生的误差都会影响脚手架的承载力。依据竖向荷载的 6% 设置水平荷载,才能保证脚手架的稳定性。

本文使用有限元软件结合实际施工分析装配式脚手架结构整体稳定承载力情况,获得装配式脚手架最佳结构布置情况。

1 材料方法

1.1 数据收集

本文研究对象为某大型建筑施工所用装配式插销脚手架,该脚手架主要使用格构柱实现承重,所选择的立杆规格为 $\Phi 49.4 \times 2.8$,横杆的步距设置为 1 m,将顶托和底座的高度分别设置为 300 mm 与 200 mm,以此避免试验结果受到底座和顶托所受到的干扰。以“之”字型布置各个立面上斜杆的连接方式,测量该装配式脚手架荷载与位移时考虑高宽比的影响^[6]。脚手架的分力梁为箱型梁,该梁有两根 25b 工字钢焊接,在脚手架立杆位置布置一个铅垂线,利用该铅垂线实现位移变化测量,铅垂线偏移值可直接看作是位移值。整个脚

手架结构之中,最大立杆位移就是受到加载破坏后脚手架格构柱的位移,受到加载影响,可能会出现压弯扭破坏。如果脚手架的高宽比较大脚手架受到荷载影响一般会在较高层数上出现破坏,如果某个立杆发生较大侧向位移会导致脚手架出现破坏,该立杆也会率先发生结构破坏,装配式脚手架顶部密集分布立杆,所以也最容易遭受破坏^[7-9]。高宽比降低能够导致装配式脚手架的格构柱承载力上升,由此可确定高宽比大小会影响装配式脚手架的整体承载力,可从这个角度开展分析研究。

1.2 有限元模型构建

利用 ANSYS 有限元软件建模并分析装配式脚手架的整体稳定承载力。该软件是一种针对结构学、声学、流体的大型数值模拟软件,能够应用于建筑、军工、航空等多个领域,利用该软件能够分析装配式脚手架在各种条件下发生的变化。模型构建的具体步骤如下:

①单元类型定义:装配式脚手架结构杆件使用有限元软件中的梁单元构建,底板结构使用软件中的半壳端元实现构建;

②材料属性设置:装配式脚手架的主要原料为钢材,所以构建有限元模型时还需要在 ANSYS 有限元软件中设置钢材的各项参数:泊松比与密度值分别为 0.3 和 $7.96 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,弹性模量则为 $2.17 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ^[10];

③截面形状设置:装配式脚手架的立杆、斜杆以及其他部位的杆体规格均为 $110 \times 49 \times 5.4$ 槽钢,脚手板钢板厚度为 3.5 mm,方钢管的规格为 $50 \times 50 \times 4$,底座加劲杆使用 $64 \times 41 \times 4.9$ 槽钢,理想化穿墙螺栓规格,半径为 4.396 mm 实心圆柱钢,临边防护骨架为 $40 \times 40 \times 3.5$ 的方钢管;

④几何图形生成:在生成装配式脚手架有限元模型前,需要依据实际脚手架的尺寸规格将关键点确定下来,连接关键点之后生成杆件骨架,脚手架上的面板构建则使用这些关键点连接的线生成,最终生成装配式脚手架的几何图形^[11];

⑤划分有限元网格:将材料属性赋在上文生成的几何图形上,网格划分时以元素单元要求为

依据；

⑥结构类型定义：确定装配式脚手架结构类型属于 Structural；

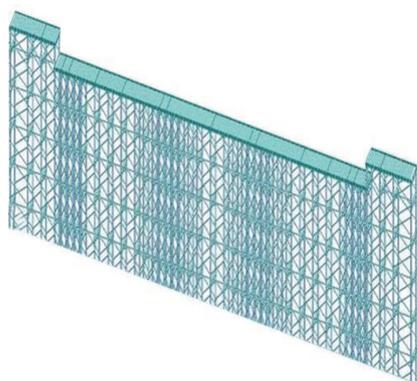
⑦荷载确定：根据所研究内容，向有限元软件中的装配式脚手架不同位置施加不同的荷载；

⑧添加约束条件：将全自由约束施加在穿墙螺栓布置的位置；

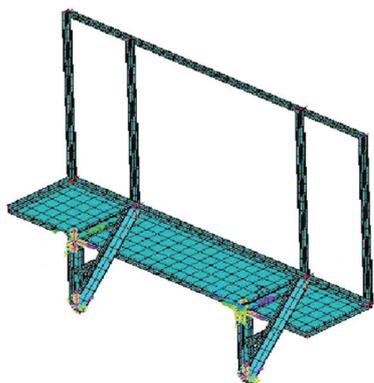
⑨数值模拟与有限元分析：使用 ANSYS 有限元软件中的 Solution 模块实现装配式脚手架的有限元分析^[12-14]；

⑩计算结果分析：获得数值计算生成的应力云图、最大位移值等结果。

将上文中收集的数据输入到有限元软件中，获得本文所研究大型建筑施工所用装配式脚手架的有限元模型，模型包含整体结构有限元模型与局部结构有限元模型，如图 1 所示。



(a) 装配式脚手架整体有限元模型



(b) 局部有限元模型

图 1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model

1.3 试验方法

(1) 节点连接刚度影响

发挥连接功能的脚手架各个节点具有较为复杂且种类繁多的约束，该节点的连接刚度如果存在差异也会严重影响装配式脚手架稳定承载力的计算结果。

综合装配式脚手架的结构特点以及前文构建有限元模型时的分析要点，使用有限元模型分析计算不同节点连接刚度影响下，装配式脚手架稳定承载力的变化情况。

(2) 高宽比影响

从目前研究的结果来看，高宽比会明显影响装配式脚手架的稳定承载力，其中受影响最大的为装配式脚手架的格构柱。在有限元模型中设置不同装配式脚手架高宽比，通过试验模拟计算得出脚手架单杆以及格构柱稳定承载力变化情况。

(3) 集中荷载影响

装配式脚手架在实际施工环境中将面对各种不利荷载会造成装配式脚手架发生整体倒塌的现象。本文主要研究水平方向施加的不利荷载，这类荷载主要会导致位移临边位置的脚手架钢管失稳，此荷载被称为集中荷载^[15]。假设脚手架内部受到的力为集中荷载。由公式给出的集中荷载标准值，竖直杆采用 $40 \times 40 \times 3$ 方形钢管，弯曲刚度为 EI 高度为 $H = 1800 \text{ mm}$ ，对临边防护骨架竖直杆件，承受荷载 $q = 0.04 \omega_k$ 悬臂梁。竖直杆最高处挠度最大为：

$$w_{\max} = \frac{qH^4}{8EI} = \frac{0.04\omega_k \times 1.800^4}{8EI} \quad (1)$$

作用在临边防护上的荷载标准值与其骨架竖直杆的最大挠度成正比，荷载标准值越大，最大挠度越大。荷载主要影响装配式脚手架临边防护，从而降低脚手架的稳定性，在脚手架设计阶段，不能忽略集中荷载的影响。

(4) 初始缺陷影响

脚手架是一种周转材料，钢管多次使用之后会出现锈蚀和磨损，造成局部壁厚减小，杆件会

建筑结构

出现较小的弯曲,荷载也会出现一定的偏心,构件的搭设也不可能达到计算所要求的理想状态,这些缺陷都会对脚手架的承载力产生影响。根据脚手架安全规范 JGJ130-2011 1.0.3 中对于脚手架上所存在的初始缺陷作出详细规定,同时由于脚手架工作的特殊性,无论是普通脚手架,还是装配式脚手架都存在不同程度的初始缺陷。实际施工环境之中,脚手架的初始缺陷难以估量,因此本文试验研究以安全规范的中心要求为依据,假设本文所研究的建筑装配式脚手架初始缺陷是一阶屈曲模态位移值的 1%、1.5%、2%、2.5%、3%,探究不同初始缺陷影响下装配式脚手架稳定承载力。

(5) 跨数影响

装配式脚手架搭建之后存在不同跨数,有研究表明跨数多少也会影响脚手架的稳定承载力,使用有限元模型模拟不同跨数对于装配式脚手架稳定承载力的影响。

2 结果

2.1 不同节点连接刚度

装配式脚手架中会使用多组 U 型卡件节点连接横杆、斜杆、立杆,这些节点发挥嵌固连接作用,通过节点连接实现弯矩传递,由此可看出,应用于装配式脚手架上的节点大多数是半刚性节点。装配式脚手架结构中,节点刚度会影响屈曲承载力。实际搭建装配式脚手架时各个节点的连接位置不同,刚度也存在差异,安装水平与质量会影响刚度的大小。根据脚手架安全规范 JGJ128-2010 中的内容,最佳节点螺栓拧紧后的扭力矩范围应在 $45 \text{ N} \cdot \text{m}$ — $60 \text{ N} \cdot \text{m}$ 之间,最低值需要超过 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。通过节点连接刚度的方位值研究装配式脚手架承载力,当螺栓拧紧的扭力矩取值为 $55 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,该扭力矩之下的原始节点连接刚度为 $55.18 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 。本节试验以所研究建筑的装配式脚手架为对象,在不考虑外力荷载影响的情况下,获得不同连接刚度下承载力变化情况,

如表 1 所示。

表 1 连接刚度差异下装配式脚手架的稳定承载力
Table 1 Stable bearing capacity of fabricated scaffold under connection stiffness difference

节点连接刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	极限承载力/ kN
5	53.84
15	58.86
25	60.53
35	61.68
45	62.64
55	63.62
65	64.51
75	64.89
85	64.06
95	65.17

从表 1 中的结果能够看出,节点连接刚度脚手架的承载力呈现显著正比例关系,说明节点的连接刚度值较大情况下,脚手架具有更加良好的承载力。节点连接刚度较小时,装配式脚手架的承载力上升更快,但是节点连接刚度达到 $25 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 以后,装配式脚手架承载力增长趋势较缓。由此可知,节点连接刚度与装配式脚手架的承载力正相关,即使在一定范围中,节点连接刚度变化幅度范围较小,还是会对装配式脚手架的极限承载力造成影响,所以如果研究装配式脚手架承载力变化情况时,一定要将节点连接刚度问题考虑进去。装配式脚手架实际生产时,部分商家为降低成本会把节点部分生产得较细,装配式安装结束以后,立杆与节点之间存在较大空隙,导致节点连接刚度被显著降低,在一定程度上影响装配式脚手架的稳定承载力,所以目前相关标准中要求装配式脚手架生产时,刚度需要超过 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$,才符合市场标准。

2.2 高宽比差异

在有限元模型中,为装配式脚手架设置四种不同大小的高宽比,模拟施加荷载,通过计算获得脚手架中的格构柱、单杆等配件的极限承载力变化情况,结果见表 2。

表 2 高宽比差异下装配式脚手架稳定承载力
Table 2 Stable bearing capacity of fabricated scaffold under different aspect ratio

高宽比	4 : 1	3 : 1	2 : 1	1 : 1
破坏方式	顶部第一层与第二层均出现屈曲	顶部第二层发生屈曲	第一层与第二层均出现屈曲	格构柱节点位置出现屈曲
极限荷载 /kN	467	442	453	417
最大水平位移/mm	33.3	11.3	11.4	14.4
格构柱极限承载力/kN	387	435	428	-
立杆极限承载力/kN	95	107	105	-
整体稳定系数	0.81	0.88	0.87	-
试验极限荷载/kN	387	399	418	-
有限元极限荷载/kN	375	382	400	-
有限元计算结果与试验结果比值	0.969	0.957	0.957	-

表 2 中，高宽比为 1 : 1 的情况下，装配式脚手架的并不会发生显著高于其他高宽比条件，部分情况下还会导致脚手架的承载力降低，假如立

杆结合形式不同，受到静力荷载影响节点连接位置还会发生弯曲破坏。研究发现如果脚手架的高宽比为 1 : 1 时，会由于格构柱上存在的严重接缝，出现较大偏心问题，导致整个装配式脚手架的承载力较低，所以研究高宽比对于格构柱与立杆承载力影响时，不考虑高宽比为 1 : 1 的条件。

从表 2 中能够看出，高宽比越大，装配式脚手架的格构柱、立杆承载力越小，这也直接导致装配式脚手架的整体稳定承载力丧失，所以实际构建装配式脚手架时需要选择较为恰当的手架高宽比。根据已有研究中提出的水平荷载系数，表 2 中还对各高宽比下各个格构柱在极限荷载作出统计，结果显示，高宽比升高，实际格构柱的极限荷载与有限元软件模拟出的极限荷载差异较小，说明使用有限元模型模拟实验具有较为良好的准确效果。

2.3 集中荷载

在有限元软件之中模拟装配式脚手架（局部区域）受到集中荷载影响后的应力云图，结果见图 2。

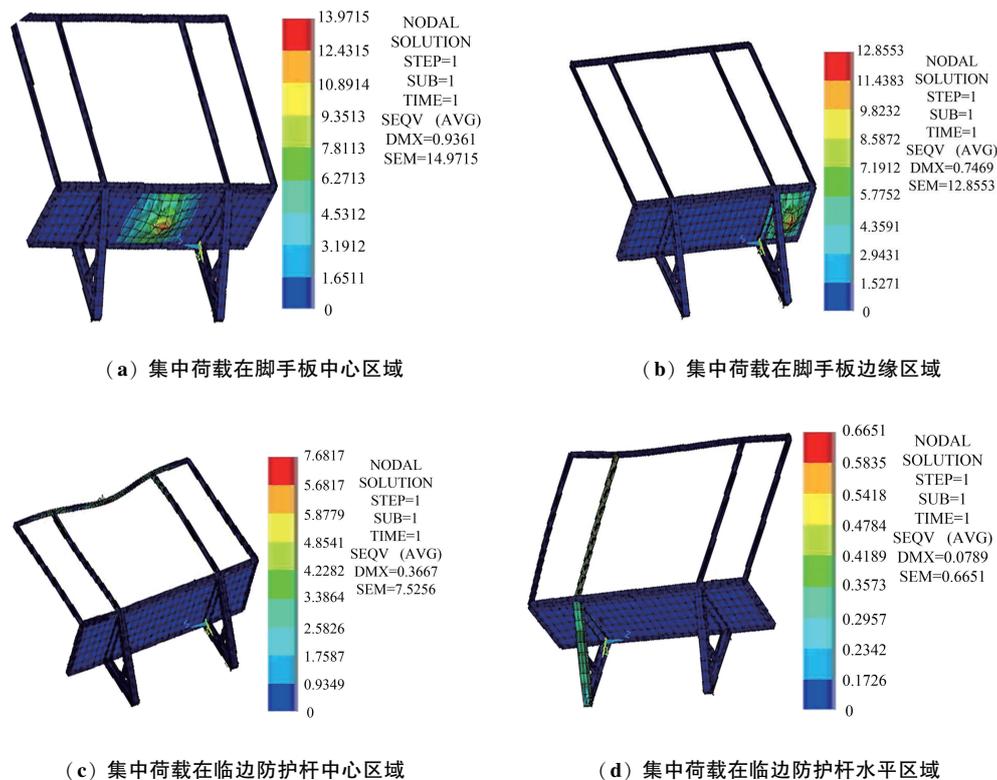


图 2 集中荷载下装配式脚手架局部区域应力云图
Fig. 2 Stress nephogram of local area of fabricated scaffold under concentrated load

建筑结构

根据图 2 中装配式脚手架局部区域的应力云图结果分析集中荷载在不同位置上时装配式脚手架最大位移与最大应力变化情况, 结果见表 3。

表 3 集中荷载下不同位置位移与应力变化
Table 3 Displacement and stress changes at different positions under concentrated load

集中荷载位置	集中荷载/N	最大位移/mm	最大应力/(N/mm ²)
集中荷载在脚手板中间	15	0.0899	1.7687
	30	0.3173	3.5762
	45	0.4185	5.2888
	60	0.5236	6.8413
	75	0.6268	8.7739
	90	0.7299	10.4864
集中荷载在脚手板边缘	15	0.0886	1.6841
	30	0.2681	3.2972
	45	0.2747	4.1177
	60	0.4288	6.4832
	75	0.4885	7.8762
	90	0.5878	9.6693
集中荷载在临边防护杆中心	15	0.0431	0.8379
	30	0.0748	1.9647
	45	0.0868	2.8916
	60	0.2389	3.8184
	75	0.2689	4.7452
	90	0.2829	5.6712
集中荷载在临边防护杆水平处	15	0.0008	0.0784
	30	0.0028	0.2496
	45	0.2237	0.3189
	60	0.2246	0.3881
	75	0.0064	0.4574
	90	0.0063	0.5266

综合图 2 与表 3 可知, 集中荷载变大时, 装配式脚手架上各个位置的最大位移与最大应力均呈现出上升趋势, 这也导致装配式脚手架的稳定承载力整体发生降低。从图 2 中可以看出, 集中荷载在脚手架上的脚手板位置影响脚手架稳定承载力最严重, 但是在临边防护杆水平区域的影响最小, 所以实际施工过程中需要尤其注意在装配式脚手架脚手板核心位置的荷载施加问题。

2.4 初始缺陷差异

在不同初始缺陷的情况下, 装配式脚手架的极限荷载变化情况以及极限荷载降低比率见图 3。

从图 3 中能够看出, 装配式脚手架的初始缺陷严重影响脚手架的稳定承载力啊, 初始缺陷值与脚手架的极限荷载呈现反比例关系, 初始缺陷

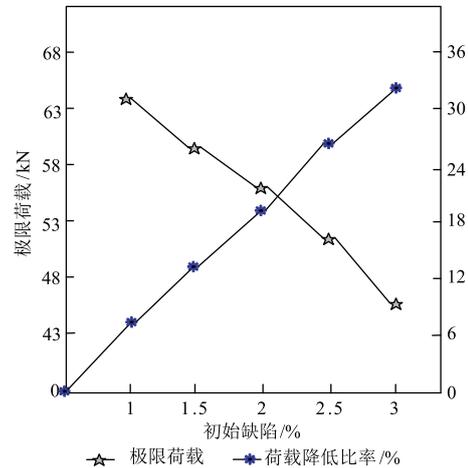


图 3 初始缺陷差异下装配式脚手架稳定承载力
Fig. 3 Stable bearing capacity of prefabricated scaffold under initial defect difference

越大, 极限荷载越小, 所以实际施工过程中需要严格注重装配式脚手架的生产质量, 降低初始缺陷出现的几率, 提升立杆垂直度, 运输与保存过程中确保装配式构件不会发生损坏变形, 装配过程中严格把控误差, 保证脚手架装配完成以后, 符合安全规范标准。

2.5 跨数差异

使用有限元模型计算不同脚手架跨数下脚手架的稳定承载力, 结果见表 4。

表 4 跨数差异下装配式脚手架稳定承载力
Table 4 Stable bearing capacity of fabricated scaffold under span difference

跨数/个	4	6	8
侧向刚度/%	13.7	15.4	20.4
承载力相对临界侧移/mm	3.5	3.6	1.7
单杆承载力/kN	57.986	64.112	61.111

由表 4 可知, 跨数越多, 装配式脚手架的侧向逐渐上升, 也就是说实际施工过程中可考虑增加装配式脚手架的跨数, 以实现脚手架整体结构侧向刚度提升。同时跨数越多, 脚手架的承载力相对临界侧移越小, 这种情况也是由于跨数的增加改变整体脚手架的结构, 使得高宽比降低, 临界侧移也随之降低。研究表明脚手架结构的承载力关联整个结构的水平荷载, 跨数越多, 脚手架越不会受到侧向干扰影响, 侧向干扰越大, 承载力下降越缓慢。表中结果也显示, 跨数越多, 承载力越高, 脚手架更加稳定。

3 结论

脚手架搭建与使用是整个建筑施工过程中较为关键的过程之一，同时也是施工过程中危险系数最高的一项工作，本文研究装配式脚手架结构整体稳定承载力，以便为将来脚手架安全性改善提供研究方向。本文研究主要在 ANSYS 有限元软件中完成，构建装配式脚手架的有限元模型，模拟节点连接刚度、高宽比、集中荷载等因素对于装配式脚手架稳定承载力的影响，试验结果显示，连接刚度越大，装配式脚手架的稳定承载力越高，但是高宽比、初始缺陷与集中应力越大，装配式脚手架的稳定承载力越小。当脚手架跨数为 6 时，脚手架具有较为稳定的承载力，所以搭建装配式脚手架时，需要综合考虑多种因素，才能获得较为良好的施工安全效果。

参 考 文 献

- [1] 李军. 装配整体式混凝土结构工程外脚手架适用性分析研究 [J]. 施工技术, 2020, 49 (S1): 871-874.
- [2] 张爵扬, 张相勇, 陈华周, 等. 石家庄国际会展中心双向悬索结构整体稳定性分析 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41 (3): 156-162.
- [3] 贾世龙, 陈凯荟, 刘莉, 等. 风荷载作用下超高层建筑脚手架立杆稳定性研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2021, 37 (4): 676-684.
- [4] 张漳荣, 周继忠, 姜绍飞. 套管承插式脚手架节点力学性能分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (4): 525-531.
- [5] 杨超, 欧进萍. 防屈曲支撑钢框架模块装配式结构及其抗震性能分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41 (5): 917-927+953.
- [6] 冯磊, 赵宝成, 蒋聪. 摇摆钢支撑结构滞回性能与极限承载力分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42 (6): 10-19+52.
- [7] 李帼昌, 宋呈希, 杨志坚. 新型装配式楼板与钢梁连接节点的承载性能有限元分析 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (12): 126-134.
- [8] 葛志毅, 刘琦璇, 宣中光, 等. 装配式轻钢楼盖受力性能试验研究与参数分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (3): 377-382.
- [9] 石开荣, 许洁槟, 姜正荣, 等. 新型套扣式钢管脚手架节点的水平向抗压性能 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (12): 43-52.
- [10] 李朝阳, 潘新忠, 余波. 建筑施工钢管脚手架非线性分析及现场实测验证 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (9): 112-117.
- [11] 武炜凯, 段金辉, 陈辉国, 等. 基于扣件式脚手架下半刚性连接对 GFRP 圆管弯曲承载能力的影响研究 [J]. 塑料工业, 2019, 47 (11): 102-106.
- [12] 雒敏, 蔺鹏臻, 杨子江, 等. 钢筋超高性能混凝土梁抗剪承载力及力学性能分析 [J]. 桥梁建设, 2021, 51 (6): 53-60.
- [13] 宋玉华. 高层建筑钢结构梁柱节点的冲击荷载性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43 (3): 43-46.
- [14] ABDUL R RASA, 王静峰, 沈奇罕. RECFST 构件抗弯性能和抗弯承载力计算方法 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2019, 42 (2): 230-236.
- [15] 薛建阳, 戚亮杰, 刘祖强. 传统风格建筑钢框架结构抗侧刚度试验研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27 (1): 84-94.