

DOI: 10.7672/sjgs2025180124

变角度附着式升降防护平台设计与应用*

张新¹, 曹瀚¹, 韩硕², 吕家翰¹, 赵方威³

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100; 3. 山东省建设建工(集团)有限责任公司, 山东 济南 250101)

[摘要] 济南中央商务区4-14地块项目1号主楼东、西立面设计为变角度曲面,整体倾斜角度由下至上逐渐减小,最大倾斜角度为 7.11° 。为解决外立面曲面变化导致的外侧防护难以实施等施工难题,基于建筑施工用附着式升降作业安全防护平台概念,设计了一种变角度附着式升降防护平台,通过改变板式支座支设角度实现架体倾斜角度变化,使防护平台架体能在倾斜一定角度状态下正常升降,从而解决变角度曲线形式外立面的施工防护问题。运用有限元软件SAP2000对变角度附着式升降防护平台在正常使用、恶劣天气使用及架体升降3种不同工况下倾斜角度分别为 0° 、 7.11° 、 10° 的架体进行整体力学分析并实践应用。研究结果表明:变角度附着式升降防护平台架体在 0° 、 7.11° 、 10° 3种角度及3种不同工况下的位移值和应力比均随架体倾斜角度变大而明显增加,且均处于规范限值内。

[关键词] 防护平台;附着式;变角度;板式支座;有限元分析;设计

[中图分类号] TU974;TU731.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0124-06

Design and Application of Variable-angle Attached Lifting Protection Platform

ZHANG Xin¹, CAO Han¹, HAN Shuo², LÜ Jiahao¹, ZHAO Fangwei³

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;

2. The First Company of China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd.,

Jinan, Shandong 250100, China; 3. Shandong Construction Engineering Group Co., Ltd.,

Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: The east and west facades of No. 1 tower in plot 4-14 of Jinan Central Business District project feature a variable-angle curved design. The overall inclination angle decreases progressively from the bottom to the top, with the maximum inclination angle of 7.11° . To address construction challenges such as the difficulty in implementing external protection measures caused by this curved facade, a variable-angle attached lifting protection platform is designed based on the concept of the attached lifting safety protection platform for building construction. This design utilizes plate-type supports with adjustable setting angles to alter the inclination angle of the platform frame. This enables the protection platform frame to ascend and descend normally while inclined at a specific angle, thereby adapting to the construction protection requirements of the variable-angle curved facade. The finite element software SAP2000 is employed to conduct a comprehensive mechanical analysis of the platform frame under three distinct working conditions (normal use, inclement weather, and lifting) at inclination angles of 0° , 7.11° , 10° . Practical application is also carried out. The research results show that both the displacement values and stress ratios of the variable-angle attached lifting protection platform frame under the three angles (0° , 7.11° , 10°) and three working conditions significantly increase as the frame inclination angle increases, and all remain within the limits specified by relevant codes.

Keywords: protection platform; attached type; variable angle; plate-type supports; finite element analysis; design

* 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXGC011204)

[作者简介] 张新,副教授,硕士生导师,E-mail: 15969698504@163.com

[收稿日期] 2024-09-18

0 引言

国内目前对附着式升降防护平台有了许多研究和实践。李志强等针对不同工程中建筑外立面角度变化所带来的施工难题,基于升降防护平台概念,通过支座外伸或内缩的方式,使防护平台适应建筑复杂的外立面,达到施工要求,为同类工程提供了借鉴。周磊结合某异形超高层工程所用附着式升降脚手架,运用数值模拟研究方法进行了架体静力和稳定验算、架体倾斜工况下不同倾斜角度的工作性能和架体突坠制动极端工况模拟等相关研究,为附着式升降脚手架设计及应用提供了指导。刘红波等通过现场试验及有限元模拟方式对不同规格的附着式升降防护平台进行了研究,明确了不同支座形式、不同爬升方式、不同构件连接性能等因素对防护平台的力学性能影响。

综上所述,国内研究多集中于常规式或倾斜角度单一的附着式升降防护平台,对变角度附着式防护平台的力学性能研究较少。在实现防护平台变角度提升方面,更多的是通过前后移动支座实现角度变化,对支座本身角度变化实现防护平台架体角度变化的研究较少。本文以济南中央商务区 4-14 地块项目 1 号主楼为研究背景,设计一种变角度板式支座,通过改变板式支座倾斜角度来实现防护平台的变角度效果。运用有限元软件 SAP2000 对附着式升降防护平台在 3 种不同工况下倾斜角度分别为 0°,7.11°,10°的架体进行整体力学分析,研究结果可为类似工程施工提供参考与借鉴。

1 工程概况

济南中央商务区 4-14 地块项目 1 号主楼建筑总高度为 166.6m。该建筑南、北两侧立面为直立设计,东、西立面为变角度设计,由下而上外立面逐渐内收,倾斜角度逐渐减小。结构倾斜角度最大为 7.11°,建筑整体呈倾斜曲面造型(见图 1)。传统形式的外脚手架造型单一,无法满足此工程及其类似工程变角度外立面的施工防护要求,给施工带来困难。

2 升降防护平台设计

由于建筑结构形式为框架-核心筒结构,防护平台支座均采用板式支座,并针对板式支座如何实现变角度进行研究。传统的建筑结构的外立面若存在单一角度变化,常采用变长度水平板式支座,即通过改变槽钢支座在结构边缘的外伸悬臂长度使架体倾斜角度发生改变。但对于结构外立面倾斜角度多变的复杂造型,常采用的水平板式支座无法灵活调整角度,且支座锚固点不便于灵活调整。故需设计一种能适应多种爬升角度,使防护平台能根

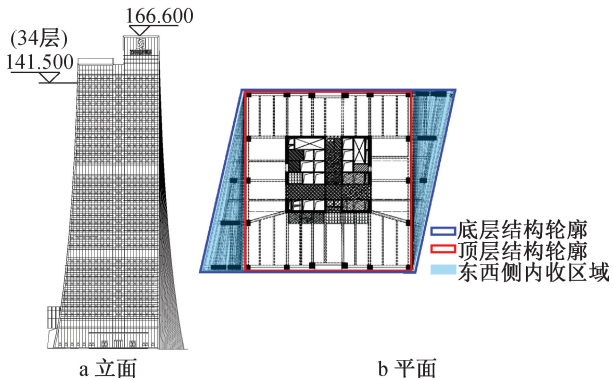


图 1 建筑平、立面

Fig. 1 Plan and facade of the building

据不同外立面造型灵活爬升施工的变角度支座。

2.1 变角度板式支座设计

针对建筑立面特点,设计一种变角度板式支座。变角度板式支座由前段倾斜支撑段及后端锚固段组成。倾斜部分长 600mm,端部设置卸荷装置及防坠装置;锚固部分首尾两端设置 2 道穿板螺栓与结构锚固,总长 1 400mm。两部分均由 [14a 构成,变角度板式支座构造如图 2 所示。

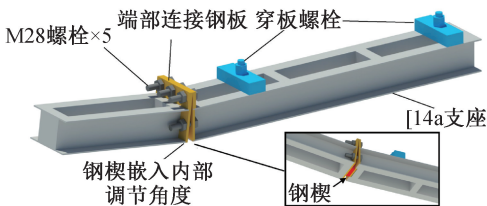


图 2 板式支座构造

Fig. 2 Structure of plate-type support

板式支座断口处顶部设置 2 块 15mm×230mm×70mm 钢板,使用 3 根直径 28mm 螺栓连接;支座槽钢截面处设置 2 块 10mm×230mm×140mm 钢板,于槽钢梁侧设置 2 根直径 28mm 螺栓连接,合计 5 根螺栓设置于断口处。施工时,通过钢楔嵌入断口处实现支座前段向上倾斜,并可通过钢楔嵌入不同深度灵活调整倾斜角度,从而可满足防护平台变角度倾斜爬升的要求。变角度板式支座不同角度下工作如图 3 所示。通过计算与实际工程应用,此种变角度板式支座可使防护平台实现不同角度爬升,为外立面角度持续变化结构提供有效防护。

2.2 架体构造设计

以济南中央商务区 4-14 地块项目 1 号主楼为研究对象,选取 3 机位 2 跨 2 个标准单元架体进行计算。主导轨间距 6m,架体竖向高度 18.4m,标准单元长 6.0m、宽 0.66m。竖向主框架最大支撑跨度为 6.0m,立杆纵向间距 1.5m、横向间距 0.66m。该

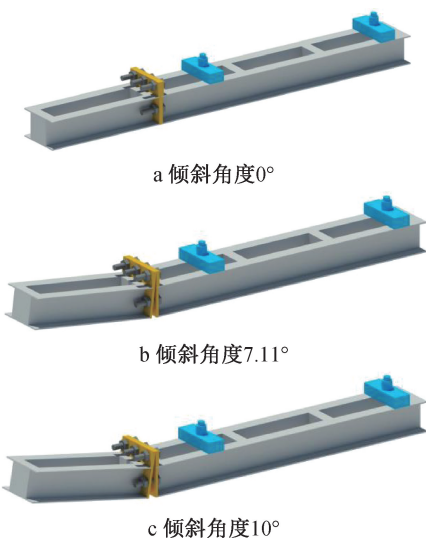


图 3 变角度板式支座不同倾斜角度
Fig. 3 Different inclination angles of variable-angle plate-type support

型附着式升降脚手架主体结构均采用钢材制作,材质主要为 Q235A 级钢。架体具体设计参数为:脚手架单元体长度(架体跨度)6m、步距 2m、高度 18.4m,立杆纵距 1.5m,脚手架宽度(横向间距)0.66m,内排立杆与主体结构距离 0.35m,主框架标准节高度 3.6m,立杆跨数为 4 跨。

变角度附着式升降防护平台架体由立杆、水平杆、斜杆、小横杆、底部桁架杆及导轨组成,杆件尺寸为:底部桁架杆、主框架斜杆均为 40mm×40mm×2.5mm 方钢管,架体小横杆、纵向水平杆、立杆均为 60mm×60mm×3mm 方钢管,架体支座为[14a,架体轨道为[6.3。

3 升降防护平台设计

3.1 模型建立

采用结构分析软件 SAP2000 建立架体模型。选择一个架体标准单元作为研究对象,标准单元架体纵向跨度 6m,宽度 0.66m,步距 2m。除底部桁架斜杆外,架体各杆件两端均按刚接考虑;底部桁架斜杆作为支撑考虑,对 x 向弯矩进行释放。

由于现实情况中架体倾斜角度为 10° 的情况极为罕见,若倾斜角度过大也会影响工人施工,故将防护平台架体倾斜 10° 作为极限情况。分别建立倾斜角度为直立角度 0° 、结构最大倾斜角度 7.11° 及设计最不利情况倾斜 10° 的变角度附着式升降防护平台架体模型,并分别对 3 个角度的架体模型在正常使用、恶劣天气使用及架体升降工况下的力学性能进行分析,研究其力学性能规律。具体模型如图 4 所示,其中模型支座设置在变角度板式支座处,最

底部支座处约束 x,y,z 3 个平动自由度,中部及上部两支座约束 x,y 2 个平动自由度。恶劣天气工况下,由于风荷载取值较大,需在架体端部悬挑部分加设临时拉结措施,故结合实际情况考虑,在架体顶部与底部主框架处各增加 1 道支座。

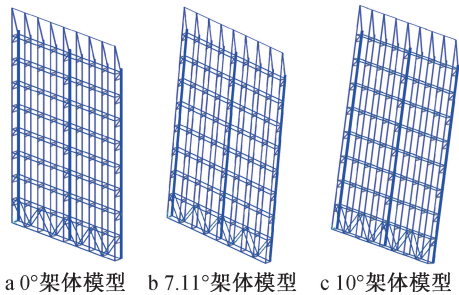


图 4 防护平台架体模型

Fig. 4 Frame body model of the protection platform

3.2 荷载取值

根据 JG/T 546—2019《建筑施工用附着式升降作业安全防护平台》及 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》等相关规范取值,荷载统计如表 1 所示。

表 1 荷载标准值

Table 1 Load standard values

荷载种类	荷载名称	作用位置	荷载取值	
永久荷载	主框架自重 G_1	主框架所有杆件	软件自动计算	
	防护网自重 G_2	架体外侧立杆	0.20kN/m	
	脚手板栏杆等自重 G_3	底部外侧纵向水平杆	0.116kN/m	
		中部外侧纵向水平杆	0.079kN/m	
		底层内侧纵向水平杆	0.304kN/m	
		中部内侧纵向水平杆	0.224kN/m	
升降系统自重 G_4		吊点	2.51kN	
荷载种类	荷载名称	作用位置	荷载取值	
可变荷载	正常使用工况	风荷载 Q_1	架体外侧立杆	1.08kN/m
		施工活荷载 Q_2	外侧横向水平杆	3.70kN/m
			内侧横向水平杆	7.40kN/m
	恶劣天气使用工况	风荷载 Q_1	架体外侧立杆	1.62kN/m
		施工活荷载 Q_2	外侧横向水平杆	3.70kN/m
			内侧横向水平杆	7.40kN/m
	升降工况	风荷载 Q_1	架体外侧立杆	0.90kN/m
		施工活荷载 Q_2	外侧横向水平杆	0.62kN/m
	内侧横向水平杆		1.24kN/m	

3.3 荷载组合

根据 JGJ 202—2010《建筑施工工具式脚手架安全技术规范》规定,计算荷载效应组合如表 2 所示。

不考虑风荷载时:

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{QK} \tag{1}$$

考虑风荷载时:

$$S = \gamma_G S_{GK} + 0.9(\gamma_Q S_{QK} + \gamma_Q S_{WK}) \tag{2}$$

式中: S 为荷载效应组合设计值(kN); γ_G 为恒荷载分项系数,取 1.3; γ_Q 为活荷载分项系数,取 1.5; S_{GK} 为恒荷载效应的标准值; S_{QK} 为活荷载效应的标

表 2 荷载效应组合

Table 2 Combination of load effects	
计算项目	荷载效应组合
纵、横向水平杆,水平支撑桁架,使用过程中的固定吊拉杆和竖向主框架,附墙支座、防倾及防坠落装置	永久荷载+施工活荷载
竖向主框架 脚手架立杆稳定性	①永久荷载+施工活荷载; ②永久荷载+0.9(施工荷载值+风荷载),取2种组合,按不利的计算
选择升降动力设备时 选择钢丝绳及锁具时 横吊梁及其吊拉杆计算	永久荷载+升降过程的活荷载
连墙杆及连墙件	风荷载+5.0kN

准值; S_{wk} 为风荷载效应的标准值。

因此,本节计算架体力学性能选用 2 种荷载组合:①永久荷载+施工活荷载;②永久荷载+0.9(施工荷载值+风荷载),取 2 种组合,按不利的计算。

3.4 有限元分析

采用有限元软件 SAP2000 进行模拟分析,对 3 种倾斜角度及 3 种不同工况下的架体进行模拟分析。以 0°,7.11°,10° 3 种角度架体正常使用工况为例,模拟结果如图 5 所示。

变角度附着式升降防护平台在正常使用、恶劣天气使用及架体升降工况下,架体杆件结构的最大位移值及最大应力比如表 3,4 所示。

整理模拟结果,将 3 种工况下架体不同倾斜角度与最大位移及最大应力比结果进行对比,具体变化规律如图 6 所示。

1)架体最大水平位移值为倾斜 10°架体在正常使用工况下的 6.97mm,小于限值 $L/400 = 4\,400/400 = 11\text{mm}$,符合规范要求。架体在各工况及不同倾斜角度情况下位移较大处均出现在其底部的悬挑部分端部。

2)正常使用工况及架体升降工况下,架体应力比最大值处均位于竖向主框架中的顶部悬挑部分根部位置,最大应力比出现在倾斜 10°架体在正常使用工况下,数值为 0.895,接近规范限值 1;恶劣天气工况下,由于顶部与底部均设置了临时拉结点,架体最大应力比小于其他工况。各工况下架体应力比最大值均小于规范限值 1,满足规范要求。

3)架体的最大位移值在 3 个不同工况下均随架体倾斜角度增大而逐渐增加,且架体在倾斜 0°~7.11°时位移值随倾斜角度变化幅度小于在倾斜 7.11°~10°时位移值的变化幅度。3 种工况下的架体最大应力比随着架体倾斜角度增加不断变大。恶劣天气工况下为了实际现场安全考虑,在架体顶

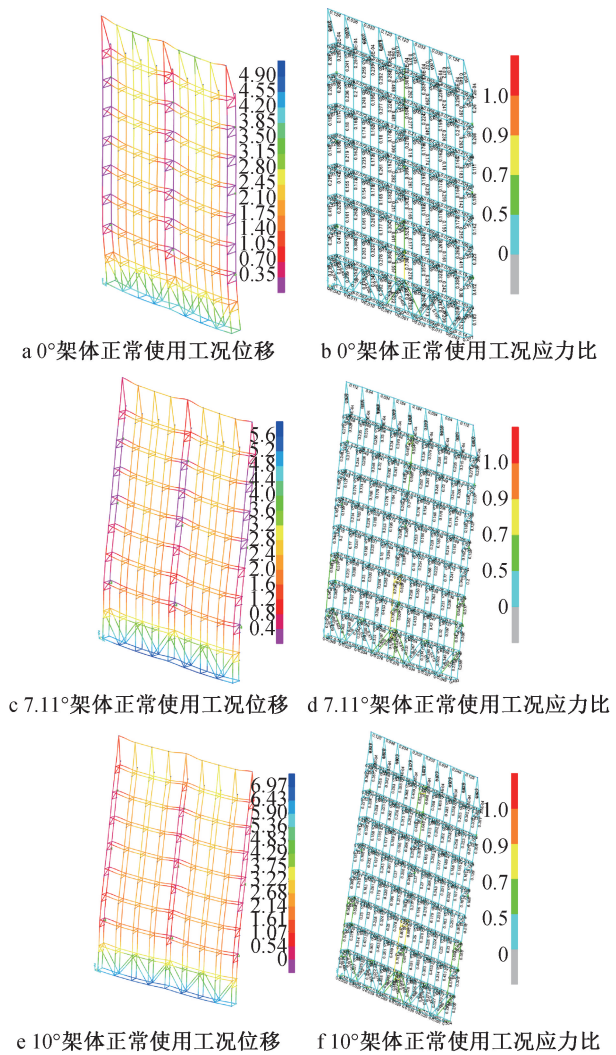


图 5 防护平台正常使用工况模拟结果

Fig. 5 Simulation results of the protection platform under normal operating conditions

Table 3 The maximum displacement values of the frame body under each working condition			
mm			
架体角度/(°)	正常使用工况	恶劣天气工况(顶部拉结)	架体升降工况
0	4.90	2.80	3.64
7.11	5.60	3.64	3.92
10.00	6.97	4.20	4.90

Table 4 The maximum stress ratios of the frame body under each working condition			
架体角度/(°)	正常使用工况	恶劣天气工况(顶部拉结)	架体升降工况
0	0.738	0.597	0.607
7.11	0.829	0.659	0.696
10.00	0.895	0.718	0.768

部与底部设置拉结点,故架体应力比值处于最低值。通过模拟结果可分析得出,架体在倾斜角度

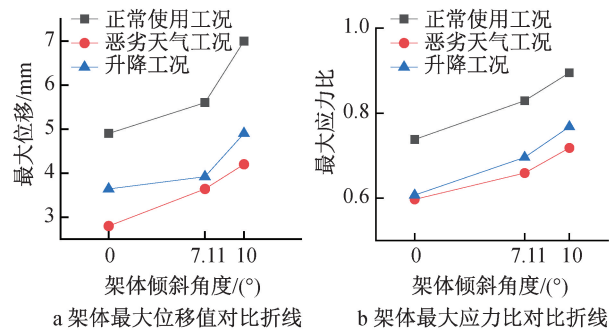


图 6 分析结果对比
Fig. 6 Comparison of analysis results

0°~10°时其最大位移值及最大应力比均符合规范要求,故可在实际工程中予以应用,适用倾斜范围为 0°~10°。

4 施工工艺

4.1 防护平台平面施工设计

由于楼层面积较大,作为外防护的升降防护平台规模也较大,故需对变角度附着式升降防护平台分块分区,这样可抵挡提升时给架体带来的不利变形,以便实际施工中升降平台爬升工作。本工程中南、北立面为垂直造型,设计时将南、北立面防护平台各分为 2 部分;东、西立面存在由下而上内收倾斜设计,故东、西立面单独设计防护平台分区。防护平台总体分为 6 部分,具体单元划分如图 7 所示。实际提升工作中,现场可根据实际情况及施工进度灵活安排防护平台升降工作。提升完毕后,在架体分片接口处采用钢管将 2 片架体连接,增加架体整体稳定性。

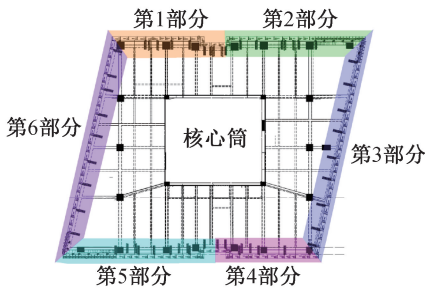


图 7 防护平台平面设计单元划分

Fig. 7 Plane design unit division of protection platform

4.2 防护平台角部调整设计

由于建筑结构外立面为内收设计,且防护平台分片爬升,不同分区架体在结构形状发生变化时需灵活调整以适应结构变化。结合本工程内收造型,防护平台需在提升过程中根据结构形状变化,以长度 660mm 为模数拆除角部防护平台悬挑架体以保证对内收结构的防护作用。以主体结构的西南角位置为例,4~5 层变化过程中,西侧 42 机位处悬挑架体向北侧内收 660mm 以适应结构形状变化;5~6

层变化过程中,南侧架体机位 42 处取消布置,防护平台架体向东侧内收 660mm,其余部分架体转角位置尺寸调整均参照此处灵活实施,具体如图 8 所示。

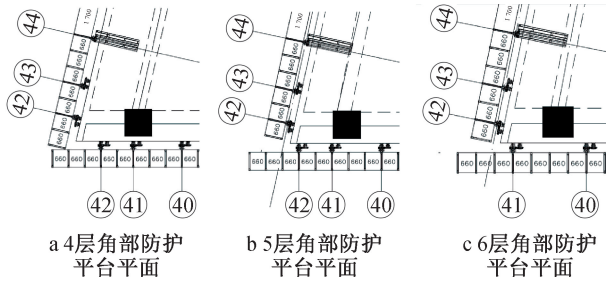


图 8 防护平台角部架体调整

Fig. 8 Adjustment of corner frame body of the protection platform

4.3 特殊节点工艺设计

1)塔式起重机附臂部位工艺设计。防护平台在塔式起重机附臂位置均按一次性断开原则将架体所在位置断开,架体横向断口部分需采用封网防护,以保证防护平台工作安全可靠。由于平台需进行爬升工作,为使防护网片灵活避让塔式起重机附臂,将防护网片设计为可折叠式。当附臂经过时,该位置的防护网片可折叠至临侧固定;附臂经过后,可将网片展开进行防护,增加施工现场便利性。

2)施工电梯部位工艺设计。施工电梯布置在防护平台以下,不与防护平台防护区域重合。当防护平台提升至顶部时,需拆除施工电梯区域防护平台架体,断口处采用钢板网防护。

3)卸料平台部位工艺设计。采用自爬式卸料平台,安装防护平台架体时在防护平台底部预留洞口以安装卸料平台。卸料平台与防护平台相互独立,断口处需采用钢板网密封,做好临边防护。

5 结语

本文依托济南中央商务区 4-14 地块项目 1 号主楼项目,设计一种变角度板式支座,通过嵌入钢楔的角度变化灵活实现支座的支撑角度变化,能在保证其承载力的前提下让防护平台适应不同倾斜角度的工况。对变角度附着式升降防护平台架体进行 3 个角度及 3 个工况下的力学性能计算,应用结果显示,防护平台在 0°~10°倾斜状况下均满足规范要求。

参考文献:

[1] 李志强,王磊,黄京新,等.可斜爬和伸缩升降平台施工技术研究与应用[J].施工技术(中英文),2021,50(20):82-84.
LI Z Q,WANG L,HUANG J X,et al. Research and application of construction technology of inclined climbing and telescopic lifting platform[J]. Construction technology, 2021, 50(20): 82-84.
[2] 李涛,吴明才,宁志学,等.倾斜附着式与集成式升降脚手架

相结合施工技术[J]. 施工技术,2015,44(S2):736-741.

LI T, WU M C, NING Z X, et al. Construction technology of combining inclined attached scaffold with integrated lifting scaffold[J]. Construction technology, 2015, 44(S2): 736-741.

[3] 李聪正, 桂雅云, 刘鹏. 附墙式升降脚手架应对超高层收缩、倾斜及架空结构的综合技术应用[J]. 安徽建筑, 2020, 27(7):56-57.

LI C Z, GUI Y Y, LIU P. Comprehensive technical application of wall-attached lifting scaffold in dealing with shrinkage, inclination and overhead structure of super high-rise buildings[J]. Anhui architecture, 2020, 27(7): 56-57.

[4] 周磊. 倾斜附着式升降脚手架静力稳定及防坠动力特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.

ZHOU L. Study on static stability and anti-falling dynamic characteristics of inclined attached lift scaffold [D]. Jinan: Shandong University, 2020.

[5] 刘红波, 于磊, 陈志华, 等. 全钢集成式附着升降脚手架冲击性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(22):72-79.

LIU H B, YU L, CHEN Z H, et al. Research on impact performance of all-steel integrated attached lift scaffold[J]. Construction technology, 2022, 51(22): 72-79.

[6] 候丹涛, 曾凡奎, 郭君. 附着式升降脚手架现场试验研究与有限元分析[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(5):145-151.

HOU D T, ZENG F K, GUO J. Field test research and finite element analysis of attached lifting scaffolding[J]. Journal of civil engineering and management, 2022, 39(5): 145-151.

[7] 刘晓旭, 马治民, 赵明, 等. 支座形式对附着式升降脚手架影响分析[J]. 施工技术, 2017, 46(18):70-73.

LIU X X, MA Z M, ZHAO M, et al. Effect of support style on performance of attached lifting scaffolds [J]. Construction technology, 2017, 46(18): 70-73.

[8] 戈文思, 殷晨波, 吴福宝. 新型提升方式对附着式脚手架力学特性影响分析[J]. 施工技术, 2015, 44(2):123-125.

GE W S, YIN C B, WU F B. Influence analysis of mechanical properties of new lifting method on attached scaffold [J]. Construction technology, 2015, 44(2): 123-125.

[9] 林冰, 张志超, 张连魁, 等. 附着升降式脚手架构件性能试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(22):106-110.

LIN B, ZHANG Z C, ZHANG L K, et al. Performance test of attached lifting scaffold components[J]. Construction technology, 2021, 50(22): 106-110.

[10] 徐洪广, 王耀, 魏伟, 等. 智能附着式升降脚手架关键技术[J]. 施工技术, 2019, 48(S1):900-904.

XU H G, WANG Y, WEI W, et al. Key technology of intelligent attached lifting scaffold [J]. Construction technology, 2019, 48(S1): 900-904.

[11] 李改华, 郝海涛. 附着式升降作业安全防护平台产业高质量发展研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(16):11-14, 21.

LI G H, HAO H T. Study on the high-quality development of attached lifting work safety protection platform industry [J]. Construction technology, 2021, 50(16): 11-14, 21.

[12] 武超, 孙桑, 伍勇军, 等. 新型曳引式内置施工升降机设计研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11):102-106.

WU C, SUN S, WU Y J, et al. Research on design of new traction built-in construction elevator[J]. Construction technology, 2023, 52(11): 102-106.

(上接第 91 页)

SUN H B, CHEN T. Key construction control techniques for Sanguantang Bridge in Ningbo [J]. Bridge construction, 2020, 50(5):119-124.

[7] 余毅, 彭旭民. 平塘特大桥上部结构施工方案优化措施分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1):104-108.

YU Y, PENG X M. Analysis of optimization measures to construction schemes for superstructure of Pingtang Bridge[J]. Bridge construction, 2019, 49(S1): 104-108.

[8] 刘传志, 妥鹏. 平潭海峡公铁两用大桥元洪航道桥桥塔墩顶钢梁施工技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(2):39-43.

LIU C Z, TUO P. Construction techniques for pier-top steel girders of Yuanhong Ship Channel Bridge of Pingtan Straits Railcum-road Bridge[J]. World bridges, 2019, 47(2): 39-43.

[9] 陈涛, 顾惠明, 王吉. 宁波新典桥拱肋合龙施工控制关键技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(S1):78-84.

CHEN T, GU H M, WANG J. Key arch rib closing control techniques for Xindian Bridge in Ningbo [J]. World bridges, 2023, 51(S1): 78-84.

[10] 陈涛, 袁建新. 宁波三官堂大桥主桥合龙控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(4):141-146.

CHEN T, YUAN J X. Key closure control techniques for main bridge of Sanguantang Bridge in Ningbo[J]. Bridge construction, 2021, 51(4):141-146.

[11] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 铁路桥梁钢结构设计规范:TB 10091—2017[S]. 北京:中国铁道出版社, 2018.

China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. Code for design on steel structure of railway bridge: TB 10091—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

[12] 中铁工程设计咨询集团有限公司. 铁路桥涵混凝土结构设计规范:TB 10092—2017[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017.

China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd. Code for design of concrete structures of railway bridge and culvert: TB 10092—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[14] 陈涛, 邱景奎, 王吉. 整体顶推提篮拱桥施工过程中力学性能分析[J]. 中外公路, 2025, 45(3):145-152.

CHEN T, QIU J K, WANG J. Analysis of mechanical properties of integral jacking basket arch bridge during construction [J]. Journal of China & foreign highway, 2025, 45(3): 145-152.