

DOI: 10.7672/sgjs2025110092

屋面行驶汽车式起重机回顶体系与 主体结构协同受力分析

段宇民¹, 刘慧萍¹, 刘彬², 施豪杰²

(1. 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 陕西建工第五建设集团有限公司, 陕西 西安 710032)

[摘要] 某国际机场工程南北停车楼主体结构施工结束后,需利用 50t 汽车式起重机对塔式起重机进行拆除,由于塔式起重机位置及现场环境限制,汽车式起重机行进路线和起吊区均位于远期预留的架空区域,其荷载超过原设计承载力,原结构体系无法满足承载力要求。通过钢板分散集中荷载,架空层及其下层区域布置回顶架体,采用有限元软件建立主体结构与回顶体系整体协同受力分析模型,并进行承载力计算,将有限元分析结果与理论计算相结合,验证回顶方案的可行性和安全性,最后进一步优化回顶体系资源投入,从而降低施工成本。

[关键词] 塔式起重机;拆除;力学性能;有限元分析

[中图分类号] TU61

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0092-05

Analysis of Synergistic Force Between Roof Traveling Automobile Crane Roof Return System and Main Structure

DUAN Yumin¹, LIU Huiping¹, LIU Bin², SHI Haojie²

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. China Shaanxi Construction Engineering Fifth Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract: After the construction of the main structure of the north and south parking building of an international airport project, it is necessary to use a 50t truck crane to dismantle the tower crane. Due to the restrictions of the location of the tower crane and the site environment, the driving route and lifting area of the truck crane are located in the overhead area reserved for the long term. The load is far beyond the original design bearing capacity, and the original structural system cannot meet the bearing capacity requirements. By dispersing the concentrated load of the steel plate, the overhead layer and its lower layer were arranged in the topping support frame body. The finite element software was used to establish the overall cooperative force analysis model of the main structure and the topping support system, and the bearing capacity was calculated. The finite element analysis results were combined with the theoretical calculation to verify the feasibility and safety of the topping support scheme. Finally, the input of the topping support system resources has been further optimized, thereby reducing the construction cost.

Keywords: tower crane; dismantle; mechanical properties; finite element analysis

0 引言

为保证工程的顺利实施,塔式起重机被广泛应用于建筑施工材料、构(配)件的垂直与水平运输,在主体结构施工完成后,需对塔式起重机进行拆除。目前,单体建筑的塔式起重机通常在天然地基、既有道路或场地上采用汽车式起重机进行拆除。对于规模庞大、占地面积较广的群体工程,塔

式起重机往往需设置于工程内部。此类塔式起重机的拆除作业通常在已完成的主体结构或车库顶板上,采用汽车式起重机进行拆除。但在结构设计阶段,并未充分考虑此工况下的荷载效应^[1]。通常情况下是将此工况下的荷载换算成等效的均布荷载与设计荷载比较,当等效荷载超过设计荷载时,采取加固措施^[2]。实际上,当此类荷载远超过设计荷载,为确保结构安全,工程中常采用支撑体系从基础顶面至结构顶板进行全部回顶,使荷载逐步传

[作者简介] 段宇民, 硕士, E-mail: 1032811326@qq.com

[收稿日期] 2025-01-20

递到基础,从而避免对结构造成质量上的缺陷^[3-6]。但这种从底到顶的全回顶体系会增加资源的投入,施工成本高。

本文以某国际机场工程南停车楼塔式起重机拆除为背景,将回顶体系与结构主体作为整体,对二者的协同受力进行有限元及理论分析,在保证结构安全的前提下,优化回顶层数及架体布置方式,减少回顶架体材料投入,降低施工成本。

1 工程概况

某国际机场工程是国家重大基础设施项目,其中综合交通中心及轨道预留工程为该项目的核心施工内容之一,总建筑面积 54.5 万 m²,包含南北停车楼、南北过夜楼、换乘中心等,如图 1 所示。

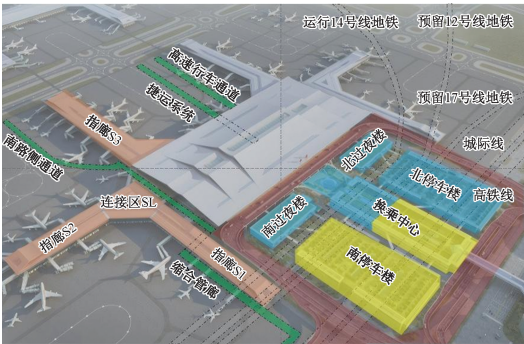


图 1 综合交通中心及轨道预留工程

Fig. 1 Comprehensive transportation center and track reservation project

南北停车楼为钢筋混凝土框架结构,地上 4 层,地下 3 层,其中 2 层夹层(标高 11.000m)为远期加建的架空层,屋面层设置停车区,屋面顶板厚 130mm,结构总高度 14.5m,南北停车楼共计安装塔式起重机 12 台,由于吊装距离及位置限制,拆除 4, 5, 18, 20, 23 号塔式起重机时,采用 1 台 400t 起重机将 50t 起重机吊至屋面结构板上进行塔式起重机拆除。南停车楼塔式起重机布置如图 2 所示。

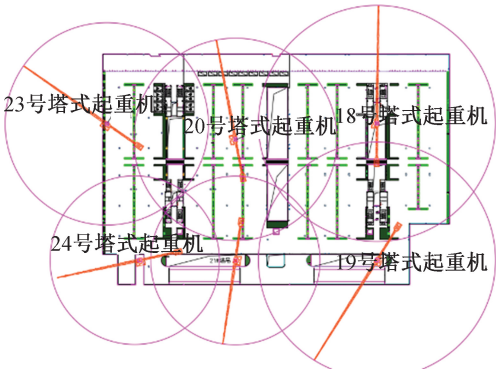


图 2 南停车楼塔式起重机布置

Fig. 2 South parking garage tower crane arrangement

2 回顶方案设计

2.1 拆除机械参数

选用汽车式起重机,其轮胎为子午线真空胎,前轮触地尺寸 0.355m×0.2m,中、后轮触地尺寸 0.355m×0.2m,起重机自重 41.6t,配重 8t,支腿间距 7.3m×6.05m。

2.2 行进路线及吊装作业区方案

采用 400t 履带式起重机将 50t 汽车式起重机吊至屋面结构板上,分 3 次拆除 18, 20, 3 号塔式起重机,汽车式起重机 3 次行进路线如图 3 所示,拆除 18 号塔式起重机时,汽车式起重机行进路线沿着 ③③, ④④轴,由 ①轴行进至 ①轴,吊装站位区位于 ③③, ④④轴/ ①, ①轴。拆除 20 号塔式起重机时,汽车式起重机沿着 ②②, ②②轴由 ①轴行驶至 ①轴,再沿着 ①, ①轴从 ②轴行驶至 ②轴后沿着 ②②, ②②轴从 ①轴行驶至 ①轴,吊装站位区位于 ②②, ②②轴/ ①, ①轴。拆除 23 号塔式起重机时,汽车式起重机沿着 ②②, ②②轴由 ①轴行驶至 ①轴,再沿着 ②②, ②②轴从 ①轴行驶至 ①轴,吊装站位区位于 ①①, ②②轴/ ①, ①轴。①①~ ③③轴/ ①~ ①轴屋面下层区域为预留架空层,层高 7m。

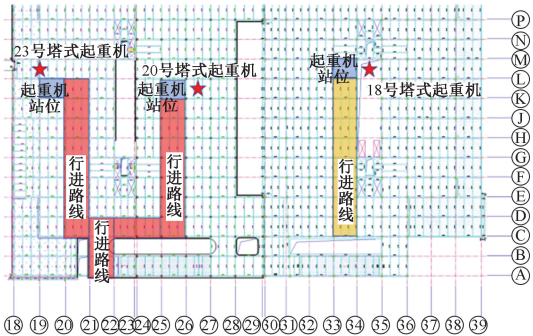


图 3 行进路线及吊装站位区布置

Fig. 3 Marching route and hoisting station area layout

2.3 回顶方案

在行进路线及作业区采用承插型盘扣式钢管脚手架搭设满堂架作为回顶体系,汽车式起重机行进路线区域回顶 1 层,回顶标高 7.500~14.500m,层高 7m。起吊作业区域回顶 2 层,回顶标高 4.000~14.500m,层高分别为 3, 7m。行进路线区域楼板下立杆间距为 900mm×1 200mm,梁下立杆间距为 600mm×900mm,吊装作业区梁板下立杆间距均为 600mm×600mm,架体标准步距为 1 500mm,顶层步距 0.3m,扫地杆高度 0.2m。采用 B 型支撑架,竖向斜杆间隔 2 跨布置。水平杆顶层及扫地杆设置层布置水平剪刀撑,水平剪刀撑与支架纵(横)向夹角保持 45°~60°。

2.4 回顶体系相关参数

作为回顶主要支撑架体的承插型盘扣式钢管满堂架截面尺寸为 $\phi 48 \times 3.2$, 采用 Q355b 钢管, 弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 抗压和抗弯强度为 300 N/mm^2 , 抗剪强度为 180 N/mm^2 。为分散汽车轮胎及起重机支腿的集中荷载, 在行进区及作业区铺设 $3\,000 \text{ mm} \times 6\,000 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 钢板。

3 协同受力分析

利用有限元分析软件模拟回顶加固后起重机行进及吊装作业时, 回顶体系与结构主体协同受力情况。

3.1 基本参数

3.1.1 结构基本参数

结构板钢筋为双层双向 $\phi 12 @ 200$, 在主次梁位置与拉筋间隔设置支座附加筋, 附加筋均为 $\phi 10 @ 200$, 每边伸出支座长度 $0.95 \sim 0.11 \text{ m}$ 。框架柱为圆形柱, 直径 $1\,200 \text{ mm}$, 主梁截面尺寸为 $600 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$, 次梁截面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$, 结构板厚度 130 mm 。结构梁板混凝土强度等级为 C40, 结构柱混凝土强度等级为 C50。

3.1.2 单元类型、材料本构及约束选择

梁、柱、楼板混凝土均采用实体单元, 梁纵筋、箍筋采用桁架单元, 架体采用杆系单元。混凝土受压本构模型采用单轴受压应力-应变本构模型, 受拉本构模型采用单轴受拉应力-应变本构模型, 钢筋及架体本构模型选择理想弹塑性模型, 采用嵌入命令将纵筋、箍筋装配到整个模型中。在钢板中心施加轮压均布荷载开展弹塑性分析, 钢板与混凝土楼板为滑移连接接触, 由于回顶层架体下端处为楼板而非筏板, 会发生竖向位移, 可将其视为弹性支座。梁、板、柱之间为刚性连接, 柱底与地面为刚性连接, 架体立杆之间为刚性连接, 立杆与横杆为铰接, 立杆底部与楼板为铰接, 立杆顶部与楼板耦合视为刚性连接。

3.1.3 确定最不利荷载

当汽车式起重机位于楼板短跨方向跨中时, 轮压荷载最不利, 长跨方向根据最不利荷载布置方法确定最不利轮压荷载位置。根据行进路线及结构图纸, 选取汽车式起重机行进路线下 ①~⑥轴/②⑤~②⑦轴区域为有限元计算对象, 此时为最不利情况。该区域采用普通混凝土梁板柱, 长 27 m , 宽 24 m 。

3.2 汽车式起重机行进时受力分析

3.2.1 楼板承载力分析

原结构楼板受压区纵向钢筋合力点至构件边缘距离为 15 mm , 受拉区纵向钢筋合力点至构件边

缘距离为 25 mm , 有效高度为 115 mm , 根据 GB 50010—2010(2015 年版)《混凝土结构设计规范》, 原结构楼板承载力为 $18.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。汽车式起重机行进时, 将回顶体系与结构作为整体进行分析时, 楼板受力如图 4 所示。由图 4 可知, 楼板跨中最大弯矩为 $0.45 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 小于楼板承载力, 满足要求。

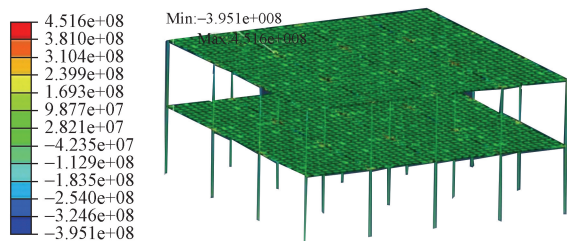


图 4 汽车式起重机行进时楼板最大弯矩(单位: $10^{-3} \text{ N} \cdot \text{mm}$)

Fig. 4 Maximum bending moment of the floor during automobile crane movement (unit: $10^{-3} \text{ N} \cdot \text{mm}$)

3.2.2 楼板挠度分析

混凝土楼板最大挠度按荷载标准组合确定, 其计算值不应超过《混凝土结构设计规范》表 3.4.3 规定的挠度限值, $l_0/250 = 16 \text{ mm}$ 。汽车式起重机行进时, 将回顶体系与结构作为整体进行分析时, 楼板挠度如图 5 所示。由图 5 可知, 楼板最大挠度 5.91 mm , 小于规范规定的挠度限值, 满足要求。

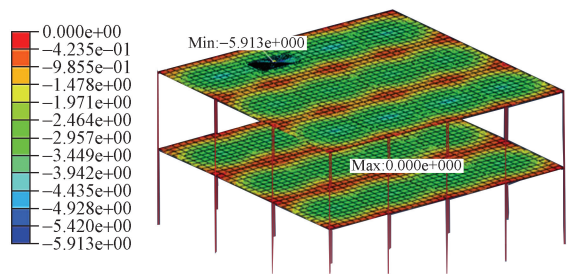


图 5 汽车式起重机行进时楼板挠度(单位: mm)

Fig. 5 Deflection of the floor during automobile crane movement (unit: mm)

3.3 汽车式起重机吊装作业时受力分析

汽车式起重机吊装作业时, 最大吊重 11 t , 汽车式起重机自重 41.6 t , 配重 8 t , 支腿间距 $7.3 \text{ m} \times 6.05 \text{ m}$, 其计算简图如图 6 所示。根据汽车式起重机自重、配重及起吊物自重荷载, 支腿最大受力标准值为 267.5 kN , 支腿反力设计值为 511.2 kN 。支腿下垫设 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 25 \text{ mm}$ 钢板分散支腿支撑力, 防止局部荷载集中造成楼板破坏。

3.3.1 楼板承载力及变形分析

选取汽车式起重机吊装作业下 ①~⑩轴/②⑤~②⑦轴区域为有限元计算对象。单根支腿反力荷载为 511.2 kN , 荷载较大, 在吊装过程中应尽量保证支

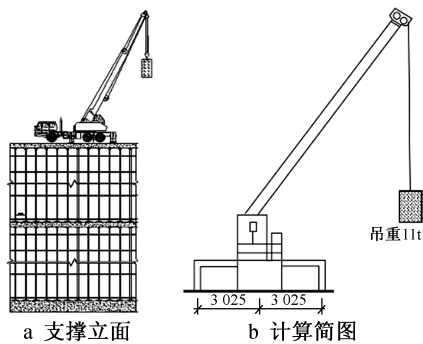


图 6 汽车式起重机吊装分析

Fig. 6 Car hoisting support lifting analysis

腿靠近梁,以提高施工安全性。但计算中考虑的是施工最不利工况,即支腿靠近楼板跨中。根据回顶体系的架体搭设规划,在框架模型基础上建立盘扣式满堂架,有限元模型如图 7 所示。

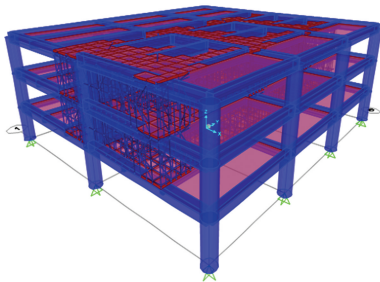


图 7 吊装作业时有限元模型

Fig. 7 Finite element modeling during lifting operations

汽车式起重机吊装最大塔式起重机部件时,有限元分析结果如图 8,9 所示。由图 8 可知,屋面板跨中最大弯矩 $3.9\text{kN}\cdot\text{m}$,小于原结构楼板承载力。由图 9 可知,楼板最大挠度 4.107mm ,小于规定的挠度限值,汽车式起重机吊装作业时,在吊装区域下回顶 2 层,回顶体系与结构共同受力满足塔式起重机拆除吊装作业条件。

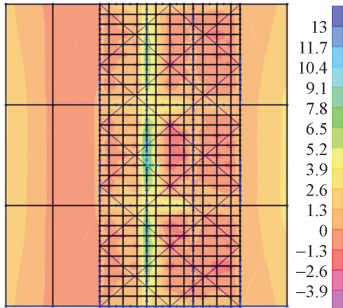


图 8 吊装作业时屋面层楼板弯矩云图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Fig. 8 Bending moment diagram of roof level floor slab during lifting operations(unit: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

3.3.2 架体立杆稳定性验算

有限元计算结果显示,支腿作用范围内立杆出

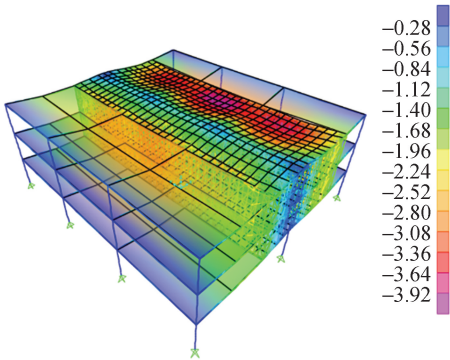


图 9 吊装作业时楼板及满堂架竖向位移(单位:mm)

Fig. 9 Vertical displacement of floor slabs and full-height racks during lifting operations(unit:mm)

现最大轴力,为 46.89kN 。根据 JGJ/T 231—2021《建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准》5.3.2 条,立杆计算长度为 1.71m ,立杆长细比为 106.25 。查附录 C 表 C.0.1,轴心受压构件稳定系数为 0.428 。由此可知,立杆轴向承载力为 58.17kN ,大于立杆最大轴力,满足规范要求。根据承插型盘扣式钢管脚手架材料属性,可托座最大承载力 $140\text{kN}>46.89\text{kN}$,满足要求。

3.3.3 楼板抗冲切验算

根据《混凝土结构设计规范》,汽车式起重机轮压、汽车式起重机站位时支腿以及满堂架立杆位置楼板抗冲切承载力计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,有限元计算荷载 $<$ 抗冲切承载力,楼板抗冲切能力满足要求。

表 1 楼板抗冲切承载力计算结果			
Table 1 Calculation results of impact resistance of floor slabs			
荷载类型	楼层 标高/m	抗冲切承载力/kN	有限元计算 荷载/kN
轮压荷载	14.500	308.74	105.35
支腿荷载	14.500	1 058.09	511.20
立杆荷载	4.500	609.44	56.34

4 工程实施情况

现场塔式起重机拆除实施过程如图 10 所示。通过现场监测,拆除全过程结构梁板无裂缝产生,回顶体系架体稳定,采用钢板可有效分散支腿及轮胎的集中荷载,避免楼板发生冲切破坏。

5 结语

本文以某国际机场南北停车楼主体结构施工结束后,汽车式起重机行走在屋面结构板上进行塔式起重机拆除为背景,分析了汽车式起重机在结构楼板上行走及站位吊装作业 2 种工况下,考虑回顶体系与结构主体协同受力,对主体结构受力、变形



图 10 塔式起重机拆除
Fig. 10 Tower crane dismantling

及结构板抗冲切能力进行分析,结合现场实施情况,得出以下结论。

1)在多层框架结构楼板上行驶大型汽车式起重机时,采用回顶体系增强结构安全性是可行的。

2)楼板及回顶架体均满足承载力及变形要求。吊装作业时,楼板抗冲切能力满足要求。

3)在考虑回顶体系与结构主体协同受力下,充分发挥原有结构承载能力,回顶架体可从非筏板层进行回顶,减少架体材料投入,从而降低施工成本。

参考文献:

[1] 李朝来,宋志强,缪应璟,等. 基坑内支撑切割块水平转运与结构楼板协同承载计算分析[J]. 建筑结构,2023,53(S2): 2543-2547.
LI C L,SONG Z Q,MIAO Y J, et al. Calculation and analysis of collaborative bearing capacity of structural floors for horizontal transportation of support cutting blocks in the foundation pit[J]. Building structure,2023,53(S2):2543-2547.

[2] 林泓志,侯文崎,秦学锋,等. 大跨度地下无柱车站临时支撑

卸载方案优化与现场监测[J]. 建筑结构学报,2023,44(3): 294-302.

LIN H Z,HOU W Q,QIN X F,et al. Optimization for temporary support unloading scheme and on-site monitoring of large-span column-free underground station [J]. Journal of building structures,2023,44(3):294-302.

[3] 刘林钊,谢显鹏,满宁宁,等. 施工电梯基础与地下室顶板一体化深化设计思路与施工要点分析[J]. 科技创新与应用,2024,14(6):112-115.

LIU L Z,XIE X P,MAN N N,et al. Analysis of the integration of the construction elevator foundation and the basement roof, deepening the design ideas and construction points [J]. Technology innovation and application,2024,14(6):112-115.

[4] 宋志强,刘洋. 顶部行走履带吊的既有地下结构与支撑架协同承载计算[J]. 建筑结构,2023,53(S2):1623-1630.

SONG Z Q,LIU Y. Calculation of cooperative bearing capacity of existing underground structure and support frame of crawler crane with top walking [J]. Building structure, 2023, 53 (S2): 1623-1630.

[5] 揭志祥,叶国新,于立海,等. 复杂工况下多台汽车吊行走楼板加固支撑研究[J]. 钢结构,2014,29(7):70-72.

JIE Z X,YE G X,YU L H,et al. Research on the reinforced floor slabs for several mobile cranes to pass through under complicated conditions[J]. Steel construction,2014,29(7):70-72.

[6] 胡长明,赵云波,汪杰,等. 模板支撑体系与混凝土楼板协同作用的有限元分析[J]. 工业建筑,2014,44(5):106-110.

HU C M,ZHAO Y B,WANG G,et al. Finite element analysis of cooperative effects of formwork-supporting system and concrete floors[J]. Industrial construction,2014,44(5):106-110.

(上接第 39 页)

[5] 曾超峰,郑刚,薛秀丽. 大面积基坑开挖前预降水对支护墙变形的影响研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(6):1012-1021.

ZENG C F, ZHENG G, XUE X L. Wall deflection induced by pre-excavation dewatering in large-scale excavations[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(6): 1012-1021.

[6] 薛秀丽,李淼坤,曾超峰. 开挖前降水作用下基坑围挡结构-地层相互作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):440-446.

XUE X L, LI M K, ZENG C F. Interaction mechanism between retaining wall and soil under pre-excavation dewatering [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2019,47(5): 440-446.

[7] 刘文杰,何旭峰. 基坑预降水试验及其对地铁隧道的影响分析[J]. 工程建设与设计,2018(23):74-75,78.

LIU W J, HE X F. Pre-dewatering test of foundation pit and the influence on subway tunnel [J]. Construction & design for engineering, 2018(23): 74-75,78.

[8] 安少楠. 软土地区地铁深基坑降水与地表沉降规律分析研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.

AN S N. Analysis and research on dewatering and surface

settlement of metro deep foundation pit in soft soil area [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.

[9] 罗志华. 基坑开挖前降水对围护变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):185-190.

LUO Z H. Analysis of dewatering before foundation pit excavation influence on enclosure deformation [J]. Journal of water resources and architectural engineering,2021,19(2):185-190.

[10] 张敏超. 潜水区悬挂式帷幕基坑开挖前预降水引起的变形特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.

ZHANG M C. Study on deformation characteristics by pre-dewatering before excavation of foundation pit with suspended impervious curtain in phreatic aquifer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[11] 张裕,王俊鹏,钟伟慈,等. 富水砂层深基坑降水开挖对邻近综合管廊的影响[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):73-78.

ZHANG Y, WANG J P, ZHONG W C, et al. Influence of dewatering excavation of deep foundation excavation in water-rich sand layer on adjacent comprehensive pipe gallery [J]. Construction technology,2024,53(9):73-78.