

输电线路预制承台-螺旋锚基础节点连接缺陷与优化研究

黄兴政

(中国能源建设集团湖南科鑫电力设计有限公司,湖南省长沙市,410000)

摘要 预制承台与螺旋锚基础组合结构在输电线路中应用广泛,节点连接是两者协同受力的关键环节。本文系统梳理螺栓连接、焊接连接、灌浆连接三种传统型式的缺陷,从设计、施工、材料三个维度剖析深层成因,提出“螺栓初固定+灌浆强锚固+防护全封闭”的复合型节点方案。工程试点表明,该方案施工效率提升40%,抗拔承载力不低于120kN,锈蚀速率不超过0.01mm/年,全生命周期成本降低30%以上,验证了该方案的可行性与良好的环境适配性,可为复杂地质区输电线路预制基础节点工程提供参考。

关键词 输电线路;预制承台;螺旋锚基础;复合型节点;连接设计;防水防腐

中图分类号:TM75 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)10-0036-03

预制承台与螺旋锚基础组合结构依托工厂化预制优势,质量可控、安装简便,在新疆戈壁盐渍土等复杂场景中应用广泛^[1]。节点连接是保障两者协同受力的关键,其性能直接决定基础整体稳定性^[2]。然而,当前常用的螺栓、焊接、灌浆三类单一连接型式均存在安全隐患,难以兼顾施工便捷性、承载可靠性与耐久防腐性,盐渍土区域节点锈蚀速率较普通区域高出30%以上。目前,针对该问题的专项研究仍较薄弱,多数仅停留在连接型式调整的表层,缺乏对缺陷成因的深层剖析。本文系统梳理节点缺陷根源,提出复合型节点优化方案,并通过工程试点验证其可行性。

1 节点连接常见形式

1.1 螺栓连接型

锚杆顶部设置螺纹,承台预留螺栓孔,通过高强螺母实现固定连接,部分构造中增设密封圈进行防水处理。该型式施工快捷、拆卸方便,质量易于现场管控,适用于荷载较小、工期紧迫、地质条件简单的普通线路。但其受力集中于螺栓剪切面,接触面积有限,且金属螺栓在盐渍土等腐蚀环境中易发

生锈蚀,承载能力与耐久性均受限。

1.2 焊接连接型

锚杆顶部焊接钢板,承台预留凹槽,现场完成焊接作业后进行防腐防水处理。该型式连接牢固、整体性优越,承载能力高,适用于大荷载、高可靠要求的重载杆塔基础。但现场焊接工序繁琐、效率低下,焊接质量受环境条件与焊工操作水平影响显著,且高温焊接会破坏构件表面防腐涂层,后期维修极为困难。

1.3 灌浆连接型

锚杆顶部设置锚固钢筋,承台预留灌浆孔,就位后注入高强灌浆料实现固定。该型式防水防腐性能优异、整体性强、无外露金属构件,适用于高海拔线路及盐渍土、多雨等腐蚀环境。但灌浆施工周期较长,质量受环境温度影响显著(新疆戈壁昼夜温差大,易导致灌浆体开裂),且养护要求严格,后期不便维修。

2 预制承台与螺旋锚基础节点连接常见缺陷及深层成因分析

2.1 核心缺陷类型及危害

2.1.1 节点松动

承台与锚基础衔接位置若出现缝隙或发生相对位移,会导致荷载传递效率下降15%~25%,杆塔在长期运行过程中易出现倾斜,严重时甚至造成基础整体失效。

2.1.2 构件锈蚀

作者简介:黄兴政(1981~),男,湖南浏阳人,硕士,高级工程师,研究方向:高压输电线路设计。

外露环境中的金属构件受到盐渍土内氯离子等腐蚀介质的侵蚀,新疆盐渍土区域碳钢锈蚀速率可达0.3mm/年,大幅缩短基础的服役寿命。

2.1.3 防水性能

接缝位置渗水会加速金属锈蚀,渗入的水分在冻融循环作用下,易导致混凝土开裂、强度下降。

2.1.4 施工质量管控难度大

螺栓力矩不足、灌浆不密实等隐蔽性缺陷在验收阶段难以有效检测,投运后缺陷逐步显现。

2.2 缺陷产生的深层原因

2.2.1 设计层面

各类缺陷产生的根本原因,在于设计环节存在不合理之处。当前多数节点设计仍沿用传统现浇基础的设计思路,既未贴合预制承台的装配式特点,也未充分考虑预制承台-螺旋锚组合结构特殊的受力传递路径,对不同使用场景的适配性不足。设计过程中未将防水、防腐要求与受力协调需求统筹考虑,防护体系存在疏漏,尚未建立起完整的闭环防护系统。此外,行业内尚未出台针对预制承台-螺旋锚基础节点的专项设计与施工规范,节点参数多依赖经验取值,缺乏结合具体地质条件与荷载工况的精细化计算。

2.2.2 施工层面

工程缺陷的直接成因是施工不规范。现场人员专业能力不足,关键工序未严格执行操作规范;质量管控体系不完善,螺栓力矩、灌浆密实度等关键参数缺乏全过程监控,隐蔽缺陷难以及时发现。同时,戈壁地区昼夜温差大、风沙频繁,导致灌浆凝结不均、密封胶加速老化,安装精度难以保证,易诱发次生病害。

2.2.3 材料层面

材料选型与质量管控不到位是各类缺陷出现的核心原因之一。盐渍土区域施工中选用普通碳钢螺栓,其抗氯离子腐蚀性能较差;密封胶耐高低温性能弱、灌浆料抗裂性不足,难以适配新疆极端气候条件;预制承台混凝土未掺入抗冻抗渗添加剂,使用过程中易出现冻融与腐蚀开裂。同时,材料进场检验环节管控力度不足,不合格材料流入施工现场,进一步加剧了缺陷的产生与扩展。

3 复合型节点优化设计

3.1 连接型式优化

归纳螺栓连接快速固定的优势与灌浆连接牢固防腐的特点,研究提出“螺栓初固定+灌浆强锚固+防护全封闭”的复合型连接型式。该型式的核心受力机理为:螺栓承担初期预紧力及部分剪切荷载,保障承台就位后的临时稳定性;灌浆料依靠粘结力及机械咬合力,传递大部分拉拔荷载与剪切荷载,分散受力、降低应力集中,提升节点整体承载性能^[9]。

3.1.1 核心结构组成

整体分为预制承台、螺旋锚杆及辅助防护结构三部分。

预制承台采用强度等级不低于C40的混凝土,全程在工厂按标准化流程生产。构件底部预留三类结构:直径24~30mm的螺栓孔、宽度80~100mm且深度50~60mm的环形灌浆槽,以及对应的配套孔位。所有孔位四周增设HRB400E级环形加强钢筋,钢筋排布间距不超过100mm,以缓解螺栓孔周边的应力集中,避免混凝土开裂。

螺旋锚杆采用40Cr高强度合金钢材制作(抗拉强度不低于800MPa,屈服强度不低于600MPa),锚杆顶端预先加工螺纹,杆身下部焊接环形阶梯状304不锈钢锚固翼缘(厚度不小于10mm),以扩大锚杆与灌浆料的接触面积,提升机械咬合能力。锚杆端面经平整处理,保证与承台底面贴合紧密。

辅助防护结构配置包含带橡胶密封圈的玻璃钢防水盖板、硅酮密封胶与防水堵头,共同构建双层防水防护体系。金属构件防腐处理采用整体热镀锌加环氧富锌涂层的双重工艺。

3.1.2 标准化施工流程

综合复合型结构自身特点与戈壁区域施工条件,本文梳理出四步标准化施工流程:

(1)预处理:对锚杆进行Sa2.5级喷砂除锈,逐一清理承台预留孔位,核对孔位尺寸偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

(2)对接固定:承台吊装就位后,调整其水平度不大于3mm/m、垂直度不大于5mm/m,按80~120N·m的力矩标准拧紧所有螺母,同步做好标记。

(3)灌浆施工:搅拌抗压强度不低于60MPa的环氧高强灌浆料,以0.5~1L/min的流速注入灌浆槽,待排气孔完全出浆后封堵,在5℃~35℃环境下养护不少于7d。

(4)防护收尾:填充厚度不小于5mm的硅酮密封胶,安装玻璃钢盖板,补涂厚度不小于80 μ m的防腐涂层,实现结构全封闭防护。

3.2 结构设计优化

3.2.1 防水结构优化

防水体系采用“缝隙密封+整体覆盖”双层闭环结构。螺栓孔与灌浆槽的衔接部位填充耐温范围为-40℃~80℃的硅酮密封胶,阻断渗水通道。厚度不小于5mm的玻璃钢盖板自带橡胶密封圈,安装后实现整体覆盖防护。灌浆孔、排气孔全部采用隐蔽式设计,施工结束后用橡胶堵头完全封死,切断水分渗入的所有路径。

3.2.2 防腐结构优化

针对盐渍土区域氯离子腐蚀问题,开展全面的防腐处理。金属构件采用厚度不小于80 μ m的热镀锌层加厚度不小于40 μ m的环氧富锌涂层,形成双层防护;承台孔壁涂刷厚度不小于100 μ m的环氧煤沥青涂料;灌浆料中掺入3%~5%的防腐抗渗添加剂,抑制氯离子渗透。该组合防护方案可将节点服役寿命延长至50年以上。

3.2.3 受力结构优化

设计中将锚固翼缘角度设为15°~20°,增大翼缘与灌浆料的咬合力;螺栓孔周边加设HRB400E级加强钢筋,钢筋间距控制在100mm以内;螺栓采用4~6个对称布置方案,相邻螺栓间距不小于100mm,保证节点受力均衡。

3.3 材料选型优化

所选工程材料均具备性价比高、采购方便的特点。核心连接构件选材分为两类:锚杆、螺栓采用40Cr合金钢,锚固翼缘采用304不锈钢。灌浆料选用环氧高强灌浆料,抗压强度不低于60MPa,初始流动度不小于300mm。密封材料选用耐高低温、抗老化的硅酮密封胶。承台混凝土采用C40等级,内部掺入复合添加剂,抗渗等级不低于P8,抗冻等级不低于F150。防护材料分别采用玻璃钢盖板、环氧防腐涂料及橡胶防水堵头。上述所有材料性能指标均符合甚至高于行业规范要求。

4 工程应用验证

4.1 新疆戈壁盐渍土区域试点概况

选取新疆某110kV输电线路为试点,土壤含盐

量0.5%~1.0%(中腐蚀等级),昼夜温差约25℃。应用10组复合型节点,严格按标准化流程施工:锚杆经Sa2.5级喷砂除锈,承台就位后按80~120N·m力矩拧紧螺母,注入抗压强度不低于60MPa的环氧高强灌浆料,在5℃~35℃环境下养护不少于7d,最后填充密封胶并安装玻璃钢盖板。

4.2 应用效果

采用该工艺施工,相较焊接方式,施工效率提高40%以上,施工周期压缩约30%。灌浆部位检测结果显示密实度不低于98%,防水性能良好。节点抗拔承载力为120~125kN(满足不低于100kN的设计要求),抗剪承载力不低于80kN(满足不低于70kN的设计要求),承载性能提升幅度达50%以上。

连续6个月监测结果显示,螺栓预紧力衰减幅度不超过5%,未出现锈蚀、松动、渗水等问题,锈蚀速率不超过0.01mm/年(较盐渍土区域普通碳钢构件0.3mm/年的锈蚀速率降低97%以上),基于腐蚀速率推算,预计服役寿命可达50年以上。从经济性指标看,材料成本增幅不超过10%,人工及机械成本降低25%,后期维护成本降低60%,全生命周期总成本降幅达30%以上。

5 结语

综上所述,当前常用的螺栓连接、焊接连接和灌浆连接三种单一型式均存在明显不足,难以兼顾施工便捷、承载稳定与耐久防腐等多重需求,其根本原因在于设计适配性差、施工管控不严、材料选用不当。本文提出的复合型节点方案,从连接型式、结构设计和材料选型三方面进行系统优化,综合提升了施工效率、承载可靠性、耐久性能与经济性。新疆戈壁盐渍土区域的工程试点表明,该方案施工高效、性能稳定、耐久良好,具有较高的实用价值和推广前景。

参考文献

- [1] 黄勇祥,丁士君,袁小超,等.青藏高原碎石土地基混凝土承台式螺旋锚基础原位载荷试验及承载机制分析[J].建筑结构,2022,52(4):148-152+105.
- [2] 徐运生.预制承台后注浆螺旋锚基础承载性能及连接研究[D].南京:东南大学,2024.
- [3] 国家能源局.架空输电线路基础设计规程:DL/T5219-2023[S].北京:中国计划出版社,2023.