

DOI: 10.7672/sgjs2025200117

预应力木结构施工技术与模拟分析*

王 龙¹, 欧亚洲¹, 陈 华¹, 郭志鑫¹, 杜艳超¹, 李建涛¹,
张 晋², 秦德凯², 李 伟³

(1. 中建八局总承包建设有限公司, 上海 201203; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189;
3. 苏州昆仑绿建木结构科技股份有限公司, 江苏 苏州 215164)

[摘要] 以长三角生态绿色一体化发展示范区嘉善展示馆预应力木结构施工为研究对象, 探讨预应力大跨胶合木结构关键施工技术和施工模拟分析。通过 Revit 软件对钢木结构施工过程进行模拟推演, 实现施工可视化, 使木构件在电脑端预先精确拼装。通过 MIDAS Gen 软件仿真模拟, 比较 2 种不同施工方案, 重点分析施工过程中杆件位移和内力变化。结果表明, 先架设梁、柱再张拉预应力索的方案, 在控制内力和变形方面表现更优, 有效提高了施工效率, 并确保了结构整体稳定与安全。此外, 模拟结果与现场监测数据的对比分析进一步验证了模拟结果的准确性, 为施工方案的优化提供了科学依据。

[关键词] 木结构; 预应力; 弯矩; 位移; 数值模拟; 监测; 施工技术

[中图分类号] TU366.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0117-06

Construction Technology and Simulation Analysis of Prestressed Wood Structures

WANG Long¹, OU Yazhou¹, CHEN Hua¹, GUO Zhixin¹, DU Yanchao¹,
LI Jiantao¹, ZHANG Jin², QIN Dekai², LI Wei³

(1. China Construction Eighth Bureau General Contracting Construction Co., Ltd., Shanghai 201203, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;
3. Suzhou Crownhomes Wood Structure Technology Co., Ltd.,
Suzhou, Jiangsu 215164, China)

Abstract: Taking the prestressed wood structure construction of Jiashan Exhibition Hall in the Yangtze River Delta ecological green integration development demonstration area as the research object, the key construction technology and construction simulation analysis of prestressed large-span glued laminated wood structure are discussed. Through Revit software, the construction process of steel-wood structure is simulated and deduced, and the construction visualization is completed, so that the wood components can be assembled accurately in advance at the computer end. Through the simulation of MIDAS Gen software, two different construction schemes are compared, and the displacement and internal force changes of the components during the construction process are analyzed. The results show that the scheme of erecting beam-column first and then tensioning prestressed cable has better performance in controlling internal force and deformation, which effectively improves the construction efficiency and ensures the overall stability and safety of the structure. In addition, the comparison between the simulation results and the field monitoring data further verifies the accuracy of the simulation results and provides a scientific basis for the optimization of the construction scheme.

Keywords: wood structure; prestressing; bending moment; displacement; simulation; monitoring; construction

* 中建八局总承包建设有限公司课题: 双碳战略下展馆建筑低碳建造关键技术研究(2022-01)

[作者简介] 王 龙, 高级工程师, E-mail: 361312461@qq.com

[收稿日期] 2025-04-20

0 引言

住房和城乡建设部 2022 年发布的《“十四五”

全国城市基础设施建设规划》中,提出了绿色低碳、安全韧性的工作原则,以及建设宜居、绿色、韧性、智慧、人文城市的目标。此外,木材具有轻质高强的特性,结合科学合理的结构设计,使木结构建筑具备优异的抗震性能。同时,木结构在能耗、碳排放、空气污染、生态资源消耗和水污染等方面的表现均优于钢结构和混凝土结构。这些特性不仅契合国家“双碳”目标,也推动了木结构建筑在过去 10 年中的研究与应用快速增长。

在过去的几十年里,使用木材作为建筑材料的情况有所增加。北美、欧洲、日本和澳大利亚等国家和地区已广泛应用木结构,尤其是在低层民用住宅领域。然而,高层、大跨及复杂曲面造型带来的技术难题,仍制约着木结构的进一步发展。预应力大跨胶合木结构是指由胶合木构件、预应力钢拉索等钢构件组成的结构,提供了解决这些挑战的有效方案。目前,国内外对该体系的研究与应用尚不成熟,主要集中于力学性能探索,无系统的设计与施工方法。此外,施工阶段预应力的精确施加与质量控制至关重要,直接决定结构性能的兑现。尽管面临挑战,随着绿色建筑理念的推广和木材加工技术的提升,预应力大跨胶合木结构有望在未来建筑领域发挥更大作用。

本文依托长三角生态绿色一体化发展示范区嘉善展示馆项目,采用 MIDAS Gen 有限元软件对整个施工过程进行仿真模拟。采用创新的施工方法,比较 2 种不同施工方案,计算分析该结构在施工过程中杆件位移和内力变化情况,并与施工现场监测数据进行对比分析,得出施工过程中结构内力、挠度等变化规律,形成最优施工方案。

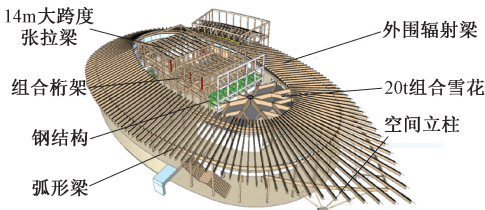
1 工程概况

长三角生态绿色一体化发展示范区嘉善展示馆是一个创新性的建筑项目,位于浙江省嘉善县西塘镇。该项目占地面积 20 005m²,建筑面积 12 821.79m²,地上 2 层,1 层为混凝土框架结构,2 层为胶合木框架结构,局部辅以钢结构支撑。如图 1a 所示,建筑整体形态设计灵感来源于“一叶扁舟”,象征着示范区在生态绿色发展中的航向和愿景。

该项目共使用 1 200 根木结构构件,总体积 750m³,多为弧形和放射形分布,构造复杂(见图 1b)。项目在设计和施工中采用多种先进技术,包括钢板与木结构植筋技术、18.5m 大跨度钢拉索与木结构张拉预应力技术及正交胶合木(CLT)整体拼装式组合楼板技术。这些技术的运用不仅提高了



a 项目效果



b 结构层次

图 1 嘉善展示馆项目效果及结构层次
Fig. 1 Effect and structure level of Jiashan Exhibition Hall project

建筑结构稳定性和耐久性,也体现了绿色建筑和可持续发展理念。

2 施工方案

2.1 整体施工流程

结合现场混凝土结构施工进度,并考虑整体结构体系稳定性,将木结构分为 8 个区域,由中心向四周组织施工。如图 2 所示,先进行中心钢结构施工(图 2 中 1 区),使后续木结构在此基础上搭接,以提升木结构稳定性。然后南、北两侧木结构按进场顺序依次施工,整体施工顺序为 1→2→3→4→5→6→8→7。根据施工流程,通过 Revit 软件对钢木结构施工过程进行模拟推演,并对中心会议室预应力索-胶合木结构施工全过程进行数值仿真模拟。

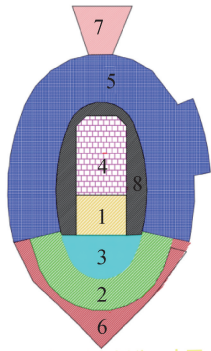


图 2 施工分区

Fig. 2 Construction zoning

如表 1 所示,将 1~6 核心区域的施工划分为 7 个阶段,每阶段均针对特定区域与工序制定计划:从 1 区钢框架局部安装开始,逐步过渡至南侧弧形

木结构搭建,再到3区雪花形主、次梁吊装。

表 1 施工步骤划分

Table 1 Division of construction steps			
施工阶段	工作内容	施工阶段	工作内容
1	安装 1 区钢框架	5	安装 5 区北侧弧形柱、梁和檩条,安装会议室预应力拉索,施加预紧应力
2	安装 2 区柱、上下层弧形梁和檩条	6	去掉预紧应力,施加 230kN 预应力
3	安装 3 区雪花部分,完成主梁、次梁吊装	7	安装 6 区檩条和梁、柱
4	安装 4 区柱、组装楼面梁及屋面部分,并在梁上安装预应力拉索,施加预紧应力		

按表 1 划分施工阶段,并借助 Revit 软件对钢木结构施工过程进行可视化模拟(见图 3),从而有效把控关键节点,确保安装精度,保障施工质量与安全。

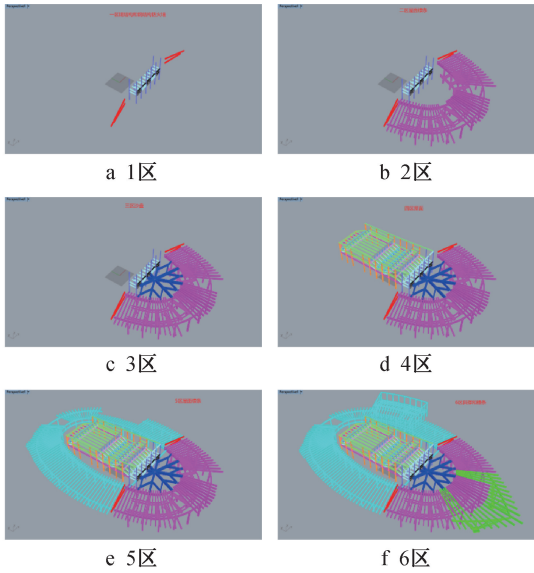


图 3 钢木结构施工分区进度模拟

2.2 施工方案比选

4 区中部会议室的预应力索张拉是结构施工中的关键技术难点,需在多种方案中进行选择。该环节不仅关系到结构稳定与安全,也直接影响建筑的耐久性与使用功能。因此,重点介绍 4 区中部会议室预应力索张拉施工方案比选过程。

1)方案 1。先行架设梁、柱,再张拉预应力索,其核心在于先构建主体支撑框架。此方案能确立坚实的起始基准,使后续工序有序推进,从而提高整体施工效率。梁柱框架的提前完成有助于在张

拉预应力索时更精确地控制结构内力和变形,增强施工阶段的稳定性。

2)方案 2。先在地面对梁上预应力索进行张拉再整体吊装。该施工方案无需将千斤顶等张拉工具吊起,并通过在梁体吊装前施加预应力,赋予梁体在吊装和定位过程中额外的强度和刚度,有效减小吊装过程中可能出现的内力和变形,从而降低施工风险。

对这 2 种方案可能出现的各种工况在 MIDAS Gen 软件中进行施工模拟,评估每种方案结构内力和变形的变化。此外,施工现场通过智能张拉系统,精确记录千斤顶张拉过程中的数据,并通过应力计和应变计等监测主要受力杆件和拉索的应力、应变。

3 仿真计算模型

采用有限元软件 MIDAS Gen 对预应力木结构施工过程进行模拟分析。屋面胶合木梁采用梁单元模拟,梁尺寸为 170mm×600mm,170mm×400mm,柱尺寸为 220mm×500mm,胶合木柱底刚接,梁与梁及梁与柱间均为铰接。整体结构计算模型中共 2 359 个结点,3 400 个单元,其中梁单元 3 257 个,只受拉桁架单元 74 个,板单元 69 个。

所有木构件均采用同等组合胶合木 TCt32,并符合 GB 50005—2017《木结构设计标准》的相关规定,抗弯强度为 22.3MPa,顺纹抗压强度为 19MPa,顺纹抗拉强度为 14.2MPa,弹性模量为 9 500MPa,泊松比为 0.3。4 区剪力墙表面由 38mm×235mm 截面的 SPF 规格材均匀覆盖,并在外部采用 1 层 15mm 厚 OSB 板加固。钢材弹性模量为 2.06×10⁵MPa,等级为 Q355B,钢构件连接方式为焊接;钢索弹性模量为 1.95×10⁵MPa。钢构件防火设计采用防火涂料,满足 1h 耐火极限。预应力拉索安装和提升过程中仅有结构自重作用,结构整体有限元模型如图 4 所示。

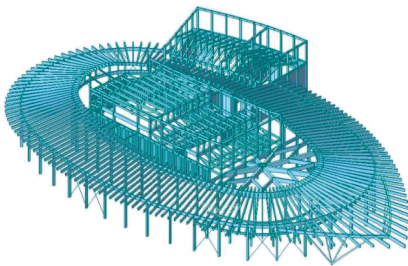


图 4 结构整体有限元模型

Fig. 4 Overall finite element model of structure

4 施工方案仿真模拟分析

采用先进的仿真技术预测施工过程中的结构行为。针对图 5 所示中心会议室的预应力索-胶合

木结构,模拟 2 种施工方案下的索张拉全过程。施工方案模拟对比如表 2 所示。

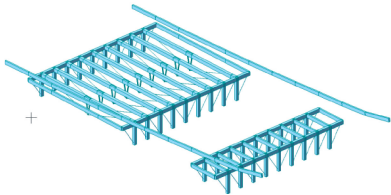


图 5 中心会议室预应力索-胶合木结构
Fig. 5 Prestressed cable-glued wood structure in the center conference room

表 2 施工方案模拟对比		
Table 2 Comparison of construction scheme simulation		
阶段	方案 1	方案 2
模型建立	在 MIDAS Gen 中建立包含梁和预应力索的结构模型	与方案 1 相同,建立完整结构模型
定义结构组	创建 2 个类别结构组:梁、柱结构组和预应力索结构组	在柱施工完成后,为每根梁及其对应的预应力索创建独立的结构组,共 9 个
施工阶段设置	阶段 1:仅包括梁、柱结构组,添加静态荷载; 阶段 2:梁、柱结构组施工完成后,添加预应力索结构组	定义 9 个施工阶段,每阶段对应 1 个结构组的施工和张拉
预应力索张拉模拟	在新阶段中,依次为 19 根预应力索定义预应力荷载,模拟张拉过程	在每个阶段中,先于梁上安装预应力索,然后施加预应力荷载模拟张拉;将张拉后的梁、索单元作为一个整体进行模拟吊装
数据记录	每张拉完 1 根索后,运行分析并记录梁、柱内力和变形	每个阶段完成后,记录梁内力和变形,随后进入下一阶段继续模拟

结构关键区域内力及变形分别如图 6,7 所示。为较全面地反映结构内力和变形情况,选取两端的第 1,9 根拉索及中部的第 5 根拉索作为分析对象。该选择覆盖了结构关键区域,其中两端拉索反映结

构边缘受力状态,而中部拉索则反映中心区域力学行为。

为更清晰显示模拟结果,将 2 种施工方案的 1~9 根拉索张拉后的内力和位移列于表 3。

表 3 2 种施工方案下 1~9 根拉索张拉后结构内力和位移
Table 3 Internal force and displacement of 1~9 cables after tensioning under two construction schemes

拉索编号	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
	绝对最大弯矩/ (kN·m)	绝对最大弯矩/ (kN·m)	最大位移/ mm	最大位移/ mm
1	79.89	85.80	49.36	45.67
2	79.92	85.67	49.08	47.15
3	80.03	85.60	48.28	47.38
4	80.00	85.59	46.95	47.28
5	79.93	85.60	44.75	47.08
6	79.81	85.65	41.59	46.90
7	79.67	85.73	36.93	45.75
8	79.45	85.86	29.80	46.84
9	79.13	79.79	21.70	41.93

2 种方案下结构绝对最大弯矩如图 8a 所示,最大位移如图 8b 所示。

经过对比分析,在 1~9 根预应力索张拉过程中,模拟结果揭示了 2 种施工方案在控制结构内力和变形方面的显著差异。

1)结构刚度发展。在方案 1 中,梁柱结构的优先施工为整个结构提供了初始刚度。如图 8 所示,拉索 1~9 绝对最大弯矩在方案 1 中为 79.13~79.89kN·m,而方案 2 对应值为 79.79~85.80kN·m,显示出方案 1 在张拉初期阶段即可有效抵抗张拉力,减小内力。

2)张拉过程中内力重分布。对于方案 2,梁和索的同步张拉和吊装导致较大的局部内力和变形。例如,拉索 1~9 最大位移在方案 2 中为 41.93~

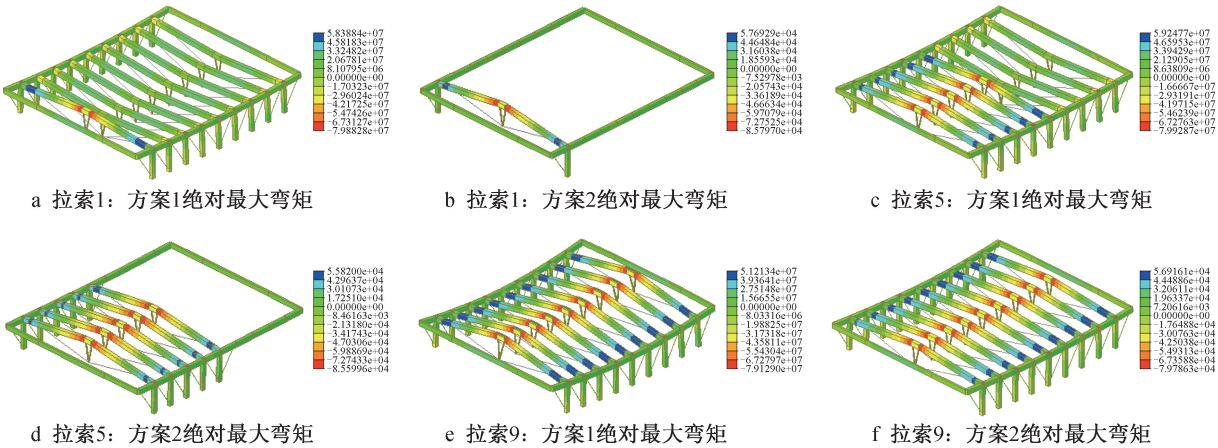


图 6 2 种施工方案下结构内力云图(单位:kN·m)

Fig. 6 Internal force of structure under two construction schemes(unit:kN·m)

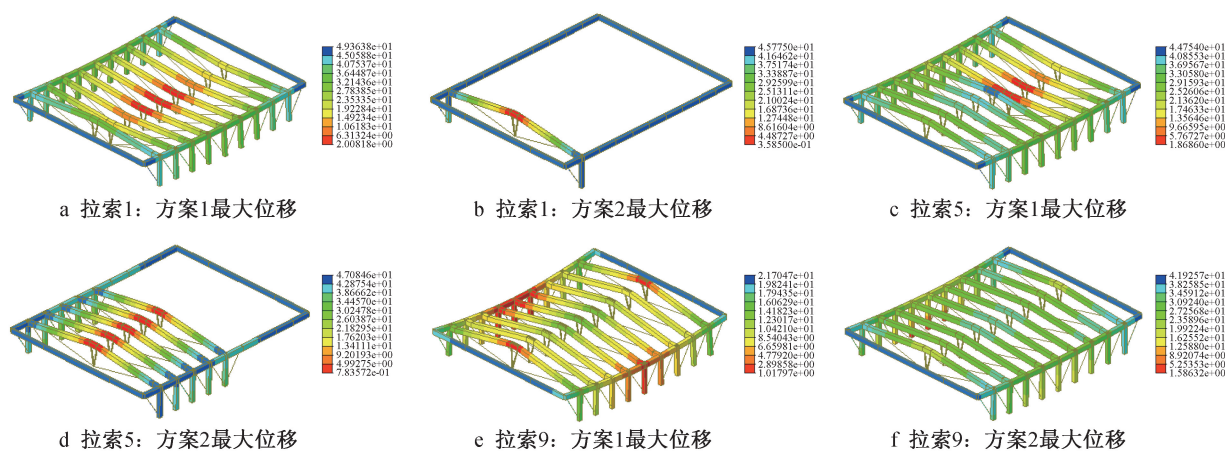


图 7 2 种施工方案下结构变形云图(单位:mm)

Fig. 7 Deformation of structure under two construction schemes(unit :mm)

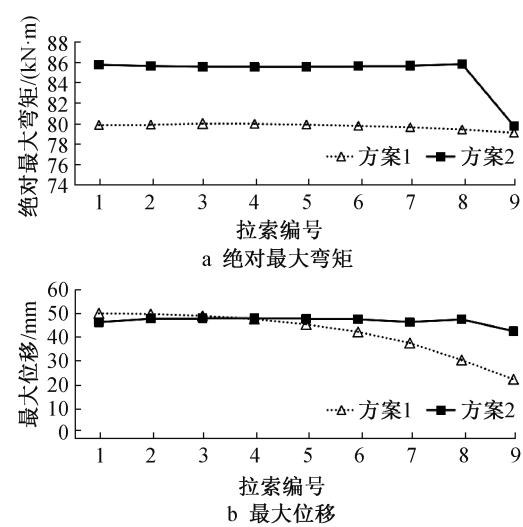


图 8 2 种施工方案下拉索张拉后模拟结果对比
Fig. 8 Comparison of simulation results after cable
tensioning under two construction schemes

45.67mm,而方案 1 仅为 21.70~49.36mm,这表明在结构整体刚度形成前,局部区域承受了更大变形。综合模拟分析结果可知:方案 1 能更好地控制梁内力与变形,在该工况下更具优势。该方案通过早期建立梁柱框架,不仅为后续施工奠定坚实基础,而且优化了流程、提升了效率。更重要的是,在随后的预应力索张拉阶段,该方案能更有效地管理结构内力分布,显著降低梁应力集中和变形风险。基于此模拟结果和对结构行为的深入分析,选择方案 1 进行施工。

5 现场监测对比

预应力索张拉监测包括张拉阶段监测和张拉完成后的监测。为验证模拟结果并优化施工方案,选取数值模拟中应力较大的杆件作为关键受力杆件,在关键施工阶段布设位移和应力-应变监测点。

在张拉过程中,按施工工法将张拉力控制至 130kN,并通过红外线位移计实时监测位移,确保位移≤74mm 的允许限值。张拉完成后,监测频率改为 1 次/周,位移限值收紧至 5mm,以评估结构的长期稳定性。对比可知,监测数据与模拟结果一致,验证了施工方案的准确性,并揭示了结构内力、挠度等参数在施工过程中的变化规律,从而确保方案的有效性 with 安全性。

通过综合分析,且模拟结果与现场监测数据一致,证实了先架设梁、柱再张拉预应力索的方案能有效控制结构的内力和变形。此外,监测数据还揭示了结构在不同施工阶段的具体响应,为施工过程中可能出现的非线性行为提供了实证,从而有助于及时发现并调整施工策略,确保施工的顺利进行。施工完成效果如图 9 所示。



图 9 施工完成效果

Fig. 9 Effect of construction completion

6 结语

- 1)通过 MIDAS Gen 软件进行的仿真模拟分析表明,先架设梁、柱再张拉预应力索的施工方案,在控制结构内力和变形方面具有明显优势,为施工过程提供了可靠保障,并优化了施工流程。
- 2)该方案不仅提高了施工效率,还显著降低了梁应力集中和变形风险。此外,现场监测数据与仿

真分析结果的高度一致进一步验证了施工方案的准确性与可靠性,从而保障了整个施工过程安全及结构长期稳定。

参考文献:

[1] 劳万里,段新芳,吕斌,等. 碳达峰碳中和目标下木材工业的发展路径分析[J]. 木材科学与技术,2022,36(1):87-91.
LAO W L,DUAN X F,LÜ B,et al. Development path of China wood industry under the targets of carbon dioxide emission peaking and carbon neutrality [J]. Chinese journal of wood science and technology,2022,36(1):87-91.

[2] 王瑞胜,陈有亮. 1992—2019 年中国木结构建筑研究进展[J]. 林产工业,2020,57(6):31-34.
WANG R S,CHEN Y L. Research progress of timber buildings in China from 1992 to 2019 [J]. China forest products industry, 2020,57(6):31-34.

[3] FOJTÍK R,DUBOVSKÝ V,KOZLOVÁ K,et al. Prestress losses in spruce timber[J]. Wood research,2020,65(4):645-652.

[4] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
PAN J L, ZHU E C. Design principle of wood structure [M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2019.

[5] 吴宁童. 大跨预应力胶合木桁架结构设计方法及应用研究[D]. 南京:南京林业大学,2022.
WU N T. Research on design method and application of long-span prestressed glued wood truss structure [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2022.

[6] 刘菊芳,刘小会,陶亚光,等. 不同预应力施加方式对预绞式金具紧固性能的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022,44(1):94-100.
LIU J F,LIU X H,TAO Y G,et al. Effect of different prestressing methods on fastening performance of pre-twisted fittings [J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 2022,44(1):94-100.

[7] 旷铁良. 桥梁工程后张法预应力梁板施工质量控制研究[J]. 科技创新与应用,2024,14(21):160-163.
KUANG T L. Study on construction quality control of post-tensioned prestressed beam and slab in bridge engineering [J]. Technology innovation and application,2024,14(21):160-163.

[8] 张晓辰,白朝勤. 绿色建筑理念在工业建筑改造中的运用与实践[J]. 建筑科学,2024,40(3):180.
ZHANG X C, BAI C Q. Application and practice of green building concept in industrial building reconstruction [J]. Building science,2024,40(3):180.

[9] 李建涛,张亮,殷腾腾,等. 钢木结合的矮立边金属屋面施工技术[J]. 城市建筑空间,2022,29(S2):523-524.
LI J T,ZHANG L,YIN T T,et al. Construction technology of short vertical edge metal roof combined with steel and wood [J]. Urban architecture space,2022,29(S2):523-524.

[10] 郑江. 复杂刚性钢结构施工过程力学模拟及计算方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
ZHENG J. Research of mechanics emulation and calculating methods during construction process of complex rigid steel structures [D]. Xi ' an: Xi ' an University of Architecture and Technology,2011.

[11] 浦建刚. 单层网壳穹顶体外双向预应力加固提升技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(4): 99-105.
PU J G. External two-way prestressed reinforcement and lifting technology of single-layer reticulated dome [J]. Construction technology, 2025,54(4): 99-105.

[12] 张纪刚,张同波,欧进萍. 青岛体育中心游泳跳水馆大跨复杂钢结构施工模拟分析与监测[J]. 建筑结构学报,2010,31(S1):299-304.
ZHANG J G, ZHANG T B, OU J P. Simulation analysis and monitoring of long-span complex steel structure construction in swimming and diving hall of Qingdao Sports Center [J]. Journal of building structures,2010,31(S1):299-304.

(上接第 71 页)

[4] 杨世波,羊波,吴楠,等. EPC 模式下重庆龙兴足球场基于 BIM 的高效建造[C]//2021 第十届“龙图杯”全国 BIM 大赛获奖工程应用论文集,2021.
YANG S B, YANG B, WU N, et al. Efficient BIM-based construction of Chongqing Longxing Football Stadium under EPC mode [C] // Proceedings of 2021 the 10th Longtu Cup National BIM Competition Award-winning Engineering Application, 2021.

[5] 梁志刚,宋子鑫,黄昊. BIM 技术在建筑设计中的应用及推广

策略 [J]. 城市建筑空间, 2023, 30 (3): 119-121.
LIANG Z G, SONG Z X, HUANG H. Application and promotion strategy of BIM technology in architectural design [J]. Urban architecture space, 2023, 30 (3): 119-121.

[6] 毕艳,王洋,罗龙,等. BIM 施工管理平台研发与应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023 (9): 74-78.
BI Y, WANG Y, LUO L, et al. Research and application of BIM construction management platform [J]. Intelligent building & smart city, 2023 (9): 74-78.