

基于复杂地基条件下的塔吊基础选型及超高围护措施施工技术研究

林信宇, 刘 军

(广西路桥集团建筑工程有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要 随着城市化进程加快, 高层、超高层建筑数量逐渐增多, 塔吊在建筑施工中的作用愈发关键。本研究以实际项目为例, 通过现场试验与有限元数值模拟相结合的方法, 深入探究了复杂地基条件下塔吊基础的选型及超高围护措施施工技术, 研究内容涵盖不同复杂地基的工程特性、对塔吊基础的影响、基础选型评价指标体系、适用基础型式、施工工艺及质量控制措施, 以及防风、防雷、抗震等围护措施, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 复杂地基; 塔吊基础选型; 超高围护措施; 有限元模拟

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.020

0 引言

随着城市化进程的加速, 高层、超高层建筑在城市建设中占据重要地位, 塔吊作为垂直运输的关键设备, 其基础安全性和稳定性至关重要。百色市路桥·青云府和路桥·栖林府项目所在区域地质条件复杂, 软土层分布广泛, 部分区域存在岩溶现象, 给塔吊基础设计与施工带来了巨大挑战^[1]。本研究通过现场试验与有限元数值模拟相结合的方法, 深入探讨复杂地基条件下塔吊基础的选型及超高围护措施施工技术, 旨在为项目施工安全和高效推进提供借鉴。

1 复杂地基条件下塔吊基础选型

1.1 不同类型复杂地基工程特性及模型建立

在路桥·青云府和路桥·栖林府项目中, 软土层是主要的复杂地基类型之一^[2]。通过现场勘察和室内土工试验, 获取软土层的物理力学参数。软土层天然含水量 w 平均为45%, 天然重度 γ 约为17 kN/m³, 孔隙比 e 高达1.3, 液性指数 IL 为0.8, 压缩模量 E_s 在2~4 MPa之间, 表现出高含水量、高孔隙比、低强度和高压缩性的特点。基于这些参数, 利用有限元软件建立软土地基模型。采用摩尔-库伦本构模型来描述软土的力学行为, 模型中考虑土体的非线性变形特性。在模型边界条件设置上, 底部约束竖向位移, 四周约束水平位移, 模拟实际地基的受力边界情况^[3]。对于岩溶地基, 通过地质雷达探测和钻孔勘察, 确定溶洞的位置、大小和形状。在有限元模型中, 将溶洞简化为圆形或椭圆形空洞, 采用实体单元模拟周围土体, 通过调整溶洞周围土体的参数来反映岩溶对地基的影响。

1.2 复杂地基对塔吊基础的影响分析

1. 承载力影响。以塔吊型号QTZ60为例, 其最大起重力矩为600 kN·m, 最大起重量为6 t, 工作状态下最大垂直荷载 P_v 约为500 kN, 水平荷载 P_h 约为50 kN。在软土地基中, 根据太沙基承载力理论公式 $q_u = cN_c + \gamma dN_q + 1/2\gamma bN_\gamma$ (其中 c 为土体粘聚力, 软土中 c 取10 kPa; N_c 、 N_q 、 N_γ 为承载力系数, 根据软土的内摩擦角 ϕ 计算, 此处 ϕ 取12°, 对应的 $N_c=5.14$, $N_q=1.22$, $N_\gamma=0.89$; γ 为土体重度; d 为基础埋深, 取2 m; b 为基础宽度, 取5.8 m), 计算得到软土地基的极限承载力 q_u 约为120 kPa。考虑安全系数 $K=2$, 则允许承载力 $[q]=60$ kPa。塔吊基础底面面积 $A=16$ m², 基础所受平均压力 $p=P_v/A=500/16=31.25$ kPa, 虽然小于允许承载力, 但软土的长期强度较低, 在长期荷载作用下, 地基承载力可能会下降, 存在安全隐患。

在岩溶地基中, 溶洞的存在使得地基的承载特性变得复杂。若塔吊基础位于溶洞上方, 溶洞顶板的稳定性成为关键。根据经验公式 $h=Qb/f_t l$ (其中 h 为溶洞顶板厚度, Q 为塔吊荷载在溶洞顶板处产生的集中力, b 为基础宽度, f_t 为岩石抗拉强度, l 为溶洞跨度), 假设溶洞跨度 $l=3$ m, 岩石抗拉强度 $f_t=2$ MPa, 经计算, 当塔吊荷载 $Q=500$ kN时, 要求溶洞顶板厚度 h 至少为1.25 m。若实际顶板厚度小于该值, 需采取加固措施, 否则会影响塔吊基础的承载力。

2. 沉降影响。利用有限元软件模拟软土地基上塔吊基础的沉降。在模型中施加塔吊荷载, 模拟时间为1年。结果显示, 塔吊基础中心的沉降量 S_{center} 约为80 mm, 边缘沉降量 S_{edge} 约为100 mm, 沉降差 $\Delta S=S_{edge}-$

$S_{center}=20\text{ mm}$ 。根据相关规范,对于塔吊基础,沉降差应控制在一定范围内(一般不超过基础长度的 0.005 倍),本项目中塔吊基础长度为 4 m,允许沉降差为 20 mm,虽暂未超出允许范围,但已接近限值,需密切关注。在岩溶地基中,溶洞的存在可能导致地基的不均匀沉降。

3. 稳定性影响。塔吊基础的稳定性包括抗倾覆稳定性和抗滑移稳定性。抗倾覆稳定性可通过计算倾覆力矩 M_{overturn} 和抗倾覆力矩 M_{resist} 的比值来评估。以工作状态下的塔吊为例,倾覆力矩主要由水平荷载 Ph 和偏心竖向荷载产生,抗倾覆力矩由基础自重 G 和基础底面的摩擦力提供。假设基础自重 $G=800\text{ kN}$,基础底面与地基土的摩擦系数 $\mu=0.3$,偏心距 $e=0.5\text{ m}$,则倾覆力矩 $M_{\text{overturn}}=PhH+Pve=50\times 30+500\times 0.5=1\,750\text{ kN}\cdot\text{m}$ (H 为塔吊高度,取 40.5 m),抗倾覆力矩 $M_{\text{resist}}=G\times 2b+\mu G\times 2b=800\times 24+0.3\times 800\times 24=2\,080\text{ kN}\cdot\text{m}$,抗倾覆稳定系数 $K_{\text{overturn}}=17\,502\,080\approx 1.19$,大于规范要求的 1.15,满足抗倾覆稳定性要求。

抗滑移稳定性通过计算滑移力 F_{slip} 和抗滑移力 F_{resist} 的比值来评估。滑移力主要由水平荷载 Ph 提供,抗滑移力由基础底面的摩擦力提供,即 $F_{\text{resist}}=\mu G$ 。则 $F_{\text{slip}}=50\text{ kN}$, $F_{\text{resist}}=0.3\times 800=240\text{ kN}$,抗滑移稳定系数 $K_{\text{slip}}=50\,240=4.8$,远大于规范要求的 1.3,满足抗滑移稳定性要求。但在岩溶地基中,若溶洞处理不当,可能会破坏地基的整体性,降低抗滑移和抗倾覆能力,威胁塔吊的稳定性^[4]。

1.3 塔吊基础选型评价指标体系建立

本研究建立的塔吊基础选型评价指标体系包括安全性、经济性和适用性三个一级指标,以及多个二级指标,采用层次分析法(AHP)确定各指标权重。邀请行业专家对各指标的相对重要性进行打分,构建判断矩阵。以安全性指标下的承载力、沉降、稳定性三个二级指标为例,构建判断矩阵。

通过计算判断矩阵的特征向量和最大特征根,得到承载力、沉降、稳定性的权重分别为 0.5396、0.1047、0.3557。同理,计算出经济性和适用性指标下各二级指标的权重,最终构建完整的评价指标体系。在实际选型过程中,对不同基础形式按照各指标进行打分,结合权重计算综合得分,选择综合得分最高的基础形式作为最优方案。

2 复杂地基条件下塔吊基础施工技术

2.1 适用塔吊基础型式研究

在路桥·青云府和路桥·栖林府项目中,针对软土地基和岩溶地基,研究了地基处理、筏板基础和复合地基等基础型式。

地基处理适用于软土地基和岩溶地基,能将塔吊荷载传递至深层稳定土层。在软土地基中,采用钢筋混凝土灌注桩,桩径 $d=600\text{ mm}$,桩长 $L=15\text{ m}$,桩身混凝土强度等级为 C35。单桩竖向承载力特征值 R_a 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)中经验公式估算: $R_a=q_{pa}A_p+u_p\sum_{i=1}^n q_{sia}l_i$ (其中 q_{pa} 为桩端土极限端阻力标准值,软土中取 800 kPa; A_p 为桩身截面积; u_p 为桩身周长; q_{sia} 为桩周土极限侧阻力标准值,根据软土性质取 25 kPa; l_i 为各土层中桩的长度,此处桩长均为软土层厚度,即 20 m),计算得到 $R_a=800\times 0.5024+2.512\times 25\times 20=1\,404.16\text{ kN}$ 。考虑群桩效应和安全系数,确定单桩竖向承载力设计值满足塔吊荷载要求。筏板基础整体性好,能有效扩散荷载,适用于地基承载力较低且不均匀的情况。在软土地基中,设计筏板厚度 $h=1.2\text{ m}$,采用 C25 混凝土,配筋为双层双向 $\phi 12@150$ (HRB400 钢筋)。复合地基是在地基中设置增强体,如碎石桩、CFG 桩等,提高地基承载力。在软土地基中,采用 CFG 桩复合地基,桩径 $d=500\text{ mm}$,桩长 $L=15\text{ m}$,桩间距 $s=1.5\text{ m}$,等边三角形布置。根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2012),计算得到 $f_{spk}=0.07\times 800/0.19625+0.8\times (1-0.07)\times 80\approx 336\text{ kPa}$,满足塔吊基础对地基承载力的要求。

2.2 不同基础型式的受力特性、适用范围及优缺点

地基处理受力特性主要是通过桩侧摩阻力和桩端阻力承担荷载,能有效穿越软弱土层,将荷载传递至深层稳定土层,适用于软弱地基、岩溶地基等承载力较低的地基条件。优点是承载能力高、稳定性好,对沉降控制效果较好;缺点是施工工艺复杂,施工周期较长,成本较高^[5]。

筏板基础受力时整体刚度较大,基底压力分布均匀,能有效抵抗地基的不均匀沉降,适用于地基土质较差且不均匀、上部荷载较大的情况。优点是整体性好,对地基适应性强;缺点是混凝土和钢材用量大,造价较高,在软土地基中可能会产生较大沉降^[6]。

复合地基通过增强体与土体共同承担荷载,提高地基承载力,适用于软弱地基、粉土地基等。优点是能充分利用土体的天然强度,提高地基承载力效果显著,施工速度较快,成本相对较低;缺点是设计计算较为复杂,对施工质量要求较高,增强体与土体的协同工作性能受施工质量影响较大。

2.3 软弱地基条件下地基处理施工工艺及质量控制措施

在软弱地基条件下,地基处理施工采用混凝土灌注桩工艺。施工流程如下:测量放线定桩位→埋设护筒→

制备泥浆→成孔→清孔→吊放钢筋笼→浇筑混凝土。

在施工过程中,泥浆的性能至关重要。泥浆比重控制在 1.1~1.2 之间,黏度控制在 18~22 s,含砂率不大于 4%。通过定期检测泥浆性能,及时调整泥浆配合比,确保成孔过程中孔壁稳定。在成孔过程中,严格控制钻孔垂直度,采用全站仪监测,垂直度偏差控制在 1% 以内。

钢筋笼制作时,保证钢筋的规格、数量和间距符合设计要求。钢筋焊接采用双面焊,焊缝长度不小于 5d (d 为钢筋直径)。钢筋笼吊放时,确保其中心与桩孔中心重合,避免碰撞孔壁。混凝土浇筑采用导管法,导管底部距孔底距离控制在 0.3~0.5 m。混凝土坍落度控制在 180~220 mm,浇筑过程中连续进行,防止出现断桩现象。

3 超高塔吊围护措施施工技术

3.1 超高塔吊防风措施的设计与实施

项目所在地最大风速达 28 m/s,为保障超高塔吊在强风下的安全,采取了塔身加固和配重优化措施。

在塔身加固方面,选用 $\angle 100 \times 10$ 的角钢在塔吊标准节间增设斜撑,并通过焊接稳固连接。这一举措使塔身抗风刚度提升 30%,有效降低了强风下的水平位移。例如:假设塔吊高 50 m、风荷载为 10 kN,加固前塔身截面惯性矩为 0.05 m^4 ,加固后提升至 0.065 m^4 ,加固前最大水平位移约 0.02 m,加固后减小到约 0.015 m,极大地增强了塔身稳定性。配重优化则依据塔吊高度和工作状态进行。项目中原配重为 10 t,经计算在平衡臂末端增加 2 t 配重块,让塔吊重心后移。

3.2 防雷接地系统的设计与施工技术

在设计上,塔吊顶部安装 2 m 高、直径 25 mm 的镀锌圆钢避雷针,利用塔身钢结构作为引下线,每隔 3 m 进行可靠连接,确保雷电传导顺畅。接地装置采用人工接地体,由 $50 \times 5 \text{ mm}$ 镀锌角钢和 $40 \times 4 \text{ mm}$ 镀锌扁钢组成。接地角钢长 2.5 m,间距 5 m 呈环形布置,埋深 1 m,再用镀锌扁钢连接成整体并与塔吊基础主筋焊接。施工完成后,使用接地电阻测试仪检测,实际测量接地电阻为 3.5Ω ,满足《建筑物防雷设计规范》(GB50057-2010)中不大于 4Ω 的要求。后续还会定期检测接地电阻,以确保防雷接地系统始终有效,避免塔吊遭受雷击损坏。

3.3 抗震措施

鉴于项目所在区域抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.15 g ,采取了多种抗震措施。

在塔吊基础与塔身之间设置的橡胶减震支座,直

径 600 mm、高 300 mm,由多层橡胶和钢板交替硫化黏结。其能有效消耗地震能量,减少传递到塔身的地震力。经计算,可使传递至塔身的水平地震力降低约 70%,显著提升塔吊的抗震性能。此外,对塔吊关键结构构件进行加固。在塔身与基础连接部位增设 20 mm 厚加强钢板并焊接牢固,增强节点抗弯和抗剪能力。同时,对附着装置进行全面检查和加固,保证附着点混凝土强度达标,附着杆长度和角度符合设计,提升塔吊与建筑物连接的可靠性,从整体上增强塔吊的抗震性能,保障塔吊在地震发生时的安全稳定。

4 结论

通过对两处项目的研究,针对复杂地基条件下塔吊基础选型及超高围护措施施工技术取得了以下成果:

1. 塔吊基础选型:深入研究了不同类型复杂地基的工程特性,建立了相应的地基模型,分析了复杂地基对塔吊基础承载力、沉降和稳定性的影响。建立了基于安全性、经济性和适用性的塔吊基础选型评价指标体系,为塔吊基础选型提供了科学依据。

2. 塔吊基础施工技术:研究了适用于复杂地基条件的塔吊基础型式,明确了不同基础型式的受力特性、适用范围及优缺点。针对软弱地基条件下的地基处理,制定了详细的施工工艺和质量控制措施,确保地基处理的施工质量。

3. 超高塔吊围护措施:设计并实施了有效的超高塔吊防风措施,通过塔身加固和配重优化提高了塔吊的抗风能力;完成了防雷接地系统的设计与施工,接地电阻满足要求,保障了塔吊在雷雨天气的安全;研究并应用了抗震措施,设置橡胶减震支座和对关键结构构件进行加固,增强了塔吊的抗震性能。

参考文献:

- [1] 刘王奇,王彬,王勇,等.500 米超高层建筑塔机选型及布置分析[J].建筑机械化,2023,44(05):11-15.
- [2] 栗银辉.智能化监测系统在房建工地塔吊维修的应用[J].中国建筑金属结构,2024,23(03):110-112.
- [3] 陈健.高层房屋建筑施工技术的关键点与应用分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(05):115-117.
- [4] 祝斌.超高层住宅屋顶的悬空大板梁施工技术研究[J].建筑施工,2024,46(05):794-797.
- [5] 龚锋锋.特殊工况下塔吊基础的选型与施工[J].建筑施工,2022,44(08):1775-1778.
- [6] 熊志刚,马云鹏,朱旭.上海印象城格构式塔吊基础的设计与施工[J].城市建设理论研究(电子版),2017(35):200-201,105.