

某水库心墙坝壳地震液化措施探析

张晓云, 马杰, 刘欣

(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要 针对心墙坝壳地震液化问题, 本文以诸城市牛台山水库为例, 上游现状砂壳粉土质中细砂部分在 7 度地震情况下存在地震液化破坏问题, 为保证大坝的整体安全, 须对上游砂壳粉土质中细砂部分进行抗震加固处理。通过采用挤密砂桩法对坝体液化问题进行抗震加固处理, 运用 Geo Studio 软件对加固后的大坝进行了边坡稳定分析, 在一定程度上验证了挤密砂桩法在处理心墙坝壳地震液化问题中的有效性。

关键词 地震液化; 加固措施; 挤密砂桩法; 边坡稳定; 心墙坝

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.013

0 引言

由于大坝上游坝壳粉土质中细砂存在液化可能性, 坝体液化后造成的后果会引起坝坡的“流滑”失稳, 导致大坝丧失挡水功能。因此, 抗震加固处理是不可或缺的重要方面。以诸城市牛台山水库为例, 采用挤密砂桩法加固处理地震液化问题, 运用 Geo Studio 软件的 SLOPE (边坡稳定计算模块) 对其加固后大坝进行坝坡稳定分析计算, 从而验证所采取的加固措施抗震效果的有效性。

1 工程概况

诸城市辛兴镇山东村境内的牛台山水库属中型水利工程, 总库容 1 140.3 万 m^3 , 以防洪为核心功能, 兼具供水、灌溉及生态补水效益。工程等别 III 等, 主、次要建筑物级别分设 3 级、4 级, 库区地震基本烈度 VII 度, 地震动峰值加速度 0.15 g。

水库建成于 1967 年, 大坝为粘土心墙坝, 坝长 550 m, 坝顶高程 88.2 m, 最大坝高 15.2 m, 坝顶宽 5 m, 坝顶设有防浪墙, 墙高 1 m; 粘土心墙顶宽 1.8 m, 顶高程 87.6 ~ 87.8 m, 坡比 1:0.5, 坡壳采用粉土质中细砂填筑; 迎水坡坡比 1:3.0, 采用浆砌石护坡, 背水坡坡比 1:2.5, 采用草皮护坡。

大坝上游坝壳粉土质中细砂经标准贯入锤击法、相对密度法综合判别, 存在液化的可能。坝体地震液化后会引起坝坡的“流滑”失稳, 导致大坝丧失挡水功能^[1], 应该采用可靠的工程措施^[2], 解决水库大坝上游坝坡安全隐患, 确保其安全运行。

2 抗震加固措施

2.1 加固方案比选

由大坝地震液化分析可知: 上游现状砂壳粉土质中细砂部分在 7 度地震情况下存在地震液化破坏问题, 针对坝体液化问题初步拟定翻压、挤密砂桩、翻压结合挤密砂桩三种加固方案进行比选。

2.1.1 方案一: 翻压方案

对上游坝坡液化区粉土质中细砂重新翻压, 翻压时将原砂壳挖除后分别堆放在坝后, 按设计断面逐层填筑并碾压密实, 翻压后相对密度要求不小于 0.8。翻压方案见图 1。

2.1.2 方案二: 挤密砂桩方案

对大坝上游壳液化区采用挤密砂桩法加固, 使砂壳颗粒重新排列, 减少孔隙, 固结密实, 提高砂壳的相对密实度、抗剪强度和抗液化能力, 使坝坡满足稳定要求。该方案的核心作用机制为依托桩体挤密效应及施工过程中的振动作用, 实现桩周土体密实度的提升, 从而提高土的抗液化能力。为避免对心墙造成扰动, 振冲范围选定为死水位以上, 且距离心墙 1 m 以外的范围, 振冲填料选用砂砾料, 振冲加固后相对密度不小于 0.8。

砂桩桩径为 0.4 m, 桩距 1.5 m, 正方形布置, 桩底高程需要入非液化层 0.5 m, 回填料采用级配好的中粗砂。挤密砂桩方案见图 2。

2.1.3 方案三: 翻压结合挤密砂桩方案

综合考虑地震液化工况、施工难易程度等因素, 拟定以兴利水位 83 m 为分界线, 采用翻压结合挤密砂桩方案, 具体方案如下:

作者简介: 张晓云 (1992-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

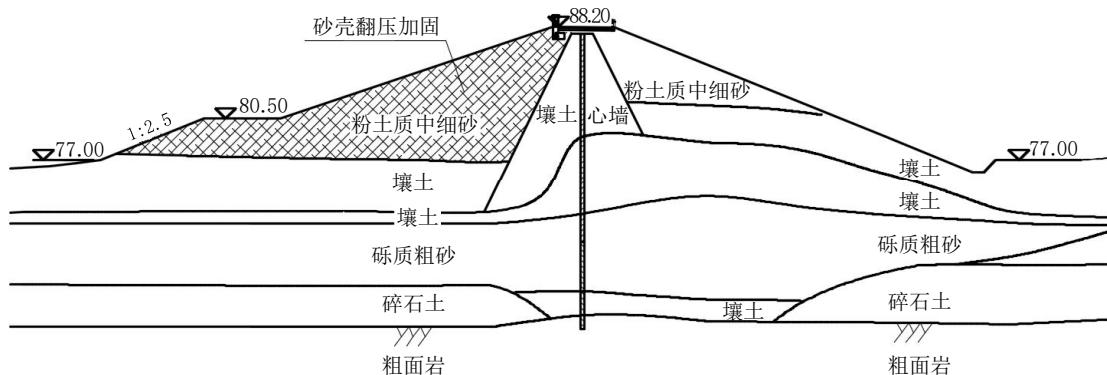


图1 翻压方案示意图

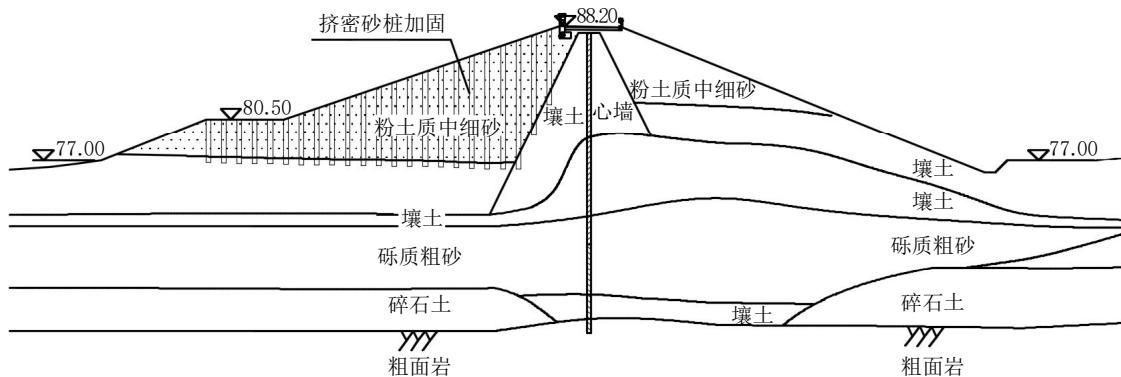


图2 挤密砂桩方案示意图

对大坝高程 83 m 以上的上游坝坡液化区粉土质中细砂重新翻压, 对高程 83 m 以下的上游坝坡液化区采用挤密砂桩法加固。砂桩桩径为 0.4 m, 桩距 1.5 m, 平均桩长为 5 m, 回填料采用级配好的中粗砂。砂桩平面布置采用正方形布置, 桩底高程需要入非液化层 0.5 m。翻压结合挤密砂桩方案见图 3。

2.2.4 结论

三种方案的优缺点如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 翻压方案虽然节省投资^[3], 但施工作业面大, 开挖量大, 施工条件要求较高, 且遇极端天气时坝坡稳定有一定风险性; 振冲方案需要多次设置工作平台, 施工工序较复杂, 工期较长, 临时工程投资较高; 翻压结合振冲方案施工较为灵活, 便于施工, 造价较低。因此, 从经济^[4]、技术的角度, 建议采用翻压结合振冲紧密砂桩方案。

2.2 振冲挤密砂桩设计

本工程坝壳振冲处理区域设置于大坝上游坝坡, 单桩施工进尺控制在 1.2 ~ 4.5 m。振冲施工前需完成场地预处理整平, 确保起重机、装载机及机动翻斗车

等设备通行作业条件。振冲处理范围内的地下埋设物与空中障碍物须彻底清除, 若因特殊情况难以清除, 应该在设计图纸及现场对应位置精准标识。

施工前应选取具有代表性且便于施工与检测的区域开展振冲试验, 依据试验成果确定水压、供水量、成孔速度、填料方式、单位孔填料量、密实电流及留振时间等关键施工参数。工程完工后 7 天内, 需组织坝体加固效果检验工作, 并同步提交完整的检验资料。

振冲挤密砂桩施工工艺流程为: 孔位定位 → 吊车吊装振冲器就位 → 开启供水阀门并启动振冲器 → 振冲至设计标高 → 分层下料并自下而上分段振密 → 全孔加固成桩后转移至下一孔位。

在设备选型方面, 选用 ZCQ-30 型振冲器作为核心振冲设备, 配套 14 kW 离心式水泵提供作业用水, 填料作业由机动翻斗车协同完成, 振冲器的起吊设备采用 10 t 履带式起重机。

2.3 技术要求

1. 填料应选用级配好的非液化粉土质中细砂, 并且填料速率应与沉管的提升速率相适应。

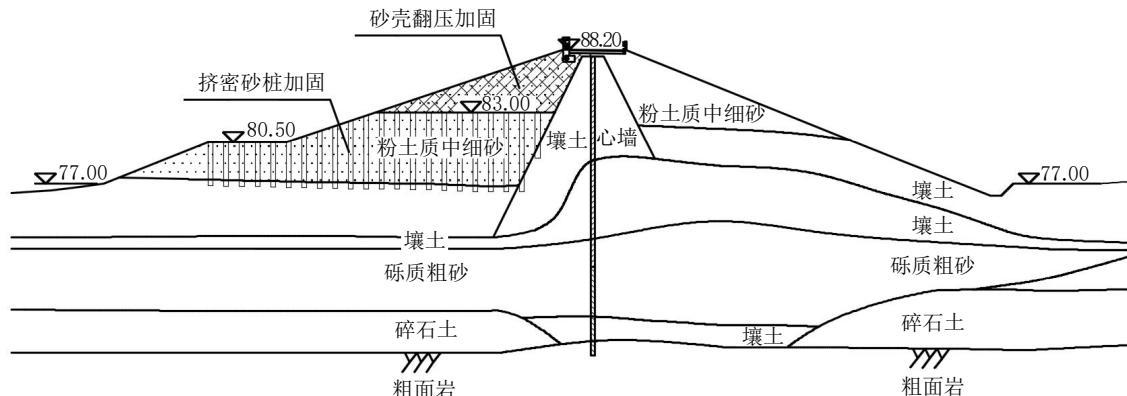


图 3 翻压结合挤密砂桩方案示意图

表 1 坝壳抗震加固方案比较

方案	优点	缺点
翻压方案	施工工艺简单,技术可行,施工技术易控制,施工质量易保证,临时工程投资较小	需要较大的施工场面,施工期较长,如果遭遇超标准洪水,工程施工进程与坝体结构安全均将面临威胁,客观上存在相应安全风险
振冲方案	施工期内的工程风险显著低于翻压方案,且施工活动受汛期的制约程度更小;施工过程无需开展大规模土方倒运作业,相较于翻压方案可有效缩短工期;同时该方案的处理成效更为理想	上游坝坡为 1:3,无法施工,施工中需要从坝脚开始多次设置工作平台,施工期较长,技术要求高,须专业施工队伍
翻压结合振冲方案	结合了翻压与振冲的优点,同时翻压区域也为振冲提供较大的施工平台,减小临时工程投资	振冲施工对技术水平要求严格,工序流程相对复杂,需由具备专业资质与施工经验的队伍负责实施

2. 施工前应对大坝不同部位进行施工性试验,合理确定桩距、填料量、沉管时间、提升与挤压时间等施工参数^[5]。

3. 坝体上游砂壳翻压采用挖掘机将工作面上的土料开挖,用于振冲施工平台填筑,振冲施工结束后再将土料回挖至翻压工作面;压实采用拖拉机分层碾压;大坝翻压所缺土料外购解决。

3 大坝边坡稳定分析

本次边坡稳定计算采用 GEO-Studio 软件中的 Slope 边坡稳定计算模块,边坡抗滑稳定性分析,采用简化毕肖谱法进行分析计算。在上游水位为正常蓄水位 83 m,下游水位 76.12 m,在Ⅶ度地震工况下,计算上游坝坡的安全系数为 1.941,大于最小安全系数 1.15。

经计算,坝体采取抗震液化加固后,上游坝坡稳定安全系数满足规范要求。

4 结束语

挤密砂桩法通过改善砂壳密实度与抗剪强度,有效降低了心墙坝壳的地震液化风险。本研究创新点

在于结合工程实际优化施工参数,并通过数值模拟验证加固效果;局限在于未充分考虑极端气候对施工的影响。在后续研究中还需进一步研究多因素耦合作用下的加固效果优化,提升技术适应性。

参考文献:

- [1] 余云安.水库沥青混凝土心墙坝受力响应研究[J].地下水,2025,47(05):281-283.
- [2] 谭嘉蓉,沈振中,王观琪,等.特高砾石土心墙坝初次蓄水非稳定渗流特性分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2025,43(07):100-104.
- [3] 王晨浩,刘柳,李骏.高沥青混凝土心墙坝体安全监测分析[J].四川水利,2025,46(03):30-36.
- [4] 张承宗.水库大坝黏土心墙风化料坝型填筑质量控制[J].工程建设与设计,2025(10):228-230.
- [5] 熊堃,杨晓红,李麒.强震作用下覆盖层上沥青混凝土心墙坝动力分析[J].人民长江,2024,55(S2):263-268.