

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.040

# 昌梨水库大坝防渗加固效果评价

顾磊<sup>1</sup>, 王宁<sup>2a</sup>, 柴先墩<sup>2a</sup>, 葛博睿<sup>2b</sup>

(1. 东海县水务局, 江苏连云港 222300;

2. 河海大学 a. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; b. 港口海岸与近海工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 在土坝防渗加固工程中, 混凝土护坡和混凝土防渗墙的应用在技术上已较为成熟, 但对其实际防渗效果的评价尚缺乏计算依据。以昌梨水库为例, 采用有限元法计算了防渗加固前后坝体的渗流特性, 结果表明, 以混凝土护坡和混凝土防渗墙为主要防渗措施建立的防渗体系效果良好, 可明显改善坝体和坝基的渗流性态, 加固后大坝各料区渗透坡降和渗透流量均明显减小, 且满足规范要求。

**关键词:** 土坝; 混凝土护坡; 混凝土防渗墙; 防渗加固; 防渗效果

**中图分类号:** TV 698. 23    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0167-04

## Evaluation of Reinforcement Effect for Earth Dam of Changli Reservoir

GU Lei<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>2a</sup>, CHAI Xiandun<sup>2a</sup>, GE Borui<sup>2b</sup>

(1. Donghai Water Conservancy Bureau; Lianyungang 222300; China;

2. Hohai University, a. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering;  
b. College of Harbour, Coastal and Off shore Engineering, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Concrete slope protection and concrete anti seepage wall are technically mature when used in the seepage reinforcement of earth dam. However, the comprehensive evaluation of its actual anti seepage effect lacks the computational basis. In this paper, finite element method has been used to compute the characteristics of the dam structure in the Changli Reservoir before and after the reinforcement. The results showed that the effect of the anti seepage system with the concrete slope protection and concrete anti seepage wall has good effect and the seepage condition of the dam body and foundation is improved. After the reinforcement, the seepage slope and seepage discharge of each area decreased significantly and met the standard requirements.

**Key words:** earth dam; concrete slope protection; concrete anti seepage wall; anti seepage reinforcement; anti seepage effect

近十多年来,许多大中小型水库由于运行多年陆续出现了不同程度的病险问题<sup>[1]</sup>,需要进行除险加固。由于各水库条件不同,故而加固措施不同,其加固效果也不同,因此对防渗加固技术进行工程分析和总结,对今后大坝安全鉴定、加固以及设计、施工和管理具有重要意义<sup>[2]</sup>。

昌梨水库位于江苏省东海县双店镇境内,是一座以防洪、灌溉为主,结合水产养殖等综合利用的中型水库。水库兴建于1957年4月,1958年6月建成蓄水。水库防洪标准为50年一遇设计,1000年一遇校核,相应的设计水位为49.30 m(废黄河零点,下同),校核水位50.35 m,相应库容2111万 m<sup>3</sup>,其中防洪库容1365万 m<sup>3</sup>,兴利库容1405万 m<sup>3</sup>,死库容5万 m<sup>3</sup>。

2007年6月对昌梨水库进行安全评价,发现其主要问题

为:土层自重压密固结条件差,土质结构较松散;大部坝段不做截水槽,且在坝身与坝基连接处存在透水层;坝基存在中等透水砂土层,渗透严重;坝脚出现管涌积水现象,护坝地沼泽化严重,渗流安全不符合要求。2008年3月昌梨水库被鉴定为病险水库,2009年6月进行除险加固,2010年10月竣工,防渗加固采用以混凝土护坡和混凝土防渗墙为主的防渗加固体系。

本文根据昌梨水库除险加固工程的实际情况,采用渗流分析有限元法<sup>[3]</sup>以及基于有限元法的可变容差法反演分析理论<sup>[4]</sup>等,选择典型断面,建立二维有限元模型,结合地质勘探资料和测压管水位观测资料,反演坝体、坝基材料的渗透参数,分析大坝除险加固前后的渗流场,获得坝体内的浸润面,坝体、坝基主要部位的渗透坡降等,并估算水库的总渗透

收稿日期: 2013-09-10    修回日期: 2014-02-14    网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2012071)

作者简介: 顾磊(1975-)男,江苏东海人,工程师,主要从事土木工程方面研究。E-mail: dhgulei@qq.com

通讯作者: 王宁(1990-)男,江苏赣榆人,硕士研究生,主要从事水利水电工程安全评价方面研究。E-mail: wangning90@foxmail.com

流量。通过比较除险加固前后大坝渗流性态的变化,评价除险加固的实际效果,为该防冲加固体系的推广应用提供计算依据。

渗流分析有限元法即是采用伽辽金逼近方法,将计算区域离散为互不交叉重叠的有限单元,选取八结点六面体等参单元,采用截止负压法<sup>[5,6]</sup>求解,迭代求得渗流的压力场,从而计算位势场、自由面坐标、渗透流量、渗透坡降等物理量。其中,渗透流量采用计算任意断面渗透流量的插值网格法<sup>[7]</sup>求得。

基于有限元法的可变容差法反演分析理论即是反复调整坝体、坝基各分区的渗透系数,利用渗流分析有限元法计算坝体和坝基的渗流场,使得每个钻孔水头的实测值与计算值相对误差小于 5%,则认为该渗流场就是最接近实际条件的渗流场,相应的渗透参数就是计算所需坝体和坝基的渗透参数。

## 1 工程概况

昌梨水库大坝长 1 850 m,坝顶宽度 5.5~6.0 m,坝顶高程 52.0 m,最大坝高 15.0 m,挡浪墙顶高程 52.65 m。加固前后坝体结构主要变化如下:迎水面护坡进行坝坡维稳处理,高程 45.00 m 至坝顶原护坡拆除,其中高程 41.00 m 至高程 45.00 m 老护坡整修 C20 细石混凝土灌缝,高程 45.00 m 至高程 50.60 m 现浇 12 cm 厚 C20 混凝土护坡,下设厚 12 cm 碎石垫层和 350 g/m<sup>2</sup> 土工布,高程 50.60 m 至高程 52.00 m(坝顶)做框格生态护坡;下游原反滤体拆除重建,结构为 5 cm 厚粗砂、350 g/m<sup>2</sup> 透水土工布、10 cm 厚碎石、25 cm 厚干砌块石;坝身防渗措施采用混凝土垂直防渗,墙身厚 30 cm、墙底入强风化岩 0.5 m,墙顶高程 50.54 m。由于该坝断面沿坝轴方向变化不大,故选择布置有观测孔的 0+930 断面作为典型断面进行计算分析,该断面加固前后结构见图 1。

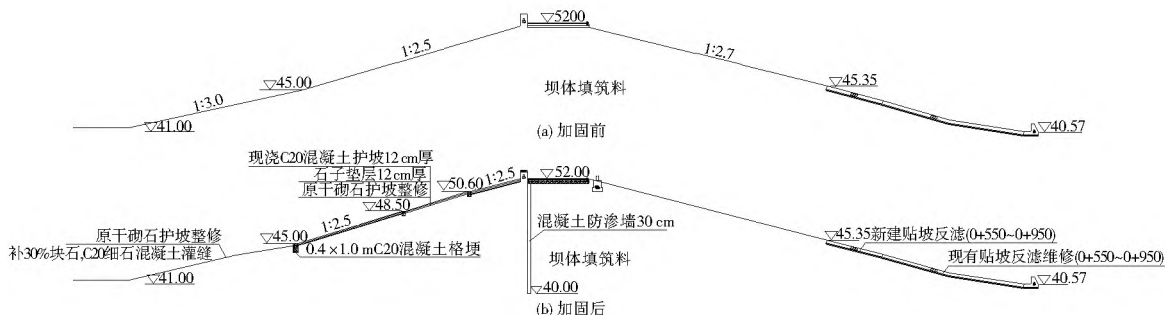


图 1 典型断面结构图

Fig. 1 The typical cross sectional structure

## 2 有限元模型

### 2.1 有限元网格

根据材料特性,坝区划分为坝体、坝基岩体等分区,建立有限元计算分析模型。有限元计算范围为: X 方向取为垂直坝轴线,上游边界截至上游坝踵以外 27.00 m(约 2 倍坝高),并取为坐标原点,下游边界至下游坝趾以外 20 m(约 1.5 倍坝高),上游和下游坝基均截取约 1.5 倍坝高; Z 方向以高程为坐标,坝基亦截取 1.5 倍以上坝高,即截至高程 22.51 m。加固前后有限元网格见图 2。

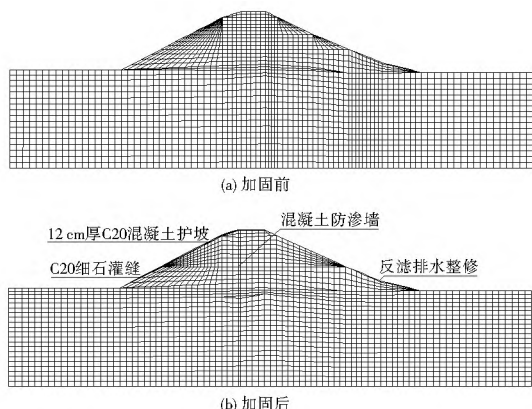


图 2 典型断面有限元网格

Fig. 2 Finite element meshes of the typical cross section

### 2.2 边界条件

考虑稳定渗流情况,渗流分析的边界类型主要有已知水头边界、出渗边界及不透水边界 3 种<sup>[8]</sup>。(1) 已知水头边界。包括坝址区上下游水位线以下的水库岸岸和库底、坝体上游坡和下游坡、河道。(2) 出渗边界。上下游水位线以上坝体上、下游坡面和坝顶。(3) 不透水边界。包括模型上下游两侧边界,以及模型底面。

## 3 渗透参数反演

昌梨水库大坝自 1958 年竣工至今已运行 50 余年,且经多次除险加固,大坝土体状态变化较大,大坝设计参数已无法反映大坝现状,需根据提供的现场资料选取稳定渗流场或准稳定渗流场对坝体渗透参数进行反演分析。

典型断面钻孔位置见图 3。选取加固前 2007 年 4 月 15 日的坝体地下水位观测资料,采用基于有限元法的可变容差法反演分析理论反演计算坝体和坝基主要分区的渗透系数,见表 1。此时,ZK19、ZK20、ZK21、ZK22 四个钻孔水头观测值与计算值的相对误差分别为 3.94%、4.29%、-3.22%和 -4.11%,均小于 5%,故表 1 所示渗透参数可用于有限元计算。

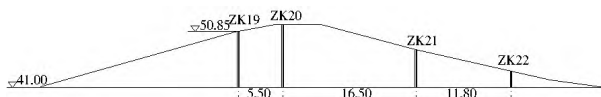


图 3 典型断面钻孔位置

Fig. 3 Drilling positions of the typical cross section

表 1 坝体、坝基材料渗透系数反演值

Table 1 Inversion values of permeability coefficients of the dam and foundation

部位	渗透系数 k / (m · s <sup>-1</sup> )	部位	渗透系数 k / (m · s <sup>-1</sup> )
坝体	2.70 × 10 <sup>7</sup>	中砂	2.48 × 10 <sup>5</sup>
全风化片麻岩	7.42 × 10 <sup>6</sup>	强风化片麻岩	4.36 × 10 <sup>7</sup>
中风化片麻岩	3.45 × 10 <sup>7</sup>	反滤排水	1.15 × 10 <sup>-1</sup>

表 2 防渗体系各部位渗透系数

Table 2 Permeability coefficients of each part of the anti seepage system

土层名称	渗透参数 k / (m · s <sup>-1</sup> )	土层名称	渗透参数 k / (m · s <sup>-1</sup> )
混凝土防渗墙	1.0 × 10 <sup>9</sup>	整修后反滤排水	2.45 × 10 <sup>-1</sup>
混凝土护坡	1.0 × 10 <sup>9</sup>	格埂生态护坡	3.32 × 10 <sup>-7</sup>
C20 细石混凝土灌缝	1.0 × 10 <sup>-8</sup>	土工布	2.99 × 10 <sup>-3</sup>
垫层	3.55 × 10 <sup>-4</sup>		

## 4 防渗加固效果评价

### 4.1 计算工况

根据《碾压式土石坝设计规范》(SL 274 2001), 土坝渗流计算应考虑运行中出现的不利工况条件, 按稳定渗流考虑, 因此本文考虑以下水位组合情况。(1) 正常蓄水工况。上游正常蓄水位 48.50 m, 下游 40.57 m。(2) 设计洪水工况。上游设计洪水位 49.23 m, 下游 40.57 m。(3) 校核洪水工况。上游 50.25 m, 下游 40.57 m。

昌梨水库大坝除险加固主要是防渗处理, 其防渗加固主要料区的渗透参数由现场试验获取, 见表 2。

### 4.2 削减水头

通过有限元法计算, 得到了加固前后各工况坝体和坝基的渗流场(限于篇幅, 这里仅给出正常蓄水工况下加固前后典型断面的位势分布图), 如图 4、图 5 所示。加固后, 在正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位工况下, 混凝土护坡两侧水头分别降低 0.6 m、0.74 m 和 0.98 m, 分别占总水头的 8%、9% 和 10%, 混凝土护坡阻渗效果较明显; 混凝土防渗墙两侧水头分别降低 2.8 m、3.06 m 和 3.45 m, 分别占总水头的 35%、35% 和 35%, 防渗墙防渗效果良好。

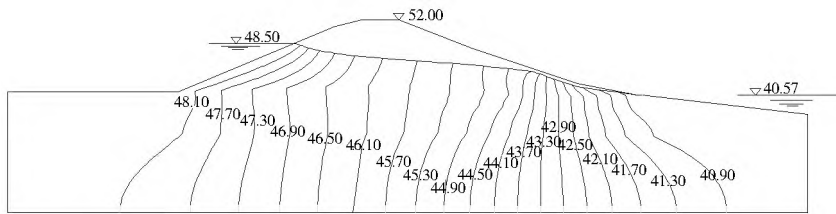


图 4 典型断面加固前正常蓄水位渗流等势线分布

Fig. 4 Seepage equipotential line distribution of the typical cross section before reinforcement under the normal water level

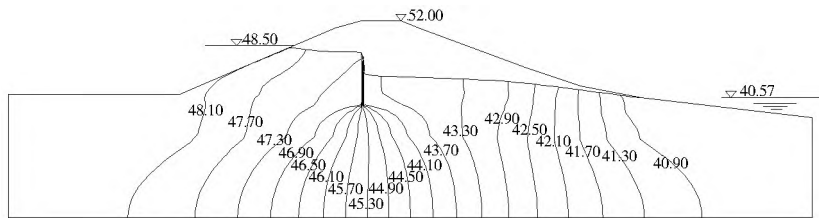


图 5 典型断面加固后正常蓄水位渗流等势线分布

Fig. 5 Seepage equipotential line distribution of the typical cross section after reinforcement under the normal water level

### 4.3 渗透坡降

坝体允许渗透坡降为 0.653。加固前在正常、设计和校核洪水位工况下, 坝体土料内的最大渗透坡降均大于容许渗透坡降, 不满足规范要求。加固后, 在各种工况下, 混凝土护坡、防渗墙的最大平均渗透坡降均较大, 分别达到 8.16 和 11.5 (表 3), 坝体其它分区渗透坡降均较小, 且均小于允许渗

透坡降, 满足规范要求。由此可知, 此防渗加固措施实施后, 坝体渗透安全有较大改善, 满足规范要求。

### 4.4 渗透流量

正常、设计、校核水位下坝体、坝基单宽渗透流量分别为 0.137 5 m<sup>3</sup> / (d · m)、0.154 3 m<sup>3</sup> / (d · m)、0.164 4 m<sup>3</sup> / (d · m), 较加固前分别减少 46%、47%、52%, 减小幅度较大, 防渗效果明显。

表 3 各工况下坝体各料区的最大渗透坡降

Table 3 The largest seepage slope of each discharge area under various working conditions

工况	料区			
	混凝土护坡	混凝土防渗墙	坝体	出逸
正常工况	5.00	9.33	0.160	0.160
设计工况	6.20	10.2	0.175	0.175
校核工况	8.16	11.5	0.191	0.191

## 5 结论

本文根据昌梨水库大坝的实际情况, 建立了防渗加固前后的有限元模型, 并利用坝体地下水观测资料, 对加固前大坝典型剖面的渗流场进行反演分析, 得到坝体和坝基主要分区的渗透参数。结果显示, 在正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位工况下, 混凝土护坡削减的水头分别占总水头的

8%、9%和10%，混凝土防渗墙削减的水头分别占总水头的35%、35%和35%。另外，结合削减水头、渗透坡降和渗透流量三个方面，对混凝土护坡和混凝土防渗墙组成的防渗体系的防渗加固效果进行了评价，认为该防渗加固体系施工质量可靠；加固后坝体各料区渗透坡降均满足规范要求，渗透安全有较大改善；加固后渗透流量大幅度减小，防渗效果明显。

#### 参考文献(References):

- [1] 严祖文, 魏迎奇, 张国栋. 病险水库除险加固现状分析及对策[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 76-79. (YAN Zu wen, WEI Ying qi, ZHANG Guo dong. Status Analysis and Countermeasures for Risk Elimination and Reinforcement of Dangerous Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(10): 76-79. (in Chinese))
- [2] 黄荣卫. 低弹模混凝土防渗墙在土石坝工程中的应用[J]. 大坝与安全, 2006, (3): 50-52. (HUANG Rong wei. Application of Low Elastic Modulus Concrete Anti-seepage Wall in Embankment Dams[J]. Dam and Safety, 2006, (3): 50-52. (in Chinese))
- [3] 梁亮, 沈振中, 张倩. 橡胶坝坝基防渗措施有限元分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 58-60. (LIANG Liang, SHEN Zhen zhong, ZHANG Qian. Seepage Stability and Its Control Measure for Dam Foundation by FEM[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(11): 58-60. (in Chinese))
- [4] 沈振中, 赵坚, 吴玲莉. 渗透参数反演的可变量差法[J]. 水电能源科学, 1999, 17(1): 5-8. (SHEN Zhen zhong, ZHAO Jian, WU Xiu li. A Flexible Tolerance Method of Inverting the Percolation Parameter[J]. Water Resources and Power, 1999, 17(1): 5-8. (in Chinese))
- [5] 速宝玉, 沈振中, 赵坚. 用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J]. 水利学报, 1996, (3): 22-29. (SU Bao yu, SHEN Zhen zhong, Zhao Jian. The Cut off Negative Pressure Method for Soling Filtration Problems Based on the Theory of Variational Inequalities[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (3): 22-29. (in Chinese))
- [6] 沈振中, 毛春梅. 稳定渗流场流网的计算与自动化绘制[J]. 河海大学学报, 1994, 22(5): 75-77. (SHEN Zhen zhong, MAO Chun mei. Calculation of Steady Seepage Field and Automation Draw Nets[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1994, 22(5): 75-77. (in Chinese))
- [7] Shen Zhenzhong, Xu Liqun, Qi Shuwen. A New Interpolation Meshing Method for Calculating Section Seepage Flux. The 10th National Conference on Percolation Mechanics, Wuhan, 2009. (in Chinese))
- [8] 李琛亮, 沈振中, 张华. 乌塔沟分洪道试验段堤防渗流场分析与渗流控制研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 55-57. (LI Chen liang, SHEN Zhen zhong, ZHANG Hua. Seepage Field Analysis and Seepage Control of Embankment for Some Floodway Test Section[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(5): 55-57. (in Chinese))

(上接第159页)

- [3] 赵瑜, 赵平. 大型预应力混凝土箱形渡槽结构三维有限元分析[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(2): 17-20. (ZHAO Yu, ZHAO Ping. Large Prestressed Concrete Box Aqueduct Structure of Three dimensional Finite Element Analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(2): 17-20. (in Chinese))
- [4] 潘旦光, 张国栋. 超大型U型渡槽有限元分析[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 2000, 22(1): 16-19. (PAN Dan guang, ZHANG Guo dong. Very Large U-shaped Aqueduct of Finite Element Analysis[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering(Yichang), 2000, 22(1): 16-19. (in Chinese))
- [5] 季日臣, 陈尧隆, 房振叶. 大型多纵梁矩形渡槽受力分析与结构形式选择[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 49-53. (JI Ri chen, CHEN Yao long, FANG Zhen ye. The Structure Analysis and Selection of Large Rectangular Aqueduct Bridge with Multi longitudinal Beams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 49-53. (in Chinese))
- [6] 夏富洲, 王长德, 曹为民, 等. 大流量预应力渡槽设计和施工技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 20-25. (XIA Fu zhou, WANG Chang de, CAO Wei min, et al. Research on Design and Construction Technology for Large Flow Prestressed Concrete Aqueduct[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 20-25. (in Chinese))
- [7] 冯光伟, 左丽, 王彩玲, 等. 南水北调中线沙河梁式渡槽结构选型与跨度分析研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 27-30. (FENG Guang wei, ZUO Li, WANG Cai ling, et al. Structure Form Selection and Study on Construction Scheme for the Shahe River Aqueduct in the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 27-30. (in Chinese))