



黑龙江灌区毛家河渡槽安全检测与结构计算分析

郭俊利, 赵 川, 王筱红, 姜国新, 罗茂盛

(四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为了评估毛家河渡槽当前的安全状态, 本文采用有限元法分析渡槽边墙的变形破坏机理, 对渡槽的基础和槽身砌体结构进行现场检测和安全评价。结果表明: 1) 渡槽砌体结构表面存在风化、剥蚀, 砌体砂浆老化, 局部失去黏结力, 槽身渗漏严重, 砂浆抗压强度和条石饱和抗压强度均不符合规范要求; 2) 受槽内水荷载作用影响, 渡槽过流断面内侧底部出现局部受拉现象, 拉应力范围为 0~20 kPa, 在渡槽底部出现应力集中现象; 3) 两侧边墙底部均出现剪切破坏, 左边墙破坏区已贯通, 右侧尚未贯通; 4) 计算结果与渡槽实际破坏情况基本一致, 渡槽结构不稳定。本文成果可为后期渡槽的安全加固设计提供一定的参考。

关键词: 渡槽; 安全评价; 剪切破坏; 应力集中; 有限元分析

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)01-0014-04

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.01.003

Safety detection and structural calculation and analysis of Maojiahe aqueduct in Heilongtan irrigation area

GUO Junli, ZHAO Chuan, WANG Xiaohong, JIANG Guoxin, LUO Maosheng

(Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: In order to evaluate the current safety status of the Maojiahe aqueduct, the finite element method is used to analyze the deformation and failure mechanism of the side wall of the aqueduct, and on-site inspection and safety evaluation of the foundation and masonry structure of the aqueduct are carried out. The results show that: 1) There is weathering and denudation on the surface of the masonry structure of the aqueduct, the masonry mortar is aging, the local cohesion is lost, the leakage of the aqueduct is serious, and the compressive strength of the mortar and the saturated compressive strength of the stone do not meet the requirements of the specification; 2) Affected by the water load in the aqueduct, the local tension occurs at the bottom of the inner side of the aqueduct overflow section, and the tensile stress range is 0~20 kPa, and the stress concentration phenomenon occurs at the bottom of the aqueduct; 3) The bottom of the side walls on both sides has shear failure, the left wall failure area has been penetrated, and the right side has not been penetrated yet; 4) The calculation results are basically consistent with the actual failure of the aqueduct, and the structure of the aqueduct is unstable. The results can provide a certain reference for safety reinforcement design of the later aqueduct.

Key words: aqueduct, safety evaluation, shear failure, stress concentration, finite element analysis

渡槽作为典型的水工建筑物, 在输水工程中被广泛应用。20 世纪七八十年代, 在我国西南丘陵地

区修建了大量渡槽工程, 由于当时建筑材料匮乏, 多数使用了当地条石材料和水泥砂浆, 而且当时的

收稿日期: 2023-03-31

基金项目: 四川省科技成果转移转化引导计划资助项目(24YSZH0010); 四川省科技厅科技计划资助项目(2020JDZH0002); 四川省省级科研院所基本科研业务费项目(SKY-2023-492060499)

作者简介: 郭俊利(1978—), 男, 高级工程师, 从事水利工程安全检测工作。

通信作者: 赵 川(1989—), 男, 高级工程师, 从事水利工程安全鉴定工作。

建造标准要求较低, 随着时间的推移, 部分超过设计使用年限, 渡槽结构破损严重。因此, 对老旧渡槽进行安全检查, 评估渡槽能否继续使用或拆除重建, 是当前急需解决的。白文斌等^[1]将现代监测技术应用于东风渠灌区渡槽信息化工程中, 形成了一套集监测-预警-决策为一体的渡槽监督与管理体系; 万忠海等^[2]提出采用高性能复合纤维材料对老旧渡槽进行结构加固, 以达到延长既有渡槽使用寿命的目的。当前, 将老旧渡槽现场质量检测 and 结构复核有限元计算相结合进行结构安全综合评估的研究较少。因此, 本文以黑龙滩水库毛家河渡槽工程为例, 通过现场检测获取结构力学参数, 并利用有限元复核计算, 进一步分析渡槽的变形和破坏特征, 旨在达到指导后期结构安全鉴定的目的。

1 工程概况

黑龙滩水库是以引蓄都江堰水源为主的大型灌溉工程, 位于四川盆地黑龙滩东南、沱江支流球溪河上游丘陵区仁寿县境内。工程从都江堰鱼嘴引水, 经内江总干渠-(柏条河-石堤堰)、(走马河-徐堰河-石堤堰)-东风渠总干渠-新南干渠-引水总干渠至黑龙滩水库。水库设计总库容为 3.6 亿立方米, 有效库容为 3.0 亿立方米, 属于都江堰灌区东风渠五期工程。

黑龙滩灌区中毛家河渡槽修建于 1973 年, 涉及钟祥镇、彰家镇、宝飞镇, 灌溉面积为 7.24 km², 如图 1 所示。毛家河渡槽设计流量为 2.5 m³/s, 比降为 1/1 000, 水深为 1.4 m, 入口槽底高程为 421.372 m。设计槽身长度为 253 m, 进口扭面为 8.4 m, 出口扭面为 10.3 m。渡槽槽身为 M8 砂浆砌条石结构, M10 砂浆勾缝, 槽身为梯形断面, 槽底净宽为 1.0 m, 上槽口净宽为 2.15 m; 槽墙高度为 1.8 m(其中压顶高度为 0.4 m), 左槽墙底厚度为 1.1 m, 左槽墙顶厚度为 0.4 m, 坡比为 1.0:0.5, 右槽墙底厚度为 1.1 m, 右槽墙压顶厚度为 0.9 m, 坡比为 1.0:0.5, 槽底板厚度为 0.3 m; 槽身支承结构为 100# 砂浆砌条石板拱, 主拱跨径为 10 m, 跨数为 19, 矢跨比为 1/5, 主拱圈厚度为 0.55 m; 边拱跨径为 4 m, 跨数为 5, 矢跨比为 1/4, 边拱拱圈厚度为 0.4 m。拱下为 M5 砂浆砌条石重力墩支承, 最大墩高为 19.8 m。该渡

槽 1+330—1+370 段左侧槽墙于 2022 年 3 月 21 日发生垮塌, 垮塌条石造成渡槽下部的 1 座钢筋混凝土机耕桥损坏。



图 1 毛家河渡槽工程现状

毛家河渡槽运行至今已近 50 a, 经“5.12”汶川地震、“4.20”芦山地震破坏, 渡槽存在严重风化剥蚀, 砌缝砂浆脱落, 槽身漏水、槽身左侧边墙局部失稳垮塌等问题。因此, 迫切需要对毛家河渡槽开展安全检测和进行结构计算, 综合分析评价渡槽当前的安全状态^[4-6]。

2 现场质量检测与评价

2.1 基础砌体

(1) 结构尺寸: 基础底部为原设计尺寸, 为两层浆砌条石基础, 采用放大脚结构, 根据不同墩高, 主墩基础底面长度范围为 4.1~8.0 m, 宽度为 4.4 m, 高度为 0.8 m。

(2) 砌体结构: 基础结构基本完整, 未发现开裂、沉陷、塌落、倾斜、变形、错位等情况。

(3) 基础条石: 经现场检测, 露在地面的基础表面存在风化、剥蚀, 未发现压碎、掉块、缺损等情况。

(4) 砌体砂浆砌筑强度与砌缝质量: 采用回弹法对现场浆砌条石墩基础砌筑砂浆强度进行检测。实测砌体砌筑砂浆抗压强度范围为 0~4 MPa, 砌体砂浆老化, 局部失去黏结力, 不符合《灌溉与排水渠系建筑物设计规范》(SL 482—2011)^[7]规定, 即 4~5 级拱式渡槽砌筑用砂浆强度等级不应低于 M5 的耐久性要求。

(5) 对基础条石钻芯取样, 实测条石饱和抗压强度为 8.34、12.9 MPa, 条石干抗压强度为 23.4、33.0 MPa, 软化系数为 0.36、0.39, 不符合 SL 482—2011 规定, 即拱式渡槽所用石料的强度等级不应低于 MU30 的耐久性要求。条石砌体基础如图 2 所示。



图 2 毛家河渡槽条石砌体基础钻芯取样

2.2 槽身砌体

(1) 断面尺寸：顶口宽范围为 215 ~ 220 cm，底宽范围为 99 ~ 104 cm，边墙高度范围为 140 ~ 142 cm，边墙顶厚度范围为 38 ~ 40 cm，左边墙压顶厚度为 40 cm，右边墙压顶厚度为 90 cm，底板厚度为 30 cm，与原设计断面尺寸基本一致。

(2) 表面平整度：槽身边墙内表面平整度范围为 7 ~ 30 mm。

(3) 槽身砌体：槽身砌体结构存在严重损坏，13[#] ~ 16[#] 共 3 孔半左侧槽墙(桩号为 1 + 330—1 + 370)于 2022 年 3 月 21 日发生垮塌，垮塌长度为 40 m，如图 3 所示。槽身砌体表面风化剥蚀严重，槽身边墙与底板存在多处严重渗漏，经现场检查，拱上结构(含槽身外边墙)表面杂草遍布，槽身拱顶、槽身外边墙、槽墩多处渗水痕迹清晰可见。



图 3 毛家河渡槽左边墙中间段整体垮塌

(4) 此外，经过长期运行、水的侵蚀与风化作用，渡槽内墙表面抹面防渗砂浆大面积脱落，失去防渗作用。砌体砌筑砂浆老化，失去黏结作用，砂浆灰缝多数不饱满，勾缝砂浆剥落，止水老化破损，致使槽身严重渗漏。底板淤积严重，淤积厚度范围约为 3 ~ 10 cm，局部最大淤积厚度约为 15 cm，如图 4 所示。

3 槽身边墙破坏机理有限元分析

3.1 模型和参数

根据毛家河渡槽典型横剖面尺寸建立 1:1 有限元网格模型(图 5)，并施加水压力荷载(水深为



图 4 槽身底板整体淤积严重

1.4 m)^[8]。渡槽边墙与底板条石之间为水泥砂浆，鉴于接缝处的砂浆风化、脱落严重，计算假定砂浆已无黏结作用。计算时，砂浆面的黏聚力取 0 kPa，摩擦系数取 0.3。采用界面单元模拟接触面，并赋予相关力学参数。条石和砂浆重度取 22.5 kN/m³，泊松比取 0.25，接触面抗拉强度取 0 kPa。计算工具采用有限元计算软件 PLAXIS 2D^[9]。取顺水流向长度为 1 m 的槽身左右边墙为研究对象，毛家河渡槽计算简图如图 6 所示。

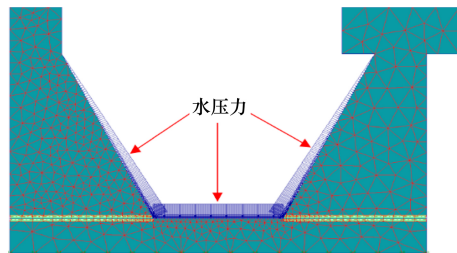


图 5 毛家河渡槽剖面有限元计算网格模型

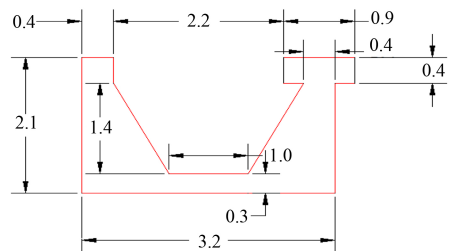


图 6 毛家河渡槽结构计算简图

m

3.2 应力应变分析

按渡槽 1.4 m 水深工况进行塑性计算过程中，发现有限元计算不收敛，并提示砌体发生破坏，说明渡槽结构在此工况下将发生破坏，与实际情况相符。需进一步研究渡槽边墙破坏的机理。

3.2.1 应力分析

渡槽水平和竖向正应力分布云图如图 7 所示。由图 7 可知：在槽内水荷载作用下，渡槽过流断面内侧底部出现局部受拉现象，拉应力范围为 0 ~ 20 kPa，且水平应力在渡槽底部出现应力集中现象。

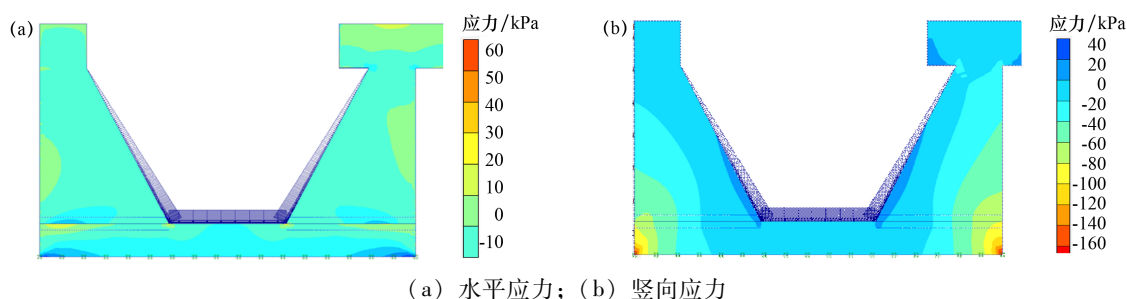


图 7 毛家河渡槽应力计算云图

3.2.2 应变分析

参照文献 [11], 计算渡槽的应变增量, 从而确定渡槽结构体在各类荷载作用下最薄弱的部位。剪应变增量如图 8 所示。由图 8 可知: 渡槽两侧边墙底部为剪切破坏的危险区域, 这与渡槽实际破坏情况基本一致。

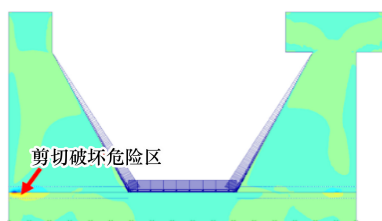


图 8 渡槽横断面剪切应变区

3.2.3 破坏面分析

渡槽在水压力作用下的破坏面如图 9 所示, 破坏面由剪切破坏区和拉伸截断破坏区共同组成。左侧边墙破坏区已基本贯通接缝界面, 右侧尚未贯通。靠近渡槽内侧的区域为拉破坏区, 外侧为剪切破坏区, 破坏过程是由内而外发展。

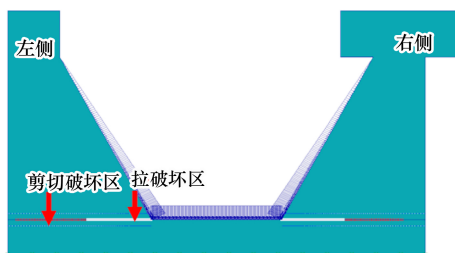


图 9 渡槽边墙拉破坏和剪切破坏范围

4 结 论

本文以黑龙江灌区中毛家河渡槽工程为例, 对该渡槽的基础和槽身结构进行现场检测和安全评价, 同时采用有限元法对边墙的垮塌机理进行应力应变分析, 得到以下结论。

(1) 渡槽砌体基础结构基本完整, 条石表面

存在风化、剥蚀, 砌体砂浆老化, 局部失去黏结力。实测砌体砂浆抗压强度范围为 $0 \sim 4$ MPa, 砂浆强度不符合规范要求。条石饱和抗压强度范围为 $8.34 \sim 12.9$ MPa, 不符合耐久性要求。

(2) 渡槽槽身边墙与底板存在多处严重渗漏, 砌体存在严重风化, 浆砌条石槽身砌筑砂浆强度不符合规范要求。实测边墙条石饱和抗压强度范围为 $9.84 \sim 16.4$ MPa, 不符合耐久性要求。

(3) 在槽内水荷载作用下, 渡槽过流断面内侧底部均出现局部受拉现象, 拉应力范围为 $0 \sim 20$ kPa, 且水平应力在渡槽底部出现应力集中现象。两侧边墙底部为剪切破坏, 左边墙破坏区已贯通, 右侧尚未贯通, 这与渡槽实际破坏情况基本一致。

参考文献:

- [1] 白文斌, 冯飒, 万忠海. 既有渡槽结构安全监测系统分析与应用: 以四川省东风渠灌区渡槽为例[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 218-222.
- [2] 万忠海, 白文斌, 冯飒. 碳纤维材料在水利工程修复中的应用研究初探[J]. 农业与技术, 2020, 40(23): 49-51.
- [3] 尚峰, 祝彦知, 纠永志. 在役钢筋混凝土渡槽安全评价与病害处理[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 208-214.
- [4] 黄涛, 张国新, 李江, 等. 寒冷地区某渡槽裂缝成因及钢筋锈蚀对耐久性影响[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 120-129.
- [5] 沈晓明, 黄永. 预应力混凝土 U 型梁式渡槽设计研究[J]. 中国水运, 2019, 19(11): 253-254.
- [6] KATEE. P, STEPHANIE. O, ROBYNNE. M, et al. Flume testing of passively adaptive composite tidal turbine blades under combined wave and current loading[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 93(1): 11-15.

(下转第 23 页)

站~民航路站区间隧道的影响,并与监测数据进行对比分析,得到以下结论。

(1) 既有车站和区间隧道的沉降和水平变形均满足控制标准。

(2) 数值计算结果和监测数据基本一致,验证了数值计算模型的可靠性。

(3) 由于施工的空间效应,新建隧道左线施工完成后,既有车站及区间隧道变形均超过总变形量的50%,为施工重点控制阶段。

(4) 既有地铁车站和区间隧道受新建隧道施工的影响主要为下方土体开挖引起的沉降,数值计算结果显示,施工完成后,既有车站最大沉降量为1.83 mm,既有1号线区间隧道最大沉降量为4.26 mm;既有车站最大水平位移为0.65 mm,既有1号线区间隧道最大水平位移为1.61 mm。

参考文献:

- [1] 吕高乐,易领兵,杜明芳,等. 软土地区双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道变形影响的分析[J]. 地质力学学报,2018,24(5):682-691.
 - [2] 王远六,易领兵,杜明芳,等. 砂卵石富水区域盾构小净距穿越单洞双线暗挖站施工技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(8):1109-1114.
 - [3] 易领兵,陈庆怀,孟旭央,等. 富水细砂地层盾构斜向超近距下穿双洞双线暗挖站施工技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(6):822-827;848.
 - [4] 张剑涛. 建筑物施工全过程对邻近地铁盾构隧道的影响[J]. 工程建设,2022,54(5):36-43;72.
 - [5] 文海涛,黄新晨. 基坑开挖对相邻小净距地铁隧道影响的数值分析[J]. 工程建设,2023,55(2):43-47;65.
-
- (上接第17页)
- [7] 灌溉与排水渠系建筑物设计规范:SL 482—2011[S]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
 - [8] 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范:SL 654—2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
 - [9] 张建伟,温嘉琦,黄锦林,等. 渡槽仿真参数确定及其非线性接触风振分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(2):77-83.
 - [10] 丁秀美,刘光士,黄润秋,等. 剪应变增量在堆积体边坡稳定性研究中的应用[J]. 地球科学进展,2004(S1):318-323.