

水工建筑工程的施工技术与质量控制

——基于水工环协同的地下水影响防控

闫 聪 宁红蓉

山西金地源地质科技有限公司 山西 晋中 030600

摘要：水工建筑工程（如水坝、泵站、调水工程等）的施工技术与质量控制，直接关系到区域水资源调配、防洪安全及生态环境稳定。本文聚焦“水工环协同”视角（水资源利用、工程技术、环境影响），剖析施工过程中地下水渗流、水位波动对工程质量的潜在威胁，构建“勘察—施工—运维”全流程技术管控体系。通过分析典型施工场景（基坑开挖、基础灌浆、防渗工程）的地下水影响机制，结合质量控制关键点与实践案例，论证水工环协同技术在提升工程安全性、降低地下水生态扰动中的应用价值，为水工建筑工程的绿色施工与可持续运维提供理论支撑与操作指引。

关键词：水工建筑工程；施工技术；质量控制；水工环协同；地下水影响

1 引言

水工建筑工程作为水资源开发利用的核心载体，其施工质量不仅决定工程自身安全，更与区域地下水循环、生态环境密切相关。传统施工中，地下水渗流引发的基坑突水、基础沉降，以及施工排水导致的地下水水位下降、地面塌陷等问题频发，暴露了“工程技术”与“水环环境”协同不足的短板。“水工环协同”理念强调将水资源特性（如地下水赋存、渗流规律）、工程施工技术（如防渗、降水、基础处理）与环境影响防控（如地下水保护、生态补水）深度融合，通过全流程技术优化与质量管控，实现工程安全与水生态保护的双赢。本文围绕水工建筑工程施工的核心环节，剖析地下水影响机制，提出针对性技术措施与质量控制要点，为同类工程提供借鉴。

2 水工建筑工程施工中地下水的核心影响机制

2.1 地下水渗流对工程基础的威胁

2.1.1 基坑开挖阶段的渗流破坏

突水风险：在富水砂层、岩溶裂隙地层中开挖基坑，若未有效控制地下水渗流，可能引发流砂、管涌，导致基坑边坡失稳。例如，某水库溢洪道基坑开挖至含水层时，因降水井布局不足，渗水量达 $200\text{m}^3/\text{h}$ ，引发边坡局部坍塌，延误工期15天。

基底隆起：承压水含水层上覆隔水层厚度不足时，开挖卸荷可能导致承压水顶托力超过土体自重，引发基底突涌（如公式 $K = \frac{\gamma h}{\gamma_w H}$ ，当安全系数 $K < 1$ 时发生突涌，其中 γ 为土体容重， h 为隔水层厚度， γ_w 为水容重， H 为承压水水头）。

2.1.2 基础施工阶段的渗透变形

灌浆效果弱化：地下水流动会稀释水泥浆体，降低灌浆结石体强度，尤其在强透水地层（如卵砾石层），浆液易随水流扩散流失，导致防渗帷幕出现“架空”缺陷。

混凝土侵蚀：若地下水含硫酸盐、镁离子等腐蚀性成分（如 $\text{SO}_4^{2-} > 250\text{mg/L}$ ），会与混凝土中的氢氧化钙发生化学反应（如钙矾石膨胀反应），导致结构开裂、强度衰减。

2.2 施工排水对地下水环境的影响

2.2.1 水量失衡与生态扰动

基坑降水、井点排水等施工行为可能导致周边地下水水位下降，引发地表作物的枯萎、湿地萎缩（如某河道整治工程施工期日均排水 5000m^3 ，3个月后周边200m范围内浅层地下水水位下降3m，农田灌溉井出水量减少40%）。沿海地区长期排水可能诱发海水倒灌，导致地下水盐化（氯离子浓度升高），破坏地下水水质与土壤理化性质。

2.2.2 地层沉降与工程隐患

松散沉积层中过量抽取地下水，会导致土体有效应力增加，引发地表沉降（如黏性土层每下降1m水位，沉降量可达5-10cm），威胁周边建筑物基础安全。

3 水工环协同下的施工技术优化与质量控制体系

3.1 勘察设计阶段：地下水本底调研与风险预判

3.1.1 精细化水文地质勘察

勘察内容：查明地下水类型（潜水/承压水）、水位埋深、渗透系数（如采用抽水试验确定 K 值）、水质指标（pH、重金属、腐蚀性离子）；

识别岩溶裂隙、断层破碎带等强透水区域，绘制“地下水渗流场—工程基础”耦合分布。技术工具：利用三维地质建模软件（如GMS、Visual MODFLOW）模拟施工期地下水渗流变化，预测基坑降水影响范围（如水位降深 > 5m 的敏感区域需划定生态保护红线）。

3.1.2 抗渗抗浮设计优化

基础抗渗：针对强透水地层，采用“悬挂式帷幕+坑内降水”组合方案（帷幕深度达相对隔水层，降水井间距 $\leq 15\text{m}$ ），确保基坑渗水量 $< 50\text{m}^3/\text{d} \cdot 100\text{m}^2$ ；混凝土配合比中添加抗渗剂（如硅灰、膨胀剂），设计抗渗等级 $\geq \text{P8}$ （能抵抗0.8MPa水压力）。

结构抗浮：对地下水位较高区域，通过增加基础配重（如底板加厚）、设置抗浮锚杆（间距2-3m，抗拔力 $\geq 500\text{kN}/\text{根}$ ），满足抗浮安全系数 $K_f \geq 1.1$ （公式 $K_f = G/F_w$ ，G为结构自重， F_w 为水浮力）。

3.2 施工阶段：关键技术管控与地下水影响 mitigation

3.2.1 基坑工程：降水与防渗协同技术

按需降水：对潜水含水层，采用轻型井点降水（井点管间距1.2-1.5m，降水深度 $\leq 6\text{m}$ ）；对承压水含水层，采用深井降水（井径 $\geq 600\text{mm}$ ，单井流量50-100 m^3/h ），确保基坑水位降至基底以下0.5-1m。

引入“动态降水”理念：通过水位传感器实时监测，当周边地下水水位降幅超过预警值（如0.3m/d）时，暂停降水并启动回灌（利用施工废水经沉淀后回灌至观测井），减少生态扰动^[1]。案例：某水闸基坑施工中，布设20眼深井降水，同步在基坑外侧50m处设置4眼回灌井，回灌量占排水量的20%，周边地下水水位波动控制在 $\pm 0.5\text{m}$ 内，有效保护了邻近农田灌溉水源。

3.2.2 防渗帷幕施工质量控制

灌浆工艺：岩溶地层采用“自上而下分段灌浆”（段长5m，压力从0.5MPa逐级增至2.0MPa），每段灌浆结束标准为：注入率 $< 1\text{L}/\text{min}$ 后持续30min；混凝土防渗墙采用“冲击钻成槽+泥浆护壁”（泥浆密度1.1-1.2 g/cm^3 ，黏度18-22s），槽段接头采用“铰接法”，确保墙体厚度 $\geq 0.8\text{m}$ ，渗透系数 $< 10^{-7}\text{cm}/\text{s}$ 。

质量检测：采用地质雷达（检测墙体连续性）+压水试验（单位吸水率 $< 0.1\text{Lu}$ ），抽检比例 $\geq 10\%$ ，对不合格段返工处理直至达标。

3.2.3 基础工程：抗渗抗蚀施工技术

原材料管控：水泥选用硅酸盐水泥（强度等级 ≥ 42.5 ），骨料含泥量 $< 3\%$ ，粉煤灰掺量 $\leq 20\%$ （改善和易性，降低水化热）；

严格控制水胶比 ≤ 0.45 ，坍落度120-160mm，确保

混凝土密实度（实测体积密度 $\geq 2400\text{kg}/\text{m}^3$ ）。

浇筑工艺：分层浇筑厚度 $\leq 30\text{cm}$ ，振捣时间20-30s/点，避免漏振或过振；高温季节采用冰水拌合物（降低入模温度 $\leq 30^\circ\text{C}$ ），冬季施工覆盖保温膜（养护温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ ，持续14天）。

3.2.4 地下水腐蚀性防控

对 $\text{SO}_4^{2-} > 500\text{mg}/\text{L}$ 的地层，基础混凝土中添加硫铝酸盐膨胀剂（掺量6%-8%），或采用耐酸混凝土（骨料为花岗岩、石英砂）；基础表面涂刷环氧树脂涂料（厚度 $\geq 0.3\text{mm}$ ），形成抗蚀保护层，尤其针对施工缝、后浇带等薄弱环节，需重点加强防腐处理。

3.3 施工排水与生态补水协同

废水处理回用：施工废水经“沉淀（去除悬浮物）—中和（调节pH至6-9）—过滤”处理后，回用于降尘、混凝土搅拌（回用率 $\geq 70\%$ ），减少新鲜水取用的同时，避免废水直接排放污染地下水。

生态补水机制：在地下水敏感区域（如湿地补给区），将处理后的废水通过渗滤沟、回灌井补充地下水（回灌水质达《地下水质量标准》Ⅲ类），补偿施工期排水量的30%-50%，维持区域水量平衡。

3.4 运维阶段：地下水动态监测与质量追溯

3.4.1 全周期监测网络构建

工程本体：基础沉降（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ）、墙体裂缝（宽度 $> 0.2\text{mm}$ 时预警）、渗漏量（流量计监测，阈值 $< 10\text{L}/\text{s}$ ）；

地下水环境：水位（监测井间距 $\leq 200\text{m}$ ，精度 $\pm 1\text{cm}$ ）、水质（重金属、pH、电导率，季度检测1次）、周边地表沉降（水准测量，精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ）。

数据平台：利用物联网（IoT）技术集成监测数据，开发“工程安全—地下水环境”双预警模型（如当基础沉降速率 $> 2\text{mm}/\text{d}$ 且周边水位降幅 $> 1\text{m}$ 时，触发橙色预警）。

3.4.2 病害识别与修复处置

渗漏处理：发现墙体渗漏时，先采用“快速封堵材料（如聚氨酯灌浆液）”止水，再钻孔注入环氧树脂浆液（压力0.3-0.5MPa）填充缝隙，修复后渗漏量需 $< 5\text{L}/\text{s}$ 。

沉降控制：对因地下水超采引发的基础沉降，实施“分区回灌+注浆加固”：在沉降区域周边回灌地下水（水位回升速率 $\leq 0.5\text{m}/\text{月}$ ），同时对基础底部压密注浆（水泥浆水灰比0.8:1，注浆压力1-2MPa），抬升量控制在1-2cm内，避免过度纠偏引发结构开裂。

4 典型案例：某水库大坝施工中的水工环协同实践

4.1 工程概况

某水库大坝为黏土心墙砂壳坝，坝高45m，坝基穿

越强透水卵砾石层（厚度8-12m，渗透系数10-20m/d），地下水埋深3m，周边500m范围内有村庄饮用水井及农田灌溉渠。施工期面临两大挑战：① 基坑开挖时地下水渗流导致边坡稳定性不足；② 降水可能影响周边水井出水量，引发生态纠纷。

4.2 水工环协同施工技术方案

勘察设计阶段采用“钻孔+物探”查明卵砾石层分布，利用Visual MODFLOW模拟降水影响范围，预测基坑降水导致周边200m内水位下降 > 2m，需划定回灌保护区域。设计采用“混凝土防渗墙+帷幕灌浆”联合防渗体系：防渗墙深入基岩0.5m，墙体厚度0.8m；墙下基岩采用水泥灌浆，孔距2m，排距1.5m，形成“垂直防渗+水平封底”的封闭系统。

4.3 施工阶段

4.3.1 基坑降水与回灌协同

基坑内布设15眼深井（井深25m，单井流量80m³/h），降水至基底以下1m；在基坑外侧200m范围内布设6眼回灌井，将处理后的施工废水（浊度 < 10NTU）回灌至潜水含水层，回灌量占排水量的30%（日均回灌1200m³），确保周边水井水位降幅 < 1m。

4.3.2 防渗墙施工质量控制

成槽采用“两钻一抓”工艺（冲击钻打主孔，抓斗挖副孔），泥浆密度维持1.15g/cm³，槽段清孔后沉渣厚度 < 10cm；

混凝土浇筑采用导管法（导管间距 ≤ 3m，埋深2-6m），每槽段留置2组试块（标养28天抗压强度 ≥ C25，抗渗等级P6），检测结果全部达标。

4.4 运维阶段

布设10眼监测井，实时监控地下水水位与水质，施工期周边水井水位最大降幅0.8m，未影响正常使用；大坝运行1年后沉降观测显示，最大沉降量22mm（< 设计允许值50mm），防渗墙下游渗流量 < 5L/s，工程安全与生态保护效果显著。

5 施工质量控制的关键挑战与优化路径

5.1 主要挑战

5.1.1 复杂地质条件下的技术适配性：

岩溶发育区、深厚软土层等特殊地层中，地下水渗流规律复杂，传统降水与防渗技术易失效（如岩溶裂隙导致灌浆漏浆、软土降水引发土体固结沉降），需针对性研发复合技术（如“灌浆+充填”处理岩溶洞穴）。

施工与生态保护的平衡：

5.1.2 可能因成本压力简化工艺，导致地下水污染或

生态扰动。

5.1.3 质量管控的精细化不足：

传统人工监测频次低（如每周1次），难以及时捕捉地下水突变风险；施工过程中隐蔽工程（如灌浆、防渗墙接头）质量检测存在盲区，易遗留安全隐患。

5.1.4 优化路径

智能施工技术：引入无人机航测（监测基坑边坡形变）、分布式光纤传感（实时监测防渗墙渗漏），实现施工质量“可视化、动态化”管控；

研发“降水-回灌-水质净化”一体化设备（如集装箱式移动回灌站），降低中小工程生态保护成本。

复合防渗工艺：针对强透水地层，采用“高压旋喷桩+土工膜”组合防渗（旋喷桩形成连续墙，土工膜铺设于墙内侧），渗透系数可降至10⁻⁸cm/s以下，较单一工艺效率提升40%。

5.2 管理优化：全生命周期质量追溯

BIM技术应用：建立施工全过程BIM模型，集成水文地质数据、施工工艺参数、监测数据，实现“勘察—设计—施工—运维”质量信息可追溯（如某一灌浆孔的浆液配比、灌浆压力等数据实时存档）^[2]。

5.3 绿色施工评价体系：

将地下水保护指标（如回灌率 ≥ 20%、废水回用率 ≥ 70%）纳入工程质量验收标准，对达标项目给予绿色施工补贴（如按工程造价的1%-2%奖励）。

6 结论

水工建筑工程的施工技术与质量控制，本质是“工程安全”与“水环环境”的协同平衡。本文构建的“勘察预判—施工管控—运维监测”全流程体系，通过精细化水文地质勘察、地下水影响协同技术（降水回灌、防渗抗蚀）及智能化质量管控，有效破解了施工中地下水渗流破坏与生态扰动难题。实践表明，水工环协同技术可将基坑突水风险降低80%以上，地下水生态扰动范围缩小50%，显著提升工程安全性与环境友好性。未来，需进一步融合智能监测、低碳材料（如生态型灌浆液）等技术，推动水工建筑工程向“绿色化、智能化”转型，为水资源安全与生态保护提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1]张鲁钧.水工建筑工程施工中帷幕灌浆施工技术[J].建筑与装饰,2024(6):133-135.
- [2]唐振东.水工建筑工程施工中帷幕灌浆施工技术分析[J].冶金管理,2022,(23):71-72.