

改扩建水库土坝段三维渗流问题仿真研究

韩凤霞¹, 崔 栋²

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048; 2. 华北水利水电大学, 郑州 450045)

摘要: 渗流问题是直接影响大坝改扩建后运行安全的关键问题, 为此, 利用三维渗流场的仿真研究, 合理评价大坝改扩建设计渗控的合理性和有效性是十分必要的。采用无压渗流场仿真计算理论和有限元方法, 在设计渗控措施下, 对某水库加高加固后土坝的三维渗流问题进行仿真计算, 并定性、定量分析了土坝坝区浸润线、水头分布、渗透坡降及渗漏量等渗流参数的数值规律。结果表明, 混凝土预制块、复合土工膜、防渗帷幕等组成的坝体防渗体系, 可以有效地截断通过土坝的渗流, 但水库水位的抬高也增加了土坝连接部位的绕渗、渗透坡降等不利渗流的安全问题。

关键词: 土石坝; 渗流; 改扩建; 水头; 渗透坡降; 渗漏量

中图分类号: TV 139.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)01-0145-03

Simulation of three dimensional seepage problem of earth dam in reservoir extension project

HAN Feng xia¹, CU I Dong²

(1. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Seepage is the key technical problem for the earth dam extension project, and the reasonable evaluation of the rationality and validity of seepage control design scheme is needed. In this paper, the unconfined seepage field theory and finite element method were used to simulate the three dimensional seepage of the earth dam in a reservoir after reinforcement and heightening under the design scheme of seepage control. The characteristics of the seepage parameters, such as infiltration, head distribution, seepage gradient, and leakage, were analyzed qualitatively and quantitatively. The results showed that seepage through the dam can be effectively intercepted under the seepage control measures of precast concrete blocks, composite geomembrane, and seepage prevention curtain; however, the unfavorable seepage safety problems of bypass seepage and seepage gradient in the dam junction occur when the reservoir water level increases.

Key words: earth dam; seepage; extension; water head; seepage gradient; leakage

土石坝因其选材容易、造价低、结构简单、抗震性能好、寿命长、施工管理简便等优点, 在世界各地包括国内被广泛采用。但是在我国, 由于建造时间早, 在建期间受资金及条件的限制, 土石坝筑坝质量通常较差, 或者水库规模不能满足当地日益增长的需水要求, 这种情况下通常要进行土石坝改扩建工程。土石坝改扩建所面临的关键问题之一既是渗流问题^[1-3], 特别是加高加固的工程, 需要特别关注加高后对原坝体渗透稳定和渗漏控制的加固要求。土石坝防渗失败或失效后, 极易发生接触冲刷、管涌等渗透破坏^[4-6], 并伴随着大量的渗漏现象, 这大大增加渗控体系设计和防渗措施施工的难度。为此, 本文以某水库工程为例, 采用三维无压渗流场有限元方法, 对该工程土坝段加高加固后的渗流问题进行仿真研究, 重点对坝区水头分布、坝体关键部位渗透坡降以

及渗漏量进行分析, 并评价其设计渗控体系的有效性以及可能存在的渗流问题, 为国内类似工程的设计和施工提供参考。

1 土坝无压渗流场仿真计算基本理论

1.1 有限元支配方程

三维稳定达西渗流场的渗流支配方程为^[7-10]

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

式中: x_i 为坐标, $i=1, 2, 3$; k_{ij} 为二阶对称的达西渗透系数张量, 描述岩体的渗透各向异性; h 为总水头, $h=x_3+p/\gamma(x_3$ 为位置水头, p/γ 为压力水头); Q 为渗流域中的源或汇项。

1.2 定解条件

计算所用边界示于图1。边界条件^[11-15]理论上为以下4

收稿日期: 2014-07-02 修回日期: 2014-11-15 网络出版时间: 2014-12-03
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1138.007.html>
作者简介: 韩凤霞(1967-), 女, 宁夏人, 高级工程师, 主要从事水利工程设计研究工作。E-mail: axwwish@163.com

种情形:

$$\begin{cases} h|_{\Gamma_1} = h_1 \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_2} = q_n \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_3} = 0 \text{ 且 } h = x_3 \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_4} \geq 0 \text{ 且 } h = x_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: h_1, h_2 为已知水头函数; n_i 为渗流边界外法线向余弦, $i = 1, 2, 3$; $\Gamma_1 = BC, CD$ 为已知水头的第一类渗流边界条件; $\Gamma_2 = GA, AF, FE, BC$ 为已知渗流量的第二类渗流边界条件; $\Gamma_3 = GE$ 为位于渗流域中渗流实区和虚区之间的渗流自由面, 事先并不知道它的确切位置, 呈现边界非线性特性; $\Gamma_4 = ED$ 为渗流逸出面, 因事先不知道渗流逸出点 E 的具体位置, 事先也不能知道整个逸出面的具体大小, 因此是一个边界非线性渗流问题, 需迭代求解; q_n 为边界法向流量, 流出为正。

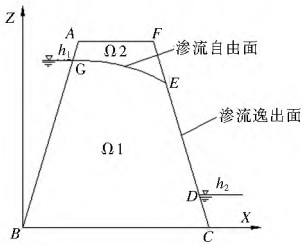


图 1 无压稳定渗流数学模型

Fig. 1 Mathematical model of unconfined steady seepage field

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某水库一期工程于 1976 年完成, 水库总库容 9 510 万 m^3 , 正常蓄水位为 52.23 m, 调节库容 3 300 万 m^3 , 现灌面积 1 593.33 hm^2 , 渠首水电站装机 1 125 kW, 属中型工程; 扩建后水库枢纽工程等别为 0 级, 属大(2)型工程。主要建筑物有浆砌石挡水坝、溢流坝、土坝及输水涵管, 均为 2 级建筑物。设计洪水标准为 100 年, 校核洪水标准依坝型而不同, 土石坝为 2 000 年, 重力坝为 1 000 年。土坝段是本工程渗流问题关注的重点, 本文将其作为研究对象。

该水库位于加里东褶皱基底的陀烈盆地中, 水库基底和

库周围分水岭由寒武系陀烈群变质岩系的千枚岩、板岩和片岩组成。库内主要断裂多已充填胶结, 在分水岭地段的地形和地下水位均高于水库设计正常蓄水位, 水库蓄水后没有发生库区渗漏问题。

2.2 计算模型和条件

该水库扩建后的渗流计算模型中网格单元以 8 结点六面体空间等参单元为主, 局部区域采用 6 结点五面体单元进行过渡, 最终形成疏密有致的三维渗流场有限元计算精细网格, 剖分后单元总数为 55 653, 节点数 60 905。网格模型中对加高后的土坝主要水工结构物参照坝体设计渗控布置进行了较精细的模拟, 含复合土工膜、混凝土预制块、粗砂垫层、下游土工膜、帷幕灌浆、加高后的坝体部分、固结灌浆区域等。此外, 模型对坝基覆盖层(Qed1)、基础岩体也进行了较细致的模拟, 根据本工程的性质, 主要包含土坝坝区以及浆砌石刺墙段, 基础边界为新鲜基岩以下 50 m 左右。模型顶部高程为坝顶高程。整个三维模型在河床坝区网格较密, 以提高坝区渗流计算精度。图 2 为生成后的三维有限元网格模型, 坝区各材料渗透系数取值见表 1。

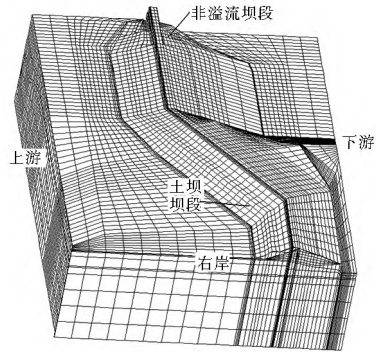


图 2 坝区渗流三维网格计算模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element mesh of dam seepage field

计算域四周截取边界条件分别假定为: 计算域的上游截取边界、下游截取边界以及底边界均视为隔水边界; 对于地表边界, 坝轴线上游侧, 低于河或库水位的地方为已知水头边界(上游水位取 52.58 m), 高于河或库水位的地方为渗流可能逸出面; 在坝轴线下游侧, 同样低于下游水位的地方为已知水头边界条件(下游水位取 41.66 m), 高于下游水位的地方均为可能渗流逸出面。

表 1 土坝扩建后坝区各料区渗透系数

Tab. 1 The permeability coefficient of each material area after the extension of earth dam

cm/s

编号	材料名称	渗透系数	编号	材料名称	渗透系数
1	基础覆盖层	5.60×10^3	7	帷幕灌浆	1.00×10^5
2	表层风化岩层	4.32×10^3	8	混凝土预制块	1.00×10^7
3	弱风化岩层	2.11×10^4	9	粗砂垫层	1.00×10^4
4	微风化、新鲜岩层	1.17×10^5	10	复合土工膜	1.00×10^8
5	土坝坝体材料	6.01×10^4	11	坝体材料(新增)	1.00×10^4
6	浆砌石	5.05×10^4	12	下游贴坡排水料	1.00×10^1

2.3 计算结果分析

经过渗流场计算, 土坝坝区平面水头等值线分布见图 3, 土坝坝段典型断面水头等值线分布见图 4, 关键部位渗透坡降见图 5, 关注部位的渗漏量与总渗漏量见图 6。

计算结果显示水库土坝在加固后计算所得的整个渗流场的水头分布规律合理, 水头等值线形态、走向和密集程度都较准确地反映了相应区域防渗或排水渗控措施特点、渗流特性和边界条件, 计算域内的主要防渗和排水措施同样得到

了细致地模拟,渗控效果也及时得到了正确反映。其中,土坝、浆砌石刺墙以及右岸山体构成的渗流场具有明显的三维渗流特征:大坝蓄水后,库水不仅通过土坝和浆砌石刺墙基础透水带向下游河床渗漏,还会通过右岸山体表层的透水带及基础岩体绕过土坝向下游渗漏。因此在土坝加高加固后,水库蓄水将使坝体中水位雍高,土坝坝区将会出现坝肩绕渗,需要设计防渗帷幕等防渗方案加以限制。

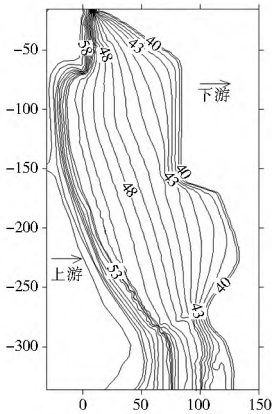


图3 平面水头等值线分布(m)

Fig. 3 Distribution of plan water head contour

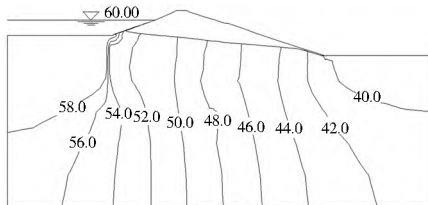


图4 典型断面水头等值线分布(m)

Fig. 4 Distribution of water head in the typical cross section

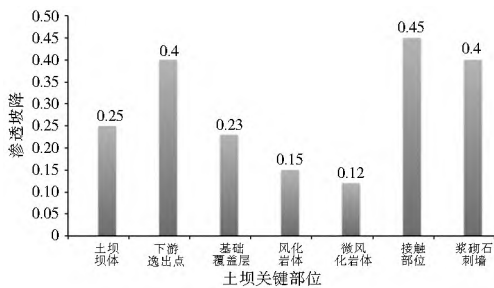


图5 土坝关键部位渗透坡降

Fig. 5 Seepage gradient in the key area of earth dam

就土坝而言,其基础河床覆盖层透水性强,分层现象显著,基岩强风化层和弱风化层埋身较浅且渗透性较强。大坝建成之后,在坝体主要防渗体正常工作条件下,坝基将成为主要的渗漏通道。因此在土坝扩建的同时,可在土坝坝址处设置防渗帷幕来截断通过坝基的渗漏。正常运行时,土坝上游面设置的混凝土预制块以及复合土工膜、土坝坝址部位设置的防渗帷幕等主要防渗措施形成一个整体,类似于面板坝上游的混凝土面板,使得土坝由加高加固前的均质土坝变为“面板”土坝,可以有效地截断通过土坝的渗流。在土石坝坝段水头分布方面,由于表层设置的混凝土预制块以及复合土工膜等相对不透水的材料,上游库水在进入土坝坝体之前有一个明显的跌幅,消减水头值在 14.65 m, 占总消减水头的 69.8%; 在渗透坡降方面,由于土坝上游加厚,土坝的渗径增

加,因此土坝中的渗透坡降增大幅度较小,但是在出逸点部位因设置贴坡排水导引土坝渗水渗出,其坡降增大较多,考虑到下游排水后设置有土工膜以减少土料的冲出,因此出逸点部位是渗透稳定的。土坝渗流量主要集中在土坝坝体,右岸山体和浆砌石刺墙段较小。

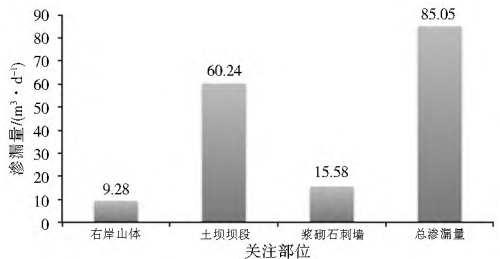


图6 关注部位渗流量

Fig. 6 Leakage in the key area of earth dam

3 结论

(1) 土坝在加厚、设置混凝土预制块以及复合土工膜、防渗帷幕等一系列的措施后,由均质土坝防渗变为类“面板坝”防渗,有效降低坝体浸润线,可削减水头达 69.8%,从而有效缓解原土坝渗透破坏和减小渗流量。

(2) 土坝加高加固、上游蓄水位的抬高,也带来了一些新的不利于水库渗透安全的问题,特别是右岸山体的绕渗增加、土坝与浆砌石刺墙的连接部位渗透坡降增大、浆砌石刺墙浸润线抬高等现象。

参考文献(References):

[1] 赵家成,王从锋,姜利汉. 中、小型病险水库除险加固的研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2005, 27(2): 119-122. (ZHAO Jia cheng, WANG Cong feng, JIANG Li han. Study on Eliminating Danger and Reinforcing of Old Hazardous Middle Small Reservoirs[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2005, 27(2): 119-122. (in Chinese))

[2] 林耀生. 有限单元法在土坝渗流计算中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2003(12): 318-319. (LIN Yaosheng. Application of finite element method in computation of dam seepage flow[J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2003(12): 318-319. (in Chinese))

[3] 邹祺,邱明月,李福金. 大坝安全评价中渗流安全评价的探讨[J]. 黑龙江水利科学, 2008(2): 50-51. (ZOU Qi, QIU Mingyue, LI Furjin. The seepage safety evaluation of dam safety evaluation[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water, 2008(2): 50-51. (in Chinese))

[4] 牛运光. 试论土石坝隐患探测[J]. 大坝与安全, 1996, 36(2): 24-33. (NIU Yunguang. Detection of earth rock dam hidden danger[J]. Large dam & Safety, 1996, 36(2): 24-33. (in Chinese))

[5] Sjö dahl P, Dahlin T, and Johansson S. Embankment dam seepage evaluation from resistivity monitoring data[J]. Near Surface Geophysics, 2009, 7(5-6): 463-474.

[6] 钮新强. 水库病害特点及除险加固技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 153-157. (NIU Xinqiang. Characteristics of reservoir defects and rehabilitation technology in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 153-157. (in Chinese))

(下转第 152 页)

- [7] 何兆芳. 尾矿在预拌混凝土中应用的试验研究[J]. 商品混凝土, 2009(6). (HE Zhaofang. Tailings in the applications of ready mixed concrete experimental study[J]. Journal of Commodity Concrete, 2009(6). (in Chinese))
- [8] 郑永超, 倪文, 张旭芳, 等. 用细粒铁尾矿制备细骨料混凝土的试验研究[J]. 金属矿山, 2009(12). (ZHENG Yongchao, NI Wen, ZHANG Xufang, et al. Preparation of fine aggregate concrete with fine grained tailings test study[J]. Metal Mine, 2009(12). (in Chinese))
- [9] 徐宝华, 宋姗. 尾矿砂复配在混凝土生产中的研究及应用[J]. 商品混凝土, 2010(1). (XU Baohua, SONG Shan. Tail ore distribution of research and application in the production of concrete[J]. Journal of Commodity Concrete, 2010(1). (in Chinese))
- [10] GB 17671-1999, 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)[S]. (GB 17671-1999, Method of testing cements-Determination of strength(ISO)[S]. (in Chinese))
- [11] SL352-2006, 水工混凝土试验规程[S](SL352-2006, Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [12] 蔡基伟, 张勇, 封孝信, 等. 铁尾矿粉对混凝土工作性与强度的影响[J]. 商品混凝土, 2009(8): 32-35. (CAI Jiwei, ZHANG yong, FENG Xiaoxin, et al. Iron ore tail's influence on the workability and strength of concrete[J]. Commercial Concrete, 2009(8): 32-35. (in Chinese))
- [13] 黄智德, 彭志辉, 彭家惠, 等. NEL 法测定海工混凝土氯离子扩散系数的应用研究[A]. 第七届全国混凝土耐久性学术交流会论文集[C]. 2008. (HUANG Zhide; PENG Zhihui. PENG Jiahui, et al. NEL method determination of Marine engineering concrete chloride ion diffusion coefficient of applied research[A]. The 7th national conference on concrete durability[C]. 2008. (in Chinese))
- [14] 易成, 郭婷婷, 程涛, 等. NEL 法与 ASTM C1202 法氯离子渗透性对比试验研究[J]. 混凝土, 2007(3): 4-6. (YI Cheng; GUO Tingting; CHENG tao, et al. NEL method and ASTM C1202 method the chloride ion permeability contrast test research[J]. Concrete, 2007(3): 4-6. (in Chinese))
- [15] 栾宏图. 影响混凝土抗渗性能的因素[J]. 民营科技, 2008(12): 194. (LUAN Hongtu. The influence factors of permeability of concrete[J]. Private Science and Technology, 2008(12): 194. (in Chinese))
- [16] 马德宝, 王玉龙. 混凝土抗冻耐久性性能的研究进展[J]. 科技资讯, 2008(12). (MA Debao; WANG Yulong. The research progress of concrete frost resistance durability performance[J]. Journal of Information Science and Technology, 2008(12). (in Chinese))

(上接第 147 页)

- [7] Lacy S J, Prevo st J H. A procedure for locating the free surface[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(6): 585-601.
- [8] 速宝玉, 朱岳明. 不变网格确定渗流自由面的结点虚流量法[J]. 河海大学学报, 1991, (5): 113-117. (SU Baoyu, ZHU Yue ming. The same grid determination of seepage free surface nodal virtual flux method[J]. Journal of Hohai University, 1991(5): 113-117. (in Chinese))
- [9] 陈守开, 刘尚蔚, 郭利霞, 等. 中、小型土石坝渗流场三维有限元分析方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 612-621. (CHEN Shou kai, LIU Shang wei, GUO Lixia, et al. 3-D Finite element method of seepage field of middle small earth rock dam and its application[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 612-621. (in Chinese))
- [10] 柴军瑞. 混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型[J]. 水力发电学报, 2000, 68(1): 27-25. (CHAI Junrui. On mathematical model for coupled seepage and temperature field in concrete dam[J]. Journal of Hydro Electric Engineering, 2000, 68(1): 27-25. (in Chinese))
- [11] 李凤志. 渗流自由面分析的比例边界有限元法[J]. 计算物理, 2009, 26(5): 665-670. (LI Fengzhi. Scaled Boundary Finite element Method for Seepage Free Surfaces Analysis[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(5): 665-670. (in Chinese))
- [12] 刘文, 钟小彦, 覃听慧, 等. 西夏水库防渗方案渗流场的有限体积法数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(3): 58-61. (LIU Wen, ZHONG Xiaoyan, QIN Xinhui, et al. Numerical simulation for seepage field of Xixia Reservoir by finite volume method[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, 6(3): 58-61. (in Chinese))
- [13] 曹纪刚, 乐陶. 某山谷型尾矿库三维渗流场模拟分析[J]. 金属矿山, 2013, 441(3): 36-38. (CAO Jigang, YUE Tao. Numerical simulation on the three dimensional flow field of a valley-type tailings pond[J]. Metal Mine, 2013, 441(3): 36-38. (in Chinese))
- [14] 王建新, 朱岳明, 吴世勇. 深圳抽水蓄能电站地下厂房渗流特性研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 71-74. (WANG Jianxin, ZHU Yue ming, WU Shiyong. Analysis of seepage characteristics of underground powerhouse of Shenzhen Pumped Storage Power Station[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(1): 71-74. (in Chinese))
- [15] 崔皓东, 朱岳明. 有自由面渗流分析的改进节点虚流量全域迭代法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(2): 238-241. (CUI Haodong, ZHU Yue ming. Improved procedure of nodal virtual flux of global iteration to solve seepage free surface[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 33(2): 238-241. (in Chinese))