

基于 ANSYS 有限元法的鲜店拱坝 坝肩裂隙处理方案研究

梁艺¹, 舒仲英²

(1. 四川水利职业技术学院 水利工程系, 四川 成都 611231; 2. 四川大学 水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 选取四川省蓬安县鲜店拱坝作为分析研究的实例基础,应用有限单元法的基本理论,采用 ANSYS 分析软件,创建了鲜店拱坝及其地基的初始三维有限元模型,将坝体与基岩视为理想弹塑性材料,以 Drucker - Prager 准则为屈服准则,以位移突变法作为判断坝体是否失稳的依据,采用夹层式裂隙模型,模拟坝肩裂隙和裂隙的处理措施,以静水荷载作为主要的荷载对拱坝进行稳定及应力分析。结果证明:将垮塌的滑坡体彻底清除干净,再用 C15 细石混凝土埋块石回填,对裂隙用低压浓浆进行固结灌浆处理,这种处理方式是合理可行的。该方式不仅可为其他类似病害工程提供经验和参考,还可将之推广到以后的水利工程建设中。

关键词: ANSYS; 有限元法; 稳定; 裂隙处理

中图分类号: TV314; TV698

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0141-05

Research on the treatment of Xiandian arch dam shoulder crack based on the ANSYS finite element method

LIANG Yi¹, SHU Zhongying²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, China;

2. College of Hydraulic and Hydro - electric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Taking Xiandian arch dam in Peng'an County of Sichuan Province as an example, the initial 3D finite element model based on the finite element method was established to be applied in Xian Dian arch dam and its foundation. Taking the dam and its bedrock as ideal elastic plastic materials, the sandwich type crack model based on the Drucker - Prager yield criterion and the method of displacement mutation was used to simulate crack of dam shoulder and analyze the stress stability of the dam. The results showed that it was reasonable and feasible to consolidate grouting with low pressure thick paste and back-fill with C15 fine stone concrete buried stone on the basis of completely removing the landslide collapse. This method can not only provide experiences and references for other similar engineering projects, but also can be widely applied to the construction of water conservancy projects in the future.

Key words: ANSYS; finite element method; stability; fracture treatment

1 研究背景

我国 20 世纪 60 - 80 年代间修建了许多浆砌石拱坝,由于当时科技水平的限制,很多浆砌石拱坝在设计、施工以及地质勘测上都存在缺陷,导致了一系列病害问题,特别是坝体稳定问题。拱坝的稳定性主要是依靠坝肩两岸岩体来维持,坝肩稳定问题显得尤为突出和重要。坝肩岩体失稳的最常见形式是坝肩

岩体受荷载后发生的滑动破坏。这种情况一般发生在岩体中存在着明显的滑裂面,如断层、节理、裂隙和软弱层、裂隙等滑裂面会给工程带来危害,应当尽量避免,必要时需采取适当的加固措施。加固后,坝肩岩体的刚度会发生变化,坝肩岩体刚度变化对坝体应力重分配的影响,前人研究的较少。本文以四川省蓬安县鲜店拱坝为例,通过计算坝肩裂隙处理前后的稳定及应力,研究裂隙处理措施的可行性以及坝肩岩体

收稿日期:2016-06-20; 修回日期:2016-08-22

基金项目:四川水利职业技术学院资助项目(KY2016-29)

作者简介:梁艺(1979-),女,广西玉林人,硕士,讲师,主要研究方向:农业水利工程、水工建筑物病害整治。

刚度变化和坝体应力重分配之间的关系。

2 工程概况

鲜店水库是一座以防洪除涝和农业灌溉为主,兼顾养鱼等综合利用的小(1)型水库,位于四川省蓬安县鲜店乡境内,嘉陵江水系龙滩子河上游。

坝型为浆砌石定圆心定半径拱坝,最大坝高 28.8 m,坝顶宽 3 m,最大坝底宽 10 m,坝顶长 106 m,外半径 50.65 m,半中心角 62° ,横断面如图 1 所示。拱坝右端直接与山岩连接,左边由宽 4.25 m,长 5.9 m,高度 13 m 的梯级重力墩支撑。右岸坝端下游 20 m 处在渠道内侧陡坡处,沿卸荷裂隙发生切层岩质滑坡。滑面由卸荷裂隙组成,卸荷裂隙产状为 $N39^\circ \sim 42^\circ E/SE \angle 80^\circ \sim 81^\circ$,裂隙上大下小,缝宽 8 ~ 20 cm,裂隙间充填物为碎石和泥质物。滑坡体宽 71 m,厚 4.5 ~ 5.5 m,近坝端 20 m 段高 8 ~ 10 m,远坝端 51 m 段高 6 ~ 7 m。滑体已将渠道内侧边墙推倒塌,渠堤内侧边坡岩体已经变形破坏,应清除此滑坡体,修复渠道,加固边墙。

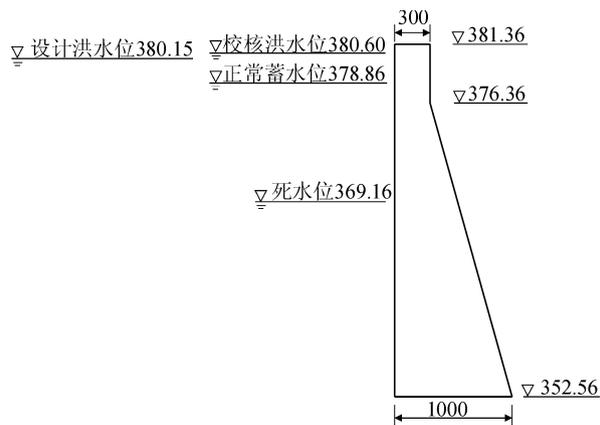


图 1 拱坝横断面图(高程以 m 为单位,标注以 cm 为单位)

3 有限元计算模型及基本资料

3.1 有限元建模

3.1.1 整体建模范围 借鉴以往大量拱坝有限元分析建模经验,结合鲜店拱坝的实际情况,模型主要模拟大坝主体、基础岩层、滑坡体、裂隙。建模范围如下:上游 45 m,下游 110 m,左右坝肩各 65 m,基础以下 30 m,模型见图 2。

3.1.2 滑坡体及裂隙建模 拱坝的右岸裂隙有一定厚度,因此,采用夹层式裂隙模型原理。在建模时,先将不同时存在的裂隙和处理措施(回填体和固结灌浆)建立在同一模型,然后通过改变材料参数,实现模型在裂隙处理前后的转换。假定滑坡体为已经滑走。

裂隙的产状为 $N39^\circ \sim 42^\circ E/SE \angle 80^\circ \sim 81^\circ$;顺河向长度为 20 m,上游端的笛卡尔坐标为 $y = -40$ m,下游端为 $y = -20$ m,宽 0.1 m;底部位于 $2/3$ 坝高处,高程 372 m,以下为砂质泥岩面。

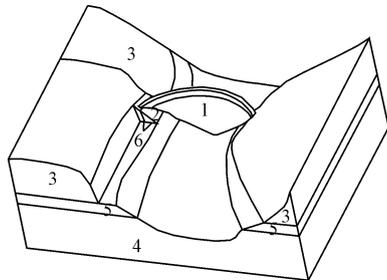


图 2 模型三维立体及岩层分布图

三维有限元模型采用 SOLID45 作为结构计算单元,采用四面体自由网格划分,用 ANSYS 直接求解法进行计算。采用笛卡尔坐标系建模,模型中坐标原点为拱坝圆心处,X 轴正向为从右岸指向左岸,Y 轴正向为从下游指向上游,Z 轴正向为铅直向上。鉴于本文只是研究右坝肩裂隙及滑坡体对拱坝安全的影响,对地形、岩层等进行了简化。

3.2 岩层分布及其基本参数

参考鲜店水库地勘报告,将浆砌石坝体视为各项同性的材料。模型各岩层分布见图 2,其物理参数见表 1。

3.3 计算工况

由于本文研究内容的侧重点在于研究坝肩岩体裂隙如何影响拱坝的安全,为简化计算,只考虑了自重荷载和校核洪水水位下的静水压力。

3.4 超载系数和应力的计算

3.4.1 超载系数计算 本文研究的是裂隙如何影响拱坝的稳定,没有考虑拱坝由于长期运行过程后可能存在材料强度的降低情况,超载法在这里更为合理,所以本文的分析计算采用超载法,具体是增大水容重 γ_n 法。

用位移突变法计算超载系数,位移突变法是根据拱坝的位移变化情况来判断拱坝是否正常工作。这种方法认为:最大位移和超载系数关系曲线上的突变点为拱坝的极限状态,该点的超载系数即为最大值。

3.4.2 应力的计算 本文采用 ANSYS 有限元法,研究裂隙处理前后,坝体应力自动调整的情况。

4 整治前后稳定及应力对比分析

由于右拱端下游的较长的卸荷裂隙后部已发育

成滑坡体,右坝肩的卸荷裂隙较发育,在 5·12 地震后,裂隙发育成数层滑坡向拱座方向发展,若不及时

处理,裂隙会继续向上游发育,直至连通水库,将危及拱坝安全,需进行评价和处理。

表 1 模型物理性质参数表

| 岩层 | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量 E/ Pa | 泊松比 μ | 粘聚力/ Pa | 内摩擦角/ ($^{\circ}$) | 膨胀角/ ($^{\circ}$) |
|-----------|--|--------------------|-----------|--------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 坝体浆砌条石 | 2.35×10^3 | 6.00×10^9 | 0.2 | 4.00×10^5 | 26 | 0 |
| 2 强风化砂岩 | 2.25×10^3 | 1.20×10^9 | 0.33 | 1.80×10^5 | 30 | 0 |
| 3 弱风化砂岩 | 2.30×10^3 | 2.50×10^9 | 0.3 | 4.50×10^5 | 32 | 0 |
| 4 新鲜砂岩 | 2.35×10^3 | 4.00×10^9 | 0.25 | 7.00×10^5 | 33 | 0 |
| 5 砂质泥岩弱风化 | 2.40×10^3 | 8.00×10^9 | 0.32 | 2.00×10^5 | 28 | 0 |
| 6 裂隙夹层 | 2.00×10^3 | 1.00×10^9 | 0.45 | 5.00×10^5 | 16 | 0 |
| 7 固结灌浆 | 2.35×10^3 | 6.00×10^9 | 0.2 | 4.00×10^5 | 26 | 0 |
| 8 浆砌石回填 | 2.35×10^3 | 6.00×10^9 | 0.2 | 4.00×10^5 | 26 | 0 |

采取的处理措施为:将垮塌的滑坡体彻底清除干净,再用 C15 细石混凝土埋块石回填;对裂隙,长宽高的处理范围为:笛卡尔坐标 $Y = -41 \sim -19\text{m}$, $X = -20 \sim -50\text{m}$, $Z = 381.36 \sim 371\text{m}$;处理措施为固结灌浆处理,注意采用低压浓浆。物理参数见表 2。

4.1 整治前后稳定对比分析

4.1.1 超载系数对比 整治前后的超载系数见表 2 及图 3~6,由此可看出,整治后位移与超载系数曲

线在 2.54 处发生突变,即超载系数为 2.54,比整治前(工况 I)的 2.45 增大了,大于规范要求的 2.5,说明整治后满足稳定要求,整治是有效的。

4.1.2 位移变化对比 整治前后的位移结果见表 2 及图 3~6。为了检验整治的效果,把整治前后超载系数 $K = 1$ 和 $K = 2$ 的位移值进行对比,可得出整治后位移比整治前减少的百分比(表 2 中数值(整治后 - 整治前)/整治前 $\times 100$),见表 3。

表 2 整治前后位移和超载系数关系成果对比表

| K | X | | $Y_{左}$ | | $Y_{右}$ | | Z | |
|------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|--------|--------|
| | 整治前 | 整治后 | 整治前 | 整治后 | 整治前 | 整治后 | 整治前 | 整治后 |
| 1 | -0.963 | -0.880 | -0.276 | -0.271 | -0.348 | 0.246 | -1.370 | -1.298 |
| 1.5 | -1.473 | | -0.372 | | -0.460 | | -1.375 | |
| 2 | -1.983 | -1.852 | -0.471 | -0.460 | -0.573 | 0.424 | -1.379 | -1.307 |
| 2.4 | -2.392 | | -0.545 | | -0.663 | | -1.383 | |
| 2.45 | -2.443 | | -0.555 | | -0.674 | | -1.383 | |
| 2.46 | -2.872 | | -0.648 | | -0.826 | | -1.388 | |
| 2.5 | | -2.338 | | -0.555 | | 0.512 | | -1.312 |
| 2.54 | | -2.377 | | -0.563 | | 0.520 | | -1.313 |
| 2.55 | | -2.728 | | -0.650 | | 0.603 | | -1.314 |

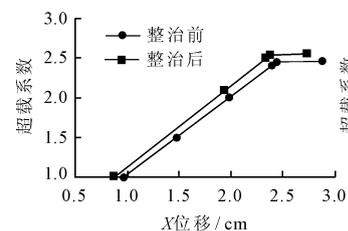


图 3 整治前后 X 方向位移与超载系数关系对比图

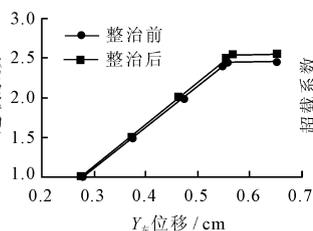


图 4 整治前后 $Y_{左}$ 方向位移与超载系数关系对比图

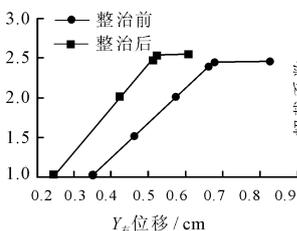


图 5 整治前后 $Y_{右}$ 方向位移与超载系数关系对比图

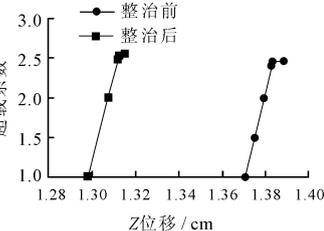


图 6 整治前后 Z 方向位移与超载系数关系对比图

表3 整治后和整治前位移变化表 %

| K | X | Y _左 | Y _右 | Z |
|---|-------|----------------|----------------|-------|
| 1 | -8.56 | -1.82 | -29.28 | -5.27 |
| 2 | -6.61 | -2.25 | -26.06 | -5.21 |

由表3可看出,整治后位移都变小了,其中右坝肩的切向位移变小的最明显,达到了26%以上,说明整治效果还是很明显的。

4.1.3 稳定对比分析

(1)整治后超载系数从整治前的2.45增大到2.54,大于规范要求的2.5,说明整治后满足稳定要求,整治是有效的。但整治后超载系数增加得不大,原因见下节内容应力对比分析。

(2)整治后位移都变小了,其中右坝肩的切向位移变小了26%以上。

以上说明,处理措施能提高拱坝稳定性。

4.2 整治前后应力对比分析

4.2.1 应力分布对比 计算校核洪水水位下的静水压力以及自重荷载的情况下(超载系数 $K=1$),整治后的径向、切向及竖向应力,对比整治前后的应力变化。应力对比见图7~18,图中单位MPa。为方便比较,同种应

力图,各种工况的应力等值线取值相同。

(1)径向应力。径向应力对比见图7~10。上游:整治后,右坝肩靠近基础部分D区变小,B、C区变大,即压应力变大。下游:右坝肩D区变小,B、C区变大,即压应力变大。从图中也可看出,压应力分布更均匀,两岸更对称。

(2)切向应力。切向应力对比见图11~图14。上游:整治后,坝顶靠近右坝肩的E区变小,C、D区变大,即压应力变大。下游:坝顶E区变小,D区变大,即压应力变大。从图中也可看出,压应力分布更均匀,两岸更对称。

(3)竖向应力。竖向应力对比见图15~图18。上游:整治后,右坝肩2/3坝高处,D区变小,C区变大,即压应力变大。下游:右坝肩E区变小,D区变大,即压应力变大。从图中也可看出,压应力分布更均匀,两岸更对称。

4.2.2 应力对比分析

(1)整治后,拱坝右坝肩能够承受的压应力变大,也证明了坝肩岩体的相对刚度变大,坝体推力重新分配,裂隙附近坝体的承载能力会增大,所能承受的压应力也会增大。故整治后的超载系数提高幅度不大。

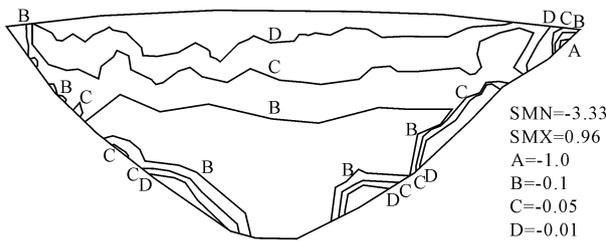


图7 整治前上游径向应力分布图(单位:MPa)

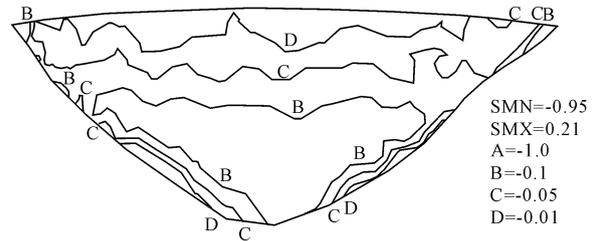


图8 整治后上游径向应力分布图(单位:MPa)

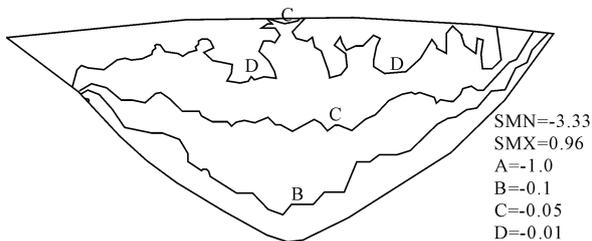


图9 整治前下游径向应力分布图(单位:MPa)

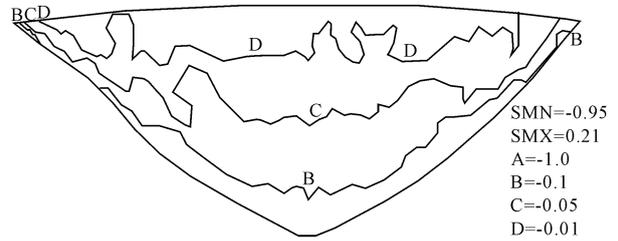


图10 整治后下游径向应力分布图(单位:MPa)

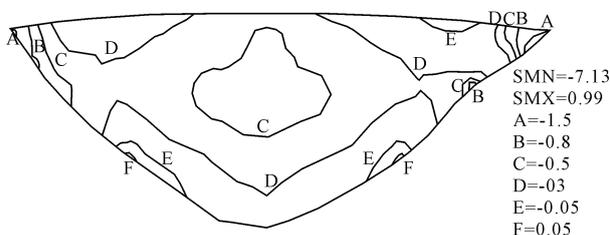


图11 整治前上游切向应力分布图(单位:MPa)

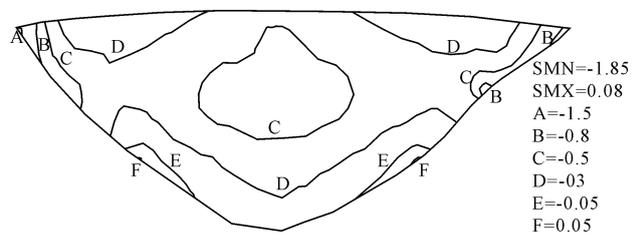


图12 整治后上游切向应力分布图(单位:MPa)

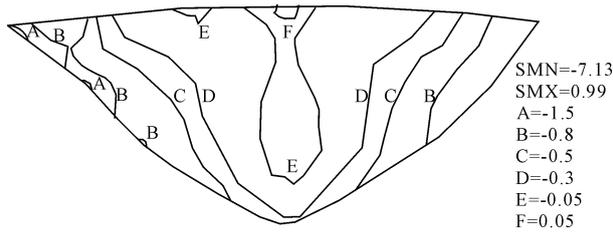


图 13 整治前下游切向应力分布图(单位:MPa)

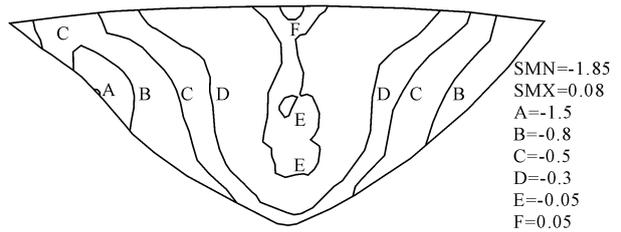


图 14 整治后下游切向应力分布图(单位:MPa)

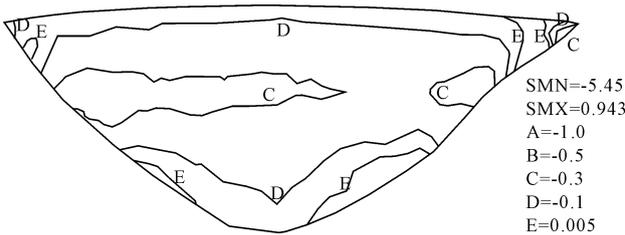


图 15 整治前上游竖向应力分布图(单位:MPa)

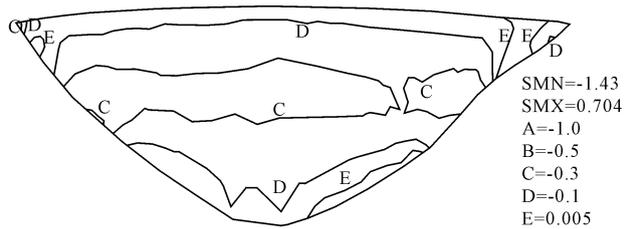


图 16 整治后上游竖向应力分布图(单位:MPa)

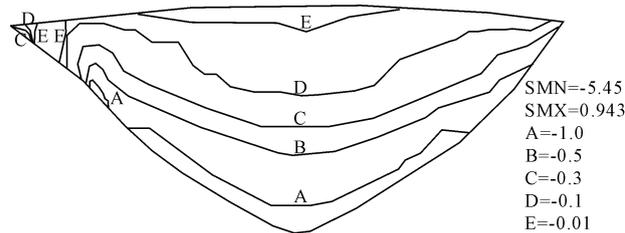


图 17 整治前下游竖向应力分布图(单位:MPa)

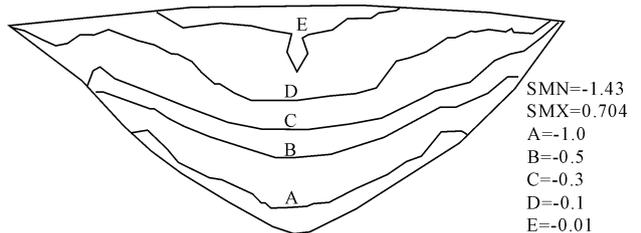


图 18 整治后下游竖向应力分布图(单位:MPa)

(2)坝体应力分布更均匀,两岸更对称。

以上说明,处理措施能提高拱坝右坝肩的承载力。

5 结论及展望

5.1 结论

本文以四川省蓬安县鲜店拱坝为例,应用有限单元法的基本理论,采用 ANSYS 分析软件,创建了鲜店拱坝及其地基的初始三维有限元模型,模拟坝肩裂隙和裂隙的处理措施,以静水荷载作为主要的荷载对拱坝进行稳定及应力分析。结果证明:

(1)整治后稳定超载系数增大了,位移变小了,特别是裂隙所在的右坝肩的切向位移变小了 26% 以上,坝体稳定性增强了。

(2)灌浆后坝肩岩体的相对刚度变大,能承受的压应力变大,坝体应力分布更均匀,两岸更对称。

(3)整治后坝肩岩体所承受的压应力增大,所以稳定超载系数增加得并不大。

以上说明,滑坡体处用 C15 细石混凝土埋块石回填,对裂隙卸荷裂隙进行固结灌浆处理,这种处理方式是合理可行的。该方式不仅可为其他类似病害工程提供经验和参考,还可将之推广到以后的水利

工程建设中。

5.2 存在的问题及展望

拱坝稳定及应力分析涉及复杂的地形地质等因素,在数值模拟过程中存在一定的概化,加上时间和其他条件的限制,有许多方面的工作还需作进一步的改进和完善:

(1)本文对地形地质条件都进行了简化,跟实际情况有一定的差别。

(2)影响拱坝稳定和应力的因素很多,各种荷载的影响最为直接,本文只考虑了水荷载和自重的作用,没有考虑温度荷载、渗透压力等其他荷载的作用。

(3)本文只研究了顺河向裂隙对拱坝安全的影响,而横河向裂隙、顺河向和横河向裂隙组合,这些也是常见的情况,对拱坝安全的影响也是应该研究的问题,由于时间问题,本文没有研究。

参考文献:

[1] 中国水利水电出版社. SL 25-91 砌石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
[2] 华东水利学院. 弹性力学问题的有限单元法(修订版)[M]. 北京:水利电力出版社,1978.

- [7] 白新理,黄和法,杨耀红,等. 水管冷却对三峡混凝土船闸底板温度应力的影响研究[J]. 华北水利水电学院学报,2000,21(3):8-11.
- [8] 王福林,杜士斌. 严寒地区碾压混凝土重力坝的温度裂缝及其防治[J]. 水利水电技术,2001,32(1):60-62.
- [9] 左红军. 某碾压混凝土重力坝温控措施研究[J]. 四川水利发电,2010,29(5):4-11.
- [10] 刘健,董福品. 混凝土性能参数对坝体温度应力影响的敏感性分析[J]. 水力发电,2015,41(6):77-80.
- [11] 赵风华. 温控措施对碾压混凝土坝温度应力场的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2011.
- [12] Li Shouyi, Chen Yaolong, Zhang Xiaofei, et al. Study on contraction joints for the Longtan RCC gravity dam[J]. Dam Engineering,2004,10(4):295-307.
- [13] Chen Yaolong, Wang Changjiang, Li Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3D finite element relocating mesh method[J]. Advances in Engineering Software,2001,32(9):677-682.
- [14] Ren Jinke, Li Shouyi, Zhao Lijuan, et al. Research on the effect of cooling pipe of RCC gravity dam[J]. Dam Engineering,2008,19(1):29-38.
- [15] Zhu Bofang, Xu Ping. Methods for stress analysis simulating the construction process of high concrete dams[J]. Dam Engineering,2001,12(4):243-260.

(上接第145页)

- [3] 李伟,曾兼权,赵世明,等. 四川省蓬安县鲜店水库枢纽除险加固工程初步设计报告[R]. 成都:四川大学水电学院,2008.
- [4] 周兴波. 有限元法在拱坝坝肩稳定及应力分析中的应用研究[D]. 西安:西安理工大学,2013.
- [5] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,等. 拱坝设计与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [6] 毛坚强. 接触问题的一种有限元计算方法及其在岩土工程中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2002.
- [7] 张正海,董羽蕙. 裂缝模型及其在ANSYS中的模拟[J]. 山西建筑,2005,31(24):49-50.
- [8] 杨宝全,陈媛,张林,等. 基于地质力学模型试验的锦屏拱坝坝肩加固效果研究[J]. 岩土力学,2015,36(3):819-826.
- [9] 李野,罗先启. 基于矢量和安全系数法的乌东德拱坝坝肩稳定性分析与评价[J]. 水电能源科学,2013,31(10):53-56.
- [10] 张景奎,张燎军,朱颖儒,等. 一种基于安全因子判据的坝肩裂隙岩体动力抗滑稳定分析方法[J]. 岩土力学,2012,33(7):2160-2166.
- [11] 陈卫忠,朱维申,邱祥波,等. 小湾水电站拱坝坝肩岩体加固方案分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):374-378.
- [12] 吴海林,李昌刚,周宜红,等. 长塘电站拱坝有限元应力分析及坝肩稳定研究[J]. 人民长江,2009,40(1):49-51.
- [13] 宁宇,徐卫亚,郑文棠,等. 白鹤滩水电站拱坝及坝肩加固效果分析及整体安全度评价[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1890-1898.