文章编号:1672-3031(2016)06-0460-03

软岩地基进水塔群的侧向抗滑稳定分析

李擎坤[1], 崔 炜[2], 王洪亮[1], 朱银邦[2]
(1. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 位于高地震烈度区的卡拉贝利水利枢纽工程, 其联合进水口的高大塔群坐落在软岩之上, 塔基形成有坡度的建基面, 侧向抗滑问题值得关注。塔基侧向抗滑稳定需考虑多个建筑物、构筑物之间的荷载传递, 给设计计算带来困难。本文借鉴重力坝深层抗滑稳定分析的"等安全系数法"原理, 编制程序, 计算得出抗滑稳定安全系数, 为解决塔群地基侧向抗滑的设计计算提供了一种途径, 对类似工程的设计有借鉴意义。对影响抗滑稳定安全系数的河床滑出块底面倾角、岩-砼摩擦系数进行了敏感性分析。

关键词: 进水塔; 侧向滑动; 安全系数; 软岩
中图分类号: X37 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2016.06.011

1 研究背景

新疆克孜河卡拉贝利水利枢纽是一座具有防洪、灌溉、发电等综合效益的水利工程, 工程规模为大(2)型、工程等别为Ⅱ等。联合进水口布置在水库左岸, 由河岸到山里分别为1#泄洪排沙放空洞、2#泄洪排沙洞、引水发电洞(见图1), 进口底板高程依次为1 696 m、1 715 m、1 725 m, 3个进水塔的主体高度依次为83.5 m、63.5 m、53.5 m。在1 745 m高程以下, 进水塔两侧、下游侧与正面边坡连接处、2#塔和引水发电塔基底, 回填了C15混凝土。联合进水口基岩主要岩性为N_2的砂岩、砂砾岩, 呈厚-巨厚层状构造, 层理不发育, 遇水易软化崩解, 饱和状态下的抗压强度值很低, 尚不足1.0 MPa。场地地震基本烈度为Ⅷ度(强), 进水口建筑物按地震动峰值加速度0.3 g进行抗震设计。

3个高大进水塔的排列基本沿横河向布置, 地基开挖后, 左侧形成了高度超过100 m的边坡, 右侧靠近河床侧的边坡岩体出露高程较低, 仅略高于河床, 因3个进水塔的基底高程不同, 形成有坡度的建基面, 对侧向抗滑不利。此外, 由于联合进水口地层的岩体强度低、抗滑和抗变形性能差, 进水塔高大、场地地震烈度高, 加剧了这种不利情况。塔群地基侧向抗滑问题, 在结构上涉及3个进水塔和4个区域回填混凝土的联合作用, 在结构构成和荷载传递上均较为复杂。无法直接引用现有规范[1-4]所规定的计算公式来完成设计计算, 需要专门的分析、研究。为此, 本文提出了一种新的解决途径, 即借鉴重力坝深层抗滑稳定分析的"等安全系数法"极限平衡法分析原理, 完成塔群地基侧向抗滑稳定分析, 以供类似问题的解决借鉴。

2 计算原理与模型

进水口设计规范[1]提出的进水塔基础抗滑稳定的抗剪断和抗剪安全系数K计算公式, 其力学原理与混凝土重力坝设计规范[5]关于坝基稳定抗滑稳定安全系数公式一致, 即由基础滑移面上的抗力与滑力之比得出抗滑稳定安全系数。参考规范[5]规定的深层抗滑稳定的公式"等安全系数法", 计算塔群基础侧向抗滑稳定。规范[5]附录E规定的滑移模式如图2所示, 图中显示的为坝基双滑动面模式,

收稿日期: 2016-04-11
作者简介: 李擎坤(1972-), 男, 山东人, 高级工程师, 主要从事水利水电勘测设计及科研研究。E-mail: lqkun181@sina.com
通讯作者: 崔炜(1979-), 男, 内蒙古敖汉旗人, 教授级高级工程师, 主要从事水工结构科研及咨询研究。E-mail: cuiwei@iwrh.com

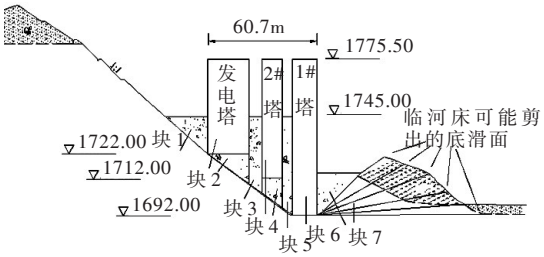

图1　联合进水口建筑物和侧向滑动的7个滑块示意

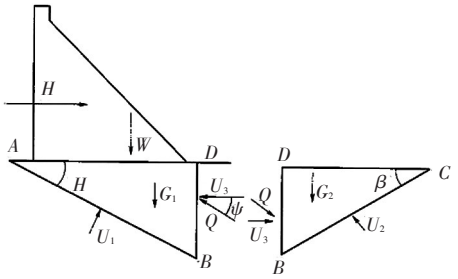

图2　重力坝设计规范所列的滑移模式

多滑面的情况比较复杂，可参照双滑面的计算式。

根据以上原理，建立联合进水口塔群地基侧向滑动7个连续滑块如图1所示，与规范[5]的方法相对应，则第1—6块为“上游”块，第7块为“下游”滑出块。

7个连续滑块的抗滑稳定安全系数计算方程如下：

$$\begin{cases}\left(a_1+b_1\times Q_1\right)\Big/\left(c_1+d_1\times Q_1\right)=K\\ \left(a_i+b_i\times\left(Q_i-Q_{i-1}\right)\right)\Big/\left(c_i+d_i\times\left(Q_i-Q_{i-1}\right)\right)=K\ (i=2,\ 3,\ \cdots 6)\\ \left(a_7+b_7\times\left(Q_6\right)\right)\Big/\left(c_7+d_7\times\left(Q_6\right)\right)=K\end{cases}\tag{1}$$

方程(1)中，系数a_i、b_i、c_i、d_i(i=1，2，…，7)根据各滑块已知的底面抗剪强度、几何参数和荷载，由规范[5]公式(E.0.2-1)和(E.0.2-2)求得。对于各滑块，抗剪强度指内聚力c'、摩擦系数f'、几何参数指滑块底面积A、底滑面倾角α、β(仅右侧滑出块)，荷载指滑块受到的荷载水平向合力H、竖向合力V、底面扬压力U等。

方程(1)中，未知量是块体间作用力Q_1~Q_6和抗滑稳定安全系数K，该方程为7元2次方程组。通过FORTRAN语言编制程序，求解各工况下的方程(1)，可求得塔群相应的侧向抗滑稳定安全系数K。依据进水口设计规范[1]的规定，验证K值是否满足要求。

3　计算成果及敏感性分析

3.1　基底抗滑稳定状态　通过式(1)计算联合进水口塔群建基面侧向抗滑稳定安全系数，工况设置见表1，水库正常蓄水位、校核洪水位的高程依次为1 770.0 m、1 773.34 m，地震工况考虑正常蓄水位遇地震的情况，垂直向地震力考虑向上和向下两种情况。饱和状态下，砼/岩体抗剪断强度值取c'=0.23MPa、f'=0.67，为了设计安全起见，完建工况计算亦取该强度值。计算得出的安全系数见表1，均满足规范要求。进水塔抗滑稳定安全系数的要求[1]：对于2级建筑物，采用抗剪断公式时，基本组合下的安全系数标准为3.0、特殊组合下的标准为2.5。

表1　联合进水口塔群地基侧向抗滑稳定安全系数K

工况	完建	正常蓄水位	校核洪水位	地震水平+向下	地震水平+向上
基底抗滑稳定K	3.80	4.22	4.39	2.91	3.02
深层抗滑稳定K	5.49	5.06	5.10	3.01	2.90

3.2　影响抗滑稳定的两个因素分析　滑动模型中的第7块为靠近河床的滑出块，存在沿岩体向河床剪出的可能，故研究其倾角对整体抗滑稳定影响的敏感性。计算工况为地震(水平+向下)工况，第7块倾角β取0°、4°、10°、20°、30°、39°时，整体抗滑稳定安全系数均大于2.8，见图3。通过该规律曲线可见，当第7块倾角为0°时，整体抗滑稳定安全系数最高，K达到3.20，此滑移模式的底滑面面积较大，抗滑作用强；当倾角增加至4°时，K值最小，其值为2.84；此后，随着倾角增加至30°，K值略有增加，当倾角超过30°以后，K值又降低。

勘查设计关注岩-砼摩擦系数f值对塔基抗滑的影响，故对此作了敏感性分析，所计算的工况为地震工况(水平+向下，河床临空剪出倾角为4°)，f值分别取0.4、0.45、0.5、0.55、0.6、0.67。计算

得出f与K的关系曲线见图4，二者呈正比例关系，当f值为0.45时，K=2.4574，不满足规范要求；由该曲线规律推断，当f值等于或大于0.47时，K值均满足规范要求。地质勘查得出的f值为0.67，此工况下得出K值约2.85，满足规范要求。

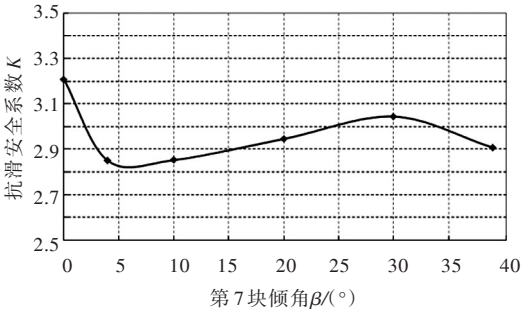

图3　抗滑稳定系数K与河床块的剪出角度关系

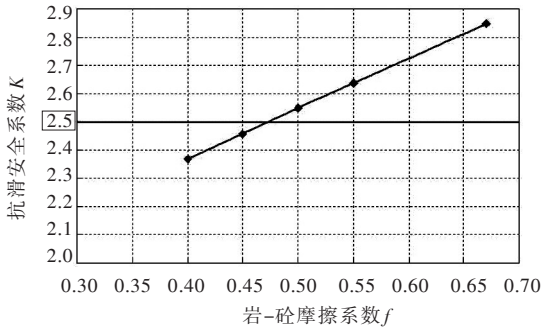

图4　岩-砼摩擦系数f与K的关系

3.3　深层抗滑稳定状态　设计计算过程中，还计算了塔基深层抗滑稳定状况。事先采用有限元强度折减法搜索出的深层滑动的滑面位置，岩体等效塑性应变情况见图5，随着岩体强度的降低，整个边坡有两处明显的塑性贯通性区，第一处为从坡顶至河床的深层滑动区，第二处为从坡顶至回填混凝土平台的小区域滑动区，第一处为塔基可能出现深层滑动的滑面。将此滑面依建筑物的部位不同进行分割，同样利用式(1)的原理，计算出塔基深层侧向抗滑稳定安全系数K，见表1，均满足规范要求。整体而言，塔基深层抗滑稳定安全系数大于沿建基面的。

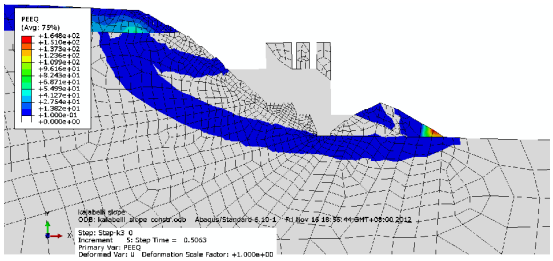

图5　有限元强度折减法搜索出的深层滑动模式(等效塑性应变区)

4　结语

在高地震烈度区、软岩地基上建造高大进水塔群，工程特点鲜明，塔群建基面坡度大，侧向抗滑稳定问题突出。塔基侧向抗滑稳定需考虑多个建筑物、构筑物之间的荷载传递，给结构设计计算带来困难。本文借鉴重力坝深层抗滑稳定分析的“等安全系数法”极限平衡法分析原理，通过编制程序，计算得出抗滑稳定安全系数，为解决进水塔地基侧向抗滑的设计计算问题提供了一种新途径。对影响塔基侧向抗滑稳定的河床滑出块底倾角和岩-砼摩擦系数进行了敏感性分析，对塔基表层和深层侧向抗滑稳定进行了多工况复核计算，实现了安全的结构抗滑设计。本文的成果对类似工程的设计计算分析有实用的借鉴意义。

参　考　文　献：

[1] 中华人民共和国水利部，水利水电工程进水口设计规范：SL285-2003[S]. 北京：中国水利水电出版社，2003.

[2] 中华人民共和国国家发展与改革委员会，水电站进水口设计规范：DL/T 5398-2007[S]. 北京：中国电力出版社，2008.

[3] 中华人民共和国水利部，水利水电工程边坡设计规范：SL386-2007[S]. 北京：中国水利水电出版社，2007.

[4] 中华人民共和国水利部，水工建筑物抗震设计规范：SL203-97[S]. 北京：中国水利水电出版社，1997.

[5] 中华人民共和国水利部，混凝土重力坝设计规范：SL319-2005[S]. 北京：中国水利水电出版社，2005.

（下转第477页）

[8] 亢景付，梁跃华，张沁成．环锚预应力混凝土衬砌三维有限元计算分析[J]．天津大学学报，2006，39(8)：968-972．
[9] 向艳．温度应力对深基坑支护结构内力与变形的影响研究[J]．岩土工程学报，2014，36(S2)：64-69．
[10] 郭巧杭，郑煌，李巍，等．基于初始应变变化的自组装螺旋变形有限元分析[J]．应用力学学报，2015，32(2)：192-197．
[11] Itasca Consulting Group，Inc．Fast Lanrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[R]．2011．
[12] 水工混凝土结构设计规范：SL191-2008[S]．北京：中国水利水电出版社，2008．
[13] 林秀山，沈凤生．小浪底工程后张法无黏结预应力隧洞衬砌技术研究与实践[M]．郑州：黄河水利出版社，1999．

Study on numerical modeling method of the prestressed tunnel lining with unbonded curve anchored tendons

CAO Ruilang[1]，WANG Yujie[1]，ZHAO Yufei[1]，PI Jin[1, 2]，YAO Wenbo[3]
(1. *China State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*，*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*，*Beijing*　100038，*China*；
2. *School of Transportation Science and Engineering*，*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*，*Beijing*　100091，*China*；
3. *School of Civil Engineering*，*Beijing Jiaotong University*，*Beijing*　100044，*China*)

Abstract: The prestressed lining structure with unbonded curved anchor is a new lining form used in building pressure hydraulic tunnel, and its complex stress mechanism may cause difficulty in design. This paper firstly analyzed the key points of numerical modeling according to mechanical behaviors of the structure, and then proposed the corresponding modeling method: setting the contact surfaces to simulate the different restraints of surrounding rock; using equivalent load and solid model to simulate the state variation of prestressed anchor cable; adopting piecewise gradient loading to simulate nonlinear distribution of the prestress loss. Based on the finite difference software FLAC3D, the Xiaolangdi desilting tunnel is analyzed. The modeling method was verified by comparing the numerical results and the monitoring data in four points that could reflect the mechanical properties of lining structure, the lining deformation, the partial and whole prestressing effect of concrete, the most unfavorable position of stress and the lining weaknesses characteristics. The research shows that the numerical model can correctly simulate the mechanical state of lining structure and could be a significant guide for engineering design.

Key words: hydraulic structure; prestressed tunnel lining; unbonded curve anchored tendons; numerical modeling method

(责任编辑：王冰伟)

(上接第470页)

Base lateral sliding stability analysis of intake towers built in soft rock

LI Qingkun[1]，CUI Wei[2]，WANG Hongliang[1]，ZHU Yinbang[2]
(1. *Xinjiang Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower*，*Urumqi*　830000，*China*；
2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*，*Beijing*　100038，*China*)

Abstract: The intake towers of Kalabeili Water Project is built on soft rock in high seismic intensity area, with a slope base. So, the base lateral sliding is concerned. It is difficult to calculate lateral sliding safety factor beacause the load transfer between 7 blocks is complicated. In this paper, a solution approach is proposed, referencing the equal safety factor method principle of gravity dam deep stability analysis, and lateral sliding safety factors of multi-load cases are calculated with computer program. This approach offers a valuable reference for similar project design. The base sliding stability sensitivities of riverbed block bottom surface inclination angle and rock-concrete friction coefficient are analysed.

Key words: intake tower; lateral sliding; safety factor; soft rock

(责任编辑：李　琳)