

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.028

基于有限元法的溢洪道导墙侧向抗滑稳定分析

杜占科, 司政, 李守义, 毕晨曦, 吕汶蔚, 程帅, 王懿

(西安理工大学 水利水电工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 水电站溢洪道导墙承受的荷载及其结构形式比较复杂。为了准确了解溢洪道导墙在复杂荷载作用下的应力及其侧向抗滑稳定性, 采用 ANSYS 建立三维有限元模型, 对溢洪道导墙控制段进行了整体空间应力与变形分析计算。经计算得到了导墙在复杂荷载组合作用下结构的整体变形和应力分布规律, 并分析计算了导墙的整体侧向抗滑稳定性。研究表明: 溢洪道导墙在复杂荷载组合作用下的整体变形和应力分布满足设计要求; 导墙的整体侧向抗滑稳定性满足要求。所采用的溢洪道导墙侧向抗滑稳定性分析方法在实际工程建设中得以应用, 具有广泛的适用性和一定的参考价值。

关键词: 溢洪道导墙; 应力分析; 侧向抗滑稳定; 有限元法 (FEM); ANSYS

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0149-05

Lateral Anti-sliding Stability Analysis of Spillway Guide Wall Based on FEM

DU Zhanke, SI Zheng, LI Shouyi, BI Chenxi, LV Wenwei, CHENG Shuai, WANG Yi

(Institute of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The structure and bearing loads of spillway guide wall of hydropower station are rather complex. In order to understand the stress and lateral anti-sliding stability of spillway guide wall under complex loads, this paper established a three-dimensional finite element model by using ANSYS, and analyzed the whole deformation and stress of the control segment of spillway guide wall. Then we got the distribution rules of whole deformation and stress of spillway guide wall under complex loads, and calculated the overall lateral anti-sliding stability of the guide wall. The results show that the distribution of whole stress and the overall lateral anti-sliding stability of spillway guide wall under complex loads could meet the design requirement. The analysis method of lateral anti-sliding stability for spillway guide wall taken in this paper has been adopted in engineering and consistent with the actual situation, and it is applicable and suitable which has certain reference value.

Keywords: spillway guide wall; stress analysis; lateral anti-sliding stability; FEM; ANSYS

某水电站工程以发电为主, 正常蓄水 1 928.0 m, 校核洪水位 1 928.9 m, 总库容 0.778 亿 m³, 具备日调节的能力。拦河坝最大坝高为 75.8 m, 发电站的总装机容量为 520 MW。根据《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》^[1](DL5180-2003) 和《防洪标准》^[1](GB50201-94), 本工程的等别和规模定为二等大(2)型工程, 引水发电、挡水、泄洪等各类主要建筑物均按 2 级建筑物进行设计计算, 建筑物的结构安全级别均为 II 级; 下游防护、消能等次要建筑物均

按 3 级建筑物进行设计计算, 建筑物的结构安全级别均为 II 级。

由于该电站工程受到地形地质条件等诸多方面的约束, 溢洪道的建基面高程为 1 769.0 m, 与溢洪道相邻的右侧电站厂房的建基面高程为 1 744.6 m, 可见溢洪道的建基面高程相对于电站厂房的建基面高程较高, 而且建基面为左侧较高而右侧较低的台阶状, 加之地基面向下游侧, 相对与下游侧水平面的倾角为 120°, 对溢洪道导墙的整体侧向稳定极为

收稿日期: 2016-01-08

修稿日期: 2016-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409207, 51309190); 中央财政支持地方高校发展专项(106-5X1205); 陕西省重点学科建设专项(106-00X903)

作者简介: 杜占科(1988—), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构应力分析及结构优化设计。E-mail: 645471248@qq.com.

通讯作者: 司政(1981—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水工结构应力及温度应力分析。E-mail: sz123hlz@163.com.

不利,是影响溢洪道导墙侧向抗滑稳定的关键性因素。因此必须对溢洪道导墙的整体侧向抗滑稳定性进行分析,评价其安全性。

随着现代科学技术的迅猛发展以及工程技术的不断创新,水资源得到了充分的开发利用,从而使得坝址及其他水利建筑物所处的地形地质条件变得越来越复杂^[3-5],近年来国内外学者对于水利建筑物在复杂地基上的抗滑稳定做了大量的研究^[6-10],但是关于溢洪道导墙的抗滑稳定性分析研究却相对较少^[11-13]。在实际工程中,分析导墙抗滑稳定性的方法主要借鉴了重力坝等经典水利建筑物的抗滑稳定性分析方法。对于简单平面上的建筑物的抗滑稳定分析,通常采用抗剪强度公式或者抗剪断强度公式进行分析,而对于较为复杂的建基面上的建筑物的抗滑稳定性分析,当前实际工程中通常采用刚体极限平衡法和有限元法,有时也会采用地质模型试验法加以验证^[14-15]。本文针对溢洪道导墙在复杂地基面上的侧向抗滑稳定性,利用目前通用的 ANSYS 有限元分析软件建立了复杂地基面上的溢洪道导墙三维有限元计算模型,采用抗滑稳定极限状态方程对导墙的各控制性断面进行了抗滑稳定性分析计算^[16-17],为该水电站工程溢洪道导墙的侧向抗滑稳定性分析评估提供了理论依据。

1 有限元模型建立

1.1 计算范围及约束条件

为了保证计算结果的可靠性和计算结果的精确性,同时又能避免计算过程中的一些不必要的繁琐工作,对结构的边界条件做如下的基本假定:

本次计算分析采用笛卡尔直角坐标系,水流方向取为 X 轴的正方向,向下游为正;铅直方向取为 Y 轴方向,向上为正;垂直于 XOY 面的方向为 Z 轴方向,向右岸为正。计算区域内的单元基本采用八节点六面体的实体单元,部分区域利用四面体实体单元进行过渡,导墙、K1 块和地基均采用单元 SOLID45 进行模拟,地基与导墙、K1 块相接部位设有 6 m 和 3 m 的过渡区域。导墙、K1 块和 6 m 过渡区域采用八节点六面体实体单元,3 m 过渡区域采用四面体实体单元进行过渡。导墙、K1 块和 6 m 过渡区域单元边长为 1 m,3 m 过渡区域以外地基单元边长为 10 m。计算模型的基础深度取 1 倍闸室高度,即 80.0 m;计算模型上游基础的长度取 50.0 m,计算模型下游基础的长度取 150 m,计算模型左右两侧基础长度按超出建筑物边界 50 m 建模,导墙有限元模型如图 1 所示。

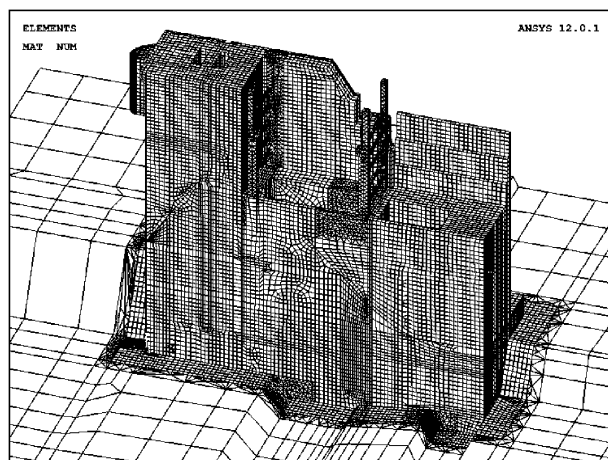


图 1 导墙有限元模型

1.2 计算基本假定

本次对于溢洪道导墙的有限元分析计算作如下基本假定:(1) 假设导墙材料为均质弹性、各向同性的连续实体材料;(2) 考虑溢洪道及导墙的各部分混凝土的应力重分布;(3) 不考虑布置在导墙顶部的启闭机室及各类启闭设备的荷载。

1.3 材料力学参数

钢筋混凝土重度 $\gamma = 24.0 \text{ kN/m}^3$;混凝土弹性模量、泊松比以及混凝土强度设计指标如表 1 所示,根据建筑物结构体型设计图所示的混凝土分区标号具体取值。

表 1 主要材料参数表

材料类型	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
C25 混凝土	2400	28.0	0.167
C30 混凝土	2400	30.0	0.167
C35 混凝土	2400	31.5	0.167
C40 混凝土	2400	32.5	0.167

1.4 工况组合与计算荷载

由于在整个工程的建设与运行期间,当下闸蓄水工况、检修门挡水时导墙上游水位最高,同时作用于导墙上的扬压力、侧向静水压力以及闸门推力等主要荷载对于导墙的稳定最为不利,因此本次溢洪道导墙有限元计算分析模型选取下闸蓄水土工、检修门挡水的工况(上游正常蓄水位为 1 818.00 m;下游水位为 1 779.43 m)。计算荷载主要包括以下几种情况:(1) 导墙混凝土的自重;(2) 导墙上游静水压力;(3) 导墙下游静水压力;(4) 导墙底部的扬压力;(5) 溢洪道纵向缝面侧向水压力;(6) 右导墙及 K1 块左侧面的侧向水压力;(7) 溢洪道内的水体自重;(8) 导墙右侧面的侧向水压力;(9) 泥沙压力;

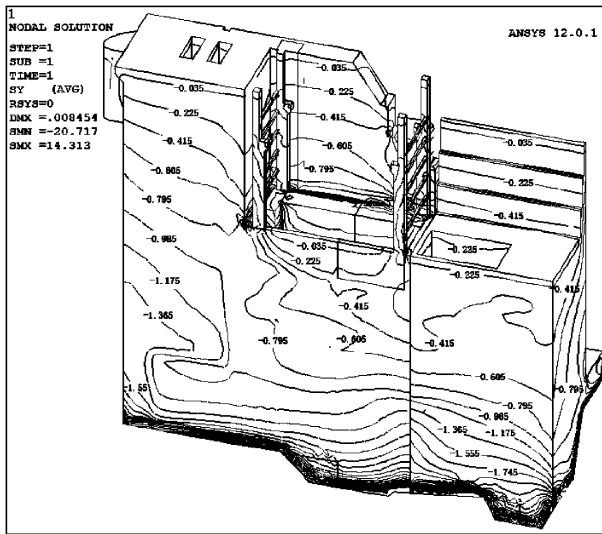


图 3 导墙 Y 向正应力等值线图

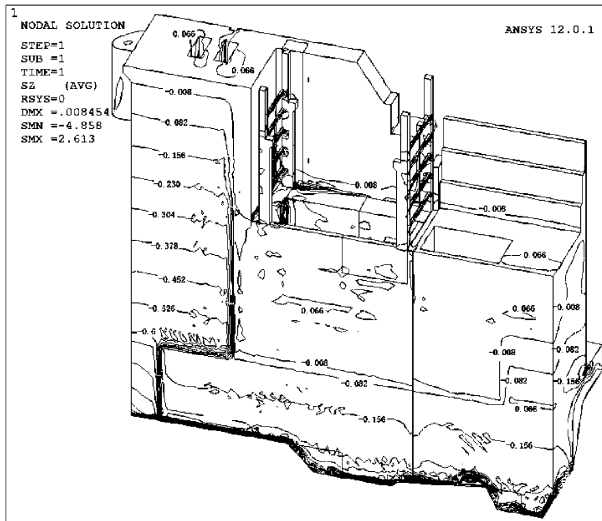


图 4 导墙 Z 向正应力等值线图

导墙 X 向最大拉应力为 1.2 MPa, 出现在基础边缘; 导墙最大压应力为 2.5 MPa, 出现在基础边缘; 导墙 Y 向最大拉应力为 0.8 MPa, 出现在悬臂、

牛腿部位; 最大压应力为 6.4 MPa, 出现在基础边缘; Z 向最大拉应力为 0.3 MPa, 出现在导墙顶部、悬臂和溢流面; 最大压应力为 2.0 MPa, 出现在基础边缘。检修门门库和拦污栅库最大拉应力小于 0.3 MPa, 最大压应力小于 0.6 MPa。导墙上游悬出结构最大拉应力小于 0.4 MPa, 最大压应力小于 15 MPa。可见, 导墙各部分的拉、压应力都在混凝土的允许应力范围之内, 导墙各部分的应力都满足要求。

2.3 导墙段、K1 块侧向抗滑稳定分析

在计算抗滑稳定时, 采用承载能力极限状态法, 即利用 ANSYS 建立导墙的三维有限元模型, 并施加对应的荷载及边界条件, 从而计算得到导墙地基面上的正应力和剪应力, 通过积分求出地基面上总抗滑力(抗力)与总滑动力(作用效应), 再考虑分项系数按照式(1)来判断导墙是否满足抗滑稳定要求。

根据平面有限元计算结果表明, 导墙坝下 0 + 020.00 和坝下 0 + 035.00 断面是控制性断面。因此, 对于三维有限元计算分析, 取这两个断面来进行侧向抗滑稳定分析, K1 块选取坝下 0 + 072.00 断面进行侧向抗滑稳定分析。导墙坝下 0 + 020.00 和坝下 0 + 035.00 断面侧向抗滑稳定计算结果见表 2 ~ 表 3, K1 块坝下 0 + 072.00 断面侧向抗滑稳定计算结果见表 4。

由表 2 ~ 表 4 中的计算结果可知, 溢洪道右导墙坝下 0 + 020.00 和坝下 0 + 035.00 断面、K1 块的坝下 0 + 072.00 断面等三个断面上的总作用效应 S_t 小于总抗力 R_t , 因此该溢洪道右导墙整体侧向抗滑稳定满足要求。另外, 将本次三维有限元分析计算的结果与二维有限元分析计算的结果进行对比, 结果表明三维有限元分析计算的导墙侧向抗滑稳定性比二维有限元计算结果安全储备更大, 这是由于在三维模型中各个断面在荷载组合总用下应力重分布导致, 具体对比如表 5 所示。

表 2 右导墙坝下 0 + 020.00 断面抗滑稳定计算结果

	f'	c' /kPa	A /m ²	法向力 /kN	切向力 /kN	抗力/kN		作用效应/kN	
						投影前	投影后	投影前	投影后
上部水平面	0.85/1.3	650/3	12.95	8048.00	-2220.17	8069.27	8069.27	0.00	0.00
中间倾斜面	0.85/1.3	—	—	4432.54	4063.79	4432.54	1296.47	4063.79	1817.45
下部水平面	0.85/1.3	650/3	4.55	4205.27	1304.57	3736.10	3736.10	1304.57	1304.57
整体(X向)	—	—	—	—	—	—	13101.84	—	3122.02

总作用效应: $S_t = \gamma_0 \psi S(\gamma_c G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k) = 1.0 \times 0.95 \times 3122.02 = 2965.92$ kN

总抗力: $R_t = \frac{1}{\gamma_{d1}} R(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k) = \frac{1}{1.2} \times 13101.84 = 10918.20$ kN

表 3 右导墙坝下 0+035.00 断面抗滑稳定计算结果

	f'	c' /kPa	A /m ²	法向力 /kN	切向力 /kN	抗力/kN		作用效应/kN	
						投影前	投影后	投影前	投影后
上部水平面	0.85/1.3	650/3	12.95	8798.24	-2027.13	8559.93	8559.93	0.00	0.00
中间倾斜面	0.85/1.3	—	—	4468.79	6630.06	4468.79	1307.07	6630.06	2965.16
下部水平面	0.85/1.3	650/3	2	2802.13	1014.07	2265.93	2265.93	1014.07	1014.07
整体(X向)	—	—	—	—	—	—	12132.93	—	3979.23

总作用效应: $S_t = \gamma_0 \psi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k) = 1.0 \times 0.95 \times 3979.23 = 3780.27$ kN

总抗力: $R_t = \frac{1}{\gamma_{d1}} R(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k) = \frac{1}{1.2} \times 12132.93 = 10110.78$ kN

表 4 K1 块坝下 0+072.00 断面抗滑稳定计算结果

	f'	c' /kPa	A /m ²	法向力 /kN	切向力 /kN	抗力/kN		作用效应/kN	
						投影前	投影后	投影前	投影后
上部水平面	0.85/1.3	650/3	10.71	2844.56	-704.05	4180.88	4180.88	0.00	0.00
中间倾斜面	0.85/1.3	—	—	2371.38	3678.95	2371.38	693.60	3678.95	1645.34
下部水平面	0.85/1.3	650/3	8.89	7709.14	1539.10	6967.97	6967.97	1539.10	1539.10
整体(X向)	—	—	—	—	—	—	11842.45	—	3184.44

总作用效应: $S_t = \gamma_0 \psi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k) = 1.0 \times 0.95 \times 3184.44 = 3025.21$ kN

总抗力: $R_t = \frac{1}{\gamma_{d1}} R(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k) = \frac{1}{1.2} \times 11842.45 = 9868.71$ kN

表 5 二维与三维有限元计算分析结果对比

断面位置	计算方法	总作用 效应/kN	总抗滑 力/kN	是否满足 要求
0+20.00	二维有限元	5368.14	8468.93	是
	三维有限元	2965.92	10918.20	是
0+35.00	二维有限元	4015.91	3805.10	否
	三维有限元	3780.27	10110.78	是
0+72.00	二维有限元	5140.17	6858.26	是
	三维有限元	3025.21	9868.71	是

3 结 语

本文根据概率极限状态设计原则以及分项系数极限状态表达式,提出了溢洪道导墙在复杂荷载组合作用下的侧向抗滑稳定性的分析方法,并用 ANSYS 有限元软件加以实现。根据三维有限元分析计算结果,计算分析导墙控制断面的侧向抗滑稳定,计算结果表明:溢洪道导墙侧向抗滑稳定满足规范要求,三维有限元计算结果比二维有限元计算结果安全储备更大,可将计算分析结果运用于工程实际中。此外,对于类似工程的侧向抗滑稳定性分析,本文所提出的分析计算方法合理有效,简单易行,可为其提供一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 水电水利规划设计标准化技术委员会. 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准: DL5180-2003[S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 中华人民共和国建设部. 防洪标准: GB50201-1994[S]. 北京: 建设部标准定额研究所, 1994.
- [3] 杨冬升, 张 晖. 基于 ANSYS 的碾压混凝土重力坝坝基面抗滑稳定安全性分析[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 80-82.
- [4] 周维禄, 丁恩俊. 复杂地基应力分析的有限元法[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(5): 702-705.
- [5] 聂鸿博, 张 林, 董建华, 等. 复杂地基上 Hardfill 坝与重力坝破坏模式及稳定性对比分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 76-80.
- [6] 马连军, 种秀灵, 梁慧兰. 复杂地基上砗拱坝三维非线性有限元稳定分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 75-77.
- [7] 徐林春, 赵明登, 黄 东, 等. 单一土层边坡抗滑稳定的影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(7): 142-145.
- [8] 黄灵芝, 司 政, 杜占科. 基于 JC 法的重力坝深层抗滑稳定研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 229-234.

(下转第 215 页)

(上接第 153 页)

- [9] 郭利娜,李同春,赵兰浩,等.重力坝深层抗滑稳定分析[J].人民黄河,2011,33(1):101-105.
- [10] 姜妮,王瑞骏.复杂坝基条件下混凝土面板堆石坝抗滑稳定分析方法[J].水资源与水工程学报,2012,23(3):138-143.
- [11] 李振龙,李守义,范瑞朋.里底水电站溢洪道竖井式预应力闸墩应力及应变分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(5):140-143.
- [12] 黄耀华,廖春武,陈兴周.某水电站溢洪道导墙坝段有限元应力分析[J].水利科技与经济,2010,16(6):684-693.
- [13] 高洪远,章荣发,李春光.白鹤梁水下保护工程导墙结构分析[J].人民长江,2014,45(11):9-11.
- [14] 朱伯芳.有限单元法原理及应用[M].北京:水利水电出版社,1998.
- [15] 商跃进,王红.有限元原理与 ANSYS 实践[M].北京:清华大学出版社,2012.
- [16] 中华人民共和国国家经济贸易委员会.混凝土重力坝设计规范:DL5108-1999[S].北京:中国电力出版社,1999.
- [17] 林继镛.水工建筑物[M].5版.北京:中国水利水电出版社,2009:33-52.