

DOI: 10.7672/sgjs2025110097

盖挖逆作施工群塔布置设计及作业技术研究

吴余海

(北京北投静态交通投资运营有限责任公司,北京 101117)

[摘要] 针对盖挖逆作施工中的塔式起重机基础设计及施工、群塔作业的安全性进行研究,研发了X形支撑柱加固装置,保证了塔式起重机基础的稳定性,增大了安全系数。优化了塔式起重机基础支撑桩柱施工方法,采用先插法将钢管柱与抗拔桩钢筋笼可靠连接后同时吊装至设计标高,保证了垂直度,提高了施工效率。采用MIDAS有限元软件分析了塔式起重机基础稳定性,利用Revit建模技术进行了群塔布置防碰撞模拟,避免了多塔同时作业发生碰撞的现象。

[关键词] 基坑;塔式起重机;加固;碰撞

[中图分类号] TU990.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0097-05

Layout Design and Operation Technology of Group Tower in Top-down Construction

WU Yuhai

(Beijing Beitou Static Transportation Investment and Operation Co., Ltd., Beijing 101117, China)

Abstract: A study was conducted on the design and construction of tower crane foundations, as well as the safety of group tower operations during cover excavation reverse construction. An X-shaped support column reinforcement device was developed to ensure the stability of the tower crane foundation and increase the safety factor. The construction method of the tower crane foundation support pile column has been optimized. The steel pipe column is reliably connected to the anti-pull pile reinforcement cage using the first insertion method, and then lifted to the design elevation at the same time, ensuring verticality and improving construction efficiency. The stability of the foundation of the tower crane was analyzed using MIDAS finite element software, and the collision avoidance simulation of the group tower layout was carried out using Revit modeling technology, which prevented the occurrence of collisions during simultaneous operation of multiple towers.

Keywords: foundation excavation; tower crane; reinforcement; collision

0 引言

盖挖逆作施工工法因占地小、工期短在城市施工中具有显著的优势^[1-3],塔式起重机作为提高施工效率的重要设备,许多学者进行了研究,徐青^[4]通过主动调控横撑内力控制塔根稳定,缩短工期的同时降低了造价;郑喜平^[5]研究了海上风电深水条件下塔基础的设计施工方法,实现打桩快速化,桁架结构安装便利化,提高了施工工效;陈祥军等^[6]针对普通风力发电机塔式起重机吊装机钢制横梁重量大、易受到振动破坏的特性,将钢制横梁改为铝制结构,并利用有限元分析对横梁结构进行了改

进,提高了塔式起重机的使用寿命;李凯等^[7]以某枢纽机场改扩建工程为背景,设计了群塔系统布置方案,并基于BIM技术和数值分析技术分析了塔式起重机使用期间的安全性。本文基于盖挖逆作富水砂层深基坑为工程背景,对塔式起重机布置过程中的群塔作业、塔式起重机基础设计进行系统性研究,优化施工工艺,从而保证塔式起重机施工及使用过程中的安全可靠。

1 工程概况

1.1 项目概况

北京城市副中心站综合交通枢纽工程1标段包含核心站房区和东咽喉区,占地面积3万m²,其中核心站房区为地下3层,标高10.783m以下2层采

用盖挖逆作法施工,标高 10.783m 以上部分采用顺作法施工;东咽喉区为地下 2 层结构,地上为轻质土回填东六环西侧路行车区域。工程地层主要以细砂层、粉质黏土层为主,桩柱施工成孔、垂直度控制难度大。塔式起重机在标高 13.000m 作业面进行基础施工和立塔工作。

1.2 塔式起重机概况

塔式起重机基础承台为 6.7m×6.7m×1.8m 的钢筋混凝土方台,承台内部斜对角布置 2 道 11.2m×1.8m 的暗梁,承台四角布置直径 630mm、厚 14mm 的钢管柱,柱间距为 5m,2 根钢管柱采用由 L180×110×16 斜撑+HW200×200×8 水平撑组成的 X 形支撑加固,支撑焊缝为双面满焊,焊缝高 8mm,钢管柱与楼板间采用 I40b 横置于楼板中心标高处,钢管柱下插直径 1m 的钻孔灌注桩,桩长 16m(见图 1)。

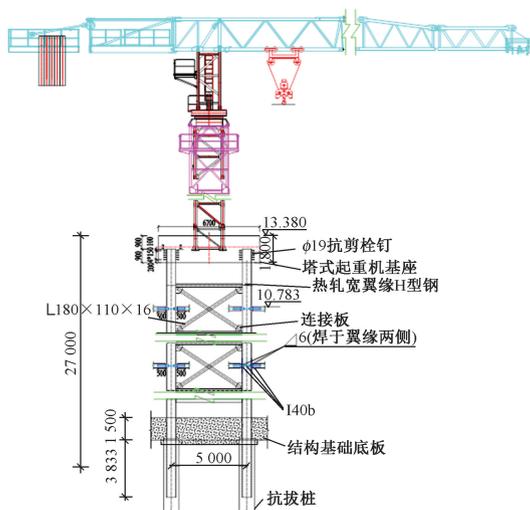


图 1 塔式起重机

Fig.1 Tower crane

施工作业区域内设置 5 台塔式起重机,1 号塔型号 WA7527-16D、起重臂长 60m,2 号塔型号 T7020-12KA、起重臂长 55m,3 号塔型号 WA6017-8B、起重臂长 50m,4 号塔型号 WA7025-12E、起重臂长 60m,5 号塔型号 WA6017-8B、起重臂长 50m。

1.3 施工顺序

先施工顶板,然后在顶板下进行土方开挖,自上而下随挖土方随施工层板直至到底板。盖挖顺作施工过程中,土方开挖到底后,塔式起重机柱悬臂 33m,若无斜撑等辅助措施,塔式起重机失稳倾覆安全风险大。盖挖逆作自上而下依次施工层板过程中,塔式起重机柱穿层板位置四周对称采用工字钢与层板连接,3 层结构板将 33m 长塔柱均分,空间上降低了悬臂长度,增加了塔式起重机柱稳定性,

时间上塔式起重机投入使用的时间提前,避免了顺作施工塔式起重机无法提前投入使用的弊端。

2 基础结构稳定性分析

2.1 技术指标

塔式起重机自重提高系数取 1.1,分别考虑塔式起重机工作状态和非工作状态,按 1 号塔进行计算,工作状态下的弯矩为 3 800.4kN·m、水平力为 43.2kN、垂直力为 933.2kN、扭矩为 411.0kN·m;套架降低到最低位置时,非工作状态下弯矩为 5 779.7kN·m、水平力为 182.3kN,垂直力为 792.0kN、扭矩为 0。

荷载组合按照承载能力极限状态基本组合设计,分项系数取 1.2,临时结构重要性系数取 1.0。

2.2 材料性能参数

抗拔桩基础混凝土采用 C35 水下混凝土,弹性模量为 30 000MPa,剪切模量为 12 000MPa,泊松比为 0.2,轴心抗压、抗拉强度标准值均为 20.1MPa,轴心抗压、抗拉强度设计值分别为 13.8,1.39MPa,热膨胀系数为 0.000 01。

钢材采用 Q235B,弹性模量为 210 000MPa,剪切模量为 70 000MPa,泊松比为 0.25,抗拉强度为 235MPa(厚度 $t \leq 16\text{mm}$),抗压强度为 375MPa($t \leq 40\text{mm}$),抗剪强度为 170MPa($t \leq 16\text{mm}$)。

2.3 边界条件及计算模型

底部按固结处理,斜撑与格构柱间采用释放梁端约束方式,按铰接模拟。采用 MIDAS 有限元软件建立 27m 高基础结构进行模拟计算。

2.4 结构计算

2.4.1 结构强度计算

1) 钢管柱强度计算

承载能力极限状态基本组合下,计算结果显示钢管柱最大拉应力为 34.4MPa,最大压应力为 125.5MPa,满足要求。

2) X 形支撑强度计算

X 形支撑最大拉应力为 20.3MPa,最大压应力为 28MPa,均满足要求。

3) X 形支撑抗拉承载力计算

系杆抗拉承载力需满足 $\gamma_0 T_{id} < f_{sd} A_s$,其中 γ_0 为结构重要性系数,取 1; T_{id} 为系杆拉力设计值,取 3 170kN; f_{sd} 为系杆抗拉设计值,取 280MPa; A_s 为系杆截面积,16 936mm²。相关数值代入得,0.017kN < 4 742kN,满足要求。

2.4.2 结构稳定计算

考虑结构自重作用和塔式起重机工作状态下塔式起重机底作用为可变荷载,在该工况下,结构

第5阶失稳模态如图2所示。计算结果显示,前5阶失稳模态均为支撑构件面外失稳,最小临界荷载系数为4.2,满足要求。

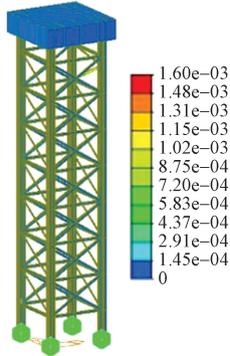


图2 结构失稳模态计算云图

Fig.2 Cloud diagram of structural instability mode calculation

2.4.3 承台承载力计算

1) 承台抗剪切强度计算

承台抗剪切强度需满足:

$$\gamma_0 V_d < [0.9 \times 10^{-4} (2 + 0.6P) f_{cu,k}^{1/2}] / m b_s h_0 \quad (1)$$

式中: V_d 为计算斜面以外各排桩最大剪力设计值的总和,取4608kN; $f_{cu,k}$ 为边长150mm的混凝土立方体抗压强度标准值,取30MPa; P 为配筋率,取0.314; m 为剪跨比,取0.768; b_s 为撑杆计算宽度,取3410mm; h_0 为承台有效高度,取1580mm。相关数值代入式(1)得出承台抗剪强度满足要求。

2) 角桩向上冲切承台的冲切承载力计算

角桩向上冲切承台的冲切承载力需满足:

$$\gamma_0 F_{1d} < 0.6 f_{td} h_0 [2a_{px} (b_y + a_y/2) + 2a_{py} (b_x + a_x/2)] \quad (2)$$

式中: a_{py} , a_{px} 为冲切承载力系数,取0.83; b_y , b_x 为承台边缘至桩内边缘的水平距离,取1.137m; a_x , a_y 为承台边缘到桩边缘 x , y 方向的水平距离,取1.213m; F_{1d} 为角桩竖向力设计值,取2304kN; f_{td} 为混凝土轴心抗拉强度设计值,取1.39MPa; h_0 为承台有效高度1.58m。相关数值代入式(2)得出角桩向上冲切承台的冲切承载力满足要求。

3) 边桩向上冲切承台的冲切承载力计算

边桩向上冲切承台的冲切承载力需满足:

$$\gamma_0 F_{1db} < 0.6 f_{td} h_0 (2a_{px} (b_p + h_0) + 0.667 (2b_x + a_x)) \quad (3)$$

式中: b_p 为桩的边长,取0.57m; b_x 为承台边缘至桩内边缘的水平距离,取1.213m; a_x 为边桩边缘至相应柱或墩台边缘的水平距离,取1.213m; γ_0 为结构重要性系数,取1; F_{1db} 为边桩竖向力设计值,取

2304kN。相关数值代入式(3)得出边桩向上冲切承台的冲切承载力满足要求。

3 施工关键技术

3.1 工艺流程

施工工艺流程:测量放线→旋挖钻成孔→下放桩基钢筋笼→桩基钢筋笼与钢管柱钢筋笼孔口对接→桩基、钢管柱钢筋笼整体下放至指定标高→下放钢管柱至指定标高并固定→灌注混凝土至设计标高→绑扎承台钢筋→预埋塔式起重机固定节→浇筑承台混凝土→养护→立塔→土方开挖→安装X形支撑→塔式起重机施工完毕拆除→钢管柱防水处理→浇筑筏板混凝土。

3.2 桩柱一体化施工

钢筋笼、钢管柱采用260t主吊、150t副吊进行双机抬吊,钢管柱钢筋笼吊至孔口位置后,将钢管柱内钢筋笼中心与桩基钢筋笼中心对齐并缓慢下放,钢管柱内钢筋笼插入桩基钢筋笼内,插入长度达到8m停止下放并保持该高度。人工调整后,将钢管柱内钢筋笼插入部分钢筋与桩基钢筋笼主筋间断焊接,焊接长度150mm,间隔150mm(见图3)。

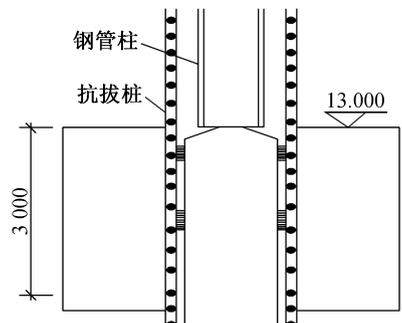


图3 桩钢筋笼与钢管柱连接

Fig.3 Connection of pile reinforcement cage and steel pipe column

3.3 X形支撑施工

主体结构顶板施工完成后进行土方开挖,随分层挖土深度,每2根钢管柱之间逐层安装X形支撑,支撑由上下2道HW200×200×8横撑、中间2道交叉的L180×110×16斜撑组成,斜撑通过14mm厚的梯形连接板与钢管柱焊接,上下2道X形支撑安装悬臂高度≤3.2m,如图4所示。

3.4 钢管柱拆除底板防水处理

塔式起重机基础支撑钢管柱拆除后在底板范围内的钢管柱顶及柱身焊接宽200mm、厚1mm的止水环并缠绕遇水膨胀止水条,如图5所示。

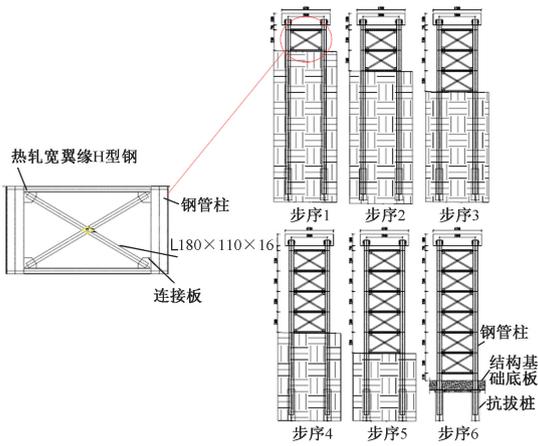


图 4 X形支撑安装

Fig. 4 X-shaped support installation

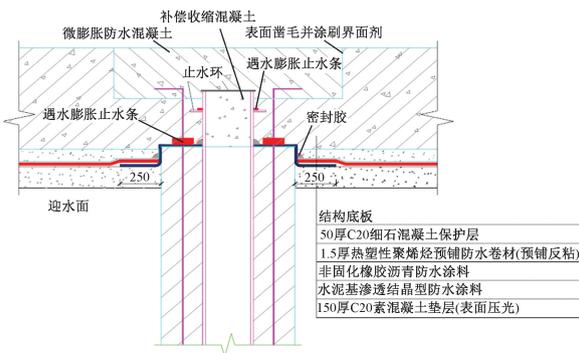


图 5 钢管柱拆除后柱头防水处理

Fig. 5 Waterproof treatment of column head after demolition of steel pipe column

4 群塔布置

4.1 影响因素

1) 施工环境复杂

场地北侧京哈铁路正线距离基坑边线 32m, 考虑不利状态下塔式起重机倾覆后的大臂着地点距离铁路正线 > 15m。场地西侧为相邻施工单位已经投入施工的塔式起重机, 塔式起重机布置要避免与相邻单位干扰。场地东侧为城市主干道, 车流量大, 工作状态下的起重臂不能悬于主干道上空。

2) 施工体量大

该工程建筑面积 10 万 m², 且基坑为不规则形状; 场地内的施工材料多, 场内平面倒运及竖向倒运频繁, 使施工场地塔式起重机必须全覆盖。

3) 结构梁板复杂

该工程结构梁平均尺寸高 2.5m、宽 2m, 且存在大量钢结构梁; 结构梁分布密集, 为了保证结构梁的完整性, 塔式起重机支撑柱尽可能避开结构梁, 增加了塔式起重机布置的复杂性。

4) 单塔交叉数量多

存在单台塔式起重机与 4 台塔式起重机空间交叉的情况, 属于超过一定规模的危险性较大工程。

4.2 群塔平面布置

群塔作业的特点为多塔重叠交叉作业, 群塔平面布置遵循 GB 5144—2025《塔式起重机安全规程》中 2 台起重机之间的最小架设距离应保证处于低位的起重机臂架端部与另一台起重机塔身之间至少距离 2m 的原则。群塔平面布置如图 6 所示, 相邻塔式起重机水平、交叉距离如表 1 所示。

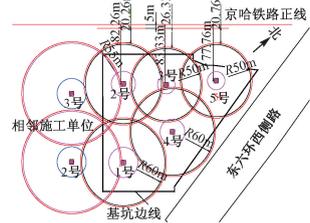


图 6 群塔平面布置(单位:m)

Fig. 6 Multi-cranes layout(unit:m)

4.3 Revit 布塔干扰模拟

根据施工场地条件布置 5 台塔式起重机, 其中 1, 2, 4 号塔式起重机、相邻工区 2, 3 号塔式起重机作业幅度交叉, 2 号塔式起重机与 1, 3, 4 号塔式起重机、相邻工区 3 号塔式起重机作业幅度交叉, 3 号塔式起重机与 2, 4, 5 号塔式起重机作业幅度交叉, 4 号塔式起重机与 1, 2, 3, 5 号塔式起重机作业幅度交叉, 5 号塔式起重机与 3, 4 号塔式起重机作业幅度交叉。

通过 Revit 建模技术对群塔布置的高程、交叉、水平进行防碰撞模拟, 如图 7 所示, 群塔高差对照如表 2 所示。经分析, 本工程 5 台塔式起重机在现场的定位和高度布置可保证不存在低位塔式起重机起重臂与高位塔式起重机塔身发生碰撞的问题, 各塔式起重机运动部分之间的高差 > 2m, 符合群塔作业的安全使用要求。

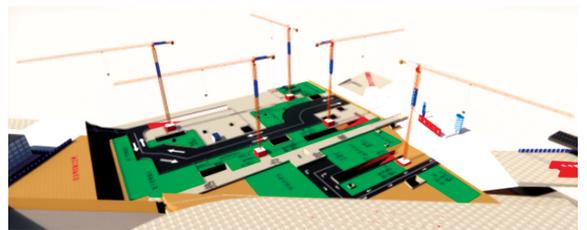


图 7 群塔布置模拟

Fig. 7 Simulation of multi-cranes layout

5 结语

北京城市副中心站综合交通枢纽工程 1 标段盖挖逆作施工中, 布置 5 台不同型号的塔式起重机, 存在塔式起重机作业幅度大、多塔干扰严重、塔式起

表 1 相邻塔式起重机水平、交叉距离

Table 1 Horizontal and cross distance of adjacent tower cranes

塔式起重机编号	项目	塔式起重机编号						
		1号	2号	3号	4号	5号	相邻工区2号	相邻工区3号
1号	水平距离/m	—	108.83	—	82.51	—	74.70	121.20
	交叉距离/m	—	10.17	—	41.49	—	59.30	12.80
2号	水平距离/m	108.83	—	61.81	97.11	—	—	75.91
	交叉距离/m	10.17	—	47.19	21.89	—	—	53.09
3号	水平距离/m	—	61.81	—	66.02	72.27	—	—
	交叉距离/m	—	47.19	—	47.89	31.73	—	—
4号	水平距离/m	82.51	97.11	66.02	—	94.94	—	—
	交叉距离/m	41.49	21.89	47.89	—	19.06	—	—
5号	水平距离/m	—	—	72.27	94.94	—	—	—
	交叉距离/m	—	—	31.73	19.06	—	—	—
3台 相邻工区2号	水平距离/m	—	0	—	—	0	—	86.95
	交叉距离/m	—	0	—	—	0	—	53.05
相邻工区3号	水平距离/m	121.20	75.91	—	—	—	86.95	—
	交叉距离/m	12.80	53.09	—	—	—	53.05	—

表 2 群塔最终阶段高差对比

Table 2 Comparison of height differences in the final stage of multi-cranes

项目	塔式起重机编号							
	1号	2号	3号	4号	5号	相邻工区2号	相邻工区3号	
高度/m	37.38	46.38	55.98	64.38	44.78	45.78	54.78	
最终 阶段 高差/m	1号	—	低 4.19	—	低 21.68	—	低 12.62	低 3.31
	2号	高 4.19	—	低 4.90	低 13.87	—	—	低 3.75
	3号	—	高 4.90	—	低 3.43	高 6.57	—	—
	4号	高 21.68	高 13.87	高 3.43	—	高 15.22	—	—
	5号	—	—	低 6.57	低 15.22	—	—	—

重机基础悬空大等特点,本文采用先插法进行桩柱一体化施工,保证了塔式起重机基础的平整度及垂直度,X形支撑随土方开挖分层安装,保证了钢管柱支撑体系的稳定性。借助数值模拟技术分析塔式起重机基础的力学性能,保证了基础整体的可靠性。利用 BIM 建模进行了群塔防碰撞布置,实现群塔安全高效施工。

参考文献:

- [1] 石欣. 盖挖逆作地铁车站竖向支撑体系位移规律研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
SHI X. Study on displacement law of vertical support system of cut and cover top-down excavation subway station [D]. Changchun:Jilin University,2021.
- [2] 何云焱,李洪亮,何彦荣,等. 盖挖逆作地铁车站深基坑开挖变形实测分析[J]. 建筑结构,2021,51(S1):1940-1944.
HE Y B,LI H L,HE Y R,et al. Measurement and analysis of excavation deformation of deep foundation pit in subway station by cover-excavation top-down method[J]. Building structure,2021,51(S1):1940-1944.
- [3] 何涛. 斜拉桥施工中塔式起重机的选型与布置探析[J]. 工程技术研究,2024,9(3):107-109.
HE T. Analysis of the selection and layout of tower cranes in the

construction of cable-stayed bridges [J]. Engineering and technological research,2024,9(3):107-109.

- [4] 徐青. 曲面异形桥塔主动横撑布设与计算[J]. 铁道建筑技术,2023(3):77-79,113.
XU Q. Layout and stress calculation of active cross-brace in construction of curved special-shaped bridge tower[J]. Railway construction technology,2023(3):77-79,113.
- [5] 郑喜平. 海上风电深水测风塔基础设计施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2022(3):86-90.
ZHENG X P. Research on foundation design and construction technology of offshore wind power deep-water wind measuring tower[J]. Railway construction technology,2022(3):86-90.
- [6] 陈祥军,刘涛,孙志鹏,等. 风力发电机塔吊装机横梁有限元分析[J]. 机电工程技术,2024,53(3):230-233.
CHEN X J,LIU T,SUN Z P,et al. The finite element analysis of cross beam of wind turbine tower crane [J]. Mechanical & electrical engineering technology,2024,53(3):230-233.
- [7] 李凯,李临高,马磊,等. 基于 BIM 的大型枢纽机场复杂工程工期控制研究[J]. 智能建筑与智慧城市,2023(7):117-120.
LI K,LI L G,MA L,et al. Research on construction period control of the complex engineering of BIM-based large airport hub[J]. Intelligent building & smart city,2023(7):117-120.