

材料置换法改善拱坝应力集中的数值模拟

蒋承杰, 苏志敏, 李 忠, 王 锋, 江念红

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 通过体型优化设计可使拱坝坝体以受压为主, 当拉应力超过混凝土的极限抗拉强度后, 由于应力重新分布的作用, 使局部区域的拉应力转变为压应力. 以某拱坝为例, 通过置换拉应力较大区域的混凝土为低弹模混凝土, 使坝体以受压为主, 充分发挥混凝土抗压强度高的特点, 改善坝体的应力状态, 提高坝体的强度安全性. 采用有限元 ANSYS10.0 为平台, 以坝高 100 m 的拱坝为计算模型, 利用直接耦合法计算拱坝应力, 得到拱坝在温升和温降工况下的应力分布状况, 主要分析了对坝体拉应力不利的温降工况; 采用低弹模混凝土置换坝体拉应力值比较大的区域, 使置换区域的拉应力减小约 50%, 而压应力增加的幅度不明显, 可以改善拱坝坝体拉应力集中现象, 提高了拱坝的安全性.

关 键 词: 拱坝; 材料置换; 应力状态; 有限元法

中图分类号: TV642.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)04-0073-05

拱坝属于空间壳体结构, 其体型设计要比重力坝复杂得多. 拱坝的体型设计与河谷地形及枢纽的整体布置密切相关, 在满足枢纽布置、运用和施工等要求的前提下, 通过调整其外形和尺寸, 使坝体材料强度得以充分发挥, 不出现大的受拉区域, 保证坝肩岩体的稳定, 并使工程量最省, 造价最低. 在运行过程中, 坝体的左右坝肩边缘及坝体中部会出现拉应力、压应力集中的现象, 由于坝体混凝土的抗压强度远远大于其抗拉强度, 当受到较大的拉应力作用时, 坝体混凝土会出现裂缝, 影响坝体运行的安全性和稳定性. 工程上通过设置底缝或周边缝的方法来达到改善拉应力的目的. 设置周边缝, 可使梁的刚度有所减弱, 相对加强了拱的作用, 从而减小甚至消除坝体上游面的竖向拉应力, 使坝体和垫座接触面的应力分布趋于均匀. 但设置周边缝以后, 坝体被切断, 在缝面抗拉强度减小的同时, 抗剪强度也降低了, 坝体安全会有隐患. 梅花拱坝失事后, 我国的周边缝拱坝建设处于停滞状态, 不再采用周边缝.

本文采用通过置换材料改善应力的新方法降低坝体的拉应力. 但如果直接改变材料的弹性模量来进行置换, 就会导致弹模降低的同时材料本身的抗拉强度也降低; 若采用掺加高分子材料或纳米材料来改善其力学特性, 可以使其在弹模增加不大的情况下, 提高抗拉抗压强度. 由于是要把塑性混凝土运用到拱坝坝体之中, 要求其弹性模量及抗压强度相比传统的混凝土要有所增强, 通过查阅最近几年塑性混凝土的运用状况, 发现浙江省近 20 座已建多年的大中型水库土石坝采用除险加固的塑性混凝土的弹模和强度都稍高于传统塑性混凝土(表 1). 由表 1 可见, 通过控制水、水泥、骨料、膨润土等配合比, 使得塑性混凝土的弹模从小于 1 000 MPa 逐渐增加到 3 000 ~ 5 500 MPa 左右, 抗压强度也可提高到 8 MPa, 抗拉强度可达到 0.8 MPa. 可见, 低弹模混凝土可以运用于一般的拱坝.

本文假设一种低弹模混凝土材料, 将坝肩区域的普通混凝土置换为低弹模塑性混凝土. 利用低弹模塑性混凝土较强的极限变形能力, 改善坝体的应力状况. 以 ANSYS 通用有限元软件分析置换前后拱坝的应力变化情况.

收稿日期: 2012-12-05

作者简介: 蒋承杰(1985-), 男, 甘肃甘谷人, 硕士研究生, 主要从事水工结构方面的研究.

E-mail: jiangch2261@sina.com.cn 通信作者: 苏志敏(E-mail: yysdszm@163.com)

表 1 浙江省典型水库除险加固中低弹模混凝土防渗墙有关系数

Tab.1 Parameters of low elastic modulus concrete impervious wall during rehabilitation of typical reservoirs in Zhejiang Province

工程名称	坝 型	最大坝高/ m	最大墙深/ m	主要设计指标				启用 年份
				抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	
大洋水库	黏土斜墙土石坝	45.00	32.79	4.0	0.2	$\leq 1\ 000$	1×10^{-7}	2002
杭州青山水库	宽心墙砂壳坝	24.10	40.00	6.0	0.3	$\leq 2\ 500$	1×10^{-7}	2003
对河口水库	黏土斜墙砂壳坝	38.20	42.70	6.5	0.4	$\leq 2\ 500$	5×10^{-7}	2005
源口水库	黏土斜墙砂壳坝	43.30	48.00	7.0	0.4	$\leq 3\ 000$	1×10^{-7}	2006
铜山源水库	黏土斜墙砂壳坝	48.20	50.26	7.7	0.8	$\leq 4\ 500$	1×10^{-7}	2008
诸暨青山水库	黏土斜墙砂壳坝	27.40	33.47	8.0	0.8	$\leq 5\ 500$	1×10^{-7}	2009

1 有限元计算基本理论

以某拱坝初步设计体型参数建立拱坝模型,用数值模拟低弹模高强度混凝土对拱坝应力分布的影响.采用 ANSYS 直接耦合法计算拱坝应力^[1],先对拱坝的温升、温降工况进行应力分析^[2-4],选出拉应力最大的工况;然后用低弹模混凝土置换到拱坝拉应力值较大的区域,再利用直接耦合法计算应力,分析置换后拱坝的应力状况,比较置换前后拱坝拉压应力的变化情况,进行结果分析.由于用有限元法算出的拉应力有时远远超过了混凝土的抗拉强度,而且有限单元法计算拱坝所反映的严重应力集中现象并不一定符合实际,为消除有限元计算中的应力集中现象和应力数值随着计算网格大小而变化的现象,建立等效应力法,消除了应力集中的影响.虽然等效应力法被写入规范,但实际工程中并没有成熟的步骤和具体方法,所以本文中暂不考虑等效应力法的问题.

2 模型计算

2.1 计算模型及参数

某拱坝为抛物线双曲拱坝,坝址处河谷狭窄,为 V 型河谷,两岸边坡及谷底对称,谷底宽 46.6 m,坝体及坝肩两岸岩体风化程度低.体形控制参数分别为:坝高 100.0 m,拱冠顶厚 10.0 m,拱冠底厚 29.0 m,拱端最大厚度 35.0 m,顶拱中心角 91.64° ,最大中心角 95.35° ,宽高比 0.29,上游倒悬度 0.22.

为方便建模^[5],根据大量拱坝设计与应力计算的经验和本文建模时在顶拱弦与河谷中心线在顶拱面投影交点处建立坐标原点,垂直水流方向,沿水流方向和竖直方向分别为 X 轴(指向左岸为正), Y 轴(指向下游为正)和 Z 轴(垂直向下为正),坝基以两岸坝肩上端为基准.根据圣维南原理^[6],坝基础范围取值越大,基础边界约束条件对坝体的应力和位移的影响就越小.本文取有限元模型以顶拱左右坝肩为基准,向 X 轴的正负方向分别延伸 1 倍坝高, Y 轴的正负方向也分别延伸 1 倍坝高,坝基底部向 Z 轴的正方向延伸 1 倍坝高^[7].几何模型如图 1 所示.

整个模型包含水工混凝土、低弹模混凝土及岩基 3 种材料,材料的密度分别为 2.4×10^4 , 2.2×10^4 和 $2.6 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,弹性模量分别为 20, 5 和 17 GPa,泊松比分别为 0.17, 0.17 和 0.20,线膨胀系数分别为 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 和 $3.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,导温系数均为 $0.1 \text{ m}^2/\text{d}$.

2.2 拱坝温降、温升工况应力计算

计算中假设材料为弹性体,主要考虑自重、静水压力及温度荷载,不考虑泥沙压力,同时温度荷载又分为温降和温升时的荷载,故采用以下 2 种荷载组合进行分析^[8-10]:工况 1,自重+静水压力+温降;工况 2,自重+

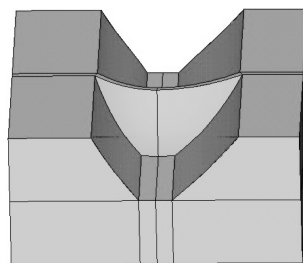


图 1 拱坝-地基系统几何模型

Fig.1 Geometry model of an arch dam-foundation system

静水压力+温升.

温升温降按拱坝设计规范的公式采用函数加载方式,在 ANSYS 计算中受拉为正,受压为负,材料按弹性体计算得第一主应力,第三主应力和 Y 方向位移,工况 1 的分别为 10.116 MPa, -3.876 MPa 和 2.9 cm; 工况 2 的分别为 4.857 MPa, -11.503 MPa 和 1.6 cm.

可见,温降工况下坝肩的第一主应力(最大拉应力)远远大于温升工况,但温降工况下拱坝的第三主应力(压应力)要大大低于温升工况;2 种工况产生的温度应力方向是相反的. 温降工况下,坝体温度低于封拱温度,坝轴线收缩,使坝体向下游变位,由此产生的弯矩和剪力的方向与静水压力所作用的方向相同,但轴力方向相反;而温升工况恰好相反,坝轴线伸长,是坝体向上游变位(温降坝体位移为 2.9 cm,温升时只有 1.6 cm),由此产生的弯矩和剪力的方向与静水压力的方向相反,但轴力方向相同. 因此,温降工况下坝体应力最危险.

2.3 置换区域

以温降工况为例,计算拱坝在温降工况下,通过低弹模混凝土置换拉应力较大的区域,分析拱坝应力的变化情况. 拱坝的上游面靠近坝肩附近一般拉应力较大,尤其是在温降工况下更为明显,所以在选择置换区域的时候主要考虑这部分,本文只是做材料置换的应力研究,对于坝体如何施工(施工方法可能暂存困难)以后会进一步研究. 如图 2 所示,将坝体上游左右整个坝肩区的一层材料都置换成低弹模高强度混凝土.

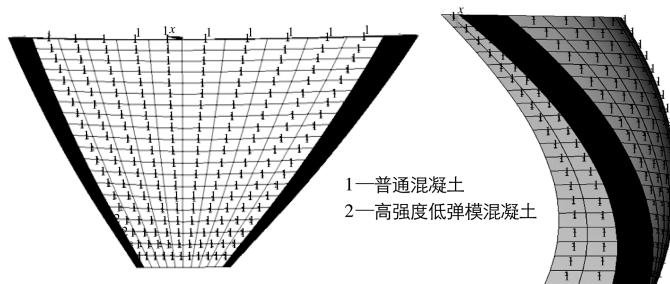


图2 坝体材料置换区域

Fig. 2 Dam body material replacement region

3 计算结果分析

在温降工况下,通过上述置换方法,计算得到该区域拉应力由 8 ~ 10 MPa 减小到 4.0 ~ 5.4 MPa 左右,而且坝肩置换区内的拉应力分布比较均匀,并且整个坝体的最大拉应力由 10.116 MPa 减小为 5.606 MPa,最大拉应力发生在坝体右坝肩置换区内,坝体上游底部的拉应力值分布均匀且比置换前拉应力值有所减小. 置换后坝体的最大压应力由原来的 3.876 MPa 增加到 4.599 MPa,增加约 0.7 MPa,最大压应力发生在坝体下游右坝肩 58.22 m 处. 另外,置换处的第三主应力也有所增加. 置换后坝体沿下游(Y 轴方向)的最大位移由原来的 2.90 cm 增加到 3.07 cm,位移略有增大,且最大位移发生在坝顶中部. 置换前左坝肩第一主应力和第三主应力分别为 10.116 和 -2.413 MPa,置换后分别为 4.865 和 -2.501 MPa; 置换前右坝肩第一主应力和第三主应力分别为 9.775 和 -3.886 MPa,置换后分别为 4.674 和 -4.601 MPa.

温降工况下,拱坝的上游面主要是受拉,下游面以受压为主,故以坝体上游面左右坝肩的边线作为第一主应力的路径,坝体下游面左右坝肩的边线作为第三主应力的路径. 通过各路径第一、第三主应力的变化反应坝体应力的改变.

(1)第一主应力比较: 置换后坝体上游的左右坝肩区的总体拉应力减少了一半,左坝肩峰值从 10.116 MPa 减小到 4.865 MPa,右坝肩从 9.775 MPa 减小到 4.674 MPa.

(2)第三主应力比较: 置换后左坝肩下游的压应力比置换前有所增加,但是增加的幅度很小,峰值从 2.413 MPa 增加到 2.501 MPa; 右坝肩下游区压应力增加的幅度相对比较大,峰值从 3.886 MPa 增加到 4.601 MPa.

温降工况下材料置换前后的第一主应力分布见图 3. 可见,置换后拉应力由 10.116 MPa 减小到 5.606 MPa,坝体上游左坝肩处最大的拉应力比置换前减小了一半左右,减大幅度很明显,虽然拉应力的区域变大,但仍显著地改善了坝体的应力状况. 压应力方面,置换后坝体的压应力比置换前坝体的压应力普遍

增大了约 0.8 MPa; 位移方面, 置换前和置换后差别不大, 置换后的位移略有增加。

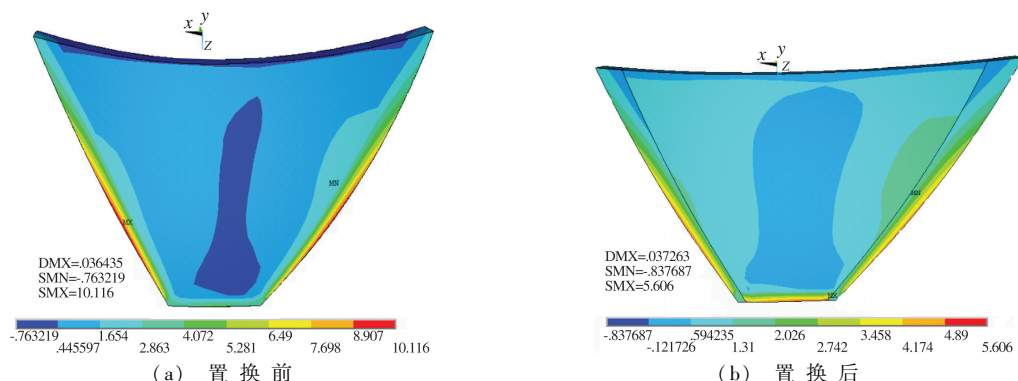


图 3 置换前后第一主应力

Fig. 3 First principal stress before and after material replacement

4 结 语

通过把坝肩上游侧的一部分混凝土置换成低弹模塑性混凝土, 坝肩上游侧的拉应力大大减小, 同时坝肩下游侧的压应力有所增加, 但对坝体不会产生不良影响。可见, 将拉应力值较大的区域进行置换后, 坝肩的应力状态改为以受压为主, 进一步减小了拉应力, 充分利用了混凝土的抗压性能, 节省工程量, 同时也提高了坝体的安全性。通过材料的置换可以进一步反映出坝体受压为主的区域, 为改善坝体应力提供参考依据。本文仅对材料置换做了探讨性研究, 工程实例上应用不多, 具体施工时技术方面可能会存在一些问题, 有待进一步深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 孙均, 汪炳钺. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988. (SUN Jun, WANG Bing-jue. The finite element method for underground structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1988. (in Chinese))
- [2] KAWAGUCHI T, NAKANE S. Investigations on determining thermal stress in massive concrete structure[J]. ACI, 1996, 93(1): 96-101.
- [3] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (ZHU Bo-fang. Temperature stress and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 王润福, 陈国荣. 温度场与温度应力[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (WANG Run-fu, CHEN Guo-rong. The temperature field and temperature stress[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [5] 肖伟荣. 基于有限元 ANSYS 的拱坝体型优化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005. (XIAO Wei-rong. Shape optimization of an arch dam based on FEM ANSYS[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005. (in Chinese))
- [6] 孙扬镛. 杆元分载拱冠梁法及其程序[J]. 拱坝技术, 1982(2): 8-12. (SUN Yang-biao. Crown cantilever method and procedures set out in[J]. Arch Dam Technology, 1982(2): 8-12. (in Chinese))
- [7] 阙前华, 谭长建, 张娟, 等. ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. (JUE Qian-hua, TAN Chang-jian, ZHANG Juan, et al. Senior engineering application and secondary development of the ANSYS[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2006. (in Chinese))
- [8] 邹超英, 苏志敏, 曾海军, 等. 拱坝有限元分析网格剖分方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 47-49. (ZOU Chao-ying, SU Zhi-min, ZENG Hai-jun, et al. Mesh generation of finite element method for arch dam[J]. South-to-North Water Diversions and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 47-49. (in Chinese))
- [9] 陈知渊. 拱坝及其优化方法的发展现状与展望[J]. 水利与建筑工程学报, 2006(4): 91-97. (CHEN Zhi-yuan. Current situation and prospect of development of arch dam and its optimal design method[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006(4): 91-97. (in Chinese))

- [10] ERGATOUDIS J G, IRONS B M, ZIENKIEWICZ O C. Three dimensional analysis of arch dam and their foundations[C]// Symposium on Arch Dam-A review of British research and development, Inst. Civ. Eng., London, 1968.

Numerical simulation of arch dam stress concentration improved by a material replacement method

JIANG Cheng-jie, SU Zhi-min, LI Zhong, WANG Feng, JIANG Nian-hong

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: In the shape optimization design of the arch dam, it is necessary to make the concrete in a large scale under compression. When the tensile stress exceeds the ultimate tensile strength of the concrete, local area under tension may shift to compression by the action of the stress redistribution. The concrete having low elastic modulus can be replaced in the region under higher tension to decrease the peak tension stress. By this way, the stress state and the safety factor of the arch dam have been improved. An arch dam with the height of 100 m is taken as an example in the study. The stress states under conditions of temperature rise and temperature drop are analyzed by the direct coupling method of the ANSYS10.0. It is clear that much attention should be paid under the temperature rise condition. After replacement of concrete having the low elastic modulus in the region under higher tension, the peak tension stress decreases to 50%, however, there is no remarkable increase in compression stress at the replacement region. Hence, this method can reduce the stress concentration and improve the safety of the arch dam.

Key words: arch dam; material replacement; stress; finite element

我院承担的国家“863 计划”课题顺利通过科技部中期检查

2013 年 4 月 18-19 日,科技部在北京组织召开了“863 计划”现代交通技术领域项目课题中期检查会,检查专家组由五名行业技术专家和两名财务专家组成,科技部高技术中心金茂菁处长主持中期检查会,我院科研管理处、水工水力学研究所、河流海岸研究所、岩土工程研究所有关负责同志和课题组负责人与主要成员参加了会议。

本次“863 计划”中期检查的是 2012 年科技部批准立项的现代交通技术领域项目,项目共设 10 个课题,我院是该项目牵头联系单位,并主持和参加各 2 个课题。我院主持的课题为胡亚安教高负责的“150 m 级超大升程新型单级垂直升船机重大关键技术研究”和蔡正银教高负责的“20 万吨级深水板桩码头关键技术研究”;我院参加的课题为连云港港 30 万吨级航道建设指挥部主持的“开敞海域淤泥质浅滩深水航道建设关键技术研究”(河流海岸研究所和岩土工程研究所参加)和天津水运工程科学研究院主持的“长江高等级航道建养与监测关键技术研究”(河流海岸研究所参加)。

中期检查专家组重点对课题规定内容完成情况、课题技术方向和技术路线的合理性、课题实施进度、课题研究人员投入、课题配套条件落实情况、经费到位与使用情况以及课题实施中存在的问题等进行审查。对我院主持及参加的 4 个课题,中期检查专家组认为课题研究进展和阶段性指标完成情况良好,支撑条件得到落实,达到了预期目标和考核要求。对专家组提出的一些意见和建议,科研管理处将与相关部门、课题组共同协商落实。

摘自南京水利科学研究院网站