

DOI: 10.7672/sgjs2026020136

超高层建筑整体钢平台模架体系抗风性能分析*

张鑫鑫^{1,2},任宝双^{1,2},汪刚³,汪钲东⁴

(1. 中交建筑集团有限公司,北京 101304; 2. 中交集团绿色建筑技术研发中心,北京 101304; 3. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044; 4. 中交建筑集团有限公司第一工程分公司,江苏 南京 211103)

[摘要] 在超高层建筑建造过程中,整体钢平台模架体系抗风性能关系到结构稳定性,尤其是沿海强风区域。针对整体钢平台模架体系,通过整体风洞试验进行风荷载特性分析,并研究外挂架挡风率和试验高度的影响。采用SAP2000软件建立模架体系整体模型,并开展风振响应动力学计算,分析结构动力特性、位移响应和加速度响应,计算得到正常施工状态和爬升状态下风振系数,并与规范值进行比较。研究表明,模架体系在爬升后的风力系数明显高于爬升前,体型系数在顺风向极大值分别达到1.3(爬升前)和1.8(爬升后);8级风力下爬升状态位移响应高于12级风力下正常施工状态,爬升状态位移响应较显著;爬升后的模架体系加速度响应高于爬升前,且高外挂架挡风率下爬升前后响应值差距明显;正常施工状态对应的12级风和爬升状态对应的8级风状态下风振系数分别取为1.3~1.6和1.4~1.8。

[关键词] 高层建筑;钢平台;抗风性能;体型系数;风振系数

[中图分类号] TU974

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0136-06

Analysis of the Wind Resistance Performance of the Integral Steel Platform Formwork Equipment for Super High-rise Buildings

ZHANG Xinxin^{1,2}, REN Baoshuang^{1,2}, WANG Gang³, WANG Zhengdong⁴

(1. CCCC Construction Group Co., Ltd., Beijing 101304, China;

2. Technology R & D Center of CCCC Construction Group Co., Ltd., Beijing 101304, China;

3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

4. The First Engineering Branch of CCCC Construction Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211103, China)

Abstract: During the construction of super high rise buildings, the wind resistance performance of the integral steel platform formwork equipment is related to the structural stability, especially in the coastal strong wind area. For the equipment, the wind load characteristics were analyzed through the integral wind tunnel test, and the effects of the wind resistance rate of the external scaffolding and the test height of the equipment were studied. SAP2000 was used to establish the overall model of the equipment, and the dynamic calculation of wind vibration response was carried out. The dynamic characteristics, displacement response and acceleration response of the structure were analyzed, and the wind vibration coefficient under normal construction state and climbing state was calculated and compared with the specification value. The results show that the wind coefficient of the equipment after climbing is significantly higher than that before climbing, and the shape coefficient reaches 1.3 (before climbing) and 1.8 (after climbing), respectively. The displacement response in climbing state under the wind force of 8 is higher than that under the normal construction state under the wind force of 12, and the displacement response in climbing state is more significant. The acceleration response of the equipment after climbing is higher than that before climbing, and the difference between the response values before and after climbing is obvious under the high wind resistance rate of the external scaffolding. The wind-

* 中交集团科技研发重大项目(2021-ZJKJ-11)

[作者简介] 张鑫鑫,工程师,E-mail: zhang_xin_xin@foxmail.com

[收稿日期] 2025-10-18

induced vibration coefficient under the 12-level wind corresponding to the normal construction state and the 8-level wind corresponding to the climbing state are 1.3~1.6 and 1.4~1.8, respectively.

Keywords: tall buildings; steel platform; wind resistance performance; shape coefficient; wind vibration coefficient

0 引言

当前,框架-核心筒结构是超高层建筑中的重要构型,应用广泛,尤其在 250m 以上的超高层建筑中应用效果良好。其中,核心筒建造的典型代表技术为整体集成平台模架施工技术,在十余年的发展更新中,逐渐由传统重型吊装钢平台体系迭代为轻型爬升模板体系^[1-4],凸显出结构灵活、可适应复杂结构形式、用材少、轻质高强、易于推广、可重复利用等优点。鉴于整体钢平台技术的独特优势,在超高层建筑建造中得到了越来越广泛的应用。

然而,由于爬升模板体系的逐步轻型化,风荷载对高空作业钢平台的控制作用不可忽视,尤其是需评估强风天气下模板体系的安全性。目前相关学者多关注整体钢平台模架体系承载力^[5-6],关于临时结构抵御强风荷载的动力响应研究较少。为实现强风环境中对整体钢平台模架体系抗风性能的评估,需开展强风荷载作用下的挡风系数和风振系数研究。因此,本文针对整体钢平台模架体系,借鉴对超高层建筑开展的结构风荷载研究^[7-8],制作了风洞测力模型,开展了不同挡风率和试验高度下的风洞试验,确定了模架体系体型系数,通过分析结构动力特性、位移响应、加速度响应和风振系数,对结构风振响应进行了研究。

1 风洞试验概况

1.1 试验风场与模型

本次试验在北京交通大学 BJ-1 回流式边界层风洞中进行,试验模拟风场为缩尺比例 1:50 的 B 类风场,测得湍流强度为 8%~10%,其随高度变化曲线如图 1 所示。

整体钢平台及附着核心筒模型主要由 ABS 材料制作,核心筒根据工程实际情况在相应位置开洞,如图 2a 所示。通过论证设计了如图 2b 所示试验抬高装置,用以消除试验中存在的风洞边界层效应。风洞试验中,通过六分量测力天平开展测力试验,设定风速 $v=10\text{m/s}$ 。试验设定风向角为逆时针增加,以 0° 风向角为 x 向、以 90° 风向角为 y 向开展风洞测试,如图 2c 所示。

1.2 数据分析方法

定义 y 轴为 0° 风向角方向, x 轴为 90° 风向角方向,参考点设置于整体钢平台模型结构顶点高度

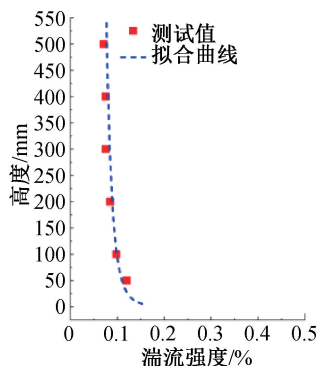
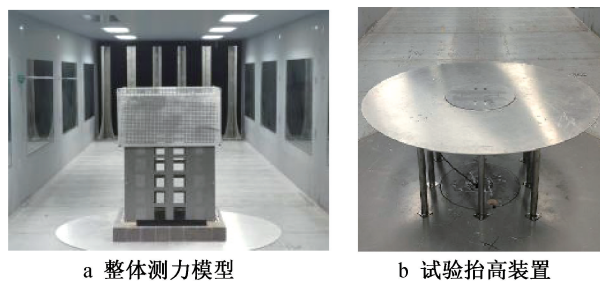


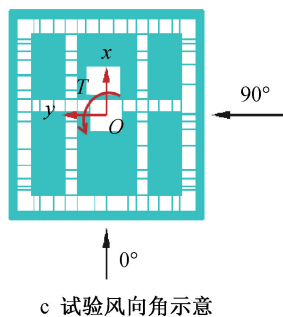
图 1 平均风速与湍流强度

Fig. 1 Average wind speed and turbulence intensity



a 整体测力模型

b 试验抬高装置



c 试验风向角示意

图 2 测力模型及试验装置

Fig. 2 Force measuring model and test device

处。在风洞试验中,通常采用无量纲压力系数分析建筑表面风压^[9-10]:

$$C_{pn}(t) = \frac{P_n(t) - P}{P_0 - P} \quad (1)$$

式中: $C_{pn}(t)$ 为测点 n 处 t 时刻的压力系数; $P_n(t)$ 为扫描阀在测点 n 处 t 时刻实测压力值; P_0, P 分别为参考高度处的总压和静压。

通过式(1)可计算得到测点表面风压系数,将风压系数进行合成,可得到整体钢平台迎风范围内总的风阻力,用 x, y 向及扭转向风荷载表示。风阻力对迎风面速度压进行无量纲化处理,得到阻力

系数和基底力矩系数:

$$\begin{cases} C_{F_x} = \frac{F_x}{\rho v^2 A/2} \\ C_{F_y} = \frac{F_y}{\rho v^2 A/2} \\ C_{M_z} = \frac{M_z}{\rho v^2 AB/2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{F_x} 为 x 向风力系数; C_{F_y} 为 y 向风力系数; C_{M_z} 为扭转向风力系数; F_x, F_y, M_z 分别为测得的试验模型 x, y 向基底剪力和基底扭矩; $\rho v^2/2$ 为模型参考高度处的速度压; A 为挡风面积; B 为钢平台模型迎风面最大宽度。

2 风洞试验结果

2.1 挡风率影响

本试验基于整体钢平台外挂架模型,针对整体钢平台爬升前后(模型高度相差 80mm,结构实际高度相差 4m)的不同试验高度,按照标准化模数,设定 4 种外挂架挡风率,分别为 63%, 77%, 88%, 100%,用以开展风洞试验。4 种外挂架挡风率对应的模型爬升前工况编号依次为 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 爬升后工况编号依次为 2-1, 2-2, 2-3, 2-4。模型爬升前和爬升后各风向平均风力系数随风向角的变化如图 3 所示。

由图 3 可知,由于模型对称,其爬升前后的平均风力系数均具有良好的对称性,极值分别出现在 $0^\circ \pm 30^\circ$ 和 $180^\circ \pm 30^\circ$ 风向角附近,最大值分别达 1.4,

1.47。钢平台爬升前,由于脚手架板和内部墙体的阻挡作用,风荷载随挡风率的增大而增大。钢平台爬升后,模架体系风力系数较爬升前增大,低外挂架挡风率(63%, 77%)模架表现更明显。这是由于内部墙体的阻挡作用消失,荷载通过内部空腔作用于架体背风面,架体整体反而受到较大的风荷载作用。由于模型的对称性, y 向平均风力系数在爬升前后均具有良好的反对称性,其分布规律与 x 向一致。扭转向平均风力系数随风向角变化呈现规律性波动,随挡风率增大而增大,爬升前后呈现出相似分布规律。 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 风向角下扭转向平均风力系数基本为零,表明在结构正方向角度扭转效应较小。

2.2 相对高度影响

不同外挂架挡风率情况下,整体钢平台爬升前 2m 高度处和爬升后 6m 高度处的最大平均风力系数如表 1 所示。由表 1 可知,模架体系爬升后 x, y 向及扭转向最大平均风力系数均大于爬升前,且均随外挂架挡风率的增大,爬升前后最大平均风力系数比值逐渐减小,在外挂架完全封闭的状态下,模架爬升前后所受平均风荷载大致相同,模架体系爬升后由于内部遮挡物变少,导致结构所受风荷载增大,而外挂架挡风率的增加可减弱所受荷载差异。

2.3 体型系数确定

JGJ 459—2019《整体爬升钢平台模架技术标准》提出,整体钢平台模架风荷载体型系数按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》的规定取值,

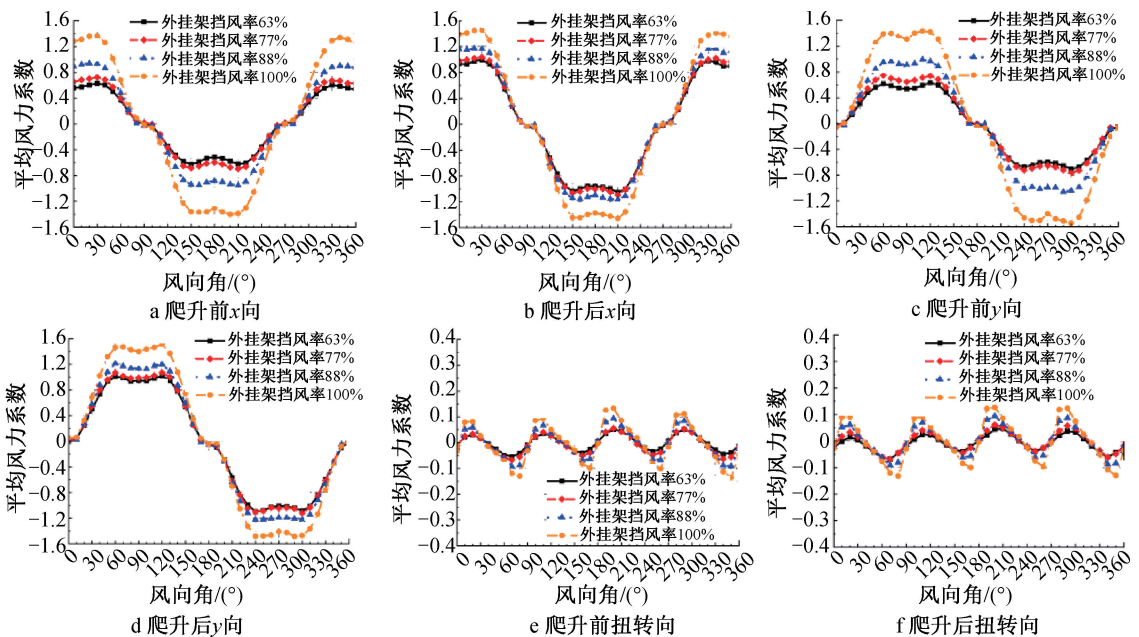


图 3 平均风力系数

Fig. 3 Average wind coefficient

表 1 模架爬升前后最大平均风力系数

Table 1 The maximum average wind coefficient before and after formwork climbing

外挂架 挡风 率/%	爬升前 x 向最大平均 风力系数	爬升后 x 向最大平均 风力系数	爬升前后 x 向最大平均 风力系数 比值	爬升前 y 向 最大平均风 力系数	爬升后 y 向 最大平均 风力系数	爬升前后 y 向 最大平均风 力系数比值	爬升前扭转 向最大平均 风力系数	爬升后扭转 向最大平均 风力系数	爬升前后扭 转向最大平 均风力系数 比值
63	1.000	1.660	1.660	1.110	1.730	1.560	0.086	0.108	1.260
77	0.940	1.420	1.510	1.000	1.450	1.450	0.087	0.089	1.020
88	1.070	1.330	1.240	1.200	1.380	1.150	0.106	0.106	1.000
100	1.400	1.460	1.040	1.550	1.520	0.980	0.136	0.132	0.970

其规定了全封闭与敞开、框架、开洞墙两类不同作业脚手架的风荷载体型系数分别为 1.0φ , 1.3φ , 其中 φ 为脚手架挡风系数, 计算公式如下:

$$\varphi = 1.2 \frac{A_n}{A_w} \quad (3)$$

式中: A_n 为脚手架迎风面挡风面积; A_w 为脚手架迎风面积。

本研究所得整体钢平台模架体系在爬升前的体型系数确定为顺风向取值 1.3, 横风向取值 0.5, 扭转向取值 0.2; 爬升后的体型系数确定为顺风向取值 1.8, 横风向取值 0.5, 扭转向取值 0.2, 其顺风向体型系数高于规范取值。

3 风振响应分析

3.1 结构动力特性

超高层建筑建造过程中, 整体钢平台结构随核心筒的升高不断爬升, 在施工过程中主要存在 2 种状态, 即用于钢筋绑扎、模板提升、混凝土浇筑的正常施工状态和支撑于核心筒向上的爬升状态。

利用 SAP2000 软件建立整体钢平台模架体系有限元模型, 计算得到爬升前后前 10 阶自振周期如图 4 所示。由图 4 可知, 爬升前受到底部牛腿约束时的结构自振频率高于爬升时受到顶部导轨柱约束时的结构自振频率, 其中前 3 阶频率比值分别为 2.45, 2.98, 2.88, 表明爬升前的模架体系整体刚度较大。

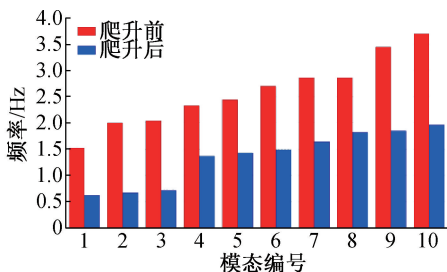


图 4 结构前 10 阶自振频率

Fig. 4 First 10 orders of natural frequency of the structure

整体钢平台在爬升前后的一阶振型动力特性如图 5 所示。由图 5 可知, 爬升前模架体系由于受到底部牛腿的约束, 其主要振型为扭转+ x 向平动; 爬升后

结构仅受到顶部导轨的约束, 其主要振型为 x 向平动。

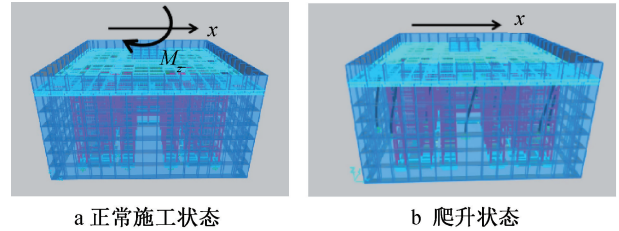


图 5 结构一阶振型动力特性

Fig. 5 Dynamic characteristics of first order mode shapes of the structure

3.2 位移响应

根据风洞试验结果, 采用时域法对建筑加速度响应进行了分析, 结构在正常施工状态时的风力等级为 12 级, 在爬升状态时的风力等级为 8 级, 基本风压按 8 级风和 12 级风分别取为 0.268 , 0.851kN/m^2 。

对正常施工状态和爬升状态下整体钢平台爬升前后位移响应进行分析, 由于结构对称性, 可取 90° 风向角范围内结构位移响应开展分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 对应工况下 x 向位移均值大于 y 向位移均值, 表明整体钢平台 x 向抗侧刚度整体弱于 y 向; 不同施工状态下整体钢平台结构顶部位移均值随风向角的变化规律一致, 爬升状态下结构位移响应高于正常施工状态下。

3.3 加速度响应

模架体系在不同风向角下 x, y 向加速度响应如图 7 所示。由图 7 可知, 模架体系加速度响应基本随外挂架挡风率的增大而增大, 随风向角的变化较小。低外挂架挡风率 (63%, 77%) 下模架体系加速度响应变化趋势基本一致, 爬升前后加速度响应较接近; 高外挂架挡风率 (88%, 100%) 下模架体系加速度响应变化趋势基本一致, 爬升前后加速度响应差距明显, 爬升后加速度均方根最高可达 0.255m/s^2 , 爬升前加速度均方根最高达 0.2m/s^2 。因此, 为减小模架体系加速度响应, 应避免高挡风率外挂架的应用。

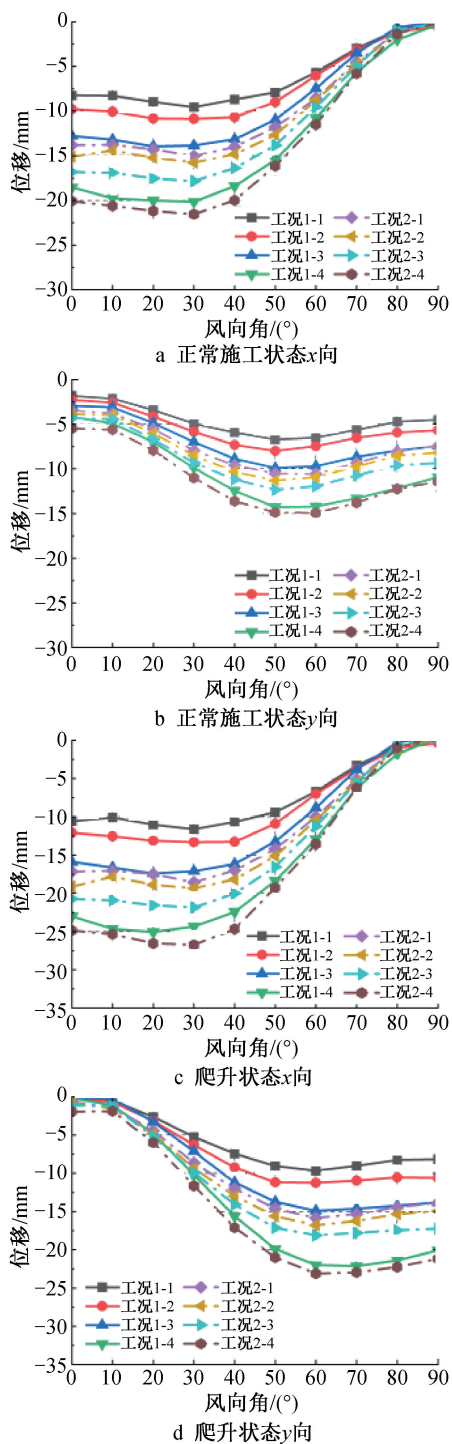


图6 不同施工状态下结构顶部位移均值

Fig. 6 Average displacement of the top of the structure under different construction conditions

3.4 风振系数

通过惯性力法求解模架体系等效静风荷载,继而求得结构风振系数,以表征结构动力响应。 z 向风振系数 $\beta(z)$ 计算如下:

$$\begin{cases} \beta(z) = \frac{\bar{F}(z) + \hat{F}(z)}{\bar{F}(z)} \\ \bar{F}(z) = gM\sigma_a \end{cases} \quad (4)$$

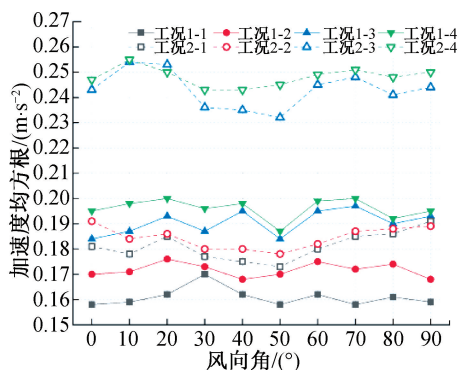


图7 结构顶部加速度响应

Fig. 7 Acceleration response at the top of the structure

式中: $\bar{F}(z)$ 为平均风荷载,可由结构基底剪力平均值求出; g 为峰值因子; M 为结构质量; σ_a 为加速度标准差。

不同施工状态下模架体系在 x, y 向的风振系数如图8所示。由图8可知,对于同一风向角,爬升状态下风振系数高于正常施工状态下,风振响应更敏感。其中, x 向风振系数随风向角逐渐增大, y 向风振系数随风向角逐渐减小,正常施工状态和爬升状态下风振系数在良态响应范围(x 向 $0^\circ \sim 60^\circ$, y 向 $30^\circ \sim 90^\circ$) 内的值分别达 $1.3 \sim 1.6$ 和 $1.4 \sim 1.8$ 。

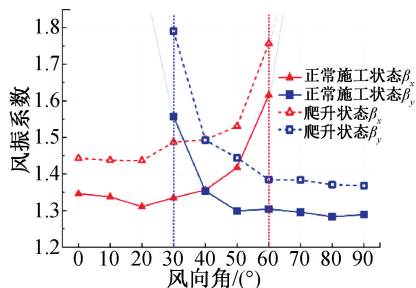


图8 不同施工状态下模架体系风振系数

Fig. 8 Wind vibration coefficient of formwork system under different construction conditions

相关规范指出,一般施工过程中,整体钢平台模架在爬升阶段、作业阶段的风振系数可取为 $1.0 \sim 1.3$,也可按实际情况选取,规范取值并未给出确定的取值来源,当前取值也低于本研究提出的风振值。因此,建议对规范值适当补充,以满足强风荷载安全性要求。

4 结语

1) 分别开展了模架体系在8种工况下的风洞试验,对外挂架挡风率、相对高度的影响进行分析,风荷载随外挂架挡风率的增加而增加,模架体系在爬升后的风力系数明显高于爬升前。

2) 通过测力试验给出了爬升前后模架体系体型系数建议值,爬升前后顺风向体型系数最大值分

别可达 1.3, 1.8, 高于规范值。

3) 对模架体系开展动力特性分析, 8 级风力下爬升状态位移响应高于 12 级风力下正常施工状态, 爬升状态位移响应较显著。

4) 爬升后的模架体系加速度响应高于爬升前, 且高外挂架挡风率下爬升前后响应值差距明显。

5) 本研究给出正常施工状态对应的 12 级风和爬升状态对应的 8 级风状态下风振系数分别取为 1.3~1.6 和 1.4~1.8, 建议对规范值进行适当补充, 以满足强风荷载安全性要求。

参考文献:

- [1] 刘玉涛, 陈万里, 黄苏梦, 等. 轻量化整体液压顶升式钢平台在宁波曼哈顿大厦项目中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(14): 35-40, 46.
LIU Y T, CHEN W L, HUANG S M, et al. Application of lightweight integrated hydraulic jacking steel platform in Ningbo Manhattan Building project [J]. Construction technology, 2024, 53(14): 35-40, 46.
- [2] 房霆宸, 龚剑, 吴联定. 整体空中造楼模架装备自动开合模板系统研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22): 107-112.
FANG T C, GONG J, WU L D. Research on automatic opening and closing formwork system for overall aerial building formwork equipment [J]. Construction technology, 2024, 53(22): 107-112.
- [3] 许佳林, 孟召虎, 汉光昭, 等. 住宅造楼机智能建造系统设计研究与应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22): 123-128.
XU J L, MENG Z H, HAN G Z, et al. Research and application of intelligent construction system for residential building machine [J]. Construction technology, 2024, 53(22): 123-128.
- [4] 张鑫鑫, 张克胜, 任宝双, 等. 超高层建造整体钢平台模架力学性能分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1858-1863.
ZHANG X X, ZHANG K S, REN B S, et al. Analysis on the

mechanics performance of the integral steel platform formwork system for super high-rise construction [J]. Building structure, 2023, 53(S2): 1858-1863.

- [5] 陈卫. 迪拜罗塔纳超高层建筑物框筒结构受力风洞试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(5): 142-146.
CHEN W. Wind tunnel test research on force of frame-tube structure of the Dubai Rotana tall building [J]. Construction technology, 2025, 54(5): 142-146.
- [6] 黄立敏. 迪拜罗塔纳超高层框架核心筒结构风荷载反演分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(3): 94-98, 128.
HUANG L M. Wind load inversion analysis of Dubai Rotana super high-rise frame core tube structure [J]. Construction technology, 2024, 53(3): 94-98, 128.
- [7] 龚剑, 房霆宸. 整体钢平台模架装备技术研发及应用[J]. 建筑结构, 2021, 51(17): 141-144, 42.
GONG J, FANG T C. Technology research and application of the integral steel platform formwork equipment [J]. Building structure, 2021, 51(17): 141-144, 42.
- [8] 闫志峰. 大跨度高载重移动模架精细化有限元模型分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(5): 115-119, 126.
YAN Z F. Refined finite element model analysis of a large-span high-load mobile formwork system [J]. Construction technology, 2025, 54(5): 115-119, 126.
- [9] 张鑫鑫, 李波, 张石, 等. 基于北京中心城区实测的城市边界层风场特性[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 109-117.
ZHANG X X, LI B, ZHANG S, et al. Characteristics of wind field in urban boundary layer based on measured data in central Beijing [J]. Journal of building structures, 2022, 43(3): 109-117.
- [10] 李波, 杨庆山, 田玉基, 等. 锥形超高层建筑脉动风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 8-16.
LI B, YANG Q S, TIAN Y J, et al. Characteristics of turbulent wind load of tapered super-tall building [J]. Journal of building structures, 2010, 31(10): 8-16.
- [11] 朵永玉, 岳清瑞, 刘晓刚. 碳纤维复合材料拉索的锚固体系研究进展[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(8): 97-113.
DUO Y Y, YUE Q R, LIU X G. Research progress on anchoring systems for carbon fiber composite cable [J]. Journal of building structures, 2025, 46(8): 97-113.
- [12] 邓娟妮, 刘雁冰, 李华, 等. 基于长标距光纤光栅传感技术的智能碳纤维筋性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(7): 2815-2826.
DENG L N, LIU Y B, LI H, et al. Performance of intelligent CFRP tendon based on long gauge FBG sensing technology [J]. Journal of railway science and engineering, 2024, 21(7): 2815-2826.
- [13] 张士友, 祝思伟. 实景建模+BIM技术在房建施工项目管理中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(19): 110-115.
ZHANG S Y, ZHU S W. Application of real-scene modeling and BIM technology in building construction management [J]. Construction technology, 2024, 53(19): 110-115.

(上接第 135 页)

- [8] 于鹏远, 罗维成. BIM+三维扫描技术在弧形构筑物施工中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(16): 110-113.
YU P Y, LUO W C. Application of BIM + 3D scanning technology in construction of arc structure [J]. Construction technology, 2024, 53(16): 110-113.
- [9] 薛桂香, 苗敬礼, 张丹, 等. 基于 VMD-CNN-BiLSTM 人工智能算法的节段拼装自复位桥梁地震响应预测方法[J]. 中国公路学报, 2025, 38(7): 75-86.
XUE G X, MIAO J L, ZHANG D, et al. Segment self-centering bridge seismic response prediction algorithm based on VMD-CNN-BiLSTM artificial intelligence algorithms [J]. China journal of highway and transport, 2025, 38(7): 75-86.
- [10] 赵敏如. 碳纤维的产业现状和发展前景分析[J]. 现代塑料加工应用, 2025, 37(2): 9-11, 47.
ZHAO M R. Analysis of the industry status and development prospects of carbon fiber [J]. Modern plastics processing and applications, 2025, 37(2): 9-11, 47.