

桥梁和隧道施工中注浆技术的应用研究

唐钰茗

重庆中环建设有限公司 重庆 400000

摘要:某大型跨江大桥主塔基础围堰在施工过程中出现严重漏水问题,封底混凝土多次被击穿,采用速凝膏浆结合稳定性浆液的注浆技术,运用孔口封闭纯压式分段分序灌注工艺,成功解决了围堰防渗方面的难题。技术应用效果显著,为桥梁隧道施工中类似渗漏问题的处理提供有效技术方案和实践经验。

关键词:注浆技术;桥梁施工;围堰防渗;速凝膏浆;水下堵漏

引言

桥梁和隧道工程施工中经常遇到复杂的地质水文条件,围堰漏水、结构渗漏等问题直接影响工程安全和施工进度,注浆技术作为一种有效的防渗加固手段,在解决这类工程难题的过程中发挥着重要作用^[1]。通过对某大型跨江大桥主塔基础围堰水下堵漏工程开展深入研究,分析注浆技术于复杂水下环境当中的应用特点,总结施工工艺要点和质量控制相关措施,为类似工程提供相应的技术参考。

1 工程概况

该跨江大桥工程采用双塔单索面轻轨两用部分斜拉桥设计,东岸主桥全长858 m,主跨445 m,西岸主桥全长720 m,采用独塔单索面结构,桥梁设置为上下双层布局,上层承载机动车交通,下层为轨道交通系统,东岸主塔P1墩位于江心石梁区域,采用双壁钢沉井围堰技术进行基础开挖施工。

工程施工遭遇严重技术难题,两次封底混凝土施工均告失败,总厚度达3.5~4 m的封底混凝土在抽水过程中被水压击穿^[2]。漏水原因主要为基底砂石层清理不彻底,混凝土浇筑形成了薄弱层,钢护筒钻孔施工造成了裂隙损伤,承台底部距离江面有11~15 m,面临巨大静水压力挑战,围堰防渗处理成为工程关键技术难点。

2 注浆技术应用与实施

2.1 注浆材料选择与配比设计

该工程采用速凝膏浆与稳定性浆液相结合的复合注浆材料体系,速凝水泥膏浆以普通硅酸盐水泥为基材,掺入适量速凝剂配制而成,具备优异的抗水流冲刷性能以及宾汉体流动特性^[3]。材料配比设计时水灰比控制在0.45~0.5的范围内,速凝剂掺量为水泥质量的3%~5%,确保浆液在动水条件下有良好触变性和扩散能力,稳定性浆液采用水泥-水玻璃双液体系,通过调节水玻璃模数和掺量控制凝结时间,适应不同渗

透条件下的灌浆需求。

材料性能测试表明,速凝膏浆初凝时间可控制在2~8分钟,终凝时间不超过15分钟,28天抗压强度达到20~25 MPa。稳定性浆液的凝结时间可以在5分钟至2小时这个范围内进行调节,固结体渗透系数 $< 1 \times 10^{-7}$ cm/s,能够满足围堰防渗的技术要求,两种材料发挥协同作用,速凝膏浆主要负责快速封堵大孔隙以及裂缝,稳定性浆液则用来渗透填充细微的缝隙,形成完整的防渗屏障体系。

2.2 注浆工艺方案制定

注浆工艺方案采用双排梅花形孔位布置与分段分序施工相结合的技术路线,灌浆孔沿钢沉箱内侧设置两条平行灌浆带,外排孔距围堰内壁1.0 m,内排孔与外排保持1.0 m间距^[4]。常规孔间距为2.5~3.0 m,渗漏严重区域加密至1.5~2.0 m,围堰中部考虑结构完整性要求调整为3.0~5.0 m,孔深设计穿透封底混凝土薄弱层,进入基岩底部0.5~1.0 m,承台底部灌浆孔深度低于承台底面2.0~3.0 m。

注浆压力参数采用分阶段控制策略,起始阶段压力控制在0.1~0.2 MPa范围进行低压慢灌,中间阶段压力提升至0.3~0.5 MPa加速填充,终止阶段可提高至0.6~0.8 MPa进行补强灌浆^[5]。施工工艺按照先外排后内排的顺序实施,每排灌浆孔分成两个序次,序间间隔不少于24小时确保浆液充分凝固,采用孔口封闭纯压式的灌浆方法,自下而上分段进行,每段长度控制在3~5 m,遵循跳孔施工原则避免浆液出现窜流现象。

2.3 施工过程控制要点

2.3.1 孔口封闭技术

孔口封闭技术采用机械式封孔器与化学封堵相结合的复合封闭方法,如图1所示,机械封孔器选择双胀式结构使用,上部胀塞处在孔口上方0.5 m处,下部胀塞设置在待灌段底部,形成一个有效的密闭腔体,

封孔器胶囊采用耐压橡胶这种材质制作，承压能力不低于 1.0MPa，确保高压灌浆过程中密封性能稳定且可靠。

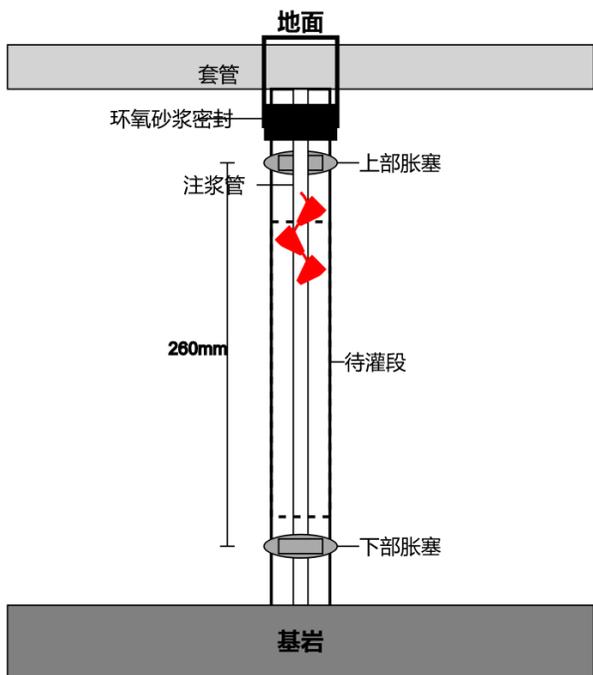


图 1 孔口封闭装置结构示意图

化学封堵材料选快硬水泥砂浆搭配膨胀止水条做孔口处理，孔口周围做凿毛处理之后，用环氧砂浆填充孔壁与套管间隙，等环氧砂浆达到初凝强度再安装封孔装置，封闭过程中严格把控胀塞压力，防止过度膨胀造成孔壁破坏，封闭完成开展压水试验，试验压力为设计灌浆压力 1.2 倍，持压时间不少于 10 分钟，确认无渗漏情况后才可进行正式灌浆作业。

2.3.2 浆液配制与泵送

浆液配制严格按照设计配比执行，采用强制式搅拌机进行机械搅拌，水泥浆液搅拌时间要控制在 2~3 分钟，水玻璃浆液搅拌时间要控制在 1~2 分钟，避免过度搅拌影响浆液流动性能，配制过程中水温需控制在 15℃~25℃ 范围内，冬季施工要采取保温措施防止浆液凝结时间异常，浆液过筛处理采用 40 目筛网，清除杂质颗粒，确保管路能够保持畅通。

泵送系统选用柱塞式注浆泵，泵送压力范围 0.1~2.0MPa，流量可调节控制。输浆管路采用高压胶管连接，管径不小于 25 mm，转弯半径符合规范要求，泵送之前需对管路系统开展清水冲洗和试压检测，工作压力达到设计压力的 1.5 倍，灌浆过程中要定期对管路进行清洗，避免浆液凝结造成堵塞，双液灌浆时采用双泵同步进行泵送，通过混合器实现孔口混合，混合比例误差需控制在 ±5% 以内。

2.3.3 现场质量检验

现场质量检验包括浆液性能检测和灌浆效果验证两个方面，浆液性能检测项目包含密度、黏度、凝结时间和析水率等关键指标，密度检测采用泥浆天平测定，检测频率为每班次不少于 3 次，黏度测定使用漏斗黏度计，凝结时间通过维卡仪测试确定，析水率检测按照标准试验方法执行，24 小时析水率应 < 5%。

灌浆效果验证通过注入量监测和压力响应分析进行评价。注入量记录精确到升，绘制压力—时间—注入量关系曲线分析灌浆过程，终灌标准采用压力—注入量双控制准则，当注浆压力达到设计值且持续稳定，同时单位时间注入量 < 1 升 / 分钟时终止灌浆，灌浆完成后进行检查孔验证，检查孔间距为灌浆孔的 1/2，通过取芯或压水试验评估防渗效果，渗透系数应小于设计要求值。

2.4 质量监测与参数调整

质量监测系统采用实时数据采集与人工观测相结合的综合监测方案，压力传感器安装于注浆管路关键节点处，实时记录灌浆压力变化曲线，监测精度能够达到 ±0.01MPa，流量计监测浆液注入速率和累计注入量，数据采集频率设定成每秒 1 次。围堰结构变形监测依靠精密水准仪和全站仪定期开展观测，监测点布置在围堰顶部和侧壁关键位置，变形控制指标为水平位移 < 5 mm，竖向沉降 < 3 mm。

参数调整遵循动态优化原则，根据监测数据变化趋势及时修正施工参数。当压力上升速度过快时降低泵送速率，避免围堰结构承受过大应力，注入量异常增大意味着存在大空洞或裂缝，需要调整浆液配比增加黏度，适当延长凝结时间。相邻孔出现压力传递现象的时候要暂停施工，待前序浆液达到初凝强度之后再继续作业，监测数据出现异常情况时要立即启动应急预案，通过补充灌浆或调整孔位布置确保防渗效果达设计要求。

3 技术效果分析与应用总结

3.1 防渗处理效果评价

防渗处理效果通过渗透系数测试和水位降深观测进行定量评价，图 2 直观展示了处理前后的显著变化，注浆处理后围堰内水位稳定性显著改善，抽水过程中水位降深速率由处理前的 0.2 m/h 提升至 2.5 m/小时，降深效率提高幅度超过了 10 倍。渗透系数检测采用的是压水试验方法，在灌浆区域布置检测孔开展原位测试，测试结果显示处理后地层渗透系数从原来的 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 降到 $5 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ，满足围堰防渗设计要求。

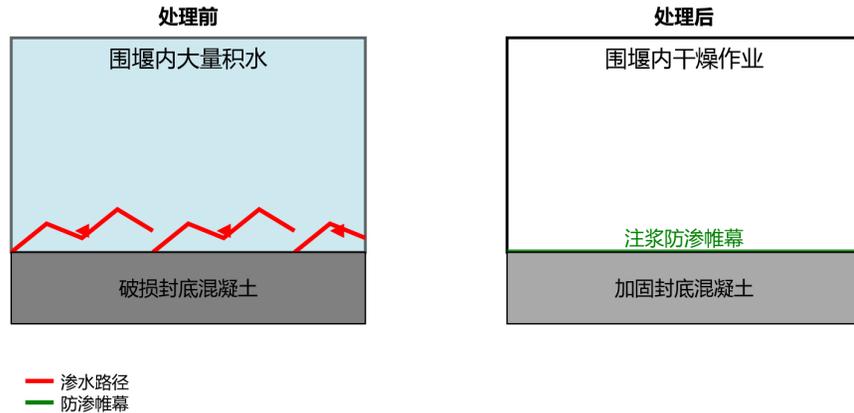


图 2 防渗处理效果对比图

漏水量监测数据显示注浆处理取得显著成效。处理前围堰日均涌水量达到 1200 m^3 , 严重影响施工作业, 注浆处理完成之后日涌水量控制在 15 m^3 以内, 降幅达到了 98.7%。长期观测显示防渗效果稳定且能够持久保持, 施工期间围堰内维持着良好的干作业环境, 承台混凝土浇筑和钢筋安装作业顺利进行, 为后续上部结构施工创造了十分有利的条件, 同时也验证了注浆技术在复杂水下环境中的可靠性和实用性。

3.2 结构稳定性检测结果

结构稳定性检测涵盖围堰变形监测和承载力评估两个方面。围堰钢结构变形监测采用高精度全站仪和倾斜仪进行连续观测, 监测周期覆盖整个注浆施工过程及后续 30 天稳定期。表 1 详细列出了各项监测

相关数据, 监测结果显示围堰顶部最大水平位移达到 2.8 mm , 竖向沉降最大值为 1.5 mm , 变形量均在设计允许范围内, 钢围堰壁板应力监测借助电阻式应变片实现, 最大应力值为 85 MPa , 远低于钢材屈服强度, 结构安全系数满足相应规范要求。

承载力评估通过荷载试验和数值分析相结合的方法进行验证, 在围堰内开展分级加载试验, 模拟承台混凝土浇筑荷载, 最大试验荷载能达到设计荷载的 1.2 倍。试验过程中围堰结构响应表现良好, 未出现异常变形或应力集中现象, 有限元数值分析模型考虑了注浆加固后的地基承载特性, 计算结果显示围堰基础承载力提升了 32%, 整体结构稳定性得到有效改善, 检测数据证实注浆处理在提供防渗功能时也增强了地基承载性能。

表 1 围堰变形监测数据表

监测项目	最大值	设计允许值	安全系数	评价结果
水平位移 (mm)	2.8	5.0	1.79	合格
竖向沉降 (mm)	1.5	3.0	2.0	合格
壁板应力 (MPa)	85	235	2.76	合格
地基承载力提升 (%)	32	-	-	显著改善

4 结语

注浆技术在该跨江大桥围堰防渗工程中的成功应用表明, 速凝膏浆与稳定性浆液相结合的技术方案能够有效解决复杂水下环境的渗漏问题。施工实践证明, 合理进行材料选择、科学开展工艺设计和严格实施过程控制是确保注浆效果的关键要素, 该工程的成功经验为桥梁隧道施工当中的防渗处理提供了可靠技术支撑, 具备重要的推广应用价值。

参考文献:

[1] 达姜维. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应

用探究 [J]. 产业创新研究, 2024(2):106-108.

[2] 熊训红. 公路桥梁路基施工中注浆技术的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2023(29):121-123.

[3] 胡明. 浅析公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用 [J]. 科学技术创新, 2023(14):129-132.

[4] 王玲玲. 浅析公路桥梁施工中注浆技术的应用 [J]. 中国储运, 2022(2):99-100.

[5] 袁卫. 浅析公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用 [J]. 四川建材, 2021, 47(5):167-168.