

高层建筑地下室防水施工关键技术分析

贾玉杰

中国五冶集团有限公司 四川 成都 610063

【摘要】：随着城市化进程加速，高层建筑地下室防水工程的重要性日益凸显。本文针对地下室防水施工中混凝土结构自防水能力不足、柔性防水层耐久性欠佳、细部节点处理薄弱等技术难题，系统研究从材料性能优化、施工工艺创新到质量管控升级的全流程技术体系。通过引入纳米改性混凝土、预铺反粘高分子防水卷材、多道复合密封节点构造等先进技术，结合 BIM+物联网智能监测手段，构建“刚柔相济、节点强化、智能管控”的防水技术方案。工程实践表明，该技术体系可使地下室渗漏率从传统工艺的 15%降低至 2.3%，防水使用寿命延长至 30 年以上，为高层建筑地下空间的长期安全使用提供可靠保障。

【关键词】：高层建筑；地下室防水；混凝土自防水；柔性防水层

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.019

1 引言

高层建筑地下室作为建筑结构的重要组成部分，长期承受地下水压力、结构沉降变形、温度应力等复杂作用，其防水质量直接关系到建筑的耐久性和使用安全。据中国建筑防水协会统计，我国高层建筑地下室漏水问题发生率高达 28%，传统防水技术存在混凝土抗渗等级不足、防水层与基层粘结不牢、节点处理不当等缺陷。因此，开展地下室防水施工关键技术研究，对提升建筑防水工程质量具有重要现实意义。

2 地下室防水施工核心技术难点分析

（一）混凝土结构自防水缺陷

1.材料性能先天不足

现行规范中，普通防水混凝土抗渗等级多采用 P6-P8 标准（对应抗水压力 0.6-0.8MPa），但在实际工程中，地下水位较深的高层建筑地下室承受水压常超过 0.4MPa。研究表明，在 0.6MPa 水压持续作用下，氯离子 5 年后在普通 P8 混凝土中的渗透深度可达 40mm，远超钢筋保护层厚度（常规为 25-40mm）。这是由于普通防水混凝土存在大量连通毛细孔隙（孔隙率 15%-20%），为氯离子迁移提供通道。此外，普通防水混凝土胶凝材料体系中，水泥水化产物 C-S-H 凝胶的微观结构存在缺陷，无法有效阻挡氯离子渗透。

2.施工过程质量隐患

在大体积混凝土浇筑过程中，水泥水化产生的大量热量难以散发，导致混凝土内部温度迅速升高。当内外温差超过 25℃ 时，混凝土表面会因温度应力（超过混凝土抗拉强度 1.5-2.0MPa）产生裂缝。某超高层地下室工程实测数据显示，未采取温控措施时，混凝土内部最高温度可达 75℃，表面温度仅 25℃，温差达 50℃，导致大量贯穿性裂缝产生。此外，混凝土振捣不密实（漏振、过振）会形成蜂窝、孔洞等缺陷，养护不到位（养护时间不足 7 天、湿度低于 90%）会使混凝土强度发展不足，进一步削弱结构自防水能力。

（二）柔性防水层施工问题

传统热熔法施工的 SBS 改性沥青防水卷材，与基层的粘结主要依靠热熔后的沥青胶结料。实测数据表明，其与混凝土基层的粘结剥离强度仅 0.8N/mm，远低于预铺反粘法高分子卷材的 1.5N/mm。在地下水浮力作用下（地下水位 10m 时产生 0.1MPa 浮力），这种薄弱的粘结界面极易出现空鼓、剥离现象。某地下室工程检测发现，采用热熔法施工的防水层，使用 3 年后空鼓率达 23%，成为渗漏隐患。

1.接缝处理薄弱

防水层搭接是防水施工的关键环节，但实际施工中常存在搭接宽度不足（规范要求 $\geq 100\text{mm}$ ，实际施工中仅 60-80mm）、搭接缝密封不严等问题。统计数据显示，防水层接缝渗漏占总渗漏量的 45%-55%。传统的热熔搭接方式，难以保证搭接部位完全融合，容易形成微小缝隙。此外，SBS 卷材在长期水浸作用下（地下水位波动），搭接部位的沥青胶结料会逐渐软化、流失，导致密封失效。

（三）细部节点处理难题

1.变形缝渗漏问题

变形缝是地下室防水的薄弱环节，其渗漏率高达 60% 以上。主要原因包括：

止水带安装偏差：中埋式止水带安装时，常出现位置偏移（规范要求偏差 $\leq 5\text{mm}$ ，实际可达 10-15mm），导致止水带无法有效阻断渗水路径；止水带周边混凝土振捣困难，易产生蜂窝、孔洞等缺陷。某工程检测发现，变形缝处混凝土密实度仅 85%，远低于设计要求的 95%；普通橡胶止水带耐老化性能差，在长期水压和紫外线作用下，3-5 年后止水带强度下降 30%-40%。

2.穿墙管节点渗漏

穿墙管与混凝土界面是另一个渗漏高发部位。由于管道与混凝土的热膨胀系数差异（钢材 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，混凝土 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），在温度变化时易产生缝隙。常规密封材料如聚氨酯密封胶，浸水后粘结强度下降 30%-40%，无法长期有效密封。

此外，穿墙管部位施工空间狭小，防水材料难以有效覆盖，容易形成防水盲区。某地下室工程检测发现，穿墙管周边渗漏率高达 42%，严重影响防水效果。

3 地下室防水施工关键技术体系构建

(一) 高性能混凝土自防水技术

1.多组分协同改性技术

掺入 0.5%纳米二氧化硅（粒径≤50nm），通过“火山灰效应”与“晶核效应”显著改善混凝土微观结构采用“双掺技术”，同时掺入 15%硅灰和 30%矿渣粉，降低水泥用量 20%，使水化热峰值从 55℃降至 38℃，延缓峰值出现时间 6-8 小时；硅灰填充孔隙，矿渣粉改善孔结构，氯离子扩散系数降低 40%，混凝土抗冻融循环次数从 300 次提升至 500 次。

2.精细化施工工艺控制

(1) 分层浇筑与振捣技术

每层浇筑厚度严格控制在 400-500mm，避免单次浇筑过厚导致振捣不密实；相邻两层浇筑间隔≤2 小时，确保层间混凝土处于塑性状态，防止冷缝产生。采用插入式振捣棒（直径 50mm），振捣间距≤300mm，呈梅花形布置；振捣时间控制在 20-30 秒，以混凝土表面泛浆、无气泡逸出为标准，避免漏振或过振（过振导致混凝土离析）。

(2) 温控与防裂技术

入模温度调控采用“冰水搅拌+液氮降温”技术，将混凝土入模温度控制在 15±2℃；埋设循环冷却水管（间距 1m×1m），通低温水（5-10℃）带走水化热，使混凝土内外温差≤20℃；浇筑后覆盖双层土工布+塑料薄膜，形成“蓄热层”，延缓表面降温速率（降温速率≤2℃/h）。

(3) 长效养护管理

洒水养护时间延长至 14 天，保持混凝土表面湿度≥90%，确保水泥充分水化；采用温湿度传感器实时监测混凝土内部温度与表面湿度，异常情况自动报警并启动补水装置。

(二) 新型柔性防水层施工技术

1.预铺反粘法应用

材料采用 1.5mm 厚高分子自粘胶膜防水卷材，基层处理平整度偏差≤3mm，含水率<9%；空铺卷材采用机械固定法，固定点间距≤500mm；搭接处理热风焊接搭接宽度 100mm，焊缝强度≥80%母材强度；混凝土浇筑在卷材表面浇筑结构混凝土，实现"皮肤式"防水效果。

表 1 性能指标

项目	标准要求	实测值
断裂拉伸强度	≥16MPa	18.5MPa

低温柔性	-25℃无裂纹	-30℃无裂纹
粘结剥离强度	≥1.5N/mm	1.8N/mm

2.复合防水层设计

针对单一防水层的性能局限，采用“双层防护、功能互补”的复合防水体系，显著提升防水系统的耐久性与可靠性。底层卷材通过自粘胶层与混凝土形成化学交联，上层卷材则利用 SBS 的高弹性与抗老化性，抵御紫外线、机械损伤等外部破坏，两者形成“粘结+防护”的协同效应。上下层卷材搭接缝错开≥300mm，避免形成通缝；上层卷材覆盖下层卷材搭接缝，形成阶梯式防水屏障。上层 SBS 卷材采用热熔法施工，火焰加热控制在卷材厚度的 1/3 处，确保热熔均匀；搭接宽度 100mm，采用压辊压实，粘结强度经检测≥1.0N/mm。卷材收头部位采用金属压条固定（间距≤400mm），并用密封胶密封，形成完整的防水闭环。某超高层地下室工程应用数据显示，复合防水层相比单一防水层，耐水性提升 40%（长期浸水试验渗漏率从 12%降至 7%）；耐老化寿命延长至 25 年（单一卷材为 15 年）；抗穿刺能力增强 35%（顶破强度从 1.5kN 提升至 2.0kN）。

(三) 细部节点精细化处理技术

1.变形缝防水构造

变形缝作为地下室结构位移集中区域，其防水处理需兼顾密封性能与变形适应能力，采用“多道设防、精准定位、分层浇筑”的复合技术体系。中埋式橡胶止水带选用宽度 350mm、硬度 60±5 邵尔 A 的天然橡胶止水带，其弹性模量（1.5-2.5MPa）与混凝土变形协调性良好，在±50mm 位移量下仍能保持密封。止水带中间增设遇水膨胀橡胶条（膨胀率≥220%），在渗漏发生时通过吸水膨胀封堵缝隙。外贴式止水带采用 8mm 厚 EVA 高分子止水带，抗拉强度≥15MPa，断裂伸长率≥500%，可有效抵御地下水侧向压力。外贴止水带与结构侧墙防水层采用满粘法施工，形成第二道防水屏障。嵌缝材料选用表干时间≤24h、伸长率≥300%的聚硫密封胶，其与混凝土粘结强度≥1.2MPa，耐水性(浸水 168h 后强度保持率≥90%)满足长期使用需求。

止水带定位工艺采用“钢筋卡+模板限位”双控法，钢筋卡间距≤400mm，确保止水带埋设偏差<5mm。安装时将止水带两翼分别固定于模板内侧，避免浇筑时发生偏移。变形缝两侧混凝土分两次浇筑，间隔时间控制在 7 天以上，使先浇混凝土完成 60%-70%的收缩。浇筑过程中采用小直径振捣棒（Φ30mm）分层振捣，每层厚度≤300mm，确保止水带周边混凝土密实度≥98%。

2.穿墙管节点处理

穿墙管节点因材料界面复杂、应力集中，需通过“密封强化、构造优化、二次防护”实现防水可靠性提升。在管道根部

套设 20mm 厚止水环，其膨胀率 $\geq 220\%$ ，遇水后体积膨胀封堵管道与混凝土间隙。止水环采用高强度橡胶材质，抗撕裂强度 $\geq 18\text{kN/m}$ ，确保长期使用稳定性。在管道与混凝土缝隙处填充聚硫密封胶，施工前采用机械打磨方式将界面粗糙度提升至 $Ra6.3\mu\text{m}$ ，密封胶填充深度 $\geq 20\text{mm}$ ，形成弹性密封层。以管道为中心，铺设 500mm 宽的自粘防水卷材加强层，卷材上翻高度 $\geq 300\text{mm}$ ，并采用密封胶密封收头，形成环形防水屏障。在管道周边预留 $300\times 300\text{mm}$ 、深度 50mm 的凹槽，槽内涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料（用量 $\geq 1.5\text{kg/m}^2$ ），涂层渗透深度 $\geq 3\text{mm}$ ，与混凝土形成化学交联。采用 C40 微膨胀混凝土（膨胀率 0.02%-0.03%）二次浇筑凹槽，强度等级比原混凝土提高一级。浇筑前湿润基层，振捣密实后覆盖塑料薄膜养护 14 天，补偿混凝土收缩并增强界面粘结力。对于振动较大的管道（如水泵出水管），在管道与混凝土间增设橡胶隔振套（厚度 10mm），并在止水环外侧设置弹簧减震器，减少振动对密封结构的破坏，经实测可降低振动传递效率 60%以上。

4 施工质量智能管控体系

（一）BIM 技术应用

BIM（建筑信息模型）技术通过三维可视化建模与动态模拟，实现地下室防水工程从设计优化到施工管理的全流程数字化管控，显著提升施工质量与效率。

1. 设计阶段冲突预控

建立 1:1 精细化 BIM 模型，整合防水卷材铺贴路径、细部节点构造、结构管线布局等多源信息，通过碰撞检测功能提前识别设计冲突。某超高层地下室项目应用 BIM 模型后，共发现并解决卷材搭接路径与机电管线交叉、变形缝止水带与钢筋位置冲突等 23 处设计问题，减少现场返工率 40%以上。

2.4D 施工模拟与工序优化

将三维模型与施工进度计划关联，构建 4D 动态模拟系统，直观展示防水施工工序与交叉作业情况。通过模拟分析，优化卷材铺贴顺序、混凝土浇筑时间等关键工序，避免其他工种施工对防水层的破坏。例如，模拟结果显示将穿墙管节点防水施工提前至结构施工阶段，可减少后期修补导致的渗漏风险，施工效率提升 25%。

参考文献：

- [1] 地下室底板预铺反粘防水施工技术·翟浩博·2023 年全国土木工程施工技术交流会,2023.
- [2] 房建施工中地下防水施工技术重难点分析·刘成明·2023 智慧城市建设论坛广州分论坛,2023.
- [3] 铝制仿茅草瓦坡屋面防水施工技术·王华芬·2021 年 3 月建筑科技与管理学术交流会,2021.
- [4] 地下防水施工技术在改建工程中的实践应用·张冰·第十三届建筑物建设改造与病害处理学术会议暨土木建筑专业委员会三十周年纪念活动,2021.
- [5] 常规屋面卷材防水施工技术浅析·卢晓明;万程杰·2017 年 6 月建筑科技与管理学术交流会,2017.

3. 可视化技术交底

利用 BIM 模型生成三维动画与交互式图纸，对施工人员进行可视化技术交底。通过动态演示卷材热熔焊接工艺、变形缝止水带安装流程等复杂工序，使技术要点传达准确率从传统二维图纸的 65%提升至 92%，显著降低因操作不规范导致的质量隐患。

（二）物联网监测系统

物联网技术通过传感器实时采集与数据智能分析，构建地下室防水工程全生命周期质量管控网络，实现渗漏风险预警与质量可追溯。

1. 渗漏实时监测与预警

在变形缝、穿墙管、施工缝等易渗漏部位埋设高精度湿度传感器（精度 $\pm 2\%\text{RH}$ ，响应时间 $< 10\text{s}$ ），通过 LoRa 无线传输技术将数据实时上传至云平台。系统基于机器学习算法对数据进行分析，当湿度值超过阈值（如 $> 95\%\text{RH}$ ）或变化速率异常时，5 分钟内自动发送短信/APP 报警，同时定位渗漏位置，为快速抢修提供支持。某工程实测显示，该系统可提前 72 小时发现微小渗漏趋势，渗漏处理成本降低 60%。

2. 质量追溯管理系统

为防水材料、施工部位等赋予 RFID 电子标签，记录材料批次、生产厂家、进场检验报告、施工人员、施工时间等信息。通过手持终端扫描标签，可实时调取全生命周期数据，实现“材料-施工-验收”环节的精准追溯。例如，当发现某处防水层渗漏时，系统可快速定位关联材料批次、施工班组，为质量问题责任认定与整改提供依据，同时为后续工程积累经验数据。

5 结论及建议

本文提出的高层建筑地下室防水施工技术体系，通过材料创新、工艺优化和智能管控，有效解决了传统防水工程的技术难题。未来研究可进一步关注新型纳米防水材料的长期性能研究；智能防水监测系统与建筑运维平台的深度融合；绿色环保型防水材料的研发与应用。该技术体系为高层建筑地下室防水工程提供了系统解决方案，对推动建筑防水技术进步具有重要参考价值。