水电站压力管道土建埋设施工及沉降防控

王　刚
长江水利水电开发集团（湖北）有限公司　湖北　武汉　430015

摘　要：水电站压力管道土建埋设施工是水利发电工程的关键环节，施工质量与沉降控制效果直接影响管道结构稳定性与电站整体运行安全。本文系统阐述管道地基处理、主体埋设、分层回填及隐蔽工程验收等核心施工工艺，全面分析地基变形、施工缺陷、外部环境及运行荷载引发的沉降机理，建立覆盖施工前期、施工过程及后期运维的全维度沉降防控体系，结合工程实例验证技术成效，可为同类水利管道工程施工质量管控提供借鉴。

关键词：水电站；压力管道；土建埋设施工；沉降防控

引言：压力管道承担水电站输水发电的核心功能，埋设施工环境复杂、工序衔接紧密，对地基稳定性和施工标准化程度要求极高。实际工程中，地质条件不均、回填压实不达标、地下水侵蚀及设备动荷载等因素，极易引发管道不均匀沉降，造成管体错位、密封失效、渗漏破损等质量病害。为有效解决各类沉降隐患，规范现场施工流程，本文结合工程实践细化施工工艺，剖析沉降成因，制定科学完善的综合防控技术措施。

1 水电站压力管道土建埋设核心施工工艺

1.1 施工前期准备与地基处理

（1）工程地质勘察与管线布设方案优化。基于设计地勘报告，补充管槽沿线详勘，查明不良地质体分布；结合地形、岩性及地下水条件，比选管线走向与埋深，规避高陡边坡、断裂带，优化纵坡设计，减少大挖大填。（2）施工场地平整、土石方开挖与基底夯实工艺。清除地表植被、腐殖土，按设计高程进行管槽开挖，中风化岩层采用控制爆破，避免超挖扰动持力层；开挖至基底后采用凸块振动碾或冲击夯进行基底压实，压实度不低于设计值，局部陡坡段设台阶过渡。（3）软弱地基换填、加固预处理施工要点。对基底承载力不足的软塑黏土或淤泥质土层，采用级配砂砾石、碎石或低标号混凝土超挖换填，换填厚度经计算确定；换填层分层铺筑、振动碾压密实，检测地基承载力达标后方可进入下道工序。

1.2 压力管道埋设主体施工工序

（1）管道测量放线、基坑开挖与支护施工技术。采用全站仪或GPS精确定位管道轴线、高程控制点，放出开挖边线；深基坑采取分层开挖、分段支护，土质边坡采用土钉墙或钢板桩支护，岩质边坡锚喷支护，控制坡比，监测位移变形。（2）管道吊装、对位、安装固定标准化施工流程。采用汽车吊或履带吊多点平衡起吊，轻放至管槽内；人工配合千斤顶精确调整轴线偏位和高程误差至规范允许范围；安装完成后采用临时支墩或拉筋固定，防止浇筑移位[1]。（3）镇墩、支墩混凝土浇筑及管道包裹施工工艺。先浇筑镇墩基础，预埋锚筋与管道固定，再分层浇筑镇墩混凝土，振捣密实；管道底部采用细石混凝土填实包裹，顶部及两侧分层对称浇筑，控制浇筑速度防止管道浮动偏移。

1.3 回填施工与隐蔽工程质量控制

（1）分层回填材料选型与分层夯实施工标准。回填料选用级配良好砂砾石或碎石土，严禁含有机质、冻土及粒径超标块石；分层厚度按碾压试验确定，一般每层铺厚30cm，采用小型压路机或电动夯逐层压实，压实度 ≥ 93%。（2）管道周边精细化回填施工要点，规避空洞、压实不足问题。管道两侧同步对称回填，高差不超过一层厚度；管道腋下部位采用手工木锤或平板夯仔细捣实，管道顶部以上1m范围内采用轻型机械压实，避免直接冲击管壁，并用探地雷达抽检密实性。（3）隐蔽工程验收流程与施工质量初检管控要点。每完成一道隐蔽工序，施工方自检合格后报监理，联合进行地基验槽、管道安装偏差、防腐层完整性、焊缝检测、混凝土强度及回填压实度等验收，签署隐蔽工程验收记录，验收合格后方可覆盖进入下一工序。

2 水电站压力管道施工沉降成因及影响因素分析

2.1 地基基础自身沉降成因

（1）地基土体压缩、固结变形引发的自然沉降。天然地基在管道自重及上部回填土荷载作用下，土体骨架产生弹性压缩与塑性变形，同时孔隙水逐渐排出、有效应力增长，引发主固结沉降；对于深厚覆盖层或高压缩性黏土地基，次固结蠕变效应显著，工后持续沉降可达数年。若前期地勘未准确获取土体压缩性指标，沉降估算偏小将直接威胁管道结构安全。（2）软弱土层、地

质不均导致的不均匀沉降。管槽沿线穿越河漫滩、古河道、基岩起伏面或软硬岩层交界处时，不同土层的压缩模量和承载力差异悬殊，管道纵向刚度突变部位产生差异沉降。当相邻管段不均匀沉降量超过柔性接头允许转角或位移限值时，将引发接口拉开、密封失效，严重时可导致管身断裂[2]。（3）基坑开挖扰动、基底承载力不足引发的沉降隐患。基坑开挖过程对基底原状土产生卸荷扰动，造成土体回弹与结构损伤；若开挖超深未及时回填或基底长期暴露受水浸泡，土体强度衰减。后续管道安装与回填加载后，扰动土体发生再压缩沉降。爆破开挖地段，爆炸冲击波造成基底及侧壁岩体松动圈扩展，岩体完整性破坏，削弱了基础长期支承能力，后期沉降风险显著加剧。

2.2 施工工艺缺陷引发的沉降问题

（1）分层回填压实度不达标、回填材料配比不合理。实际施工中若分层铺筑厚度超限、碾压机具选型不当或含水率控制偏离最优值，回填土压实度难以达到设计指标，管侧土体密实度不足，在运行荷载作用下产生压密沉降。回填材料若含超粒径块石、有机质土或级配不良，土体空隙率偏大，自重固结及外荷载作用下将引发不均匀沉陷。（2）管道安装对位偏差、支墩浇筑质量不达标。管道安装轴线偏位或管底高程控制偏差超出规范允许范围，导致管身与地基接触状态不良，局部架空形成应力集中点；镇墩、支墩混凝土浇筑振捣不密实、强度未达设计要求即承载，支墩在高压力作用下产生压缩变形或局部压碎，进而引发管段整体下沉与错位。（3）施工工序混乱、养护不到位造成的后期沉降变形。管道安装与回填工序组织不当，如两侧回填高差过大导致管道侧向位移、先回填后实施焊接造成焊缝区域受力复杂；混凝土浇筑后养护时间和强度未达标即进行上部回填或水压试验，结构早期受力产生不可恢复塑性变形，长期累积加剧管道沉降。

2.3 外部环境与运行荷载影响因素

（1）地下水渗透、浸泡引发的土体软化沉降。地下水位上升或施工排水终止后，管槽回填土长期处于饱水状态，土体有效应力降低、抗剪强度衰减，产生湿陷性附加沉降；渗透水流持续作用下，管底垫层及侧壁细颗粒土被逐步掏蚀运移，形成隐伏空洞，后期在水压及上覆荷载作用下塌陷，导致管道突发性下沉。（2）管道内水压力、设备振动产生的附加沉降荷载。压力管道输水运行过程中，内水压力产生的环向拉应力和轴向温度应力经管壁传递至地基；水锤压力反复冲击加剧管基动载效应。水轮机及发电机组运行产生的周期性振动经管道传递至地基土体，引起回填土动力密实与结构弱化，在长时间动荷载循环作用下累积附加沉降量显著增大。（3）温度变化、土体干湿循环加剧沉降变形的机理。季节性温差使管道产生伸缩变形，管壁与回填土界面往复摩擦，导致管侧接触带土体松动、孔隙率增大。干湿交替环境下黏性土体发生胀缩循环，产生微裂隙和结构性损伤，土体压缩性升高、承载力下降；同时温度变化引起管道内部水体积变化，间接改变管基受力状态，在恒定上覆荷载作用下沉降速率明显加快[3]。

3 水电站压力管道施工沉降综合防控技术与工程应用

3.1 施工前期沉降预控技术

（1）精细化地质勘察与地基专项加固处理技术。施工前加密管槽沿线勘探孔，采用钻探结合原位测试（标准贯入、静力触探）查明土层分布及力学参数，针对高压缩性软土、液化砂层等不良地基，采用振冲碎石桩、CFG桩或高压旋喷桩进行深层加固，提高地基复合承载力，从源头控制工后沉降量。（2）优化管线施工方案，规避地质薄弱区域。依据勘察成果进行管线平面及纵断面多方案比选，优先选择基岩埋深浅、土质均匀的线路走向，对无法避绕的局部软弱段采取浅埋或架空过渡方案，从设计层面减少不均匀沉降风险。（3）施工参数提前验算，确定最优回填、浇筑参数。施工前依据地基承载力、管道刚度及回填土特性，进行沉降理论计算和数值模拟，确定分层回填厚度、碾压遍数、最优含水率及混凝土浇筑速率等关键参数，编制专项施工方案指导现场作业。

3.2 施工过程动态沉降防控措施

（1）分层回填压实精准管控与质量检测技术。每层回填前检测土料含水率，控制在最优含水率±2%范围内；采用智能压实监控系统实时采集碾压轨迹、振动频率和压实度，每层完成后采用灌砂法或核子密度仪检测，压实度合格后方可进行下一层施工，管侧关键部位加密检测频次。（2）镇墩、支墩及管体浇筑抗沉降优化施工工艺。镇墩地基设置混凝土垫层并预留锚筋与基岩连接，增强整体抗沉能力；支墩浇筑采用大流动度微膨胀混凝土，减少收缩变形，浇筑完成后覆盖保湿养护至设计强度；管道底部采用自密实混凝土充填，避免脱空。（3）施工全过程沉降实时监测、数据反馈与动态调整。沿管道纵向布设沉降观测标，关键断面安装静力水准仪或分层沉降仪，施工期间每日监测，数据实时上传管理平台；一旦监测沉降速率或累计值超预警阈值，立即暂停施工，分析原因并采取补强加固或调整施工参数等措施[4]。

3.3 后期运维沉降治理与加固技术

（1）管道沉降隐患排查与变形监测数据分析方法。运维期采用管道内窥机器人、探地雷达定期排查管身变形及管周空洞隐患，结合水准测量和分布式光纤监测系统获取全线沉降分布；通过绘制沉降-时间过程曲线和纵向沉降剖面图，分析沉降发展趋势，判断是否进入稳定阶段。（2）轻微沉降修复、不均匀沉降加固处理技术。对轻微均匀沉降且不影响安全运行的管段，采取注浆抬升或管底垫层补强；对不均匀沉降超限管段，采用静压注浆加固地基、增设钢内衬加固管身或局部开挖调整管道高程，恢复设计线形，接头部位重新密封处理。（3）长期运维沉降防控管理制度与保障措施。建立管道沉降定期巡检制度，制定年度监测计划与应急处置预案，明确沉降预警分级标准及响应流程；建立沉降监测数据库，定期开展数据分析评估，形成沉降防控长效机制，确保管道全生命周期运行安全。

3.4 工程案例应用与效果验证

（1）依托实际水电站工程的施工方案落地应用。以西南地区某大型水电站引水压力管道工程为例，设计水头约200m，管线全长约1.2km，穿越河漫滩及浅覆盖层地段。依据地质详勘结果，对约250m长软基段采用振冲碎石桩加固处理；施工中严格按验算的分层厚度30cm、压实度 ≥ 93%控制回填质量，并布设48个沉降监测点实施全过程动态监控。（2）沉降监测数据对比分析，验证防控技术有效性。监测数据显示，管道安装完成后初期沉降速率约0.8mm/d，随时间推移逐步衰减；充水试验后累计沉降量介于4.2 ~ 7.6mm之间，各断面差异沉降小于3mm，远小于设计允许值15mm。管周回填土压实度抽检合格率达到96.5%，管底脱空检测未发现明显空洞缺陷，各项指标均满足设计及规范要求[5]。（3）施工及沉降防控技术应用总结与优化建议。工程实践表明，前期精细勘察与地基加固是沉降防控的根本保障，施工过程智能监控与动态反馈是质量控制的关键手段，后期系统监测与预警机制是长期安全的有效支撑。建议后续类似工程进一步推广应用自动化监测系统，加强施工期与运维期数据联动分析，建立沉降预测模型，持续提升沉降防控水平。

结束语

本文通过梳理水电站压力管道土建埋设全套施工工艺，系统探究不同工况下沉降病害的诱发因素与发展规律，形成了事前预防、事中管控、事后治理的一体化沉降防控技术方案。工程应用表明，整套工艺与防控措施能够有效控制管道沉降变形，保障施工质量。后续可结合智能化监测、数据模拟分析等新技术优化防控策略，进一步提升压力管道全生命周期的安全稳定运行水平。

参考文献

[1]伍鹤皋,王卓,石帅.深埋水电站压力管道地基不均匀沉降机理与防控技术[J].人民长江,2025,56(12):136-142.

[2]张双红,李茂东,郭淼.水电站压力管道土建埋设回填施工质量控制与沉降治理[J].水利水电技术,2024,55(08):143-149.

[3]王满想,郑宏杰,赵荣生.复杂地质水电站压力管道埋设施工及沉降防控策略[J].人民黄河,2023,45(S02):20-27.

[4]马子昌,张继勋,任旭华.地层扰动对水电站埋管沉降变形的影响及防控[J].水电能源科学,2023,41(10):149-153.

[5]李毅强,杜晓凡,羊栖均.水电站压力管道土建埋设施工难点及沉降病害防控[J].水电站设计,2025,31(03):71-79.