

文章编号: 1000-7598-(2008) 增-008-08

特高拱坝建基面浅层卸荷机制与稳定分析

林 鹏, 王仁坤, 周雅能, 周维垣

(1. 清华大学 水利水电工程系/水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 随着我国水电资源的大力开发, 高坝建设日益增多, 面对这些大规模的建设, 拱坝的稳定问题成为拱坝设计中的关键重大问题。对于处在高地应力河谷的拱坝建设, 由于开挖, 地应力释放引起基础岩体卸荷, 造成的浅层稳定问题, 对高坝设计来说是个少有成例的问题。对此问题, 如果采用概念不对, 误导了计算, 则将引入失误。对高拱坝建基面浅层卸荷特征、产生机制进行详细讨论, 结合小湾高拱坝遇到的浅层稳定问题, 提出了拱坝多余力, 及浅层建基面安全系数的求法, 利用最大最小原理对小湾拱坝建基面浅层稳定进行分析评价, 分析结果在小湾工程的设计中得到应用, 文中提出的分析方法可以指导同类工程的设计。

关 键 词: 特拱坝; 建基面; 浅层卸荷机制; 安全度

中图分类号: TV 642.4⁺⁵

文献标识码: A

Study of shallow unloading mechanism and stability of foundation interface of super high arch dam

LIN Peng, WANG Ren-kun, ZHOU Ya-neng, ZHOU Wei-yuan

(Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Along with the vigorous development of hydropower resources, many super high arch dams are constructing in Southwest region of China. The stability of these arch dams is a key and important problem in the process of design and construction. As for those arch dams constructed in high ground stress valley, foundation excavation may lead to geostress release and unloading of rock mass, and then causes shallow stability problem, which has few successful example for us to learn how to design and reinforce foundation for super high arch dam under these geo-condition. To this problem, unsuitable concept may bring about wrong calculation or numerical simulation, and then lead error to occur during design process. A detailed discussion is conducted focusing on the characters and mechanism of shallow unloading of excavated foundation surface of super high arch dam. Based on the Xiaowan Arch Dam, the calculation method of unbalance force of abutment and surface factor of safety of dam interface are proposed. By employing maximum-minimum principle, the stability of foundation interface of Xiaowan Arch Dam was analyzed and evaluated for supervising the design. The analysis results show that the proposed method is effective to supervise design for those super high arch dams similar to Xiaowan Arch Dam.

Key words: super high arch dam; foundation interface; shallow unloading mechanism; safety factor

1 引 言

出于安全和高坝建设技术与经验的考虑, 我国现行拱坝设计规范^[1-2]就 200 m 高度以内的高坝建基岩体明确以微新岩体为主, 坝高超过 200 m 的高拱坝的建基面选择需开展专门研究。对高拱坝建基面的稳定规范中只规定了两拱座的抗滑稳定安全度, 即剪摩安全系数 $K \geq 3.5$, 纯摩安全系数 $K \geq$

1.5^[1]。规范对拱坝的整体稳定做出的规定, 要求拱座稳定按基础岩体进行分析破坏取值, 但对浅层滑动, 如河床部位的卸荷岩体软弱结构面是否要校核他们的抗滑稳定尚缺乏明确的规定。

目前有学者按重力坝抗滑稳定的办法, 采用类似拱冠梁重力坝断面的模型进行校核, 这种计算浅层建基面的稳定问题及这些处理方法都缺乏理论与实践的证明。当采用梁构件校核断面稳定时, 他们

收稿日期: 2008-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.10772095)。

作者简介: 林鹏, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学、水工结构、地下工程方面的教学和研究工作。E-mail: celinpe@tsinghua.edu.cn

的安全度一般 $K < 1.5 \sim 2.0$ ，距离 3.5 尚有很大差距，校核拱冠梁的断面的稳定是不能反映实际问题的，由已建的大坝如二滩、李家峡、紧水滩，东风、英古里大坝等都不宜按梁的断面校核它们的稳定^[3-5]，又如欧洲的拓拉拱坝，中国的泉水拱坝，坝高在 80~100 m，而坝面最厚只有 2~3 m，如果按拱冠梁的断面来校核大坝的抗滑稳定，在剪摩条件下肯定达不到 3.5，满足不了大坝稳定的要求，但这些坝已建成多年，并没有出现失稳问题。

对于 300 m 级高拱坝，河谷一般具有高地应力，尤其是在河谷下部高程一般存在明显的地应力集中现象。由于开挖，地应力释放引起岩体卸荷松弛现象，造成的浅层稳定问题，对高坝设计来说是个少有成例的问题，是目前高坝建基面处理的难点问题。

本文首先从分析高拱坝建基面浅层岩体卸荷松弛特征入手，对高坝建基面浅层破坏机制进行详细讨论。在此基础上提出 300 m 级高拱坝建基面建基面浅层稳定的分析评价方法，即提出了拱坝多余力及浅层建基面安全系数的求法，利用潘家铮最大最小原理对小湾拱坝建基面浅层稳定进行分析评价，最后结合具体小湾工程进行分析评价，验证分析方法的有效性。

2 建基面浅层岩体卸荷松弛特征

从目前我国在建高拱坝建基面基础岩体开挖卸荷松弛特征，可以总结建基面开挖卸荷松弛岩体主要有以下 4 种表现形式。

2.1 沿已有裂隙张开的现象

高拱坝坝区，在未开挖之前节理裂隙在微风化未卸荷岩体中一般呈闭合、隐形特征，如小湾中缓倾角节理在微风化~新鲜岩体中多表现为裂纹状，即坝基建基面附近岩体中的节理裂隙在未开挖的天然状态下大多是闭合的^[6]；溪洛渡拱坝的含斑玄武岩在未开挖之前一般是隐性裂纹^[7]。随坝基开挖岩体卸荷回弹，一般可观察到沿已有节理裂隙张开（排除爆破震裂原因）的现象。主要有以下两种情况：①开挖后卸荷回弹沿单一倾角节理张开，见图 1；②局部沿组合节理形成的分离块体开挖后产生蠕滑变形，陡节理拉张现象，见图 2。

2.2 “葱皮”现象

在高地应河谷，一般在两岸坝基较完整的块状岩体表层容易观察到“葱皮”松弛现象或是开挖卸荷裂隙，薄片厚度一般为 0.5~5 cm，“葱皮”现象一般在开挖较深的上游侧坝基较明显，低高程地段

坝基较高高程明显。图 3 为小湾拱坝右岸坝基高程 1 150 m 灌浆洞口附近块状岩体表层松弛现象。



图 1 单一倾角节理张开
Fig.1 Single joint opening



图 2 组合块体松弛变形
Fig.2 Unloading deformation of rock blocks



图 3 小湾拱坝右岸建基面岩体表层“葱皮”松弛现象
Fig.3 Looseness phenomenon in shallow rock mass of right abutment of Xiaowan arch dam

2.3 卸荷松弛“回弹”现象

在高地应河谷，此现象在河床部位坝基表现最为明显，开挖后如建基面浅部岩体中存在缓倾角~水平裂隙，则容易出现卸荷松弛“回弹”张开，在坝基岩体声波检测孔测试过程中孔口段普遍有漏水现象，这些裂隙在开挖前应为闭合~微张状态。

一般根据全孔壁数字成像成果分析，基坑部位坝基岩体中发育的缓倾角~近水平节理裂隙按发育的程度、形态等划分主要有以下几种类型：①缓倾裂隙带状集中发育，呈片状、薄片状，薄片厚度一般 1~5 cm，孔壁局部有掉块现象，发育深度一般较浅，见图 4(a)。②缓倾裂隙带状发育，但岩体受挤压破碎，多呈碎块状，孔壁有明显的掉块现象，发育深度一般较浅，见图 4(b)。③在一定孔段范围内仅发育一条缓倾裂隙，孔壁一般较完整，较深的

孔段也有发育（多闭合），见图4（c）。

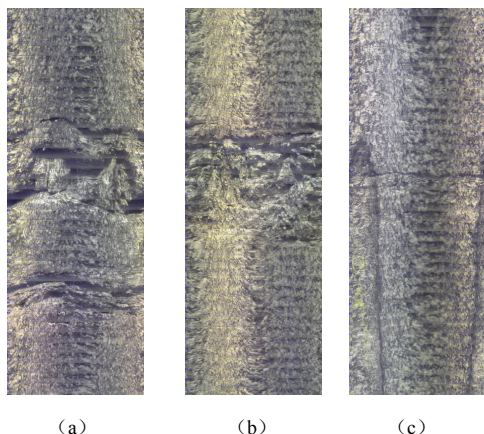


图4 全孔壁数字成像典型孔段照片
Fig.4 Full photos of internal borehole

2.4 岩爆现象

如果枢纽区属中高地应力区，在河谷底部常有高应力集中区，河床部位坝基岩体开挖卸荷后局部可见岩爆现象，如图5为小湾拱坝右岸坝基962 m高程中心线上游侧发生的岩爆，岩爆过程中可听见“叭”的声响，面积约为 $2\sim 3\text{ m}^2$ ，有部分岩块弹出。



图5 岩爆现象
Fig.5 Image of rockbursting

综上，建基面上开挖卸荷松弛岩体的表现现象分布的一般特征：

（1）两岸坝基开挖后存在的卸荷松弛现象，以及卸荷松弛明显程度同构造应力分布方向，岩体构造等有关。

（2）同一岸不同高程的开挖卸荷松弛现象亦有差别，总体上是低高程部位较高高程明显，尤其是河谷底部更为显著。

（3）同一高程不同部位的开挖卸荷松弛现象也有所不同，一般坝踵部位（上游段）较坝趾部位（下游段）明显，

（4）坝基开挖卸荷松弛现象与岩体的完整性有

明显的关系，在天然状态下较完整的坝基岩体往往集蓄了较高的应力，开挖后卸荷松弛现象主要位于较完整的岩体中，而在结构面发育、岩体较破碎的岩体中卸荷松弛现象不明显；

（5）开挖体型较复杂的部位常有明显的松弛现象，主要表现在灌浆洞、排水洞、置换洞等洞口附近、地质缺陷槽挖凸出的转角部位和陡壁附近。

3 高拱坝建基面浅层的破坏机制

国内外一些拱坝的工程实践表明，大坝的失稳或破坏大多是由于坝的基岩或坝体建基面附近存在缺陷，从而引起坝上的一定部位，尤其是上游坝踵和基岩的弱化结构，产生拉压应力的集中，导致拱坝局部开裂，进而引起大坝开裂破坏。拱坝建基面的开裂一般认为是由于剪切强度破坏，同时在坝体内有开裂与裂缝发展破坏。下面列出二滩拱坝建基面稳定研究的成果^[9]，图6大坝在正常荷载下三维有限元分析建基面上剪应力和点安全度分布结果，图7为二滩拱坝地质力学模型试验破坏图^[10]。

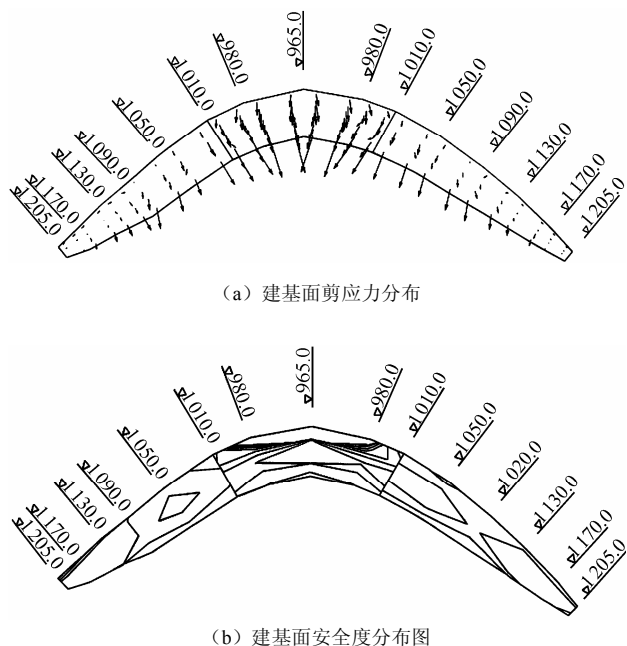


图6 正常荷载下建基面应力和安全度分布图
（高程单位：m）

Fig.6 Stress and safety factor distribution of foundation surface under normal loading (unit: m)

由图6可知，坝体开裂及基岩开裂成为三维主体，并没有形成滑移体，建基面上的作用力的矢量在空间有随机性，它们构不成滑体。从试验破坏图7可知，大坝开裂的裂缝扩展组合，也说明大坝

行。类似地也可按高程段对建基面不平衡力进行分段求和。

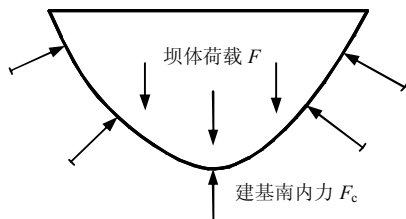


图9 拱坝坝体受力简图
Fig.9 Dam loading distribution

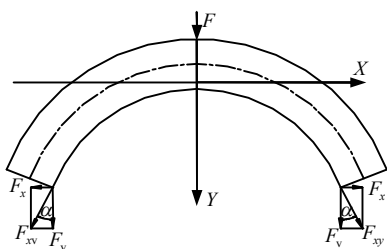


图10 拱端水平推力及推力角示意图
Fig.10 The relationship between thrust angle and horizontal thrust of abutment

4.2 面安全系数计算

面安全系数验算河床坝段沿坝基浅表部位的摩尔-库仑弹性屈服准则,亦即整体抗滑稳定安全系数。

计算时将反压砦按照其重量考虑,下游水垫塘岩体作为抗力体考虑,反压混凝土重量在坝体和抗力体之间分配,按照抗力体极限平衡计算其抗力,然后计算坝段的抗滑安全系数。抗滑稳定安全系数的计算参见图 11。

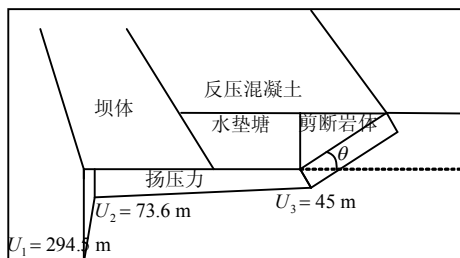


图11 抗滑稳定安全系数计算示意图
Fig.11 Schematic geometry of safety factor against sliding

按照抗剪断公式,根据剪断岩体的极限平衡状态可以得到剪断岩体的抗力:

$$R = (W' + W'_f) \tan(\theta + \varphi') - U' [\cos \theta \tan(\theta + \varphi') - \sin \theta] + c'A [\cos \theta + \sin \theta \tan(\theta + \varphi')] \quad (5)$$

式中: W' 剪断岩体的重量; W'_f 为剪断岩体上部反压混凝土的重量; U' 作用于剪断岩体的扬压力; θ 为岩体剪断角; A' 为剪断面积; c' 为剪断岩体的黏滞力; φ' 为剪断岩体的抗剪断内摩擦角。对于抗剪公式,式(5)中用抗剪内摩擦角代替抗剪断内摩擦角,黏滞力等于 0 即可。

有了抗力 R , 则可以得到抗剪断公式坝基抗滑稳定安全系数为

$$K_s = \frac{f'(F_n + W_f - U) + R + c'A}{F_s} \quad (6)$$

式中: F_n 为坝基底部总压力; f_s 为坝基底部总剪切力; 其他符号意义同式(5)。 f' 为剪切面的抗剪断摩擦系数,对于抗剪公式,式(6)中用抗剪摩擦系数代替抗剪断内摩擦角,黏滞力等于 0 即可。

4.3 建基面稳定分析的最大最小原理

潘家铮分析了建筑物和地基抗滑稳定的各种方法后,提出了以下两条原理,来补充结构抗滑稳定的理论分析:(1) 滑块如能沿许多滑面滑动,则失稳时,它将沿抵抗力最小的一个滑面破坏(最小值原理);(2) 滑坡体的滑面确定时,则滑面上的反力(以及滑坡体内的内力)能自行调整,以发挥最大的抗滑能力(最大值原理)。

依据建筑物和地基抗滑稳定的两条原理,本文初步提出拱坝建基面浅层稳定的最大最小原理,并结合后面的实例进行分析论证。

本文理论假设:(1) 拱坝沿三维建基面开裂,当失稳时,它将沿抵抗力最小的三维拱型开裂体破坏模式破坏(最小值原理);(2) 拱坝建基面三维失稳时,则建基面上的拱推力(以及多余不平衡力)能自行调整转移到两岸,以发挥两岸基础的抵抗三维失稳能力(最大值原理)。

运用以上方法,求出建基面在允许应力下,受力超载 K_p , 降强余幅 K_f 的总体安全度 K , $K = K_p K_f$, 当 $K \geq 3.5$ 即可满足稳定要求。

5 建基面浅层稳定分析实例

5.1 小湾工程概述^[14, 17]

小湾水电站位于云南西部大理凤庆县及南涧县境内的澜沧江中游河段上,是以发电为主兼有其它综合利用效益的水力枢纽。是正在中国建造的世界上的最高的小湾拱坝,坝顶高程 $\nabla 1245$ m, 坝基面最低点高程 $\nabla 953$ m, 坝高 294.5 m, 坝前水头高达 287 m, 总水推力约为 1660×10^4 t, 是澜沧江梯级开发的龙头电站。小湾水电站总装机容量为 4200 MW, 正常蓄水位高程为 $\nabla 1240$ m。河谷呈 V 型,

两岸岸坡陡峻。小湾拱坝在建设过程中遇到复杂构造的岩基。在坝肩抗力岩体范围内及沿建基面分布有以Ⅲ级断层 F11、F10 和蚀变带 E1、E4、E5、E8、E9 为主的地质缺陷，其力学指标低、水理性质差。此外，在坝趾局部区域存在Ⅲ类岩体和随断层分布的Ⅳb+Ⅳc 类岩体。在开挖中下部高程建基面的过程中出现由于高地应力硬气的岩石崩裂现象，此外在上游坝踵出现了较大拉应力导致坝踵开裂，以上这些问题会导致大坝的失稳问题。

文献[16, 19]中对小湾拱坝进行了详细的三维

建模、计算和分析，详细考虑了模型中考虑岩层分界、开挖卸荷松动影响区、主要断层以及蚀变带，对拱坝及岩体进行了详细建模，并考虑岩体自重场、上下游水载、泥沙压力、温降载荷。限于篇幅，本文仅就在基本载荷工况，材料参数取值为中值情况下分别按重力法和三维非线性有限元对小湾拱坝建基面的稳定进行校核计算。

5.2 重力法校核建基面的安全度

按重力法^[1]计算沿坝基浅表部位的抗剪点安全度以及抗滑安全系数，见表 1。

表 1 小湾抗剪安全系数（计入扬压力）

Table 1 Shear friction factors of Xiaowan arch dam (Consideration uplift pressure)

两岸至河床水平坝段 建基面以下				两岸包络至建基面 975 m 高程 建基面以下				两岸包络至建基面 1 050 m 高程			
2 m		4 m		2 m		4 m		975 m 间建基面以下 2 m 处, 975~ 1 050 m 间建基面以下 5 m 处		975 m 间建基面以下 4 m 处, 975~ 1 050 m 间建基面以下 5 m 处	
抗剪	抗剪断	抗剪	抗剪断	抗剪	抗剪断	抗剪	抗剪断	抗剪	抗剪断	抗剪	抗剪断
0.91	1.28	1.14	1.88	1.05	1.48	1.32	2.16	1.49	2.22	1.64	2.58

从以上计算结果可以看出：

点屈服安全度较小的区域主要集中在 1 050 m 高程以下拱端上游坝踵部位，该部位属于应力集中部位，且有拉应力产生，导致安全度较低。按平面计算，稳定安全系数最多为 2.5，远小于 3.5。

5.3 非线性校核建基面的安全度

按照三维非线性有限元计算及本文 4.1 节拱坝多余力求法可得小湾在超载过程中建基面上的不平衡力，见表 2。表 3 为超载作用下建基面安全度分布情况。图 12 为超载作用下建基面剪应力分布图。

表 2 每 1 倍水荷载增量所引起的不平衡力

Table 2 Unbalance force caused by increasing $1P_0$ water loading

(单位: t)

工况	1 倍水载	2 倍水载	3 倍水载	4 倍水载
左岸	97.44	19 610	50 974	95 462
右岸	529.1	26153	66 892	134 876.3

表 3 小湾超载作用下建基面面安全度分布

Table 3 Shear friction factors of Xiaowan arch dam

高程段	1 倍水载 (不考虑渗流)	2 倍水载 (考虑水载)	3 倍水载 (考虑水载)	4 倍水载 (考虑水载)
950	2.1	1.2	1.0	0.8
左 950~975	2.17	1.6	1.3	1.2
岸 975~1 050	4.5	3.1	1.58	1.5
1 050~1 210	5.3	3	2.8	0.8
右 950~975	1.53	1.5	1.26	1
岸 975~1 050	4	3.4	1.4	1.3
1 050~1 210	4.5	2.6	2.2	1.5

拱端安全度逐渐变大,符合最大值原理。

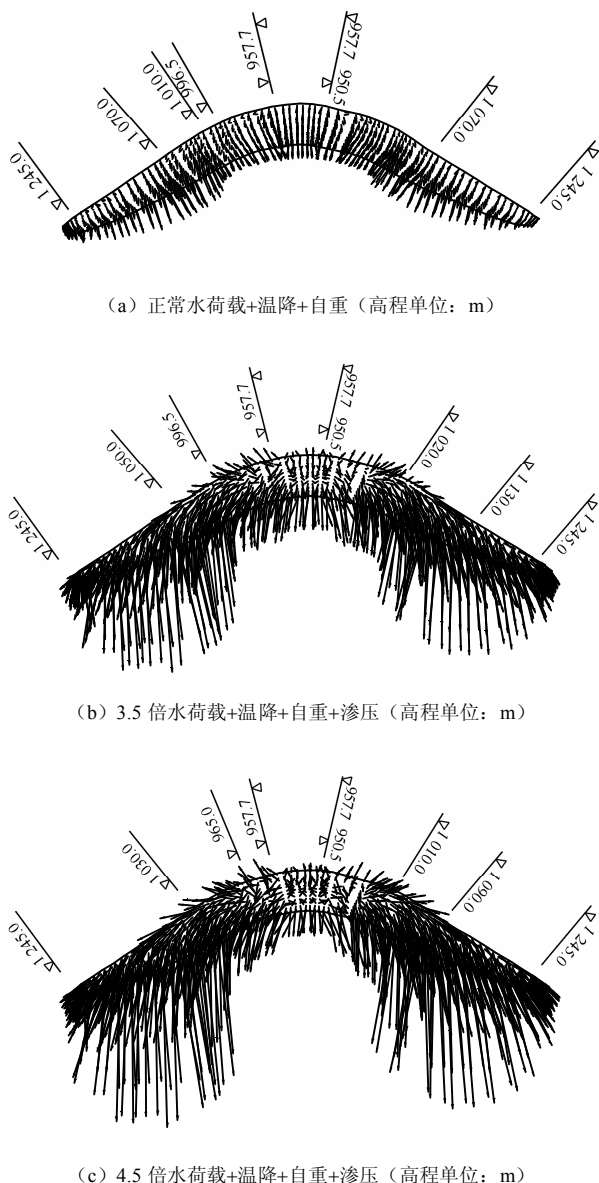


图 12 小湾拱坝建基面剪应力分布图

Fig.12 Shear stress distribution of foundation interface of Xiaowan arch dam

6 结 论

对于处在高地应力河谷的拱坝建设,由于开挖,地应力释放引起基础岩体卸荷,造成的浅层稳定问题,对高坝设计来说是个少有成例的问题,对其开展研究具有重要的学术和工程意义。

对于浅层卸荷建基面,其安全度具有非线性的特点,局部化的特点,故在求解的过程中,不能按重力坝的孤立断面或取一点某一加载步的安全求解,而应采用三维模式进行全过程破坏计算,分析整体安全度。

按摩尔-库仑抗剪断方法对浅层卸荷建基面做计算可以得到 K_p (点安全系数) 和 K_f (面安全系数),其判据为: $K_p \geq 1.5 \sim 2.0$, $K_f \geq 2.5$ 。

建基面浅表部位岩体开挖卸荷松弛后,在一定范围内降低了基岩变形模量,影响其完整性和均质性,从而会改变拱坝的应力、变形分布,带来不利后果。因此,必须进行处理。处理原则:尽量清除表层已松动的岩体,随后分别针对各坝段情况进行必要的清挖,并尽快浇筑混凝土,然后进行高质量的固结灌浆”

对于类似小湾高拱坝遇到的浅层稳定问题,本文建议的拱坝多余力,及浅层建基面面安全系数的求法,和利用最大最小原理对建基面浅层稳定进行分析评价是可行的。

致谢:参加本课题研究的还有清华大学水利水电工程系其他老师以及中国水电工程顾问集团公司昆明勘测设计院相关设计人员,在此一并表示致谢!

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5436—2006 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [2] 中华人民共和国水利部. SL282—2003 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 白俊光,林鹏,李蒲建,等. 李家峡拱坝复杂地基处理效果和反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 902—912.
- [4] 李瓚,陈飞,郑建波,等. 特高拱坝枢纽分析与重点问题研究[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [5] 王仁坤,林鹏,周维垣. 复杂地基上高拱坝开裂与稳定研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1 951—1 958.
- [6] 邹丽春,王国进,汤险良. 复杂高边坡整治理论与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [7] 王仁坤. 溪洛渡拱坝设计综述[J]. 水力发电, 2003, (11): 17—19.
- [8] 周维垣,杨若琼,杨强,等. 二滩水电站拱坝整体稳定仿真破坏分析[R]. 北京:清华大学, 1992.
- [9] 周维垣,林鹏,杨若琼,等. 高拱坝地质力学模型试验方法与应用[J]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- [10] BAUSTADTER K, WIDMANN R. The behavior of the Kolnrein arch dam[R]. I-COLD, Lausanne: [s.n], 1985.