

工程设计与施工

Volume 7 Issue 12 · December 2025 · ISSN 2705-070X(Print)



工程设计与施工

Engineering Design and Construction

Volume 7 Issue 12 · December 2025 · ISSN 2705-070X(Print)

中文刊名：工程设计与施工

ISSN：2705-070X (纸质)

出版语言：华文

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/edc

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Engineering Design and Construction

ISSN: 2705-070X (Print)

Language: Chinese

URL: http://journals.nassg.org/index.php/edc

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Database Inclusion



Google Scholar



CQVIP



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: http://www.nassg.org



期刊概况:

中文刊名：工程设计与施工

ISSN：2705-070X (Print)

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/edc

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求:

- 稿件格式：Microsoft Word
稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
测量单位：国际单位
论文出版格式：Adobe PDF
参考文献：温哥华体例

出刊及存档:

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
纸质版出刊
出版社进行期刊存档
新加坡图书馆存档
中国知网（CNKI）、谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
文章能够在数据库进行网上检索

作者权益:

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程:

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

Engineering Design and Construction

工程设计与施工

December · 2025 | Volume 7 · Issue 12 | ISSN 2705-070X (Print)

编委会

主 编

贾西圣 山东汇通建设集团有限公司

编 委

王立峰 通号（郑州）电气化局郑州铁路工程有限公司

马利东 北京诚通华亿房地产有限公司

谢红星 通号（郑州）电气化局有限公司

徐舟 陕西航天建设集团有限公司

成柏璇 北京光谷创新置业有限公司

张龙 沂源龙裕工贸有限公司

吕泓静 濮阳市住房和城乡建设事务中心

王子睨 百安木设计咨询（北京）有限公司

1	轻型模块化临时看台结构有限元分析与优化设计 / 郑文富 任亚琳 熊之高 沈为 洪彬	/ 王丽娜
7	装配整体式混凝土结构节点缺陷加固处理方案研究与应用 / 陈茂虎 尧文静	46 风景园林施工中植物配置方法及养护技术分析 / 江昆
10	智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的应用研究建议 / 陈世平	49 建筑工程测量数字化技术应用与发展趋势 / 易金鹏
13	关于受限空间吊装作业方法的浅析 / 赵小明 张朝军 王远志	52 公路工程项目施工质量管理的关键要点 / 单楠 汪群
16	绿色施工理念下建筑工程节能减排技术应用分析 / 毛忠奇	55 基于弹性理念下济宁市口袋公园设计探究 / 郝美澳
19	高速公路桥梁预制拼装施工技术优化及质量控制研究 / 魏云 胡廷树	58 基于海绵城市建设的临沂大学校园绿地景观设计实践 / 杨田利
22	大型水电机组的 AGC 优化设计 / 杨伟 唐元霖	61 公路结构性病害诊断与加固技术体系构建研究 / 武云虎
25	工程量清单计价模式下的成本控制研究 / 邓洪川	64 基于生态排水系统的山地城市内涝治理模式探索—以龙岩市为例 / 揭小锋 刘文廉 张其慧 蓝昌桂 崔婷钰
28	一起调相机静止变频起动系统过流故障分析及优化措施 / 刘生春 张杰 王海蓉 付振忠 杨占山	67 房屋建设工程进度动态管控体系构建与应用研究 / 郭联欢 马腾
31	装配式建筑装饰装修一体化设计与施工关键技术 / 高速	70 水电站大坝坝体连接缝灌浆施工要点分析 / 易生
34	城市轨道交通深基坑岩土工程施工技术与质量控制探讨 / 李强 程国平 郝丽生 汪一村 王斌	73 试析高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工工艺 / 杜育升
37	绿色数据中心装修设计中的节能材料选型与应用效果 / 鲁旭东	77 单元式幕墙在超高层建筑中的设计要点与施工安装技术难点分析 / 宋超
40	结构加固中 ECC 高延性混凝土材料性能演化机理与界面协同作用研究 / 温彬 贾建法 李汉 马腾飞 吴羨亮	80 基于工程管理信息化与 BIM 技术应用 / 王晓璇
43	低温管道应力分析的特点和方法	83 季节性冻土区铁路线路冻害的预防与整治 / 冀国华
		86 既有钢筋混凝土框架结构抽柱托梁加固改造技术研究与应用 / 张源 郝李鹏 高明

- 1 Finite Element Analysis and Optimization Design of Light Modular Temporary Stand Structure
/ Wenfu Zheng Yalin Ren Zhigao Xiong Wei Shen Bin Hong
- 7 Research and application of reinforcement treatment scheme for defects in assembled integral concrete structure nodes
/ Maohu Chen Wenjing Yao
- 10 Application Research on Intelligent Construction Technology in Construction Management of Prefabricated Building Engineering
/ Shiping Chen
- 13 Analysis of Lifting Operation Methods in Confined Spaces
/ Xiaoming Zhao Chaojun Zhang Yuanzhi Wang
- 16 Application Analysis of Energy Saving and Emission Reduction Technology in Construction Engineering under the Concept of Green Construction
/ Zhongqi Mao
- 19 Research on Optimization and Quality Control of Prefabricated Assembly Construction Technology for Highway Bridges
/ Yun Wei Tingshu Hu
- 22 AGC optimization design of large hydroelectric generating units
/ Wei Yang Yuanlin Tang
- 25 Research on cost control under bill of quantities pricing mode
/ Hongchuan Deng
- 28 Analysis and optimization measures for overcurrent faults in the static variable frequency starting system of the camera during simultaneous adjustment
/ Shengchun Liu Jie Zhang Hairong Wang Zhenzhong Fu Zhanshan Yang
- 31 Key technologies of integrated design and construction of prefabricated building decoration
/ Su Gao
- 34 Discussion on Construction Technology and Quality Control of Deep Foundation Pit Geotechnical Engineering in Urban Rail Transit
/ Qiang Li Guoping Cheng Lisheng Hao Yicun Wang Bin Wang
- 37 Selection and Application Effect of Energy-saving Materials in Green Data Center Decoration Design
/ Xudong Lu
- 40 Research on the Performance Evolution Mechanism and Interface Synergistic Effect of ECC High Ductility Concrete Materials in Structural Reinforcement
/ Bin Wen Jianfa Jia Han Li Tengfei Ma Xianliang Wu
- 43 Characteristic and method of low temperature pipe stress analysis
/ Lina Wang
- 46 Analysis of plant configuration method and maintenance technology in landscape garden construction
/ Kun Jiang
- 49 Application and Development Trend of Digital Technology in Construction Engineering Surveying and Mapping
/ Jinpeng Yi
- 52 Key Points of Quality Management in Highway Engineering Construction
/ Nan Dan Qun Wang
- 55 Design of Pocket Park in Jining City Based on Elastic Concept
/ Meiao Hao
- 58 The Practice of Green Space Landscape Design for Linyi University Campus Based on Sponge City Construction
/ Tianli Yang
- 61 Research on the Construction of Technical System for Diagnosis and Reinforcement of Structural Diseases of Highway
/ Yunhu Wu
- 64 Exploration of Urban Flood Control Model Based on Ecological Drainage System — Taking Longyan City as an Example
/ Xiaofeng Jie Wenlian Liu Qihui Zhang Changgui Lan Tingyu Cui
- 67 Research on the Construction and Application of Dynamic Control System for the Progress of Housing Construction Projects
/ Lianhuan Guo Teng Ma
- 70 Key Points Analysis of Grouting Construction of Connection Joint of Dam Body in Hydropower Station
/ Sheng Yi

- 73 Analysis of Energy-saving Construction Technology of High-rise Residential Concrete Structure without Plastering / Yusheng Du
- 77 Analysis of Design Key Points and Technical Difficulties in Construction and Installation of Unitized Curtain Walls in Super High-rise Buildings / Chao Song
- 80 Based on Engineering Management Informatization and BIM Technology Application
- 83 Prevention and Treatment of Frozen Damage of Railway Line in Seasonal Frozen Soil Area / Guohua Ji
- 86 Research and Engineering Application of Reinforced Concrete Frame Structure Column Extraction and Beam Support Reinforcement Technology / Yuan Zhang Lipeng Hao Ming Gao

Finite Element Analysis and Optimization Design of Light Modular Temporary Stand Structure

Wenfu Zheng Yalin Ren Zhigao Xiong Wei Shen Bin Hong

Zhejiang Dafeng Sports Equipment Co., Ltd., Yuyao, Zhejiang, 315400, China

Abstract

This paper conducts a finite element analysis and optimization design of the structure for a light modular temporary grandstand. Multiple load cases are analyzed to evaluate the grandstand's performance. Firstly, the geometric structure of the light modular temporary grandstand is introduced, and simulation calculations are performed based on relevant design codes and standards. Subsequently, using simulation software such as HyperWorks and Abaqus, along with high-performance hardware equipment, the responses of stress and displacement under load cases including seating and walkway loads, wind loads, seismic loads, and their combinations are analyzed, comprehensively assessing the performance of the grandstand structure. Finally, based on the analysis results, optimization design suggestions are proposed to further enhance the safety and economy of the grandstand structure. This paper provides theoretical basis and technical support for subsequent research on the design and optimization of temporary grandstands.

Keywords

light modular temporary grandstand; finite element analysis; structural optimization; load conditions; simulation calculation

轻型模块化临时看台结构有限元分析与优化设计

郑文富 任亚琳 熊之高 沈为 洪彬

浙江大丰体育设备有限公司, 中国·浙江 余姚 315400

摘要

本论文针对轻型模块化临时看台的结构进行有限元分析与优化设计, 采用多种荷载工况对看台结构进行分析。首先, 介绍了轻型模块化临时看台的几何结构, 并依据相关设计规范与标准进行仿真计算。其次, 通过使用Hyperworks、Abaqus等仿真软件, 并结合高性能硬件设备, 对坐席和通道荷载、风荷载、地震及其组合工况的应力、位移等响应进行分析, 全面评估看台结构的性能。最后, 结合分析结果提出了优化设计建议, 进一步提高了看台结构的安全性和经济性。本论文为后续研究临时看台的设计与优化提供了理论依据和技术支持。

关键词

轻型模块化临时看台; 有限元分析; 结构优化; 荷载工况; 仿真计算

1 引言

轻型模块化临时看台在大型公共活动中广泛应用, 尤其是在体育赛事、文艺演出等场合。由于其需要具备较高的安全性、稳定性及经济性, 传统的设计和施工方式往往面临着材料成本高、施工周期长等问题。有限元分析技术作为一种先进的结构分析工具, 能够模拟不同工况下结构的响应, 为设计优化提供重要依据。本文通过对轻型模块化临时看台进行有限元仿真分析, 探索其在多种荷载作用下的结构性能, 重点分析了坐席荷载、风荷载、地震荷载等工况对结构安全性的影响。通过仿真计算, 进一步优化了设计方案, 以提高看台结构的整体强度、稳定性和经济性。

【作者简介】郑文富(1978-), 男, 中国浙江宁波人, 工程师, 从事轻型钢结构研究。

2 模型介绍

2.1 几何结构概述

轻型模块化临时看台的几何结构设计主要考虑易组装、拆卸以及承载性能。结构包括主桁架、次桁架、支撑杆组等基本组件, 如图 2.1 所示。主桁架设计为阶梯形结构, 通过竖向插装杆与其他桁架连接; 次桁架则通过挂耳结构安装在主桁架之间; 支撑杆组由多个竖向立柱组成, 间隔设置以提供稳定支撑^[1]。每个竖向立柱通过套筒和插接柱与主桁架连接, 保证了结构简便的装配与拆卸。整体结构布局紧凑, 避免了过度复杂的连接件, 提升了组装效率。所有连接点均通过无螺栓结构固定, 提供了额外的稳定性。通过优化结构的几何布局, 确保了看台在承受多种荷载下的稳定性与安全性。

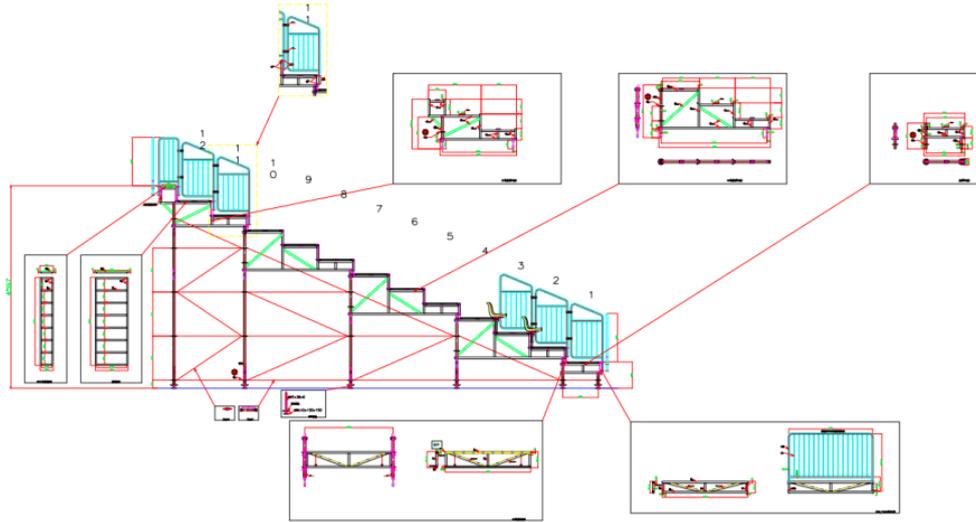


图 2.1 轻型模块化临时看台结构布局

2.2 模型介绍

看台结构件的基础信息及材料特性如下表 2.1，表 2.2 所示。

表 2.1 构件的基础信息

名称	截面尺寸 /mm	型号
立柱	Φ48.3 × 2.75	Q345B
横杆	Φ42 × 2.75	Q235B
纵大梁	Φ48.3 × 2.75/ 方管 60 × 40 × 2	Q345B
	方管 40 × 40 × 2	Q235B
次桁架	方管 40 × 40 × 2/ 等边角钢 40 × 4	Q235B
台面板	花纹钢板 t=2mm/ 方管 30 × 30 × 1.5/ 方管 25 × 25 × 1.5	Q235B
栏杆	方管 40 × 40 × 2/ Φ19 × 1.5	Q235B

表 2.2 材料特性

型号	屈服强度 / MPa	剪切模量 G/ MPa	泊松比 u	弹性模量 E/ MPa
Q345B	300	7.9×10^4	0.3	2.06×10^5
Q235B	205	7.9×10^4	0.3	2.06×10^5

2.3 有限元模型建立

2.3.1 有限元模型的基本设置

焊接区域可以采用共节点形式和 Tie 形式的连接，钢板平面支撑与地面

之间为摩擦接触，地面设定为刚体，摩擦系数取 0.15。

2.3.2 网格划分

由于看台结构为薄壁结构，因此有限元分析时除万向节连接件外，其余网格均采用四边形网格，如下图 2.2 所示。总体结构网格数量达到 1374556 个，网格单元类型为 S4R，如下表 2.3 所示。

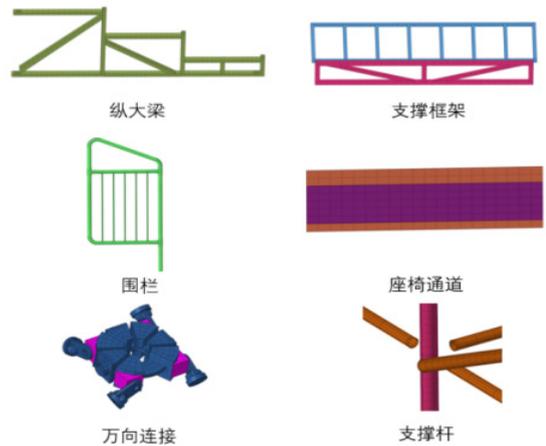


图 2.2 临时看台网格局部示意图

表 2.3 临时看台网格数量

序号	名称	单元数量
①	支撑立柱	429,694
②	万向连接	471,208
③	次横梁	129,984
④	竖挡板	68,304
⑤	纵大梁	52,528
⑥	围栏	210,838
⑦	座椅通道	12,000
Total		1,374,556

2.3.3 荷载的取值

[1] 恒载与活载

根据规范规定，考虑看台座椅横梁、看台台面以及座椅的总重量，在架体计算时恒荷载取 1.0KN/m^2 ；本临时看台支撑架位有固定座椅，因此活载按照规范在座椅区取 4KN/m^2 ，通道区取 7.5KN/m^2 。

[2] 风荷载

风荷载按照规范要求按下列公式求得： $wk=\beta z\mu s\mu z w_0$ ，

式中，

wk —风荷载标准值（ kN/m^2 ）；

βz — z 高度处的风振系数，本临时看台支撑架最高为 12.5m，查表得为 1.0；

μs —体型系数，体型系数按照四面开敞式双坡屋面取值 -1.3；

μz —风压高度变化系数，风压高度变化系数按照高度 5m 地面粗糙度 A 类取值 1.09；

w_0 —为基本风压，按照国内沿海较大值取为 $0.5kN/m^2$ 。

由上式可得该结构风荷载为：

$$wk=\beta z\mu s\mu z w_0=1\times 1.3\times 1.09\times 0.5=0.7085kN/m^2$$

[3] 地震荷载

本项目中地震等级烈度为 7 级，取华东地区 7 级地震反应谱曲线（图 2.3）。

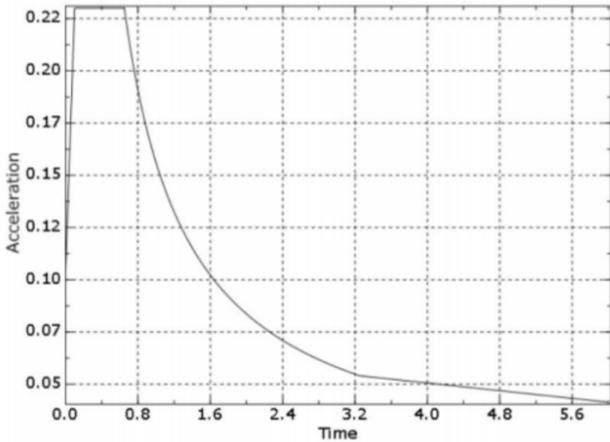


图 2.3 7 级地震反应谱曲线

2.4 工况组合

工况组合可分为：①坐席和通道荷载；②风荷载；③座椅通道荷载与风荷载；④座椅通道荷载和地震荷载。

3 有限元非线性屈曲分析

在屈曲分析中（图 3.1 所示），通过荷载位移曲线显示，结构所用的材料和型材具有足够的安全系数；并且从非线性屈曲分析得出第一阶屈曲因子为 10.625 倍，证明结构具有足够的稳定性。

该屈曲分析通过取结构的最后一跨进行荷载位移曲线分析，清晰地展示了结构在受压至失稳破坏全过程中的非线性力学响应。曲线初期荷载与位移的关系呈线性快速增长，表明结构处于线弹性稳定状态，刚度较高。随后，曲线斜率逐渐减小，进入非线性过渡阶段，刚度开始退化，表明材料已进入弹塑性状态或几何非线性效应显现。当达到 1275000 N 荷载时（纵坐标峰值附近），曲线显示极限承载力，是框

架设计要求荷载值的 10.625 倍，但并未出现脆性断裂。相反，结构进入了稳定的后屈曲平衡路径，保留了一定的承载能力，展现出良好的延性性能。这一过程表明结构不仅能够承受大荷载并安全屈曲，还能有效避免因过载导致的失稳或灾难性破坏。

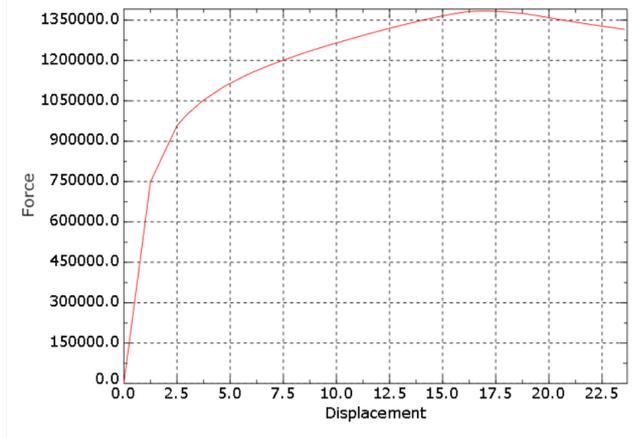


图 3.1 屈曲分析

4 模态分析

图 4.1 为活动看台一阶模态的阵型图，结构的一阶模态的频率为 7.78Hz，从位移云图中可以看出栏杆的位移偏大，杆件支撑和框架结构的位移较小；图 4.2 为模态分析前 10 阶频率，频率 7.78Hz 以上。

人行走的频率一般在 1.5 Hz 到 2.5 Hz 之间，未与结构自振频率重合，结构不会与人行频率发生显著共振；地震的破坏性频率主要集中在 0.5 Hz 到 5 Hz 之间，结构的自振频率未落在此区间，避免承受远超静力计算的地震力。综上此看台结构可兼顾防人致振动和抗震的要求。

5 轻型模块化临时看台仿真计算结果分析

5.1 工况 1：坐席和通道荷载下的应力与位移分析

在工况 1 下，活动看台受到的坐席和通道区域荷载分别为 $4 kN/m^2$ 和 $7.5 kN/m^2$ 。分析表明，坐席区域的最大应力集中在座椅与通道交接处，最大应力值为 128.3 MPa（如图 5.1），位于纵向大梁与竖向支撑连接点，这一应力值远低于 Q235B 钢材的屈服强度（235 MPa），表明在常规荷载下看台结构具有足够的承载能力。此外，通道区域的最大应力为 113.6 MPa（如图 5.2），应力分布较为均匀，主要集中在支撑立柱连接部分，该部位承受了主要的弯曲和剪切应力，但仍在安全范围内。位移方面，最大位移为 7.69 mm（如图 5.3），主要发生在通道区域，尤其是座椅区，这表明该区域的受力较大，由于最大位移远低于材料的允许变形范围，表明在给定荷载下看台结构的稳定性良好，整体变形在安全可接受的范围内。

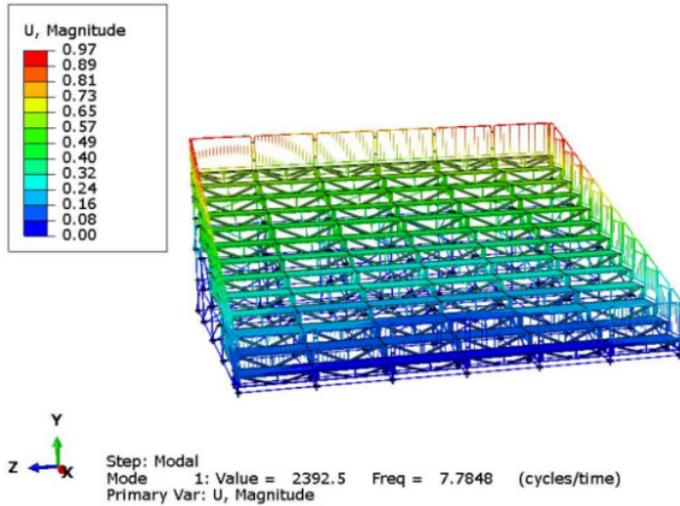


图 4.1 活动看台一阶模态的频率

序号	名称	频率(Hz)
①	第 1 阶模态	7.78
②	第 2 阶模态	8.72
③	第 3 阶模态	10.23
④	第 4 阶模态	11.04
⑤	第 5 阶模态	11.66
⑥	第 6 阶模态	12.22
⑦	第 7 阶模态	12.56
⑧	第 8 阶模态	12.63
⑨	第 9 阶模态	14.09
⑩	第 10 阶模态	14.14

图 4.2 模态前 10 阶频率

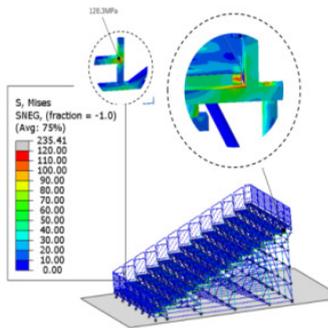


图 5.1 活动看台在工况 1 时的应力云图

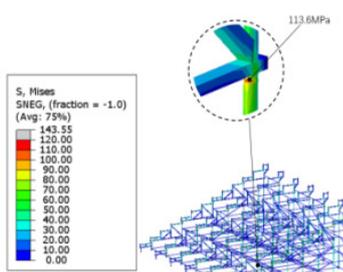


图 5.2 圆柱支撑结构的米泽斯应力

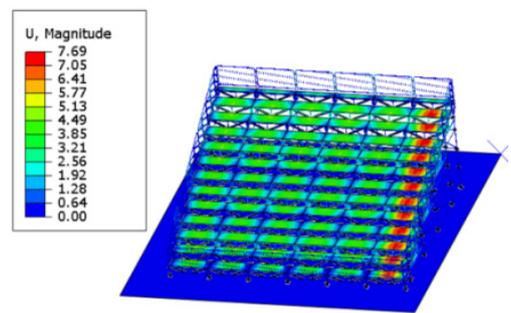


图 5.3 活动看台在仅受垂直荷载加载时的位移云图

5.2 工况 2：风荷载下的应力与位移分析

在工况 2 下，风荷载被施加于活动看台的不同区域，其中风荷载的大小为 0.3 kN/m^2 。仿真结果显示，正向迎风时，活动看台的最大应力出现在纵向大梁侧面，最大米泽斯应力为 23.2 MPa （如图 5.4），这一应力值远低于 Q235B 钢的屈服强度，表明结构未出现明显的塑性变形。在侧向迎风时，最大应力值为 23.3 MPa （如图 5.5），与正向迎风时的值接近，同样未超过材料的屈服强度。在风荷载作用下，整体结构的应力保持在安全范围内，未发生超过材料强度的风险。位移方面，最大位移为 0.88 mm （如图 5.6），主要集中在支撑拉杆上，由于风荷载对整体结构的影响相对较小，且位移非常小，说明结构的抗风能力较强。风荷载的影响并未对活动看台的整体稳定性产生显著影响，仿真结果表明看台结构在此工况下的设计是安全的，符合相关标准^[4]。

5.3 工况 3：座椅通道荷载与风荷载的组合况分析

工况 3 为座椅通道荷载与风荷载的组合工况。在此工况下，活动看台同时承受坐席区的 4 kN/m^2 荷载、通道区的 7.5 kN/m^2 荷载以及风荷载 0.3 kN/m^2 。仿真分析显示，在该组合工况下，活动看台的最大应力为 131.6 MPa （如图 5.7），

发生在纵向大梁的交接部位，该位置的应力受到座椅荷载与风荷载的共同作用，未超过材料屈服强度。竖向支撑杆的最大应力为 114.2 MPa （如图 5.8），仍在材料强度范围内，说明支撑结构能够有效承受组合荷载。栏杆部分的最大应力为 80.7 MPa （如图 5.9），表明栏杆结构也能承受组合荷载的影响。位移方面，最大位移为 7.69 mm （如图 5.10），主要分布在通道区域，显示出该区域的受力较大，但位移值远低于结构的允许变形范围，表明结构能够有效抵抗组合工况下的荷载作用。综合分析表明，在此组合荷载作用下，活动看台结构仍保持稳定，未出现超载或不安全现象，满足设计要求。

5.4 工况 4：座椅通道荷载和地震载荷

活动看台在 1.4 倍座椅通道荷载及华东地区 7 级地震反应谱作用下（如图 5.11），结构最大的应力分布在纵向支撑大梁结构上。纵向大梁结构最大的米泽斯应力为 235.4 MPa （如图 5.12），竖向支撑的杆件结构的最大的米泽斯应力为 235.8 MPa （如图 5.13），由于纵向大梁及竖向支撑采用 Q345 材料，这一应力值远低于 Q345 钢材的屈服强度，所以结构强度符合要求。

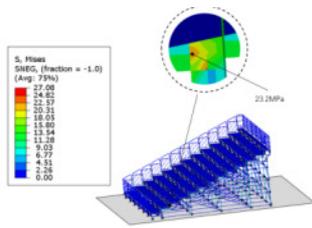


图 5.4 活动看台正向迎风加载时的米泽斯应力云图

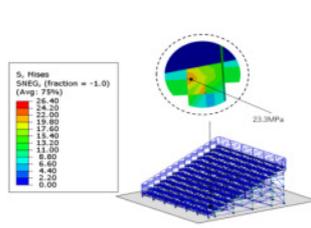


图 5.5 活动看台侧向迎风加载时的米泽斯应力云图

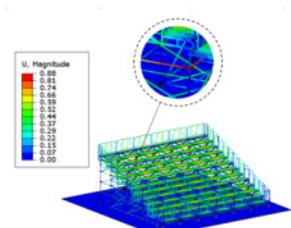


图 5.6 活动看台正向迎风加载时的位移云图

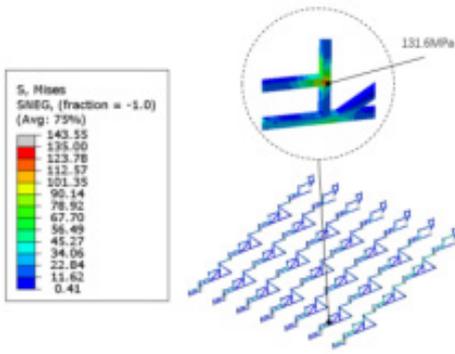


图 5.7 框架梁结构的米泽斯应力云图

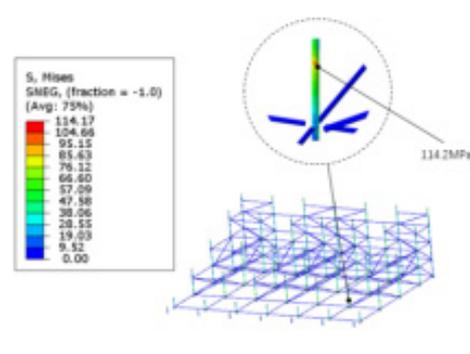


图 5.8 圆柱支撑框架结构的米泽斯应力云图

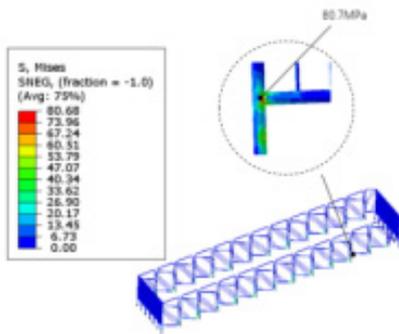


图 5.9 栏杆结构的米泽斯应力云图

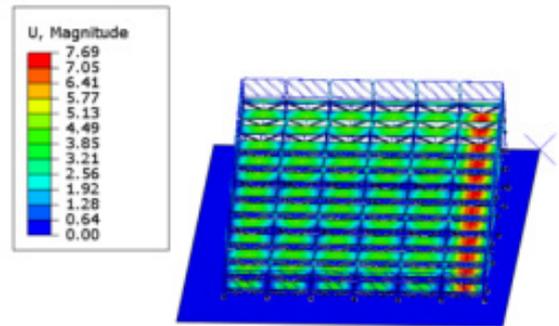


图 5.10 看台迎风受力时的组合工况的位移云图

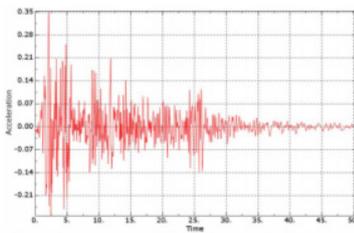


图 5.11 7 级地震作用时的加速度-时间载荷曲线

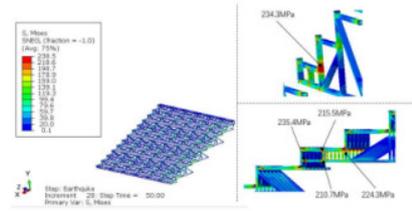


图 5.12 框架梁结构的米泽斯应力云图

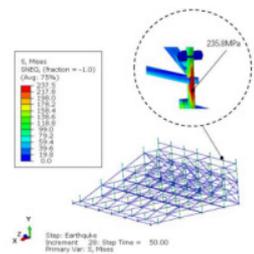


图 5.13 圆柱支撑框架结构的米泽斯应力云图

6 结论

通过有限元分析, 本文对轻型模块化临时看台在多种荷载工况下的结构响应进行了深入研究。分析结果表明, 在座椅和通道荷载、风荷载、和荷载组合工况等不同情况下, 结构的应力和位移均在安全范围内, 未超过材料的屈服强度, 保证了看台的稳定性和安全性; 同时最大应力分别出现

在纵向大梁和支撑杆连接部位, 最大位移集中在通道区域。所有工况下, 轻型模块化临时看台的设计满足强度和稳定性要求, 能够承受常规使用条件下的荷载, 符合相关设计规范的安全标准。整体而言, 本研究为轻型模块化临时看台的设计优化提供了科学依据, 确保了其在实际应用中的可靠性和安全性。

参考文献

- [1] 范重,樊泽源,柴会娟,李劲龙,潘宁,罗兴隆,王田友,张成义.厦门白鹭体育场可转换看台结构设计研究[J].建筑结构学报,2024,45(S2):22-34.
- [2] 罗苗.某大学运动场看台钢索膜结构安全性检测鉴定[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(19):164-166.
- [3] 陈文博,郭惠勇.基于云模型和离散卡尔曼滤波的临时看台结构动荷载识别[J].振动与冲击,2023,42(18):233-240.
- [4] 吴海英,郭昭胜,雷宏刚.山西某大剧院看台屋面网架超高施工模架设计与分析[J].施工技术,2014,43(23):24-28.
- [5] 《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)
- [6] 《钢结构设计标准》(GB50017—2017)
- [7] 《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130-2011)
- [8] 《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068-2018)
- [9] 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018-2002)
- [10] 《临时性建筑应用技术规程》(JGJ/T 280-2022)
- [11] 《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)
- [12] 《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205-2020)
- [13] 《体育馆临时看台安全技术指南》(WH/T 92-2021)

Research and application of reinforcement treatment scheme for defects in assembled integral concrete structure nodes

Maohu Chen Wenjing Yao

Jiangxi Jianke Engineering Technology Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330077, China

Abstract

As China's urbanization transitions from rapid expansion to stable development, cities are shifting from large-scale growth to a phase prioritizing quality improvement and efficiency enhancement. Promoting high-quality urban development has become the central theme for current and future decade-long progress. However, potential defects in prefabricated concrete structures caused by inadequate construction quality control have emerged as a critical bottleneck hindering sustainable development. Field observations reveal that these structural nodes predominantly exhibit two typical defects: post-pour concrete joints and sleeve grouting joints, primarily attributed to construction conditions, technical proficiency, and worker accountability. Therefore, implementing targeted reinforcement measures for various types of prefabricated concrete joint defects is crucial to ensure the overall structural integrity of buildings.

Keywords

assembled monolithic concrete structure node; defect; reinforcement; application

装配整体式混凝土结构节点缺陷加固处理方案研究与应用

陈茂虎 尧文静

江西省建科工程技术有限公司, 中国·江西 南昌 330077

摘要

随着我国城镇化从快速增长长期转向稳定发展期, 城市发展正从大规模增量扩张阶段转向存量提质增效为主的阶段, 推动城市高质量发展成为当前及未来十年发展的主题。然而装配整体式混凝土结构房屋因施工质量控制不足导致的潜在缺陷, 已成为制约装配式建筑可持续发展的关键瓶颈。从实践来看, 装配整体式混凝土结构节点易出现后浇混凝土连接节点与套筒灌浆连接节点两大类典型缺陷等问题, 这主要是因施工条件、工艺熟练程度及工人责任心等影响所致。因而, 基于保障房屋建筑整体结构性能, 对于不同类型装配整体式混凝土结构节点缺陷应用针对性的加固处理方案十分关键。

关键词

装配整体式混凝土结构节点; 缺陷; 加固; 应用

1 引言

装配整体式混凝土结构是通过工业化生产的预制混凝土构件, 以钢筋间的可靠连接为基础, 结合现场后浇混凝土、水泥基灌浆料等现浇部分的协同作用, 将各预制构件有效连接为整体。该结构通过“预制+现浇”的组合方式, 使装配式结构与现浇结构在受力性能、整体性及安全性能上实现“等同”效果, 其综合性能基本达到或接近传统现浇混凝土结构的技术要求, 从而满足建筑结构安全标准^[1]。该种结构建筑自 2016 年在我国民用建筑领域大面积推广应用, 可以提高生产效率高、提高建筑品质、减少资源浪费, 从而保证工期和质量目标、保护环境, 同时可以把室外的事情室内做、工地的事情工厂做、高空的事情地面做、危险复杂的

事情机械或机器人做, 让农民工更安全更体面更有尊严地工作。为满足结构体系整体及局部上受力要求, 其连接节点的性能就显得至关重要。

2 装配整体式混凝土结构节点加固类型

2.1 后浇混凝土连接节点。

通过在预制构件间预留连接区域, 且在安装完成后进行现场浇筑混凝土来达成整体连接的一种方式即为后浇混凝土连接节点。后浇混凝土连接节点在房屋建筑工程中如预制剪力墙、预制框架柱、预制梁、叠合板等关键部位广泛应用, 这得益于其具备适应性强、能形成良好的整体性以及抗震性能。由实践来看, 该节点施工工艺要求颇高, 要是振捣养护或者界面处理未能做到位容易出现局部强度不均以及界面结合力不足的状况, 进而对整体承载能力产生影响。

2.2 套筒灌浆连接节点。

纵向受力钢筋的连接中, 套筒灌浆连接节点发挥着主

【作者简介】陈茂虎(1989-), 男, 高级工程师, 从事装配式建筑, 智能建造、建筑结构研究。

要作用,其借助专用套筒以及高强灌浆料使上下钢筋得以锚固,应力传递也由此达成。套筒灌浆连接节点在房屋建筑的装配整体式混凝土预制剪力墙以及预制框架柱中应用较广,得益于其具备施工便捷、质量可控性强以及装配效率很高等优点,但该节点存在着安全性高度依赖于灌浆饱满度、插入套筒钢筋锚固长度等情况,若存在锚固长度不够或灌浆不密实会导致节点局部承载力不足甚至失效^[2]。

3 装配整体式混凝土结构节点常见缺陷分析

在实际工程中,节点缺陷问题较为突出,主要表现为后浇混凝土连接节点与套筒灌浆连接节点两大类典型缺陷,这些缺陷的产生既与施工阶段的工艺控制密切相关,也受到后期使用环境的影响,对结构整体性能构成潜在威胁。

3.1 后浇混凝土连接节点常见缺陷分析

1) 新旧混凝土界面粘结不足。后浇混凝土连接节点的核心功能是通过新旧混凝土的可靠粘结实现预制构件间的协同受力。在工厂生产的预制构件后浇界面,若未严格执行凿毛或设置键槽处理,将显著降低新旧混凝土的机械咬合作用,使得界面处粘结强度不足,该问题会引发节点在荷载或温度应力下出现剥离、开裂,甚至整体性失效,需通过系统性加固处理恢复界面粘结性能及节点协同受力能力。

2) 钢筋违规(剪断/掰弯)处理。现场施工人员为方便安装,违规剪断预制构件预留连接钢筋(如梁纵筋未锚入节点核心区)或强行掰弯钢筋,将直接破坏“预制-现浇”协同传力路径,导致节点抗拉、抗剪承载力大幅降低,危及结构整体安全。

3.2 套筒灌浆连接节点缺陷

1) 灌浆不饱满。灌浆时浆体的饱满度以及流动性较差,将导致灌浆料无法充分填充套筒内部空隙,易产生夹渣或者空鼓现象,最终致使钢筋和套筒之间的界面粘结力不够,无法有效传递拉压应力。

2) 握裹力不足。套筒锚固钢筋预留长度不足的情况,会直接削弱钢筋与套筒的握裹力,导致节点传力失效,若为关键受力节点(如上下层预制柱-柱节点、预制剪力墙构件连接节点),可能引发局部破坏甚至整体结构失效,后果极为严重。

4 装配整体式混凝土结构节点加固缺陷处理方案

4.1 后浇混凝土连接节点加固缺陷处理方案

4.1.1 界面粘结不足的处理

在装配整体式混凝土结构节点加固环节,如果后浇混凝土连接节点存在界面粘结不稳的情况,就需要使用系统性的加固处置手段。第一,采取凿毛或喷砂等机械方式来处理节点表面,目的是把松散颗粒以及施工污染物给去除掉,让后浇混凝土跟原有结构界面的粗糙度得到增强,进而提升界面的摩擦力以及粘结性能。第二,在处理好的界面涂抹环氧

树脂界面剂或者高性能界面粘结剂,保障后浇混凝土和原结构间构建起可靠且连续的胶结层。值得注意的是,要维持界面含水率的适宜,保证施工缝的湿润状态良好,同时在浇筑期间采取分层振捣措施,防止气泡滞留以及离析现象的出现。在关键受力节点处,把钢筋锚固或者植筋技术相结合,达成粘结以及机械锁固的双重强化效果,以此来提升节点整体的承载能力以及结构的整体性^[3]。

例如,在进行某装配整体式混凝土框架高层住宅工程后浇带浇筑结束后的检查环节,察觉到部分梁柱连接节点出现界面粘结不足的状况,局部混凝土和原构件结合面呈现出脱层状况,伴有细微裂缝,即便经过振捣仍有密实度不足的迹象。对此,施工团队先是采用机械凿毛工艺对缺陷区域展开处理,将原混凝土表面的浮浆清除。随后对局部蜂窝麻面位置使用聚合物砂浆进行修补,以此保证界面表面拥有足够的强度和粗糙度,并在界面上均匀地涂刷环氧树脂粘结剂,以此形成可靠的过渡层。在后续进行混凝土浇筑工作时,将塌落度严格控制在了160mm左右,以此确保混凝土具备良好的流动性与密实度。对于梁柱交汇处等受力集中的节点,施工人员还通过植筋方式增加了机械锚固,以确保新旧界面能够共同承担受力。后期复检时界面粘结情况符合设计与规范要求,可知经过该系列处理措施,节点的结构完整性和整体受力性能得到了显著提升

4.1.2 钢筋破坏的处理:钢筋恢复与加固

在装配式整体式混凝土结构开展后浇带施工期间,一旦连接节点部位出现钢筋损坏状况必须借助恢复和加固的措施,保障受力体系具备连续性以及可靠性。首先,借助回弹仪、超声波检测或现场拉拔试验对受损钢筋展开全面检测,以此判定破坏程度,随后结合设计要求来明确修复范围。其次,如果钢筋出现轻度锈蚀或表面剥,能在运用机械除锈以及进行防锈涂层处理之后继续投入使用。并且在关键部位要利用环氧富锌漆或者防腐砂浆来实施保护,防止后期再度发生锈蚀现象。如果钢筋出现断裂截面削弱或是存在明显变形的状况,便需要采用焊接或者机械连接方式来搭接新旧钢筋,保证受力传递顺利。

在某大型公共建筑地下室后浇带施工过程中,施工人员在结构验收进程中察觉到梁柱交接节点处的部分纵向钢筋呈现出锈蚀状况,还存在局部断裂情形。经检测得知在该区域当中钢筋截面的削弱幅度已然超过了20%,这一情况已经对节点的承载能力产生了影响。施工单位针对这一问题先是运用机械打磨以及喷砂的办法对轻度锈蚀的钢筋展开除锈处理,而后在其表面均匀地涂刷上环氧防腐涂层。对钢筋完全断裂的部位采用直螺纹套筒连接新钢筋的办法予以恢复,保证钢筋在轴向拉力作用时依旧能够形成可靠的力学传递。在此过程中,在焊接部位严格把控热输入情况,以防高温致使钢筋性能降低,完成焊接后运用超声波检测设备来测定接头质量。施工团队在梁柱交汇处节点受力较大之处,为

让整体抗剪性能得到进一步提升采取了增加外包钢板加固措施的做法,且凭借植筋灌浆工艺与原结构达成紧密结合。经荷载试验与无损检测验证加固完成后节点刚度与承载力均达到设计标准,确保了后浇带区域投入使用后的结构安全与耐久性。

4.2 套筒灌浆连接节点加固缺陷处理方案

4.2.1 灌浆不饱满的处理:缺陷定位与补灌修复

在装配整体式混凝土结构里的套筒灌浆连接节点处,一旦发生灌浆不饱满的状况得借助缺陷定位以及补灌修复,以此保证节点受力的完整性。首先,运用工业内窥镜或者超声波探伤等技术方法,针对灌浆区域展开检测工作,明确空鼓部位气泡所在以及未充盈地方的具体范围与位置,并依照节点布置图做好标注从而形成修复的依据。其次,在定位出缺陷区域后,在套筒表面钻设小口径的灌浆孔,将孔道里残留的杂质清理干净以此保证浆液能够顺利进入,补灌材料要选高流动性早强型微膨胀灌浆料,用来保障充盈效果以及粘结强度。在灌浆时可借助振动辅助,采用压力灌注的方式把空气与气泡排出,以此保障浆体处在密实状态。再者,补灌完成之后进行无损检测或拔出试验,以此验证灌浆密实度与钢筋锚固性能能否达到设计要求。

以某装配式商业综合体的梁柱套筒节点施工为例,在验收环节施工人员借助超声波探伤检测察觉到部分节点出现灌浆不饱满的状况,具体呈现为空鼓以及局部未充盈区域。在确认缺陷位置后项目团队依照节点布置图对空鼓点予以标记,在套筒外壁钻设小口径灌浆孔,与此将孔道内残留的灰尘与杂质清理干净,确保浆液通道的畅通无阻。在补灌进程里施工单位择选具有高流动性早强微膨胀特性的灌浆料,借助压力灌注方式把浆液注入到套筒的空隙当中,并且配合手动振动器来排除其中的气泡。在完成灌浆之后运用工业内窥镜对灌浆层的充盈状况展开复查,针对关键节点开展了拔出试验,试验结果表明钢筋锚固力以及灌浆密实度均达到了设计标准,有力地确保了节点的受力连续性,以及整体结构的安全。

4.2.2 握裹力不足的处理:锚固长度增强与节点加固

首先,增强钢筋的锚固,让其在灌浆材料之中形成足够的摩擦和咬合效应,以此增强钢筋和混凝土之间力学结合

的能力。在实施进程里要严格把控钢筋伸进套筒的最小有效长度,而且根据节点受力特性适度增添端部锚固段长度或改为机械锚固,从而确保承载力契合设计要求。其次,设置环向箍筋或采用高强度纤维增强混凝土包裹层等局部加固措施在节点区,凭借改善节点局部受力环境这一方式提升其剪切与弯矩传递能力。再者,施工期间要保证灌浆材料把套筒空隙充分填满,借助振动或者压力灌浆等手段来消除孔隙,避免局部握裹力不足的情况再次发生,以此让节点加固效果达成标准要求。

以某高层装配整体式混凝土住宅楼的套筒灌浆连接节点为例,部分楼层梁端钢筋套筒内部灌浆存在不充分情况,使得节点握裹力不够,当节点承受设计荷载的时候出现了微裂缝。针对此问题施工团队先是把受影响钢筋的锚固长度予以延长,将原本设计的12d(d代表钢筋直径)增大到16d,目的是增强钢筋与灌浆混凝土之间的咬合力以及摩擦力。并在梁端和柱的交接位置设置高强度的环向箍筋,在节点区域浇筑纤维增强混凝土包裹层用来改善局部应力分布状况以及抗剪性能。此外在施工操作里利用压力灌浆手段来保证套筒内灌浆饱满,并且借助振动排气把潜在孔隙消除,经现场静载试验表明,处理后节点握裹力显著提高,节点承载力恢复至设计值,微裂缝消除整体结构性能得到有效保障。

5 总结与展望

总而言之,面对装配整体式混凝土结构节点的缺陷,施工单位应当要始终秉持“问题导向”理念,借助精准检测和分级修复技术科学地恢复结构承载能力以及整体安全性。在今后,可将重点放在智能化检测手段,高性能修复材料以及数字化运维管理上,推动节点加固技术迈向精准化、智能化与绿色化。

参考文献

- [1] 范晓霞.钢筋混凝土结构梁柱节点施工处理方法[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(012):000.
- [2] 高红军.现浇结构梁柱节点不同强度等级混凝土防混浇装置及施工工艺[J].陕西建筑,2023(7):57-62.
- [3] 苏家杰.考虑预制柱连接缺陷的装配整体式框架结构抗震性能研究[D].华南理工大学,2023.

Application Research on Intelligent Construction Technology in Construction Management of Prefabricated Building Engineering

Shiping Chen

Huizhou Rongshuo Construction Engineering Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516001, China

Abstract

This study employs a systematic review to analyze the application value of intelligent construction technologies, with key benefits including enhanced project efficiency, improved safety standards, and optimized resource allocation. The research identifies critical implementation aspects across multiple phases—from construction planning and prefabricated component manufacturing to on-site execution and post-construction maintenance—thereby elevating both management efficiency and quality while extending the service life of prefabricated buildings.

Keywords

prefabricated building; construction quality; intelligentization

智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的应用研究建议

陈世平

惠州市荣硕建筑工程有限公司, 中国·广东惠州 516001

摘要

在本文的研究活动中, 采用综述法对智能化施工技术的应用价值进行分析, 内容包括提高工程施工效率、确保工程施工安全、提高资源配置效率等, 整理了智能化施工技术在施工方案编制、预制件生产、工程施工、建筑运维等环节的应用要点, 以提高施工管理效率与质量, 延长装配式建筑的使用寿命。

关键词

装配式建筑; 施工质量; 智能化

1 引言

随着时代的快速发展, 建筑业也发生了巨大的改变, 尤其是近几年来, Ai 人工智能走进了人们的生活, 智能化建筑在现代化建筑各领域都有体现, 相较于传统施工方式的建筑, 装配式建筑在施工中具有环保水平高、施工效率高等优势, 目前已经在许多地域得到了应用推广。在装配式建筑施工管理期间引入智能化施工技术, 一方面, 可以营造良好的工程施工环境, 提高工程施工进度与安全; 另一方面, 能够减少各环节资源浪费, 将工程造价控制在合理范围之内, 为企业创造更多经济效益。

2 智能化施工技术的应用价值

2.1 提高工程施工效率

依托智能化施工技术可以建立全流程工程管理体系, 体系涵盖预制件设计、生产、安装、后期管理等环节。依托该体系可以快速采集和整合相关信息, 提高各类信息之间的交互水平, 从源头上规避数据孤岛问题, 减少数据遗漏、重复计算等问题, 保证工程总体施工效率。例如, 在拟定预制件吊装方案时, 可通过 BIM 模型对预制件吊装过程进行模拟, 确定预制件吊装顺序、现场车辆调度路线、吊装速度、旋转路径等参数。针对发现的问题也会针对性提出解决方案, 降低施工变更带来的相关影响, 保证吊装过程的高效性。除此之外, 在智能设备(如自动化机器人、自动监测设备等)辅助下, 可自动完成预制件放样定位、吊装、加固等操作, 减少预制件施工期间的成本, 确保工程施工效率。

【作者简介】陈世平(1997-), 男, 中国广东惠州人, 本科, 从事施工管理研究。

2.2 确保工程施工安全

装配式建筑施工期间会使用到较多临时支撑架构，如脚手架、支撑平台等，这些架构的稳固性，将直接影响工程施工安全与进度。在智能化施工技术辅助下，可以在架构中安装监测设备，对支撑架构沉降、偏斜角度、横向位移等参数进行实时监测，若相关数据超出安全阈值，那么系统也会对外进行预警，提醒施工人员及时采取加固措施进行处理，避免支撑架构坍塌、高空坠物等事故。对于参与高空作业的人员，可以为其配备自动检测仪器，可以对施工人员心率、作业位置、是否佩戴安全装备等参数进行实时监测，提高安全预警过程的主动性，及时发现和处理安全隐患。另外，依托智能化施工技术，还可以对预制件运输过程进行跟踪，若预制件在某地点停留时间超过 30min 未移动，那么也会及时和驾驶员确定情况，针对存在问题及时采取措施进行处理，保证运输过程的安全性。

2.3 提高资源配置效率

智能化施工技术的应用，也能够提升工程资源配置效率，减少资源浪费问题。一方面，依托智能化施工技术能够对预制件生产过程进行规范化管理，保证预制件生产精度，减少后期返工量。例如，根据装配式建筑工程施工进度计划，可以将总工程细分为若干预制件生产模块，以订单的方式向工厂下达生产任务，减少预制件冗余造成的资源浪费。另一方面，装配式建筑施工期间会使用到大量施工设备，包括塔吊、运输机等，利用智能化施工技术可以搭建设备智能化调度平台，对目前各类设备使用状态进行监督，根据需求对设备进行科学调度，降低设备闲置率，减少机械设备上的成本支出。

3 智能化施工技术在施工管理中的应用要点

3.1 完善工程施工方案

首先，利用智能化施工技术建立各专业应用模型，如建筑模型、机电模型、给排水模型等，利用 BIM 技术对模型内容进行细化，包含结构尺寸、位置等。在 BIM 模型当中可以进行碰撞试验，根据试验结果调整结构参数，保证结构合规性的同时，减少施工变更问题。根据已经完成的施工方案，来调整预制件设计方案，明确预留孔布置位置，确定预制件制作精度，有利于预制件生产活动的推进。其次，结合智能化施工技术应用情况，拟定可靠的施工进度计划，将进度计划和三维模型关联在一起，对装配式建筑施工过程进行模拟，在模拟场景中录入装配式建筑工程施工场景、气候条件、机械设备类型等基础参数，提高模拟结果的真实性。对模拟时出现的工序冲突、质量隐患等问题，针对性讨论应对措施，借助 Navisworks 软件对对应方案进行推演，确保方案可行性后再进行应用。最后，进行可视化交底，在技术辅助下可以分解复杂施工方案，前期利用 BIM 模型展示复杂细节，实现与施工人员、管理人员的精准交底，减少后期

不合理操作带来的负面影响。

3.2 预制件生产管理

装配式建筑所使用到的预制件数量、种类繁多，为保证预制件生产精度的可靠性，需依托智能化施工技术搭建智能化生产线，提高预制构件生产过程的数字化水平。例如，在生产楼梯预制件时，可以利用物联网技术建立监测网络，对楼梯预制件台阶高度、坡度、混凝土强度等参数进行监测，提高整个应用过程的信息化管理水平，确保预制件生产效率和质量。为方便预制件运输、存放、取用，会在制作预制件时，在预制件中添加 RFID 芯片，利用该芯片可以记录预制件生产时间、名称、编号、安装区域等信息，取用时可根据工程施工进度对构件进行调度，提高生产过程智能管理水平^[1]。除此之外，在预制构件生产过程中，可依托机器视觉、激光扫描、5G 通信等技术建立在线检测系统，若发现预制构件缺陷（如裂缝、缺损等），那么系统也会对外进行预警，提示人员对问题件进行处理，保证初始状态下所有预制构件质量。

3.3 现场施工过程监督

3.3.1 进度管理

在装配式建筑进度管理活动中，可利用智能化施工技术搭建全流程进度管理体系，初期可利用无人机对施工现场进行定期巡航，采集现场施工影像。采集到的影像将录入软件中进行处理，自动生成现场进度的三维模型，将装配式建筑施工进度转换为可量测内容，为施工进度计划的科学调整提供可靠依据。同时生成的三维模型也会上传到项目管理平台当中，将实际施工进度模型和预设施工进度模型进行对比，利用人工智能算法计算出模型差异情况，结果会利用不同颜色进行显示。例如，绿色表示进度正常，黄色表示进度滞后，红色表示进度超前，分析进度滞后原因，将落后进度分摊到其他环节，保证项目可以在预定工期内完成施工^[2]。除此之外，依托技术可以将施工进度和不可抗力因素（如法定节假日、恶劣天气等）关联在一起，出现不可抗力事件后需充分整理客观数据，利用数据整合结果对资源进行科学调度，保证项目的按期交付。

3.3.2 质量管理

在质量管理环节应注意以下内容：第一，对预制件展开进场验收时，会利用扫描设备扫描预制件上的 RFID 标签，根据标签显示信息确定构件是否和档案相一致，验收结果也会通过互联网技术直接上传验收结果（包括外观照片、信息对比报告等），保证预制件质量管理过程的可追溯性，也为质量管理体系优化提供可靠支持。第二，加强安装质量管理，设备吊装期间会借助智能化技术调控吊装参数，包括试吊高度、吊装速度、吊装精度等，以保证吊装结果的科学性。在安装过程中，也会利用智能全站仪、无人机等设施采集预制件坐标信息，利用采集到的“点云”数据建立实际模型，将模型和原始模型进行对比，据此调整安装精度，提高安装结

果的合理性^[3]。第三,对施工期间的关键工序(如连接处加固、止水带安装等)进行建档,按要求记录各类关键信息,如材料配合比、施工位置、操作过程等。所有档案信息会和预制件关联在一起,形成良好信息追溯链,提高工程质量管理水平。

3.3.3 安全管理

一方面,加强人员安全管理,装配式建筑施工期间,需要人员按要求穿戴各类安全护具,如安全帽、安全带、防静电鞋等。借助智能化技术可以自动检查人员穿戴情况,未按要求穿戴护具的成员,会向人员发出预警,待其按要求穿戴后才可以进入现场。同时安全帽上携带自动定位装置,若无授权人员进入塔吊旋转盲区、建筑边缘等位置时,安全帽也会对外发出报警,起到相应的提示作用。另一方面,对施工电梯、塔吊、起重机、挖掘机等设备工况进行持续跟踪,若工况超出安全值,那么系统也会对外进行报警,提示相关人员撤离危险区。同时暂停继续操作,待危险解除后再继续工作。例如,装配式建筑施工现场会应用到多台塔吊,利用智能化施工技术搭建塔吊防撞系统,基于系统科学控制吊臂间距,有效规避塔吊碰撞风险,影响良好的工程作业环境,提高装配式建筑施工质量。

3.4 健全建筑运维方案

待装配式建筑完成施工并投入使用后,也需利用智能化施工技术健全建筑运维方案,提高所拟定方案的科学性,延长装配式建筑使用寿命。在BIM技术、人工智能技术辅助下,可搭建运维管理平台,该平台会录入设计、人员、设备、环境、施工、物业、后期维修等信息,搭建全生命周期信息管理模型。借助该模型可以和装配式建筑能耗、设备工况管理、设施维养等环节保持联动,真实反映装配式建筑运行状态^[4]。若出现结构安全、设备运行故障等隐患,那么系统也会对外进行预警,并且会提供相应的处理方案,以维持装配式建筑总体运营安全。除此之外,也可利用大数据分析技术,对装配式建筑运营数据进行综合分析,根据分析结果拟定智慧运维策略,确保装配式建筑智慧化运维管理成效。

在智能化施工技术的深度应用中,还可结合数字孪生技术构建装配式建筑虚拟映射体,实时同步施工现场人、机、料、法、环全要素动态。通过虚拟仿真模拟极端天气、设备突发故障等突发场景,提前优化应急处置流程,降低施工风险。同时,利用AI算法对施工过程中的能耗数据进行实时

分析,精准识别高能耗环节并自动推送节能调整方案,助力绿色施工目标达成。此外,搭建云端协同管理平台,实现设计方、施工方、监理方、建设方的跨地域实时沟通,打破信息壁垒,让变更指令、进度反馈、质量问题等信息传递更高效,进一步提升施工管理的协同性与精细化水平。

4 智能化建筑的的未来发展趋势

未来建筑智能化的发展将呈现技术深度融合、绿色低碳导向、全生命周期数字化管理三大核心趋势,推动行业向高效、安全、可持续方向转型。

4.1 技术驱动:智能建造与数字孪生深度融合

人工智能与物联网集成:AI将广泛应用于风险预测、资源优化和自动化施工,如建筑机器人替代高危工种;物联网传感器实现设备实时互联,提升能效与安全管理效率。

4.2 BIM与数字孪生技术普及

建筑信息模型(BIM)贯穿设计、施工、运维全周期,数字孪生技术通过虚拟仿真优化决策,减少设计变更和施工返工。

4.3 模块化与装配式建造创新

标准化构件库和数字化协同平台推动模块化设计,缩短工期40%以上,装配式建筑占比预计2025年超30%。所以,运用好人工智能对未来建筑可更好的实现智能化。

5 结语

综上所述,将智能化施工技术融入装配式建筑工程管理活动中,对提高工程管理效率与质量具有重要现实意义。未来,在装配式建筑工程施工期间,也需做好先进技术融入、自动化设备引入、施工人员管理、施工制度优化等工作,营造良好的工程作业环境,推动建筑行业经济的可持续发展。

参考文献

- [1] 姚薇,曾莹莹.基于BIM的装配式建筑智能化全过程施工管理技术应用研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(05):146-148.
- [2] 刘珍珍,黄仁惠.智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的应用研究[J].佛山陶瓷,2025,35(01):173-175.
- [3] 黄定华,张连波.浅析智能化施工技术在装配式建筑施工中的应用要点[J].房地产世界,2024,(12):149-151.
- [4] 马博.装配式建筑智能化技术在工程施工管理中的应用[J].佛山陶瓷,2022,32(12):72-74.

Analysis of Lifting Operation Methods in Confined Spaces

Xiaoming Zhao Chaojun Zhang Yuanzhi Wang

China Railway Engineering Equipment Group technical Service Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 461000, China

Abstract

This paper addresses the challenges of lifting operations in confined spaces, such as large underground facilities and renovation/expansion projects, highlighting the necessity and value of confined space lifting technology in terms of economic efficiency, safety assurance, and technological innovation. Through boundary condition analysis, the fundamental roles of geological, hydrological, and structural factors in formulating lifting plans are emphasized. Key techniques including hydraulic synchronous lifting, hydraulic self-climbing gantry cranes, and multi-equipment combined lifting methods in complex spaces are discussed, underscoring their advantages in precision, safety, and adaptability. The study notes that these technologies rely on simulation analysis, system integration, and detailed project management, and looks forward to the future development of lifting systems toward intelligence, unmanned operations, and sustainability.

Keywords

confined space; simulation analysis; lifting methods; synchronous lifting; equipment combination

关于受限空间吊装作业方法的浅析

赵小明 张朝军 王远志

中铁工程装备集团技术服务有限公司, 中国·河南 郑州 450016

摘要

本文针对大型地下设施、改扩建项目等现场空间受限的吊装作业难题, 系统分析了受限空间吊装技术的必要性及其在经济效益、安全保障与技术创新方面的价值。通过边界条件分析, 强调地质、水文与构筑物结构等因素对吊装方案的基础性作用。重点探讨了液压同步提升技术、液压顶升门式起重机以及复杂空间下的多设备组合吊装方法, 突出其在精度、安全性与适应性方面的优势。文章指出, 该类技术依赖于仿真分析、系统集成与精细化项目管理, 并展望了未来吊装系统向智能化、无人化与绿色化方向的发展趋势。

关键词

受限空间; 仿真分析; 吊装方法; 同步提升; 设备组合

1 引言

许多大型地下设施、改扩建项目(如老旧厂房设备更新、市政管网下地、地铁站建设等)的现场空间极为苛刻, 传统的大型、开放式吊装方法根本无法实施, 受限空间吊装技术是唯一能完成任务的途径。

解决“不可达”与“不可逆”的工程矛盾, 是实现现代化大型设施建设、改造和维护的关键技术保障, 其价值体现在经济效益、安全保障和技术创新等多个维度。相比于“拆墙破屋”或“大开挖”来创造吊装空间, 采用精密的受限空间吊装方案虽然前期技术准备成本高, 但避免了巨大的结构破坏和恢复成本, 总体上节省了时间和金钱, 并减少了对周边环境 and 现有生产的干扰。

2 边界条件分析

首先要获得受限空间的地质、水文、构筑物结构、建造时序等边界条件, 这不仅是开展仿真计算的前提, 更是整个受限空间吊装方案成功的基石。将这些边界条件输入仿真模型, 就如同为虚拟世界确立物理定律。忽略任何一项, 仿真结果都会成为脱离现实的“数字游戏”, 可能导致灾难性的现实后果。

地质与水文条件解决“脚下是否稳固”的问题。土壤承载力、土层分布、坡度等直接决定了吊装设备(如汽车吊、履带吊)的支腿布置和地基处理方案。地下水位、土壤含水量等, 影响土壤的力学性质, 在基坑、隧道等场景中, 水文条件更是直接关系到边坡稳定性和作业安全, 必须纳入仿真考虑。

构筑物结构解决“能否触碰与依靠”的问题。在受限空间中, 经常需要利用现有构筑物的梁、柱、板、墙作为辅助吊点、滑移轨道支撑点或设备锚固点。构筑物的具体尺寸、

【作者简介】赵小明(1987-), 男, 中国河南许昌人, 本科, 高级工程师, 从事机械设计制造研究。

内部管线、附属设施等，构成了吊装路径上的静态障碍物。

3 吊装方法分类

在现有边界条件下，根据仿真计算分析应力、变形、位移、碰撞风险等，优化吊点位置、设备选型、作业路径等，最终形成安全、可行的吊装方案。具体的吊装方案，在空间受限的情况下，往往需要采用多种设备组合（如液压提升器、滑移轨道、卷扬机等）和巧妙的工装设计。这促进了对现有设备潜力的深度挖掘和组合创新，提高了设备的利用价值。对于自行式起重机吊装，桅杆式起重机等常见设备起重，不在此赘述，更多侧重于与受限空间充分结合的非标专用设备起重。

3.1 液压同步提升技术

使用液压同步提升/顶升技术的重型构件吊装，一种广泛应用于大型工程项目的先进技术，通过液压系统实现多个提升器的同步操作，完成重型构件的精准提升和安装。计算机控制多台液压提升器同步工作，精度高可达毫米级、承载能力极大可达上万吨，相对安全可靠。

液压同步提升技术的安全性和成功，几乎完全依赖于固定措施（锚点系统）和受力点安置（吊点设计）的合理性与可靠性。整个系统可以理解：被提升结构物 ↔ 吊点 ↔ 钢丝绳 ↔ 提升器 ↔ 支承结构（永久或临时）。其中，“固定措施”和“受力点安置”贯穿了整个力流路径。固定措施的核心是为提升系统提供一个绝对稳固、高承载能力的反力支撑。这个支撑体系必须将巨大的提升力安全地传递到基础或永久结构上，主要分为临时支承结构系统和利用永久结构作为支承系统。永久结构支撑是最经济的方式，但必须经过严格的复核计算，当永久结构无法直接作为支撑时，需要专门设计和搭设临时结构支撑。

3.2 液压顶升技术及扩展

液压同步提升技术与顶升技术经常被一起提及，甚至有时被混用，但从严格的技术角度来讲，它们在工作原理、应用场景和系统构成上有本质的区别。相对于液压提升结构夹紧钢绞线的锚具系统，液压顶升的执行机构结构简单，就是一个传统的液压缸。在现代大型工程中，两种技术往往并存，甚至在同一项目中协作，共同构成了重型吊装领域不可或缺的技术支柱，本篇主要探讨液压顶升门式起重机的应用。

液压顶升门式起重机是传统起重机与液压顶升技术精髓的结合，其核心特点是通过液压系统实现门架的升降功能。工作原理可以分为两个主要部分，起重作业原理和自爬升原理，其目的是让起重机能够自己将自己一节一节地顶高，从而达到所需的工作高度。无需依赖其他大型辅助吊车来安装，尤其是在空间受限或无法进入大型吊机的场地，优势极其明显，可以根据项目需求灵活增加或减少标准节数量来调整高度。它通过巧妙的“自爬升”原理，解决了传统起

重机在超高、大吨位、受限空间安装难题，是现代重型工业建设和安装领域不可或缺的关键装备，代表了重型起重设备发展的一个重要方向。代表产品如中铁装备主要参与研制的MGYD400吨液压顶升门式起重机，在大吨位，低空间高度情况下开展的起吊、移动、高难度翻身等工序作业。



3.3 复杂受限空间多设备组合吊装技术

在通道狭窄、高度受限、转弯等综合复杂空间下的多设备组合吊装技术，是现代工程中展现技术实力和精细化管理的典范。它超越了单一大型设备的力量美学，更侧重于技术巧思和系统集成。此类吊装侧重于模块化，将庞大的吊装任务分解为多个可控的、可并行的小单元，使用标准化设备进行组合。可实现毫米级的微调，特别适合就位精度要求高的安装作业。

一般需要卷扬机，手拉或电动葫芦等动力源提供主牵引，通过预埋件或者化学螺栓法兰等提供承载基础。卷扬机作为核心省力与变向机构，通过多倍率缠绕，将卷扬机的拉力放大数倍至数十倍，从而用小型卷扬机吊起更大重物，同时，能精确改变力的方向，适应复杂路径。滑轨和地坦克提供提供平滑、承重的路径。其中地坦克作为承载重物，实现原地90°转向、直行和微调，完美解决狭窄空间内的转弯和长距离移动难题。在此过程中，手拉葫芦可以另外提供微调和安全锁的作用。一是用于精确就位，在最后对口阶段进行毫米级调整；二是作为保险措施提供二次保护，与主吊索具串联，防止意外坠落。三是作为临时悬挂，在调整吊点时固定工件。

当然，以上设备的组合可根据需要增加数量和调整布置方式，便于应对特殊的场景。此种技术的应用绝非设备的简单堆砌，而是基于周密策划的系统集成。前期需要策划与仿真分析，通过BIM模型进行碰撞检查，精确规划设备布局、吊装路径、锚点位置，模拟每一步动作，提前发现并解决空间冲突。对每一个吊点、每一根索具、每一段滑轨进行严格的受力计算。校核建筑结构的承载能力。方案必须经过多方评审验证。

在复杂空间下的多设备组合吊装技术，是一门将传统起重智慧与现代工程科技完美结合的艺术。它代表了起重作业从力量型向技术型、智慧型发展的先进方向，是衡量一个团队工程技术能力和项目管理水平的重要标尺。

3.4 风险防控体系构建

3.4.1 风险多维识别与分级

风险识别要贯穿项目整个生命周期,以边界条件分析结果为基础,从环境、设备、人员、工艺四个方面建立风险清单。环境风险主要是地质水文条件突变(地下水位突然上升、土壤液化)、受限空间内有毒有害气体积聚、周边构筑物突然发生变形等;设备风险是液压系统泄漏、锚点疲劳损伤、索具磨损、地坦克等移动设备卡滞等;人员风险是操作技能不达标、安全意识薄弱、应急处置能力不足等;工艺风险是多设备协同误差超标、吊装路径规划疏漏、仿真模型与实际工况偏差等。用风险矩阵法对识别出来的风险进行分层,按风险发生概率和影响程度,分成重大风险、较大风险、一般风险、低风险这4种。像锚点失效、重型构件坠落这些属于重大风险,要单独制定防控方案,索具有点磨损、操作稍微走神那种算一般风险,日常巡检加按规矩来就行。

3.4.2 风险防控关键技术与措施

不同的风险等级需要根据吊装技术的特点采取有针对性的控制方法。技术上采用实时监测系统是主要手段之一,在锚点、索具、构件及周边构筑物上安装高精度的应力传感器、位移传感器、气体检测仪,采用物联网实现风险数据的实时传输与分析。监测数据大于设定阈值就会发出预警信号,同时自动液压系统停机、应急制动等,实现风险早发现。管理上创建全流程的管控体系。方案设计阶段,把风险防控要求融入到吊装方案当中;在重大的风险点增设冗余设计,在关键锚点处设置了一主一备的双保险模式;施工前组织所有的参与人开展专项的培训和交底;强调风险点的识别方法和应急处理流程,并进行实战化演练;实施双人监护的制度,人员一名负责数据监测和分析,另一个人负责现场的安全检查;作业结束后对设备的状况以及风险控制的效果进行反思总结;形成经验资料库供未来项目使用。数字化技术给风险防控赋予了新途径,依靠 BIM 技术创建包含风险点的三维可视化模型,把风险等级,防控举措,监测数据等信息同模型关联起来,从而达成风险的动态追踪和可视化经营。并且利用大数据分析的技术去挖掘历史项目中已经出现过的风险点,预测类似项目会有什么潜在的风险点从而给方案改进提供数据支持。

3.4.3 应急处置与复盘优化机制

应急处置和复盘优化属于受限空间吊装风险防控的闭环核心部分,要创建起“快速反应-科学处置-复盘改进”的全流程机制,符合受限空间视野受限、救援复杂的特性,坚持精准高效、因地制宜的原则,防止二次风险。应急处置采取分级响应:一级响应针对监测数据轻度超标,班组长暂停作业、组织技术复核;二级响应对应设备局部故障或者构件微偏移,启动专项预案,通过备用锚点切换等方式进行处理;三级响应针对锚点失效等重大险情,指挥小组统筹撤离、警戒,并联动专业救援。各流程确定责任与时限,保证指令

明确。应急保障适配空间特性:设专属物资区,配备便携式应力检测仪、应急通风设备和防毒面具等;定期校验;组成技术骨干和安全员的应急分队,熟悉布局,每月进行一次“盲演”,强化快速加固、人员转移能力。复盘优化融入全周期当中,作业及应急后的多个部门经由调取数据和录像展开复盘工作,梳理出风险识别的遗漏之处、防控的薄弱环节以及改进的方面,形成一份包含问题、原因、改进措施、责任人、时限的问题清单报告。建立案例数据库关联解决方案,为同类项目提供支撑,实现防控能力持续提升。

3.4.4 党建引领发展

重大工程技术的发展与成功实践,离不开坚强有力的组织保障和思想引领。在我国众多大型复杂工程的背后,党建工作始终发挥着至关重要的政治核心和战斗堡垒作用。在受限空间吊装这类高技术、高风险的工程实践中,党建工作通过多种方式提供了坚实保障:首先,通过强化思想政治建设,筑牢安全质量意识,使“生命至上、安全第一”和“精益求精”的理念深入人心,为技术方案制定和现场作业树立了最高标准。其次,通过组建党员突击队、设立党员示范岗,在技术攻关和急难险重的吊装任务中,充分发挥党员的先锋模范作用和奉献精神,有效带动整个团队攻克技术瓶颈、保障工程节点。再者,党建工作促进了跨部门、跨专业的协同联动,通过构建高效的沟通协调机制,确保了设计、仿真、施工、安全等各环节紧密配合,形成了推动技术创新的强大合力。最后,严格的党风廉政建设和监督机制,为项目营造了风清气正的氛围,确保了资源高效配置、决策科学透明,从源头上保障了工程质量和投资效益。将党的政治优势、组织优势转化为技术发展和管理提升的创新优势、竞争优势,是中国特色工程建设管理的一条重要经验,中铁工业的三峰党建工作为此提供了较多实例样板。

4 总结

吊装技术的发展日新月异,未来的吊装系统会配备更先进的传感器,如高精度位移、视觉传感器,基于人工智能(AI)算法1对环境和吊物进行实时分析,实现自动避障、路径规划、精准定位和自适应控制。未来吊装技术的发展,将是智能化、无人化、绿色化以及新设备新技术应用深度融合、协同演进的过程。其核心目标是追求更高的安全性、效率、精度和环保效益。

参考文献

- [1] 马政纲、邵凯平、申建义、马国平、王伟.《液压整体提升施工工法》工法编号-YJGF204-2006
- [2] 杨华勇、李建斌等.《智能盾构理论与方法》北京:人民交通出版社股份有限公司,2024:283-293
- [3] 刘源.空间受限跨运营公路钢箱梁吊装技术[J].安装,2023,(03):56-59.
- [4] 张涛,杨志平,张星钰,等.基于BIM技术的受限空间钢箱梁施工研究[J].市政技术,2020,38(06):97-100+106.

Application Analysis of Energy Saving and Emission Reduction Technology in Construction Engineering under the Concept of Green Construction

Zhongqi Mao

Qitian Construction Group Co., Ltd., Qinzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

The promotion of green construction concepts in the field of building engineering plays a significant role in advancing energy conservation, emission reduction, and green transformation within the construction industry. With the rapid expansion of building scale and the continuous increase in the proportion of construction energy consumption, energy waste, material loss, and pollution emissions during the construction phase have become critical limiting factors for industry development. Guided by the concept of green construction, the systematic application of material substitution, structural optimization, energy consumption management, carbon emission control, and pollution reduction technologies can effectively reduce resource consumption throughout the construction process, achieving simultaneous improvements in energy utilization efficiency and reductions in environmental impact.

Keywords

Green construction; Building engineering; Energy-saving technologies; Emission reduction technologies; Management system

绿色施工理念下建筑工程节能减排技术应用分析

毛忠奇

启天建设集团有限公司, 中国·浙江衢州 324000

摘要

绿色施工理念在建筑工程领域的推广,对推动建筑业节能减排和绿色转型具有重要作用。随着建筑规模快速扩大和施工能耗占比持续提升,施工阶段的能源浪费、材料损耗及污染排放成为行业发展的关键限制因素。在绿色施工理念指导下,通过材料替代、结构优化、能耗管控、碳排放控制和污染物减排技术的系统应用,可有效降低建筑施工全过程的资源消耗,实现能源利用效率提升与环境负荷削减的同步推进。

关键词

绿色施工; 建筑工程; 节能技术; 减排技术; 管理体系

1 引言

建筑工程施工阶段的能源消耗强度高、材料用量大、污染排放集中,是建筑领域节能减排工作的重点环节。传统施工模式普遍存在设备运行效率偏低、材料损耗率过高、施工废弃物排放量大、能源管理粗放等问题,难以满足当前绿色低碳发展的要求。绿色施工理念作为建筑业转型升级的重要方向,强调在施工全过程中实现资源节约、环境友好和高效管理,通过技术优化与制度创新减少能源消耗和污染排放。近年来,随着国家节能减排政策持续推进,绿色施工技术体系不断完善,施工管理方式逐步由粗放型向精细化、集约化、节能化转变。

【作者简介】毛忠奇(1984-),男,中国福建武夷山人,本科,工程师,从事房建工程施工研究。

2 绿色施工理念在建筑工程中应用的重要性

2.1 绿色施工对资源节约型建筑发展的推动作用

绿色施工理念强调在建筑工程的各个阶段减少资源消耗,通过优化材料选择、施工工艺与现场管理措施,实现资源利用效率的整体提升。建筑材料在传统施工中浪费率普遍在2%到5%之间,通过推行材料计量配送、周转材料循环利用和结构化加工,可将材料损耗率降低到1%左右,明显提升资源利用效益。在钢筋加工、模板周转和混凝土浇筑等工序中,工厂化预制、定型化模板与高性能混凝土技术的采用,使现场材料浪费得到抑制,建筑废弃物产生量下降约20%到30%。绿色施工通过构建资源节约型施工体系,为建筑工程提供节能降耗的基础路径,并推动建筑领域向高效、低耗、减废方向发展,强化建筑工程全过程的资源节约能力。

2.2 绿色施工提升施工阶段能源利用效率的关键价值

施工阶段能源消耗主要集中在机械设备运行、临时设施用电和材料运输环节,能耗占工程总能耗比重可达30%到50%。绿色施工理念通过全过程能源管理和设备高效运行策略,使施工能源利用效率得到显著提升。采用变频设备、电机节能控制技术与能源监测系统后,机械设备能耗可降低8%到12%,塔吊、提升机等高耗能设备通过功率调节与能源回收技术,可使单位作业能耗下降10%以上。施工现场照明采用LED光源和分区控制系统,可减少照明能耗约30%。施工机具的工况监测技术能够实时掌握运行状态,提高设备利用率,使机械闲置能耗减少15%左右。绿色施工通过用能管理和技术干预,有效提升施工阶段能源利用效率,为工程节能减排奠定基础^[1]。

3 绿色施工理念下建筑工程节能减排技术分析

3.1 基于材料替代与结构优化的节能技术路径

材料节能技术通过选用低能耗、低污染、可再生材料,实现建筑工程材料体系的绿色替代。高性能混凝土、再生骨料、低导热保温材料等在施工中得到推广,再生骨料替代率达到20%时,可降低材料生产能耗约15%。钢筋加工采用机械连接和工厂化加工方式,可减少钢筋损耗约2%,并降低现场切割能耗约10%。在结构节能方面,通过优化梁板截面、采用装配式结构体系和预制构件生产模式,可减少现场施工能耗和模板材料使用量,预制率达到40%的工程中,材料浪费可降低约25%。装配式围护系统采用低导热材料,使建筑外维护结构传热系数降低 $0.2\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以上。材料替代与结构优化共同构成绿色施工节能的核心技术路径,在减少资源消耗的同时提升材料使用效率,使工程整体能耗得到明显控制。

3.2 依托施工过程管理的能源消耗控制技术

施工阶段能源控制通过现场管理体系、设备运行策略与智能监测措施实现能耗的可控与降低。能源监测系统对施工现场临电、机械能耗和分区用能进行实时记录,使表观能耗数据误差控制在 $\pm 3\%$ 以内,通过负荷分配和用电错峰策略,可降低临时用电量约8%。机械设备运行方面,通过引入变频调速技术、液压能效提升装置与自动功率调节模块,可使塔吊、泵车等设备能耗下降10%到15%。施工机具采用分级启停程序,可减少怠速能耗约20%。运输环节采用集中调度、车辆轨迹监控及电动运输设备应用,可使单位运输能耗降低约12%。材料加工区布局优化后,分散能耗损失降低5%以上。全过程能耗控制技术通过管理、设备与调度协同,实现施工阶段总体能耗系统下降。

3.3 面向全过程的污染物减排与资源循环利用技术

污染物减排技术覆盖扬尘、噪声、废水和固废等方面,通过源头削减、过程控制和末端治理实现施工环境负荷的降低。现场扬尘控制采用雾化喷淋、围挡密封与道路硬化技术,

使PM10浓度降低30%到40%。噪声控制通过低噪声设备、隔音屏障与作业时间调整,使施工噪声降低10至15分贝。施工废水经沉淀、絮凝与循环利用处理,可达到70%以上的水资源回收率。固体废弃物通过再生骨料加工与模板周转利用,可减少约20%的固废排放量。通过设置材料回收区、分类管理制度与周转材料跟踪系统,可提升材料利用率5%到8%。全过程污染物减排技术通过系统治理,实现施工阶段环境影响的显著降低,为绿色施工目标的实现提供技术支撑^[2]。

4 绿色施工管理体系在节能减排中的实施路径

4.1 施工阶段能源管理体系的构建方法

施工阶段能源管理体系依托组织、制度、技术三方面共同构建,通过明确能源管理责任、设置能耗监测点位、制定能源使用标准和运行规范,使施工能耗得到系统化管理。现场能源审计能够识别高能耗设备和薄弱环节,通过能耗基准值的建立,使各类设备与分区的能耗水平保持在合理区间。能源监测系统对临电总表、分表、机械设备能耗实施实时采集,使能耗数据透明化,便于调节施工负荷和优化用能策略。施工组织设计中将能源管理内容纳入专项方案,依据施工强度和工序特点配置设备运行计划,以减少重复作业与空载运行。能源管理体系通过用能责任到岗、用能数据可视化和用能标准量化,实现施工能耗的持续控制,使建筑工程施工阶段能源管理具备制度化和精细化特征。

4.2 施工全过程碳排放控制机制

施工阶段碳排放控制需要在材料、设备、工序和运输等环节建立全过程管理机制,通过碳排放核算、碳源识别、减排措施配置形成系统控制模式。材料环节通过推进低碳混凝土、再生骨料、装配式构件应用,使材料生产环节碳排放量下降约10%到15%。设备环节通过设备能效分级管理、无功损耗调节与施工机械保养制度,减少机械排放强度,使单位作业碳排放下降约8%。工序环节通过优化施工工序衔接、减少返工和等待时间,可降低约5%至7%的间接排放量。运输环节通过集中调度、提高车辆周转率和使用新能源车辆,使运输环节碳排放下降12%以上^[3]。全过程碳排放控制机制通过碳排放核算平台对排放数据进行动态更新,使碳排放管理可量化、可追溯,为绿色施工提供系统化的低碳路径。

4.3 施工现场绿色监督与评价机制

绿色监督与评价机制通过制度建设、过程监控和结果评价三个层面推进,以确保绿色施工要求在现场落地执行。监督体系由项目负责人、专业管理人员和第三方监理共同组成,通过日常巡查、专项检查与阶段性评估形成持续监管链条。绿色施工评价指标涵盖扬尘控制、噪声管理、能源消耗、材料利用与固废排放等内容,通过数据记录和评分模型对现场绿色施工水平进行量化评价。能源、废水、固废等关键指

标依据项目规模设定控制值，现场监测设备将实时数据上传系统平台，实现问题自动预警和责任追踪。监督机制定期对施工单位绿色施工表现进行排名，评价结果作为履约考核和后续项目准入的重要依据。绿色监督与评价机制通过数据化监管手段，使绿色施工要求从制度转化为可执行、可考核的管理工具，图1为绿色施工理念施工现场的7大评价体系。



图1 绿色施工理念施工现场的7大评价体系

5 绿色施工节能减排技术的综合提升路径

5.1 节能减排技术协同应用模式

节能减排技术在建筑工程中需要形成材料节能、设备节能、工序节能和环境治理等多项技术的协同体系，通过多环节联动提升整体节能减排效益。材料节能通过使用再生骨料、装配式构件和低导热材料减少原生材料开采带来的资源消耗；设备节能通过引入变频控制、能效提升装置与实时监控技术，使设备运行能耗降低10%以上；工序节能通过优化施工进度计划与机械协同策略，使重复作业和待机能耗减少约15%；环境治理技术通过扬尘抑制、废水回收与固废再利用，使污染物排放总量减少约20%。协同应用模式以全过程管理为核心，通过技术组合、数据共享和责任联动机制，将节能与减排形成协同增效效应，使绿色施工在规模化应用中实现更高效的综合效益。

5.2 施工现场信息化支撑节能减排的技术路径

信息化技术为施工现场节能减排提供数据监控、智能调度和实时预警能力，通过数字化手段提升节能管理效率。能源管理平台集成临电监控、机械能耗监测和分区域用能记录，实现能耗数据的自动采集与可视化，能耗异常可在分钟级时间内被识别。施工调度系统依据设备运行参数和工序安排优化设备启停策略，使机械闲置时间缩短约20%。运输管理系统结合车辆定位、路径优化与调度算法，使运输能耗

下降约10%左右。环境监测设备对扬尘和噪声进行实时采样，数据上传后形成绿色施工指标曲线，用于评估污染物变化趋势。信息化技术通过智能监测、自动控制和数据分析三项能力构建信息化节能减排体系，使施工现场管理更加精准、高效和低耗^[4]。

5.3 节能减排技术在建筑工程中的推广机制

节能减排技术的推广依托政策引导、标准规范、示范工程和市场机制共同推动，通过制度化与工程化双路径加速技术应用。政策层面通过节能施工规范、绿色施工评价标准与专项激励政策，为技术应用提供制度约束与经济激励。行业层面通过编制技术指南与培训体系，使施工单位掌握节能减排技术的实施要求和操作流程。项目层面通过建设绿色施工示范工程，使先进技术在实际项目中形成可复制模式，示范项目节能效益通常比常规项目提高10%到15%。市场层面通过绿色采购制度推动再生材料、节能设备和环保工艺的规模化应用，使节能减排技术具备产业化推广基础。推广机制通过制度、技术与市场的共同驱动，使节能减排技术在建筑工程领域实现持续扩散与有效落地。

6 结语

绿色施工理念下建筑工程节能减排技术的系统应用，已经成为建筑行业推动高质量发展的重要方向。通过在施工阶段引入材料节能、设备节能、工序节能与污染物减排等多项技术措施，能够有效降低能源消耗与环境负荷，使施工全过程的资源利用更加集约高效。绿色施工管理体系的构建以及信息化技术的深度融入，为节能减排目标的实现提供了制度保障和技术支撑，使施工现场的能源管理、碳排放控制和监督评价等环节形成闭环管理。未来建筑工程实施绿色施工的深度与广度将持续扩大，通过技术协同、管理创新和机制完善，使节能减排成为建筑工程建设的常态化要求，为行业绿色转型和可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 褚复含,王陆伟.绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新路径探究[J].全面腐蚀控制,2025,39(10):157-160.
- [2] 靳艺超.绿色施工理念下建筑工程节能施工技术探析[J].居业,2023,(06):13-15.
- [3] 黄伟祥.研究绿色施工理念下建筑工程节能施工技术[J].建设科技,2023,(04):82-84.
- [4] 许斌,李锡涛.浅谈绿色施工理念下建筑工程节能施工技术[J].智能建筑与智慧城市,2021,(12):124-125.

Research on Optimization and Quality Control of Prefabricated Assembly Construction Technology for Highway Bridges

Yun Wei Tingshu Hu*

Yunnan Jiaotou Public Construction Energy Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

In response to the high requirements for quality, efficiency, and environmental protection in the construction of highway bridges in China, as well as the problems of unstable component production accuracy, waiting for optimization of assembly connections, and imperfect quality control system in prefabricated assembly construction technology, this study conducts relevant optimization and control research. The research covers technology status analysis, multi link technology optimization, construction of a full process quality control system, and engineering case verification, using literature research, case analysis, and comparative analysis methods. Technical optimization focuses on the three core processes of prefabrication, transportation and hoisting, and assembly and connection. Quality control runs through the entire process of raw materials, prefabricated components, and on-site construction. Through the verification of a case study of a cross river super large bridge on a provincial ring expressway, the proportion of qualified component size deviation after optimization exceeds 98%, and the mechanical performance of the connecting parts meets the design value of 105% or more. The construction period is shortened and the benefits are good, which can provide reference for similar projects. At the same time, the research shortcomings are pointed out and the future direction is clarified.

Keywords

highway bridges; Prefabricated assembly; Construction technology optimization; Engineering Case

高速公路桥梁预制拼装施工技术优化及质量控制研究

魏云 胡廷树*

云南交投公建能源工程有限公司, 中国·云南昆明 650000

摘要

针对我国高速公路桥梁建设对质量、效率及环保的高要求,以及预制拼装施工技术存在的构件生产精度不稳、拼装连接待优化、质量控制体系不完善等问题,本研究开展相关优化与控制研究。研究涵盖技术现状分析、多环节技术优化、全流程质量控制体系构建及工程案例验证,采用文献研究、案例分析与对比分析方法。技术优化聚焦预制工艺、运输吊装、拼装连接三大核心环节,质量控制贯穿原材料、预制构件、现场施工全流程。经某省绕城高速跨江特大桥案例验证,优化后构件尺寸偏差合格占比超98%,连接部位力学性能达标设计值105%以上,工期缩短且效益良好,可为同类工程提供参考,同时指出研究不足并明确未来方向。

关键词

高速公路桥梁; 预制拼装; 施工技术优化; 工程案例

1 引言

我国高速公路桥梁建设规模持续扩大,对施工质量、效率及环保要求不断提高。预制拼装施工技术因工期短、质量稳、环境影响小等优势广泛应用,但存在构件生产精度不稳、拼装连接待优化、质量控制体系不完善等问题。因此,开展该技术优化与质量控制研究,对提升工程质量、缩短工期、降低成本及推动技术升级具有重要意义。本研究包括预制拼装施工技术现状分析、多环节施工技术优化、全流程质量控制体系构建及工程案例验证。方法上综合采用文献研究

法,梳理技术现状;案例分析法,提炼实践经验;对比分析法,凸显技术优势与改进方向,为最优方案选择提供支撑。

2 施工技术优化措施

预制工艺优化:为优化高速公路桥梁预制构件生产质量与效率,需从模板、钢筋加工安装、混凝土浇筑养护三大核心环节革新。模板方面,摒弃传统钢、木模板弊端,采用铝合金模板(重量轻、精度高,周转次数超200次,构件尺寸偏差 $\pm 2\text{mm}$ 内)或塑料模板(成本低、可回收,适配复杂形状),结合模块化设计与有限元分析优化结构,提升通用性与稳定性。钢筋加工引入数控设备,弯曲精度达 $\pm 1^\circ$,效率提升50%以上;安装采用定位架与模具,控制位置偏差 $\pm 5\text{mm}$ 内,同时强化全流程质量检查。混凝土施

【作者简介】魏云(1988-),男,中国云南昭通人,本科,工程师,从事公路施工研究。

工优化配合比,降低水胶比至0.40,添加高性能减水剂,抗压强度提升10%且抗渗达P8;采用分层浇筑(30cm厚)与高频振捣,避免缺陷;搭配智能养护系统,实时调控温湿度,使28天强度达设计值110%以上。三大环节的技术革新,全面提升了预制构件的尺寸精度、力学性能与生产效率,为后续拼装施工奠定坚实基础^[1]。

运输与吊装技术提升:运输与吊装是预制拼装施工的关键环节,需精准优化以保障安全与精度。运输方案按构件规格适配工具:小型构件用载重卡车,大型箱梁、T梁等选用平板挂车(适配50-100吨构件)或炮车(适配复杂路况),车厢底部铺设减震垫并设支撑座,通过钢丝绳、紧固螺栓等固定装置多点加固,防止构件震动损坏。吊装设备按需选型:汽车起重机适配开阔场地中小型构件,履带起重机应对复杂地形大型构件(80-150吨),龙门起重机提升批量吊装效率。工艺上采用多点吊装技术,大型构件经受力模拟确定吊点,控制变形在5mm内;结合全站仪、GPS实时监测,调整吊装位置与角度,使安装精度控制在±5mm内,全面提升吊装安全性、效率与精准度。

拼装连接技术创新:拼装连接与定位调整是保障桥梁整体性与拼装精度的核心。连接方式摒弃传统焊接、螺栓及湿接缝的弊端,推广灌浆套筒连接(高强灌浆料需符合GB/T 51440-2023《装配式混凝土结构灌浆施工技术标准》,保障连接密实性与强度,抗拉、抗剪性能达到设计要求)和胶结连接(高性能结构胶粘接,施工效率提升30%以上,防水性优),大幅提升连接可靠性。定位调整技术方面,采用全站仪精准测量水平角、距离,实时监测构件控制点,拼装精度控制在±3mm内;GPS技术适用于大型/远距离工程,实现全天候实时定位跟踪。搭配定位销、定位板等装置,先通过定位销初步定位,再经定位板微调垂直度与水平位置,高效保障构件精准就位。新型连接方式与先进定位技术的结合,全面提升了预制拼装的质量、效率与结构稳定性。

3 施工质量控制要点

质量控制贯穿高速公路桥梁预制拼装全流程,需分阶段严格落实。原材料控制方面,钢筋进场按GB/T 1499.2-2018标准每60t为一批检验,核查屈服强度($HRB400 \geq 400\text{MPa}$)等指标,存储垫高200mm以上分类防雨防潮,使用前处理锈蚀缺陷;混凝土原材料中,水泥按工程特点选型,进场核查强度、凝结时间等,存储期不超3个月,骨料优先选级配良好的中砂(细度模数2.3-3.0)和连续级配石子,外加剂依需求选型并按GB 8076-2017标准检验,精准计量掺量。预制构件控制聚焦尺寸精度(长度、截面尺寸等按规格把控偏差,用高精度模具及专业工具检测)、外观质量(针对蜂窝、麻面、裂缝采取预防与分类修补措施)及强度性能(按规范制作试块检验抗压、抗渗、抗冻等指标)。现场施工中,运输需按构件规格选适配车辆,车厢铺减震垫并设支撑座,

用专用装置多点固定并检查牢固性;存放场地需地势高、排水好、地基坚实且硬化处理,不同类型构件分类存放并设明显标识,全程保障各环节质量符合设计与规范要求。

4 工程案例

4.1 案例选取与工程概况

本研究选取了某省绕城高速跨江特大桥作为案例进行深入分析。该项目位于省域中部沿江平原与丘陵过渡地带,是绕城高速东线的关键控制性工程,对于打通区域交通环线、强化沿江产业带联动、促进城乡融合发展具有重要意义。该桥梁全长1280米,共28跨,全线采用预制拼装施工技术。上部结构为预应力混凝土预制箱梁,共计112片,箱梁跨径主要为30米和40米两种规格,梁高1.8米,顶板宽度12.75米;下部结构采用预制桥墩与现浇承台组合形式,桥墩为圆形实心截面,直径1.5米,高度根据墩位地势在8-22米之间;承台为矩形整体式结构,尺寸统一为长6.5米、宽4.8米、高2.0米。桥梁设计使用寿命为100年。项目所在地地形兼具平原低洼区与丘陵缓坡,3处墩位穿越软土地基段(承载力80-120kPa),需通过地基处理保障结构稳定性;区域属亚热带季风气候,年平均气温18.5℃,6-8月高温多雨(月均降雨量220mm),冬季最低气温不低于0℃,气候条件对预制构件运输、拼装及混凝土养护提出了较高要求^[2]。

选择该项目作为案例,主要是因为其具有典型性和代表性。该项目全面应用预制拼装施工技术,涵盖中小跨径箱梁、预制桥墩等核心构件,同时面临软土地基处理、高温多雨气候应对等常见工程难题,通过对该项目的分析,能够全面深入地验证预制拼装施工技术的优化及质量控制措施的有效性,为同类地质、气候条件下的高速公路桥梁工程提供有益参考和借鉴。

4.2 施工技术应用与优化

该项目初期采用的原施工技术方案存在诸多不足:预制工艺用传统钢模板,存在重量大、周转次数有限、表面平整度欠佳等问题,钢筋加工安装依赖人工,精度与效率低,混凝土浇筑为常规工艺,养护以自然养护结合洒水养护为主,效果受环境影响不稳定;运输环节减震固定措施简单,仅铺筒易橡胶垫、用普通绳索固定,存在安全隐患,吊装选用汽车起重机与龙门起重机,但工艺传统、缺乏精准测量控制,精度不足;拼装连接采用传统湿接缝与部分螺栓连接,前者施工周期长、易开裂,后者可能松动,定位调整依赖人工测量与简单工具,精度难以保障。针对这些问题,项目实施了系列技术优化措施:预制工艺引入铝合金模板,尺寸精度达±1mm内、表面平整度误差<0.5mm,配备数控钢筋加工设备,加工精度≤±2mm、效率提升60%以上,辅以定位架与模具控制钢筋安装偏差,优化混凝土配合比并采用分层浇筑、高频振捣工艺,引入智能养护系统

使 28 天抗压强度达设计值 115% 以上；运输环节为大型构件增设多层减震橡胶垫与专用支撑座，用高强度钢丝绳和专业紧固装置固定，吊装选用升级后的履带起重机与大型龙门起重机，搭配多点吊装技术及全站仪、GPS 实时监测，精度控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内；拼装连接关键部位采用灌浆套筒连接，定位调整结合全站仪与定位销、定位板，桥墩拼装精度 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，全面提升了施工质量与效率。

4.3 质量控制实施与效果

质量控制体系建立：项目成立以项目经理为组长，项目总工、质量总监为副组长，各部门负责人及专业技术人员为核心成员的质量管理领导小组，全面统筹质量管理工作。明确岗位职责权限：项目经理作为工程质量第一责任人，保障国家、行业、地方标准规范及企业质量管理规定全流程落地；项目总工承担技术总责，牵头编制专项施工方案、工艺标准及操作规程，制定针对性质量保证措施；质量总监协助开展日常质量管理，承担直接管理责任，负责组织质量检查、下发缺陷整改通知并及时汇报。同时，制定涵盖质量目标管理、责任、检验、验收、奖惩的全链条管理制度。确立“一次性验收合格，争创优质工程”核心目标，将其层层分解至各部门、岗位及施工人员，实现全员参与、全程覆盖。建立严格的质量责任追溯机制，对质量问题责任人严肃追责；配套奖惩办法，对质量管理成效突出的予以表彰奖励，对违规造成质量事故的从严处罚，以奖惩倒逼责任落实。

质量控制措施执行：施工过程中严格落实全流程质量控制，从原材料、预制构件到现场施工层层把关。原材料方面，对钢筋、水泥、骨料、外加剂等核心材料严格检验：钢筋抽样检测屈服强度、抗拉强度；水泥按工程特点选型，检测品种、强度等级等参数；骨料检验粒径、级配及含泥量；外加剂重点检测减水率、凝结时间差，合格后方可投入使用。预制构件聚焦尺寸精度、外观质量与强度性能，采用全站仪等高精度仪器检测尺寸偏差，巡检并修补蜂窝、麻面等缺陷，按规范制作混凝土试块并开展抗压强度试验。现场施工重点把控运输存放与吊装拼装：运输车辆配备减震固定设施，存放场地设防雨防潮防晒措施；吊装拼装遵循方案规程，运用全站仪、GPS 等仪器实时监测构件位置，动态调整确保精准就位，保障施工精度与质量^[3]。

质量检测与评估结果：项目采用常规检测与专项检测相结合的多元化方法，实现工程质量全覆盖。原材料检测增设化学成分分析、无损检测等深度手段；预制构件检测引

入超声波、回弹法等无损技术，排查内部隐患；现场施工通过全站仪、水准仪测量线形、高程等参数，用压力试验机等设备检测连接部位力学性能。

经严格管控与全面检测，项目质量评估结果优良：原材料 100% 合格，满足设计与规范要求；预制构件尺寸偏差合格占比超 98%，外观缺陷发生率 $\leq 2\%$ ，强度全部达标；桥梁整体施工质量优良，线形平顺，高程和垂直度偏差均控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内，连接部位抗拉强度、抗剪强度分别达设计值的 105% 和 110% 以上。此次质量控制措施的成功实施，充分验证了施工技术优化方案的有效性，为同类高速公路桥梁预制拼装工程提供了可靠实践经验与技术借鉴。经严格管控与全面检测，项目质量评估结果优良：原材料质量 100% 合格，完全满足设计与规范要求；预制构件尺寸偏差合格占比超 98%，外观质量缺陷发生率控制在 2% 以内，构件强度全部达到设计强度标准；桥梁整体施工质量优良，线形平顺，高程和垂直度偏差均控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，连接部位抗拉强度、抗剪强度分别达到设计值的 105% 和 110% 以上。此次质量控制措施的成功实施，充分验证了施工技术优化方案的有效性，为同类高速公路桥梁预制拼装工程提供了可靠的实践经验与技术借鉴。

5 结论

本研究聚焦高速公路桥梁预制拼装施工技术优化与质量控制，经技术与工程验证成效显著。技术优化方面，预制环节采用新型模板、数控钢筋加工及智能养护系统；运输吊装通过定制方案与精准测量提效；拼装连接创新应用灌浆套筒保障可靠性。质量控制构建全流程体系，严格把控各环节标准与检测。项目验证显示工程质量优良、工期缩短，获良好效益。研究存在新型材料与智能技术应用不深入、特殊环境适配性探索不足等局限。未来需加大高强材料、BIM 等智能技术研发，拓展大跨径及特殊环境技术适配性，推进标准化建设，为交通基建提质升级提供支撑。

参考文献

- [1] 胡路遥.兰太高速公路桥梁盖梁预制安装机械化施工技术[J].石河子科技,2025,(05):60-61.
- [2] 侯玉茹.公路桥梁预制节段拼装施工关键技术[J].交通世界,2025,(08):121-123.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.08.054.
- [3] 黎颖.某高速公路桥梁预制T梁施工流程及技术方案研究[J].工程技术研究,2022,7(11):63-65.DOI:10.19537/j.cnki.2096-2789.2022.11.019.

AGC optimization design of large hydroelectric generating units

Wei Yang Yuanlin Tang

Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211102, China

Abstract

The paper takes a large hydropower unit as an example, introducing the AGC head treatment scheme, the optimal design of AGC parameters, and proposes an AGC gain adjustment strategy to accelerate secondary frequency regulation.

Keywords

AGC; head conditions; the optimal design of AGC parameters; adjustment strategy

大型水电机组的 AGC 优化设计

杨伟 唐元霖

南京南瑞继保电气有限公司, 中国 · 江苏 南京 211102

摘要

本文以某大型水电机组为实例, 介绍了水电机组 AGC 水头处理方案, AGC 参数的优化设计, 并提出一种加快二次调频的 AGC 增益调节策略。

关键词

AGC; 水头; AGC 参数的优化; 增益调节

1 引言

由于水电机组调节性能好, 调节速度快, 一般情况下是由水电机组来承担电力系统日负荷中的峰荷和腰荷。水电机组 AGC (自动发电控制) 的核心作用是通过动态调节机组有功功率, 实现电网频率稳定与经济调度。水电机组 AGC 按预定条件和要求, 以迅速、经济的方式自动控制水电厂有功功率来满足系统需要的技术, 它是在水轮发电机组自动控制的基础上, 实现全电厂自动化的一种方式。根据水库上游来水量和电力系统的要求, 考虑电厂及机组的运行限制条件, 在保证电厂安全运行的前提下, 以经济运行为原则, 确定电厂机组运行台数、运行机组的组合和机组间的负荷分配。在完成这些功能时, 要避免由于电力系统负荷短时波动而导致机组的频繁启停。

水头是水电机组运行的核心参数, 直接影响机组出力特性和调节能力, 故而水电机组 AGC 优化设计需综合考虑水头动态变化、机组特性及电网需求, 通过参数整定、控制策略优化和算法升级, 实现快速响应、稳定运行和能效提升。

本文以某大型水电机组为实例, 介绍了水电机组 AGC

自动水头和手动水头的处理方案; 不同水头下 AGC 参数优化、同一水头的不同负荷段 AGC 参数优化, 提升调节速率和调节精度; 并提出一种加快二次调频的 AGC 增益调节策略。

2 AGC 水头处理方案

2.1 总体原则

(1) 水头采用自动水头方式, 以集控下发水头为主用, 厂内测量水头为第一备用, 手动水头为第二备用;

(2) 若集控下发水头、厂内测量水头均出现故障, 程序闭锁自动水头值、切手动水头为主用水头。

(3) 水头控制方式分自动方式和手动方式, 切换控制方式需要操作员手动操作。

2.2 水头可信判断

(1) 集控下发水头可信判定条件: 集控下发水头在正常水头范围 (152m-215m) 内; 集控下发水头与当前水头值的差不超过 2m; AGC 操作权在集控侧; AGC 处自动水头控制方式。

(2) 厂内测量水头可信判断条件: 上游库水位及下游尾水位信号品质正常; $758\text{m} < \text{上游库水位} < 840\text{m}$, $590\text{m} < \text{下游尾水位} < 635\text{m}$; 通过上下游水位计算出的厂内测量水头值在正常水头范围 (152m-215m) 内。厂内测量水头值与

【作者简介】杨伟 (1988-), 男, 中国陕西子长人, 本科, 工程师, 从事自动控制系统研究及应用研究。

当前水头值的差不超过 2m。

(3) 电站下水头可信判定条件：电站下水头在正常水头范围（152m-215m）内；电站下水头与当前水头值的差不超过 2m；AGC 处手动水头控制方式。

2.3 厂内测量水头值计算

厂内测量水头输入信号源包含两套现地测量元件，一套用于库水位测量，一套用于尾水位测量。每套测量元件由 1 个投入式水位传感器和 2 个雷达式水位传感器组成，采集水位后经 4-20mA 信号接入到监控系统的模拟量输入通道。

厂内测量水头值的计算方法为：先由一套测量元件的 3 处测点的库水位进行综合处理得出综合库水位，由另一套测量元件的 3 处测点的尾水位进行综合处理得出综合尾水位，再用上游综合库水位减去下游综合尾水位得出水头值。

综合水位的计算方法采用中位数绝对偏差法（MAD）和水位波动判定筛选出异常值并剔除后再取平均值，具体方法是：对 3 个测点值分别判断一个小时波动是否超过 0.3m，若超过则认为此测点值异常；对 3 个测点值 A、B、C 求出中位数 M，计算出 3 个绝对偏差 |A-M|、|B-M|、|C-M|；求出 3 个绝对偏差的中位数 MAD；若 |A-M|/MAD>3 则判定 A 异常，B、C 类似；若无异常值，取 A、B、C 三者平均值作为综合库水位；若有异常值，剔除异常值后，取剩下 2 个测点值的平均值作为综合库水位。

2.4 水头滤波处理

对厂内测量水头值进行 2s 抽样，进行 20 次滑动平均（计算 20 个采样周期的平均值），计算出厂内测量滑动平均水头值。厂内测量滑动平均水头值可信判断条件为：厂内测量水头可信；抽样的新值与滑动平均水头值的差小于 0.3m。厂内测量滑动平均水头值与当前水头值的差不超过 2m。

若厂内测量滑动平均水头值不可信，让厂内测量滑动平均水头值跟踪手动水头值。

2.5 主用水头选择

主用水头优先级为：集控下水头 > 厂内测量水头 > 手动水头。

如果集控下水头可信，取集控水头值为主用水头；否则，若厂内测量水头可信，取厂内测量水头为主用水头。如果两路水头均不可信，程序切换手动水头值为主用水头，并发出简报报警，切换后暂时保持原主用水头值，等待接受操作员设定新的手动水头值，设置的新水头值与原水头值相差不得超过 2m（若超过 2m 则设置无效），如想要设定水头

与当前水头相差过大，可采用多次设值逐步实现。当水头测值超过最高/最低限值时，AGC 禁止投入。

当集控下水头可信或厂内测量水头可信时，操作员可以将水头控制方式切换至自动方式。

3 AGC 参数优化

3.1 不同水头下参数优化方案

水电机组在同样的导叶开度下，更高水头时，发电效

率更高、调节速率更快，因此为了有功控制更精准、更快速，更好地适应不同水头下有功控制速率要求，根据水头变化，对比例系数、调节周期、最大调节脉宽、最小调节脉宽共 4 组调节参数进行自动切换，其中比例系数还可以根据不同负荷段进行自动切换。

表 1 不同水头下的参数表

水头 (m)	比例系数	调节周期	最大调节脉宽	最小调节脉宽
164~180	K1	4.8	2.4	0.1
180~195	K2	4.8	2.4	0.1
195~215	K3	5.0	2.4	0.1
215~231	K4	5.0	2.4	0.1
231~241	K5	5.2	1.8	0.1
241~251	K6	5.2	1.8	0.1

3.2 同一水头下比例系数参数优化方案

在同一水头下，在特定负荷段，为了有功控制控制更精准，采用低负荷段（120-240MW）、高负荷段（500-600MW）、其他负荷段三个比例系数数值，以更好地适应不同负荷段有功控制速率要求；并且每个负荷段根据调节量大小，按调节量 ≤ 30MW、> 30MW 两种情况设置比例参数。

表 2 调节量 ≤ 30MW 时比例系数的参数表

比例系数 \ 负荷 (MW)	120-240	500-600	其他负荷段
K1	6.5	6	5.5
K2	6.5	6	5.5
K3	6.2	6.0	5.8
K4	6.2	6.0	5.8
K5	5.0	4.5	4.0
K6	4.0	3.8	3.6

表 3 调节量 >30MW 时比例系数的参数表

比例系数 \ 负荷 (MW)	120-240	500-600	其他负荷段
K1	6.2	6.0	5.8
K2	6.2	6.0	5.8
K3	6.0	5.8	5.8
K4	6.0	5.8	5.8
K5	5.0	4.5	4.0
K6	4.0	4.0	4.0

4 AGC 增益调节策略

4.1 AGC 增益调节的意义

水电机组 AGC 加快二次调频，快速响应电网的频率变化，可抑制频率持续波动，提升电网的频率稳定性，增强电网抗扰动能力，同时参与二次调频，可以获得电网的二次调频经济奖励，提高电厂的经济收益。

4.2 AGC 增益调节方案

(1) 当全厂 AGC 功能投入状态、全厂 AGC 调节源在调度、调度调节处于二次调频模式（AUTOR 控制模式、SCHEA 控制模式、SCHEO 控制模式三种模式取或），以

上三个条件均满足时,判断 AGC 处于二次调频状态,即机组的二次调频增益允许。

(2) AGC 计算的机组有功指令与机组当前有功实发值做差运算并取绝对值,将偏差绝对值与增益门槛(经现场调试,取 5%)进行比较。

(3) 判断二次调频指令是否会导致机组穿越振动区。

(4) 当机组的二次调频增益允许、偏差绝对值小于增益门槛、二次调频指令不导致机组穿越振动区,则进入机组

AGC 增益触发模式。

(5) 当机组处于 AGC 增益触发模式时,在机组 LCU 发给调速器系统原有有功脉宽的基础上,叠加增益补偿脉冲长度(经现场调试,取 0.2 秒)。例如机组 LCU 发给调速器系统的原有有功脉宽为 1 秒,当机组处于 AGC 增益触发模式时,叠加增益补偿脉冲长度 0.2 秒,最终机组 LCU 发给调速器系统的有功脉宽为 1.2 秒,可以显著加快有功调节速率,更快速地响应电网的二次调频指令。

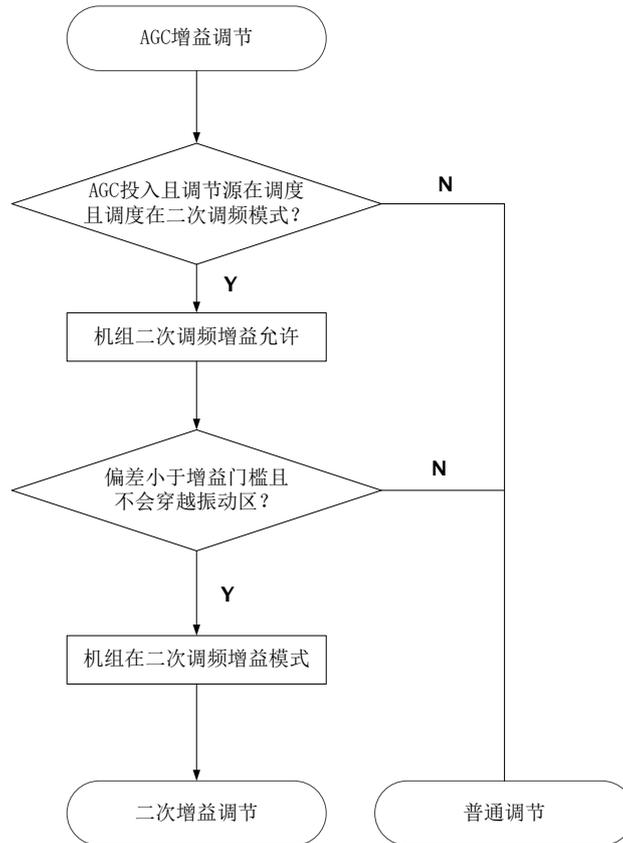


图 1 AGC 增益调节判断流程

5 结语

本文研究的水电机组的 AGC 优化设计,在某大型水电监控项目成功应用,验证了方案的可行性与合理性,提升了水电机组 AGC 的调节水平。水电机组 AGC 自动水头和手动水头的处理方案,提升了电厂的自动化水平;不同水头下 AGC 参数优化、同一水头的不同负荷段 AGC 参数优化,提升了 AGC 的调节速率和调节精度;AGC 增益调节,可以加快二次调频响应,提升电网的频率稳定性,提高电厂的经济收益。

参考文献

- [1] DL/T 5186-2004 水力发电厂机电设计规范
- [2] DL/T 578-2008 水电厂计算机监控系统基本技术条件
- [3] DL/T 1626-2016 700MW及以上机组水电厂计算机监控系统基本技术条件
- [4] DL/T 321-2012 水力发电厂计算机监控系统与厂内设备及系统通信技术规定
- [5] DL/T 1802-2018 水电厂自动发电控制及自动电压控制系统技术规范

Research on cost control under bill of quantities pricing mode

Hongchuan Deng

Chongqing Anyue Project Management Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

Abstract

With the continuous development of market-oriented construction projects in China, the bill of quantities pricing method has become the primary approach for engineering cost estimation. The core strength of this model lies in market-driven pricing mechanisms, which imposes higher demands on project cost control. This paper focuses on exploring cost control strategies under the bill of quantities pricing framework. First, it introduces the concept and characteristics of this pricing model. Next, it examines fundamental principles of cost control, including its conceptual basis, established guidelines, and implementation procedures. Subsequently, it emphasizes key cost control measures throughout the entire process—from bill preparation and bid pricing to construction phases. The analysis then identifies current challenges in cost management and proposes improvement strategies. Finally, it outlines future trends in information technology applications and the development of comprehensive cost control systems, providing theoretical references to enhance project management efficiency and optimize investment returns.

Keywords

bill of quantities; pricing mode; cost control; whole process management

工程量清单计价模式下的成本控制研究

邓洪川

重庆安越项目管理有限公司, 中国·重庆 400000

摘要

随着我国建设工程市场化的不断发展, 工程量清单计价的方式已经成为工程计价的最主要的方法。该模式的关键之处在于市场确定价格, 给项目的成本控制提出更高要求。本文主要研究工程量清单计价模式下如何控制工程造价的问题。首先, 介绍了工程量清单计价模式的概念与特点; 接着, 探讨了成本控制的基本原理, 涵盖内涵、准则及流程等内容; 然后, 着重讨论在采用清单计价模式的情况下, 从清单的编制到投标报价以及施工过程中的各个阶段的成本控制要点; 之后, 分析目前成本控制存在的主要问题及其原因, 并提出改进措施; 最后, 对未来信息化技术应用趋势、全过程成本控制体系建设等发展方向做出展望, 以期为项目管理改善水平和投资效益优化提供理论参考。

关键词

工程量清单; 计价模式; 成本控制; 全过程管理

1 引言

建设工程项目的成本控制属于项目的核心部分, 会直接影响项目的经济效益以及投资目标能否达到。工程量清单计价方式作为一种国际通用的方法, 核心就是量价分离, 由招标方给出工程量清单, 投标者自己报价, 然后经市场竞争后定出合同价。该模式增加了承建单位的价格自主性同时也加大了其承担的价格风险, 在此情况下传统的、粗糙的成本控制方式无法适应新的市场竞争环境给精确的、动态化的以及全过程成本控制带来巨大考验。因此对清单计价模式下成本控制理论和方法的研究, 有利于规范建筑市场秩

序、提高企业的核心竞争力、保证工程投资效益有着重要的现实意义。本文将从理论基础到实践要点, 再到问题对策与发展趋势, 系统性地展开论述, 旨在构建一个适应清单计价模式的成本控制框架。

2 工程量清单计价模式概述

2.1 工程量清单的核心概念

工程量清单指表现拟建工程的分部分项工程项目、措施项目、其他项目的名称和相应数量的明细清单。招标人根据统一的工程量计算规则、项目划分以及计量单位来编制出来的。

工程量清单是招标文件的主要组成内容之一, 给各个投标人提供了一个公平竞争的平台。其主要的思想就是把“量”和“价”分开来, 在招标人对工程实体“量”的准确

【作者简介】邓洪川(1989-), 男, 中国重庆人, 本科, 工程师, 从事工程造价研究。

性负责的同时,投标人可以利用自身的技术水平、管理水平以及市场信息来填写工程量清单中的价格。这样的分离明确了招投标双方风险划分的边界,在定额计价模式下,政府指导价为主的情况改变成市场供给与需求决定价格,这是建筑产品市场化的一大表现。

2.2 工程量清单的构成与编制方法

一份完整的工程量清单一般包括分部分项工程量清单、措施项目清单、其他项目清单、规费项目清单、税金项目清单等。分部分项工程量清单为核心内容,其对工程实体各个部分及数量进行了详细列出。清单的编制必须符合国家统一的工程量计算规范,编制时要认真细致,必须依据设计图纸、施工规范以及相关标准图集。项目编码、项目名称、项目特征、计量单位、工程量计算规则这“五个统一”是清单编制的基本准则。项目特征的叙述尤为重要,它决定着整个项目的费用构成。正确的、完整的项目特征能够保证投标人在合理的条件下报价,并且之后也可以用作执行合同、修改工程、处理结算的基础。任何一处遗漏或者模糊的描述都会引发计价争端。

3 成本控制的基本原理

3.1 成本控制的内涵与目标探析

成本控制就是在项目建设的全过程活动中,运用各种管理手段,在保证工程质量与工期符合合同要求的前提下,对生产经营过程中消耗的人力、物力和费用开支进行指导、监督、调节和限制,防止将要发生的和已经发生的偏差,把各项费用控制在计划成本的范围内。其基本含义是一种主动的、超前的管理活动,而不是事后核算。其最终目的是尽可能多地节约成本,提高经济效益,以实现项目预定的盈利目标。

3.2 成本控制的原则与方法探究

成本控制要遵守一系列的基本准则,全面控制原则规定成本控制应当覆盖项目整个进程,包含全部部门和人员。动态控制原则指的是成本控制要在项目实施过程中进行,要及时发现存在的问题并且做出相应的处理,目标管理原则就是要把成本目标逐级分解落实到具体的工作单元中。成本控制的方法有目标成本法、偏差分析法、价值工程法等。目标成本法是以市场为导向的,确定目标成本然后以此去约束设计、施工等方面。偏差分析法则,是通过计划成本与实际发生的成本进行比较分析,发现偏差的原因,并采取纠正措施。

3.3 成本控制的流程与内容解析

成本控制是不断循环的过程,主要包含成本预测、成本计划、成本控制、成本核算、成本分析、成本考核这六个步骤。成本预测、计划是成本控制的事前控制,它是给成本控制确定目标和标准。成本控制属于事中控制,牵涉到人工费、材料费、机械使用费等各类直接费以及间接费的管控。

成本核算与分析属于事后控制,它把已经发生的成本加以归集并计算出来,从中找出成本变化的规律以及超支或节约的原因,进而给未来的成本预估和计划给予反馈信息,这就产生了一个持续改进的循环体系。

4 清单计价模式下成本控制的关键要素

4.1 工程量清单编制中的成本控制

清单计价模式下的工程造价是一种同时具备动态化与系统化的计价模式。清单计价模式能更好地实现建筑过程中所要求的工程造价应该具备的两种特性,即公正性和透明性。清单计价模式与传统的定额计价模式相比,前者采用了工程量与单价分离和投标人在竞标市场中公平竞标的方式,通过这两种较为清晰透明的方式防止在工程竞标过程中发生暗箱操作、权钱交易等违法腐败现象的发生,从而维护有关各方的利益。招标人要组织相关人员依照规范来编制和校核工程量清单,并保证其质量。并且应在招标文件里对合同价款调整的范围、方法及风险承担条款做出明确的规定,以从源头上避免合同纠纷的发生,从而使得投资控制在概预算之内。

4.2 投标报价阶段成本控制策略

对于投标方来说,投标报价属于成本控制的重要一环。投标报价不再只是简单的套用定额,更多的是依托企业的自身成本信息所做出的一种战略决策。企业应建立起自己的企业定额或者成本数据库作为企业的报价依据。在报价的时候,要仔细研究招标文件,去勘察现场,剖析项目的特性,还要制订出先进的施工组织计划。通过对人工、材料、机械等市场价格准确预测,结合自身风险承受能力,确定合理的管理费和利润率,报出一个有竞争力又能满足预期成本、获得合理利润的综合单价。

4.3 施工阶段成本控制

施工阶段是成本发生的阶段,也是成本控制的关键时期。承包商要以中标合同价为成本目标,对工程造价实施动态控制。首先、做好“两算对比”,即施工图预算与施工预算的对比,找出成本控制的关键点。再者要对变更工程进行严格的管理。若发生由业主引发的工程变更时,应当立刻签署相关文件并且做出相应的合同收入修改;如果是由工程施工方导致的内部变动,则必须从优化施工组织设计的角度出发来加以应对,并且严控费用的发生情况。加强施工现场的人工、材料及机械管理,实施限额领料制,提高机械设备的使用效能,减少浪费现象的发生,把实际产生的成本紧紧地控制在责任成本范围内。

5 成本控制的问题与对策

5.1 清单计价模式下成本控制的关键问题

目前,在清单计价模式下的成本控制中还存在很多问题,一方面,很多企业没有建立完善的企业定额,报价时仍然过分依靠政府定额,不能体现出各企业的具体成本区别。

另一方面,清单编制质量参差不齐,漏项错项现象频发,为后期的成本控制埋下隐患。重施工,轻策划的情况很多见,在过程控制中。缺少前瞻性,成本控制和质量控制、技术管理没有联系上。成本控制手段不能得到好的执行。另外,动态信息反馈机制不完善、成本分析滞后,不能对成本的形成过程进行及时的监控和预警。

5.2 问题产生的原因分析

出现以上问题的主要原因是多方面的。宏观上来看,建筑市场的信用体系还不健全、恶性竞争依旧严重,企业利润空间被压缩,投入成本管理创新的积极性也随之降低。从企业微观方面来说,内部管理根基不牢固是根源,很多企业没有形成现代化的成本管理架构,缺少历史成本数据积累,信息化应用程度比较低。管理人员成本控制的意识和方法还有待提高,仍旧习惯于事后算账,而没有做到事前预算、事中监控。

5.3 提升成本控制效果的对策建议

要解决这些问题,首先要加强清单编制管理,推行清单编制质量责任制度,提升招标代理机构、造价咨询人员的专业水平,从根本上保证清单的正确性。对施工企业而言,当前最迫切的就是加强自身建设,尽快建立和完善反映自己技术水平和管理水平的企业定额、成本数据库。还要提高全员成本控制意识,把成本责任分摊给各个班组以及个人,最关键的是要把成本控制关口前移到投标时期,在施工期加强策略研究和动态跟踪管理,形成覆盖整个工程生命周期的成本管理体系。

6 成本控制的优化与发展路径

6.1 信息化在成本控制中的应用研究

信息技术的应用深入是成本控制发展的必然趋势,建筑信息模型 BIM 技术可以把建筑项目以三维数字形式显示出来,它包含的几何信息和物理信息,为成本控制给予很强的数据支持。基于 BIM 模型,可以自动、快速、准确的计算工程量,从而减少大量的手工算量错误与争议,使成本估算更加精确。除此之外, BIM 技术可以做到与成本数据的实时联动,并能实现施工过程中动态的成本控制以及多角度的成本分析,可以达到成本可视化的管理效果,极大提高了管理水平及决策质量。

6.2 全过程成本控制体系的建立

未来的成本控制,必然会由传统的只针对施工阶段的控制,转变为对整个项目的决策、设计、招投标、施工、结

算到运营维护全过程的全面控制。特别重视设计阶段对成本起决定作用,实行设计阶段的成本控制和限额设计。全过程成本控制需要业主、设计方、施工方、咨询方等各参建方破除组织壁垒,协同管理。它重视目标的统一性与信息的无缝衔接,依靠共同的信息平台和管理流程来保障成本目的在项目全过程中一贯地得到贯彻执行。

6.3 成本控制的发展趋势

成本控制的发展会有集成化、精细化以及战略化的趋势。集成化指的是成本和进度、质量、安全等多个管理目标融为一体,相互影响。精细化要求成本管理精细到每一个分项工程、每一道工序甚至每一天的工作日。战略化,就是企业的成本控制不再只是单个项目盈亏的问题了,而上升到了企业战略的高度,跟企业的核心竞争力培养、供应链构建、品牌塑造这些事儿联系在一起。追求的不仅是成本节约,更是价值创造,以成本控制能力打造竞争优势从而实现企业的持续性发展。

7 结语

工程量清单计价模式的推行,极大地改变了建筑产品的定价方式,也使得项目成本控制工作上升到一个新的高度。市场上的主体特别是施工单位应该改变想法,不能只靠定额,而应以自身的管理来支撑。事后算账要转变为全过程中对成本的实时跟踪。本文主要对清单计价模式下的成本控制理论、重要环节、目前的问题以及改进措施进行了系统性的归纳整理。研究发现,在企业定额的基础上,利用信息技术来创建以价值创造为中心、覆盖整个工程项目的精确化成本控制系统,是适应现阶段环境、提高企业利润水平和管理能力的有效方法。未来,随着 BIM、大数据等技术的不断成熟和应用,成本控制必将朝着更加智能、精准和高效的方向发展。

参考文献

- [1] 毛伟霞.基于工程量清单计价模式的造价管理[J].中国建筑金属结构,2024,23(07):184-186.
- [2] 吴明涛.基于工程量清单计价模式的建筑工程成本管理[J].技术与市场,2024,31(02):173-175.
- [3] 王金龙.基于工程量清单计价模式的工程造价研究[J].低碳世界,2023,13(02):166-168.
- [4] 刘琳.工程量清单计价模式下工程造价全过程控制分析[J].散装水泥,2022,(04):22-24+27.
- [5] 刘阳.工程量清单计价模式下的工程造价控制分析[J].住宅与房地产,2020,(36):34+43.

Analysis and optimization measures for overcurrent faults in the static variable frequency starting system of the camera during simultaneous adjustment

Shengchun Liu¹ Jie Zhang² Hairong Wang¹ Zhenzhong Fu¹ Zhanshan Yang¹

1. Qinghai Dehong Electric Power Technology Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Qinghai, Xining, 810000, China

Abstract

This article focuses on the overcurrent tripping fault of the static frequency conversion starting system (SFC) during the debugging of a large phase-shifting camera project, and conducts a comprehensive process review and in-depth analysis. By examining historical data, analyzing start-up waveforms, calculating system parameters, and conducting simulation verification, the root cause was identified as weak inter turn insulation in the SFC input transformer, which caused breakdown under specific harmonic and operational overvoltage excitations, resulting in a phase to phase short circuit on the secondary side and triggering overcurrent protection action on the SFC input side. The article elaborates on the fault diagnosis process in detail and proposes comprehensive optimization measures based on analysis from four dimensions: equipment selection, system design, protection configuration, and operation and maintenance strategies. After implementation, it effectively improves the reliability and safety of the SFC starting system, which has important reference value for the debugging and operation of similar projects.

Keywords

phase-shifting camera; Static variable frequency starting system; Overcurrent fault; optimization measures

一起调相机静止变频起动系统过流故障分析及优化措施

刘生春¹ 张杰² 王海蓉¹ 付振忠¹ 杨占山¹

1. 青海德泓电力科技有限公司, 中国·青海 西宁 810000

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 中国·青海 西宁 810000

摘要

本文针对某大型调相机工程调试中静止变频起动系统(SFC)过流跳闸故障,展开全过程梳理与深度分析。通过检查历史数据、分析起动波形、计算系统参数及仿真验证,定位根本原因: SFC 输入变压器匝间绝缘薄弱,在特定谐波与操作过电压激励下击穿,引发二次侧相间短路,进而触发 SFC 输入侧过流保护动作。文中详细阐述故障诊断过程,并基于分析从设备选型、系统设计、保护配置、运维策略四维度提出综合优化措施。实施后有效提升 SFC 起动系统可靠性与安全性,对同类工程调试与运行具有重要参考价值。

关键词

调相机; 静止变频起动系统; 过流故障; 优化措施

1 引言

随特高压直流输电技术发展,电网对动态无功支撑和电压稳定性要求提高,同步调相机因优异性能大规模应用。调相机需外部动力起动,静止变频起动系统(SFC)因起动平滑、控制精确等优点成主流方式。但 SFC 结构复杂,起动中承受剧烈电气应力,过流故障常见且危害大,可能损设备、影响调相机并网与电网安全。本文以某换流站 300Mvar 调相机 SFC 为对象,记录其首次起动试验过流跳闸故障并分析根因,提出优化方案,为同类系统提供借鉴^[1]。

2 系统结构与故障过程描述

本工程 SFC 系统为“交-直-交”电流源型,核心含输入开关(总电源)、输入变压器(Dyn11 接线, 35kV/2 × 1.8kV 变比, 供压、隔离电网、抑谐波)、晶闸管桥式整流器与逆变器(交直、直交转换)、平波电抗器(平滑电流、限故障电流); 输出侧经开关、起动母线、离合器连调相机转子,控制部分由励磁与 SFC 本体系统协同管理起动逻辑等。调相机首次起动试验中, SFC 上电备发指令时跳闸,监控显示输入侧过流(12.5kA, 超定值),现场变压器内有爆破声与烟气,检查发现其压力释放阀动作、油箱有

放电痕迹，初判故障在 T1 内部。

3 故障诊断与根因分析

3.1 电气量数据分析

调取故障录波装置记录的波形数据，是分析故障的第一步。其特征分析如下：

SFC 输入侧电流：故障发生时，B 相和 C 相电流瞬间急剧增大，峰值达到约 13kA，且两者相位接近反向。A

相电流变化相对较小。这表明故障类型为严重的相间短路故障。

SFC 输入侧电压：B 相和 C 相电压瞬间崩溃，大幅降低，A 相电压也随之波动。这是典型的相间短路导致的电压特征。

直流侧电流与电压：在故障瞬间， I_{dc} 和 U_{dc} 均为零。这证明了故障发生在 SFC 系统主电路通电但晶闸管尚未触发的时刻，故障点位于晶闸管桥之前，即输入变压器及其连接母线范围内。

表 1：故障关键电气量特征分析

电气量	故障前状态	故障瞬间特征	分析结论
SFC 输入电流	接近于零	B、C 相出现幅值巨大、方向相反的冲击电流	指向 B、C 相间短路
SFC 输入电压	35kV 额定电压	B、C 相电压崩溃，A 相电压波动	支撑相间短路结论
直流侧电流 I_{dc}	0	始终为 0	故障点在晶闸管桥之前
直流侧电压 U_{dc}	0	始终为 0	故障点在晶闸管桥之前
保护动作信息	-	“SFC 输入侧过流保护”，12.5kA	主保护正确动作，切除故障

3.2 输入变压器解体检查

对故障变压器进行返厂解体，是定位故障直接证据的关键步骤。解体后发现：

绕组损坏情况：变压器二次侧 B 相绕组靠近中性点区域存在严重的匝间短路和对地放电点，并发展为 B 相与 C 相绕组间的贯穿性放电通道。这是导致相间短路的直接物理证据。**2. 绝缘材料检查：**损坏区域的匝间绝缘纸存在多处击穿碳化点，且其材质和厚度经检测，略低于同类高端产品的标准。**3. 连接件与屏蔽：**绕组内部的电磁屏蔽措施存在局部不完善，可能导致电场分布不均^[2]。

3.3 根本原因综合分析

结合前文所述 300Mvar 调相机 SFC 系统结构及首次启动试验跳闸故障，该故障的直接原因为输入变压器匝间绝缘

击穿，即变压器二次侧绕组制造时存在微观瑕疵或绝缘材料本身有薄弱点，致使局部放电起始电压和耐压裕度不足；诱发原因为操作过电压与谐波激励，SFC 系统上电瞬间属于“空载变压器合闸”过程，会产生高幅值操作过电压与含大量谐波的励磁涌流，虽系统设有避雷器等过电压抑制措施，但保护水平未完全覆盖变压器绝缘最薄弱点，在过电压与特定频率谐波共同激励下，绝缘薄弱点电场强度超耐受极限，引发局部放电并迅速发展为匝间击穿；根本原因则在于设备制造质量与绝缘设计裕度，制造环节中绕组绕制、绝缘处理工艺控制不严，是绝缘薄弱点存在的内因，且该变压器应用于 SFC 这种谐波和暂态过程严重的特殊负载，其匝间绝缘和冲击绝缘水平设计裕度却未高于普通配电变压器，存在设计考虑不足的问题。

表 2：故障根因归纳

原因类别	具体描述
直接原因	SFC 输入变压器二次侧 B 相绕组匝间绝缘发生击穿，并发展为 B-C 相间短路。
诱发原因	SFC 系统上电时的操作过电压与励磁涌流，对变压器绝缘形成了强烈的电气冲击。
根本原因	变压器制造过程中存在绝缘瑕疵，且其绝缘设计（针对 SFC 应用场景）的耐受裕度不足。

4 优化措施与实施方案

4.1 设备层面优化

加强匝间绝缘：要求新更换的变压器采用更高等级的匝间绝缘材料，并增加绝缘纸的厚度和层数。提高绝缘水平：明确提出工频耐受电压和雷电冲击耐受电压应比标准值提升一个等级。**优化工艺控制：**要求在绕制、浸渍、烘烤等关键工序增加在线监测和出厂试验项目，如进行更加严格的局部放电试验和倍频耐压试验。

对 SFC 系统的其他关键设备，如整流 / 逆变桥晶闸管、平波电抗器、交 / 直流断路器等，进行全面的评估和隐患排查。

4.2 系统设计与配置优化

为了进一步提升静止变频器系统的稳定性和安全性，本工程对过电压抑制方案进行了优化。在 SFC 输入变压器的两侧，即高压侧和低压侧，均安装了高性能的氧化锌避雷器，此举旨在确保避雷器的保护特性，特别是残压水平，能够与变压器提升后的绝缘等级相匹配，从而提供更加有效的过电压保护。此外，为了专门针对操作过电压进行抑制，考虑在变压器的高压侧增设 RC 吸收回路，该回路能够有效地吸收系统在操作过程中产生的过电压，降低对设备绝缘的威胁。

同时，为了改善系统的电流和电压特性，工程还增设了限流与滤波装置。首先，对在 SFC 输入侧加装空芯电抗

器的方案进行了深入评估，目的是通过限制系统的短路容量和励磁涌流的幅值，从而降低短路故障对系统的冲击。此外，对输入变压器的阻抗电压百分比进行了优化调整，以实现限制短路电流和确保电压稳定性之间的最佳平衡。这种优化不仅有助于提高系统在故障情况下的恢复能力，还能在正常运行条件下保持电压的稳定，从而延长设备的使用寿命，提高整个 SFC 系统的运行效率和可靠性^[3]。

4.3 保护与控制策略优化

为保障 SFC 系统安全运行，本工程完善优化保护配置：为输入变压器新增差动保护，与原有过流保护构成双重化保护，提升动作选择性与速动性；配置轻、重瓦斯保护，灵敏反映变压器内部故障。同时优化过流保护定值与时间阶梯，避免励磁涌流误动，确保故障时快速切除。上电逻辑方面，修改 SFC 控制程序：合上输入开关 QF1 后，增加 100-200 毫秒延时，待励磁涌流衰减稳定后再投控制系统或后续操

作，避免电气应力最大时敏感操作，降低上电风险，提升系统稳定性与安全性。

4.4 运维管理策略优化

4.4.1 加强调试与投运前检验：

制定严格的 SFC 系统分步调试大纲。在首次上电前，必须完成所有一次设备的绝缘电阻、直流电阻、变比等试验，以及保护装置的传动试验。

对输入变压器，必须进行感应电压试验，确保其绝缘性能达标。

4.4.2 制定专项巡检与预防性试验制度

将 SFC 系统及其输入变压器列为重点巡检设备，定期进行红外测温、油色谱分析、超声波检测等状态监测。

缩短 SFC 输入变压器的预防性试验周期，重点关注其绝缘性能的变化趋势。

表 3：综合优化措施一览表

优化层面	具体措施	预期效果
设备层面	1. 提升变压器匝间绝缘等级与工艺 2. 提高工频和冲击绝缘水平 3. 强化关键元器件可靠性	从源头上提升设备本质安全，杜绝先天性缺陷
系统设计	1. 优化过电压抑制（避雷器、RC 回路） 2. 评估加装限流电抗器 3. 优化变压器阻抗	抑制外部电气冲击，为设备创造良好的运行环境
保护控制	1. 增设变压器差动、瓦斯保护 2. 优化过流保护定值 3. 优化系统上电时序逻辑	构建快速、可靠、有选择性的保护防线，防止故障扩大
运维管理	1. 加强投运前检验与调试 2. 制定专项巡检与监测制度 3. 缩短预防性试验周期	实现全过程闭环管理，及时发现并消除潜在隐患

5 效果验证

在采取上述优化措施后：

新采购的 SFC 输入变压器通过了更为严苛的出厂试验，尤其是局部放电量小于 50pC，远优于标准要求。

在第二次调试中，对 SFC 系统进行了分步上电：先空载投入输入变压器，录得的励磁涌流和过电压均在安全范围内；随后逐步进行 SFC 空载试验和带调相机起动试验。

整个起动过程顺利，所有电气参数正常，保护装置未误动。截至目前，该调相机组已成功并网运行超过一年，SFC 系统多次起动均稳定可靠。

6 结论

本文通过调相机 SFC 起动系统过流故障案例，展示从故障现象记录、电气数据分析、设备解体到根因定位的全过

程方法。分析表明，故障根源是 SFC 输入变压器绝缘薄弱，且对操作过电压等严酷工况耐受能力不足。基于此，本文提出涵盖设备选型、系统设计、保护配置、运维管理的综合优化措施，实践证明措施有效可行，显著提升系统安全性与可靠性，对解决同类大型旋转电机变频起动问题具参考推广价值。未来，结合数字孪生的实时监测与预测性维护，将是提升 SFC 运维水平的重要方向。

参考文献

[1] 朱朝柱. 基于调相机的电力系统无功补偿方案研究与应用 [J]. 电力设备管理, 2025, (04): 47-49.
 [2] 简优宗, 原晓琦, 张亦驰, 等. 大初始阻力矩分布式调相机的变频启动控制 [J]. 大电机技术, 2024, (06): 8-12.
 [3] 石祥建. 大型同步调相机静止变频器高可靠控制及应用技术研究 [D]. 东南大学, 2023. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2023.005722.

Key technologies of integrated design and construction of prefabricated building decoration

Su Gao

China Water Resources and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd. International Company, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract

With the accelerated industrialization of China's construction sector, prefabricated buildings have emerged as the industry standard, leveraging their eco-friendly, energy-efficient, and high-performance advantages. The integrated design and construction technology for prefabricated building decoration and finishing, serving as a cornerstone for quality enhancement and sustainable development, directly impacts both the overall performance and operational costs of buildings. This paper systematically reviews the current status and technical framework of integrated decoration and finishing in prefabricated construction, conducting in-depth analyses of core technologies including design integration, component standardization, assembly construction, quality control, and digital management. It specifically examines innovative applications such as Building Information Modeling (BIM) and dry construction methods, while summarizing key technical challenges and breakthroughs through case studies of typical projects. The study ultimately proposes future development trends and actionable recommendations.

Keywords

prefabricated construction; integrated decoration and renovation; BIM technology; dry construction; standardization; key technologies

装配式建筑装饰装修一体化设计与施工关键技术

高速

中国水利水电第八工程局有限公司国际公司, 中国·湖南长沙 410000

摘要

随着我国建筑工业化进程加快, 装配式建筑凭借绿色、节能、高效等优势日益成为行业主流。装配式建筑装饰装修一体化设计与施工技术作为建筑品质提升与可持续发展的关键, 直接影响建筑整体性能与运维成本。本文系统梳理了装配式建筑装饰装修一体化的发展现状和技术体系, 深入分析了设计集成、部品标准化、装配施工、质量控制与信息化管理等核心技术, 重点探讨BIM、干法施工等创新应用, 并结合典型工程案例, 总结关键技术难点及创新突破, 提出未来发展趋势与对策建议。

关键词

装配式建筑; 装饰装修一体化; BIM技术; 干法施工; 标准化; 关键技术

1 引言

在“双碳”战略和建筑工业化进程加快的背景下, 装配式建筑装饰装修一体化以其高效、绿色、精益的特征, 成为推动行业变革的核心路径。该模式有效克服了传统装修工期长、质量不稳和资源浪费等弊端, 依托 BIM、干法施工和智能制造等先进技术, 实现了设计、制造、施工与管理的深度集成。

2 装配式建筑装饰装修一体化发展现状与技术体系

2.1 一体化发展背景与产业现状

近年来, 随着国家政策的持续引导和市场需求的逐步释放, 装配式建筑装饰装修一体化呈现出快速发展的良好态势。住建部等主管部门出台多项政策文件, 强调推动建筑全生命周期的一体化设计、施工与运维, 鼓励装配式建筑装饰装修与主体结构实现同步化进程。市场层面, 住宅、办公、商业等多类型建筑纷纷采用一体化装配模式, 促进了产业链的协同创新和装饰部品的工业化生产。BIM、物联网、大数据等数字化技术不断嵌入建筑全流程, 提升了设计、制造与施工的协同水平。

【作者简介】高速(1977-), 男, 中国安徽人, 本科, 高级工程师, 从事建筑施工、技术、建筑装饰装修研究。

2.2 一体化技术体系的构成与特征

装配式建筑装饰装修一体化技术体系集成了设计集成、部品标准化、工厂化制造、现场装配与信息化管理等核心环节，形成了全流程高度协同的工业化建造模式。其核心特征是以建筑整体设计为引领，通过结构、机电、装饰等多专业集成，实现各系统的协同优化与部品的模块化、节点标准化。部品在工厂预制环节实现高精度制造，包括墙板、楼板、整体卫浴与厨房等，显著提高了现场装配效率与质量稳定性。现场施工采用干法连接、机械锁固、集成安装等现代工艺，最大程度减少湿作业和人工干预。BIM技术贯穿设计、制造、施工和运维全周期，支撑工艺仿真、进度管控和质量追溯，提升多专业协作和项目管理的数字化水平。

2.3 国内外装配式建筑一体化经验比较

国际上发达国家在装配式建筑装饰装修一体化领域积累了丰富的经验。以日本为代表，其住宅工业化率高，结构、机电与装修高度集成，依托标准化部品和模块化设计，实现工厂化制造与现场高效装配的全流程闭环。欧洲各国则侧重完善的标准化体系和系统集成管理，通过严格的质量控制和高水平部品研发，促进一体化模式的广泛落地。我国近年来积极推进装配式建筑升级，在住宅及公共建筑领域探索设计集成、部品工厂化和装配化施工等路径，部分示范工程已实现BIM驱动、标准引领和绿色低碳的一体化模式。尽管取得阶段性成果，但在产业协同、技术标准体系、人才培养等方面仍与国际先进水平存在差距，需持续加强核心技术研发和标准体系完善，推动装配式建筑装饰装修一体化高质量发展。

3 装配式建筑装饰装修一体化设计关键技术

3.1 BIM驱动的集成化设计方法

BIM（建筑信息模型）技术为装配式建筑装饰装修一体化设计提供了强有力的数字化支撑。通过建立多专业协同设计平台，实现结构、机电、装饰等专业模型的深度集成与信息共享，能够有效消除设计冲突，提升设计精度。BIM技术不仅支持三维可视化设计，还能进行碰撞检测、工艺仿真、施工组织模拟等操作，优化部品模块划分与接口节点设计。在一体化设计过程中，BIM模型为后续工厂制造与现场装配提供精确数据，支撑部品标准化与个性化定制的高效衔接。基于BIM的设计流程重构，有效缩短设计周期，提高设计变更响应速度，提升整体设计质量。当前，BIM已成为装配式建筑一体化设计的必备工具，推动了设计、生产、施工、运维的全流程协同。

3.2 部品部件标准化与模块化设计

部品部件标准化与模块化设计是装配式建筑装饰装修一体化的核心技术之一。通过梳理各类建筑功能需求与施工流程，建立标准化部品库，实现墙板、吊顶、地面、门窗、卫浴、厨房等部品的模块化开发与工业化制造。标准化有助

于提升部品互换性、降低制造与运输成本，模块化则便于现场快速装配与维护。模块化设计不仅关注部品的物理尺寸与连接方式，更强调功能集成与系统兼容例如，集成管线墙板、整体卫浴单元、可拆卸隔断系统等创新模块，能够显著提升空间利用率与居住舒适度。通过模块化理念，设计师可根据不同项目需求灵活组合部品，实现功能多样、风格多元的一体化装修效果。

3.3 绿色低碳与人性化设计创新

装配式建筑装饰装修一体化设计强调绿色低碳与人性化理念。在设计阶段，广泛采用环保建材、可再生资源与高效节能设备，优先考虑建筑热工性能、光环境、声环境等指标，降低全生命周期碳排放。人性化设计方面，注重空间功能优化、智能化集成与居住体验提升。例如，融入智能家居系统、无障碍设施、灵活可变空间等创新元素，满足不同用户群体的个性化需求。绿色与人性化设计创新不仅符合可持续发展要求，也为装配式建筑市场竞争力提供坚实支撑[1]。

4 装配式建筑装饰装修一体化施工关键技术

4.1 干法施工与装配化安装工艺

干法施工是装配式建筑装饰装修一体化的核心施工技术，区别于传统湿作业，主要依靠机械连接、粘结剂、卡扣等实现部品装配。干法施工具有工序简化、速度快、环境污染小等优点，能够大幅缩短工期、降低劳动强度，提升施工安全性与工程质量。装配化安装工艺要求高精度的部品预制与严格的现场质量控制。施工过程中，需依据BIM模型与装配图纸，精准定位与组装部品，采用专业工具与设备实现高效对接。为适应不同建筑类型与空间需求，干法工艺不断创新，如可调节连接件、快速锁定系统、集成安装模板等，推动装配式装修向智能化、自动化升级。

4.2 工厂化制造与现场物流管理

工厂化制造是装配式建筑一体化施工的重要基础。通过流水线、自动化、信息化手段实现部品高效预制，保障部品尺寸精度与功能集成。先进制造装备与质量检测系统确保每一环节可追溯、可控，提升部品一致性与可靠性。现场物流管理则是确保部品高效运输、合理堆放与有序安装的关键。需结合项目节点，制定科学的运输与堆放方案，利用RFID、物联网等技术实现部品全流程可视化管理。精细化物流管控能够有效降低损耗、减少现场占地，提高装配效率与工地文明施工水平[2]。

4.3 施工过程数字化与智能化管理

随着数字化建造技术的发展，装配式建筑装饰装修一体化施工进入智能化管理阶段。通过BIM+物联网平台，实现施工进度、人员设备、质量安全的全过程数字监控与信息集成。智能感知设备、移动终端、云计算平台等工具实现数据实时采集与分析，为施工组织决策与现场管理提供科学依据。数字化管理平台可与供应链、制造端、现场作业多方联

动,实现工序协同、信息共享、预警反馈,显著提升施工管理效能。智能化技术的应用,为装配式装修一体化施工创造了更加高效、透明、可追溯的管理模式。

5 装配式建筑装饰装修一体化的质量控制与管理创新

5.1 全过程质量管控机制

装配式建筑装饰装修一体化的高品质交付离不开全过程的质量管控。从设计、制造到运输、装配、验收等环节,均需建立系统的质量管理体系,明确各环节标准、流程与责任主体。在设计阶段,通过 BIM 碰撞检测、参数化校核确保图纸无误;制造阶段,实施工厂质量检验与过程追溯;运输与装配阶段,推行分批验收、节点检测、功能测试等措施。全过程管控不仅保障部品精度与系统兼容,还能有效降低返工率与后期维护成本,为用户提供高品质空间体验^[9]。

5.2 信息化手段支撑下的协同管理

装配式建筑装饰装修一体化项目多学科、多专业协作密集,需依托信息化平台实现高效协同管理。BIM、项目管理系统、供应链平台等工具贯通设计、制造、施工、运维各环节,实现项目信息共享与流程闭环。通过信息化手段,能够动态追踪项目进展、及时响应设计变更、协调供应商与施工团队,提升项目管理的科学性与透明度。协同管理平台还支持智能排产、资源调度、进度预警等功能,为装配式建筑装饰装修一体化的高效实施提供坚实保障。

5.3 标准化体系建设与持续创新

标准化体系是装配式建筑装饰装修一体化可持续发展的基础。当前,国家与地方不断完善装配式建筑相关标准,涵盖设计、部品、施工、验收、运维等环节,推动一体化技术落地实施。企业层面,需结合自身实际,制定内部技术标准与管理规范,建立标准部品库、工艺流程手册与质量评价体系,提升全员标准化意识。与此同时,应鼓励技术创新与工艺升级,不断拓展新型材料、智能制造、绿色建造等前沿技术,推动标准体系与产业创新协同发展,为装配式建筑装饰装修一体化注入持续动力^[4]。

6 装配式建筑装饰装修一体化典型案例与发展对策

6.1 典型工程案例分析

以北京某大型住宅项目为例,采用装配式建筑装饰装修一体化模式,涵盖结构预制、部品工业化、BIM 协同、智能管理等多个环节。项目实现了主体结构与装修同步设计、同步施工,关键部品工厂预制率超过 85%,现场装配用量较传统模式减少 60%,工期缩短 40%,建筑垃圾减少 70%。在实际操作中,项目依托 BIM 平台实现多专业模型集成与工艺优化,创新应用可调节墙板、集成管线、整体卫浴等标准化部品,大幅提升了空间品质与居住舒适度。全

流程数字化与智能化管控,有效降低了返工率与安全风险。该项目为我国装配式建筑装饰装修一体化提供了有益经验,对行业推广与技术迭代具有示范引领意义。

6.2 行业面临的技术与管理难点

尽管一体化模式优势显著,行业在推广过程中仍面临多重技术与管理难点。部品部件标准化水平有待提升,品类丰富度与适配性不足;设计、制造、施工信息流协同难度大,BIM 技术与生产系统深度集成不足;现场施工工艺与传统模式存在差异,技术人员专业素养与操作技能参差不齐。此外,行业标准体系尚未完全覆盖全流程,供应链协同机制有待完善,质量控制与管理体系建设仍需加强。面对上述挑战,需从制度、技术、管理、人才等多维度发力,推动行业高质量、可持续发展^[5]。

6.3 未来发展趋势与对策建

面向未来,装配式建筑装饰装修一体化将向高集成、智能化、绿色低碳方向演进。建议强化政策引导与标准支撑,完善技术标准与验收规范;加快 BIM、物联网、智能制造等新技术在全流程深度应用,推动信息化与工业化深度融合。

应加大研发投入,推动新型部品、绿色建材、智能工艺创新,实现多样化、个性化一体化装修需求。构建多元协同的产业生态,加强设计、制造、施工、运维等环节协作,完善供应链管理 with 全过程质量控制体系。强化专业人才培养,提升从业人员技术素养与创新能力,为装配式建筑装饰装修一体化的高质量发展提供坚实基础。

7 结语

装配式建筑装饰装修一体化作为推动建筑工业化和绿色智能转型的核心路径,正加速引领行业高质量发展。依托设计集成、部品标准化和信息化管理,推动全流程高效协同。尽管行业已取得显著进展,但仍需突破标准体系与智能建造等瓶颈。未来,随着 BIM、物联网等技术深度应用,该模式将更加智能、绿色。通过案例推广与产业协作,一体化将为行业升级、“双碳”目标及高品质人居环境提供强劲支撑。

参考文献

- [1] 孔长建,秦静芸,张文鑫.装配式建筑中的装饰装修一体化设计研究[J].居舍,2025,(22):33-35.
- [2] 杜雨娟,徐逸浩,王范瑾.装配式建筑装饰一体化隔墙设计与应用要点[J].中国住宅设施,2024,(03):28-30.
- [3] 王林,陈孟鸿,钟伟,等.基于BIM技术的装配式建筑装饰一体化设计及措施探讨[J].中国建筑装饰装修,2023,(13):64-66.
- [4] 张玲.装配式建筑装修一体化设计应用与发展[J].城市住宅,2021,28(07):29-31.
- [5] 杨晓方.装配式建筑装修与建筑设计一体化及BIM技术应用经验交流会在京召开[J].中国勘察设计,2017,(08):17.

Discussion on Construction Technology and Quality Control of Deep Foundation Pit Geotechnical Engineering in Urban Rail Transit

Qiang Li Guoping Cheng Lisheng Hao Yicun Wang Bin Wang

Beijing Urban Rail Transit Deep Foundation Pit Geotechnical Engineering Key Laboratory of Beijing Urban Construction Survey and Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

As a critical component of urban infrastructure development, deep foundation pit engineering in urban rail transit systems directly impacts project timelines and safety through construction techniques and quality control. With the continuous expansion of urban rail transit networks, deep foundation pit construction now faces heightened technical requirements and more complex geological conditions. This paper examines the geotechnical engineering techniques for urban rail transit deep foundation pits, analyzes key technologies including foundation pit support, excavation, and dewatering, and provides detailed quality control measures. Effective prevention and control strategies are proposed to address common quality issues encountered during construction.

Keywords

Urban rail transit; Deep foundation pit; Geotechnical engineering; Construction technology; Quality control

城市轨道交通深基坑岩土工程施工技术与质量控制探讨

李强 程国平 郝丽生 汪一村 王斌

北京城建勘测设计研究院有限责任公司城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 中国·北京 100000

摘要

城市轨道交通深基坑工程作为城市建设中的重要组成部分,其施工技术和质量控制直接影响工程的进度与安全。随着城市轨道交通规模的不断扩大,深基坑施工面临着更高的技术要求和更为复杂的地质环境。本文主要探讨了城市轨道交通深基坑岩土工程的施工技术,分析了基坑支护、开挖、降水等关键技术,并对质量控制措施进行了详细阐述。针对施工中常见的质量问题,提出了有效的防范和控制策略。

关键词

城市轨道交通;深基坑;岩土工程;施工技术;质量控制

1 引言

城市轨道交通作为解决大城市交通拥堵问题的重要手段,其建设规模逐年增大,深基坑施工在轨道交通建设中占据了重要地位。深基坑工程通常用于地下车站、通道以及地下设备设施的建设,其施工技术和质量控制要求极为严格。深基坑施工面临的挑战是复杂的地下地质条件和施工环境的不可预见性,如何确保施工过程中的安全性、施工质量和施工进度,已成为业内亟待解决的难题。随着技术的进步,新的施工方法和质量控制措施不断涌现,为解决这些问题提供了新的思路。

2 城市轨道交通深基坑工程概述

2.1 城市轨道交通深基坑的定义与特点

城市轨道交通深基坑工程通常是指为建设地下车站、隧道以及其他地下设施而开挖的基坑。深基坑工程通常具有较大的开挖深度,涉及的土体、岩体复杂多样,施工过程中对周围环境、地质条件以及水文条件要求较高。由于基坑开挖的深度较大,因此在施工过程中需要特别注重基坑的稳定性和支护系统的设计,以避免发生坍塌或渗水等事故。此外,基坑的开挖作业还需要精确控制,以减少对周围建筑物、道路的影响。因此,深基坑施工技术不仅需要解决开挖和支护的问题,还要考虑到地下水控制、地质环境的变化以及施工过程中的安全风险。

2.2 深基坑在轨道交通中的应用背景与重要性

随着城市人口不断增长,轨道交通成为解决城市交通拥堵的关键手段。城市轨道交通的建设往往需要在城市核心

【作者简介】李强(1987-),男,中国河北邯郸人,本科,工程师,从事岩土工程施工管理研究。

区或交通枢纽位置进行,而这些区域的地下空间通常已经被各种地下管网和建筑物占据。因此,轨道交通工程的建设往往依赖于深基坑开挖技术,通过在有限的空间内进行地下施工来确保轨道交通设施的顺利建成。深基坑技术的应用能够有效地利用地下空间,减少对地面交通的干扰,提高施工效率。此外,随着轨道交通的快速发展,深基坑工程在城市轨道交通项目中占据越来越重要的地位,合理设计和施工深基坑不仅有助于提升工程的建设效率,也有助于减少施工过程中对周边环境的影响,确保工程安全和质量^[1]。

3 城市轨道交通深基坑岩土工程的施工技术

3.1 基坑支护结构与施工技术

基坑支护结构的设计与施工是深基坑工程中至关重要的环节。支护结构的主要作用是确保基坑开挖过程中周围土体或岩体的稳定,防止发生坍塌或过度变形。支护系统通常根据地质条件、基坑深度、周围环境等因素进行设计。常见的支护结构形式有钢板桩支护、地下连续墙支护、喷锚支护等。在城市轨道交通深基坑工程中,由于周围环境复杂,采用地下连续墙支护较为常见,具有较好的抗渗性和抗侧移性。施工过程中,支护结构的质量要求极高,尤其是在基坑开挖初期,要确保支护结构的施工精度,以便充分发挥其稳定作用。

3.2 基坑开挖技术及工艺流程

基坑开挖是深基坑工程中最关键的施工环节之一,涉及的技术要求较高。基坑的开挖工艺通常根据土质类型、基坑深度和周围环境来确定。一般而言,深基坑的开挖采用分层开挖和分段支护的方式进行,确保每一层的开挖深度符合设计要求。在施工过程中,需要对开挖面的稳定性进行严格控制,避免出现过大的水平位移或不均匀沉降,特别是在复杂地质条件下,施工难度更大。开挖技术要求施工人员严格按照施工计划进行操作,确保开挖顺序、支护结构的安装、降水措施等各环节的衔接合理。整体工艺流程上,要求施工各环节精密配合,尤其是开挖过程中的土方运输、支护施工、降水处理等均需要科学安排。

3.3 降水技术及地下水控制方案

在城市轨道交通深基坑施工中,地下水的控制是一项重要的技术难题,尤其是在地下水位较高的地区。降水技术的目的是将基坑区域内的地下水位降至安全范围,以保证基坑开挖的顺利进行。常用的降水方法有井点降水、深井降水、管井降水等。在选择降水方案时,需要根据基坑的深度、周围土层的渗透性、地下水的水文地质条件等因素进行综合考虑。在井点降水中,通过布置多个降水井,利用水泵将地下水排出,从而降低基坑区域内的水位;而深井降水则通过深井泵的持续抽水,进一步加深降水深度,确保施工区域的干燥环境。为了防止降水过程中周围环境产生影响,还需加强周围建筑物的沉降监测,确保降水方案不会导致地面沉降

或建筑物损害。在施工过程中,应注意控制降水的强度和周期,避免过度降水引发地质灾害或影响土体结构的稳定性。此外,降水过程中应定期对地下水的水质、水量进行监测,确保基坑施工的安全性与稳定性。

4 城市轨道交通深基坑施工中的质量控制

4.1 质量控制的基本原则与目标

质量控制是深基坑施工的重要组成部分,旨在确保施工过程中的每个环节都能达到设计标准与安全要求。质量控制的基本原则是预防为主,全面检查,控制关键环节。首先,基坑施工中的每一个阶段都需要经过严格的质量检查,特别是在支护结构的施工和基坑开挖过程中。根据数据显示,基坑支护系统的质量问题占基坑工程质量问题的40%,而开挖过程中出现的问题占25%。为此,施工单位应根据项目的复杂性制定详细的质量控制目标,这些目标包括支护结构的稳定性、开挖的精度以及施工现场的安全管理。质量控制的目标应通过定期的质量检查与监控来实现,确保所有施工工艺都符合设计要求,避免因工艺不规范导致的质量事故。有效的质量控制不仅能减少质量缺陷的发生,还能提高工程的安全性和可靠性^[2]。

4.2 施工阶段的质量控制措施

在深基坑施工过程中,质量控制措施需要贯穿整个施工阶段。首先,在基坑支护施工阶段,必须确保支护结构的设计、施工材料以及安装工艺符合规范要求。支护结构的安装质量直接影响基坑的稳定性和安全性,施工过程中要严格控制支护结构的变形量,确保不超过设计标准。其次,在基坑开挖阶段,质量控制应注重开挖深度的精确控制,避免过度开挖或不均匀开挖导致基坑失稳。开挖作业应分层进行,确保每层开挖后的支护措施及时到位,防止出现支护失效或位移问题。根据施工数据分析,基坑开挖过程中存在约20%的工程因开挖不当导致质量事故,因此对开挖工艺、支护施工、地下水控制等环节必须实施严格的质量监督。同时,监测技术的应用也是质量控制的重要措施,通过安装变形监测仪器对支护结构的位移、沉降进行实时监控,确保施工安全和质量。

4.3 基坑施工中的质量问题与防范对策

深基坑施工中常见的质量问题主要集中在基坑支护失稳、开挖过度、地下水渗漏等方面。基坑支护失稳的主要原因是支护结构设计不当或施工不规范,这可能导致基坑壁坍塌、土体滑移等问题。根据研究数据显示,支护结构问题约占基坑质量问题的35%。另外,基坑开挖过程中,若没有严格控制开挖深度和支护进度,容易导致开挖过度、支护不及时,甚至引发基坑周围环境的不稳定。地下水渗漏问题是深基坑施工中普遍存在的质量难题,特别是在水位较高的地区,地下水的控制不足可能导致基坑无法保持干燥环境,影响施工进度和安全。为此,防范对策应包括强化支护结构的

设计和施工质量、加强开挖过程中的监控和管理、完善地下水控制措施。此外，通过加强施工人员的技术培训，提高质量意识、定期进行质量检查和评审，也有助于有效预防质量问题的发生，图1为基坑施工中的质量流程展示。

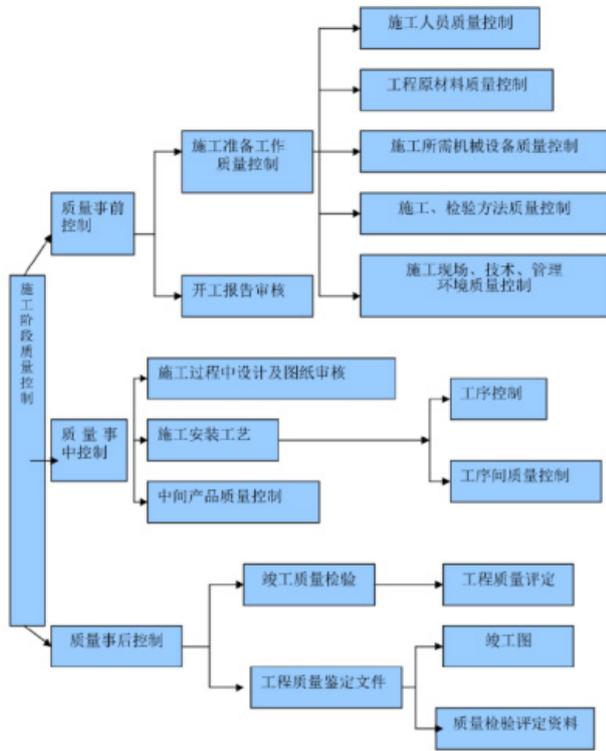


图1 基坑施工中的质量流程展示

5 城市轨道交通深基坑施工的风险管理与安全控制

5.1 施工风险的识别与评估方法

深基坑施工风险管理是确保工程安全的关键环节。首先，施工风险的识别需要对基坑周围环境、地质条件、施工工艺等方面进行全面评估。通过对地质勘察报告的分析，识别出可能的地质风险点，如软弱土层、断层等，预判其对基坑施工的影响。其次，基坑开挖过程中的风险评估应结合监测数据，分析施工过程中支护结构可能出现的失稳风险、地下水渗透风险以及周边建筑物沉降风险等。数据显示，地质条件复杂的地区，基坑施工的风险发生概率高达30%。因此，施工前应制定详细的风险评估报告，并结合具体施工阶段进行动态评估，确保及时发现潜在风险并采取应对措施。风险评估的过程还应借助计算模型和数值模拟技术，提前模拟不同情况下基坑的响应，优化风险管理方案。

5.2 安全控制措施与监测技术

在深基坑施工过程中，安全控制措施和监测技术的有效应用至关重要。安全控制措施包括对施工现场的全面检查、施工人员的安全培训以及安全防护设施的配置。基坑施

工时，安全防护设施如临时支护、坡度控制等，需要根据基坑的实际情况进行科学设计和施工，以确保施工人员的安全。在施工阶段，要实施分阶段的安全评估，及时发现潜在的安全隐患。监测技术的应用可以有效提高施工的安全性，尤其是在基坑支护系统、开挖深度以及地下水控制等关键环节。通过设置变形监测、位移监测、地下水位监测等设备，实时监控基坑的变化，确保任何异常情况都能第一时间得到反馈和处理。此外，使用智能监控系统对施工过程中的关键数据进行分析与预警，可以大大降低施工风险^[3]。

5.3 施工事故的预防与应急响应方案

施工事故的预防与应急响应是保障基坑施工安全的重要环节。事故预防的关键在于施工前的充分准备工作，包括详细的施工方案、风险评估报告、应急预案的编制等。施工过程中，确保每个环节都严格按照安全操作规程进行，施工人员需定期接受安全培训，提高安全意识，及时发现并处理安全隐患。数据显示，基坑施工中的安全事故大多发生在不规范操作和施工监控不足的情况下。对于基坑施工中的常见事故，如支护结构失稳、基坑渗水等，应制定应急响应预案，确保发生事故时能够及时采取应对措施。应急响应方案应包括事故报告、应急处置、人员疏散等内容，并进行定期演练，确保应急处理能力的提高。通过建立完善的应急响应机制，施工单位可以迅速应对突发事故，最大限度地减少损失和人员伤亡^[4]。

6 结语

在城市轨道交通深基坑施工中，技术的精细化和质量控制的严格性是确保工程顺利推进的关键。通过对基坑支护、开挖、降水等施工技术的精确管理，可以有效避免施工中的质量问题和安全隐患。此外，深基坑施工中的风险管理与安全控制同样重要，必须综合考虑地质条件、地下水位变化以及施工过程中的各类风险，制定详尽的防范与应急措施。随着技术的发展和手段的提升，智能监控系统的应用为施工安全提供了有力保障。未来，深基坑施工将更加注重技术创新与环保措施的融合，推动轨道交通项目在高效、安全的基础上不断向前发展。通过持续优化施工工艺与质量控制策略，可以最大限度地保障城市轨道交通工程的安全、顺利完成，为城市发展和交通建设贡献更多的力量。

参考文献

- [1] 段嘉仪,徐梦瑶.城市轨道交通信息化建设与安全管理的综合研究[J].建材世界,2025,46(02):121-124.
- [2] 张可晨.城市轨道交通深基坑开挖过程变形控制方法研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(06):52-54.
- [3] 金岳灵.邻近城市轨道交通线路的深基坑工程施工管控研究[J].建筑科技,2025,9(02):14-17.
- [4] 王同华.软弱地层地铁深基坑施工邻近建筑物微变形控制技术[J].都市轨道交通,2025,38(01):129-135.

Selection and Application Effect of Energy-saving Materials in Green Data Center Decoration Design

Xudong Lu

Jietong Smart Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

Under the “dual carbon” strategic goals, green data center construction has become a key direction in the development of information infrastructure. The interior design phase is a critical component of energy efficiency management, where the rational selection and scientific application of energy-saving materials directly impact the thermal performance of data center envelopes, energy consumption levels, and overall operational energy efficiency. Conducting a comprehensive analysis of energy-saving material selection and application is not only a practical requirement for improving energy utilization but also an effective measure to promote the green building economy. This article, based on the actual construction status of green data centers in China, first explores their functional characteristics and energy-saving requirements, then provides key points for selecting and applying energy-saving materials in various interior design areas, offering valuable references and insights for industry professionals.

Keywords

green data center; interior design; energy-saving materials; selection; application; key points

绿色数据中心装修设计中的节能材料选型与应用效果

鲁旭东

捷通智慧科技股份有限公司, 中国 · 北京 100000

摘要

在“双碳”战略目标下,绿色数据中心建设已然成为信息基础设施发展进程的主要方向之一,装修设计环节属于能效管理关键部分,其节能材料合理选型与科学应用情况直接影响数据中心的围护结构热工性能,能耗水准以及整体运行节能成效。对其节能材料选型与应用实施全方位分析,不但是提高能源利用率的现实需求,同时亦是发展绿色建筑经济的有效举措。对此,文章从我国绿色数据中心实际建设状况出发,先切入绿色数据中心功能特性和节能需求,随后针对其装修设计的各个不同部位节能材料的选型以及应用要点,以供广大同行参考与交流。

关键词

绿色数据中心;装修设计;节能材料;选型;应用;要点

1 引言

随着电子信息技术的快速发展,大数据、云计算以及人工智能等技术日渐成熟。数据中心要求更多的存储和计算数据,数据中心普遍面临设备发热、密度高、电力能耗大的现状,2019年国家明确提出了关于加强绿色数据中心建设的指导意见,数据中心平均能耗要基本达到国际先进水平,新建大型、超大型数据中心的电能使用效率值需要达到1.4以下,由此可见,实现节能环保、绿色降耗迫在眉睫。

2 绿色数据中心的功能特性与节能需求

功能方面绿色数据中心不但要承担高密度信息设备的集中存储以及运行任务,而且需要借助建筑物理环境的调控

来保证机房拥有恒温、恒湿且低噪声的运行环境。在装修设计阶段,与普通公共建筑相比因绿色数据中心运行负荷高度集中且持续性强,意味着对能效控制标准更高。功能特性层面而言,绿色数据中心着重机房区域的环境稳定,辅助区域的舒适以及整体结构的安全,这对围护结构的气密性隔热性和吸声性能提出了更高的要求^[1]。节能需求层面而言,目前绿色数据中心建设的节能需求领域普遍依照公共建筑节能设计标准以及绿色数据中心评价指标体系等相关规范,其中装修材料要求导热系数、环境释放物控制以及燃烧性能等级等指标方面都要达到绿色建材等级标准。为让运行能耗得以降低,绿色数据中心装修设计中墙体和隔断要拥有优良隔热与保温性能;地面和吊顶在兼顾结构轻质化的同时,要实现良好热反射效果;门窗及围护结构在遮阳隔声、密闭性能方面需达到高标准要求;特殊功能性材料在抗静电隔振和阻燃等方面要提供额外支持。

【作者简介】鲁旭东(1984-),中国天津人,本科,工程师,从事装饰装修设计研究。

3 绿色数据中心装修设计中的节能材料选型

3.1 墙体与隔断材料

针对绿色数据中心的墙体与隔断部分装修设计上，其节能材料选型要于结构承重能力和节能性能间达成平衡，具体为：轻质节能墙体材料与高效隔断系统应在装修设计中重点考虑，而摒弃难以满足轻质化、隔热性等需求的常规混凝土或砖砌结构。为保证机房内部环境稳定性，墙体与隔断材料要具备低导热系数、良好的耐火及隔声性能。在后期机房功能出现调整需求时，为避免因二次施工导致能源浪费，非承重隔断设计时选择具备装配化特性的材料体系，从而达到快速拆装的目的。在机房长期运行环境下，墙体材料的热工性能至关重要，因而设计时应采用内部复合保温层，或者芯材填充的途径达成持续的热阻效应。另外，针对绿色数据中心大开间空间，隔断材料的抗变形能力与刚度极为关键，设计时要借助热工分析与声学模拟精细化选材工作，以此保障隔热、隔声以及耐久性能等都符合绿色建筑的要求。

3.2 地面与吊顶材料

地面与吊顶在绿色数据中心装修设计里属于重要环节之一，其选用的节能材料对机房内部热环境调节效率以及能耗水平有着直接影响，具体为：地面部分除要兼顾承重能力以适应设备机柜高荷载的使用需求外，还需满足防静电、防火耐磨及易清洁等性能。因而宜挑选具有较高反射率的地面饰材以降低照明能耗，同时借助控制材料导热性能减少机房冷热气流的能量损失。吊顶部分设计重点关注轻质化以及高反射特性，且所选用的材料需要具备优良的热稳定性和阻燃性能，同时采取模块化设计提升机房维护以及设备布线的便利性^[2]。另外，吊顶材料的声学性能亦需纳入选材考量范畴，目的在于保障绿色数据中心空间噪声被控制于合理区间之内。

3.3 门窗及围护结构材料

在绿色数据中心里门窗及围护结构占据着重要地位，它们能够将外界环境的影响予以隔绝，并维持内部热湿状态的平衡，其节能材料选型为：为绿色数据中心内部环境在外界气候变化剧烈的状况下仍保持稳定，材料选型重点在于气密性、隔热性与遮阳性能。门窗部分设计上，采取高性能密封条与门框结构相配合，门体则选用高强度低导热的复合材料，以此来降低空气渗透损失；窗体选用双层或多层中空玻璃，内部填充低导热气体提升保温系数，在外层增添遮阳设施减少太阳辐射热的输入。围护结构设计上，除选择复合节能材料外，借助外保温和内饰层的有机融合构建起完整的热工屏障以防冷桥效应，同时在结构的接缝采用具有耐候性以及柔性的材料，如此方可防止因热胀冷缩所引发的能量损耗现象。

3.4 特殊功能性材料

装修设计上特殊功能性材料的应用目的在于为绿色数据中心运行环境的特殊需求提供多层次保障，其涵盖抗静

电、防火阻燃、隔振降噪以及空气净化等功能性材料，具体选型为：在机房地面饰层以及隔断表面设计上须选用防静电材料，目的在于降低设备运行期间静电积聚的风险；在绿色数据中心火源风险较高区域选用防火阻燃等级较高的材料，通过形成隔热屏障以此防止火势出现扩散情况；绿色数据中心外围墙体吊顶以及管道包裹层设计时选用隔振降噪材料，以此来减小设备运行时所产生的噪声对外部空间造成的干扰；绿色数据中心内部还需选用具备吸附能力及低挥发性有机物释放的环保型产品作为空气净化类材料，以此降低空气中有害物质的含量^[3]。

4 绿色数据中心装修设计中的节能材料应用要点

4.1 墙体与隔断材料应用要点

装修设计绿色数据中心时对于墙体与隔断材料的应用，要从热工性能控制、界面密封性以及结构稳定性等方面进行统筹。针对墙体基层设计上选择无机保温砂浆或者低导热系数的加气混凝土砌块，同时在施工规范中明确须借助高分子防潮膜并精确找平，从而保证隔断系统于高温环境里具备长期的耐久性与稳定性。绿色数据中心复合型墙体设计时选择岩棉板或酚醛泡沫作为芯材，同时外侧覆以纤维增强硅酸钙板，同时采用机械锚固与耐候胶黏剂双重固定工艺，让芯材与饰面层形成紧密整体结构防止因空鼓或分层导致传热阻值降低。隔断设计中，拼装的连接节点采取全封闭式处理方式，并以硅酮耐候密封胶或者阻燃型膨胀密封胶用来填充缝隙，这样既保证空气渗透率处在能够控制的范围之内，又能提升隔断系统的耐火完整性。机房内部隔断设计则是在轻钢龙骨框架当中填充高密度矿棉，并将穿孔吸声石膏板复合于表面，如此能够同步控制隔热与声学性能，提高空间功能的适配性。针对管线穿墙部位，设计时除采用独立的防火套管外，其外层需使用无机防火封堵材料或者阻燃型密封胶予以封闭，以此来避免热量传导以及空气渗透情况的出现。

4.2 地面与吊顶材料应用要点

针对绿色数据中心地面与吊顶两部分装修设计时材料应用要点核心在于能效管理以及空气动力学优化。地面部分设计选择高强度架空活动地板体系，同时以多层复合阻尼弹性体嵌设在其支撑基座与结构的接触面上，从而实现系统整体的抗振稳定性增强、削弱低频噪声传播以及确保机柜区域承载分布的均匀性目的。防静电饰面材料导电性能稳定宜用于表层铺设，随后设计再以导电胶层以及接地铜箔构建连续电荷释放网络防止局部电位出现积聚。为确保气流分布均匀性得以维持，设计时一方面地板接缝处应嵌入密封等级较高的阻隔条，另一方面采用精密模数化板材接口。吊顶系统设计上选择轻质高强龙骨框架，以降低结构附加荷载，同时采用高反射率铝镁合金复合板或陶铝微孔吸声板作为其表面饰材，这不仅能保证室内光学反射效率，还可兼顾声学环境

控制。针对板材拼缝采取机械锁缝结构以实现面层平整度与严密性。空调送回风口及各类管线的接口区域设计时使用高阻燃防火隔套与气密密封层,避免冷热气流在吊顶层间产生泄漏或短路。当吊顶内腔用作冷热空气通道时,设计时要在其内壁包覆具有低导热系数的无机纤维复合保温层,并配备表面覆箔隔热层以此降低能量损耗并避免冷凝水产生。

4.3 门窗及围护结构材料应用要点

在装修设计绿色数据中心时,需将气密性隔热性以及热桥削减当作核心控制指标指导门窗及围护结构的材料应用。设计中宜选用高密度复合型隔热门芯板用于门体部分,且在门框与墙体的衔接处配置双道甚至多道复合密封系统。密封条材料应当采用硅橡胶或者三元乙丙合成胶,以此提高长期耐候以及抗形变性能,同时还应将可调节耐磨密封底扫条与门扇底部相结合,且在门扇内侧整合自动闭合机构从而保证冷热气流隔断始终具备持续有效性^[4]。窗体设计上采用分区组装式系统窗,框体外层需选用断热铝合金型材,且要内嵌多腔体隔热条,而玻璃选用三层中空结构,间隔层要充填氩气或氟气以此增强传热阻力,同时其内表面贴上低辐射镀膜层降低红外辐射透过率,在玻璃与框体的结合部位必须嵌设复合气密胶带,还要辅以弹性密封胶以此保证界面封闭的稳定性。针对围护结构外立面设计上应选择连续型无热桥外保温体系,以高导热阻聚异氰酸酯板或岩棉复合板为保温材料,具体厚度需结合能耗模拟结果而定,同时在外饰面与保温层之间应当设置透气防水膜以此来控制湿热迁移。主体结构 and 幕墙的结合处设计时宜采用高耐候密封胶与柔性隔热条构建起多层协同的屏障以此防止节点部位出现冷桥效应。楼板边缘区域与檐口需额外配置连续隔断的闭孔型挤塑聚苯板,且在接缝区域用高分子密封带辅助以此来保持气密性。

4.4 特殊功能性材料应用要点

为实现绿色数据中心节能化与高可靠性目标,其装修设计中还应对特殊功能性材料应用环节予以合理配置。选用防静电材料应优先选择表面电阻分布稳定以及导电性能均匀的特性饰面产品,接着设计中将其和接地系统相连形成静电泄放通路,借助饰层基底里整合导电铜带或者金属纤维层达成面层电荷的有效泄放目标,以防止因静电积累而给设备

运行环境带来不利影响。装修设计中弱电电路包覆区域墙体夹层、吊顶衬层等是防火阻燃材料配置的重点区域,应当选用烟毒释放量低且氧指数较高的复合阻燃板材,并且在界面部位借助密封胶与耐火涂层构建起闭合阻隔体系,以此保证材料在受到火源作用时依然可以维持稳定的物理结构。以多层复合型声学吸隔材料作为绿色数据中心的隔振降噪材料,设计时将其用于机房外围围护体系,通过玻璃棉矿物棉与高分子阻尼层组合构建多频段声波衰减通道,同时在结构设计里严格把控材料厚度与密度匹配,防止因声桥效应造成隔声性能被削弱^[5]。另外,装修设计中空气净化材料主要以具备高比表面积和多孔结构的无机矿物涂层或改性活性炭基薄层为主,它们应用在饰面内层及吊顶腔体,随后联合通风管路内置高效颗粒物空气过滤单元形成复合净化体系,如此一来能在维持通风效率的同时还可实现对细颗粒物、甲醛及其他挥发性有机物的有效吸附与催化分解。

5 结语

综上所述,绿色数据中心作为新时期下信息基础设施的能效优化工程,其装修设计须借助于科学合理的选择和应用节能材料实现能效水平及运行成本的降低。基于此,上文结合我国绿色数据中心装修设计实际情况,从功能特性和节能需求这两个方面出发,对节能材料的选型逻辑以及应用要点展开了系统的阐述,以期建立起可操作性强的节能装修设计路径。

参考文献

- [1] 陈心拓,周黎旸,张程宾,王树华,张亮亮,陈建峰.绿色高效数据中心散热冷却技术研究现状及发展趋势[J].中国工程科学, 2022, 24(4):11.
- [2] 施旭炎.浅析数据中心内装材料燃烧性能等级要求[J].江苏通信, 2023, 39(3):77-79.
- [3] 王超.绿色建筑理念下的数据中心装修技术优化——以数据中心装修为例[J].中国建筑装饰装修, 2025(10).
- [4] 刘恋,朱丽,刘帆,等.低碳背景下的装配式数据中心策略研究[J].工程建设标准化, 2021(6):5.
- [5] 可思为,董萍,马铭宇,等.考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法[J].电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 22-33.

Research on the Performance Evolution Mechanism and Interface Synergistic Effect of ECC High Ductility Concrete Materials in Structural Reinforcement

Bin Wen Jianfa Jia Han Li Tengfei Ma Xianliang Wu

Hebei Luhang Urban and Rural Development Group Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 150026, China

Abstract

Structural reinforcement is a key link in enhancing the safety and durability of existing buildings. Traditional external concrete, FRP and steel plate reinforcement often leads to problems such as interface cracking and insufficient ductility. ECC with high ductility and multi-crack refinement characteristics shows obvious advantages in reinforcement, but the collaborative mechanism of its microcrack evolution, fiber traction and interface transition zone still needs in-depth research. Based on the multi-scale force-bearing behavior of ECC, this paper analyzes the force transmission paths among fibers, matrix and interface transition zones, constructs a performance evolution model, and summarizes the action laws of ECC in interface strengthening, ductility improvement and load-bearing capacity enhancement in combination with component reinforcement tests, and proposes reinforcement strategies under different damage grades. Research shows that ECC can enhance the collaborative force-bearing capacity between the reinforcing layer and the base by reshaping the tensile force transmission path and refining the crack distribution, providing theoretical support and methodological reference for the design and application of high ductility materials in structural reinforcement.

Keywords

ECC High ductility concrete Structural reinforcement Interface transition zone Crack control Synergy

结构加固中 ECC 高延性混凝土材料性能演化机理与界面协同作用研究

温彬 贾建法 李汉 马腾飞 吴羨亮

河北路航城乡发展集团有限公司, 中国·河北 邢台 150026

摘要

结构加固是提升既有建筑安全与耐久性能的关键环节, 传统外包混凝土、FRP和钢板加固常出现界面开裂和延性不足等问题。具有高延性和多裂缝细化特征的ECC在加固中展现明显优势, 但其微裂纹演化、纤维牵引与界面过渡区协同机制仍需深入研究。本文基于ECC的多尺度受力行为, 分析纤维、基体与界面过渡区的传力路径, 构建性能演化模型, 并结合构件加固试验总结ECC在界面增强、延性提升和承载能力改善方面的作用规律, 提出不同损伤等级下的加固策略。研究表明, ECC可通过重塑拉力传递路径与细化裂缝分布, 提高加固层与基底的协同受力能力, 为结构加固中高延性材料的设计与应用提供理论支持与方法参考。

关键词

ECC; 高延性混凝土; 结构加固; 界面过渡区; 裂缝控制; 协同作用

1 引言

既有结构在长期荷载、环境侵蚀及偶发灾害作用下容易出现开裂、剥落、承载能力下降等问题, 亟须进行有效加固。在加固材料体系中, 普通混凝土存在脆性断裂、裂缝不可控及界面黏结不足等弱点; 纤维增强复合材料 (FRP) 虽具备较高强度, 但与混凝土界面粘结性能弱、受力模式不兼容; 钢板加固则易出现腐蚀、界面剥离等耐久性问题。相比

之下, ECC 具有高延展性、可控制多裂缝开展及良好界面适应性, 能够显著改善共同受力状态, 使加固层与原结构形成更稳定的协同体系。然而, ECC 的性能优势来源于其纤维与基体、界面过渡区结构、裂缝演化机制的协同作用。在结构受力过程中, 裂缝起裂、扩展及定向分布的形成机制尚需多尺度力学视角研究。同时, ECC 与原混凝土之间的界面传力路径、温湿耦合影响及加载过程中界面组织演变规律, 是影响加固效果的重要因素。因此, 深入探讨 ECC 在结构加固中的性能演化机理与界面协同作用, 是推动 ECC 加固设计体系成熟的关键。

【作者简介】温彬 (1974-), 男, 中国河北宁晋人, 工程师, 从事建筑工程研究。

2 ECC 材料组成特征与力学性能演化机理

2.1 纤维增强体系的拉-拉传力机制

ECC 的本质在于纤维与基体间的桥联作用。纤维在受拉过程中通过拔出、滑移与界面黏附等机制分担荷载,使裂缝数量增加但宽度受控在微米级。纤维与基体之间的界面黏结强度、纤维端部形貌与分布取向直接决定材料的应变硬化能力。研究表明,纤维含量在 2% 左右可维持多缝开展与拉伸硬化性能的平衡,而过高的纤维含量会导致基体团聚与孔隙率升高。

2.2 基体微结构与裂缝细化控制机制

ECC 基体采用高掺量粉煤灰、硅灰及其他超细矿物掺合料,通过“微填充效应”与“次级水化反应”使界面过渡区(ITZ)显著致密化,减少毛细孔隙和微缺陷的连通性,从而提高抗裂能力。裂缝细化行为本质上受控于裂缝尖端能量释放率与纤维牵引反力之间的动态平衡。当裂缝尖端达到扩展临界能量时,纤维桥联力及时参与承载,使裂缝扩展被阻滞,并在周围区域产生新的细微裂缝,实现裂缝由单一集中发展向多点分布扩散。此“裂缝分散效应”使 ECC 在受力后形成微米级裂缝网络,而非传统混凝土中典型的主裂缝贯通模式。该机制有效避免应力集中与断裂失稳,使材料在高应变下仍保持力学连续性,从而提升延性、抗冲击和抗疲劳能力。

2.3 应变硬化阶段的微观响应过程

ECC 在受拉加载初始阶段表现为与普通混凝土相似的线弹性响应,其后在达到初裂点后进入应变硬化阶段。此阶段中,基体逐渐退出主导承载作用,纤维桥联力承担越来越多的外部荷载,从而使材料在较大应变范围内保持应力增长趋势。随着应变增加,裂缝数量不断增多但裂缝宽度始终受控在较小范围内,使局部损伤得以扩散并与周围材料形成协调变形。直至纤维界面黏附能力或纤维强度达到极限,材料才进入应变软化阶段。该从微裂纹萌生到应力均匀再分配的过程,构成 ECC 避免脆性断裂的本质机理。应变硬化阶段的存在不仅提高材料延性,也为其在结构加固中提供缓冲与能量耗散能力,形成良好的协同受力效果。

3 ECC 与原混凝土界面过渡区特性分析

3.1 界面过渡区(ITZ)组织结构特征

ECC 与原混凝土基体结合后,在两者接触区域形成特征显著的界面过渡区(ITZ)。该区域微结构的致密性、孔隙率分布及水化产物形态直接影响复合体系的整体黏结性能。SEM 观察显示,ECC 基体中细颗粒掺合料使水化产物在界面区域形成连续性较好的桥联结构,减少了典型混凝土界面中常见的孔隙富集与弱化带现象。此外,纤维端部在界面区产生牵引与咬合作用,可进一步增强界面结构完整性,使界面由潜在的薄弱层转变为应力协同传递的重要区域。这为 ECC 加固体系提供了优于传统水泥砂浆修补材料的黏结优势。

3.2 界面黏结行为的力学传递模式

ECC 与原混凝土界面在受力过程中呈现由化学键合、摩擦力传递和机械咬合作用共同驱动的复杂黏结机制。界面在加载初期表现为弹性黏结阶段,剪切滑移较小;随着荷载提高,界面进入黏结滑移阶段,摩擦与界面粗糙度共同影响剪切刚度变化;在进一步加载下,界面进入软化阶段,纤维牵引可延缓完全脱粘,维持一定残余承载能力。ECC 材料中多裂纹细化行为可使界面应力沿宽域扩散,避免单点应力集中,显著提高界面破坏延迟性和能量耗散效率。因此,界面并非受力薄弱点,而是整体力学协同的关键节点。

3.3 温湿耦合与老化对界面性能的影响

界面性能在服役过程中会受到温度变化、湿度波动及外部侵蚀介质等因素影响。温湿耦合作用主要通过改变水化产物晶型结构及界面微裂纹数量影响黏结强度。长期耐久性试验结果显示,在多次干湿循环和冻融环境下,ECC 与混凝土界面仍能保持较高黏结稳定性,界面劣化速率明显低于普通砂浆或普通修复材料体系。这得益于 ECC 的致密基体结构与裂缝自愈潜能,可通过再水化产物填补微裂纹,阻断劣化扩展路径。由此可见,ECC 在界面耐久性方面具有显著优势,可长期维持复合加固体系的可靠性和力学性能一致性。

4 ECC 在结构加固中的力学协同作用

4.1 受弯构件加固的承载能力提升机理

受弯构件的主要破坏形式通常表现为受拉区裂缝快速扩展与混凝土脆性断裂,拉区混凝土在开裂后难以继续承担拉力,导致构件整体延性不足。将 ECC 加固层布置于受拉区后,材料的多裂缝细化与延性应变硬化特征能够形成连续拉应力传递路径,使拉区受力由集中向分布形式转变。其内在机理在于纤维牵引作用能够在裂缝起裂后仍维持有效的拉力传递,避免单一主裂缝导致构件失效。ECC 的微裂缝形成可有效降低裂缝尖端的应力集中,延缓裂缝贯通,并通过多裂缝协同分担拉应力,使受拉区在较大应变范围内仍保持承载能力。弯曲加载试验结果显示,加固构件的屈服点后承载能力提升显著,延性系数可达到原构件的 2~3 倍,破坏形态由脆性断裂向延性弯曲压溃转变。同时,ECC 加固层的变形协调性使截面应力重分布能力增强,构件跨中位移与塑性转角能力提升更为明显,从而实现承载力、延性与耗能能力的综合提升,为延长结构服役周期提供可靠支撑。

4.2 受剪构件加固的裂缝抑制机制

受剪构件常出现斜裂缝迅速开展及剪切脆性破坏,其破坏发生过程短、预警不足。ECC 材料的细裂缝开展特征能够在受剪区域形成密集裂缝网格,使剪应力由单一斜裂缝承载转为多裂纹协同传递。微裂缝宽度可被控制在 40~80 μm 范围内,这种微裂缝分散效应有效延缓斜裂缝拔增长速度,限制裂缝贯通。ECC 中纤维的拉-拉传力机制能够在裂缝形成后依然承担部分剪切抗拉应力,抑制裂缝进一步扩

展,改善构件的塑性耗能能力。试验研究表明,采用ECC加固受剪构件后,构件的剪切破坏形态由陡直贯通裂缝转为细密多裂纹形态,极限剪切承载力可提升20%~50%,疲劳抗裂寿命显著延长。此外,ECC替代传统抗剪箍筋或与箍筋协同作用,可优化剪切应力场,降低局部应力集中,提升构件的抗震延性。该机制为解决受剪构件脆性失效提供了有效途径。

4.3 受压构件中加固层的协同约束作用

对于受压构件,核心混凝土在受力后往往发生横向膨胀,导致应力集中与脆性压溃破坏。ECC加固层通过其较高的拉伸韧性与包覆能力,可在受压区形成外向约束,使横向变形受到限制,从而提高构件的约束效应与抗压性能。加固层的存在使核心混凝土受力状态由单向受压转变为三向受压,有效提高了峰值强度与应变能力。三轴受压模型试验显示,ECC包覆后,构件破坏形态由脆性碎裂状向缓慢压溃状转变,应力-应变曲线表现为峰后下降更为平缓,韧性系数显著提升。ECC的裂缝细控能力保证加固层不会在受力初期产生贯通裂缝,有利于加固层持续提供约束作用;同时,界面黏结性能的提高使得加固层与核心混凝土协同变形,避免出现界面剥离与失效。通过应力场重分布机制,ECC提升了构件整体稳定性、承载储备与耐久性能,特别适用于老旧结构柱、受压剪柱及高轴压比构件的延寿与抗震加固。

5 工程应用与加固设计建议

5.1 不同损伤等级结构的加固策略

既有结构损伤形态、开裂范围和承载能力衰减程度存在显著差异,加固方案需根据损伤等级分级制定,以实现材料性能与结构需求的合理匹配。对于轻微开裂或表层剥蚀的构件,损伤主要集中于混凝土保护层内部,承载能力未出现明显衰减,此时应以恢复耐久性与抑制裂缝扩展为目标,宜采用ECC薄层表面修复方式,通过表层微裂纹闭合与界面致密化改善构件服务性能。对于中度损伤构件,如出现跨截面显性裂缝或局部承载能力下降,可采用ECC叠合层加固策略,使ECC与原构件形成整体受力体系。叠合层不仅提供额外拉区承载能力,还能通过多裂缝细控抑制原裂缝进一步扩展,提高变形能力与延性储备。对于严重破损或承载能力明显不足的构件,仅依靠ECC难以满足承载要求,应采用ECC与钢板、型钢或FRP等复合加固体系,利用多材料协同效应实现承载力、延性与抗疲劳性能的综合提升。

5.2 加固层与基底的界面处理要求

加固层与原混凝土基底之间的界面性能直接决定复合

受力体系的协同能力。界面若存在光滑层、弱化层或水化产物脱落,将导致滑移、脱层甚至加固失败,因此界面处理是ECC加固系统中不可忽视的关键环节。对原混凝土表面应采用机械凿毛、喷射磨蚀或水冲打毛等方式去除表层污染物、风化层与弱界面层,形成一定粗糙度以增强机械咬合作用。施工前应进行适度预湿,使界面孔隙中含水量达到稳定状态,以防吸水过快影响ECC水化与粘结界面致密度。为进一步增强界面结合,可采用聚合物界面剂、水泥基渗透型界面材料或胶结性能增强剂形成化学键合与微结构过渡层,从而降低界面处应力集中概率,提高粘结剪切强度。研究表明,界面粗糙度、含水状态及界面剂组成共同影响界面剪切性能与耐久性。

5.3 材料配合比及施工控制要点

ECC在结构加固中的性能发挥高度依赖材料配合比与施工控制。水胶比直接影响基体致密性与纤维界面粘结性能,一般控制在0.25~0.30区间以确保适度流动性与高强度界面结构。纤维体积分数需在可实现应变硬化与裂缝细化的范围内优化,一般取2.0%左右能兼顾工作性与力学性能;纤维分布均匀性受分散剂、减水剂和搅拌制度影响,若纤维团聚将导致裂缝控制能力下降,因此需通过分段投料、低速预混与高速剪切混合等方式确保纤维分布均匀。施工振捣应避免过度处理,以防止纤维定向与分离。

6 结语

ECC的高延性、多裂缝细化及界面匹配性能使其成为结构加固领域具有前景的重要材料。通过微结构演化机理与界面协同作用的深入研究,可促进ECC加固理论体系完善,为既有结构的安全性提升与耐久性延长提供可靠支撑。未来,应在长期耐久性、复杂环境耦合效应及大规模工程应用标准化体系方面继续推进研究,实现从材料性能研究向加固设计规范与工程实践应用的系统化发展。

参考文献

- [1] 陈宇,宋学伟,吴佳梁.抗收缩ECC单轴拉压力学性能及损伤本构模型[J].硅酸盐通报,2024,43(09):3137-3148.
- [2] 李睿寅.FRP网格-ECC预制管与内部混凝土界面黏结性能研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [3] 杨彦东,卢博,田浩,等.超高延性混凝土(ECC)加固砌体墙抗剪性能的数值分析[J].材料导报,2024,38(S1):269-275.
- [4] 周峰.FRP网格增强ECC加固损伤钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D].广西科技大学,2022.
- [5] 徐若兵.ECC中柔性纤维空间分布及其对力学性能影响的研究[D].福州大学,2023.

Characteristic and method of low temperature pipe stress analysis

Lina Wang

Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163712, China

Abstract

The low temperature pipe is an important part of the cryogenic separation unit of natural gas and the LNG liquefaction station. However, the strength of the pipe material is easy to be changed and brittle break in the low temperature environment. Its safe and reliable operation is the key to the smooth operation of the plant. In this paper, the natural gas cryogenic unit is taken as an example, and CAESAR II software is used to discuss the change of operating temperature, combination of load conditions and setting of boundary conditions, so as to master the change of stress distribution and pipeline strength.

Keywords

Low temperature pipe; Stress analysis; Cryogenic gas

低温管道应力分析的特点和方法

王丽娜

大庆油田设计院有限公司, 中国 · 黑龙江 大庆 163712

摘要

低温管道是天然气深冷分离装置和LNG液化站的重要组成部分, 然而低温环境下, 管道材料的强度易发生变化出现脆断, 其安全可靠运行是工厂平稳运行的关键。本文以天然气深冷装置为实例, 采用CAESAR II应力分析软件, 从操作温度变化、载荷工况组合和边界条件的设置等方面进行论述, 以掌握低温管道的应力分布和管道强度的变化情况。

关键词

低温管道; 应力分析; 天然气深冷

1 概述

在石油天然气项目建设和运行中, 常常会出现低温工况, 如安全阀和调压阀出口管道、天然气深冷分离装置、LNG 液化站以及东北寒冷冬季温度低于 -20°C 的环境。长期处于低温环境下, 管道材料的强度易发生变化, 甚至出现脆断, 影响工厂的安全性和平稳运行。因此, 对低温管道进行应力分析以掌握材料强度和管道应力的变化尤为重要。

1.1 温度变化对管道材料性质的影响

压力管道输送介质的温度以及外界环境温度的变化对管道材料的性能有较大的影响。当介质温度过高时(如碳钢温度超高 300°C 、合金钢温度在 400°C 以上时)材料的应力超过一定限度, 会出现应力保持不变, 应变随时间增加而不断增加的情况, 即发生了高温蠕变现象。而当介质温度过低时, 材料将产生脆变, 容易造成管道的脆性断裂。

材料低温脆性的形成, 与屈服强度 σ_s 和强度极限 σ_b 的温度依赖性密切相关。其中, 强度极限 σ_b 受温度波动的影响较小, 而屈服强度 σ_s 的变化规律则取决于材料本身的属性。具体而言, 体心立方晶体结构的金属及合金、或是部分密排六方晶体的金属及合金, 其屈服强度 σ_s 会随温度降低而显著攀升。这一特性使得 σ_s 与 σ_b 随温度变化的两条曲线会相交于某一特定温度点, 该交点对应的温度即为 t_k (脆性转变温度)。当材料温度高于 t_k 时, 强度极限 σ_b 始终大于屈服强度 σ_s , 材料在承受载荷时会先发生屈服变形, 随后才出现断裂; 而当温度低于 t_k 时, 强度极限 σ_b 会小于屈服强度 σ_s , 材料受载后会优先达到断裂强度, 此时材料将表现出脆性断裂的特征。^[1] 因此, 低温管道在进行选材时, 要求材料具有良好的低温韧性、抗腐蚀性能和焊接性能等。

管道材料在工程设计中的选用通常将 t_k 值作为材料使用下限温度。经过大量的试验和工程实践, 各类材料所适用的温度下限值在国内外标准中均有详细的规定。因此, 在进行管道选材时, 要充分考虑管道设计温度和材料使用温度下限值来确定管道基材。然而当管道操作条件符合“低温低应力工况”条件时, 可以通过控制管道整体应力值远低于断裂

【作者简介】王丽娜(1989-), 女, 中国黑龙江绥化人, 硕士, 工程师, 从事油气田地面场站及配套设施的配管设计和管道材料研究。

强度 σ_c 来适当放宽管道材料的适用温度下限,同时又能满足标准规范和工程设计的需求。

1.2 管道应力分析的类型和方法

管道应力分析包括静力分析和动力分析,根据管道所承受载荷的类型,静力分析中管道受力分为一次应力、二次应力和偶然应力,管道自重和介质重量、压力载荷属于一次应力范畴,二次应力主要由温度变化引起的热胀冷缩和端点位移产生;动力分析主要为管道的振动分析。^[2-3]对管道进行静力分析计算和校核,要求管道的一次应力和二次应力值均小于规范规定的许用应力。控制管道的一次应力值使管道满足刚度条件,最直接的办法是减小管道弯矩,即要减小管道跨距,可以通过适当补充增加支架的数量来减小一次应力;对管道进行二次应力分析使管道满足强度条件,要求管道具有足够的柔性,在进行管道布置时可以增大非约束段管道长度和适当增加 π 型弯来减小二次应力。^[4]

对低温管道进行应力分析时,装置运行中温度变化引起的热胀冷缩和端点位移易造成支架脱空,因此节点位移的大小和对二次应力的校核是应该关注的重点。同时在开车、预冷阶段,易出现热拱、水锤等现象,也是低温管道应力分析的关注重点。

2 天然气深冷装置管道应力分析实例

以北方某天然气深冷分离装置管道安装设计为例,本文选取膨胀机出口去脱甲烷塔下部进口管线进行应力分析。

2.1 模型参数输入

管道介质:天然气;介质密度: 0.74kg/m^3 ;设计温度: $-82.8^\circ\text{C} \sim 86.0^\circ\text{C}$;设计压力: 2.5MPa ;规格: $\Phi 219 \times 6$;材质: $06\text{Cr}19\text{Ni}10$ 不锈钢;材质密度: 7.93kg/dm^3 ;管道保冷层厚度为 180mm 。

为了对比温度变化对管道应力的影响,本文对输入的设计温度参数分别取常温 20°C 和低温 -82°C 。

2.2 模型建立

为使一次应力和二次应力满足许用应力要求,在管道布置设计时合理增设支吊架和充分考虑管道柔性。建立管道模型见图 1。



图 1 管道模型示意图

2.3 工况选取与组合

本文在对深冷分离单元管道进行应力分析时,考虑了管道和介质重力载荷 W 、温度载荷 $T1$ (常温)、温度载荷 $T2$ (低温)、压力载荷 $P1$,按照应力载荷的不同分类进行工况组合,采用 CAESAR II 软件分别对不同温度、不同工况下的应力进行校核分析。各种组合工况见表 1。

表 1 载荷工况组合统计表

序号	载荷工况	应力类型
1	$L1=W+T1+P1$	OPE
2	$L2=W+P1$	SUS
3	$L3=L1-L2$	EXP
4	$L4=W+T2+P1$	OPE
5	$L5=L4-L2$	EXP

2.4 计算结果分析

2.4.1 常温下管道的应力情况

通过 CAESAR II 软件计算,在常温下,管路模型节点位移较小,均小于 1mm ,管路各节点没有出现支架脱空现象,一次应力和二次应力均在许用应力允许范围内。应力校核情况见表 2。

表 2 常温下管道应力校核

载荷工况	节点	应力最大值 /kPa	许用应力 /kPa	比值 %
L2 (SUS)	50	35410.5600	137895.1000	25.6793
L3 (EXP)	180	4063.4410	254546.1000	1.5963

2.4.2 低温下管道的受力情况

通过软件计算可知,当管路温度降低后,低温操作工况的二次应力较常温工况有明显增大,但仍然在许用应力允许范围内,应力校核情况见表 3。

表 3 低温下管道应力校核

载荷工况	节点	应力最大值 /kPa	许用应力 /kPa	比值 %
L2 (SUS)	50	35410.5600	137895.1000	25.6793
L5 (EXP)	140	79757.0600	323313.1000	24.6687

该管路模型节点 120-140 处 DY 方向节点位移较大,见表 4,可知塔前进口管线部分管段在低温作用下产生变形,管线局部向上拱起,支架出现脱空现象,造成支撑失效。

表 4 不同操作温度工况下节点位移 DY (mm)

载荷工况	节点		
	120	130	140
L1	-1.1453	0.0000	0.2002
L4	-3.5434	8.8244	14.6024

可在节点 130 处设置弹簧支架,借助弹簧支架的辅助支撑作用来缓解该管段的低温变形。这是由于弹簧支架既能

承受管道荷载，又允许其存在垂直位移，解决了管道在有垂直位移时的支撑问题，增加了管道的柔性。

表 5 不同操作温度工况下增加弹簧后节点位移 DY (mm)

载荷工况	节点		
	120	130	140
L1	-1.1453	0.0000	0.2002
L4	-17.2675	0.0000	23.1146

3 结语

本文采用 CAESAR II 软件对天然气深冷分离装置的低温管道进行了应力分析，考虑了重力载荷、压力载荷(内压)

和不同温度载荷变化的影响；对载荷分类组合并进行应力校核，通过计算结果可知温度降低容易引起管道局部变形，出现支架脱空现象，可以通过借助弹簧支架等辅助作用对管道模型进行优化。

参考文献

- [1] 阳东升, 费珂, 何旭东, 蔡晓峰.“低温低应力工况”下管道材料的应用[J].化工设计, 2019, 29(3):29~31.
- [2] 唐永进.压力管道应力分析[M].北京:中国石化出版社,2010.
- [3] 李家栋. CAESAR II用于应力计算时的载荷类型及要求[J].广州化工, 2018,46 (22) : 100~102.
- [4] 于国鹏, 赵广明, 张彦新. LNG罐区低温管道应力分析[J].石油化工设计, 2015, 32 (3) : 22~25

Analysis of plant configuration method and maintenance technology in landscape garden construction

Kun Jiang

Tonglu County Municipal Garden Construction Management Office, Hangzhou, Zhejiang, 311500, China

Abstract

Landscape architecture plays an important role in shaping the ecological livable environment in modern urban construction. In order to effectively improve the ecological benefits and aesthetic value of landscape engineering in landscape architecture, and to promote the sustainable development of the city, this paper first analyzes the principle of plant configuration, and then combines the principle of ‘three planting and seven breeding’, based on the needs of ecological development and aesthetic design, summarizes the methods of plant configuration and plant maintenance technology. Mastering scientific and reasonable plant configuration methods and maintenance techniques can gradually form a systematic maintenance system. This study can effectively improve the urban environment, fully meet the leisure and cultural needs of the public, and provide a useful reference for the construction of gardens in China.

Keywords

landscape architecture ; plant configuration ; maintenance technology

风景园林施工中植物配置方法及养护技术分析

江昆

桐庐县市政园林建设管理处, 中国 · 浙江 杭州 311500

摘要

风景园林在现代城市建设中, 承担着塑造生态宜居环境的重要使命。文章以切实提升风景园林工程景观生态效益和美学价值为目的, 以促进城市可持续发展为目标, 首先分析植物配置原则, 其次结合“三分栽、七分养”原则, 立足生态发展需要和美学设计, 总结植物配置方法、植物养护技术。掌握科学、合理的植物配置方法和养护技术, 可逐渐形成系统性养护体系。本研究可以实现对城市环境的有效改善, 充分满足市民休闲和文化需求, 并为我国园林建设提供有益的参考。

关键词

风景园林; 植物配置; 养护技术

1 引言

城市化进程加速的背景下, 城市环境问题日益严峻。风景园林作为现代城市建设的核心内容, 对城市生态发展至关重要, 其不仅能美化环境、提高居民生活品质, 还具备生态修复和文化遗产等功能。植物配置作为风景园林营造的关键环节, 会对园林景观的品质和生态价值产生直接影响, 因此, 积极探究并总结植物配置方法和养护技术具有积极的现实意义。

2 风景园林施工中植物配置原则

风景园林施工中, 植物是重要的元素, 为充分保证植物景观的美观性、生态性和持久性, 则在配置植物时, 应遵循以下原则。

2.1 多样与统一原则

为保证风景园林具有丰富的视觉体验, 则施工单位在配置植物时, 应积极遵循多样与统一原则, 即在配置植物时, 要积极丰富植物种类、植物形态、植物色彩和植物质感, 并且, 为避免出现混乱的情况, 施工单位要在变化中主动寻求统一, 充分保证风景园林的整体性和协调性。具体而言, 施工单位要在布局上采用重复的手法、主动选用色调相近的植物^[1]。

2.2 对称与平衡原则

植物配置中, 良好的对称布局可以带来稳重和庄严感, 动态均衡设计可以让游客在视觉上和心理上达到平衡。所以, 施工单位在植物配置中, 要积极遵循对称与平衡原则, 科学分布不同植物之间的视觉重量, 并合理设计对称破缺和植物群落的自然分布。

2.3 对比与协调原则

对比原则要求施工单位在配置植物时, 要通过对比突出不同植物之间的特性, 进而实现对主题和焦点的有效强

【作者简介】江昆(1985-), 男, 中国浙江桐庐人, 本科, 工程师, 从事园林绿化建设管理研究。

调。协调原则要求施工单位在配置植物时,能保证植物之间在形态、色彩和质感上具有一定的相似性,不会产生突兀感。施工单位积极遵循对比与协调原则,可创造出既对比鲜明又和谐统一的植物景观^[2]。

3 风景园林施工中植物配置方法

3.1 生态优先

生态优先是植物配置的重要遵循,其既可以充分保证风景园林生态系统稳定性,又可以进一步提升植物环境适应性和长期可持续性^[3]。因此,施工单位在配置植物时,要始终保证生态优先。

第一,实现乡土物种主导。相较于外来植物,乡土植物更具备较强的适应性,所以,具有更高的成活率。基于此,施工单位在施工之前,应积极开展土壤pH值、有机质含量和渗透性的检测工作,并以检测结果为导向,结合当地年均温和降水数据等,合理、科学开展植物分区划分工作,进而在划分的基础上,优先选择本土物种。第二,修复原生生态系统。首先,要实现场地原生要素保留。在风景园林施工中,施工单位要主动对湿地、溪流和古树名木等科学设置物理围挡,并积极对施工路线进行科学调整。并且,在必要时,施工单位还应积极落实根系修复工作,包括填充腐殖土等。其次,要进行地形地貌适应性设计。施工单位要主动结合坡地、洼地等,科学配置芦苇、菖蒲等湿生植物和胡杨、沙棘等旱生植物,切实降低土方改造成本。第三,构建复层群落结构。施工单位要积极开展垂直分层配置工作:为达到固土、抑制杂草的目的,施工单位应在地被层科学种植麦冬、鸢尾等植物;为达到降噪、分隔空间的目的,施工单位应在灌木层种植丁香、连翘等植物;为达到遮阴、降尘的目的,施工单位应在乔木层种植榆树、香樟等植物。需要注意的是,为能有效避免单一物种大面积种植,则施工单位应主动采取“斑块混交”的植物种植模式。并且,施工单位也可以积极引入紫薇等蜜源植物,进而实现对传粉昆虫的有效吸引,并进一步增强生态链完整性。

3.2 艺术设计

植物配置中,艺术设计是重要的美学灵魂,其可以对植物形态、色彩和质感等要素进行科学调整和设计,进而逐步打造一个具备层次感和韵律感的景观空间^[4]。因此,施工单位要在植物配置中,积极落实艺术设计活动。

第一,对比与协调视觉要素。从色彩构图上来看,为能营造出一个良好的宁静氛围,施工单位可以使用同一色系进行分层过渡;为能有效增强视觉冲击,施工单位可以进行互补色碰撞设计,进而实现对游客目光的有效吸引。从形态组合上来看,为能形成刚柔对比,施工单位可以将柔曲线条和刚直树形有机结合起来;为能进一步增强几何构成感,施工单位可以将球形植物和尖塔形植物等有机结合起来,从而形成良好的视觉冲击。第二,应用空间层次营造技法。为营造出良好的空间感,施工单位可以在地被层种植麦冬和鸢

尾等冷色调植物,在灌木层种植绣球和美人蕉等花色渐变植物,在小乔木层种植红叶李和木槿等形态互补植物,在大乔木层种植枫树和香樟等交错植物。与此同时,为能吸引游客停留,则施工单位还可以将罗汉松等孤植造型树作为视觉焦点。这种视线引导设计,可以让风景园林设计更具有特色。第三,科学应用植物配置形式。植物配置形式包括焦点式、序列式和群落式,其中,焦点式是指选择造型黑松、古银杏等形态独特的树种,独立成景,突出个体美。或者,可以在入口进行对称种植,充分彰显庄重感;序列式是指在道路两侧等距种植法桐等同种乔木,进而有效形成韵律节奏。或者,也可以分段交替种植桃树、柳树等树种,进而形成“步移景异”的良好效果;群落式是指利用槭树、杜鹃、蕨类等植物模仿自然群落,通过随机组合的方式,充分体现出野趣。风景园林施工中,施工单位积极进行艺术设计,可实现功能、生态和美学的有机统一。

3.3 功能协调

风景园林施工中,为保证植物配置可以满足不同空间的使用需求,并可以达到环境调节、人文关怀等目标,施工单位要积极采取功能协调的植物配置方法,既有效优化空间实用性,避免景观“形式大于内容”,又切实提升环境适应性,并实现经济和可持续性的有效平衡。

第一,实现空间功能分区适配。施工单位应主动根据场地属性,科学制定差异化配置方案:在休闲区,为满足其遮阴、安全、亲和力的要求,施工单位可科学搭配冠幅宽阔乔木、无刺灌木层和耐踩踏草坪,包括悬铃木、绣球和结缕草等植物;在道路系统,为满足其降尘、导向、抗碾压的要求,施工单位可积极搭配抗污染乔木列植和根系抗板结地被,包括女贞和麦冬等植物;在生态防护区,为满足其固土净水、生物栖息的要求,施工单位可搭配深根性乔木和湿生植物群落,包括柳树、芦苇和蜜源植物等植物;在儿童、老人区,为满足其安全防护、感官互动的要求,施工单位需要禁用带刺植物、有毒植物,并积极增加触感柔和、色彩明快物种,包括紫薇、三色堇等植物。第二,落实行为需求导向设计。针对动态活动区,施工单位可以在运动场地周边积极种植珊瑚树等密植灌木,进而实现对外部干扰的有效阻断,同时,可以在中层科学配置香樟,进而实现对眩光的有效减弱;同时,施工单位可以在广场集散区种植银杏等落叶大乔木,切实保障夏季遮阴率;针对静态休憩区,施工单位可在私密空间,种植常绿灌木围合和芳香植物,进而切实提升私密空间舒适度。又或者,施工单位可在开放空间种植低矮地被,进而充分保障视野通透。

4 风景园林施工中植物养护技术

4.1 水分管理

植物生长过程中,水分是重要的基础介质,其与植物成活率和景观持续性,具有直接关系,因此,施工单位要积极做好水分管理工作。针对乔木、绿篱等植物,施工单位

可以采取滴灌、渗灌的方式,即在根系区科学埋设滴头,且保证埋设深度为30~50cm,这可以提高节水率;针对草坪、花坛等,施工单位可以采取微喷灌的方式,且保证喷射高度 $\leq 50\text{cm}$ 、雾化覆盖半径为1.5m;针对生态园区,施工单位可以采取雨水蓄用的方式,即组合设计下凹绿地和渗透井,进而有效地将蓄存雨水用于旱季灌溉中,实现对自来水的有效替代;针对珍贵树种区,施工单位可以采取墒情监测灌溉的方式,即在20cm、40cm、60cm等位置埋入土壤湿度传感器,进而有效减少无效灌溉。

4.2 营养调控

营养供给是保证植物能进行有效能量代谢的核心驱动,因此,施工单位要基于植物对元素的需求,实现精准施肥:在土壤改良阶段,施工单位可施用[腐熟有机肥5kg+过磷酸钙100g]/ m^2 ,且需要保证深翻30cm混匀,进而有效降低土壤容重;在促生长阶段,施工单位可施用缓释NPK复合肥,50g/ m^2 ,一般情况下,要在雨前撒施或兑水灌根;在应急补肥阶段,施工单位可通过叶面喷施的方式,科学施用0.2%磷酸二氢钾+0.1%螯合铁;在缺素矫正阶段,施工单位可根据叶片实际情况,利用定向注射或根灌的方式,科学补充元素:黄化补铁、紫叶补磷。

4.3 整形修剪

整形修剪是定向调控植物生长和形态的有效手段,因此,施工单位要积极开展整形修剪工作,既实现对营养生长和生殖生长的有效平衡,又实现对病虫害的有效去除。针对乔木,施工单位可根据透光防灾的修剪目标,积极开展疏枝工作,且保证截干高度 $\geq 2.5\text{m}$ 。并且,在疏枝后,要在剪口处涂愈合剂;针对灌木,施工单位可根据更新复壮的修剪目标,开展剪弱留强、剪内留外和剪老留新的工作,并且所使用的工具,应当用75%酒精进行擦拭;针对绿篱,施工单位可根据形态规整的修剪目标,根据上部窄下部宽的要求,开展修剪工作,保证透光率 $> 30\%$ 防下部秃裸^[5]。需要注意的是,在该环节中,每修剪10m,都应当消毒1次;针对藤本后,施工单位应根据防缠绕破坏的修剪目标,开展修剪工作,且保留主蔓,清理吸附根。需要注意的是,剪口距芽点应为0.5cm。

4.4 病虫害综合治理

为进一步保障植物的健康生长,施工单位应主动结合

生态安全性和经济性,积极开展病虫害防治工作,包括生态预防、物理阻隔、生物调控和精准化防:①生态预防。施工单位应积极构建“乔—灌—草”立体复合结构,且乔木层选用银杏、香樟等抗虫植物,地被层选用薄荷、艾草等驱虫植物,这可以实现对病虫害爆发的有效抑制。同时,施工单位还应积极落实土壤健康管理:每年秋季,科学施用腐熟有机肥,进而实现对土壤微生物环境的有效改良。同时,施工单位也应积极落实轮作制度,进而实现对病虫害生存周期的有效破坏。②物理阻隔。为有效打破传播途径,施工单位可以积极安装防护装置,包括在树干缠绕防虫胶带、合理悬挂黄色粘虫板等。同时,还应积极落实环境调控技术,即在夏季高温时段,应积极覆盖遮阳网,进而有效降低红蜘蛛发生率;在冬季清园时,应利用高压水枪对树皮缝隙进行冲洗,进而实现对越冬虫卵的有效清除。③生物调控。通过天敌防控的方式,实现生物调控,包括利用赤眼蜂防治鳞翅目害虫,10000~20000头/667 m^2 ;利用瓢虫控制蚜虫,释放比例为瓢虫:蚜虫=1:50。此外,施工单位还应加强微生物制剂施用,包括利用苏云金杆菌(Bt)制剂800~1000倍液对咀嚼式口器害虫进行有效防治、利用100亿孢子/g枯草芽孢杆菌500倍液对植物做灌根处理,进而实现对根腐病的有效预防。

5 结语

风景园林施工中,积极开展植物配置工作和养护工作,可打造出同时具备生态韧性和美学价值的生命型景观。因此,施工单位应加强植物配置工作和养护工作研究,书写人与自然和谐共生的诗篇。

参考文献

- [1] 冯修宇.风景园林施工中植物配置方法及养护技术[J].园艺与种苗,2025,45(09):58-59+67.
- [2] 李学建.风景园林施工中植物配置方法及养护策略[J].居舍,2025,(22):127-130.
- [3] 刘晓睿.风景园林施工中的植物配置方法及养护方案[J].花木盆景,2025,(02):66-67.
- [4] 易炳兴.风景园林施工中植物配置方法与养护技术研究[J].中华民居,2024,17(08):86-88.
- [5] 绳斌.风景园林施工中植物配置方法及养护技术[J].中国林业产业,2024,(06):116-118.

Application and Development Trend of Digital Technology in Construction Engineering Surveying and Mapping

Jinpeng Yi

China Gezhouba Group Three Gorges Construction Engineering Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443000, China

Abstract

Digital technologies for construction engineering surveying play a central supporting role throughout the entire construction process. By upgrading surveying equipment, data-processing methods, and result-presentation approaches, these technologies significantly enhance the accuracy, efficiency, and stability of surveying outcomes. The coordinated application of three-dimensional laser scanning, unmanned aerial photogrammetry, and high-precision GNSS positioning has transformed spatial information acquisition from traditional point-or line-based sampling to surface-and volumetric-based representation. This shift establishes a continuous data chain and visualized models, providing a solid technical foundation for standardized and high-quality development in construction engineering surveying.

Keywords

construction engineering surveying; digital technology; 3D laser scanning; UAV photogrammetry; GNSS positioning

建筑工程测量数字化技术应用与发展趋势

易金鹏

中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司, 中国·湖北 宜昌 443000

摘要

建筑工程测量数字化技术在工程建设全过程中发挥着核心支撑作用,通过对测量装备、数据处理方式及成果表达模式的全面升级,使测量结果的精度、效率与稳定性显著提升。三维激光扫描、无人机航测和GNSS高精度定位等技术的协同应用,使建筑物空间信息的获取由传统的点状、线状采集向面状、体量化表达转变,形成连贯的数据链与可视化模型,为建筑工程测量的规范化与高质量发展奠定技术基础。

关键词

建筑工程测量; 数字化技术; 三维激光扫描; 无人机航测; GNSS定位

1 引言

建筑工程测量是支撑工程规划、设计、施工和运维管理的重要基础环节,其成果质量直接影响工程建设的精度与安全性。随着建设规模不断扩大和工程结构类型日趋复杂,传统测量方式在效率、精度和信息表达能力方面的局限逐渐显现,难以满足现代建筑工程对多源数据、动态监控和高精度控制的综合需求。数字化测量技术的快速发展,为工程测量提供了新的技术路径,通过自动化测量装备、数字化数据处理平台和可视化成果表达,实现测量全过程的高效化、精细化和协同化发展。

2 建筑工程测量数字化技术的体系构成

建筑工程测量数字化技术的体系由数字化测量装备、

数据处理平台与成果表达模块构成,构建了贯穿测量任务采集、处理与交付的全过程技术链。数字化测量装备覆盖三维激光扫描仪、无人机航测系统、GNSS高精度接收机及多传感器融合终端,能够以毫米级至厘米级的精度获取空间信息,形成高密度点云、正射影像、数字表面模型及三维坐标成果。数据处理平台承担数据结构化、配准、建模和校正等任务,通过点云自动拼接、航测影像空三解算、卫星观测数据差分改正等算法,实现数据格式的高效转换与质量控制。成果表达模块依据建筑工程需求,将测量结果以三维模型、矢量图、数字地形模型及BIM关联成果等形式输出,用于施工放样、结构变形监测和竣工验收等场景。数字化测量体系各模块之间通过数据接口实现衔接,使测量信息在工程建设中的传递更为及时,流程更为精细,提升建筑测量作业的准确性与管理效能。

2.1 三维激光扫描技术的精细化测量优势

三维激光扫描技术基于高速激光脉冲测距原理,通过向目标表面发射激光并接收回波信号计算点位坐标,能够在

【作者简介】易金鹏(1991-),男,中国湖北枝江人,本科,工程师,从事测绘相关研究。

短时间内得到高密度点云信息。扫描仪通常具备每秒几十万至上百万点的采集能力，常用设备的测距精度可保持在 2 毫米至 5 毫米之间，扫描半径可达到 50 米至 200 米，使建筑结构、构件细部和复杂曲面均可被完整记录。扫描成果通过点云配准技术进行多站合并，可形成覆盖完整建筑空间的三维模型。该技术在钢结构节点复测、混凝土结构实体核验、机电管线综合调整等环节具有显著优势，通过点云对比分析，可将偏差控制在厘米级范围内。点云数据在处理过程中可由软件进行噪声剔除、网格化建模和体积计算，通过色带编码反映表面特征，使变形量、位移量的提取更为直观。凭借高精度、高密度和非接触的特点，三维激光扫描技术已成为建筑工程中精细化测量的重要技术支撑^[1]。

2.2 无人机航测技术的快速获取能力

无人机航测技术以机载航摄相机、惯导系统及定位模块为核心，通过按规划航线实施空中摄影获取建筑区域影像数据。常规多旋翼无人机的航摄分辨率可达到 2 厘米至 5 厘米，固定翼无人机在大范围作业中可实现 5 厘米至 10 厘米的地面分辨率，能够满足建筑场地、基坑、道路及周边环境的空间信息快速更新需求。无人机航测通过影像空三加密、区域网平差和正射校正技术形成高精度正射影像、数字表面模型和三维实景模型，平面精度常控制在 5 厘米至 15 厘米，高程精度维持在 10 厘米至 20 厘米。无人机具备快速部署与低空机动能力，可在几十分钟内完成大范围测区的影像采集，显著提升测量效率。通过多视影像匹配，可自动生成高密度点云，使建筑轮廓、场地形态和构筑物位置得以完整呈现。航测成果在施工规划、土方量计算、安全巡查与形变监测等环节具有重要应用价值，其快速、灵活和覆盖范围广的特点，使无人机成为建筑测量的重要数字化装备。

2.3 GNSS 高精度定位技术的实时测量特性

GNSS 高精度定位技术依托卫星观测信息，通过载波相位测量、差分改正和实时动态定位算法，实现建筑工程中的

高精度位置获取。常用 RTK 模式可将平面定位精度保持在 1 厘米至 2 厘米，高程精度保持在 2 厘米至 3 厘米，满足建筑放样、基坑监测和结构变形观测的精度要求。GNSS 接收机通过多频段观测与抗干扰技术提升信号稳定性，使观测数据在复杂施工环境中仍具可靠性。实时动态定位系统通过移动站与基准站的数据链路实现秒级更新，能够在施工放样过程中提供连续、实时、动态的坐标信息。结合倾斜测量、电子气泡、自适应滤波等功能，可进一步提升外业测量的效率与稳定性。在建筑工程全周期中，GNSS 技术可用于控制网布设、施工过程定位、结构监测数据获取等多类场景，使测量作业更加高效、连续和可控，支撑工程建设过程的实时化管理需求。

3 建筑工程测量数字化关键技术的应用路径

3.1 三维激光扫描技术在建筑测量中的应用

三维激光扫描技术在建筑测量中的应用涵盖精细建模、结构变形监测、施工质量核验和竣工成果生成等多个环节，通过高速激光测距与空间点云建模形成高精度几何信息。扫描仪通过发射激光脉冲并记录回波，构建的点云密度可达到每平方米 5000 点至 50000 点，空间误差控制在 2 毫米至 5 毫米，可满足钢结构构件安装、幕墙龙骨定位与室内机电综合管线核查等对精度要求较高的场景。建筑施工阶段采用多站扫描配准技术，可形成完整的建筑三维模型，点云之间的配准误差可收敛在 5 毫米范围。通过点云与设计模型的对比分析，可将结构偏位、构件尺寸误差和地面不平度以色带方式直观展示，为施工偏差调整提供依据。扫描成果在基坑变形监测中可形成高程差分模型，通过时间序列点云比对，可监测毫米级沉降变化。在竣工测量中，点云数据可直接转化为建筑信息模型，实现快速交付，提升成果表达的精度和完整性，图 1 为三维激光扫描技术在建筑测量的流程示意图。

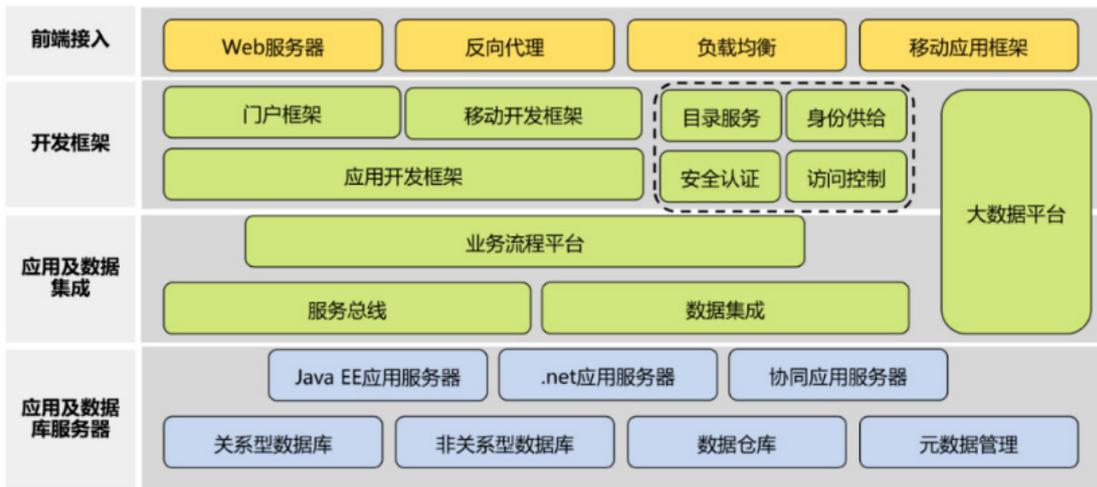


图 1 三维激光扫描技术在建筑测量的流程示意图

3.2 无人机航测技术在建筑测量中的应用

无人机航测技术在建筑测量中主要用于地形测绘、场地规划、施工进度分析和大型构筑物外观建模,通过对建筑区域实施低空影像获取实现数据快速更新。多旋翼无人机配备 24 毫米至 35 毫米航摄影相机,在 50 米至 120 米的飞行高度下可获得 2 厘米至 5 厘米的地面分辨率,满足精细化地形建模和放样准备需求。航测数据经过空三加密与区域网平差后,可生成平面精度 5 厘米至 15 厘米、高程精度 10 厘米至 20 厘米的正射影像和数字表面模型,用于场地规划和施工布置。建筑外立面与周边构筑物可利用倾斜摄影技术进行三维重建,通过五镜头或七镜头相机获取多角度影像,结合密集匹配算法形成高密度点云,点云密度可达每立方米数十万点,使外观模型更加精细。施工过程可通过定期航拍获得影像序列,对比不同时间的三维模型,可计算土方变化量、基础开挖深度和进度偏差,提升施工管理的直观性和准确性^[2]。

3.3 GNSS 高精度定位技术在建筑测量中的应用

GNSS 高精度定位技术通过载波相位差分、实时动态定位和多星座观测,实现建筑施工全过程的精确定位控制。RTK 定位方式可提供 1 厘米至 2 厘米的平面精度和 2 厘米至 3 厘米的高程精度,适用于控制网布设、道路与管线放样、桩位定位和基础开挖线形控制。建筑高层测量中可采用多频 GNSS 接收机,通过 L1、L2、L5 等多频段观测提升抗遮挡能力,在钢结构密集区域仍可保持观测稳定性。GNSS 与全站仪联用可形成混合控制网,通过几何约束优化使整体测量精度保持在毫米至厘米级。施工过程应用 GNSS 定位系统可实现实时坐标输出,移动站更新速率可达到 5Hz 至 20Hz,使放样点位能够连续呈现。在基坑监测中,GNSS 可结合自动化采集系统实现全天候观测,通过时间序列数据分析提取位移变化,实现结构安全的实时监控。技术在施工放样、结构变形测量、竣工测量和运维定位中发挥广泛作用。

4 建筑工程测量数字化技术的发展趋势

4.1 测量装备智能化与一体化趋势

测量装备正向智能化与一体化方向发展,通过自动识别、自动配准、智能算例和传感器集成技术提升作业效率与智能水平。新型三维激光扫描仪融合 IMU、陀螺仪和 SLAM 算法,可在无控制点条件下进行移动扫描,点云配准误差可控制在 10 毫米以内,适用于楼层狭窄空间与复杂工况。无人机测量装备正在向集成化发展,通过 RTK 模块、倾斜相机和避障雷达组合,使飞行精度得到显著提升,轨迹控制误差常保持在 10 厘米以内。GNSS 接收机正向网络化和高灵敏度方向演进,通过多星座观测(GPS、北斗、GLONASS、Galileo)提升信号冗余度,使定位成果更加稳定。多测量设备正在通过数据接口和智能控制平台实现一体化联动,可由单一终端完成控制、采集与初步处理,使外业效率提升 20% 至 40%,推动装备向更高集成度与智能化迈进。

4.2 测量数据融合化与实时化趋势

建筑工程测量数据正在向多源融合与实时更新方向发展,通过整合激光点云、无人机影像、GNSS 坐标和全站仪观测数据,形成结构化、统一化的空间数据体系。点云融合

算法通过 ICP 与 NDT 技术实现不同设备点云的精确拼接,误差可收敛在 5 毫米至 10 毫米范围。影像数据与点云可通过特征点匹配实现联合建模,使三维模型具备真实纹理与结构特征。实时化趋势通过 RTK 网络、5G 通信和边缘计算实现,外业数据可在数秒内上传至云端平台并完成初步处理,使施工放样、变形监测和进度分析具备动态更新能力。多源数据融合可生成高精度数字地形模型、建筑表面模型和施工进度模型,用于多部门协同。随着数据结构标准化水平提升,融合后的测量成果可在设计、施工和运维中实现共享,提升建筑工程管理效率^[3]。

4.3 测量应用平台化与协同化趋势

建筑工程测量正从单点作业向平台化与多部门协同方向发展,通过数字化测量管理平台实现成果集中管理、任务协同和流程可视化。平台通过云端架构存储激光点云、航测影像及三维模型,可支持 TB 级数据管理及多终端访问,满足大型建筑项目多阶段、多区域测量成果的集中应用。平台具备在线建模、点云浏览、断面提取、偏差分析和成果比对功能,可实现快速处理与可视化展示。协同化趋势通过项目管理模块实现测量任务分配与进度跟踪,使测量、设计、施工和监理单位可在同一平台共享数据^[4]。接口标准化技术使平台可与 BIM 系统、项目管理系统和物联网监测系统互联,在施工放样、结构监测和运维管理中提供持续的数据支撑。随着数据流动能力增强,测量成果正逐步成为工程信息链的关键节点,为建筑工程数字化建设提供稳定支撑。

5 结语

建筑工程测量数字化技术的快速发展,为工程建设全过程提供了更加精细、高效和可视化的技术支撑。三维激光扫描、无人机航测与 GNSS 高精度定位等关键技术,在数据获取、处理与表达中的深度融合,使测量成果的表达能力、实时性与准确性显著提升,推动建筑测量由传统手工化模式向智能化、系统化模式转变。伴随测量装备的智能升级、多源数据的融合共享以及平台化协同体系的完善,数字化测量已成为建筑工程质量控制、施工管理与运维监测的重要基础。在未来的工程实践中,数字化测量技术将继续发挥支撑作用,为建筑行业的高质量发展提供持续动力,并在更广的应用场景中展现其技术价值与发展潜能。

参考文献

- [1] 梁露.建筑工程测量中数字化测绘技术应用分析[J].科技资讯,2025,23(17):139-141.
- [2] 郑板涛.数字化测绘技术在建筑工程测量中的应用探究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(20):158-160.
- [3] 郭富坤.建筑工程测量中数字化测绘技术的应用[A].2025年第四届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流论文集[C].广西网络安全和信息化联合会:2025:556-557.
- [4] 李国庆.测绘技术在建筑工程测量中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(09):91-93.

Key Points of Quality Management in Highway Engineering Construction

Nan Dan¹ Qun Wang²

1. Hainan Highway Construction Project Management Co., Ltd., Haikou, Hainan, 570000, China

2. China Highway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Hainan CCCC Company, Haikou, Hainan, 570000, China

Abstract

As China advances its national transportation strategy, highway engineering—this vital infrastructure for socioeconomic development—faces dual challenges. Construction quality not only determines project longevity and traffic safety but also directly impacts public welfare and industry reputation. This study systematically examines the practical significance of construction quality management, with a focus on addressing quality control challenges and enhancing construction standards. Key aspects analyzed include preliminary geological surveys, material and process control during construction, and full-process quality traceability. The research demonstrates that establishing a comprehensive accountability system, strengthening professional competencies, and adopting intelligent management technologies are core pathways to quality improvement. These findings provide scientific guidance for highway engineering practices, facilitating high-quality development in the construction sector.

Keywords

highway engineering; construction quality management; key points; quality control; responsibility system

公路工程项目施工质量管理的关键要点

单楠¹ 汪群²

1. 海南公路建设项目管理有限公司, 中国·海南海口 570000

2. 中国公路工程咨询集团有限公司海南中交公司, 中国·海南海口 70000

摘要

在交通强国建设深入推进的背景下, 公路工程作为支撑经济社会发展的重要基础设施, 其施工质量不仅决定工程使用寿命与通行安全, 更直接关联民生福祉与行业口碑。本文以破解公路工程质量管控难题、提升施工质量水平为核心目的, 系统探讨施工质量管理的现实意义, 重点剖析前期地质勘察、过程材料与工艺管控、全流程质量追溯等关键要点。研究表明, 构建全流程责任追溯体系、强化人员专业素养、引入智能化管控技术是提升质量的核心路径, 该结论可以为公路工程施工实践提供科学指导, 助力建设行业实现高质量发展。

关键词

公路工程; 施工质量管理; 关键要点; 质量管控; 责任体系

1 引言

当前中国正处于《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》实施的关键阶段, 公路建设向着规模化、智能化方向加速推进, 然而部分项目存在质量隐患, 影响通行安全与工程效益。加强施工质量管理成为行业共识, 既是落实“交通强国”战略的具体举措, 也是破解建设难题的重要抓手, 本文围绕质量管理关键点展开分析, 为工程实践提供参考。

2 公路工程项目施工质量管理的现实意义

2.1 保障项目全周期经济效益的核心支撑

公路工程作为投资规模大、建设周期长且运营使用年限久的基础设施项目, 其施工质量与项目全周期经济效益之间存在密不可分的深层关联。质量管控到位的工程, 能够有效减少施工阶段因材料不合格、工序不规范引发的返工整改, 避免人力、物力及时间成本的无效损耗, 从源头压缩额外开支^[1]。运营过程中, 优质工程路面结构稳定、附属设施耐用, 可大幅降低养护维修频率与费用, 在延长使用寿命的同时, 维持良好通行条件, 通行效率提升能够促进物流运输成本下降、区域经济往来加速, 这种从建设到运营的成本节约与价值增值, 共同构成项目经济效益的核心支撑, 让前期投资持续产生稳定回报。

【作者简介】单楠(1988-), 男, 中国吉林榆树人, 高级职称, 硕士, 从事路基与路面工程研究。

2.2 维护公共出行安全与社会稳定的重要基石

公路作为连接城乡、保障民众日常出行与物资运输的核心通道，其施工质量直接关乎每一位使用者的生命财产安全，更与社会秩序稳定紧密相连。质量达标且结构可靠的公路，能够抵御自然环境侵蚀与车辆长期碾压，有效避免路面塌陷、桥梁断裂等安全隐患，为民众出行提供坚实保障。若施工质量存在缺陷，不仅可能引发交通事故造成人员伤亡与财产损失，还会影响民众对公共基础设施的信任度，甚至引发社会层面的负面情绪，因此，严格把控施工质量，本质上是维护公共安全底线、夯实社会稳定基础的重要举措，体现着对民众权益的切实保障。

2.3 推动公路建设行业转型升级的内在动力

在当前建筑行业追求高质量发展、市场竞争愈发激烈的大背景下，施工质量管理水平已成为衡量公路建设企业核心竞争力的关键指标，更是推动整个行业实现转型升级的内在驱动力。注重质量管理的企业，会主动优化施工流程、引入先进技术与设备、提升人员专业能力，通过标准化与精细化管理替代传统粗放式施工模式，这种对质量的追求，会倒逼行业内企业淘汰落后产能与管理方式，形成“以质量求生存、以质量谋发展”的良性竞争氛围。同时，优质工程的打造能够提升行业整体口碑与公信力，吸引更多资源投入到技术创新与管理升级中，推动公路建设行业向高效、绿色、智能的方向转型。

3 当前公路工程项目施工质量管理的关键要点分析

3.1 施工前期地质勘察与技术方案的精准性把控

施工前期的地质勘察与技术方案设计，是公路工程建设的“先行官”，其精准程度直接决定后续施工的方向与成效，是质量管理不可或缺的首要环节。地质勘察需全面覆盖施工区域，深入探明地形地貌、土壤成分、水文条件及地下管线分布等情况，为技术方案制定提供真实可靠的数据支撑^[2]。若勘察存在疏漏，可能导致技术方案与实际地质条件不符，引发路基沉降、边坡失稳等质量问题。技术方案设计需结合勘察结果，针对施工难点、关键工序制定详细方案，明确材料标准、施工工艺、质量检验指标等内容。方案审批过程中需多方论证，确保其科学性与可行性，从源头为施工质量提供保障，避免后续因方案缺陷导致质量隐患。

3.2 施工过程中材料质量与工序工艺的动态监管

施工过程中，材料作为工程建设的物质基础，工序工艺作为确保工程质量的技术核心，二者的动态监管是实时把控施工质量的关键抓手，直接影响工程最终品质。材料质量监管需贯穿采购、运输、存储及使用全流程，采购环节需严格筛选供应商，查验材料出厂合格证与检测报告；进场时需按规范抽样复检，杜绝不合格材料流入施工现场；存储阶段需根据材料特性采取防护措施，避免变质损坏。工序工艺监

管需依据技术方案，对每道工序施工过程进行全程跟踪，重点关注路基压实、沥青摊铺、混凝土浇筑等关键工序的操作规范。施工人员需严格按工艺要求施工，监管人员需及时纠正违规操作，上道工序质量验收合格后方可进入下道工序，形成环环相扣的质量管控链条。

3.3 施工全过程质量检测与信息化追溯体系构建

公路工程施工质量并非仅靠终端检验就能保障，而是需要贯穿全过程的严密检测，搭配完善的信息化追溯体系，形成质量管控的闭环管理。全过程质量检测需细化检测节点，涵盖施工准备阶段的设备调试检测、施工中的工序抽样检测、竣工后的整体性能检测等，采用专业检测仪器与科学检测方法，确保检测数据真实准确^[3]。信息化追溯体系则依托大数据、物联网等技术，将材料信息、施工人员、工序检测数据等实时录入系统，为每个施工环节建立可追溯的“电子档案”。一旦发现质量问题，可通过系统快速定位问题源头、责任主体及影响范围，为问题整改提供精准依据，同时也为后续工程维护与质量评估积累数据，提升质量管理的智能化与高效性。

4 提高公路工程项目施工质量管理水平的具体措施

4.1 构建全流程责任追溯的质量管理体系

构建全流程责任追溯的质量管理体系，是将质量管控责任精准落实到每个环节、每位主体的核心保障，这种体系打破传统质量管理中责任模糊、追溯困难的壁垒，通过明确权责边界、规范追溯流程，让质量责任贯穿工程建设始终。在体系构建初期，管理团队需结合公路工程线路长、工序多、参与方复杂的特点，全面梳理从勘察设计、招投标、材料采购到施工建设、竣工验收的全链条流程，精准识别各阶段的质量控制点与风险点，为责任划分提供科学依据^[4]。在此基础上，将责任条款细化至合同文本，针对建设单位的统筹监管责任、施工单位的主体实施责任、监理单位的监督核查责任及材料供应商的质量保障责任，明确各自在关键节点的具体职责与量化标准，例如要求材料供应商提供每批次材料的质量检测报告，施工单位对路基压实度等关键指标承担终身责任。施工前，为每个分项工程（如路基工程、路面工程、桥梁工程）划定独立责任单元，同步为施工班组、技术负责人、质量员及监理人员建立电子责任档案，详细记录其资质信息、过往业绩及质量奖惩情况。施工过程中全面推行“一岗一码”智能化管理模式，关键工序（如沥青摊铺、钢筋焊接）施工前，责任人需扫码确认身份信息与作业任务，系统自动推送对应的施工规范与质量标准；施工后由施工、监理、建设三方共同进行现场验收，验收结果、实测数据及签字确认信息实时上传至云端管理平台，形成不可篡改的电子台账。当出现路面裂缝、路基沉降等质量问题时，管理人员可通过平台快速追溯责任单元内的操作记录、材料批次信息、检测

数据及验收文件,精准界定责任主体。

4.2 强化施工人员专业素养与质量责任意识培育

施工人员作为工程建设的直接执行者,其专业素养决定工序施工的规范程度,其质量责任意识则影响施工行为的严谨性,强化二者培育需要摆脱单一培训模式,构建“分层培育、精准赋能、长效激励”的培育体系。针对新入职人员,需开展为期1-2个月的“理论+实操+考核”一体化岗前培训,理论课程邀请行业专家与资深工程师授课,系统讲解公路工程施工技术规范、《公路工程质量检验评定标准》及施工安全操作要点,结合本地典型公路质量事故案例解析质量缺陷的形成原因;实操培训采用“老带新”模式,安排新员工在经验丰富的技工带领下参与路基平整、模板安装等基础工序操作,重点训练其对施工工具的规范使用及质量偏差的初步判断能力,经理论考试与实操考核双合格后方可独立上岗。质量责任意识培育需融入日常管理,每周召开质量例会,选取近期行业内的质量事故案例进行深度剖析,邀请事故亲历者分享教训;建立“质量绩效”考核体系,将工序一次验收合格率、质量问题整改及时性等指标纳入薪酬考核,占比不低于30%,对连续三个月质量达标率100%的班组授予“质量标兵班组”称号并公开表彰,对出现质量失误的个人进行约谈问责并扣除相应绩效,让“质量第一”的理念从被动要求转化为施工人员的自觉行为。

4.3 引入先进施工技术与智能化质量管控手段

在数字化转型浪潮下,引入先进施工技术及智能化管控手段,是突破传统质量管理瓶颈、提升管控精度的有效路径,这种技术赋能让质量管控从“被动补救”转向“主动预防”,实现对施工全过程的精准把控^[5]。施工技术革新方面,全面推广BIM(建筑信息模型)技术的深度应用,在施工前由设计单位构建包含地形地貌、地质条件、结构参数的三维可视化模型,联合施工、监理单位开展虚拟施工模拟,重点对路基沉降、桥梁桩基受力、路面层间结合等关键工况进行仿真分析,提前发现设计方案中的不合理之处并优化调整,例如通过模拟沥青路面摊铺温度场分布,确定最佳摊铺顺序与速度参数。同时积极采用新型环保节能工艺,如沥青温拌技术可降低施工温度30-50℃,减少沥青老化现象,提升路面耐久性;高性能混凝土技术通过优化配合比,增强桥

梁、涵洞等结构物的抗渗性与抗冻性,降低后期质量维护成本。智能化管控手段部署上,构建“前端监测+中端传输+后端分析”的全流程管控网络。在路基施工区域间隔50米安装沉降传感器与含水率检测仪,在沥青摊铺设备上搭载红外温度传感器与超声波厚度监测模块,所有设备实时采集数据并通过5G网络传输至智慧管控平台,当数据超出预设阈值(如路基沉降单日超过5mm、沥青摊铺温度低于130℃)时,平台自动触发声光报警并推送至现场管理人员手机端。引入无人机巡检系统,配备高清摄像头与热成像仪,对边坡防护、高填方路基、桥梁支座等人工难以到达的区域进行每日高频巡检,搭配AI图像识别技术自动识别裂缝、坑槽、钢筋外露等质量缺陷,识别准确率达95%以上,生成的检测报告包含缺陷位置、尺寸及整改建议,直接分派至责任班组。同时搭建大数据管理平台,整合施工进度、材料检测、设备运行等多维度数据,通过机器学习算法分析质量风险关联因素,例如根据历史数据预测连续阴雨天气下路基压实度的变化趋势,为管理人员提前调整施工方案提供数据支持,让质量管控更具前瞻性与科学性。

5 结语

公路工程项目施工质量管理是系统性工程,贯穿建设全流程,承载着经济价值与社会使命,明确前期勘察、过程管控等关键点,落实责任体系、人员培育、技术创新等措施,是提升质量水平的必由之路。唯有将质量管理落到实处,才能破解行业发展瓶颈,打造安全耐久的公路工程,为综合交通运输体系完善与交通强国建设提供坚实保障。

参考文献

- [1] 郭靖宇.X高速公路机电工程项目施工质量管理研究[D].太原理工大学,2024.
- [2] 曹彦峰.浅谈公路填石路基施工技术要点[J].四川建材,2024,50(02):166-168.
- [3] 田昀,苏岩.基于BIM的公路工程项目施工质量管理策略研究[J].运输经理世界,2024,(02):59-61.
- [4] 陈侯德.安全质量管控在工程项目施工和监理中的应用探析[J].交通建设与管理,2023,(06):79-81.
- [5] 李国平.公路施工工艺和施工质量控制分析[J].工程建设与设计,2023,(14):160-162.

Design of Pocket Park in Jining City Based on Elastic Concept

Meiao Hao

Shanghai University of Technology, Shanghai, 200235, China

Abstract

Pocket parks serve as pivotal platforms for advancing green urban development and eco-friendly living environments. Beyond ecological restoration, they enhance environmental quality and elevate urban living standards. This study adopts the resilient design philosophy to provide a theoretical framework for Jining City's pocket park planning. It elucidates the principles and significance of resilient design in this context, identifies existing challenges in Jining's pocket park development, and proposes strategic solutions. The research reveals the profound ecological, social, and cultural dimensions of these parks, offering both theoretical foundations and practical pathways for high-quality urban green space development. Ultimately, it contributes to optimizing the city's living environment and promoting sustainable urban growth.

Keywords

elastic concept; pocket park in Jining; eco-city; landscape design; design method

基于弹性理念下济宁市口袋公园设计探究

郝美澳

上海应用技术大学, 中国·上海 200235

摘要

口袋公园是响应绿色城市、生态宜居建设需求的关键载体, 它不仅能修复城市生态环境、还能改善生态环境质量, 旨在推动城市生活品质。本文以弹性理念为切入点, 为济宁市口袋公园设计提供新的理论视角, 阐述弹性理念下济宁市口袋公园设计的原则与意义, 剖析济宁市口袋公园设计中现存的问题, 提出对济宁市口袋公园设计的策略, 揭示其在生态、社会与人文层面的深层意义, 为济宁口袋公园的高品质建设供给理论依据与实践路径, 助力城市人居环境优化与可持续发展。

关键词

弹性理念; 济宁市口袋公园; 生态城市; 景观设计; 设计方法

1 引言

济宁市作为鲁南重要中心城市, 近年城镇化进程稳步推进, 但城市发展中逐渐凸显的公共空间矛盾值得关注, 如老城区人口密集导致绿地资源紧张, 新城区的公共空间建设虽在推进, 却未能满足居民实际使用需求。传统大型公园虽具备生态与休闲功能, 难以满足居民对公园环境的核心诉求。而口袋公园凭借体量小、选址活与功能复合的优势, 把边角废地变成“绿洲”, 有效破解了济宁市绿地短缺的现实困境。基于此, 本文将弹性理念融入济宁市口袋公园设计中, 核心目标在于构建生态宜居、可持续发展的城市绿色空间, 不仅满足了居民对高品质口袋公园的需求, 又能通过空间设计, 促进邻里交往、激活社区内活力, 助力济宁市城市公共空间的建设。

2 研究背景

2.1 居民对生态城市建设的需求更为迫切

当前我国经济快速发展, 城市化进程不断推进, 城市人口规模扩大, 城市发展波澜壮阔, 对于城市环境污染与生态破坏等一系列的问题增多, 同时, 人们对追求高质量生态环境的愿景不断提高, 对优美的人文环境期待更加迫切。推进美丽城市的建设, 需要建设绿色生态开放空间, 本质上是实现人与自然共生, 不仅能提高人们的幸福感与获得感, 而且可以促进城市可持续发展, 提升城市宜居等方面发挥重要的作用。

2.2 弹性理念有效应对城市面临多重挑战

当前, 社会经济发展迅速, 带来一系列非常棘手的问题, 如极端气候变化加剧、污染泄漏、暴雨内涝与公共卫生事件等突发灾害对城市韧性提出更高要求, 同时, 热岛效应、电磁辐射污染与光污染等大城市病问题频发, 如何抵御这些突发灾害与社会问题引起当前人们新的思考。为了有效应对城市面临的自然、经济与社会等多重挑战, 以城市居民的需求为出发点, 探究城市口袋公园弹性景观设计新的策略, 构建

【作者简介】郝美澳(1999-), 男, 中国山东济宁人, 硕士, 从事环境艺术设计研究。

宜业、宜居、宜乐、宜游的高品质城市环境。

3 口袋公园与弹性理念概念

3.1 口袋公园概念

口袋公园,又称袖珍公园,作为城市开放空间,特点是规模非常小,多以斑块状形态散落或隐藏在城市环境中,可以更好的服务周边居民,兼具环境美化、公共交往、休闲游憩与文化展示等多元功能。

在1967年5月23日纽约公园协会组织的展览会上,美国风景园林师罗伯特泽恩提出了“为纽约服务的新公园”概念,即后来的“口袋公园”,罗伯特泽恩设计的纽约佩雷公园,被视为典范,佩雷公园占地大概有三百多平方米,公园内设计了绿植、瀑布与座椅等景观及设施,受到居民特别高的欢迎,对于佩雷公园的建成,掩盖了城市的喧嚣,不仅满足了人们的休憩场所,而且促进了当地居民的交流与互动,为口袋公园的发展提供了设计典范,此后美国费城推进“邻里共有”计划、英国提出“乡村在门外”、日本建设袖珍公园,理念逐渐影响了全世界。

3.2 弹性理念概念

“弹性理念”是一个源自物理学的概念,原指材料在承受外力变形后,能够恢复其原始形状和尺寸的能力。“弹性设计”是一种应对灾害发生的设计,当灾害发生并对区域造成不同程度的损毁,通过针对性设计,对损毁区域恢复原有的核心功能与基础结构等。

弹性设计理念是一种适应性强、灵活性高的设计方法,以应对事物的不同变化与不确定性,特点具有可持续性,同时,注重用户需求与用户体验,通过用户所带来的反馈,进行不断调整、不断迭代与不断优化等。

20世纪70年代的生态学研究, L.H. Gunderson 与 C.S. Holling 对此做了系统探讨,在1973年, C.S. Holling 提出了“弹性理念”,2003年, Godschalk 将这一概念引入城市规划,为弹性理念融入到景观设计等领域奠定了理论根基。在2010年, 尼尔·G. 科克伍德在《弹性景观—未来风景园林实践的走向》这本书中,探讨了“弹性景观”的理念,引发人们对环境挑战与气候变化新的思考,并对生态修复技术有深入研究,提出了相关研究成果和主要方法,对我国口袋公园的生态景观的修复设计具有较强的启发意义。

4 弹性理念下济宁市口袋公园设计的原则与意义

4.1 基本原则

4.1.1 遵循自然之道,促进生态共生

生态优先是口袋公园建设的核心理念,可持续发展是弹性景观设计的核心特征之一。

将弹性景观理念融入到济宁市口袋公园建设中,应秉持对环境“最小干预”理念,尊重口袋公园现有的场地环境,

避免对生态系统的过度破坏等,保护口袋公园原有植被与水文条件,尤其要重点保护承载历史记忆的古树名木等,实现人与自然的和谐共生。

4.1.2 因地制宜,彰显文化底蕴

济宁市人文脉络承载历史故事,以弹性景观设计理念为支撑,在口袋公园的设计中,需要挖掘地域文化内涵,结合特色民俗风情文化,通过植入特色文化小品、雕塑、景墙与铺装纹样等载体,使其转化为兼具实用功能与文化价值的特色景观节点,唤起居民街区历史文化记忆等,赋予口袋公园独特精神内核,塑造具有辨识度的“文化微空间”,展现济宁市口袋公园独特的历史文化,塑造居民对济宁市口袋公园的文化认同,有效提升济宁市口袋公园的整体形象与品质。

4.1.3 便民亲民为导向,安全舒适为基本

秉持“300米见绿,500米见园”布局理念,保障居民短距离享有绿色休闲空间。安全舒适是口袋公园的基础保障,还需要兼顾硬件设施与环境营造,在硬件设施上,需要符合国家安全标准,在环境营造上,规避带刺有毒植物减少隐患,同时,满足对不同年龄群体的需求,面向老年群体,重点保障口袋公园的通行安全与器械的使用安全等,设置完整的无障碍标识系统,面向儿童群体,打造安全的游乐空间,并配套亲子互动场景,最后,需要建立居民反馈机制,切实考虑到不同年龄群体对口袋公园的使用建议等,实现口袋公园实用性与人文关怀的统一。

4.1.4 秉持节俭务实,践行绿色低碳发展方式

对于济宁市口袋公园设计,科学合理的进行设计,对于口袋公园建设的材料选择上,尽量选用经济实用的本地或可再生材料,避免资源浪费,摒弃高价难以维护的大型设施,以简约的设计满足口袋公园基础功能等。对于绿植的选择上,优先选用耐旱、耐贫瘠的乡土植物,降低养护投入,同时,简化一些设施的配置,最大化的减少后期维修成本。

4.2 弹性理念下济宁市口袋公园设计的意义

4.2.1 有助于激发城市经济发展活力

济宁承载着厚重的历史底蕴,拥有丰富的运河文化、儒家文化与水浒文化等地域文脉资源,通过弹性理念融入口袋公园的规划设计,营造高品质的景观空间,发展文旅融合新业态,推动周边商业街区的消费升级,将生态可持续优势转化为经济发展动能,有效激活城市“末梢神经”,同时,也是吸引并留住高素质人才与创新企业的关键因素,进一步推动城市经济的繁荣和进步。

4.2.2 有助于建设生态宜居城市

当前,对济宁市口袋公园进行弹性设计,可以修复口袋公园的生态系统,维护生物多样性,改善了口袋公园的环境质量,让居民“推窗见绿、出门进园”的美好愿望变为现实,同时,满足了居民的休憩与交流的需求,提升了居民的幸福感知,为更多的居民提供可宜居的生活环境。

5 弹性理念下济宁市口袋公园设计存在的问题

5.1 绿化设计缺陷与后期维护管理不足

济宁市部分口袋公园设施缺乏定期养护,如口袋公园内金属设施表面生锈掉漆,木栈道漆面部分脱落,植被养护管理出现严重的问题,同时,景观植物枯死,存在杂草丛生等现象,环境脏乱差,没人打扫和维护,垃圾满地,不仅影响市容,还存在一定的安全隐患等,并不能为居民建设高质量的城市口袋公园。

5.2 设计理念与使用体验脱节

部分口袋公园的设计忽视了居民实际功能使用需求,如缺少足够的遮荫树木、休憩设施,部分步道材质选择不佳,雨天易滑,缺少无障碍的标识系统,非常影响居民的舒适与安全,也未能根据周边居民特点进行针对性的设计,空间利用率低。此外,公共空间缺少清晰的边界规划设计,最终使口袋公园最初的设计理念与居民的使用体验脱节。

5.3 文化特色缺失与设计同质化严重

部分口袋公园存在设计单调问题,仅满足基础绿化和简单休闲功能,缺乏对济宁运河文化、儒家文化与水浒文化等历史元素的融入,既没有对文化小品、雕塑、景墙与铺装纹样等载体呈现独特的地域特色,也未结合老济宁记忆与民俗故事,缺失本土文化符号,难以让居民感受到城市文化底蕴,同时,在口袋公园景观设计上,存在绿植配置单一,缺乏层次感与色彩搭配,缺乏特色的植物组团与特色花镜等,最终陷入“千园一面”的困境,削弱了口袋公园的吸引力。

6 弹性理念下济宁市口袋公园设计的策略

6.1 秉持弹性理念,重塑多元空间布局

对于济宁市口袋公园的空间布局重构,核心在于通过灵活多变的设计策略,结合简洁化设计,简洁并非简单化,而是在有限尺度实现公共空间的高效利用。基于济宁不同口袋公园区域的场地规模、区位条件及周边环境特征,以居民使用需求为前提,科学合理划分功能分区与动静空间,以清晰的交通流线串联各功能模块,保障居民使用的便捷性,提升空间可达性。

6.2 秉持弹性景观理念,保护与传承历史文脉

济宁是中华优秀传统文化发祥地和儒家文化发源地,有深厚的儒家文化、运河文化、水浒文化与古城记忆等,在口袋公园建设中,需要注重文化植入,唤醒城市记忆,打造传统文化主题的口袋公园。对于口袋公园景观设计中,设计独特文化元素的景观小品、廊架、休憩座椅、雕塑、景墙与铺装纹样等,在历史文化街区与历史地段范围内建设口袋公园,需要保护当地的古树名木、古桥古井与古建筑等,保护

好历史风貌环境,将文化遗产与实用功能相融合,既保护地域文化基因,又通过设计语言增强与使用者的情感共鸣,避免文化表达的生硬堆砌,为当地居民提供了丰富多彩的游园和文化体验,不仅激起口袋公园的活力,而且唤醒了人们对传统文化的归属感与自信感

6.3 秉持弹性景观理念,构建绿色空间基础设施

首先,需要注重济宁市口袋公园的生态功能设计,以生态修复为基础,通过巧妙置入雨水花园、生态花园、透水铺装与下沉式绿地等设施,增强公园应对暴雨等极端天气的能力,增强雨水的积存与渗透能力,缓解排水压力,并净化雨水污染,实现区域水资源的循环与利用,为鸟类和昆虫提供了栖息地与生物廊道,提升了城市的生物多样性;其次,济宁作为运河之都,利用“古大运河文化”作为口袋公园设计的衍生,引入象征孔孟文化、古运河文化与水浒文化意义的植物,优先选用济宁当地的乡土树种,以科学合理的植物搭配原则,选用具有特色的乔灌木进行组合,营造出色彩丰富、季相分明且富有生命力的景观廊道,助力海绵城市的建设,让居民感受千年运河的独特韵味。

7 结语

本文将弹性理念的具体设计方法与济宁市口袋公园设计相结合,坚持生态可持续发展为导向,塑造具有独特文化底蕴的城市公共空间,实现人与自然和谐共生,不仅提升了居民的幸福感和安全感,而且还提升了济宁市的宜居水平。本文探讨弹性理念对济宁市口袋公园设计的经济与社会意义,为济宁市口袋公园的弹性设计提供新的思考。

未来,通过对口袋公园的弹性设计,可以为济宁市织就一副生态之美、生活之美与人文之美的城市画卷。

参考文献

- [1] 沈乐娜.基于弹性设计理念的公共空间景观设计策略探讨[J].南方农业,2020,14(23):35-36.
- [2] 许璐.基于弹性设计理念的城市滨水公园设计思路探讨[J].安徽建筑,2023,30(04):15-16.
- [3] 曹鹏,杨民安,王建华.弹性城市理念下的景观设计研究[J].建筑设计管理,2018,35(10):64-67.
- [4] 张冉.济宁口袋公园建设中的文化与生态优化策略[J].现代园艺,2025,48(06):144-146.
- [5] 陈伟煊.可持续发展理念下城市园林景观设计探讨[J].工程与建设,2025,39(02):314-315+377.
- [6] 丁岚.可持续发展理念在园林景观设计中应用分析[J].鞋类工艺与设计,2024,4(13):112-114.

The Practice of Green Space Landscape Design for Linyi University Campus Based on Sponge City Construction

Tianli Yang

Linyi University, Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract

Under the guidance of the concepts of ecological civilization construction and sustainable development, the theory of sponge cities is becoming an important direction for the construction of urban ecological infrastructure. As an important unit of the urban ecosystem, the green space landscape design of university campuses has the functions of ecological regulation, cultural dissemination and education. Taking Linyi University as an example, in combination with the characteristics of terrain, water system and vegetation, based on the principles of rainwater infiltration, purification and recycling, a "infiltration - retention - storage - purification - utilization - drainage" system is constructed to achieve the integration of landscape and ecology. Research shows that this model can effectively alleviate water accumulation on campus, enhance ecological benefits and landscape quality, promote the formation of ecological awareness among teachers and students, and provide important theoretical support and practical reference for the construction of green campuses in colleges and universities and the development of regional sponge cities.

Keywords

Sponge City; Campus green space; Landscape design; Ecological restoration; Linyi University

基于海绵城市建设的临沂大学校园绿地景观设计实践

杨田利

临沂大学, 中国·山东 临沂 276000

摘要

在生态文明建设与可持续发展理念的引领下, 海绵城市理论正成为城市生态基础设施建设的重要方向。高校校园作为城市生态系统的重要单元, 其绿地景观设计兼具生态调节、文化传播与教育功能。以临沂大学为例, 结合地形、水系与植被特征, 基于雨水渗透、净化与循环利用原则, 构建“渗—滞—蓄—净—用—排”系统, 实现景观与生态共融。研究显示, 该模式可有效缓解校园积水、提升生态效益与景观品质, 促进师生生态意识形成, 为高校绿色校园建设与区域海绵城市发展提供重要的理论支撑与实践参考。

关键词

海绵城市; 校园绿地; 景观设计; 生态修复; 临沂大学

1 引言

近年来, 随着“海绵城市”理念在全国范围的推广, 城市排水系统与生态基础设施建设理念发生深刻变革。传统的“快速排水型”城市设计模式已难以应对极端降雨、地表径流污染与生态失衡等问题。高校校园作为城市微型生态系统的典型代表, 其景观绿地不仅承载生态调节功能, 也体现生态教育、审美体验与文化认同的多元价值。临沂大学地处鲁南地区, 地形起伏、雨水丰富, 是实施海绵城市建设理念的典型场景。通过在校园绿地景观中引入“渗、滞、蓄、净、用、排”系统, 能够有效调节雨洪、改善水环境、提升绿地生态功能, 形成可持续发展的校园生态格局。本文结合临沂

大学校园绿地设计实践, 从理论基础、设计原则、技术策略与应用效果四个方面展开探讨, 旨在探索高校海绵型景观设计的系统方法与创新路径, 为高校绿色校园建设提供可借鉴的经验。

2 海绵城市理念在校园景观中的理论基础

2.1 海绵城市理念的生态内涵

海绵城市理念源于生态基础设施建设理论, 强调以自然系统为主体的雨洪调控与生态修复模式。其核心是通过“渗、滞、蓄、净、用、排”的全过程管理, 实现雨水从径流控制到循环利用的生态化转变。不同于传统以“排”为主的管网式排水体系, 海绵城市注重源头削减与过程调节, 倡导以自然生态系统的自我修复机制恢复城市水循环平衡。在校园建设中, 海绵理念不仅服务于防洪与节水, 更通过生态景观设计、雨水花园及透水铺装的应用, 构建人与自然和

【作者简介】杨田利(1976-), 男, 中国山东临沂人, 本科, 工程师, 从事绿化设计研究。

谐共生的空间结构。校园环境中的海绵系统具备环境教育功能，能够在景观体验与教学互动中引导师生形成生态意识与可持续发展的价值观，促进校园空间的生态性、功能性与文化性融合。^[1]

2.2 高校校园生态系统的特殊性

高校校园生态系统兼具生态性、教育性与社会服务性，是展示可持续理念的重要载体。与城市功能区相比，校园地貌类型多样，拥有道路、绿地、水体及建筑群等多层空间结构，具备建设多样化海绵设施的先天条件。教学区、宿舍区及运动区之间的绿化空间可通过雨水花园、生态沟渠和透水铺装等设施形成雨水调蓄网络，实现雨洪的自然渗透与生态净化。高校校园具有独特的教学科研功能，海绵景观既可承担生态调节与防洪作用，又能作为环境教育的实践平台，促进学生参与科学观测与实验研究。此外，校园人口密集、用地稳定，为系统性实施海绵城市理念提供了良好的管理基础与社会影响力。

2.3 海绵理念引入高校景观的价值意义

在高校景观建设中引入海绵城市理念，具有生态、教育与文化三重价值。其一，生态价值体现在节水、控洪与改善微气候，通过雨水花园、人工湿地与透水材料构建循环利用系统，显著提升绿地的生态服务功能；其二，教育价值体现为“可学习的景观”，学生可在日常生活中观察雨水流动、植物净化与微生态变化，从而深化生态认知；其三，文化价值在于将绿色理念融入校园精神，通过生态空间营造展示学校的环保态度与社会责任。海绵校园不只是绿色基础设施的建设，更是高校践行生态文明教育的重要途径，为构建节能低碳、环境友好的智慧校园提供可持续发展路径。^[2]

3 临沂大学校园绿地现状与问题分析

3.1 校园地形与排水系统特征

临沂大学校园地势总体呈北稍高南稍低格局，地形起伏不明显，雨水径流主要汇集于东南低洼地带，易形成局部积水。现有排水系统以传统地下管网为主，排水模式以“快排快放”为核心，缺乏雨水调蓄与渗透环节，导致雨洪利用率低。部分区域雨污管线混接，造成雨季溢流与水质污染问题。绿地空间虽分布广泛，但透水地面比例偏低，渗透系数不足，限制了雨水自然下渗与蓄存功能的发挥。同时，道路硬质铺装面积较大，径流系数高，雨季形成大量地表径流，既加重排水压力，又加速污染物入河过程。整体来看，校园排水系统缺乏海绵调控功能与生态弹性，亟需通过系统性改造构建可持续的雨洪管理格局，实现从“排水防涝”向“蓄渗利用”的功能转变。^[3]

3.2 植被与生态系统结构相对较单一

临沂大学现有绿化系统以草坪与乔木、灌木、绿篱为主，植被层次结构相对单一，生态系统功能较弱。由于过度追求视觉美观与简洁布局，乔、灌、草复合结构缺失，生态滞水

与净化功能未能有效发挥。绿化植物多为外来观赏树种，如法桐、雪松等，本地耐湿、耐涝植物配置比例偏低，造成生态系统的稳定性和适应性不足。在雨季条件下，草坪排水性差，根系浅薄，难以形成有效的水土保持层；旱季时草坪养护成本高，水资源消耗过大。此外，部分绿地区域缺乏生态修复措施，土壤板结、微生物单一，生物多样性明显下降。整体而言，校园植被系统未形成生态循环与自我调节机制，亟需通过引入乡土物种、构建复合生态群落、提升绿地生态承载力，推动从“景观绿化”向“生态绿化”的转变。

3.3 景观空间功能分区不合理

临沂大学校园的景观空间规划在功能分区上存在明显不协调。公共绿地、教学区及生活区之间的绿化带缺乏系统衔接，空间过渡突兀，未能形成连续的生态网络。部分景观节点虽然具备视觉美感，但功能单一，仅起装饰作用，缺乏雨水调控、生态修复等综合功能。排水设施与景观设计脱节，雨水径流直接进入市政管网，未经过滞留、过滤与再利用，造成水资源浪费。在教学区与宿舍区之间，缺乏能够承担雨洪缓释与生态休憩双重功能的复合空间。此外，部分硬质铺装区域缺少透水材料应用，降低了地表渗透率。整体而言，校园景观空间布局缺乏系统性与生态逻辑，未形成“生态—功能—审美”相融合的设计体系，制约了校园整体生态效益的提升。未来应通过功能复合化设计与系统性空间整合，重构校园绿地生态功能格局。^[4]

4 海绵城市理念下的校园景观设计策略

4.1 空间结构的系统优化

临沂大学校园绿地的空间布局应以生态水文逻辑为核心，构建分级分区的雨水调蓄与生态修复体系。设计采用“核心集水区—一级调蓄区—生态缓释区”的三级水系网络结构，形成从汇水、储水到排放的连续系统。核心区布设人工湿地与生态湖，通过自然沉降与植物净化作用实现雨水的集中净化与再利用；次级调蓄区以下凹绿地、雨水花园为主，实现雨洪的滞蓄与缓释，减轻极端降雨带来的径流压力；外围缓释区以透水铺装、植被沟与生态隔离带为主，承担雨水的渗透与导流功能。通过“点—线—面”结合的立体空间设计，形成“渗—滞—蓄—净—用—排”全过程生态调控体系。该系统不仅优化了校园水资源循环路径，也增强了绿地生态自修复能力，为校园水文安全和生态平衡提供了系统保障。

4.2 景观节点的功能化设计

在海绵城市理念指导下，校园景观节点设计应实现生态、功能与艺术的融合。教学区入口作为汇水重点区域，可设置具有导水、滞留与净化功能的“雨水花园”，利用自然高差实现雨水下渗与过滤；宿舍区与食堂周边则构建“透水铺装+植被沟”的复合系统，减少硬质地面径流、提升雨水利用率；主干道两侧布设“生态树阵带”，通过林下复合种植实现降温、滞尘与雨水净化功能的叠加。校园水体引

入循环净化装置,结合湿地植物与微生物共生系统,实现水质长期自维持。景观节点的生态设计不仅具备防涝与节水功能,还兼具视觉审美与环境教育意义,使学生在日常活动中感知生态文明的价值。

4.3 植被配置的生态优化

植物体系是校园海绵景观的生物核心,其配置应遵循“乡土化、分层次、复合性”的生态设计原则。乔木层选用白蜡、银杏、国槐等耐湿耐污染树种,构建遮荫降温与涵养水分的上层生态屏障;灌木层以金银木、连翘、紫穗槐等为主,具备耐旱耐涝特性,可有效稳定坡面与调节微气候;地被层采用狗牙根、早熟禾等深根系草本植物,增强土壤渗透力与侵蚀防护效果。各植物层通过“乔—灌—草”立体组合,形成稳定的生态群落结构,实现季相变化、色彩层次与生态功能的统一。此类生态型植被系统不仅提升了景观观赏性与生物多样性,还强化了校园绿地的生态涵养与雨水管理能力,为构建绿色、低碳、韧性的生态校园提供重要支撑。^[5]

5 设计实践与建设成效

5.1 海绵设施的系统布设与集成

临沂大学在校园绿地改造过程中,将海绵城市理念与校园功能需求深度融合,构建了“点—线—面结合、分区分级调控”的立体化雨水管理系统。点状设施包括分布在教学楼与宿舍周边的雨水花园、下凹绿地与植被沟,用于雨水的就地渗透与滞留;线状系统以校园主干道路、绿化带及排水沟为载体,承担雨水输导与净化功能;面状系统则以中央湿地与景观湖为核心,形成自然汇水与生态蓄滞区,实现“源头控制—过程调节—末端利用”的完整水循环。系统通过雨水调蓄池、过滤沟与生态湿地的协同作用,实现径流污染削减与水资源再利用,年均雨水利用率提高约35%,局部积水现象得到有效缓解。该综合体系既满足景观功能,又具备生态调节与防洪安全作用,为高校校园绿地海绵化改造提供了可复制的实践样本。

5.2 景观生态效益的综合提升

海绵设施的集成应用显著改善了校园生态系统的整体功能。改造后的绿地形成了具有渗透、滞蓄、净化与涵养等多重生态效益的复合系统。监测数据显示,雨季峰值径流削减超过40%,地表径流污染物(COD、SS)平均降低30%,有效提升了校园水环境质量。湿地植被群落的引入改善了空气微循环与地表能量平衡,使校园平均气温下降1.5℃,空气湿度提升约5%,局部热岛效应得到缓解。生态

群落的重构增强了生物多样性,吸引多种鸟类与昆虫栖息,形成稳定的生态景观网络。景观层面上,水体、植物与建筑形成自然融合的视觉秩序,既实现了空间的层次感,又强化了校园的生态美学特征,使绿色生态成为临沂大学校园形象的重要标识。

5.3 教育与文化功能的拓展

临沂大学的海绵景观建设不仅注重生态效益,更强调教育功能与文化价值的结合。校园绿地被规划为“生态学习园区”,配备生态解说标识、雨水循环展示系统与智能监测终端,向学生直观展示海绵设施的工作原理及环境效益,成为生态文明教育的重要场所。学校组织学生开展雨水采样分析、植物群落监测与生态设计竞赛等活动,使理论学习与实践探索相结合,强化学生的生态意识与创新能力。在文化层面,海绵景观的艺术化表达将“节水、环保、共生”的生态理念融入校园精神,形成独特的绿色文化景观。雨水花园、生态廊桥与观景湿地等空间节点已成为校园文化活动的重要场域,推动环境美育与文化认同的双向提升,实现了生态教育、文化传播与校园景观的融合发展。

6 结语

基于海绵城市理念的校园绿地景观设计,是高校实现生态文明教育与可持续发展的有效途径。临沂大学的实践表明,通过科学的空间规划、生态技术应用与文化融合创新,校园绿地不仅实现了雨洪调蓄与环境美化的双重目标,也构建了兼具生态、教育与文化功能的绿色生态系统。未来,高校应进一步探索数字化管理与生态监测体系建设,推动“智慧海绵校园”的形成,实现校园生态系统的动态维护与优化升级。在“双碳”目标与绿色教育背景下,海绵城市理念将持续引领高校景观设计向生态化、智能化、人文化方向发展,为绿色校园建设提供持续动力与系统支撑。

参考文献

- [1] 侯鹏,董彬,周宇洋,等.智慧海绵校园建设探讨——以临沂大学为例[J].安徽农学通报,2018,24(24):127-128+138.
- [2] 褚雪,侯鹏,尉海东,等.“海绵校园”建设研究——以临沂大学为例[J].绿色科技,2018,(08):156-158.
- [3] 陈雅玲.海绵城市理念下的校园雨水花园设计研究[D].南京师范大学,2019.
- [4] 陈功.海绵城市理论及其在校园景观规划设计中的应用分析[J].人居,2019,(10):131.
- [5] 井妍.海绵城市理念在高校校园景观规划设计中的应用[J].砖瓦,2022,(01):66-67.

Research on the Construction of Technical System for Diagnosis and Reinforcement of Structural Diseases of Highway

Yunhu Wu

Kunming Huangma Expressway Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

The diagnosis and reinforcement of highway structural diseases are crucial for ensuring the safe operation of highways. With the increase in traffic volume and the impact of natural environments, the incidence of highway structural diseases continues to rise, presenting a severe challenge to traffic safety. This paper analyzes the classification, diagnostic methods, and reinforcement technologies of highway diseases, exploring diagnostic technologies and reinforcement measures for common diseases. It focuses on the traditional disease diagnosis methods and emerging non-destructive testing technologies, detailing the characteristics and application conditions of various reinforcement technologies. The study provides scientific evidence for the early diagnosis and reinforcement of highway diseases, with significant theoretical and practical implications.

Keywords

Highway diseases; Structural diagnosis; Non-destructive testing; Reinforcement technologies; Technical system

公路结构性病害诊断与加固技术体系构建研究

武云虎

昆明黄马高速公路有限公司, 中国·云南 昆明 650000

摘要

公路结构性病害的诊断与加固是保证公路安全运行的重要环节。随着交通流量的增加与自然环境的影响,公路结构性病害的发生率不断上升,给交通安全带来了严峻挑战。本文通过对公路病害的分类、诊断方法及加固技术进行分析,探讨了常见病害的诊断技术与加固措施。重点分析了传统的病害诊断方法与新兴的无损检测技术,阐述了不同加固技术的特点与应用条件。本文的研究为公路病害的早期诊断与加固提供了科学依据,具有重要的理论与实践意义。

关键词

公路病害; 结构性诊断; 无损检测; 加固技术; 技术体系

1 引言

随着中国交通网络的不断发展,公路成为现代社会交通的重要组成部分。然而,由于环境因素、交通负荷以及工程老化等多重因素的影响,公路结构性病害问题日益突出,严重影响了公路的安全性与使用寿命。病害的发生不仅增加了维护成本,还可能对交通安全造成直接威胁。为此,准确及时地诊断病害并采取有效的加固措施,成为确保公路设施长期稳定运行的关键。现有的病害诊断技术不断迭代更新,传统方法与现代无损检测技术相结合,为公路病害诊断提供了更精确的手段。同时,加固技术的选择与实施也面临着诸多挑战,需要根据不同病害类型与病害程度进行个性化设计。

2 公路结构性病害的分类与诊断方法

2.1 公路结构性病害的定义与分类

公路结构性病害是指影响公路路基与路面结构性能、耐久性和服务功能的各类损伤与缺陷。根据受损部位和病害特征,可分为路基沉陷、边坡塌方、路面裂缝、车辙、坑槽、拱胀、翻浆、剥落等类型。路基沉陷与变形多由地基承载力不足、地下水变化或交通荷载增大引起;路面裂缝常源于温度收缩、基层疲劳及材料老化;车辙与坑槽则与长期重载碾压及沥青老化有关。此类病害主要分布于行车荷载集中路段、填挖交界处和排水不畅区域,若不及时处理,将导致结构层应力扩散异常、路面破坏加剧,进而影响行车安全与使用寿命。

2.2 常见公路结构性病害的诊断标准与方法

公路结构性病害的诊断标准依据具体病害类型和影响程度而定。常见的病害如裂缝、沉降、变形等通常通过视觉检测、传统测量法、结构强度测试以及地质勘察等手段进行

【作者简介】武云虎(1980-),男,中国云南昆明人,本科,高级工程师,从事道路运营养护相关研究。

诊断。裂缝的宽度、深度及其扩展情况通常采用裂缝宽度计、超声波测量等方式评估；沉降和变形则通过水准仪、激光测量、全站仪等设备进行精确监测。对于更为复杂的病害，需结合综合分析方法，结合监测数据对病害进行分类，并判断其严重性及对结构安全的影响。

2.3 病害诊断技术的应用与发展趋势

随着科技的进步，病害诊断技术也逐步向高精度、高效率的方向发展。传统的病害检测方法虽然能够识别出较为明显的病害问题，但面对复杂的病害情况时，检测精度和效率往往受到限制。近年来，无损检测技术的应用逐渐兴起，成为病害诊断领域的重要发展方向。超声波检测、雷达成像、红外热成像等技术使得诊断可以在不破坏路面和结构的情况下完成，大大提高了诊断的准确性与全面性。同时，随着智能化技术的发展，人工智能与大数据分析逐步引入病害诊断领域，为数据处理和分析提供了更强大的支持，病害的诊断速度和准确性不断提高，预测能力也得到了显著增强^[1]。

3 公路病害诊断的关键技术与仪器设备

3.1 传统诊断方法与新型技术的对比

传统的公路病害诊断方法主要依赖人工检测与简单的仪器设备，这些方法虽然能够发现一些显著的病害，但存在检测精度低、效率差等问题。随着科技的进步，新型检测技术如激光扫描、三维成像、地质雷达等被逐步引入到公路病害诊断中。这些新型技术能够在较短的时间内获取大量数据，并通过精密算法处理，提高了病害识别的准确性与全面性。例如，地质雷达能够准确探测路面下层的结构问题，而三维激光扫描则能够全面评估公路表面的裂缝和变形情况。相比传统方法，新技术具有更高的自动化程度和更强的数据处理能力，能够大幅度提升病害诊断的效率与精度。

3.2 无损检测技术在病害诊断中的应用

无损检测技术近年来在公路病害诊断中得到了广泛应用。其主要特点是通过不破坏或破坏极少的情况下，获取公路结构的状态信息。常见的无损检测方法包括超声波探伤、雷达成像、红外热成像等技术。超声波探伤可以有效检测裂缝的深度和扩展情况，而雷达成像技术则通过反射波探测地下设施的结构缺陷，能够识别出裂缝和沉降等隐蔽性病害。红外热成像能够通过检测温度差异，发现表面裂缝及其对结构的影响。无损检测技术不仅提高了检测效率，还能提前发现潜在的病害问题，避免了传统方法可能错过的隐蔽性病害，成为现代公路病害诊断的重要技术手段。

3.3 高科技仪器设备在公路病害诊断中的作用

随着测量和诊断技术的发展，越来越多的高科技仪器设备被引入公路病害诊断中，极大提升了诊断的精度和效率。例如，利用无人机搭载高分辨率相机进行航拍，结合图像处理技术，能够快速识别和监测大范围内的病害情况。高精度的地质雷达仪器可以穿透路面，准确识别路面以下的病害，如裂缝、空洞及其他隐患。激光扫描仪能够实现公路

表面结构的三维成像，帮助分析裂缝的分布与变化情况。此外，基于人工智能技术的诊断系统能够通过分析大量检测数据，提供病害预测、评估与预警功能，进一步提升诊断的智能化水平。随着这些高科技仪器设备的广泛应用，公路病害诊断的准确性与实时性得到了显著提高。

4 公路病害加固技术的发展与应用

4.1 加固技术的基本原理与分类

公路病害加固技术的核心在于恢复路基与路面结构层的整体承载性能与稳定性。其基本原理是通过提高结构层模量、改善地基承载条件或增强层间结合，达到延长使用寿命的目的。常用加固类型包括路基加固、路面结构层加固与基层补强。路基加固多采用换填、强夯、注浆、固化剂加固等方式；路面结构加固通常采用再生层加铺、冷再生、热再生等技术；基层补强则通过添加无机结合料或高强度材料提高抗剪强度。各类加固方法应依据病害性质、结构层受损深度及交通荷载等级综合选取，确保加固后结构稳定、排水顺畅、使用性能提升。

4.2 常见的公路结构加固技术

针对路面病害常用的加固技术包括水泥注浆加固、冷再生混合料加铺、玻纤网复合加筋、乳化沥青薄层罩面以及水泥稳定碎石补强等。水泥注浆法可提高路基密实度，改善沉陷与翻浆问题；冷再生混合料加铺技术通过回收旧料再生利用，提升基层强度与延性；玻纤网复合加筋能有效分散应力，延缓裂缝扩展；乳化沥青罩面能提高防水与抗滑性能；水泥稳定碎石补强适用于重载路段结构层疲劳衰减问题。这些技术具有工期短、经济性好、耐久性高的特点，已在高速公路与省道养护工程中得到广泛应用，显著改善了道路的结构稳定性与使用性能。不同的加固技术根据具体病害类型和加固效果的要求，可以单独应用或组合使用^[2]。

4.3 加固技术的选择与应用案例分析

公路结构性病害的加固技术选择应根据病害类型、损伤程度、地质条件及交通荷载特征进行综合评估。对于路基沉陷和翻浆问题，通常采用注浆加固、换填夯实或固化剂改良法，以提升地基强度与稳定性；针对路面裂缝与车辙，可采用沥青再生加铺、玻纤网复合加筋或薄层罩面技术，提高结构层的抗拉强度与延性。不同技术的选择应兼顾施工环境、气候条件及交通干扰程度。S33 昆明高海高速养护工程为例，项目采用冷再生基层补强与乳化沥青薄层罩面相结合的方式，在施工周期 45 天内完成路面加固，全线弯沉值由原平均 1.78mm 降低至 1.12mm，承载力提升约 37%，行车舒适度明显改善。该案例表明，针对性技术组合能显著提高公路结构性能与耐久性，同时兼顾经济性与施工便捷性。

5 公路结构性病害加固设计的优化策略

5.1 加固设计的原则与步骤

公路结构性病害加固设计的原则首先是确保结构的安

全性与稳定性, 优先解决影响交通安全和路面使用性能的病害问题。在设计过程中, 应根据病害的类型、位置和程度进行全面评估, 确保加固措施能够满足长期使用需求。加固步骤通常包括病害的诊断与分析、选定加固方法、进行结构评估和计算、设计加固方案, 并进行实施前的可行性验证。每一步都需考虑到现有结构的承载能力和加固材料的性能, 以确保加固后能达到预期效果, 并延长公路的使用寿命。合理的设计方案需要综合考虑施工难度、时间安排和费用预算, 以提高加固工作的经济性和施工效率。

5.2 公路加固设计中的技术难点与解决方案

公路加固设计过程中常见的技术难点包括如何选择合适的加固方法、如何处理复杂地质条件下的结构病害以及如何确保加固材料与现有结构的良好结合。加固方法的选择需要考虑到路面或结构的具体病害类型, 如裂缝、沉降、变形等, 通常需要根据具体的技术要求进行调整。对于特殊地质条件下的病害加固, 常常需要采用较为复杂的技术手段, 如高压注浆技术或深层加固技术。为了确保加固效果, 必须确保新材料与原结构的良好适配, 并合理安排加固施工工艺, 以防加固后的结构出现新的问题。

5.3 加固设计的经济性与可持续性分析

加固设计不仅要保证结构的安全性, 还需要充分考虑经济性与可持续性。在经济性分析方面, 需要对加固方案进行成本评估, 综合考虑施工成本、材料费用、施工时间等因素, 选择性价比最高的方案。在可持续性方面, 加固设计应注重材料的环保性与耐用性, 优选高强度、长寿命且易于维护的加固材料, 减少未来可能的维修费用。此外, 应考虑加固方案的长期影响, 如对周围环境的影响以及对交通流量的影响, 尽可能降低施工对交通运营的干扰^[3]。

6 公路病害诊断与加固技术体系的构建与实施

6.1 公路病害诊断与加固技术体系的构建框架

公路病害诊断与加固技术体系的构建应以病害诊断为前提, 以加固设计为核心, 整合现代技术与传统经验, 形成完整的技术支持体系。该体系应包括病害诊断方法的选择、加固设计技术的更新、材料的选型、施工技术的规范等多个方面, 确保从诊断到加固实施的每一个环节都能够得到科学、合理的指导。技术体系还应具备灵活性, 能够根据不同的公路结构、地质条件和病害类型进行调整, 以达到最佳的

加固效果和最优的成本效益。通过这一技术体系的实施, 可以实现对公路结构病害的早期发现与有效加固, 提高公路的长期安全性与耐久性。

6.2 技术体系在实际工程中的应用案例

技术体系在公路病害诊断与加固中的应用在多个真实工程中取得了显著成效。例如, G85 昆明东绕城高速公路路面提升整治项目中, 利用综合诊断技术体系, 结合地质雷达、激光扫描和超声波检测等手段, 精准定位了路面裂缝、车辙和局部沉降等病害。根据诊断结果, 项目选择了冷再生技术和沥青加铺技术进行路面加固, 并针对路基沉降问题采用了高压注浆加固技术。施工后, 路面弯沉值从原来的 2.5mm 降至 1.0mm, 裂缝修复率达到 85%, 车辙深度减少了 35%。通过这一技术体系的应用, 公路的整体承载力和使用寿命得到了显著提高, 且施工过程中对交通流量的影响被降至最低。该案例不仅验证了技术体系在实际工程中的有效性, 也为类似公路养护工程提供了宝贵的经验, 优化了加固设计, 提高了工程质量与经济效益^[4]。

6.3 技术体系的实施与效果评估

技术体系的实施需要在严格的项目管理下完成, 确保每个环节的标准化与规范化。在实施过程中, 首先进行病害诊断与评估, 然后制定详细的加固方案, 并在施工过程中严格监督。加固后的效果评估应包括结构强度、使用寿命、维护需求等方面的综合分析。通过数据采集与长期监测, 评估加固效果是否达到预期目标, 并进行必要的调整与优化。对于成功的案例, 技术体系的实施不仅提高了公路的使用安全性, 也降低了维护成本, 提升了公路管理的效率。最终, 通过持续监测与效果反馈, 形成了一个完善的技术闭环, 确保了技术体系的长效实施和不断优化。

参考文献

- [1] 鲍曦露, 刘涛. 高速公路路面常见病害成因与养护措施研究[J]. 汽车周刊, 2025, (12): 36-38.
- [2] 劳艺. 旧公路桥梁结构病害识别与修复策略研究[J]. 汽车周刊, 2025, (12): 226-228.
- [3] 曹小波, 王畅, 赵忻, 袁超, 王茂琿. 高等级公路路面常见病害及养护措施研究[J]. 科技与创新, 2023, (07): 124-126.
- [4] 饶法强, 高亮, 黄文元, 张宏超. 基于病害发展阶段分类的公路路面检测方法发展综述[J]. 上海公路, 2022, (01): 31-35+142.

Exploration of Urban Flood Control Model Based on Ecological Drainage System — Taking Longyan City as an Example

Xiaofeng Jie¹ Wenlian Liu² Qihui Zhang¹ Changgui Lan¹ Tingyu Cui¹

1. China Municipal Engineering Northeast Design and Research General Institute Co., Ltd., Beijing Branch, Beijing, 100043, China

2. Longyan Municipal Project Construction Center, Longyan, Fujian, 361000, China

Abstract

Due to characteristics such as large topographic elevation differences and rapid runoff convergence, urban flooding control in mountainous cities is significantly more difficult than in plain cities. Taking Longyan City in Fujian Province, a typical mountainous valley city, as the research object, this study combines its national Sponge City construction demonstration practice to systematically analyze the formation mechanism of urban flooding in mountainous cities and construct a three-level ecological drainage governance system of ‘source reduction, process regulation, and end disposal’. By analyzing the differentiated governance plans of typical areas such as Zijin Mountain and Dongcheng, a characteristic model of ‘mountain sponge conservation, valley wetland regulation, and old urban area systematic transformation’ is summarized. Practice has shown that this model has raised the flood control standard of Longyan’s old urban area to once-in-ten-years and new urban area to once-in-thirty-years, providing replicable experience for urban flooding control in similar cities.

Keywords

ecological drainage system; mountain city; flood control

基于生态排水系统的山地城市内涝治理模式探索—以龙岩市为例

揭小锋¹ 刘文廉² 张其慧¹ 蓝昌桂¹ 崔婷钰¹

1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司北京分公司, 中国·北京 100043

2. 龙岩市市政项目建设中心, 中国·福建 龙岩 361000

摘要

山地城市因地形高差大、径流汇集快等特征, 内涝治理难度显著高于平原城市。以福建省龙岩市这一典型山地河谷城市为研究对象, 结合其国家海绵城市建设示范实践, 系统分析山地城市内涝的成因机理, 构建“源头减排-过程调控-末端消纳”三级生态排水治理体系。通过解析紫金山、东城等典型片区的差异化治理方案, 总结出“山体海绵保育+河谷湿地调蓄+老城区系统改造”的特色模式。实践表明, 该模式使龙岩市旧城区内涝防治标准提升至十年一遇, 新城区达三十年一遇, 为同类城市内涝治理提供可复制的经验。

关键词

生态排水系统; 山地城市; 内涝治理

1 引言

随着城镇化进程加速与极端降雨事件频发, 山地城市内涝问题日益凸显, 其独特的“山环水绕”地形既造就了丰富的山水资源, 又因地表坡度大、汇流时间中”的特征。龙岩市作为闽西核心城市, 山地丘陵占比达 94.95%, 龙津河及其支流贯穿城区, 2021 年入围首批国家海绵城市建设示范城市后, 依托“渗、滞、蓄、净、用、排”理念开展系统

性治理。本文以龙岩市为案例, 探索生态排水系统在山地城市内涝治理中的应用路径, 剖析其基于地形差异化的治理策略, 为解决山地城市水安全困境提供理论与实践支撑^[1]。

2 山地城市内涝特征及生态排水系统的适配性

2.1 山地城市内涝的典型特征

山地城市地形地貌决定其内涝灾害特殊性, 与平原城市差异显著。以龙岩市为例, 一是径流汇集快且峰值高, 市域地势东北向西南倾斜, 平均海拔 460m, 城区周边山体坡度多在 15%—30%, 雨水坡面汇集快, 短时间形成集中径流, 暴雨时单位面积径流量达平原城区 2.3 倍。二是内涝空

【作者简介】揭小锋(1984), 男, 中国福建连城人, 本科, 高级工程师, 从事市政给排水设计研究。

间分布不均,灾害集中于“山脚-河谷”过渡带,如东城片区因处山体下坡与龙津河交汇区,多次因山洪与城市雨水叠加致内涝,山顶建城区地势高、排水畅,内涝风险低。三是内涝与水土流失、水质污染协同,龙岩年降水量1365至1725mm,集中于梅雨与台风季,强降雨引发内涝,冲刷土壤致径流含沙量升高,2021年治理前龙津河部分河段雨后悬浮物浓度达80mg/L,堵塞管网且污染水体。

2.2 生态排水系统的核心优势及适配价值

生态排水系统以生态工程学为基础,融合多学科原理,模拟自然水文过程管控雨水,核心优势是“弹性适应”与“多功能协同”,契合山地城市内涝治理需求。与传统硬化排水系统相比,它更适应山地地形高差变化,如生态沟渠可使地表径流峰值降低30%-45%,在龙岩东肖溪片区缓解了山谷汇水压力。其适配价值体现在两方面,一是精准调控山水文过程,通过“三生空间”配置构建复合系统,实现排水防涝、解决水土流失问题,如龙岩奇迈山项目降低山体径流含沙量62%,提升雨水下渗能力;二是有多功能协同效应,排涝同时兼具水质净化、维护生物多样性等功能,如龙岩园田塘湿地削减径流中总氮、总磷,为多种水生生物提供栖息地。经济成本上,生态排水系统建设成本比传统沟渠高20%-30%,但通过降低维护费用、提升生态价值,投资回收期4-6年。龙岩龙地·东尚湾小区实践表明,海绵型改造虽增加初期投入,但每年节省绿化灌溉用水成本35%,提升小区宜居性与房产价值,综合效益显著。

3 龙岩市基于生态排水的内涝治理体系构建

3.1 顶层设计:基于地形分型的系统化规划

龙岩市打破“一刀切”的治理思路,结合市域“山顶-山脚-河谷”的地形梯度特征,构建“分区施策-系统联动”的顶层设计体系,为生态排水系统建设提供方向指引。首先建立地形-水文数据库,通过无人机测绘与水文模拟技术,精准识别不同区域的内涝风险等级、汇水面积及径流路径,将城区划分为山顶建城区、山脚建设区、河谷老城区、河谷新城区4种类型,明确各区域的治理重点与技术路径。

在规划机制上,成立由市委书记、市长担任双组长的海绵城市建设工作领导小组,统筹住建、水利、生态环境等多部门职责,出台《龙岩市海绵城市条例》《海绵城市建设技术标准》等系列文件,形成“法规保障-技术规范-管理细则”的完整体系。其中,《龙岩市住房和城乡建设局等六部门关于加强海绵城市建设项目全流程管控的通知》作为管理细则的重要组成部分,为“源头减排-过程调控-末端消纳”三级体系的落地实施提供全流程管理依据,确保各环节建设符合规划要求。

针对山地城市特点,修编的技术标准特别明确了生态设施的坡度适配要求,如生态沟渠边坡坡度不超过1:3,雨水花园下沉深度根据地形坡度调整在15-30cm之间,确

保设施在发挥功能的同时保障结构安全。

规划核心在于构建“山水林田湖草”一体化的生态排水网络,以龙津河为主脉,串联各支流生态廊道、山体缓冲带、城市湿地公园及社区海绵设施,形成“源头减排-过程调控-末端消纳”的三级体系。通过SWMM模型模拟优化,确定各区域年径流总量控制率目标,山顶片区不低于76%,河谷新城区不低于71%,河谷老城区因条件限制不低于65%,确保系统治理成效。

3.2 分区实践:四类区域的差异化治理路径

山顶建城区以紫金山片区为典型,打造“山体海绵保育+湖体调蓄”模式。依托高森林覆盖率封山育林,山脚设生态缓冲带;城区严控硬化面积,道路用透水沥青,居住区建雨水花园与下沉式绿地。改造紫金山湖生态岸线扩大容量,与周边沟渠联动,暴雨时削减山体汇流峰值42%,实现“小雨不积水、大雨不内涝”。山脚建设区以东肖溪片区为代表,采用“山谷滞蓄+雨水回用”策略。沿山谷建阶梯式生态沟渠与小型蓄水池,配置填料、种植水生植物。片区开发融入“海绵+”理念,如龙岩大道二期项目引导雨水流入生态设施,年径流总量控制率达71%。收集的雨水处理后用于清扫与灌溉,夏季高峰期可替代40%市政供水。河谷老城区以东城片区为重点,实施“高水高排+系统改造”工程。因管网老化、地势低洼内涝突出,先建生态截洪沟“高水高排”,截洪沟对泥沙拦截效率达75%,同时重构地表排水系统,剥离合流制管渠中雨水和清水,串联绿色调蓄空间,老旧小区改造后年径流总量控制率提升,解决积水问题。河谷新城区以东山及园田塘片区为示范,构建“大海绵体+精细管控”体系。保护与修复自然湿地,园田塘蓄洪湿地项目排蓄结合。新建项目落实海绵指标,如龙地·东尚湾小区等实现较高年径流总量控制率。设计操场等打造教育类海绵示范工程,形成“实用、优美”的校园水环境^[2]。

表1 龙岩市不同区域生态排水系统核心指标

区域类型	年径流总量控制率(%)	径流峰值削减率(%)
山顶建城区	76	42
山脚建设区	71	38
河谷老城区	65	32
河谷新城区	71	31

3.3 技术支撑:智慧化与生态化的融合应用

龙岩市将智慧化技术融入生态排水系统,提升治理精准性与效率。在关键排水节点与调蓄单元部署传感装置,实时监测降雨强度、水位变化、水质指标等参数,数据经物联网传至海绵城市管控平台。在生态技术应用上,坚持“因地制宜、乡土优先”原则,构建地域适应性生态设施体系。植被以龙岩本地物种为主,固土选狗牙根、水杉,水质净化选芦苇、香蒲,降低养护成本并提升生态稳定性。材料应用推广绿色低碳技术,用再生骨料替代天然石材建沟渠,降低建材碳排放37%;生态沟渠与湿地建设采用预制拼装工艺,

减少施工能耗 29%。同时引入低碳理念,通过植物固碳与土壤碳固定,园田塘湿地年固碳量达 1.8kg/m²,实现生态与碳汇效益协同。

4 龙岩市内涝治理成效及模式启示

4.1 治理成效的多维度体现

经过两年多系统治理,龙岩市内涝治理成效显著,水安全保障能力大幅提升。内涝防治标准全面提高,旧城区从三年一遇提至十年一遇,新城区达三十年一遇。2023年台风“杜苏芮”期间,龙岩遇百年一遇短时强降雨,主城区核心区域未大面积内涝,园田塘蓄洪湿地拦蓄超标径流 12 万 m³ 保护下游。内涝点消除成效好,全市治理 15 处历史内涝点,解决重点内涝积水问题,改善市民出行环境。同时,水环境质量提升,通过生态排水系统净化,消除 11 条黑臭水体且未返黑返臭,龙津河主要监测断面水质达标,雨后水体悬浮物浓度降 62%,水生生物多样性增加,底栖动物种类增 3.1 倍。水资源利用效率提高,全市通过生态排水系统年收集雨水约 500 万 m³,替代 8% 市政绿化与景观用水,缓解干旱季水资源供需矛盾。此外,社会与生态效益凸显,海绵城市建设改善人居环境,龙津湖公园、园田塘湿地成市民休闲地,龙津湖公园年接待超 100 万人次带动周边活力,还发挥生态教育功能,通过设置科普标识、开展活动提升公众水生态保护意识,形成全民参与氛围。

4.2 山地城市内涝治理的模式启示

龙岩市实践为山地城市内涝治理提供三点核心启示及凸显公众参与的重要性。其一,坚持“地形适配”原则,山地城市内涝治理要摒弃平原城市思维,利用“山、水、谷”地形,融合生态排水设施与地形,采取“高水高排、低水蓄滞”策略,实现“顺应自然、改造自然”平衡。如龙岩针对四类地形分区设计方案,提高成效并降低成本。其二,构建“系统联动”是关键路径,内涝治理需从顶层规划整合山体、湿地等要素,形成完整治理链条。龙岩成立跨部门领导小组、制定法规与标准,打破壁垒与瓶颈,实现生态排水系统与城

市全流程融合,保障治理成效长效性。其三,推动“技术融合”是提升效能保障,生态化与智慧化融合可实现“1+1>2”效果。龙岩将自然设施与智慧技术结合,发挥生态调蓄功能、提升设施效率,为应对极端天气提供技术路径,同时坚持绿色低碳理念,推广环保技术,推进内涝治理与“双碳”目标协同。此外,龙岩凸显“公众参与”在内涝治理中的不可或缺性,通过宣传教育提升市民认识与参与度,鼓励居民参与雨水收集与利用项目,增强城市排水系统韧性、促进社区凝聚力提升,还建立反馈机制,让市民提供内涝积水区域,为治理体系优化提供数据^[1]。

5 结语

山地城市内涝治理核心是构建适配地形的生态排水系统。龙岩市作为典型山地河谷城市,采用“分区施策、系统联动、智慧赋能”治理模式,解决内涝难题,实现水安全、水环境、水资源协同改善。其基于地形分型的治理路径,串联山顶、山脚、河谷等区域生态排水设施,形成“山体保育-山谷滞蓄-城区净化-湿地调蓄”体系,为同类城市提供可复制经验。未来,山地城市内涝治理应强化三大方向:一是深化智慧化应用,结合 5G 与大数据技术构建精准水文预测与设施调控系统;二是推动生态设施长效运维,建立“政府主导、市场参与”运维机制;三是加强区域协同治理,针对多流域、跨行政区域特点建立上下游联动排水防涝体系。龙岩市实践证明,坚持生态优先、因地制宜原则,可破解山地城市内涝困境,实现城市与自然和谐共生。

参考文献

- [1] 王滢,周小伟.Info Works ICM在山地丘陵城市内涝治理中的应用[J].中国给水排水,2018,34(19):118-123.
- [2] 时艳婷,赵建超,丁国尚.城市内涝治理与雨污分流改造措施[J].中国住宅设施,2023,(3):121-123.
- [3] 朱嘉运,陶光卿,姚永连,等.基于水动力学的数学模型在城市排水系统设计中的应用——以贵阳市花果园小区为例[J].净水技术,2025,44(S2):108-116.

Research on the Construction and Application of Dynamic Control System for the Progress of Housing Construction Projects

Lianhuan Guo¹ Teng Ma²

1. Engineering Project Management Office, Air Force Logistics Department, Xicheng District, Beijing, 100016, China
2. Construction Bureau, Air Force Logistics Department, Dongcheng District, Beijing, 100009, China

Abstract

The housing construction industry is large in scale and the complexity of projects is increasing day by day. Traditional management problems such as project delays, quality fluctuations, and cost overruns are still widespread, which directly affect the quality and efficiency of project construction. This poses higher requirements for the scientificity and dynamics of project progress control. The progress control of housing construction projects needs to rely on core concepts and dynamic control theories, and build a system in combination with internal and external influencing factors. This system follows four major principles, contains four core layers and four key modules, and operates in a closed-loop process. Through application strategies such as pre-planning, construction organization, completion delivery, and cross-stage collaboration, it achieves precise control of the construction period, reduces delay deviations, and collaboratively improves quality and efficiency to ensure the smooth progress of the project.

Keywords

Housing construction; Dynamic management; Operation mode; Precise control

房屋建设工程进度动态管控体系构建与应用研究

郭联欢¹ 马腾²

1. 空后工程代建办, 北京市西城区, 中国·北京 100016
2. 空后建设局, 北京市东城区, 中国·北京 100009

摘要

房屋建设行业规模体量大, 项目复杂程度日益提升, 工期延误、质量波动、成本超支等传统管理顽疾依然普遍存在, 直接影响项目建设质量效益, 这对工程进度管控的科学性、动态性提出更高要求。房屋建设工程进度管控需依托核心概念与动态管控理论, 结合内外部影响因素构建体系。该体系遵循四大原则, 含四层核心框架及四大关键模块, 按闭环流程运行。通过前期规划、施工组织、竣工交付及跨阶段协同等应用策略, 实现工期精准把控, 降低延误偏差, 协同提升质量与效益, 保障项目稳妥推进。

关键词

房屋建设; 动态管理; 运行模式; 精准把控

1 引言

房屋建设工程动态管控, 其核心在于打破传统进度管理中以固定计划为蓝本、以事后纠偏为手段的局限, 转而采取一种“全过程、实时性、可预见、能调控”的管理新模式。通过对“人、机、料、法、环”等多维度海量数据进行实时采集、同步分析与即时研判, 将进度状态从“黑箱”变为“透明”, 使项目管理团队能够精准洞察当前进展、即时预警潜在偏差、科学模拟后续走势, 并动态优化资源配置与施工逻

辑。这不仅是对单一进度线的管理升级, 更是驱动项目成本、质量、安全等目标协同达成的核心枢纽。

2 房屋建设工程进度管控理论基础

2.1 工程进度管控核心概念

工程进度管控指的是在房屋建设的整个生命周期中, 按照预先确定好的进度计划, 针对施工各个环节的实际进展状况展开监测、对比、分析以及调整的一项系统性工作。它的核心来保证工程可以在规定的工期内完成, 还要兼顾质量、成本等核心目标之间的平衡, 管控过程需要依靠科学的计划编制方式, 结合工程的实际情形设定合理的进度节点, 借助动态跟踪及时找出进度偏差, 并且采取有效的纠偏措

【作者简介】郭联欢(1986-), 男, 博士, 工程师, 从事油气储运工程、工程管理研究。

施,以此保障工程建设可有序地推进,提高项目整体的实施效率和效益^[1]。

2.2 房屋建设工程进度影响因素分析

房屋建设工程的进度受到多方面因素的综合作用,这些因素可以分为内部和外部两个类别。内部因素主要包含施工方案的合理性、资源配置的有效性、施工技术的水平以及项目管理的能力等方面,如施工方案不完善就容易造成工序出现混乱的情况,如资源供应不足将会直接导致工期延误。外部因素则有政策法规的变化、天气地质条件、周边环境的干扰以及供应链的稳定性等。例如,遇到极端天气户外施工即需暂停,建材价格波动或者供应中断会对施工连续性产生影响,各种因素之间相互存在关联,需要进行全面的识别以及动态的监测,为进度管控提供有针对性的依据。

3 房屋建设工程进度动态管控体系构建

3.1 体系构建原则与目标

体系构建要遵循系统性、动态性、实用性以及协同性这四大原则。系统性原则需对工程全生命周期各个环节进行统筹规划,促使各管控要素可有机地融合在一起;动态性原则着重强调要适配工程建设过程中的变量,及时对管控策略做出调整;实用性原则关注的是管控流程简洁且有可操作性,要符合项目实际的需求;协同性原则可保障建设、施工、监理等多方主体实现高效联动^[2]。体系的核心以便借助科学的管控来实现工期的精准把控,切实降低进度偏差的发生率,协同提升工程质量、控制建设成本,推动项目实现效益最大化,为后续工程进度管控提供可被复制的标准化模式。

3.2 体系核心框架设计

体系核心框架的核心逻辑是“目标引领—模块支撑—流程驱动—保障护航”,呈现出四层结构。目标层会清晰地明确工期管控、偏差预警以及效益提升等核心目标,以此为体系运行指引方向;模块层会整合进度计划、数据监测、偏差分析以及措施优化这四大关键模块,构成管控的核心支撑部分,流程层会设计出“计划编制—数据采集—偏差研判—措施执行—效果反馈”的闭环流程,以此保障管控有序推进,保障层包含组织保障、技术保障、资源保障以及制度保障,为体系稳定运行提供全方位支撑,保证各环节可高效衔接^[3]。

3.3 关键管控模块划分

3.3.1 进度计划动态编制模块

进度计划动态编制模块围绕项目全生命周期展开工作,综合考虑工程规模、工艺要求以及资源条件等多方面因素,运用横道图、网络图等科学方式来编制初始进度计划,并且构建计划动态调整机制,根据施工实际进展情况、资源配置变化状况以及外部环境影响因素,定期对计划进行修订完善,将各分部分项工程的进度节点细化,明确各责任主体的职责分工,以此保证计划具有科学性又拥有可操作性,为后续进度管控提供精准的依据。

3.3.2 实时数据采集与监测模块

实时数据采集与监测模块借助物联网、大数据等先进技术构建多维度数据采集网络,采集内容包含施工工序完成状况、资源消耗数据、设备运行状态、天气环境信息以及各方协同反馈信息等,搭建智能化监测平台后可实现数据实时传输、整合分析以及可视化呈现,重点监测关键进度节点,及时捕捉进度偏差信号,为偏差分析及后续调控提供全面且准确的数据支撑,突破传统监测的滞后性与局限性。

3.3.3 偏差分析与预警模块

偏差分析与预警模块会针对数据监测模块所捕捉到的进度偏差,运用对比分析以及因果分析等方式,对偏差的大小、类型以及成因展开深入研究判断,区分出可控偏差与不可控偏差,依据工程实际情况设定合理的偏差预警阈值,并构建分级预警机制,借助平台弹窗以及短信通知等途径,及时向各个责任主体推送预警信息。形成偏差分析报告,明确偏差的影响范围以及发展趋势,以此为后续调控措施的制定提供科学依据,实现进度偏差的早发现、早研判以及早预警。

3.3.4 调控措施优化模块

调控措施优化模块依据偏差分析结果,结合工程实际状况来制定有针对性的调控方案。在技术层面优化施工方案并调整施工工序,在资源层面合理调配人力、物力以及财力资源,以此保障关键工序顺利推进,在管理层面强化各方协同合作且完善考核机制,提升管控效率,构建措施效果评估机制,对调控措施的实施效果进行实时跟踪,依据评估结果及时优化调整措施,保证调控精准有效,迅速纠正进度偏差,使工程进度回归到计划轨道。

3.3.5 体系运行流程设计

体系运行依照闭环管理逻辑展开,具体流程如下所述,首先开启进度计划动态编制模块,完成初始进度计划的编制以及节点的细化工作,随后进入实时数据采集与监测阶段,不断收集施工全流程的数据并实施动态监测,接着借助偏差分析与预警模块对数据加以研判,如果未出现偏差就持续进行监测,如果出现偏差则触发预警并展开成因分析,依据分析结果,由调控措施优化模块制定并执行调控方案^[4]。最后对调控效果给予评估,若进度回归计划便反馈至数据监测环节持续跟进,若未达预期则重新优化调控措施,形成“编制—监测—研判—调控—评估—反馈”的运行流程,以此保证体系可持续适配工程的动态变化情况。

4 房屋建设工程进度动态管控策略

4.1 前期规划阶段管控策略

前期规划阶段管控策略是动态管控体系得以落地的基础,应当围绕“精准预判、前置防控、高效统筹”这一核心方向,全面夯实进度管控的基础,需要强化勘察设计的深度以及精度,结合项目的地质勘察报告、周边生态环境评估以及房屋功能定位,编制有科学性与可行性的施工组织设计,

明确各个分部分项工程的施工工艺、技术标准以及工期占比,提前对深基坑施工、高空作业等关键环节的技术难点进行预判。开展全维度的资源调研与规划,系统地梳理建材供应商资质、价格波动规律以及运输周期,筛选出优质的施工队伍并明确人员配置标准,制定详细的设备租赁、进场以及维护计划,精准地锁定各类资源的进场节点,从源头上规避因资源短缺或者衔接不畅而造成的进度延误。

4.2 施工组织阶段管控策略

施工组织阶段在进度管控中占据着核心地位,要依靠动态管控体系实现全流程的精细化以及智能化管控,以此保证进度可依照计划稳定地向前推进。一方面,严格落实进度计划的刚性执行以及动态优化,把初始进度计划当作基准,将每日、每周、每月的施工任务进行细化,明确各个工序的开始和结束时间、衔接逻辑以及责任人员。针对主体结构施工、机电安装、装饰装修等关键工序实施节点管控,运用横道图、网络图等工具实时追踪进度的完成状况^[9]。如出现资源配置调整、技术难题突破等情形,要及时联动进度计划动态编制模块来优化计划,保证计划和施工实际高度契合;另一方面,要升级实时数据采集与监测体系,借助物联网、大数据等技术,在施工现场布置智能监测设备,实时采集施工人员到岗率、设备运行效率、建材消耗数量、工序完成质量等数据,借助智能化平台实现数据的实时传输、整合分析及可视化呈现,管理人员可远程实时了解施工动态。一旦监测到进度偏差,马上启动偏差分析与预警模块,快速判断偏差大小、成因以及影响范围,区分施工组织不当、资源供应不足、技术问题等可控因素与极端天气、政策变动等不可控因素。针对性地制定调控方案,建立每日施工调度会、每周进度复盘会制度,及时协调解决施工过程中的堵点、难点问题,强化对施工队伍的考核激励,提高施工效率,保证进度偏差及时得到纠正。

4.3 竣工交付阶段管控策略

竣工交付阶段的管控重点在于实现“高效收尾、品质验收以及顺利交付”这几个目标,需要对收尾施工、验收整改、资料整理以及交付准备等各项工作进行统筹推进,以此来最大程度地缩短交付周期,制定一份详尽的竣工收尾计划,全面细致地梳理收尾工程的具体内容,像屋面防水的完善、管线的调试、绿化施工以及公共区域的装修等都囊括其中,明确各个收尾任务的完成时间限制、责任主体以及质量标准,实行清单化管理以及销号制度,防止出现遗漏或者拖延的情况。对验收流程以及质量管控进行优化,提前梳理好竣工验收所需要的技术资料、施工记录、检测报告等,组织施工、监理等相关主体开展多轮预验收。加强与建设单位、

物业企业、质监部门等之间的沟通对接,提前了解掌握验收标准、流程以及注意事项,合理安排验收时间,做好验收现场的布置、资料展示等准备工作,搭建交付服务保障体系,组建专业的交付服务团队,提前开展房屋质量的全面排查、配套设施的调试以及交付流程培训,制定详细的交付方案,明确交房流程、资料审核、问题反馈等环节的操作规范。

4.4 跨阶段协同管控策略

跨阶段协同管控策略最关键的是破除前期规划、施工实施以及竣工交付各阶段之间的管控障碍,实现全生命周期进度管控的无缝隙衔接以及高效联动。建立健全阶段衔接机制方面,在前期规划与施工实施的过渡时期,组织设计、施工、监理等相关主体召开全面的技术交底会议,对设计图纸、施工方案以及进度计划进行详尽解读,梳理施工过程中的重点难点以及风险点,以此保证设计意图可以精确传达,施工准备工作充分落实到位。在施工实施与竣工交付的过渡阶段,提前开启验收准备工作,将收尾施工与验收资料整理、预验收等工作同步推进,缩短工期衔接的周期,另外搭建全周期信息共享平台,整合各阶段的进度数据、资源配置信息、风险防控记录、质量检测结果等关键内容,促使建设、施工、监理、设计等多方主体的信息可实时共享、同步更新,防止因信息不对称引发的进度衔接脱节、重复工作等问题。

5 结语

房屋建设工程进度动态管控属于全生命周期的系统工作范畴,该项工作体系的构建以及策略的落地实施需要综合考量多个维度的要素,借助科学合理的框架设计、针对关键模块采取有效措施以及实现跨阶段的协同配合,可切实有效地规避进度方面的风险。在后续阶段,需要不断持续优化技术应用以及协同机制,强化管控工作的实际操作性,以此推动行业进度管控水平逐步稳定提升,为同类工程起到一定的参考作用。

参考文献

- [1] 林建. 新建住宅工程建设管理中项目进度控制优化 [J]. 四川建材, 2025, 51 (11): 218-220.
- [2] 赵仁君,刘鹏飞. 建设工程项目进度管理影响因素及控制方法探究 [J]. 中华建设, 2025, (11): 48-50.
- [3] 廖立群. 建设工程质量管理存在的问题及解决对策 [J]. 散装水泥, 2025, (05): 163-165.
- [4] 李文. 水库工程建设中甲方进度管理的挑战与对策 [J]. 治淮, 2025, (10): 68-70.
- [5] 朱文静. 关键路径法在煤化工项目工程建设进度管理中的应用 [J]. 化工管理, 2025, (25): 20-23.

Key Points Analysis of Grouting Construction of Connection Joint of Dam Body in Hydropower Station

Sheng Yi

State Power Investment Corporation Wuling Electric Power Co., Ltd., Changsha, Hunan, 655000, China

Abstract

In hydraulic engineering construction, joint grouting technology is indispensable for securely connecting adjacent dam sections, enhancing the structural integrity and stability of dams, improving water resistance, and reducing safety risks. The application of joint grouting requires precise measurement of joint opening, temperature monitoring, water pressure testing, flushing immersion, drilling, and grouting operations. Each process must undergo strict quality control, with scientific solutions for issues like leakage, pipeline blockages, and slurry leakage to optimize the technology. This article analyzes the application process of joint grouting in hydropower dam structures, aiming to improve construction quality and ensure the proper functioning of dam structures.

Keywords

hydropower station; dam body; grouting technology of joint

水电站大坝坝体连接缝灌浆施工要点分析

易生

国家电投集团五凌电力有限公司, 中国·湖南长沙 655000

摘要

在水利工程施工中, 离不开连接缝灌浆施工技术, 能够牢固连接相邻的坝段, 增加大坝结构整体性和稳固性, 强化坝体抗渗效果, 减少安全事故的发生概率。在连接缝灌浆施工技术应用中, 需要测量缝面张开度、测量温度、做好压水检测、冲水浸泡、钻孔、灌浆等作业, 并对各个工序质量进行严格把控, 并对串漏、管路堵塞、浆液外漏等问题进行科学处理, 促进连接缝灌浆技术的优化应用。文章主要对水电站大坝坝体连接缝灌浆施工技术的应用流程进行分析, 从而有效提升水利工程施工质量, 推动水电站大坝坝体结构功能作用的正常发挥。

关键词

水电站; 大坝坝体; 连接缝灌浆施工技术

1 引言

在水电站大坝坝体属于大体积混凝土建筑, 需要采用分段浇筑的方式进行施工, 从而避免出现温差裂缝。针对各个坝段的连接缝, 需要利用接缝灌浆技术进行处理, 进而强化整个坝体结构的整体性和稳固性, 并增加抗渗性, 促进整体大坝结构的安全使用。只有提升大坝坝体结构施工质量, 才能充分发挥水电站灌溉、防洪、人畜饮水等方面的功能作用, 促进水利工程行业的顺利发展。

2 连接缝灌浆施工技术

通常情况下, 在水电站大坝坝体施工中, 为了减少温差裂缝的出现, 需要对坝体分段施工, 致使相邻坝段之间存在接缝, 容易引起坝体渗漏问题。连接缝灌浆施工技术主

要是把混凝土浆液输送灌注到坝体的缝隙中, 并对其进行填充, 这样可以对不同坝段进行连接, 形成统一整体, 保障水利工程结构稳固性, 有效提升水电站大坝坝体施工效率和质量^[1]。在接缝灌浆技术应用中, 主要是利用水硬性凝胶材料, 如单一水泥浆液或者混合浆液等, 使其与接缝原有混凝土界面相结合, 产生固化反应, 实现缝隙的填充和封堵, 强化坝体加固、防渗效果, 避免坝体表面裂缝扩散。通过接缝灌浆技术的应用, 能够有效提升坝体对水侵入的抵抗能力, 减缓侵蚀作用, 强化坝体结构安全性和稳固性, 增加整个坝体的稳定性, 减少后期维护费用, 提升综合效益。

3 水电站大坝坝体连接缝灌浆施工要点

3.1 测量缝面张开度

在接缝灌浆施工前, 需要测量灌区缝面张开度, 结合张开度的不同, 选择差异化、针对性的灌浆材料。通常情况下, 如果缝面张开度在一毫米以上, 需要选择普通的硅酸盐水泥进行灌浆; 如果张开度范围为 0.5-1 毫米, 需要使用磨

【作者简介】易生(1984-), 男, 本科, 工程师, 国家注册一级建造师, 从事风电、水电、光伏研究。

细的硅酸盐水泥；张开度不超过 0.5 毫米的，需要针对性处理缝面张开度，使其达到接缝灌浆标准，不然就需要使用树脂类化学灌浆技术进行操作^[2]。此外，当缝面混凝土温度稳定后，需要通过预埋电阻式测缝针的方式测量缝面张开度，避免影响混凝土正常凝结。

3.2 测量温度

在灌浆前，需要在灌区混凝土的冷却管中接通水，并关闭水管阀门；静置几天后，混凝土和冷却管内的水会互相交换热量，促进混凝土凝固。在测量冷却管内水温时，要选择保温隔热功能较强的容器，并将冷却管中闷热的水转入进去，并利用温度计测量水温，同时要多次重复测量，计算平均值作为施工参数。通常情况下，需要把混凝土温度和设计温度误差控制在 0-2℃ 范围内。

3.3 通水检查、压水检查、压气检测

在通水检测中，测量所有单开口管口的出水量，以此判断是否达到标准要求，否则需要采取必要措施进行改善。通水检测时要检测灌区内是否存在外漏现象、互串现象。在封闭式通水检测时，要关闭管口，留一个进浆管口输水，如果管口压力和通水压力相同，需要检测灌区漏水量，并定位漏水部位，并针对性处理，减少渗漏问题^[3]。压水检查，完成管路系统铺设作业后，需要封闭灌区，并向管路内冲水打压，打压压力为灌浆压力的 80% 统计压水容积，以便了解施工材料用量，一旦发现外漏问题，需要及时处理。其中管路铺设方法如图 1 所示。确保打压合格后才能确定管路安装规范性。完成管路铺设后，需要在拔管内持续充气，充气压力需要控制在 0.4MPa 左右，检验标准为拔管，如果不能从接缝中拔出，且充气压力适中保持稳定，则说明不会漏气。其中拔管制作工艺如图 2 所示。

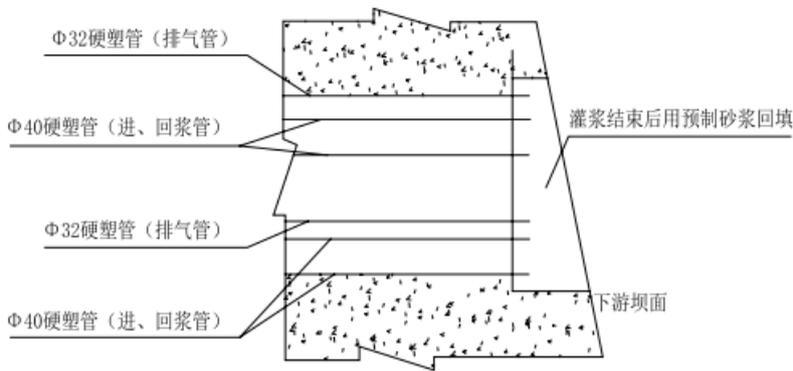


图 1 接缝灌浆管路布置剖面图

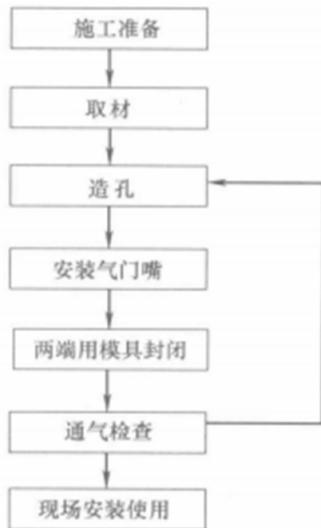


图 2 拔管制作工艺

3.4 冲洗与浸泡

在灌浆前，需要利用高压水枪对钻孔、接缝面进行清洗，清理接缝面上的杂质、泥土、碎土等，避免影响接缝灌浆质量。完成清洗作业后，需要对接缝面充水浸泡 20 小时以上，然后对接缝面、灌浆管路进行冲刷，排出管路和接缝的积水，

保障接缝没有杂质。

3.5 选择灌浆材料

灌浆材料质量与整体接缝灌浆施工效果息息相关。要结合水电站大坝坝体工程特点，选择合适的水泥浆材料。其中水泥为普通硅酸盐水泥，强度需要在 42.5 以上，抗压强度需超过 52.5MPa，同时要对细度进行合理控制。要选择没有结块的水泥，提前鉴定合格后才能投入使用；选择洁净饮用水对水泥进行配制；结合接缝张开度、气温条件、稠度等特点，优化选择外加剂，如减水剂等，进而增加浆液流动性，降低黏度值控制在合理范围内^[4]。在浆液制作过程中，需要使用高速制浆机进行拌制，且要搅拌均匀，把浆液密度、黏度控制在标准范围内，同时制备时间控制在 4 小时内，提前过筛且浆液温度在 5-40℃ 时才能投入使用。

3.6 钻孔作业

在坝体大坝工程施工过程中，要结合岩石的坚硬程度、性质，选择合适的钻孔方式。其中，常用的钻孔方式为岩心钻孔，即利用金刚石进行钻孔，同时在砂砾石层钻孔前，要选择优质泥浆保障孔壁稳定性，避免出现坍塌现象。钻孔作业过程中，对钻具长度进行合理控制，进而保障钻孔过程的垂直度。在此环节中需要实时清除岩石粉末，防止对孔壁空

隙造成堵塞。

3.7 灌浆施工

在接缝面灌浆过程中,针对同一条横缝,需要按照从上到下、从中部到两岸的顺序依次分层灌浆。当上下灌区发生串漏问题,需要对上下两层同步灌浆;完成同一高程的灌区灌浆作业后,才能对周边灌区进行灌浆,灌浆方式为同时灌浆或者逐区连续灌浆。同时灌浆过程中,需要从中间缝面逐渐向坝肩缝面灌浆;连续灌浆过程中,灌溉完前一灌区后的半小时内开始下一灌区的关键作业。同一横缝的下一层灌浆结束十天后,才能开始新上一层灌区的灌浆作业。不同的灌浆阶段,使用浆液水灰比不同,如初期使用2:1的水灰比;排气管出浆后换成1:1的浆液;排气管出浆后换成0.5:1的水灰比浆液^[5]。此外,如果接缝面张开度超过1.0毫米时,需要使用单一浓浆灌注;当缝面张开度在0.5毫米以下时,需要适当在水泥中添加一定比例的减水剂,这样可以增加浆液流动性,实现多浆比灌浆。在灌浆前需要加大压力反复通水;灌浆时要提高灌浆压力。通常情况下,灌浆压力需要控制在0.2MPa。在灌浆前,需要做好现场检查工作,规范性铺设管路,且在灌浆过程中每隔十分钟开展一次浆液性能检测工作,进而强化浆液性能。在灌浆作业过程中,需要全部打开管口,并通过下方进浆孔缓慢注浆;当管口出现返浆与进浆口浆液浓度相同时,需要依次关闭管口,确保浆液对缝面进行全面填充,然后逐步提高进浆压力,确保顶部压力满足设计要求,稳压二十分钟后,才能停止注浆。完成灌浆作业后,需要关闭阀门并静置8小时后,才能拆除管路,避免出现倒浆问题。

4 水电站大坝坝体连接缝灌浆施工注意事项

4.1 浆液外漏

针对这种问题,需要利用麻丝、水泥砂浆、水玻璃等材料进行封闭处理,同时要降低注浆压力,或者增大浆体浓度^[6]。如果渗漏情况较为严重需要暂时停止灌浆,同时利用清水进行清洗,完成修补工作后再继续注浆。

4.2 管道堵塞

如果在通水检测中发现管路不畅通的现象,需要使用压力水进行冲洗,且要持续变换进水压力,直到管路畅通后才能减小压力,如果以上方法还是难以解决堵塞问题,需要在顶部设置一个或者多个通畅的排气孔。如果在灌浆过程中发生管路堵塞问题,需要提高进浆压力,但是不能超过缝面增开度极限值,才能确保冲开堵塞的管路,或者从顶部的排

气孔进行倒灌,必要时需要增大浆液浓度,稳压十分钟后,才能停止灌浆。

4.3 串通问题

灌浆过程中如果发生上下层串通问题,需要利用上下层灌区同时灌浆的方式进行处理,这样可以提升灌浆效率;此外还可以通过先下层灌注,然后灌注上层的方式进行操作,并控制上层灌注压力,有效提升灌注质量^[7]。针对串漏问题,需要通过嵌缝方式进行处理,即利用切割机在横缝外漏处切割一定宽度的口,并使用钢钎打掉切割的混凝土,形成U字型槽,用水冲洗干净,然后利用1:2水泥预拌砂浆从灌区下部填充嵌堵,并使用铁锤夯密实,静置三天后进行压水检测。

4.4 灌浆中断问题

在灌浆过程中需要持续不断且均匀灌浆,如果需要中断灌注,需要及时冲洗并改变通水管道,当缝面溢出清水后才能停止,通过通水检查后,才能继续灌浆。如果当廊道四周止浆片失效时,应整圈廊道凿槽嵌堵,形成闭合圈。

5 结语

综上所述,在水电站大坝坝体施工中,为了减少混凝土裂缝的出现,需要进行分段浇筑,虽然该方法工程量少,但是在各个坝段之间形成连接缝,需要利用接缝灌浆技术进行处理,增加坝体整体性和稳固性,有效提高施工质量。

参考文献

- [1] 向胜. 水电站坝体接缝灌浆施工技术分析 [J]. 江西建材, 2023, (09): 261-263.
- [2] 滑通,王军. 接缝灌浆施工技术在双曲拱坝中的应用 [J]. 云南水力发电, 2023, 39 (08): 110-114.
- [3] 陈智,刘玉轩,杨哲文. 高拱坝横缝接缝灌浆施工技术 [J]. 湖南水利水电, 2022, (06): 82-84.
- [4] 石海松,朱旭. 乌东德高拱坝接缝灌浆施工技术[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会. 2021水利水电地基与基础工程技术创新与发展. 中国葛洲坝集团市政工程有限公司, 2021: 202-207.
- [5] 于磊. 水电站大坝坝体连接缝灌浆施工工艺分析 [J]. 中国新技术新产品, 2019, (05): 92-93.
- [6] 陈加文. 接缝灌浆技术在水利工程施工中的应用 [J]. 现代物业(中旬刊), 2018, (02): 146.
- [7] 何敏敏. 接缝灌浆技术在水利工程施工中的应用研究 [J]. 智能城市, 2017, 3 (07): 256.

Analysis of Energy-saving Construction Technology of High-rise Residential Concrete Structure without Plastering

Yusheng Du

Ningxia Chengzhixin Electric Power Construction Consulting Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750011, China

Abstract

As the construction industry transitions toward green, energy-efficient, and high-performance practices, the application of plaster-free construction techniques for high-rise residential concrete structures has become increasingly prevalent. Traditional methods suffer from excessive material consumption, prolonged construction timelines, and process interlocking issues, which often result in structural defects such as hollow drumming, cracking, and peeling—factors that increase building energy consumption and environmental impact. The plaster-free energy-saving construction technique addresses these challenges by optimizing core elements like concrete formwork systems and surface treatment, enabling direct attainment of decorative or thin plaster standards for concrete surfaces while achieving significant energy efficiency. This study provides a concise overview of the plaster-free energy-saving construction technique, analyzes its key implementation points for high-rise residential concrete structures, and explores common issues along with corresponding solutions, offering valuable insights for industry professionals.

Keywords

high-rise residential building; concrete structure; energy-saving without plastering; construction technology

试析高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工工艺

杜育升

宁夏诚智信电力建设咨询有限公司, 中国·宁夏 银川 750011

摘要

随着建筑行业向绿色节能高效方向转型, 高层住宅混凝土结构免抹灰施工工艺的应用也越来越广泛。传统施工工艺中, 存在材料消耗大、施工工期长、工序反锁等一系列问题, 使得混凝土结构出现空鼓、开裂、脱落等质量隐患, 增加了建筑能耗和环境负担。而免抹灰节能施工工艺可以通过优化混凝土浇筑模板体系和表面处理的一些核心环节, 实现混凝土结构表面直接达到装饰或薄抹灰标准, 达到良好的节能效果。鉴于此, 开展本文的研究工作, 简单概述免抹灰节能施工工艺, 分析高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工工艺的要点, 探究常见的问题和解决对策, 以供相关人员参考。

关键词

高层住宅; 混凝土结构; 免抹灰节能; 施工工艺

1 引言

现阶段, 在追求高效、环保节能的当今时代, 传统住宅混凝土结构的施工工艺面临着诸多挑战。而探索新型施工技术可以有效提高建设质量和效率, 降低应用过程中的能耗和污染, 其中混凝土结构、免抹灰节能施工技术便应运而生。在具体施工中, 施工单位需要掌握该技术的要点, 做好前期准备和过程控制工作, 解决其中的一些质量问题, 采取高质量精细化管理措施, 有效落实绿色低碳发展理念, 从而提高高层住宅建筑工程的施工质量。

2 建筑工程传统抹灰用砂来源与危害

矿山砂石开采的主要危害体现在水土流失、地质灾害、

环境污染及生态破坏等方面。

具体包括:

水土流失加剧: 露天开采须剥离地表植被与土壤层, 降雨时, 表层土壤及采砂弃物易被冲刷。采场挖损土地成为水土流失重灾区

地质灾害频发: 地面崩塌与滑坡: 采砂区形成高陡边坡, 在雨水渗透及重力作用下易诱发滑坡坍塌。

泥石流: 采砂活动可能改变地形, 增加泥石流风险。

水土污染蔓延: 采砂区一般重金属较多, 重金属随雨水渗漏污染土壤与河流, 通过食物链威胁人类健康, 酸性废水与油污污染饮用水安全。

生态破坏: 非法采砂破坏河床与堤防, 加剧洪水风险; 植被破坏导致生物多样性下降, 部分区域可能因暴雨引发山体滑坡。

【作者简介】杜育升(1968-), 男, 中国山东济南人, 工程师, 从事工程建设新能源技术研究。

3 河道采砂及危害性

3.1 河道采砂造成的危害包括

破坏防护安全，污染生态环境。采矿活动改变河道原有水文环境，削弱防洪工程的稳定性，可能引发溃堤等灾难性后果。同时，采砂船排放柴油，生活污水及汞毒物等污染物，导致水体浑浊，pH值异常；直接危害水生生物生存，汞污染通过食物链累计，可能引发各类健康问题。

3.2 采砂造成的安全隐患

非法采砂造成改变河道流态，破坏航道结构，增加船舶碰撞搁浅等事故风险，采砂船常在航道夜间作业，进一步加剧航行隐患。

3.3 社会与经济影响

非法采砂导致砂资源枯竭，推高建筑市场成本，部分地区因采砂引发土地权属纠纷，加剧社会矛盾。此外，非法采砂活动常伴随涉黑涉恶现象，破坏地方治安。

施工现场砂浆拌合粉尘飞扬，造成环境污染且因砂质量不稳定，其含泥量不稳定，（正常 $< 2\%$ ）颗粒级配不均匀沙中氯离子含量超标等现象。表观密度正常（ $\geq 2500\text{kg/m}^3$ ），碱基料反应膨胀率 $< 0.1\%$ ，压碎值和亚甲基值（MB值）。等现象。造成砂浆质量不稳定因素，由此发生墙体空鼓、开裂、泛碱、起皮等，个别地区因暴风雨或地震造成墙皮脱落，发生砸伤人员伤亡及个人财产损失事故。

4 免抹灰新工艺产生的必然趋势

随着科技的发展，新材料、新工艺不断出现，建筑抹灰施工可以替代的施工工艺条件已成熟；例如：界面剂的出现，其主要作用是增强基层与外饰面之间的粘接力，有效预防空鼓脱落等质量问题。其核心功能包括：

提升基层附着力：通过渗透浸润基层表面，增加粗糙度，使光滑面或疏松的基层（如混凝土、加气混凝土砌块）更易于装饰面材料结合，替代传统抹灰前凿毛工艺。

封闭与加固基层：对起砂老旧或高吸水率墙面进行套胶处理，封闭浮尘与孔隙，减少基层吸水率，确保基层水分均匀固化，避免因基层问题导致的后续工艺层开裂剥落。

改善界面性能：改变基层表面的物理化学特征，增强耐水性和抗冻融能力，更加适用于瓷砖粘贴、腻子批刮等后续工序，延长墙面使用寿命。

例二：玻璃纤维网格布的出现与使用：该产品的出现解决了抹灰工艺中不同载体之间温度收缩挂设钢丝网的传统工艺。同时，该产品具备良好的防裂处理，墙面保温等功能。主要用于墙体抗裂性能，提高保温系统的稳定性。具有抗剪抗拉强度等施工简便实用。墙面翻新等特点。

例三：聚合物粘接抹面砂浆：是以水泥、石膏等凝结材料，与丙烯酸酯、聚乙烯醇等可分散有机物聚合物复合而

成的新型建筑材料，其聚合物在环境条件下成膜覆盖水泥颗粒，增强骨料粘接力并抑制细微裂缝扩展。按功能分为粘接砂浆、防水砂浆、保温砂浆、抹面砂浆、加固砂浆等类别。具有防水、抗渗、耐腐蚀、高粘接强度等特点。该材料通过聚合物与水泥反应，形成立体网结构，提升密实度和抗渗性。其性能远超传统抹灰工艺所具备的功能和作用。

装配式建筑的发展力：装配式建筑把传统建筑方式中的大量现场作业工作转移到工厂进行，在工厂加工好建筑所用的构件和配件（如叠合板、墙板、楼梯、叠合梁、柱等）运输到建筑施工现场，通过可靠的连接方式，在现场装配安装而成的建筑。装配式建筑主要包括预制装配式、混凝土结构、钢结构等采用标准化设计，工厂化生产，装配化施工，信息化管理，智能化应用。是现代工业化生产方式的代表。

《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》发布指出，发展装配式建筑是建筑方式的重大变革，是推进供给侧结构性改革和新型城镇化发展的重要举措。有利于节约资源能源。减少施工污染，提升劳动生产效率和质量安全水平。有利于促进建筑业与信息化深度融合，培育新产业，新功能，推进化解过剩产能。装配式建筑采用先进科技水平控制建筑构件及建筑物的垂直度、平整度标准较高，通常均控制在 $\leq 5\text{mm}$ 以内；如此高精度、高标准，建筑市场发展潜力巨大，正是为改变传统抹灰提供更大的保障和发展的前景。免抹灰技术产生势在必行。

5 免抹灰节能施工工艺概述

免抹灰节能施工工艺以一次成型为核心，通过精细化施工，使混凝土结构表面达到免抹灰或薄抹灰的装饰效果，省去了传统抹灰工序，从源头上避免了抹灰空鼓开裂的质量通病，同时也实现了节能、节材、节工的综合效益^[1]。在具体应用中，优化模板体系和混凝土配合比。加强浇注振捣工艺和养护工程的控制工作，使得混凝土构件的表面平整度、垂直度达到设计要求和装饰面层的施工标准，无需进行后抹灰处理。

节能主要体现在减少材料消耗和降低工序能耗两个方面。一方面可以减少水泥、砂浆等抹灰材料的使用，降低建筑生产过程中的能源消耗。另一方面省去了抹灰、养护等工序，减少了施工过程中的机械能耗和人工消耗，同时避免了抹灰层脱落带来的二次维修能耗。而且免抹灰工艺省去了抹灰和养护时间，缩短了施工周期，也意味着施工机械和临时设施的使用时间减少，间接降低了能耗和资源消耗。而且应用该工艺，可以确保高层建筑在使用阶段有着良好的保温性能。免抹灰工艺，通过优化混凝土结构表面质量，减少了表面裂缝和空隙，提升了混凝土结构的密实度，导热系数降低，整体的保温性能更优。而且减少了建筑垃圾的产生，有效控制粉尘污染和碳排放，实现施工建筑环保节能的目标要求。

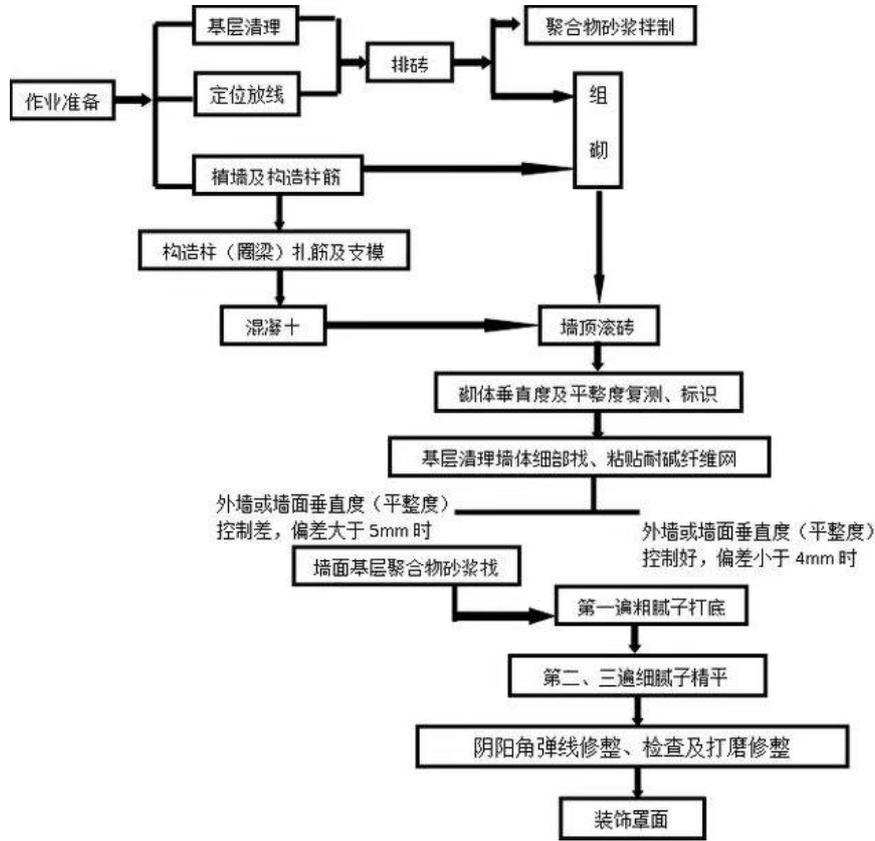


图1 结构免抹灰节能施工流程图

6 高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工工艺要点

6.1 施工前期准备

高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工工艺应用前做好一系列的充足准备，使其符合施工要求，确保后续工程能够顺利进行。首先，施工团队采用测量放线的方式管控混凝土的施工标准。第一，施工过程中，确保施工坐标点和水准点与工程设计规划部门规定的基准相一致。实际的施工中，现场点与基准点之间的距离要控制在80m，确保每个建筑物上都能够设计三个以上数量的水准点，从而为后续的施工提供便利^[2]。第二，采用经纬仪结合界限法策略，对关键的主垂线进行精准放样，严格控制垂线的垂直度和位置的精度。引入各轴线，使用钢尺进行复核，确保每一步骤准确无误。对主体结构进行施工时，将标准高度、基准点与平均值大小进行检验，确保误差不超过两厘m。第三，施工前要检查管线、接线和钢筋的施工状况，确保其质量符合要求。清理施工现场，确保运输道路通畅，混凝土输送泵、布料机等设备安装位置平整坚实。搭建临时养护棚，设置洒水点，确保养护用水供应充足。

6.2 模板工程

模板工程是免抹灰施工的关键，直接决定了混凝土表面质量，因此要加强模板施工的控制工作。选择合适的模板体系，例如新型复合模板或铝合金模板系统。新型复合模板

解决了传统胶合板模板、木模板存在的强度与耐久性不足的问题，从根源上保证了结构安全性和表面平整度。主要针对高层建筑常用的混凝土短肢剪力墙结构。铝合金模板系统具有刚度大、变形小、周转次数多的特点，浇筑出来的混凝土表面平整光滑，阴阳角方正，完全省去了二次抹灰的工序。选择合适的模板类型后，优化模板设计，可根据构件尺寸和受力情况进行设计，采用大模板和小拼缝结合的方案，可以减少模板拼缝数量。支撑体系采用碗扣式脚手架或盘扣式脚手架，立杆间距 $\leq 1.2\text{m}$ ，水平布置 $\leq 1.5\text{m}$ ，扫地杆距地面 $\leq 200\text{mm}$ ，确保支撑体系的高度和稳定性符合要求。模板整体安装要遵循横墙先纵墙后、外墙先内墙后的顺序。先安装外墙和柱模板。利用塔吊将安装好的模板吊装至指定位置进行固定。人工将内墙模板搬移至钢筋骨架一侧后进行拼装，打入对拉螺栓与限位套管进行另一侧模板的拼装，最后合上模板^[3]。纵向布置主龙骨，横向布置次龙骨。拼接龙骨时采用双拼方钢管。对阴阳角模板进行加固安装。模板安装完成后，采用水准仪、激光测距仪、2m靠尺进行全面检测，调整偏差部位，直至符合质量要求。做好模板加固工作，加重模板的外侧设置水平加固楞和斜撑，确保模板在混凝土浇筑过程中不变形。梁底设置加密立杆，两侧设置对拉螺栓。模板拆除需要满足混凝土强度要求，拆除顺序按照先支后拆，后支先拆的原则，避免暴力拆除损坏混凝土表面。拆除后及时清理模板表面，修补损坏部位，为下次做好充足准备。

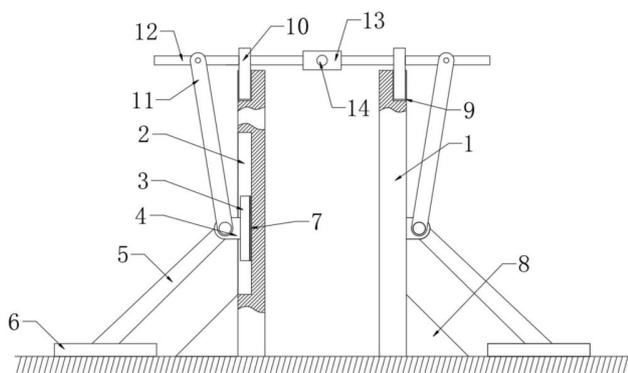


图2 免抹灰结构支撑构件

6.3 混凝土工程

混凝土工程施工质量直接影响到结构表面观感和内在质量。前期混凝土制备环节,选择商品混凝土,按照配合比进行制备,控制搅拌时间,确保混凝土均匀。运输到施工现场,检查混凝土的坍落度。混凝土浇筑前全面检查模板和钢筋,清除模板内的杂物和积水,对钢筋保护层垫块进行加固,确保保护层厚度符合设计要求。浇筑采用分层浇筑的施工方法,墙柱浇筑分层厚度 $\leq 500\text{mm}$,梁板浇筑分层厚度 $\leq 300\text{mm}$ 。控制好浇筑速度,避免因过快导致模板变形。整个浇筑的过程密切关注浇筑效果,严格把控板厚的标高,使其符合设计要求和质量标准。楼板浇筑时采用激光找平仪进行找平,确保表面平整度偏差。符合要求,初凝前采用木抹子搓平,终凝前采用铁抹子压光,减少表面裂缝,可以达到光滑平整的视觉效果,从而提升结构的美观度和耐用性^[4]。混凝土振捣中采用插入式振捣器进行振捣,插入深度 $\geq 50\text{mm}$,振捣间距 $\leq 500\text{mm}$,控制好振捣时间,直至混凝土表面浮浆,无气泡冒出为止,避免漏振或过振。

6.4 表面处理

拆除模板后检查混凝土的表面情况,确保其达到免抹灰标准。可以使用2m靠尺、塞尺、裂缝宽度检测仪等设备,对梁、柱、墙等表面进行检测,重点检查。平整度、垂直度、裂缝、蜂窝麻面等缺陷,做好记录工作^[5]。混凝土表面处理完成后,涂刷界面处理剂,增强混凝土表面与后续装饰层的粘结力,防止装饰层脱落。在后续工序衔接中,要重点关注装饰层施工和保温层施工。内墙装饰层可直接采用界面剂+耐水腻子+涂料的方案,无需抹灰。外墙装饰层需要在界面处理后,先施工保温层,再进行装饰面层的施工,保温层粘贴时,需要确保平整度和粘接强度,避免因保温层施工影响整体质量。

7 免抹灰工艺的常见问题与质量控制

7.1 质量通病及防治策略

在混凝土结构免抹灰工艺施工中常见的质量通病有,混凝土表面气泡、接缝错台、表面色差、阴阳角不顺直等各种问题。因此,针对这些问题,做好提前优化工作,防止质量通病的发生。针对混凝土表面气泡情况,要优化混凝土配

合比,适当地调整外加剂的掺量。浇筑环节要控制好浇筑的高度和厚度,把控好上下两层的衔接时间。在振捣工作中也需要进行合理布设振捣点,控制振捣时间,采用二次振捣工艺。而针对接缝错台,需要加强模板高度,改进节点构造,要严格检验模板平面位置,使用高强度连接件^[6]。针对表面色差,要确保脱模剂涂刷均匀,避免使用不同品牌的脱模剂。同时控制好拆模时间。为了有效防止阴阳角不顺直,可采用专用角模,加强脚部支撑,拆模时使用专用撬棍,避免硬撬硬砸。

7.2 把握各项施工要点,规范操作

施工单位在施工前进行技术交底,明确各项要点规范操作,可以有效解决免抹灰施工过程中的一系列问题,使其符合施工要求。模板施工中检查模板的平整度高度和尺寸偏差,安装完成以后采用三检制检查模板安装的精度。模板接缝处采用密封胶封堵,安装完成以后进行漏浆实验。在混凝土施工控制中,要加强原材料的验收,确保水泥、骨料、外加剂等原材料符合施工要求,浇筑时,安排专职质检员全程旁站监督,记录浇筑时间、分层厚度和振捣情况,重点检查墙、柱、梁、板等关键部位的振捣质量^[7]。浇筑结束后开展混凝土强度和表面质量检测工作,确保符合质量要求。

8 结语

综上所述,高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工工艺是一种具有很高应用价值的技术,它可以降低建筑的能耗,减少碳排放,达到环保节能的目的。因此在具体施工项目中,施工单位要严格按照免抹灰节能施工工艺的流程进行操作,重点做好施工前期准备、模板工程、混凝土工程、表面处理工程的质量控制,解决模板成本高、施工技术要求高、冬季施工难度大等问题,通过优化施工方案、加强技术培训、改进养护措施等方式,确保免抹灰工艺的顺利实施。提高施工质量,实现免抹灰节能的目标要求,为建筑企业带来良好的经济效益,促进建筑行业的健康稳定发展。

参考文献

- [1] 韩毅. 高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工技术[J]. 建材发展导向,2024,22(4):136-138.
- [2] 邱赞. 混凝土结构免抹灰节能施工技术的原理及应用[J]. 四川建材,2024,50(8):113-115,118.
- [3] 王兴城,任秋,顾武生,等. 高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工技术研究[J]. 中国建筑装饰装修,2023(2):174-176.
- [4] 付昌坚. 高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工技术[J]. 门窗,2023(13):37-39.
- [5] 刘宁. 住宅混凝土结构免抹灰节能施工技术研究[J]. 中国厨卫,2025,24(2):10-12.
- [6] 杨建军. 高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工技术[J]. 科学与财富,2023(20):85-87.
- [7] 付锦宇. 高层住宅混凝土结构免抹灰节能施工技术探讨[J]. 户外装备,2021(12):226.

Analysis of Design Key Points and Technical Difficulties in Construction and Installation of Unitized Curtain Walls in Super High-rise Buildings

Chao Song

Far East Lijin Curtain Wall (Shanghai) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

With the acceleration of urbanization and the rapid development of construction technology in China, super high-rise buildings have become an important part of the urban skyline. This type of building not only pursues breakthroughs in height and form, but also puts forward strict requirements for the performance, safety and aesthetics of the building's facade. Unitized curtain walls have been widely applied in super high-rise buildings due to their advantages such as high industrialization level, fast installation efficiency and good sealing performance. However, the high-altitude environment where super high-rise buildings are located is complex, facing multiple challenges such as strong winds, earthquakes, and temperature changes, which makes the design and construction installation of unitized curtain walls encounter many special problems. This paper, in combination with the engineering characteristics of super high-rise buildings, systematically analyzes the design key points of unitized curtain walls, deeply discusses the technical difficulties in construction and installation, and proposes targeted solutions, providing references for related engineering practices.

Keywords

Unitized curtain wall; super high-rise buildings; key design points; construction and installation techniques

单元式幕墙在超高层建筑中的设计要点与施工安装技术难点分析

宋超

远东力进幕墙(上海)有限公司, 中国·广东 深圳 518000

摘要

随着我国城市化进程的加速和建筑技术的飞速发展,超高层建筑已成为城市天际线的重要组成部分。这类建筑不仅追求高度与造型的突破,更对建筑外立面的性能、安全及美观提出了严苛要求。单元式幕墙凭借其工业化程度高、安装效率高、密封性能好等优势,在超高层建筑中得到了广泛应用。然而,超高层建筑所处的高空环境复杂,面临强风、地震、温度变化等多重挑战,使得单元式幕墙的设计与施工安装面临诸多特殊问题。本文结合超高层建筑的工程特性,系统分析单元式幕墙的设计要点,深入探讨施工安装中的技术难点,并提出针对性的解决对策,为相关工程实践提供参考。

关键词

单元式幕墙; 超高层建筑; 设计要点; 施工安装技术

1 引言

作为超高层建筑“外衣”的幕墙系统,其性能直接关系到建筑的安全性能、使用体验与综合效益。单元式幕墙与传统构件式幕墙相比,将面板与框架在工厂完成组装,形成标准化单元板块后运至现场进行吊装拼接,这种工业化生产模式有效规避了现场湿作业多、质量受环境影响大等问题,尤其适配超高层建筑施工周期紧、高空作业难度大的特点。因此,系统研究单元式幕墙在超高层建筑中的设计要点,深入

剖析其施工安装技术难点并提出解决方案,对于推动超高层建筑幕墙技术的规范化发展、保障工程质量与安全具有重要的现实意义。

2 单元式幕墙在超高层建筑中的设计要点

2.1 结构设计

2.1.1 风荷载取值与抗风压设计

设计前需结合建筑所处地域的气象数据,通过风洞试验或数值模拟,精准确定不同高度的风荷载标准值,尤其需考虑高空湍流、绕流效应带来的局部风压突变。幕墙框架及面板的选型需满足抗风压性能要求,铝型材应选用高强度合金材料,通过截面优化设计提高抗弯、抗扭刚度;玻璃面板

【作者简介】宋超(1989-),男,中国河南信阳人,助理工程师,从事建筑幕墙设计研究。

优先采用夹胶中空玻璃,其抗冲击性能和承载能力优于单片玻璃,当建筑高度超过200米时,需考虑采用钢化夹胶中空Low-E玻璃,必要时增设金属背板或采用双层幕墙结构增强抗风性能。

2.1.2 抗震设计

超高层建筑所在区域若为地震设防烈度6度及以上地区,幕墙设计需满足相应的抗震等级要求。通过采用弹性连接节点,如在单元板块与主体结构的连接部位设置橡胶垫或滑移支座,允许板块在地震作用下产生一定的水平位移,避免应力集中导致的结构破坏。

2.1.3 温度应力补偿设计

超高层建筑幕墙暴露在外,昼夜温差及季节温差会导致型材与面板产生热胀冷缩变形,若设计中未考虑温度应力补偿,易出现面板开裂、密封胶老化失效等问题。设计时应合理设置伸缩缝,单元板块之间采用柔性密封胶条连接,允许板块沿水平和竖向进行微量变形;对于玻璃面板,需通过计算确定合理的面板尺寸,避免因温度变形产生的应力超过玻璃的许用应力。

2.1.4 层间位移变形设计

超高层建筑主体结构在侧向风荷载、地震作用下易产生层间相对位移(通常高度每增加100米,层间位移可达10-25mm),若幕墙单元无法适配该变形,易导致框架开裂、面板破损或密封节点失效。设计需以主体结构的层间位移限值为依据,通过专项计算与构造优化实现变形适应,核心要点如下:(1)连接节点优化:采用具备水平滑移功能的挂接构造,如在单元板块与主体结构的连接部位设置长圆孔连接件或弹性滑移支座,允许板块沿水平方向产生不小于主体结构层间位移1.2倍的相对位移,避免刚性约束导致的应力集中;(2)板块间隙控制:结合最大层间位移量设定单元板块的水平及竖向间隙(通常水平间隙不小于30mm),间隙内填充高弹性密封胶条,确保位移后仍能维持密封性能,同时避免板块碰撞干涉。

2.2 节能设计

2.2.1 保温隔热设计

保温隔热设计方面,需优化幕墙的热工性能。采用断桥铝型材作为框架材料,通过在型材空腔内填充聚氨酯泡沫或聚酰胺隔热条,阻断热量传递路径;玻璃面板选用中空玻璃,中空层厚度建议采用12-16mm,内部填充惰性气体(如氩气),可有效降低导热系数。

2.2.2 水密性设计

水密性是单元式幕墙抵御高空雨水渗透的核心性能,超高层建筑面临强风裹挟雨水的“雨幕效应”,设计需遵循“等压腔+多道密封+有序排水”的核心原则,具体要点如下:(1)等压腔构造:通过合理划分单元板块的密封腔体(如图1所示的等压腔),使腔体内外气压平衡,消除雨水渗透的压力差,从根源减少雨水通过密封间隙渗入的风

险;(2)多道密封协同:设置“尘密封-水密封-气密封”三道防护:尘密封胶条阻挡灰尘进入等压腔,避免密封面污染;水密封胶条直接阻挡雨水渗透;气密封胶条维持等压腔气压稳定,三道密封形成立体防护;(3)排水系统优化:在单元板块水平节点设置排水槽(坡度不小于3%),竖向节点预留泄水孔,确保少量渗入等压腔的雨水能快速排出,避免积存导致渗漏;(4)性能指标量化:依据建筑所处地域的降雨强度、风压等级,确定幕墙水密性等级不低于GB/T 21086-2007《建筑幕墙》规定的4级(固定部分),并通过工厂水密性试验验证设计合理性。

2.3 安全设计

2.3.1 防坠落设计

单元板块的吊装连接节点必须具备足够的承载能力和安全冗余,采用双螺栓连接或销轴连接方式,确保单个连接点失效时,备用连接点仍能承受板块自重及附加荷载。同时,需在幕墙底部设置防护栏杆或防坠网,对于突出建筑主体的幕墙构件,如挑檐、装饰线条等,需增设抗倾覆装置,防止高空坠落事故发生。

2.3.2 玻璃面板防破碎设计

玻璃面板防破碎设计需从材料选型和防护措施两方面入手。优先选用钢化玻璃或钢化夹胶玻璃,其破碎后呈无锐角的小颗粒,可降低伤人风险;对于高度超过300米的超高层建筑,玻璃面板需进行防冲击性能测试,必要时在玻璃表面粘贴防爆膜,增强玻璃的抗破碎能力^[1]。

2.3.3 防火设计

幕墙与主体结构的缝隙、层间楼板与幕墙的交接部位,需采用防火岩棉、防火板等防火材料进行封堵,封堵高度不低于1.2米,确保火灾发生时能有效阻止火焰和烟气蔓延。

3 单元式幕墙在超高层建筑中的施工安装技术难点

3.1 测量放线精度控制难

超高层建筑高度大,主体结构施工过程中易产生竖向偏差和水平位移,若测量放线精度控制不当,会导致单元板块拼接错位,影响幕墙的安装质量和密封性能。测量放线的难点主要体现在以下方面:一是高空测量受风力、温度影响大,仪器稳定性下降,易产生测量误差;二是主体结构的累计偏差随高度增加而增大,需通过精准测量进行偏差修正;三是幕墙单元的安装精度要求高(通常偏差控制在2mm以内),测量数据的微小误差都可能导致板块无法正常拼接。

为解决这一难点,施工前需建立高精度的测量控制网,采用全站仪、GPS定位系统等先进测量仪器,结合激光铅垂仪进行竖向投点,确保测量数据的准确性。测量过程中需定期对控制网点进行复核,消除温度、风力等环境因素的影响;针对主体结构的偏差,需绘制详细的偏差分布图,根据实际偏差调整幕墙单元的安装位置,必要时对单元板块进行

工厂二次加工,确保板块与主体结构的适配性。

3.2 高空板块吊装风险高、难度大

单元式幕墙板块重量大(单块重量通常为300-800kg),超高层建筑高空吊装面临诸多挑战:一是吊装设备选型难度大,需结合建筑高度、板块重量及现场施工空间,选择合适的塔吊、施工电梯或专用吊装平台;二是高空风力大,易导致板块摆动,增加吊装定位难度,甚至引发安全事故;三是交叉作业频繁,幕墙吊装需与主体结构施工、机电安装等工序协调配合,避免施工冲突;四是板块运输及吊装过程中易发生碰撞变形,影响板块质量。

针对这些难点,首先需制定科学的吊装方案,根据建筑高度和板块重量选用大吨位塔吊,塔吊的布置需确保吊装覆盖整个幕墙施工区域,同时设置备用吊装设备以应对突发情况。吊装前需对吊装设备进行全面检查,包括钢丝绳、吊钩、制动系统等,确保设备性能完好;在板块吊装过程中,需安排专人指挥,采用风速仪实时监测高空风速,当风速超过6级时停止吊装作业。为控制板块摆动,可在板块顶部设置牵引绳,由地面人员配合调整板块位置,实现精准定位。板块运输过程中需采用专用运输架,运输架内设置缓冲垫,避免板块碰撞;吊装时采用专用吊具,吊具与板块的连接需牢固可靠,确保吊装平衡^[2]。

3.3 密封防水施工质量把控难

密封防水是单元式幕墙的核心性能之一,超高层建筑高空密封防水施工受环境因素影响大,质量把控难度高。主要难点包括:一是高空作业环境恶劣,密封胶施工易受风力、灰尘、温度影响,导致密封胶与面板、型材的粘结不牢固;二是节点缝隙清理不彻底,存在油污、灰尘等杂质,影响密封胶的密封性能;三是密封胶施工厚度和宽度控制不当,过薄易导致密封失效,过厚则易产生开裂;四是密封胶固化时间长,高空环境下易受雨水冲刷,影响固化质量。

3.4 施工过程质量与安全管理难

超高层建筑幕墙施工周期长、参与人员多、作业面分散,质量与安全管理难度大。质量方面,易出现板块安装偏差、密封胶粘结不良、五金件安装不牢固等问题;安全方面,高空坠落、物体打击、吊装事故等风险突出。

质量管控方面,需建立全过程质量控制体系。工厂加工阶段,对单元板块的尺寸、面板平整度、五金件安装等进行严格检验,不合格产品严禁出厂;现场安装阶段,实行“三检制”(自检、互检、专检),对板块的安装位置、垂直度、水平度进行逐一检查,确保符合设计要求;对于关键工序如密封胶施工、节点连接等,需安排专业技术人员进行现场指导和质量监督。同时,采用BIM技术建立幕墙施工模型,通过三维建模模拟板块安装过程,提前发现安装冲突和质量

隐患,实现可视化质量管控。

4 工程案例

以某超高层建筑工程为例,该建筑高度350米,共88层,外立面采用单元式钢化夹胶中空Low-E玻璃幕墙,总面积约5.2万平方米,单元板块数量共3200块,单块最大重量750kg。该工程在幕墙设计与施工中面临高空强风(最大风速达18m/s)、主体结构偏差大、交叉作业频繁等问题,通过针对性的技术措施,有效解决了各项难点^[3]。

设计阶段,通过风洞试验确定各高度风荷载标准值,采用高强度6063-T6铝型材作为框架材料,玻璃面板选用12mm钢化玻璃+16mm中空层+10mm钢化Low-E玻璃,增强抗风性能;节点采用干式对接方式,设置三道密封胶条,水平节点增设排水槽和泄水孔,提升密封防水性能;采用BIM技术进行三维建模,优化节点设计,提前规避安装冲突。

施工阶段,建立高精度测量控制网,采用全站仪结合激光铅垂仪进行竖向投点,对主体结构偏差进行修正,确保测量精度;选用QTZ800型塔吊进行板块吊装,配备专用吊具和牵引绳,风速超过6级时停止吊装,实现板块精准定位;密封胶施工前对节点缝隙进行彻底清理,选择无风天气施工,采用专用工具控制密封胶厚度和宽度,并进行抽样水密性试验;建立全过程质量与安全管控体系,采用“三检制”控制安装质量,强化高空作业安全防护,最终该工程幕墙施工质量验收合格,未出现渗漏、板块变形等问题,运营至今性能稳定^[4]。

5 结语

单元式幕墙以其独特的优势在超高层建筑中占据重要地位,但其设计与施工面临超高层复杂受力环境、高空作业风险等诸多挑战。设计过程中需重点关注结构安全、节能性能、节点密封等核心要点,通过精准的风荷载取值、合理的材料选型、优化的节点设计,确保幕墙系统的安全性和适用性;施工阶段需攻克测量放线精度、高空吊装、密封防水等技术难点,通过科学的施工方案、先进的测量设备、严格的质量管控,保障施工质量与安全。

参考文献

- [1] 王路乾,李小争. 建筑幕墙单元式板块高空安装精度控制方法[J].四川水泥,2025,(12):167-169.
- [2] 戴栗涵,平晓雷,刘铁龙,等. 超高层建筑单元式玻璃幕墙多段同步施工技术[J].工程建设与设计,2025,(21):157-159.
- [3] 周成. 构件式与单元式相结合的幕墙体系研究[J].福建建筑,2025,44(11):27-31.
- [4] 张成,沈程,吕文睿,等. 超高层单元式玻璃幕墙环形轨道吊装施工技术应用[J].中国建筑装饰装修,2025,(19):126-128.

Based on Engineering Management Informatization and BIM Technology Application

Xiaoxuan Wang

XiaMen NanYang University, Fujian, Xiamen, 361102, China

Abstract

Today, our country is in the stage of comprehensive reform and construction, the use of BIM technology in engineering management, not only can achieve the fine engineering management, but also can improve the quality of engineering project construction. Combined with the characteristics of engineering management information, this paper analyzes the deficiencies in the application of BIM technology of engineering management information, and analyzes the thrust and application countermeasures of BIM technology for reference.

Keywords

project management; information technology; BIM technology

基于工程管理信息化与 BIM 技术应用

王晓璇

厦门南洋职业学院, 中国 · 福建 厦门 361102

摘要

BIM技术不是单纯地将数字信息集成在一起,而是将数字信息有效应用各大领域,以数字信息为基础,贯穿于工程管理的各个环节,从最初的设计到最后的拆除,形成一个完整的模型,相关工作人员能够根据模型不断优化项目工程各阶段的信息,不断提升工程管理项目水平,这也是多个建设主体共同协作的基础。目前中国正处于全面化改革建设阶段,在工程管理中运用BIM技术,不仅能够实现工程管理精细化,而且还能提升工程项目施工质量。本文结合工程管理信息化特征,分析工程管理信息化应用BIM技术中存在的不足,分析BIM技术的推力以及应用对策,以供借鉴。

关键词

工程管理; 信息化; BIM技术

1 引言

如今, BIM 技术发展速度越来越快, 普及 BIM 技术只是时间问题, BIM 技术的时代早晚会的到来。因此, 对于工程管理信息化和 BIM 技术应用是非常有必要的。^[1]

2 工程管理信息化特征分析

与企业信息化不同, 工程管理信息化最主要的特征在于更加考虑组织自身资源是否被充分利用, 主要包括建筑师、结构工程师、设备工程等^[2]。虽然两种信息化过程在本质上存在一定的相似之处, 但是看待资源的角度存在一定的不同, 工程管理信息化更加强调企业组织内部的沟通与控制, 而企业信息化则更加强调跨组织协调与匹配。工程管理信息化贯穿于工程信息化管理的各个方面, 具体遵循如下原则: ①效益优先原则, 这里的效益优先原则不是指某一个

阶段最优, 而是指建设的整个过程最优; ②实事求是原则, 相关负责人要的工程利益相关者进行深入分析, 一方面, 安排专门的工作人员去深入了各方面的需求, 在此基础之上搭建起来的设计方案能够更好地满足人们都需要, 另一方面, 要安排人去调查现阶段可以利用的资源, 在此基础之上对于可利用的资源进行系统规划, 以此来不断提升资源利用率; ③从本质上来说, 工程管理信息化系统能够将不同单位、不同组织了解在一起, 让不同组织、部门直接的协调与沟通。

随着时代和社会的飞速发展, 工程管理越来越依赖信息技术, 同时信息技术也反作用于工程管理, 不断提高了工程管理水平。但是从技术本质来看, 工程信息化管理技术大多数是已经成熟或者通用的技术, 并非是一门独立技术。信息化管理不但要优化技术, 同时也要优化组织内部的业务流程, 合理配置现有的资源。在工程信息化管理的过程中, 应该进行整体的规划, 挖掘出可利用的有效资源, 从而能够获得更大的优势。

【作者简介】王晓璇(1989-), 女, 中国黑龙江佳木斯人, 硕士, 讲师, 从事工程造价、工程管理研究。

3 工程管理信息化中 BIM 技术应用存在问题

3.1 成本投入不足

BIM 软件大多数被美国垄断,因此软件大多数是国外产品,本土化程度不高。再加上我们国家还没有建立起完善的 BIM 标准和规范,这就导致不同软件公司理解的 BIM 技术不同,所呈现出来的 BIM 技术也不同,软件公司与软件公司之间有着非常大的差异,这严重制约了 BIM 软件的开发与应用。另一方面,在世界范围内,投入建筑业信息化的资金和精力偏低,据调查研究表明,过去的 40 年,西方发达国家建筑行业生产效率已经足足下降 20%,而同一时间其他行业生产力上涨 10% 左右。对于我们国家来讲也是同样的。

3.2 缺乏专业的技术人员

我们国家 BIM 技术发展起步晚,还处于初级阶段,需要用到 BIM 技术的项目比较少,这就导致许多技术人员学习 BIM 技术,学了也找不到好工作,未来也没有前景,认为学习 BIM 技术对于自己未来的职业规划没有任何意义,导致 BIM 技术人员比较少。由于 BIM 技术人员比较少,整个费用很高,无疑增加了工程项目管理成本,导致很多项目工程参与方不会选择 BIM 技术。

3.3 BIM 软件兼容性差

目前,许多软件需要重新编译才有可能正常运行。但是在这一过程中,部分计算机软件需要重新编译才能被运行,对于不同层次的结构体系,还需要考虑前端和后端的选择性,BIM 软件兼容性比较差,给用户带来了非常多不好的体验。

4 BIM 技术推广动力

4.1 规划设计单位

设计单位是采用 BIM 技术的主要单位,利用 BIM 技术能够带来一定的效益,对于设计师有了更高的要求,设计师需要具备一定的专业技术水平,许多深入学习 BIM 技术,不断提高自己的能力,满足 BIM 时代和社会的要求。但是设计单位难以承担起推广责任,因为规划设计单位主要是在项目初期参与工作,设计方案通过考核后,除了设计更改时需要规划设计单位参与外,其他基本很少可以看到规划设计单位。

4.2 业主

业主是重要的参与者之一,贯穿于项目管理的全过程。因此,业主也被称为是 BIM 最大受益者,但是业主的力量有限,也不能成为 BIM 技术的推力,大多数业主不了解 BIM 技术,也不明白什么是 BIM 技术,BIM 技术如何应用等,给 BIM 技术的应用带来了一定的阻碍。除此之外,大多数业主对于项目的建设是有自己阶段性的目标,比如医院今年需要建一座住院楼,但是不一定明年也需要建住院部,甚至以后可能很长的时间都不需要再搞建设,因此,对于这

部分业主来说,让他们去建立一个专门的 BIM 技术团队是没有意义的^[3,4]。除了房地产公司,项目管理业务是连续的,才需要建立 BIM 团队。在新时代背景下,专业逐渐细分,业主更应该关注自己的主业。

4.3 施工单位

在施工阶段,需要投入的资金份额比例非常大,但是由于中标价早已经被确定,为了能够好地提高资金利用率,施工单位可以利用 BIM 技术能够获得更好的效益。

4.4 BIM 技术推广方法

首先,成立专门的 BIM 技术服务公司。先聘请一批高水平 BIM 技术人员,成为 BIM 技术的骨干,在加大宣传力度让更多人开始关注和学习 BIM 技术,培养出一批高质量、高水平的 BIM 人才,实现人才裂变,从而能够更好地开发 BIM 技术和应用软件。其次,通过监理公司不断拓展 BIM 的业务范围,将 BIM 技术应用于建筑决策时期、建筑设计时期、建筑施工时期、建筑竣工时期,贯穿于项目管理的全过程,不断提高项目管理信息化水平。最后,根据实际情况选择 BIM 技术方案。从本质上来讲,BIM 集项目信息和项目模型为一体,同一个信息参与方输入一次,其他参与方登录相关的账号就能够共享 BIM 模型的信息,不需要再从分散的报纸、报表去收集相关的信息,使用 BIM 技术能够给各参与方带来非常大的便利。但是如何使用 BIM 技术才能获得更高的投资回报率,一个阶段一个参与方使用 BIM 技术不一定会获得最低的投资回报率,所有的参与方都使用 BIM 技术也不一定会获得更高的回报率,企业和项目应该根据实际情况制定 BIM 技术实施方案,确保参与方能够获得更大的回报^[5-7]。

5 BIM 技术在工程管理中的应用

通过 BIM 技术能够准确分析出各个阶段施工工程的情况、施工流程、施工成本、施工潜在的风险、安全管理措施等,以此为基础构建起完善的 4D 信息模型,这一模型能够准确分析工程项目体系的结构,为后续的项目管理奠定良好的基础。其特点主要有:①实现不同阶段工程项目的共享,能够根据具体的施工情况去分析潜在的安全管理冲突,为提升项目工程信息化水平提供了一条可借鉴的路线。②能够将项目工程设计信息、施工信息等提供一个共享共建的平台,为项目管理分析提供一个完善的数据模型。③ 4D 信息模型能够分析安全冲突,辅助解决各类施工过程中存在的不足,以此来达到预防安全冲突、避免安全隐患等,全方位提升工程信息化管理水平。

5.1 建筑决策时期

随着时代和社会的飞速发展,建筑水平越来越高,建筑工程发展越来越完善,在实际项目决策的过程中,会承受更多方面的阻碍,比如气候、地理位置等,因此,在借助决策的过程中,相关技术人员要收集尽可能详细的信息,随着

建筑决策现在越来越重要,可以利用 BIM 技术去现场模拟工程项目的施工情况,每一个阶段每一个环节建筑施工能够达到怎样的水平,每一个环节需要用到何种材料、何种设备等,此外还要特别标注施工注意事项,方便后续工作人员施工,能够一目了然看到相关注意事项,通过各种有效的策略不断提升项目管理水平,利用 BIM 技术的优势能够使得建筑决策更加具体,确保后续工作能够有序展开,节约建筑成本和建筑时间,降低建筑经济持续投入的频率。

5.2 建筑设计时期

传统的建筑行业设计方法需要对不同部门所收集的信息和数据整合,但是在具体操作的过程中,不同部门之间没有办法形成数据和信息整合协调发展,导致建筑工作在具体实施的过程中存在许多问题。因此,将 BIM 技术应用于建筑设计师,充分发挥 BIM 技术的优势,有效整合各个环节信息,实现共享共建目标。通过各类信息整合能够对设计单位的设计图纸进行审定,如果发现有不合理的地方,可以邀请设计单位一起参与后续的设计图完善和修改工作,能够有效提升建筑图纸的准确性,同时还能降低建筑经济投入。除此之外,利用 BIM 技术能够动态展示项目施工过程,施工单位可以利用 3D 模型监督各个施工环节,将建筑图像立体地展现在业主、施工单位等面前,为他们提供更加具体清晰的建筑图图像,以此来不断提升工程项目管理水平。

5.3 建筑施工时期

在工程施工阶段,施工环境、施工工作人员、施工设备等都在不同程度上影响了施工进度,施工单位没有办法准确预测出施工过程中可能存在的风险和不足。将 BIM 技术应用于建筑工程,能够准确预测建筑施工过程中潜在的风险,减少建筑工程发生问题的频率。首先,在建筑工程前期, BIM 技术能够让施工图纸更加形象直观、对于整个施工过程进行预测,提前制定对应的措施去解决施工过程中可能存在的问题,并及时进行修改完善,从而能够更好地提升建筑工程施工质量。除此之外,利用 BIM 技术模拟施工技术动态展示过程,使得相关工作人员对于整个施工过程中所要完成的任务进行深入思考,以此来不断提高建筑工程施工的质量,减少不必要的项目投入。

5.4 建筑竣工时期

竣工验收是项目工程管理的最后一个环节,验收合格

后,项目工程才能被投入使用,否则就要重新返修,这无疑增加了项目管理成本。因此,工作人员一定要重视验收工作,利用 BIM 技术去精确测量合格环节的工作。与传统项目工程验收模式相比, BIM 技术能够精准模拟项目,验收人员能够直观勘测数据,对于人工验收所考察不到的地方利用 BIM 技术也能够被突破,有效提升了项目验收审核透明度,保障项目工程资料的系统与完整,确保项目工程验收工作能够有效展开,不断提升建筑工程项目管理水平。^[8]

6 结语

综上所述, BIM 技术能够有效提升项目管理信息化水平,降低了项目施工建设成本,减少了不必要的资源浪费,有效提升了企业核心竞争力。在新时代背景下,项目管理越来越复杂,项目预算、项目工期等会受到一定程度的限制,对于环境相关设施有着更高的要求,需要在工程项目管理中使用更高效的方法,在工程管理信息化中运用 BIM 技术,能够有效节约成本,不断提高核心竞争力,但是从客观的角度来说,依然存在一些问题,接下来研究将朝着新问题优化体系的方面发展。

参考文献

- [1] 牛晨阳. BIM技术在施工质量控制中的应用研究——以某工业厂房项目为例[D]. 天津:天津理工大学,2020.
- [2] 高展. BIM技术在建筑项目施工管理中的实践探析[J]. 中国住宅设施,2021(1):109-110.
- [3] 王乐思. BIM技术在电子信息化控制工程成本管理中的应用建模[J]. 现代电子技术,2020,43(12):138-141.
- [4] 李盼. BIM技术在建筑工程项目全生命周期中的应用探索[J]. 中国勘察设计,2021(8):90-93.
- [5] 蔡兆旋,颜锋,马坤,等. 基于BIM技术和全过程工程咨询模式下数字化项目管理平台建设研究[J]. 中国工程咨询,2021(2):95-100.
- [6] 代明. 施工企业BIM技术应用研究——以A企业为例[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [7] 李娜. 基于BIM技术的工程造价专业教学改革路径研究[J]. 产业与科技论坛,2022,21(8):196-197.
- [8] 刘颖. 基于"互联网+BIM"的全过程工程造价管理[J]. 经济师,2020(7):284-285.

Prevention and Treatment of Frozen Damage of Railway Line in Seasonal Frozen Soil Area

Guohua Ji

Engineering Technology Department of Guoneng Shuohuang Railway Company, Beijing, 100000, China

Abstract

This paper systematically examines the concept, causes, prevention, and remediation methods of railway line frost damage in seasonal frozen soil regions. By analyzing both natural and human-induced factors contributing to frost damage, and through a case study of the Shenchinan Station on the Guoneng Shuohuang Railway in a typical seasonal frozen soil area, the paper details the implementation of drainage methods, replacement and thermal insulation techniques, and salt injection methods at the station. It emphasizes the need to enhance design and construction quality by conducting thorough surveys and detailed planning during the engineering phase, fully considering variations in temperature, soil composition, and moisture content. Through comprehensive analysis of frost damage causes, targeted and meticulous preventive measures are formulated to achieve optimal results. The study provides valuable references for frost damage prevention in railway technical stations and explores the application of new technologies and materials in frost damage control.

Keywords

frost damage; seasonal frozen soil area; frost damage slope; drainage method; replacement and insulation method; salt injection method; strengthening design and construction quality; prevention and remediation effect.

季节性冻土区铁路线路冻害的预防与整治

冀国华

国能朔黄铁路公司工程技术部, 中国·北京 100000

摘要

本文系统阐述了季节性冻土区铁路线路冻害的概念、成因、预防及整治方法。通过分析自然环境因素和人为因素导致的冻害成因, 结合国能朔黄铁路神池南站典型季节性冻土区典型案例, 通过对排水法、换填+保温法、注盐法在神池南站的具体的工程实施和整治情况, 提出了加强设计与施工质量, 在工程设计阶段进行详细的勘察和设计, 充分考虑温度、土、含水情况等的差异, 综合分析、研判冻害的成因, 制定有针对性而细致的冻害预防整治措施, 从而达到理想的预防及整治效果, 为铁路技术站冻害的防治工作提供有益的参考, 并展望了新技术、新材料在冻害防治中的应用。

关键词

冻害; 季节性冻土区; 冻害顺坡; 排水法; 换填+保温法; 注盐法; 加强设计与施工质量; 预防及整治效果

1 引言

铁路线路冻害是指土壤中的水分在低温条件下结冰膨胀, 导致土壤体积增大, 进而对铁路线路基础造成挤压和抬升, 导致铁路线路及其附属设施出现冻结、膨胀、变形等病害, 进而影响轨道几何尺寸稳定性和行车安全现象。

季节性冻土指地表冬季冻结而在夏季又全部融化的土, 我国季节性冻土面积大约 513.7 万平方公里, 占国土面积 53.5%, 季节性冻土区铁路线路路基的冻结与消融可能导致上部的线路轨道、道岔等关键设施出现变形, 严重影响列车运行的平稳性和安全性, 是冬季铁路维护的重点防治对象。

【作者简介】冀国华(1982-), 男, 中国山西原平人, 本科, 工程师, 从事铁路工程研究。

因此, 针对冻害的成因进行深入分析, 并采取有效的整治措施, 对于确保铁路运输的顺畅和安全具有重要意义。

2 季节性冻土区铁路线路冻害成因分析

铁路线路冻害成因复杂多样, 主要包括气候条件、地质条件、水文条件等自然环境因素, 工程设计及施工、设备维修保养等设备管理因素。

2.1 自然环境因素

气候条件和地质条件是铁路冻害形成的重要因素。为了有效整治铁路冻害, 必须充分考虑这些自然环境因素的影响, 采取针对性的措施来改善土壤环境、增强轨道结构的抗冻性能, 从而确保铁路运输的安全和稳定。

气候条件方面, 季节性冻土区的冬季气温低且持续时间长, 导致土壤中的水分结冰, 体积膨胀, 从而对铁路路基

和轨道结构产生冻胀力。这种冻胀力会破坏路基的稳定性，引发轨道几何尺寸的变化，严重时甚至会导致轨道断裂，影响列车的安全运行；

地质条件方面，土壤的类型、透水性、导热性、含水量、地下水位以及排水性能等特性各异，直接影响着土壤冻胀的敏感性和程度均会影响冻害的发生。例如，在黏性土壤地区，由于土壤颗粒细小、透水性差，细粒土由于毛细作用强，水分迁移量大，水分易于积聚，因此冻胀现象往往更为严重。而在砂性土壤地区，由于土壤颗粒较粗、透水性好，水分不易积聚，冻胀现象相对较轻。此外，地质构造如断层、裂隙等也可能为水分的迁移提供通道，从而加剧冻害的发生。

2.2 设备管理因素

工程设计及施工因素和设备维修是设备管理因素主要的方面。为了有效预防和整治铁路技术站的冻害问题，我们必须从设备管理因素入手，加强工程设计及施工的质量控制，确保设施设备的合理性和安全性。同时，也要加大设备维修的投入力度，提高维护保养的水平 and 效率，确保设施设备始终处于良好的运行状态，保障铁路运输的安全和畅通。

首先，工程设计是导致冻害的重要原因之一。在季节性冻土区的设计和施工过程中，如果存在对地质、气候等自然条件考虑不周，排水系统设计不合理、路基结构设计不当以及缺乏针对寒冷地区特点的专门设计等工程设计缺陷，就在设备管理源头埋下了隐患。因此，在工程设计阶段，必须充分考虑寒冷地区的气候特点，采用科学合理的设计方法，以确保季节性冻土区铁路工程在极端气候条件下的稳定性和安全性。

其次，施工质量问题也是引发铁路冻害的一个重要因素。施工过程中对材料选择、施工工艺及施工质量控制等方面的疏忽，为冻害的发生埋下了隐患。如：地基处理不当，排水系统坡度控制等隐蔽工程卡控不严格，水分易于在地基中积聚并结冰，从而产生冻胀现象。因此，必须严格执行施工规范和质量标准，加强施工过程的监督和管理，确保每一个施工环节都符合质量要求，从而有效降低冻害发生的概率。

最后，设备维修不科学也是导致冻害的一个关键因素。设备的维护保养方法及理念至关重要。冻害的整治需秉承“冬病夏治”的理念，合理安排线路清筛等解决道床排水的施工，机械化捣固时根据冻害标记进行提前预垫板，从而提升线路设备抵御冻害的能力。特别是在极端寒冷天气下，缺乏有效维护保养的设施设备更容易受到冻害的侵袭，甚至可能引发严重的安全事故。

3 国能朔黄铁路神池南站铁路线路冻害情况及应急整修方式

国能朔黄铁路神池南站是国家能源集团的一级技术作业站，承担煤炭运输的编组、技检、换挂等核心作业，是中国西煤东运大通道的关键节点。神池南站位于山西省忻州市神池县，地处晋西北黄土高原，平均海拔约 1500 米，属

温带大陆性季风气候，冬季平均气温低于 -10°C ，极端最低气温可达 -30°C 以下，属于典型的季节冻土区，冻结期为每年 11 月到次年 3 月中旬，神池南站路基填料多为低液限粉质粘土。站场路基出现冻胀、翻浆、融沉等病害数量较多。据统计，神池南站 2024 至 2025 年冬季期间的冻害数量达到 46 处，最大变形量达 30mm。每年冻害上涨和春融回落期间线路质量不稳定，分散多发的冻害与春融期的不均匀沉降呈周期性的变化对铁路运输安全和效率构成严重威胁。

3.1 神池南站冻害监测、监测情况

图 1 为 2024 至 2025 年神池南站气温、冻胀变形和冻深变化监测结果。冻害的发展阶段：从 11 月初到 12 月底，冻胀变形量呈现直线快速上升的趋势，在第二年 1 月初到 2 月末保持稳定。3 月初变形量又出现波动上升的趋势，此时冻胀变形量达到最大，其后随着融化趋于稳定，变形值迅速减小后逐步消失。铁路冻结期轨道变形一般可分为初始波动、快速冻胀、稳定冻胀、冻融循环和春融回落 5 个阶段。快速冻胀阶段和春融回落阶段历时均为 15-20 天，这两个阶段变形大发展迅速，是线路维护的重难点阶段。

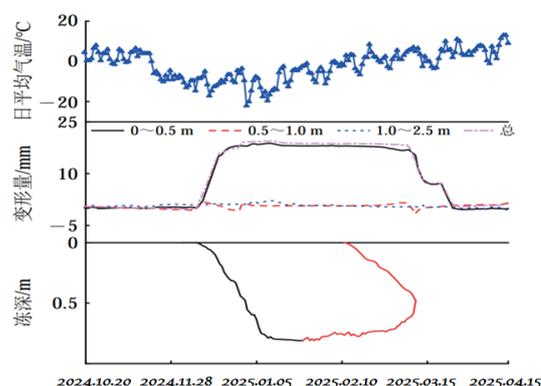


图 1 山西省忻州市神池县朔黄铁路段冻害监测结果

3.2 神池南站冻害垫板应急整修作业

目前神池南站冻害应急整修的方式为冻害垫板作业，主要对冻害冻起及回落地段前后进行顺坡、顺撬，恢复线路几何尺寸，满足正常通行列车的条件，主要程序为：

一是确认标准股：冻害上涨时，直线上先垫冻起高度较高一股钢轨，然后根据此股，按照水平和轨距把另一股钢轨垫好、改好道，曲线上先垫外股，后垫里股，以防造成超高不够或反超高；冻害回落时，直线上先撤较少的一股，曲线上则必须先撤下股，以免影响行车安全。

二是根据历年冻害发生情况，对冻害较严重处所，进行夏季预垫板，冬季撤板的方法整治，使用调高扣件时，垫板厚度可达 20mm；道床冻结后，根据冻起高度撤出调高垫板。

三是针对冻起高度不超过 15 mm 地段，可用调高垫板整修，每处调高垫板不得超过 2 块，总厚度不得超过 15mm。使用大调量扣件，每处调高垫板不得超过 3 块，总厚度不得超过 25mm。

四是针对冻起高度达到 15-30mm 地段，在冻害的冻起

最高点撤下原来 10mm 厚的轨下胶垫, 换上 3-7mm 厚的调高胶垫, 两端顺坡之间应有不短于 10m 的过渡段, 其坡度应与线路坡度一致, 垫板厚度超过 20mm 时, 每隔四根轨枕使用轨距杆加强。

五是针对冻起高度超过 30mm 以上时, 应每隔 1 根轨枕穿入 1 根木枕, 垫板顺坡完成后按外二里一打入道钉, 并每隔 1 根轨枕使用轨距杆加强。

六是在线路上垫入或撤出冻害垫板, 在正线、到发线上顺坡长度, 不少于冻起高度的 600 倍, 其他站线最低不少于 400 倍。冻起高度超过 20mm 时, 两端顺坡之间应有不短于 10m 的过渡段, 其坡度应与线路坡度一致。辙叉及转辙部分不得有边坡点。

4 国能朔黄铁路神池南站铁路线路冻害预防及整治措施

在季节性冻土区处理冻胀应从影响土体冻胀的土质、水分、温度三大要素出发一般采取机械法(土体强夯、粗颗粒换填等措施)、热物理法(土体疏干、铺设绝热层、热交换等)、物理化学法(添加无机化合物改变离子成分、憎水物、电化学处理等)。国能朔黄铁路神池南站在铁路线路冻害预防及整治方面, 采取了排水法、换填+隔温法、注盐法等措施。

4.1 排水法整治线路冻害

排水法主要针对神池南站股道众多、站场中间股道排水不良的 I、II 场东咽喉区以及东岔区下行正线路堑地段两侧山体排水不良等处所。采取了一下措施:

一是进行线路机械清筛, 确保石砟清洁、排水坡合理, 改善道床基面表层排水, 解决道床连续不均匀冻胀问题。同时进行削平路肩、清理排水沟及截水沟, 疏通整体排水系统。

二是在路堑段线路外侧原有水沟下修渗水井和渗水盲沟等引排水设施并从路肩侧面修建横向排水孔, 保证基床底层的积水顺利排出。减少地表水对本体冻胀的影响。

图 2 排水法主要解决了神池南站地下水丰富东咽喉路堑区域冻害, 通过疏通排水, 减少道床缝隙间的含水量, 该地段冻害高度从最大值 37mm 降低至 10mm, 起到减缓冻害发生的目的。

4.2 换填法 + 隔温法整治线路冻害

采取“路基换填+隔温”目的是换除路基土体中的不均匀土质或改良土的性质, 以消除和减少路基土体的冻胀。道床采取隔温工程措施后, 部分冻胀土脱离冻结层, 从而减少路基土体的冻胀, 主要采取措施是铺设 EPS 保温板。

在神池南站 1# 道岔、II 场股道口前后车径路道岔主要采取了“路基换填+铺设保温层+铺设排水管”主要用于解决由于非渗水性土质路基渗水性差, 道床与路基间积水凝结形成的冻害。施工顺序为: 预备补充石砟→开挖病害整治线路段落(挖至枕木下方 60cm)→铺设中粗砂保护层(5cm)并形成路拱→铺设 EPS 保温层(5cm)→铺设防水层(两布一膜)→开挖断面单侧(或两侧)安装 PE 双壁渗水波纹管(裹透土工布)→铺设中粗砂保护层(10cm)→回填干净石砟→线路养护→线路开通。

对重车场道口前后进行了换填综合整治, 效果明显,

该地段冻害高度从最大值 39mm 降低至 12mm, 起到减缓冻害发生的目的。

4.3 注盐法整治线路冻害

冻害垫板顺坡通过扣件调节轨道高程以消除冻胀变形的影响也是一种解决方法, 但目前常规的有砟轨道扣件调高量为 10mm-20mm 且不能调低, 尤其在道岔处所的冻害, 调节量远小于冻胀变形量。既有的扣件调节量无法满足要求且调节时间较长。因此, 采用注盐法特别适用于道岔区的冻害整治, 溶于水中的盐类能使水溶液的冰点低于淡水, 而且浓度越大, 冰点越低, 在道床中注盐可以起到减轻冻害的作用。

神池南站在 2023 至 2025 年利用小型机械清筛道岔养机, 对 2063# 道岔、2071#、2099# 道岔尖轨中部、辙叉部位存在冻害处所采取撒防冻液, 线路道床掺入适量的盐分后溶液的冰点下降, 导致土体中冻结温度发生了改变, 且随着氯化钠的掺入, 含水率最大值所出现的位置也发生了改变。冻害高度从最大值 35mm 降低至 15mm。

5 结语

综上所述, 季节性冻土区在工程设计阶段应进行详细的勘察和设计, 结合现场设备具体情况, 充分考虑温度、土、含水情况等差异, 采取有效的防冻胀设计措施。在重点冻害处所, 综合分析、研判冻害的成因, 科学采取防排水、路基填料换填+隔温法、注盐法等工程措施, 制定有针对性而细致的冻害预防整治实施方案, 达到理想的预防及整治效果。经过神池南站冻害整治的实际效果评估表明, 这些措施有效减轻了冻害对神池南站的影响, 验证了整治措施的有效性和实用性, 为冻害的防治工作提供了有益的参考。展望未来, 随着科技的不断进步和新型耐冻材料的研发应用, 冻害的预防与整治将迎来更多的解决方案, 为铁路运输的安全和顺畅提供坚实保障。

参考文献

- [1] 兰新铁路西段路基冻害特征分析及整治技术研究 兰州理工大学, 2022年第01期
- [2] 准池铁路路基病害整治技术研究 石家庄铁道大学, 2023年6月
- [3] 季节性冻土区铁路路基主动温度控制措施的冻害整治效果研究 石家庄铁道大学, 2025年6月
- [4] 浅谈利用渗水盲沟结合新型调高混凝土深槽枕综合整治路基冻害的方法 哈尔滨铁道科技, 2025 (03)
- [5] 丹大铁路路基冻害原因分析及整治对策 铁道建筑 2019(09):59
- [6] 寒区路基冻害数据分析及整治方案 哈尔滨铁道科技 2018 (02)
- [7] 谈大秦线冻害的预防与整治 山西建筑 2017 ,43 (13)
- [8] 滨绥线哈牡段路基冻胀特点及其应对措施研究 中国铁道科学研究院, 2016年第12期
- [9] 寒区重载铁路路基冻害变形限值研究 石家庄铁道大学, 2021年第04期
- [10] 准池铁路人工供热路基的冻胀控制效果研究 地下空间与工程学报, 2023 ,19
- [11] 季节性冻土区铁路路基冻害研究现状 中国铁路 2022 (03)

Research and Engineering Application of Reinforced Concrete Frame Structure Column Extraction and Beam Support Reinforcement Technology

Yuan Zhang Lipeng Hao Ming Gao

Western Architectural Seismic Investigation and Design Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China

Abstract

With the acceleration of urban renewal, the demand for functional upgrades and spatial reconstruction of existing buildings has been growing. This study focuses on a commercial building reinforcement project in Shaanxi Province, addressing the design requirements for open spaces on the first and second floors. It analyzes core issues including insufficient overall seismic performance after column extraction, inadequate structural capacity, and construction disturbance control. A comprehensive design approach combining "overall seismic reinforcement + local truss replacement" was adopted, innovatively utilizing temporary-free column extraction and replacement technology. Through theoretical calculations and field measurements, the safety and reliability of the solution were validated. The research demonstrates that increasing cross-sectional reinforcement of frame columns and adding shear walls combined with steel truss replacement effectively resolve structural load path interruption and capacity insufficiency after column extraction. The temporary-free construction technique, which uses demolition columns as temporary supports alongside static cutting methods, significantly reduces construction disturbances, shortens project duration, and lowers costs. 72-hour deformation monitoring revealed a cumulative maximum deformation of only 4.56mm, far below design tolerance and meeting current regulatory requirements. This study provides technical references and practical insights for similar projects.

Keywords

existing building; frame structure; column extraction and beam support; reinforcement and renovation; no temporary support; seismic performance

既有钢筋混凝土框架结构抽柱托梁加固改造技术研究与工程应用

张源 郝李鹏 高明

西部建筑抗震勘察设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710054

摘要

随着城市更新进程加快,既有建筑功能升级与空间重构需求日益增长。本文以陕西省某商业楼加固改造工程为研究对象,针对1~2层大空间挑空设计需求,分析框架结构抽柱后整体抗震性能不足、构件承载力不足及施工扰动控制等核心问题,采用“整体抗震加固+局部桁架托换”综合设计方案,创新性使用无临时支撑抽柱托换施工技术。通过理论计算与现场实测数据对比,验证方案安全性与可靠性。研究结果表明,增大截面加固框架柱、增设剪力墙结合钢桁架托换的设计方案,可有效解决抽柱后结构传力路径中断、承载力不足问题;无临时支撑施工技术利用待拆除柱作为临时支撑,配合静力切割工艺,显著降低施工扰动、缩短工期、节约造价。工程72小时变形监测显示,累计最大变形量仅4.56mm,远小于设计容许值,满足现行规范要求,可以为类似项目提供技术参考与工程借鉴。

关键词

既有建筑; 框架结构; 抽柱托梁; 加固改造; 无临时支撑; 抗震性能

1 引言

1.1 研究背景与工程意义

当前,我国城镇化进入存量更新阶段,既有建筑功能升级与空间改造需求持续攀升。商业建筑因业态调整常需进

行大空间重构,业主方时有需进行抽柱托梁需求出现。而对于钢筋混凝土框架结构来说,抽柱后传力路径打破、梁跨度增加,易引发构件承载力不足、整体抗震性能下降等问题。在施工过程中,既有建筑加固改造也需兼顾上部结构安全与周边环境影响,而传统施工的满堂架支撑、增设临时柱、斜撑,交叉支撑等措施往往存在工期长、造价高、施工复杂、对周围业态扰动过大等等弊端,在城市商业建筑改造项目中

【作者简介】张源(1992-),男,中国四川绵阳人,本科,工程师,从事土木工程研究。

时常没有应用条件。因此,开展既有框架结构抽柱托梁加固改造技术研究,优化设计方案与施工工艺,具有一定程度上的理论价值与工程意义。本文依托陕西省某商业楼改造工程,探讨设计优化、施工创新及效果验证方法,为同类工程提供技术参考。

1.2 国内外研究现状

国外对抽柱托梁技术研究起步早,广泛采用钢桁架、型钢混凝土梁等托换结构,结合精细化建模与抗震性能设计,技术体系成熟。相较而言,国内对此类技术研究较少;

本工程采用基于整体模型与局部模型结合的计算方法进行设计,采用增大截面法、粘钢加固法方式进行构件加固,“托换结构+抗震墙”组合方案有效提升了抽柱后结构的整体抗震能力,采用在抽柱所在托梁下增设桁架的方式解决了抽柱之后托梁强度、变形方面可能出现的问题。

施工方面,传统临时支撑方式存在诸多弊端,本工程创新性采用的无临时支撑施工技术,通过利用待拆除构件承载能力,避免临时支撑设置,在国内高烈度区、大跨度框架结构中应用案例较少,具备参考借鉴意义。

1.3 研究内容与技术路线

主要研究内容:

(1) 抽柱后结构整体抗震性能与构件承载力分析,明确设计难点;

(2) 制定整体加固与局部托换结合的设计方案;

(3) 无临时支撑施工技术创新与实践;

(4) 通过现场变形监测验证方案有效性。

技术路线:

(1) 基于工程概况与设计目标,建模计算识别设计难点;

(2) 制定综合加固方案;创新施工工艺;

(3) 对比监测数据与设计值,评估加固效果。

2 工程概况

2.1 工程基本信息

本工程为陕西省某商业楼,建成于2018年,总建筑面积约12000 m²,系钢筋混凝土框架结构。本工程地上6层、地下2层,地下1~2层为设备机房与停车场,地上为商业用途。基础采用筏板形式,整体与贴临建筑防震缝脱开,结构可独立计算。

2.2 结构设计参数

抗震设防烈度8度(0.2g),第二组;场地类别II类,特征周期 $T_g=0.40s$;框架结构抗震等级一级;设防分类丙类,设计使用年限50年;基本风压 $\omega_0=0.35kN/m^2$,地面粗糙度C类;计算时楼面活荷载按现行《通用规范》取值。

2.3 改造需求与设计目标

业主需将1~2层部分区域改造为挑空大空间,拆除1~2层2根框架柱及周边部分梁板,原框架梁跨度由6.5m增至13m。设计目标:

(1) 改造后结构整体抗震性能,关键指标均应满足规范要求;

(2) 托换结构及原有构件承载力满足荷载要求,挠度及变形情况满足规范要求;

(3) 施工最大限度减少对原有结构扰动,避免结构损伤。

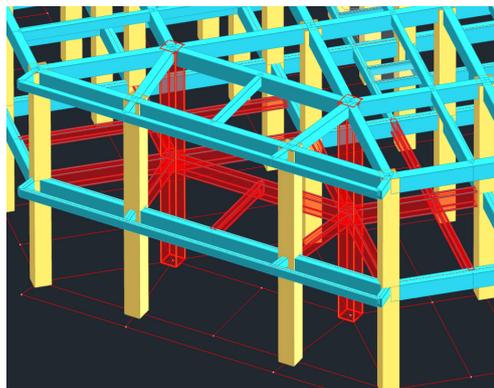


图1 改造部分示意图

3 设计难点与技术分析

3.1 整体抗震性能优化难点

原结构满足8度设防要求,抽柱后受力体系显著变化:

(1) 因拆除底层部分框架梁柱,导致整体结构抗震性能(如楼层位移角等大指标)及部分构件截面及配筋不满足规范要求;

(2) 周边框架柱轴压比增大,原设计值0.65,抽柱后增至0.82,接近一级框架柱轴压比限值0.85,安全储备不足。

3.2 构件承载力与变形控制难点

拆除框架柱后,原结构跨度6.5m的框架梁变为跨度13m的托梁,面临承载力不足与变形过大的双重问题:

(1) 承载力方面,抽柱所在上方原框架梁按6.5m跨度设计,根据抽柱后模型计算,承载力及现有配筋均无法满足13m跨度下的荷载要求。需通过加固措施提升构件承载力;

(2) 变形方面,大跨度托梁在恒载与活载作用下易产生过大挠度,影响正常使用。整体计算后原梁在13m跨度下的计算挠度略超过规范限值,但考虑到上部结构的约束作用,实际挠度需控制在更严格范围内,为安全起见,本工程在进行托梁加固时采用原结构模型中需拆除柱二层顶部轴力(基本组合1.3恒+1.5活)作为集中力,不考虑结构上部刚度进行计算。

3.3 施工扰动控制难点

既有商业建筑改造施工常存在以下控制难点:

(1) 传统施工措施往往采用满堂架支撑,增设临时柱,八字形或交叉斜撑作为临时支撑,占用大量室内空间,影响出入及商业运营,且工期长、造价高,对商业建筑物已完成的装修面产生破坏情况;

6 工程加固效果验证

6.1 变形监测结果分析

拆除完成后72小时持续变形监测显示：拆除后2小时结构出现初始下沉，Z1柱累计变形3.69mm，Z2柱4.70mm；

4~12小时变形速率减缓，部分位置轻微回弹，结构趋于稳定；24~72小时变形趋于平缓，无突变。最终Z1柱累计最大变形4.56mm，Z2柱4.45mm，均远小于设计容许值，满足规范要求，表明无临时支撑施工技术安全可靠，托换桁架承载效果良好。

表 1

监测时间	柱号	单次变形量（-下沉）	累计变形量	备注
拆除后 2 小时	Z1	-4.04	-3.69	桁架开始承担荷载，结构出现初始下沉
	Z2	-2.27	-4.70	
拆除后 4 小时	Z1	-1.30	-3.82	变形速率减缓，结构趋于稳定 部分回弹，属正常受力调整
	Z2	1.80	-4.52	
拆除后 12 小时	Z1	-0.66	-3.16	变形量持续减小，结构稳定性提升
	Z2	1.24	-3.28	
拆除后 24 小时	Z1	-1.09	-4.25	变形趋于平缓，无突变现象
	Z2	1.06	-4.34	
拆除后 72 小时	Z1	-0.31	-4.56	累计变形稳定，满足设计要求
	Z2	0.11	-4.45	

6.2 整体抗震性能验证

加固后采用YJK结构计算软件建模计算，对比加固前后关键抗震指标，结果显示楼层位移角、周期比、剪重比指标等均能满足现行规范要求，整体抗震性能达标。

6.3 构件承载力验证

框架梁经变形检测，承载力及挠度均满足设计与规范要求；

框架柱增大截面加固后，轴压比满足要求、抗震性能及承载力显著提升，安全储备充足；

钢桁架焊缝超声波探伤合格率100%，应力测试实测最大应力180MPa，远小于Q355B钢材屈服强度355MPa，承载力满足设计要求。

工技术安全可靠，满足业主大空间改造需求，可以为类似项目提供完整技术方案与工程借鉴。

7.2 展望

随着城市更新推进，既有建筑加固改造工程将增多，抽柱托梁技术仍有优化空间：

- （1）设计方面，结合BIM技术与有限元分析软件精细化建模，优化加固方案；
- （2）材料方面，探索碳纤维复合材料、超高强钢材等新型加固材料应用；
- （3）施工技术方面，优化无临时支撑工艺，结合智能化监测设备实现实时预警与动态调整；
- （4）标准规范方面，建议制定专门技术规程，明确设计、施工、验收要求，促进技术规范应用。未来需持续总结经验、创新技术，为城市更新提供更可靠、高效、经济的技术支撑。

7 结论与展望

7.1 结论

（1）采用增大截面加固框架柱+增设剪力墙”的整体抗震加固方案，有效解决抽柱后结构整体抗震能力下降问题，各项抗震指标均能够满足规范；

（2）钢桁架托换结构设计合理，连接节点可靠，能有效承担上部荷载，加固后结构累计最大变形4.56mm，远小于砼框架梁挠度限值 $(1/400)=13.5\text{m}/400=33.5\text{mm}$ ，变形控制效果良好；

（3）无临时支撑抽柱托换施工技术创新实用，利用待拆除柱作为临时支撑，配合开洞避让、静力切割工艺，显著降低施工扰动、缩短工期、节约造价，解决传统施工弊端；

（4）施工全过程监测与质量检测表明，设计方案与施

参考文献

- [1] GB 50011-2010,建筑抗震设计规范(2016年版)[S].
- [2] GB 50367-2013,混凝土结构加固设计规范[S].
- [3] JGJ 145-2013,混凝土结构后锚固技术规程[S].
- [4] 程绍革,任卫教.钢筋混凝土框架结构抗震加固方法综述[J].建筑科学,2001,(03):4-7.2001.03.002.
- [5] 李视令,梁发云.钢筋混凝土框架梁柱节点的抗震加固[J].建筑技术,2001,(06):375-377.
- [6] 田飞.钢筋混凝土结构改造施工中加固方法优选研究[D].西安建筑科技大学,2015.