

苇子水水库大坝渗漏分析与治理建议

陈 丽¹, 谢定松², 张守臻³, 李少鹏⁴

(1. 国家开放大学 理工教学部, 北京 100039; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3. 华能白杨河电厂, 山东 淄博 255200; 4. 中国电建集团 北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 苇子水水库自第一次蓄水至今, 存在较为严重的坝肩渗漏, 致使其一直未能正常发挥工程效益。地勘资料显示, 大坝坝基渗漏量较大, 可能与断层、坝肩部分区域岩石破碎有关。为探明水库主要渗漏部位, 指导后续渗漏处理, 采用地质勘查与数值模拟相结合的方法, 借助于钻孔压水试验来分析水库严重渗漏的主要部位及范围, 并通过坝址区水文地质概念模型和坝址区三维有限元分析模型进行验证。地质勘察结果表明: 左坝肩 347.954 ~ 336.354 m 高程存在顺河断层破碎岩, 断层岩体渗透系数增大至 1×10^{-3} cm/s 和 4×10^{-3} cm/s 时, 坝基渗流量分别增大为 356.60 m³/d 和 606.44 m³/d, 且增加部分几乎全来自左岸区域, 可见左岸断层岩体是水库主要的渗漏通道, 并在此基础上预测了断层条件变化下水库的渗流量。研究结果可为大坝渗漏后续处理和采取补救措施提供依据。

关键词: 坝基渗漏; 数值模拟; 压水试验; 苇子水水库

中图分类号: TV698.23

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.09.034

1 研究背景

据统计, 国内目前约 50% 以上的大坝修建于 20 世纪 50 ~ 70 年代, 限于当时的技术条件和施工工艺, 工程标准低, 施工质量差, 存在较多安全隐患^[1]。经过几十年的运行, 原来设计、施工中存在的问题逐渐暴露, 大部分大坝均处于病险状态; 加之建成后, 由于自然和人为因素的影响, 运行管理不到位, 导致这些水库大多存在裂缝、空洞、松散体、软弱夹层等渗漏隐患, 如不采取措施进行处理, 严重时将导致大坝溃决^[2]。因此, 大坝查险的一个重要内容是及早发现渗漏隐患, 争取时间用最少的人力物力排除险情, 这对确保水库大坝的安全运行具有十分重要的意义。

大坝渗漏分析方法主要包括钻孔与探槽^[3-4]、地球物理探测^[5]与数值模拟^[6]等 3 类方法。如何将上

述方法进行综合, 充分利用其各自优点, 以准确及时地发现大坝的渗漏部位及渗流量, 成为大坝渗漏分析工作中迫切需要解决的问题。为此, 本文通过钻孔压水试验, 分析了苇子水水库严重渗漏的主要部位及范围, 并建立了坝址区水文地质概念模型和坝址区三维数值模型, 运用数值计算佐证渗漏的主要部位; 在此基础上, 预测了断层和垫层等条件变化时的渗流量。分析成果可为大坝渗漏后续处理和采取补救措施提供依据。

2 水库基本特征

2.1 水库概况

苇子水水库位于北京市门头沟区官厅山峡下马岭北沟, 是海河水系永定河支流上的一座防洪水库。水库控制流域面积 39 km², 水库总库容 800 万 m³, 工程

收稿日期: 2020-04-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505004)

作者简介: 陈丽, 女, 讲师, 硕士, 研究方向为水利工程。E-mail: chenl@ouchn.edu.cn

通讯作者: 谢定松, 男, 正高级工程师, 博士, 研究方向为岩土工程渗流控制与渗流计算分析、土石坝安全评价。E-mail: dsxie@163.com

规模为小(1)型水库,防洪标准为50 a一遇洪水设计,500 a一遇洪水校核。

水库主要建筑物有拱坝、溢洪道、泄洪底孔和灌溉管。大坝为混凝土双曲拱坝,坝顶高程353.60 m,防浪墙顶高程354.60 m,基岩面开挖高程289.00 m,深槽部位用混凝土回填至296.00 m,拱坝实际最大坝高58.6 m,坝顶长度135.0 m,坝顶宽度3.4 m,坝底最大宽度13.4 m。溢洪道位于拱坝左坝头,为岸边开敞式。泄洪底孔为泄洪、排沙和放空水库之用。

2.2 坝址地质特征

坝址基岩为鲕状灰岩,岩层产状基本倾向上游,倾角 36° 左右,有3组裂隙,较发育的一组裂隙走向 $NE60^\circ \sim 85^\circ$,倾向SE,倾角 $70^\circ \sim 90^\circ$,岩石弹性模量在20万~50万 kg/cm^2 。

河床地面高程297.00 m,覆盖层深7 m,基岩为鲕状灰岩,新鲜完整,吸水率大部分小于 $0.01 L/(min \cdot m)$ 。在钻孔深达69 m处有泥质页岩,该岩层在坝址下游约100 m露头。

左坝肩在324.00 m高程以下,岩石完整,该高程有顺河断层破碎岩,宽2 m左右,自断层至坝顶约30 m坝高范围内,岩石较破碎,岩芯取率35%~63%,吸水率 $1.6 \sim 3.3 L/(min \cdot m)$ 。

右坝肩岩石较完整,岩芯取率60%~100%,岩层间有夹泥,吸水率较大的在310.00~320.00 m高程,吸水率 ω 为 $0.55 L/(min \cdot m)$ 。

2.3 坝体现状及渗漏情况

水库于1974年8月开工,当时拱坝施工采用了液压滑模技术,1980年8月竣工,1982年8月9日水库开始蓄水。苇子水水库运行期间,坝基渗流量较大,主要包括左坝肩和右坝肩渗漏。地勘资料显示,大坝坝基渗流量较大,可能与断层、坝肩部分区域岩石破碎有关。

图1~2为大坝现状。1982年8月9日水库第一次蓄水,水位达到318.00 m,到8月27日达到最高水位325.08 m,库容112万 m^3 ,1984年自然干枯,此后库水位一直没有超过325.08 m。

3 水库大坝渗漏分析及模拟

3.1 大坝渗透性分析

为查明左右坝肩的渗漏部位及范围,选择有效的防渗处理措施,在左右坝肩布置4个钻孔,钻孔深度40 m,各孔按5 m段长分别采用3级压力、5个阶段的五点压水法连续进行压水试验。通过对压水试验结果整理分析,绘制了压水试验的典型 $P-Q$ 曲线(见图3



图1 大坝上游侧

Fig. 1 Upstream of dam



图2 大坝下游侧

Fig. 2 Downstream of dam

~4,其中 P 为试段压力、 Q 为压入流量)并对左右岸山体渗透性进行了分区。

由图3和图4可知,A1钻孔和A4钻孔部分段 $P-Q$ 曲线类型属D(冲蚀)型。由A1钻孔26~31,31~36 m和36~40 m试验段的 $P-Q$ 曲线可以看出,升压阶段的曲线近似为一直线。开始降压后,相同压力下流量增大了9%~40%,说明在升压阶段水流状态为层流,当加压至最高压后,孔隙中的填充物被冲蚀干净,岩体裂隙不能恢复至原有状态,曲线类型为D型^[7]。

由A1钻孔16~21 m试验段的 $P-Q$ 曲线可以看出:当试验压力小于0.48 MPa时,岩体的透水性很小;当试压压力增大至0.6 MPa后,流量突然变大,但随压力增大流量并未有明显的增大;降压阶段的流量较升压阶段同压力小了约27%,表明在升压过程中裂隙中的填充物未被冲走而是进行了重新排列,裂隙被移动的颗粒充填,降低了岩体整体的渗透性,曲线类型为E(充填)型。

由A4钻孔22~24,27~30,30~33 m和36~40 m试验段的 $P-Q$ 曲线可以看出,升压和降压阶段的曲线不重合。降压阶段的流量较升压阶段同压力增

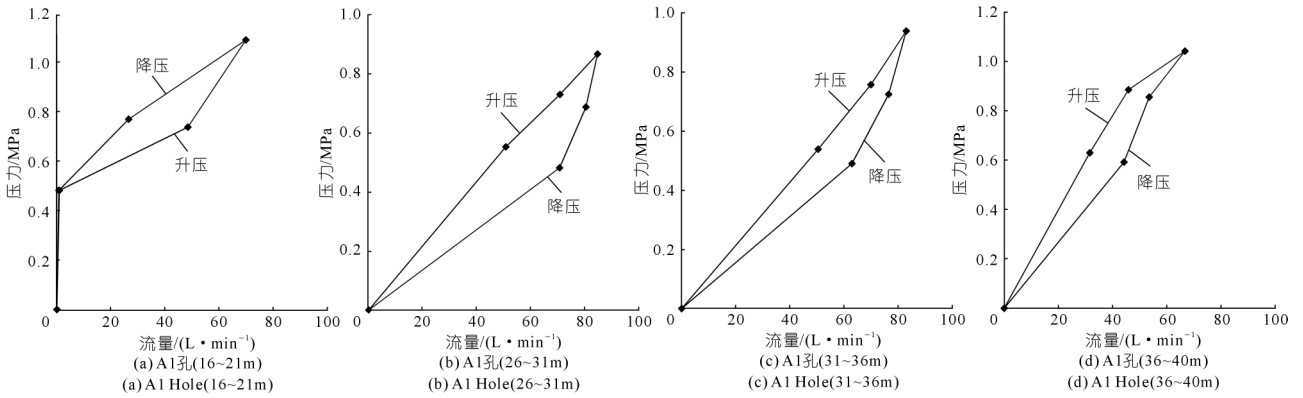


图3 右坝肩 A1 钻孔 P~Q 曲线
Fig. 3 P~Q curve of left abutment A1 borehole

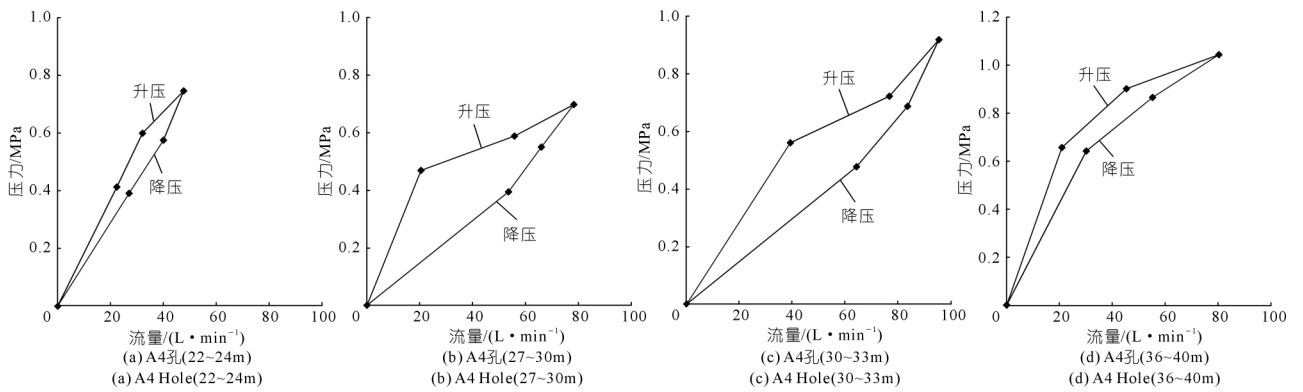


图4 左坝肩 A4 钻孔 P~Q 曲线
Fig. 4 P~Q curve of right abutment A4 borehole

大了 23% ~ 200% ,说明当加压至最高压后 ,孔隙中的填充物被冲蚀干净 ,岩体裂隙不能恢复至原有状态 ,曲线类型为 D 型。

通过钻孔压水试验发现:左坝肩大坝基岩渗透性较强 ,高程 347.95 ~ 336.35 m 为强透水层 ,透水率大于 100 Lu ,其余岩体透水率为 13.47 ~ 82.79 Lu ,整体透水性中等透水;右坝肩大坝基岩渗透性中等 ,岩体透水率为 7.39 ~ 19.58 Lu ,整体透水性弱 - 中等透水。

3.2 大坝三维渗流分析

3.2.1 拱坝渗流场基本理论

(1) 渗流场控制方程及边界条件。达西稳定渗流的控制方程 ,即

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = 0 \quad (1)$$

式中: x_i 为坐标 $i=1, 2, 3$; k_{ij} 为达西渗透系数张量; $h = x_3 + p/\gamma$ 为总水头 x_3 为位置水头 p/γ 为压力水头; Q 为源或汇项。

相应的边界条件为

$$h|_{\Gamma_1} = h_1 \quad (2)$$

$$-k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_2} = q_n \quad (3)$$

$$-k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_3} = 0 \text{ 且 } h = x_3 \quad (4)$$

$$-k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_4} \geq 0 \text{ 且 } h = x_3 \quad (5)$$

式中: h_1 为已知水头函数; n_i 为渗流界面外法线方向余弦 $i=1, 2, 3$; Γ_1 为第一类渗流边界条件; Γ_2 为第二类渗流边界条件; Γ_3 为渗流自由面; Γ_4 为渗流逸出面; q_n 为法向流量 ,流出为正。

根据变分原理 ,建立上述渗流问题的有限元计算格式如式 (6) 所示:

$$[K_1] \{h_1\} = \{Q_1\} \quad (6)$$

式中: $[K_1]$, $\{h_1\}$ 和 $\{Q_1\}$ 分别为渗流实体的传导矩阵、结点水头列阵和等效结点流量列阵。

(2) 固定网格节点虚流量法。对于上述有自由面的无压渗流问题 ,若按常规算法 ,则需事先完全知道渗流计算域的大小才能进行网格的剖分和问题的求解。

固定网格节点虚流量法,不需要事先给出精确的渗流计算域,而是采用一套大于实际渗流域的固定网格,通过迭代计算求解渗流域的自由面(浸润线)、逸出线(点)及渗流场水头分布情况。

式(7)为固定网格节点虚流量法的迭代计算方程,通过迭代计算求得的水头解等同于式(6)的解 $\{h_1\}$ 。

$$[K]\{h\} = \{Q\} - \{Q_2\} + \{\Delta Q\} \quad (8)$$

式中: $[K]$ 、 $\{h\}$ 和 $\{Q\}$ 分别为计算域 $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ 的总传导矩阵、结点水头列阵和等效结点流量列阵; $\{Q_2\}$ 为渗流虚域的等效结点流量列阵; $\{\Delta Q\} = [K_2]\{h\}$ 为渗流虚域中虚单元和过渡单元所贡献的结点虚流量列阵^[8-9]。

3.2.2 有限元计算模型

根据提供的坝址区地形地质条件,合理选择计算域,建立含坝体和地基的三维大坝有限元模型。有限元网格剖分以六面体单元为主,局部地方辅以四面体和四面体单元。图5为拱坝有限元计算网格,其中结点数55 025个,单元数51 332个。有限元计算模型中,对地基地面施加全部约束,各个侧面施加水平法向连杆约束。

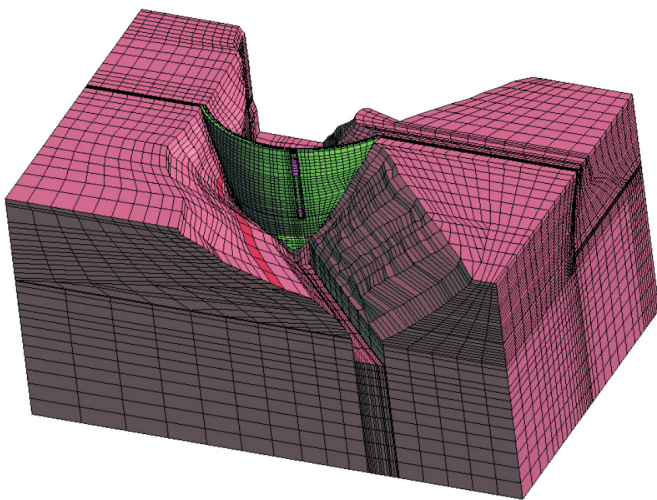


图5 有限元计算模型

Fig. 5 Finite element calculation model

3.2.3 材料物理学参数

大坝结构采用的计算参数如表1所示。

表1 坝体或地基力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of dam or foundation cm/s

土层或结构	渗透系数	土层或结构	渗透系数
坝体混凝土	1.0×10^{-6}	断层	2.0×10^{-4}
断层以下基岩	2.5×10^{-5}	覆盖层	2.5×10^{-5}
断层以上基岩	5.0×10^{-5}	垫座	1.0×10^{-6}

3.2.4 渗流计算工况

选取2个典型剖面绘制渗流场等水头线分布图:

- ① 断面1-1,大坝河床段代表剖面;
- ② 断面2-2,水平剖面(高程296.50 m)。

计算工况拟定时需综合考虑工程地质条件、大坝结构形式等因素。考虑到断层和垫座的渗透系数对坝基渗流场可能产生不利影响,因此增设了断层和垫座的敏感性分析工况。表2给出了大坝渗流场计算工况。

表2 计算工况

Tab. 2 Calculation conditions

工况	上游水位/m	下游水位/m	说明
1	352.50	296.00	设计洪水位
2	353.35	296.00	校核洪水位
3	352.50	296.00	设计洪水位 断层 $k = 1 \times 10^{-3}$ cm/s
4	352.50	296.00	设计洪水位 断层 $k = 4 \times 10^{-3}$ cm/s
5	352.50	296.00	设计洪水位 垫座 $k = 5 \times 10^{-6}$ cm/s
6	352.50	296.00	设计洪水位 垫座 $k = 2 \times 10^{-5}$ cm/s

3.2.5 渗流场成果分析

各工况的渗流量统计结果如表3所示。

表3 各工况渗流量统计

Tab. 3 Statistics of seepage flow in various working conditions

工况	m ³ /d				
	河床	左岸	右岸	坝体	合计
1	45.58	141.60	93.65	9.86	290.69
2	46.17	145.50	95.83	10.27	297.77
3	45.38	207.80	93.46	9.86	356.60
4	45.30	457.90	93.38	9.86	606.44
5	46.86	141.70	93.67	9.86	292.09
6	50.72	142.00	93.69	9.88	296.29

(1) 渗流场成果分析。工况1和工况2分别为设计和校核洪水位下的计算工况。设计洪水位下水头等值线分布见图6,渗流量统计如表3所示。

由图6可知:整个大坝和坝基渗流场水头等值线和渗流自由面较为简单,水头等值线形态、走向和密集程度反映了相应区域的材料特性和(或)边界条件。由于坝基未设渗控设施,因此坝基水头等值线变化平缓。此外,上游水位升高后(工况2),更多上游库水流向坝基,坝基水头等值线(较工况1)整体后移^[10]。

该工程枯水年年径流为360万m³,计算得到的设计和校核洪水位工况渗流量约为枯水径流量的3%。工况1下坝基总渗流量为290.69m³/d,其中左岸区域的渗流量达141.60m³/d,约占总渗流量的48.71%。这是由于左岸存在断层,其岩层透水性较大,流经该区域的渗流量较大。水位小幅上升后,工况2(校核水位)下坝基总渗流量为297.77m³/d,渗流量较工况1(设计水位)增加了2.44%,增幅较小。此时左岸区域

的渗流量达 $145.50 \text{ m}^3/\text{d}$ 约占总渗流量的 48.86% 。

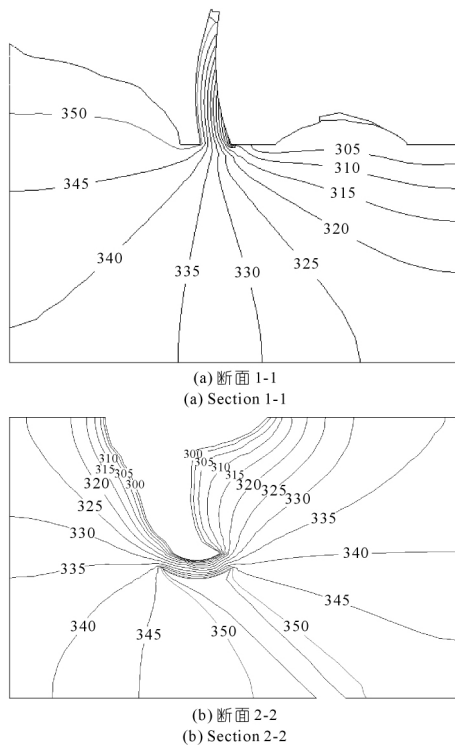


图6 工况1设计洪水水位下大坝水头等值线分布(单位:m)

Fig. 6 Contour map of dam head water under the design flood level in working condition 1

(2) 断层对坝基渗漏的影响。工况3和工况4的断层渗透系数分别为 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 和 $4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 断层渗透系数为 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 时的水头等值线分布如图7所示, 渗流量统计如表3所示。

与工况1相比, 工况3和工况4整个坝基渗流特性总体相似。断层岩体渗透系数增大, 岩层透水性增加, 上游库水更容易流入左岸坝基, 坝基水头等值线整体后移, 并随断层渗透系数增加而后移程度增大。

由渗流量统计表3可知: 断层岩体渗透系数增大, 坝基总渗流量增加明显, 工况3和工况4总渗流量分别为 $356.60 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $606.44 \text{ m}^3/\text{d}$, 分别较工况1增加 22.64% 和 108.62% 。由于断层仅位于左岸区域, 使得增加的渗流量几乎全来自左岸区域, 此时工况3和工况4左岸区域渗流量分别约占总渗流量的 58.29% 和 75.51% 。

(3) 垫座渗透系数对坝基渗漏的影响。工况5和工况6的垫座渗透系数分别增加至 $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 和 $2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 垫座渗透系数增加至 $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 时的大坝水头等值线分布如图8所示, 渗流量统计如表3所示。

与工况1相比, 工况5和工况6的水头等值线分布和坝基各区域渗流量结果相差不大, 垫座渗透系数

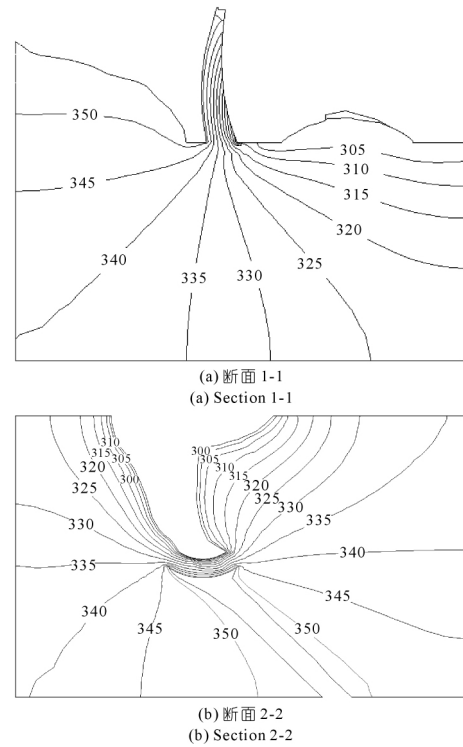


图7 工况3大坝水头等值线分布(单位:m)

Fig. 7 Contour map of dam water head in working condition 3

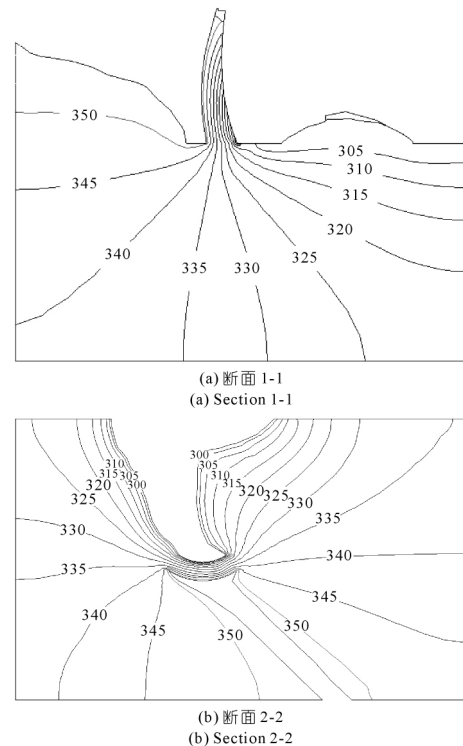


图8 工况5大坝水头等值线分布(单位:m)

Fig. 8 Contour map of dam water head in working condition 5

增大未对坝基渗流场产生明显影响。垫座范围较小, 在一定程度上增大垫座渗透系数并未使其成为坝基渗流通道, 工况5和工况6总渗流量分别为 $292.09 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $296.29 \text{ m}^3/\text{d}$, 分别较工况1仅增加 0.48% 和

1.93% ,变化甚小。

4 大坝渗漏治理建议

根据压水试验成果,大坝左坝肩基岩渗透性较强,标高347.954~336.354 m为强透水层,透水率大于100 Lu;大坝右坝肩基岩渗透性中等,岩体透水率为7.39~19.58 Lu,整体透水性弱~中等透水。根据断层岩体的渗透系数敏感性分析结果,当断层岩体渗透系数增大至 1×10^{-3} cm/s和 4×10^{-3} cm/s时,坝基渗流量变化率分别为22.64%和108.62%,且增加部分几乎全来自左岸坝肩,左岸断层岩体透水性变化对坝基渗流特性影响显著。因此,渗漏治理范围主要包括标高347.954~336.354 m的左岸坝肩,在渗漏治理帷幕补强过程中,特别应注意帷幕与断层交叉处的防渗质量,在注浆过程中需要布置一定的斜孔。

5 结论

(1) 根据压水试验工作,左坝肩大坝基岩渗透性较强,标高347.954~336.354 m为强透水层,透水率大于100 Lu,其余岩体透水率为13.47~82.79 Lu,整体透水性中等透水;右坝肩大坝基岩渗透性中等,岩体透水率为7.39~19.58 Lu,整体透水性弱~中等透水。

(2) 在现有计算条件下,坝基等水头线分布规律合理,设计和校核洪水位工况的坝基渗流量分别为290.69 m³/d和297.77 m³/d。该工程枯水年年径流为360万m³,计算得到的设计和校核洪水位工况渗流量约为枯水径流量的3%。坝基左岸存在断层,其岩层透水性较大,流经该区域的渗流量较大,设计和校核洪水位工况的坝基左岸区域渗流量分别为141.60 m³/d和145.50 m³/d,分别占坝基渗流量的48.71%和48.86%。

(3) 断层岩体渗透系数敏感性分析表明:断层岩

体渗透系数增大至 1×10^{-3} cm/s和 4×10^{-3} cm/s时,坝基渗流量分别增大为356.50 m³/d和606.44 m³/d,变化率分别为22.64%和108.62%,且增加部分几乎全来自左岸区域,可见断层岩体透水性变化对坝基渗流特性影响显著。

(4) 该工程对河床段进行局部开挖,采用垫座设计,垫座对渗漏量的影响很小。

(5) 目前水库的主要功能为防洪,不作为长期蓄水用,如果后期考虑调整水库的功能,水库需长期蓄水时,则需对左右坝肩的渗漏进行处理。渗漏治理范围主要包括标高347.954~336.354 m的左岸坝肩,在渗漏治理帷幕补强过程中,特别应注意帷幕与断层交叉处的防渗质量,在注浆过程中需要布置一定的斜孔。

参考文献:

- [1] 王旭东. 水库工程常见病害及防治措施[J]. 科技创新与应用, 2018(18): 113-114.
- [2] 朱艳. 水库渗漏的研究与分析[J]. 黑龙江科技信息, 2014(13): 187.
- [3] 杨鹏, 时惠黎. 复杂渗流条件下的水库渗漏分析[J]. 建材发展导向, 2018, 16(8): 92-95.
- [4] 冷元宝, 黄建通, 张震夏, 等. 堤坝隐患探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 370-379.
- [5] 任爱武, 柯柏荣, 程建设, 等. 岩溶地区水库渗漏原因分析与无损检测验证[J]. 水利学报, 2014, 45(S2): 119-124, 129.
- [6] 崔炜, 马军, 朱银邦, 等. 水库库区渗漏的三维数值模拟及处理措施影响分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(2): 110-114.
- [7] 王行本, 鞠占斌, 李绍基, 等. 水利水电工程钻孔压水试验规程: SL 31-2003[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [8] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 邢林生. 混凝土坝坝体渗漏危害性分析及其处理[J]. 水利发电学报, 2001(3): 108-116.

(编辑: 刘媛)

引用本文: 陈丽, 谢定松, 张守臻, 等. 苇子水水库大坝渗漏分析与治理建议[J]. 人民长江, 2020, 51(9): 194-200.

Analysis and treatment of dam seepage in Weizishui Reservoir

CHEN Li¹, XIE Dingsong², ZHANG Shouzhen³, LI Shaopeng⁴

(1. School of Engineering, The Open University of China, Beijing 100039, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Huaneng Baiyanghe Power Plant, Zibo 255200, China; 4. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: There has been serious seepage at the dam abutment since the first impoundment of Weizishui Reservoir, so it has not been brought into full play. The geological prospecting data showed that the seepage amount was large, which may be related to the fault fracture rock at the dam abutment. In order to explore the main seepage site of the reservoir and guide the subsequent treatment, we adopted combining methods of geological exploration and numerical simulation, i. e., the main site and scope of the serious seepage were analyzed through the borehole water pressure test and verified through the hydrogeological conceptual model and

the three - dimensional finite element analysis model of the dam site area. According to the geological investigation results ,river - direction faults and broken rocks were found at the elevation of 347. 954 m to 336. 354 m at the left dam abutment. The numerical analysis found that when the fault rock mass permeability coefficient increased to 1×10^{-3} cm/s and 4×10^{-3} cm/s ,the seepage flow increased to 356. 50 m³/d and 606. 44 m³/d ,respectively ,and the increased part was almost from the left bank ,proving that the fault rock masses on the left bank were the major seepage passage. On this basis ,the reservoir seepage under various fault conditions were predicted ,which could provide references for the subsequent treatment and remedial measures of dam seepage.

Key words: dam foundation seepage; numerical simulation; pressurized water test; Weizishui Reservoir

(上接第 66 页)

- [19] DAVID C ,FUGATE ,CARL T. Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV ,OBS and LISST [J]. *Continental Shelf Research* 2002(22) : 11 - 13.
- [20] GEORGE V ,SAMUEL T ,MEYERS. Temporal variability of hydrodynamics ,sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek[J]. *Continental Shelf Research* 2004 24(15) : 120 - 124.
- [21] 罗激葱. 太湖水动力学及其环境效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学 2004.
- [22] 秦伯强 ,胡维平 ,陈伟民 ,等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J]. *湖泊科学* 2000(4) : 327 - 334 ,385.
- [23] 刘青泉 ,曹文洪. 泥沙颗粒的扬动机理分析[J]. *水利学报* ,1998 (5) : 2 - 7 ,54.
- [24] SUMER B M ,OGZ B. Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel [J]. *Journal of Fluid Mechanics* ,1978 ,86 (1) : 109 - 127.
- [25] 曹志先 ,张效先 ,习和忠. 基于湍流猝发的明渠流悬沙浓度分布[J]. *水利学报* ,1997(2) : 52 - 57.

(编辑: 江文)

引用本文: 唐孝桥 ,王健健 ,姜娇 ,等. 太湖湍流特征及其对表层沉积物起悬机制的影响[J]. *人民长江* 2020 51(9) : 62 - 66 200.

Turbulence characteristic and its effect on suspension mechanisms of surface sediment in Taihu Lake

TANG Xiaoqiao¹ ,WANG Jianjian^{1, 2} ,JIANG Jiao¹ ,GAN Yuxue¹ ,LI Yiping²

(1. *School of Hydrology and Water Resources ,Nanjing University of Information Science and Technology ,Nanjing 210044 ,China*; 2. *Ministry of Education Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes ,HoHai University ,Nanjing 210098 ,China*)

Abstract: Taihu Lake is a typically large shallow lake with eutrophication. Sediment suspension due to hydrodynamic disturbance at sediment - water interfaces has a close relationship with cyanobacteria bloom. In this study ,we collected synchronous data including weather ,hydrodynamics ,water quality by Acoustic Doppler Velocimeter ,Optical Backscatter Sensor ,PH - II Handheld weather stations in Taihu Lake. Then ,we analyzed the relationship between suspended matter concentration and wind speed ,shear stress and turbulence characteristics. The results showed that the shear stress caused by wave played a leading role in the process of sediment resuspension in the central Taihu Lake. Besides ,thresholds of wave shear stress and wind speed were 0. 08 N/m² and 4 m/s respectively. Also ,sediment resuspension was mainly caused by intermittent bursting of turbulence in coherent structures. The large amplitude disturbance in a short time played a key role in sediment vertically diffusion. This study could provide references for endogenous release mechanism related to turbulence in Taihu Lake.

Key words: suspended matter concentration; turbulence kinetic energy; shear stress; surface sediment; sediment - water interfaces; Optical Backscatter Sensor; Taihu Lake