陆上风力发电项目风机基础土建施工工艺及质量控制研究

杨德明[1]　罗富斌[1]　杨松斌[1]　王富宣[2]　蒋吉林[2]
1. 云南宏固工程检测有限公司　云南　昆明　650000
2. 云南贞元建设工程有限公司　云南　昆明　650000

摘　要：陆上风机基础土建施工涵盖基坑开挖、钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑振捣及养护等关键工序，各环节衔接紧密，对承载性能与耐久性影响显著。围绕施工全过程，本文从工序质量检测、核心指标检测方式及分项工程验收管控 3 个层面展开分析，涉及地基承载力、钢筋保护层厚度、混凝土强度及锚栓定位精度等控制要点。检测手段包括平板载荷试验、电磁感应法、试件抗压试验及智能测温系统等，验收环节强调资料与实体同步核查。通过工序自检、监理复检与多方联合验收，形成闭环管控，为陆上风机基础施工质量提供系统化保障路径。

关键词：陆上风机基础；土建施工工艺；质量控制；质量检测；验收管控

引言：陆上风机基础作为上部结构的承载核心，其土建施工质量直接关系到机组运行安全与长期稳定性。基础施工涉及多工种交叉作业，从基坑开挖到混凝土养护，每道工序的偏差都可能累积为结构性缺陷。当前工程实践中，施工工艺与质量控制、检测验收之间仍存在衔接不畅的问题，部分环节依赖经验判断，缺乏量化依据。梳理主流施工工艺的操作要点，明确全过程质量控制措施，并建立与之匹配的检测验收体系，有助于减少质量波动、提升一次性合格率。围绕工序检测内容、核心指标检测方式及分项验收管控要点展开讨论，可为同类工程提供可参照的管理思路。

1 陆上风机基础主流土建施工工艺

1.1 基坑施工工艺

现场先按控制点放出开挖边线，把开挖深度、边坡坡度和排水走向定清楚。机械挖到接近设计标高后，改用人工清底，防止原状土被扰动。遇到软弱土层或地下水，得结合排水、换填或加固处理，让基底承载力达到要求。开挖中要随时检查平面位置、尺寸、标高和边坡稳定，发现偏差及时修整。基底验收合格后，尽快做垫层，缩短暴露时间。回填按分层铺筑、分层压实来做，控制含水率和压实度，避免后期沉降。整个基坑作业还要盯住土体位移和周边变化，给后续钢筋、模板施工留出平整干燥稳定的作业面。

1.2 基础钢筋加工与绑扎施工工艺

钢筋加工要按料单调直、切断和弯曲，下料长度与弯折角度都得控制好。加工件分类堆放并做好标识，避免规格混用。绑扎前核对钢筋规格、间距、层数和保护层厚度，先定位底层钢筋，再装上层钢筋和构造钢筋。交叉点用绑扎或连接件固定，需要时设置支撑马凳，保持网片间距。预埋件、锚栓组件与钢筋位置要提前协调，防止相互冲突。绑扎完成后检查钢筋数量、搭接位置、锚固长度和接地连接。隐蔽前清理杂物、油污和积水，检验合格再封闭。钢筋工程得为混凝土均匀包裹和基础受力传递打好底子。

1.3 基础模板安装与加固施工工艺

模板安装前先检查基础尺寸和中心线，按配板方案逐块拼装。模板表面清理干净，涂刷脱模剂，接缝处做好密封，防止漏浆。安装时控制垂直度、平整度和截面尺寸，让模板与钢筋之间保留设计要求的保护层[1]。加固体系用背楞、拉杆和斜撑组合，承受混凝土侧压力和施工荷载。边角、变截面和预埋件周围要加强固定，避免浇筑时移位。模板底部封堵严密，防止根部漏浆。安装完成后做尺寸复核和稳定性检查，确认支撑牢固、拼缝严密、通道顺畅，再进入混凝土浇筑环节。

1.4 混凝土浇筑与振捣施工工艺

浇筑前检查模板、钢筋、预埋件和作业面，确认没有积水与杂物。运输过程控制坍落度和时间，防止离析。浇筑采用分层方式，每层厚度按振捣设备能力确定，沿基础平面连续推进，减少冷缝。振捣棒插入下层一定深度，快插慢拔，布点均匀，避免漏振和过振。钢筋密集区、边角及预埋件附近要加强振捣，同时防止碰撞模板和钢筋。浇筑中观察模板变形、支撑松动和漏浆

情况，及时处理。表面按标高刮平并做2次收面，减少塑性收缩裂缝。完成后记录浇筑时间、温度和试件信息。

1.5 混凝土养护施工工艺

养护在混凝土初凝后及时开始，目的是保持适宜温湿度，促进强度增长并减少收缩裂缝。根据环境条件选择覆盖保湿、洒水或蓄水等方式，养护时间按配合比和气候确定。高温时避免表面失水过快，低温时采取保温措施，防止早期受冻。养护期间控制温差，避免温度应力过大。基础大体积区域需监测内部与表面温度，调整覆盖和散热。养护用水温度与混凝土表面温差不宜过大，防止热震。未达到规定强度前，不得承受施工荷载或进行回填。养护记录应完整，反映时间、方式和环境变化。

2 风机基础土建施工全过程质量控制措施

2.1 基坑施工阶段质量控制

基坑阶段质量控制要把位置尺寸和基底条件盯住。开挖前复核轴线控制点和标高，按批准坡度与分层厚度推进。机械挖到接近基底时预留人工清底厚度，防止超挖和原状土扰动。施工中随时检查平面尺寸标高边坡稳定和排水效果，积水及时排走。遇到软弱土层或地下水，按处理方案换填加固，处理后检测承载力，合格才进入下道工序。验槽检查土质均匀性平整度和杂物，验收后尽快浇筑垫层封闭。垫层标高厚度符合设计，表面密实。基坑边部不能随意堆载，机械行走避开边坡影响区[2]。开挖验槽处理垫层各环节留记录，保证质量可追溯。发现偏差立即修整，不能带着问题进入后续施工。同时控制暴露时间，避免基底受水浸泡和风化。雨季施工要提前准备排水设施和覆盖材料，保证作业面干燥。冬季要防止基底受冻，必要时覆盖保温。验收人员要按控制点逐项量测，数据真实完整。只有各项指标满足设计，才能移交下道工序。

2.2 钢筋与模板施工质量控制

钢筋与模板质量控制要抓住受力骨架和成型尺寸。钢筋进场按规格分批检验，加工前调直除锈，下料长度和弯折角度按料单控制。连接接头位置数量外观要检查，绑扎时保证间距层数和保护层厚度准确。预埋件锚栓和接地装置固定牢靠，与钢筋冲突时按设计调整。模板要有足够刚度，拼缝严密，表面清理干净并涂脱模剂。安装后检查中心线截面尺寸垂直度和平整度，加固体系能承受侧压力。浇筑前做隐蔽验收，确认钢筋模板预埋件均合格。发现偏位松动或漏浆风险立即整改，不能带问题进入浇筑。验收资料同步整理，保证工序衔接清楚。施工中还要防止钢筋被踩踏变形，模板受碰撞移位。对关键尺寸要反复复核，确保基础几何精度满足安装要求。现场交底要落实到操作人员，让每个人清楚检查点和合格标准，减少人为偏差。

2.3 混凝土施工全过程质量控制

混凝土施工全过程质量控制要从拌合到养护盯紧。原材料计量准确，配合比按设计执行，坍落度每车检查，运输时间不能过长，防止离析。浇筑前润湿基面，清除积水和杂物。浇筑分层进行，每层厚度与振捣设备匹配，连续推进，减少冷缝。振捣快插慢拔，布点均匀，钢筋密集区和边角加强，不能漏振也不能过振。浇筑中观察模板支撑和预埋件，出现变形或移位立即停浇处理。表面按标高刮平，做2次收面，减少收缩裂缝。按批次制作试件，记录浇筑温度和时间。初凝后及时养护，大体积区域测温控制温差。拆模强度达到要求再拆，避免棱角损坏。各环节数据要真实，发现异常及时调整。浇筑过程要保持通信顺畅，前后台协调供料，避免中断时间过长。对已浇部分要做好接缝处理，保证整体性。

2.4 施工成品保护质量控制

施工成品保护质量控制要贯穿基础和后续工序。混凝土浇筑完成后，强度未达到要求前，禁止人员踩踏车辆碾压和重物堆放。预埋件锚栓和接地端子加保护套或防护盖，防止污染锈蚀和机械损伤。模板拆除时避免撬动棱角，拆下材料及时清运。养护期间保持覆盖完好，不能随意揭开。回填和安装作业时，机械与基础保持安全距离，防止碰撞。基础外露部分做好标识，提醒后续人员注意。冬期防冻夏期防暴晒，减少表面裂缝。各工序移交前检查成品状态，发现破损及时修复并记录[3]。成品保护责任落实到班组，交接清楚，避免后续施工造成二次破坏。对关键部位要设专人看护，直到移交完成。现场道路和堆场布置要避开基础影响范围，减少车辆振动和重载挤压。

3 风机基础土建施工质量检测与验收管控

3.1 施工工序质量检测内容

施工工序质量检测得跟着工序走，每道工序完成后先自检，再报监理复检。基坑工序主要检测开挖平面位置、基底标高、边坡坡度和地基承载力，验槽时查看土质是否均匀、有无杂物和积水。垫层工序检测标高、厚度和混凝土强度。钢筋工序检测规格、间距、搭接位置、锚固长度和保护层厚度，预埋件和锚栓组件的位置偏差也得量测。模板工序检测中心线、截面尺寸、垂

直度和平整度，加固体系要确认没有松动。混凝土工序检测坍落度、入仓温度、分层厚度、振捣密实度和试件强度[4]。回填工序检测分层厚度、含水率和压实度。每项检测都得有记录，数据真实可查。2025 年陕煤旬邑 200MW 风电项目通过质量监督检查时，专家组重点勘查了基坑施工质量，详细审阅了地基承载力检测报告，认真核对了垫层混凝土强度试验数据，各项技术指标均符合设计规范要求。同年的汇能电力九园风电项目首台风机基础浇筑后，现场检测混凝土入仓温度、坍落度、振捣密实度、分层厚度和浇筑速度等关键指标均达到要求。工序检测的目的就是把问题消灭在过程中，不让缺陷留到验收环节。

3.2 核心施工指标检测方式

核心指标检测要选对方法和工具。地基承载力一般采用平板载荷试验或动力触探，必要时结合钻探取样。基坑尺寸和标高用全站仪和水准仪测量，边坡稳定靠观察和位移监测。钢筋保护层厚度用电磁感应法扫描，间距用钢尺量测，接头强度通过拉伸试验验证。混凝土强度以标准养护试件抗压试验为主，辅以回弹法和钻芯法复核。大体积混凝土测温用埋设热电偶或光纤测温系统，记录内外温差变化。锚栓组件的定位精度用全站仪和水准仪配合检测，水平度偏差控制在设计范围内。回填压实度用环刀法或灌砂法检测，每层取样不少于规定点数。2025 年国电投塔城风电项目通过智能测温与梯度冷却技术协同，将混凝土内外温差控制在 25℃以内，锚栓水平度偏差控制在 1 毫米以内。

3.3 分项工程质量验收管控要点

分项工程验收要在工序检测合格的基础上组织，参建各方共同参与。基坑分项验收重点查地基处理记录、验槽结论和垫层强度报告，确认基底条件满足设计。钢筋分项验收查材料合格证、连接试验报告、隐蔽验收记录和保护层检测数据。模板分项验收查安装尺寸复核记录和加固体系稳定性检查结果。混凝土分项验收查配合比、试件强度、测温记录和外观质量，裂缝宽度和深度超过限值的要处理。回填分项验收查压实度检测报告和分层施工记录[5]。验收时资料和实体要同步核对，不能只看报告不看现场。2025 年中煤建设六十八公司施工的 48 台风机基础，锚盘平整度控制在 1.5 毫米，锚栓同心度达到高精度指标，48 台基础一次性通过监理、安装单位、风机厂家和业主四方联合验收。2025 年国家电投阜新阜蒙 700 兆瓦风电项目 85 台风机基础采用分层浇筑工艺和智能温控监测系统，全部一次性通过质量验收。验收管控的关键是把住资料关和实体关，两样都过硬才算真正合格。

结束语：陆上风机基础土建施工是一项工序关联度高、质量要求严的系统作业。从基坑施工到混凝土养护，各阶段均需以参数控制为核心，以记录追溯为手段，把偏差控制在允许范围内。质量控制措施覆盖施工准备、过程操作与成品保护，检测验收则贯穿工序自检、监理复检和分项评定，两者相互支撑，构成完整的管理链条。核心指标检测方式的合理选用，直接影响数据的可靠性与判定准确性。分项验收强调资料与实体同步核查，避免脱节。通过工艺、控制与验收三个层面的协同推进，基础施工质量可得到有效保障，为风机长期稳定运行奠定基础。

参考文献

[1] 张若洋. 山地风电风机基础土建施工难点及质量控制措施探析 [J/OL]. 中国科技期刊数据库工业 A,2026,(7):093-095.

[2] 王文强. 风电项目土建施工装配式建造模式应用研究 [J]. 住宅产业,2026,(6):94-96.

[3] 刘晔. 风力发电机组预应力锚栓基础施工工艺 [J]. 四川建材,2024,50(6):137-138+148.

[4] 章鸣浩. 山地风电设备基础土建施工难点与关键技术研究 [J]. 大众科学,2024,45(18):40-42.

[5] 周磊. 风电项目风机基础土建施工难点及质量管控技术研究 [J]. 电力研究,2025,8(16):1-4.