

# 断层破碎带与挖砂扰动地层下围堰防渗失效机理研究

韦兵生

中国能源建设集团广西水电工程局有限公司 广西南宁 530000

**摘要:** 右江鱼梁航运枢纽临时草土围堰施工时遭遇f3断层破碎带与挖砂扰动双重地质突变, 引发大范围渗漏现象。断层破碎层延伸到55.80m高程而补强帷幕仅到65m, 存在10m深度差形成绕底通道, 采砂筛选破坏原地层结构, 使得卵石孔隙率增加到35%~40%, 导致高压摆喷难以形成连续防渗帷幕。防渗方案经过双管摆喷、三管摆喷、帷幕灌浆及膏浆封堵四次调整后, 基坑渗漏量从2000m<sup>3</sup>/h降到813m<sup>3</sup>/h, 削减59.36%, 但深层渗流通道未完全封闭, 地质勘探深度不足与断层延伸不确定性导致防渗失效具有不可预见特点。

**关键词:** 断层破碎带; 挖砂扰动; 围堰防渗; 渗流通道; 不可预见性

## 引言

临时围堰的防渗能力会直接影响水利枢纽基坑施工稳定性, 特殊地质条件下断层破碎带与人为干扰因素常使渗流量超出设计预估。2010年右江鱼梁航运枢纽建设草土围堰时, 遭遇F3断层深层破碎与采砂作业扰动双重影响, 原采用的高压摆喷防渗技术完全失去应有作用, 围堰中部频繁出现管涌与坍塌等事故, 只能连续排水80余天且四次修改防渗方案仍无法有效控制渗漏。该案例揭示了地质突变时围堰防渗技术面临的挑战, 为同类复杂地质条件下的临时工程防渗提供重要借鉴。

## 一、工程概况与地质背景

右江鱼梁航运枢纽处在广西右江流域的位置, 一期工程临时草土围堰承担着导流与基坑开挖防护功能, 围堰采用草土结构且设计高程94.0m, 防渗系统运用高压摆喷灌浆工艺实施, 原设计布置522个钻孔且孔距1.3m, 钻孔底部入岩深度要求不小于0.5m。实际底部高程处于81.4m~87.5m的范围间, 初步地质勘探表明围堰区域存在f3断层通过, 勘探孔NK8-92揭示断层破碎带宽度达1.95m且裂隙较为发育, NK8-116孔钻探过程中多次出现掉钻现象表明局部溶洞发育, 上闸首处发现存在层间剪切破碎带, 构造活动对地层稳定性产生的影响显著<sup>[1-2]</sup>。围堰下部基础是采砂船翻动后的砂卵石层, 其厚度较大并且级配不均, 原地层结构遭受严重的破坏, 地质剖面显示80m高程以下为弱风化泥岩, 泥岩成岩较差遇水容易软化且风干易开裂, 岩体破碎同时节理发育明显, 层间破碎带构造压扭现象表现突出, 初步设计阶段未能查

明f3断层的规模、延伸方向、破碎程度与工程特性, 这为后续渗漏问题埋下了一定的隐患。

## 二、断层破碎带与挖砂扰动地层特征

### (一) f3断层破碎带发育特征及勘探偏差

施工过程中揭露的f3断层, 其发育规模、破碎程度及导水特性均远超前期地质勘察的预估, 这一认知偏差直接导致了后续防渗体系的失效, 详尽的施工钻孔资料为揭示断层的真实面貌提供了关键证据, NK8-101孔在高程70.50m至55.80m区间内, 岩体呈现出显著的构造压扭与破碎特征, 该破碎段厚度达14.70米, 并非前期推测的局部薄层破碎。无独有偶, NK8-103孔在高程67.09m至66.69m段, 以及NK8-104孔在高程78.96m至77.36m段, 均观测到类似的岩体强烈破碎现象, 这些散布的钻孔证据共同勾勒出f3断层并非一个孤立的构造面, 而是一个具有一定宽度、影响范围呈带状展布且构造活动活跃的不良地质体, 其在空间上并非完全垂直, 而是呈现出起伏延伸的复杂形态。更为直接的印证来自于基坑排水实践, 当基坑内水位被强制降低时, 在远离围堰堰体的基坑侧部, 出现了明显的深层涌水点, 这一现象无法用浅层渗流解释, 有力地证实了在断层破碎带的深部, 存在着贯通性强、水力联系密切的深层渗流通道, 地下水正沿着这些隐蔽通道源源不断地补给至基坑。

面对这一紧急情况, 设计单位虽及时签发了设计变更通知, 要求在推测的断层主要影响区增设补强帷幕灌浆, 然而这份基于不完整信息的变更方案存在致命缺陷, 其所设定的帷幕灌浆孔底部高程仅为65m。而NK8-101孔已明确揭示, 断层破碎带的底部至少延伸至55.80m高

程,这意味着在65m至55.80m这高达9.20米的垂直区间内,破碎岩体完全未被任何防渗措施所覆盖,这片未处理的区域如同在防渗帷幕下方敞开了一个巨大的“旁门左道”,高压地下水得以轻松绕过帷幕的底部,形成典型的“绕坝渗流”或“底部绕渗”通道,使得花费巨资构建的防渗体系功亏一篑。

追根溯源,勘察阶段对断层破碎带深度的严重误判是问题的起点,其根本原因在于前期勘探网的布置过于稀疏,钻孔间距高达50至100米,在这种密度下,对于F3断层这类空间形态多变的隐伏构造,其精确的走向、倾角、延伸范围以及最为关键的破碎带底界埋深,都缺乏足够的控制,工程设计只能建立在粗略的推测与推断之上。最终,因关键设计参数(帷幕深度)的偏差,导致了防渗措施未能完全封堵实际存在的渗流路径,为工程留下了严重隐患,这一案例深刻揭示了在复杂地质区,精细勘探对于工程成功的基础性作用。

### (二) 挖砂扰动对砂卵石层结构的破坏

围堰纵向的下部基础在施工前经历了采砂船的大规模翻动与筛选作业,导致原本具有良好自然级配的砂卵石层结构遭到彻底破坏,在天然状态下,砂卵石层由不同粒径的砂、卵石及少量黏粒组成,细颗粒填充于粗颗粒之间的孔隙中,形成相对密实、渗透性较低的地层结构,然而采砂作业通过机械筛选将细颗粒砂料大量抽走,残留下粒径普遍偏大的卵石,其平均粒径远超设计预期,据现场取样与室内试验分析,扰动后地层的孔隙率由天然状态的20%~25%急剧上升至35%~40%,卵石层厚度也超出原地勘报告的预测范围,其中大块石(粒径大于10cm)含量超过60%,形成了典型的“骨架孔隙结构”。这种结构转变对地层的工程性质产生了深远影响,在天然地层中,细颗粒填充于卵石间隙,不仅增强了结构整体性,也显著降低了地层的渗透性,而挖砂扰动后细颗粒大量流失,卵石骨架直接接触,孔隙之间的连通性大幅增强,导致渗透系数提高了2~3个数量级,由原来的 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ cm/s量级上升至 $10^{-2}$ ~ $10^{-1}$ cm/s量级,这种高渗透性地层对围堰防渗系统构成了严峻挑战,尤其影响了高压摆喷灌浆技术的实施效果。

在131孔至351孔区段,全长286米的范围内,下部砂卵石层不仅厚度较大且普遍受到采砂船的搅动,卵石颗粒粗大、孔隙连通性强,使得单排灌浆孔施工时浆液难以均匀扩散并形成连续的防渗帷幕,浆液在进入地层后,易沿大块石之间的宽大孔隙优先流失,无法有效填

充所有空隙,导致旋喷体形态不规则、直径显著缩小,仅为设计值的60%~70%。除此之外,相邻钻孔的旋喷体之间搭接效果差,防渗墙体存在大量薄弱环节和渗漏通道,进一步削弱了整体防渗效能。

综上所述,挖砂扰动改变了砂卵石层的物理结构与渗透特性,也直接制约了常规防渗工艺的适用性与可靠性,在今后的类似工程中,必须在勘探阶段充分识别此类人为扰动地层,并在防渗设计中采取针对性措施,如增加帷幕排数、优化浆液配比或结合多种工法,以应对高孔隙率、大粒径卵石地层带来的技术挑战。

## 三、围堰防渗失效机理

### (一) 渗流通道形成机制与渗漏量演变规律

围堰渗流通道有三类构造分别是断层破碎带深层渗流通道、卵石层优势渗流通道以及防渗帷幕缺陷渗流通道,F3断层破碎带在65m高程以下延伸到55.80m处形成10m高差为地下水底部绕渗创造了条件,破碎带内裂隙宽度为0.5~2.0mm,且充填泥质遇水软化后裂隙有效开度增大导水能力相应提升。经过筛选的卵石层孔隙率达到35%~40%,卵石粒径为5~20cm,孔隙直径2~8cm,高压摆喷形成的旋喷桩直径0.6~0.8m,在单排孔距1.3m下旋喷桩搭接不良导致部分孔隙未被完全封堵形成优势渗流通道。2010年3月9日工作面移交时基坑内配置6台抽水机,总额定排量 $2000\text{m}^3/\text{h}$ ,随防渗加固措施实施渗漏量呈阶梯状下降,3月12日抽水设备总功率6865kw,4月3日大功率离心泵停机标志渗漏高峰期结束,4月11日总功率降至2790,渗漏量从 $20003/\text{h}$ 降至 $8133/\text{h}$ ,削减幅度59.36%,但深层渗流通道未完全封闭导致基坑保持干燥状态仍需持续低强度抽水。

### (二) 防渗方案四次调整过程及失效原因分析

原设计采用双管法高压摆喷灌浆技术,在94.0m高程平台设置522个钻孔,孔间距保持1.3m且钻孔深度贯通到81.4m~87.5m高程,施工期间发现大块石地层阻碍浆液正常扩散,卵石密集区旋喷体直径缩减至0.5~0.6m,相邻孔旋喷体未能有效搭接致使帷幕完整性受损。首次优化将工艺升级为三管法高压摆喷灌浆,通过高压气流辅助破碎卵石周边土体,使旋喷直径增大至1.0~1.2m,调整后该区段渗漏量减少约30%,但基坑深层涌水问题仍未得到解决。二次调整聚焦基坑侧壁深层涌水区,在推测的F3断层位置增设补强帷幕灌浆,布置31个灌浆孔且孔距为1.2m,帷幕底部设置在65m~68m高程,灌浆处理使涌水区流量降低约50%,但未彻底消除渗漏,主要

症结是帷幕深度不够，其底部与破碎岩层底部存在高差，导致地下水沿帷幕底部形成绕渗通道。第三次调整采用膨润土膏浆封堵残留渗漏点，根据现场定位的5处集中渗漏点及多处边坡塌陷区布设99个膏浆钻孔，利用膏浆高粘度特性填充微小裂隙，然而受限于局部处理范围，该措施仅能应对已暴露渗漏点，四次调整历时70余天，累计投入超200万元，防渗失效根本原因是前期地质勘探未能准确揭示断层破碎带深度及采砂活动造成的地层扰动程度。

#### 四、地质突变的不可预见性与工程启示

##### (一) 防渗失效的不可预见性论证

防渗失效不可预见主要是受限于地质勘探深度不足以及断层延伸不明，NK8-101孔钻到55.80m高程揭露破碎层后未继续钻探，按此设计的补强帷幕灌浆孔底高程65m与破碎层底部相差9.20m，未处理的破碎岩体形成了绕渗通道。依据渗流理论计算在30m水头和 $1 \times 10^{-4}$  cm/s渗透系数条件下，9.20m厚破碎层单位宽度渗流量约 $0.82000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{s}$ ，按400m围堰长度计算总渗流量达 $320 \text{ m}^3/\text{h}$ 与实际观测深层涌水量一致，f3断层走向、倾角、延伸范围及破碎带宽等关键参数都未明确，勘探阶段50-100m钻孔间距让断层空间形态只能依靠推测，挖砂作业使卵石孔隙率从天然地层20%至25%增至35%至40%，且渗透系数提升2-3个数量级，这一扰动特征在初步勘探阶段难以准确预估。2010年3月9日工作面移交签证单中未明确基坑抽水责任归属，临时草土围堰分部工程虽通过验收且各项指标达标，但验收组认为渗漏是地质条件突变引起，地质复杂性超出有经验承包商合理预判范围。

##### (二) 复杂地质条件下围堰工程技术建议

在复杂地质环境中开展围堰工程时，需构建分阶段补充勘探体系，在施工图设计环节，必须对已探明的不良地质体实施加密勘探，运用钻孔加密、物探CT及示踪试验等方法，精准查明断层破碎带的深度、宽度、延伸走向及其导水性能，勘探孔深度要穿透破碎层底部至少5m。针对人为扰动地层进行防渗设计时，应该全面评估

原地层结构的受损情况，对挖砂筛选区域要通过现场试坑开挖或大口径钻孔取样，获取扰动地层的实际渗透参数，在大块石地层中，采用单排高压摆喷难以形成连续防渗体，宜选用多排帷幕或结合帷幕灌浆与高压摆喷的组合方案，防渗施工期间需建立动态调整机制，借助抽水试验、压水试验与渗流量监测等手段实时评估防渗效果<sup>[3]</sup>。当监测数据显示渗流量超出设计阈值时，必须立刻启动补充勘探程序，制定针对性加固方案，工程经济决策要综合评估继续封堵与持续抽水两种方案的成本效益，当防渗加固的边际效益低于持续抽水成本时，应及时调整技术路线，采用强抽强排策略，本案例中，持续抽水的日均成本23995元仅为膏浆封堵日均成本50580.93元的47.4%，充分体现了工程决策的经济合理性。

#### 结语

右江鱼梁航运枢纽围堰防渗失效是因f3断层破碎带深度超出勘探揭示范围以及挖砂扰动破坏地层结构两大地质突变因素，勘探孔所揭示的55.80m高程破碎层而补强帷幕仅到65m，10m深度差形成绕底渗流通道。采砂筛选让卵石层孔隙率增大至天然地层的1.6倍，导致单排摆喷灌浆无法形成连续防渗墙体，四次方案调整虽削减渗漏59.36%但受地质勘探精度限制深层通道封闭不彻底。防渗失效属于有经验承包商不可预见的地质，类似工程应加强补充勘探、建立动态调整机制并完善地质风险分担体系。

#### 参考文献

- [1] 曹锐. 三液可控围堰快速堵漏防渗灌浆技术应用研究[J]. 陕西水利, 2025, (07): 113-114+117.
- [2] 于广斌, 左江瑞. 防渗墙布置与埋深比对围堰渗流规律影响研究[J]. 海河水利, 2025, (08): 95-100.
- [3] 彭建芳, 王一鸣. 断层破碎带区域土石围堰中高压旋喷桩防渗施工技术应用[J]. 珠江水运, 2024, (11): 80-82.