 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v1i6.5133

Research on Design and Construction Technology of Hydraulic Milling Mixing Cement Soil Impermeable Wall for Dam Foundation

Yanchang Liu

Xinjiang Changji Fanghui Hydropower Design Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract

In response to the current situation of anti-seepage in the foundation of the Xinier Reservoir dam, a comparative analysis was conducted through on-site curtain grouting and hydraulic milling mixing cement soil anti-seepage wall tests. Combined with technical and economic evaluation, the hydraulic milling mixing cement soil anti-seepage wall was selected as the anti-seepage reinforcement solution for the dam foundation. We have studied key technologies such as the layout of the anti-seepage wall axis, depth and thickness design, cement soil ratio and connection design, and proposed construction technical measures such as construction preparation, drilling parameters, wall forming process, and quality control. The research results can provide technical references for the anti-seepage treatment of similar dam foundations. This article takes the Xinier Reservoir as an example and studies the design and construction key technologies of hydraulic milling and mixing cement soil anti-seepage walls through field experiments and comparisons, in order to provide reference for similar projects.

Keywords

dam foundation; Hydraulic milling mixing; Cement soil impermeable wall; Design; construction technique.

大坝基础液压铣削搅拌水泥土防渗墙设计与施工技术研究

刘彦昌

新疆昌吉方汇水电设计有限公司，中国 · 新疆 昌吉 831100

摘　要

针对希尼尔水库大坝基础防渗现状问题，通过现场帷幕灌浆与液压铣削搅拌水泥土防渗墙试验对比分析，结合技术经济评价，优选液压铣削搅拌水泥土防渗墙作为大坝基础防渗加固处理方案。研究了防渗墙轴线布置、深度厚度设计、水泥土配比及连接设计等关键技术，提出了施工准备、钻探参数、成墙工艺、质量控制等施工技术措施。研究成果可为类似工程大坝基础防渗处理提供技术参考。本文以希尼尔水库为例，通过现场试验对比，研究了液压铣削搅拌水泥土防渗墙的设计及施工关键技术，以期为类似工程提供借鉴。

关键词

大坝基础；液压铣削搅拌；水泥土防渗墙；设计；施工技术

1 引言

大坝基础渗漏是危害大坝安全的重要因素之一，加强对既有大坝基础防渗处理与加固至关重要。帷幕灌浆是传统的大坝基础防渗加固措施，但对于部分地层破碎或渗透性较强的坝基，灌浆防渗效果往往难以保证。液压铣削搅拌水泥土防渗墙具有可靠的防渗性能，有望成为复杂坝基防渗处理的新选择。

2 希尼尔水库大坝防渗处理方案比选研究

2.1 工程概况与现状问题分析

希尼尔水库位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州尉犁县境内，是一座以灌溉为主的中型平原水库。水库总库容 9800 万 m^3。大坝为均质土坝，最大坝高 20m，坝顶长 7650m，坝顶宽 6m。

水库运行期间，大坝多处出现渗漏，下游坝坡局部滑塌，坝基渗漏严重。勘察表明，坝址区上部覆盖第四系松散沙砾石层，下伏白垩系泥岩、砂岩、砾岩，岩体破碎，富水性中等，构造发育，透水性强。坝基防渗设计标准偏低，整体防渗效果不佳，迫切需要进行加固处理 [1]。

2.2 防渗设计参数与标准确定

根据勘察成果，确定防渗墙体设计渗透系数不大于 1×10-5cm/s，抗压强度不低于 1MPa。结合工程等别，按 50 年设计使用年限考虑防渗体耐久性。防渗底高程按 5Lu 线控制。

为优选防渗加固方案，在坝体 2+436~2+466 桩号段分

【作者简介】刘彦昌（1980–），男，中国新疆昌吉人，本科，副高级工程师，从事水利水电工程研究。

别开展了帷幕灌浆及液压铣削搅拌水泥土防渗墙两种方案的现场试验。

2.3 帷幕灌浆与液压铣削搅拌水泥土防渗墙试验对比

2.3.1 帷幕灌浆试验

在上下游各布设一排共 49 个灌浆孔，孔距 1.5m，采用纯水泥浆由稀到浓分级灌注。试验过程中普遍存在“吃水不吃浆”现象，单位注浆量偏低，变浆困难。灌浆后开挖检查发现，浆液体内分布少，部分岩芯无浆液扩散迹象，防渗效果不明显。2 个检查孔透水率均超出设计值，表明该地层不适宜采用帷幕灌浆防渗（图 1）。

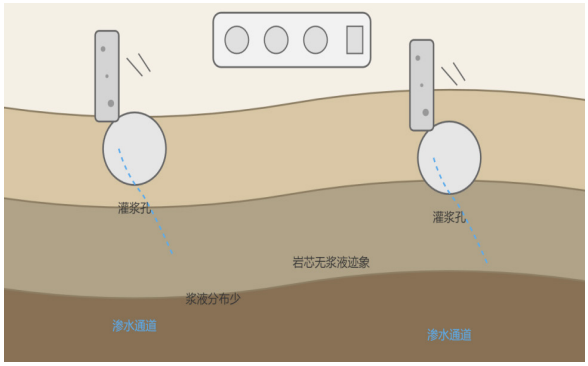

图 1 帷幕灌浆试验开挖检查

2.3.2 液压铣削搅拌水泥土防渗墙试验

试验段防渗墙厚 0.7m，幅宽 2.8m，搭接 0.2m。采用普通硅酸盐水泥，水泥强度不低于 42.5R，水灰比 1：1，单位水泥掺量分别为 13%、15% 和 18%，对比试验防渗及强度性能。经 14d 龄期试验，水泥掺量 15% 时，防渗墙渗透系数为 $7.17\sim7.91\times10^{-7}$cm/s，28d 无侧限抗压强度达 1.56~2.07MPa，各项指标均满足设计要求。开挖及钻孔取芯检查表明（图 2），墙体连续完整，水泥土拌和均匀，固结良好，防渗效果可靠。

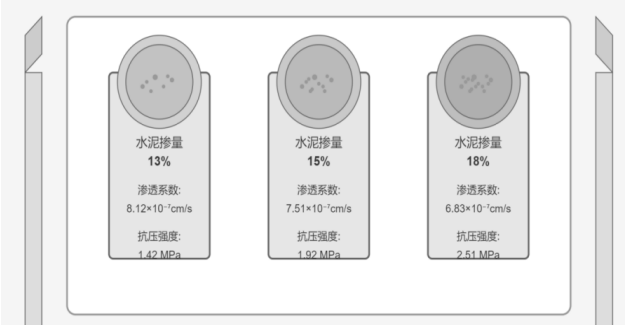

图 2 液压铣削搅拌水泥土防渗墙试验钻孔取芯

2.4 防渗方案综合评价与优化选择

两种防渗方案试验结果对比见表 1。可以看出，液压铣削搅拌水泥土防渗墙的防渗及强度指标均优于帷幕灌浆，施工效率更高，造价略高但性价比更佳，综合效益明显。

最终确定采用液压铣削搅拌水泥土防渗墙作为希尼尔水库大坝基础防渗加固的最优方案。

表 1 帷幕灌浆与液压铣削搅拌水泥土防渗墙试验结果对比

项目	帷幕灌浆	液压铣削搅拌水泥土防渗墙
渗透系数	$>1\times10^{-5}$cm/s	$7.17\sim7.91\times10^{-7}$cm/s
强度	未测	1.56~2.07MPa
施工效率	慢	快
造价	略低	略高
防渗效果	较差	良好
综合评价	不推荐	推荐

3 液压铣削搅拌水泥土防渗墙设计关键技术

3.1 防渗墙轴线布置与深度确定

防渗墙轴线宜布置在坝体上游侧迎水面坡脚附近，与坝轴线平行。液压铣削搅拌水泥土防渗墙顶高程以前坝脚现状阻滑墙顶高程以下 1m 控制，并与大坝防渗体形成良好的迎水面连接。

通过地质勘探、压水试验等综合分析确定防渗墙深度。对于砂砾石覆盖层，应全段防渗至基岩面以下；对于基岩段，应根据 5Lu 透水率和透水层厚度等因素，结合上下游渗压分布合理确定。本次对坝体桩号 0+000~7+100 段坝基防渗处理采用液压铣削搅拌水泥土防渗墙方案，坝基防渗深度按 5lu 线及结合泥岩层控制。

3.2 防渗墙厚度与宽度设计计算

综合考虑防渗要求、地层条件、施工工艺等因素确定防渗墙的厚度，一般取 0.5~1.0m。墙体单幅宽度根据成墙设备参数选择，并满足搭接要求。可按下式计算防渗墙的最小有效厚度：

$$T=\eta\cdot\frac{H}{J}$$

其中：

- T 是防渗墙的最小有效厚度；
- H 是墙体两侧的最大水头差；
- η 是安全系数，取值范围为 1.1 到 1.4，设计取值 1.25；
- J 是允许渗透比降，依据《深层搅拌法技术规范》（DL/T5425—2009）第 5.3.6 条水泥土防渗墙允许渗透比降不宜小于 50 的要求，以及根据液压铣削搅拌水泥土防渗墙类似已建工程经验，液压铣削搅拌水泥土防渗墙渗透破坏允许渗透比降取 60。

考虑施工、抗震及采用造墙机械设备（铣轮最小宽度 0.7m）等因素和类似工程经验，确定墙体厚度为 0.7m。

3.3 水泥土配比优化与强度控制标准

水泥土拌合料的主要性能指标包括抗压强度、抗渗性能和耐久性等。通过室内配比及现场试验优化确定各项参数：水泥品种及掺量：宜选用强度等级不低于 42.5 的普通硅酸盐水泥。参考类似工程经验，水泥掺量宜为 12%~18%。水泥用量越大，水泥土强度越高，但经济性降低。水灰比：水灰比是影响水泥土性能的关键因素。试验表明当水灰比为 0.8~1.0 时，水泥土的各项性能综合较优。外加剂：

必要时可掺入减水剂或引气剂改善水泥土的工作性能，但掺量应通过试验确定。水泥土强度：参照规范并结合工程实际确定水泥土的抗压强度标准值，一般 28d 无侧限抗压强度宜大于 1MPa。

3.4 防渗墙体与坝体防渗系统连接设计

防渗墙体与坝体防渗面板、铺盖等防渗体必须实现可靠连接，形成完整的迎水面防渗系统。液压铣削搅拌水泥土防渗墙轴线布置于上游坝坡坝脚现状阻滑墙上游 2.5m 处，防渗轴线平行于阻滑墙布置，清除前坡脚覆盖层至原阻滑墙顶以下 1.0m，液压铣削搅拌水泥土防渗墙墙顶现浇厚 0.7m，高 0.6m C25F200W6 素砼防渗墙，坝体土工膜平铺粘接锚固在现浇 C25F200W6 素砼防渗墙顶，与坝体防渗体形成封闭防渗体系。

3.5 耐久性与抗渗性能设计考量

通过合理的设计与施工控制措施，确保液压铣削搅拌水泥土防渗墙体在设计年限内的耐久性与防渗性能。主要包括：墙体厚度与水泥用量应满足抗渗及耐久性要求；强化施工过程质量控制，确保墙体的均匀性、密实度及连续性；合理选用水泥品种，必要时掺加抗硫酸盐类外加剂提高耐久性；防渗墙顶宜设置混凝土压顶保护层，提高顶部耐久性。

4 液压铣削搅拌水泥土防渗墙施工技术与质量控制

4.1 施工准备与场地布置

针对坝基地形与地质条件，合理布置施工场地。主要考虑：场地应平整坚实，地表障碍物清除；坝面防渗结构应提前完成；供水、供电等施工条件满足要求；布置排架等辅助设施，施工道路应满足大型设备运输要求。

4.2 先导孔钻探与防渗参数确定

采用液压反循环钻机，沿防渗墙轴线布置先导孔，孔距 30~50m。钻探过程中应编录地层岩性、渗透性状及其变化规律，测定地下水位。结合钻探揭露情况、取芯及压水试验分析资料，复核或及时调整防渗墙深度等参数 [3]。

4.3 液压铣削搅拌防渗墙成墙工艺流程

采用双轮铣工法施工，工艺流程为：测量放样→导向槽开挖→槽段长度划分→铣头就位→铣削下沉→水泥浆注入搅拌→铣头提升复搅→成墙→质量检验。采用导向槽法施工，导向槽截面尺寸应满足铣头回转及成墙需要。导向槽应分段开挖，槽壁应支护牢固。防渗墙分幅成槽，现场划分槽段长度，一般为 2.5~3.0m。成墙时，相邻槽段间应留有搭接，搭接长度不小于 0.2m。铣削施工应连续进行，铣头下沉与提升速度严格控制，确保墙体成槽及搅拌均匀。搅拌铣头提升至设计高程后，应在导向槽内做 2~3 个提升复搅，以确保顶部水泥土拌和均匀。

4.4 铣削与搅拌参数控制技术

铣头动力应满足土层破碎及岩层铣削的需要，铣削扭矩应大于 100kN · m，铣削速度宜为 500~800mm/min，搅拌速度应大于 35r/min。水泥浆应根据设计配比严格控制，并采用计量泵连续泵送，泵送压力应保持在 0.5~1.5MPa。注浆量应与铣削速度匹配，确保单位土体中掺入水泥量满足设计要求。铣头应设多级喷浆口，浆液应自下而上分层注入，确保水泥浆液在土体中充分分散并均匀搅拌。同时通过铣头内置搅拌器使水泥浆与土体在铣削过程中充分混合，防止离析。施工过程中应连续监测各工艺参数，发现异常及时调整。搅拌时间和搅拌次数应根据现场土层条件通过试验确定 [4]。

4.5 墙体质量检测与评价方法

防渗墙体质量检测方法主要包括成槽质量检查、钻芯取样、压水试验及物探法等。成槽质量检查：通过测量槽段长度、宽度及垂直度，检查槽段搭接情况，判断铣头就位及导向是否准确。钻芯取样：成墙 28d 后，在墙体中钻取岩芯，测定芯样的完整性、一轴抗压强度及渗透系数，评价水泥土的防渗及力学性能。芯样数量应满足设计及规范要求。压水试验：在防渗墙轴线上钻压水试验孔，采用单倍压力试验，评价防渗墙体渗透性能。物探法检测：采用高密度电阻率法或高频雷达法，探测墙体的完整性及均匀性，并与钻芯取样结果相互验证。对检测数据进行分析评价，当发现局部缺陷或不合格时，应及时采取补强措施。

4.6 特殊地层与复杂工况施工措施

当铣削施工遇到硬岩、孤石或构筑物等异常情况时，应采取以下措施：当铣遇硬岩层，导致铣进速度明显下降或铣头震动时，应提高水泵压力，必要时减小铣削速度。当铣进受阻时应提升铣头避开硬岩层。当铣遇较大孤石影响铣削时，可采取补充钻孔胶结注浆或重锤破碎等措施铣除孤石后再行铣削。当铣遇坝基废弃排水构筑物时，应结合其材料性质、埋深等情况，采取提升铣削、补充钻孔处理等措施，并注意观测铣进状态，确保施工安全。另外，在饱和砂层等易发生坍孔的地层中施工时，应严格控制铣削速度，增大护壁泥浆黏稠度及泵送量，并视土层状况采用套管跟进等辅助措施。

5 结语

液压铣削搅拌水泥土防渗墙具有连续性好、防渗效果可靠、适应地层条件广等优点，是一种行之有效的大坝坝基防渗加固新技术。通过优化设计参数、规范施工工艺、加强质量控制，可确保其发挥良好的防渗及加固效果。本文以希尼尔水库为例，系统研究了液压铣削搅拌水泥土防渗墙的关键设计及施工技术，可为其他类似工程提供一定的技术参考。

参考文献

[1] 乔时延,王龙,肖伟华.铣削搅拌水泥土防渗墙的均匀性检查分析[J].水利建设与管理,2021,41(11):32-36.

[2] 黄川萍.深层搅拌水泥土防渗墙技术在某水库除险加固工程中的应用[J].人民珠江,2010,31(3):12-15.

[3] 卢康林.液压铣削水泥土防渗墙在希尼尔水库除险加固中的应用[J].水利科技与经济,2020,26(3):72-75.

[4] 孟宪龙.水泥土铣削搅拌墙施工技术在月亮湾水库工程中的应用[J].水利建设与管理,2019,39(7):50-54.