

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2017.6.10

重力坝剖面优化设计研究

樊任华¹, 樊义永¹, 程建设²

(1. 江西省上饶市鸿安水利水电勘测设计咨询有限公司, 江西 上饶 334000; 2. 江西省瑞昌市水利局, 江西 瑞昌 332200)

摘要:重力坝作为水利工程中的一种重要坝型,已经得到了广泛的运用,然而坝体的剖面优化一直是困扰设计人员的一个难题. 论文结合非线性规划和有限单元法,提出了一套坝体剖面优化设计的思路,并结合实例对该思路进行了验证,结果表明,计算结果完全满足要求,能够较好地运用在重力坝剖面设计中.

关键词:重力坝;剖面优化设计;非线性规划;有限元分析

中图分类号:TV642.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2017)06-0435-03

0 引言

重力坝作为一种古老的坝型,在当今水电工程中占据着重要的地位. 特别是19世纪后,随着新材料的发展和设计理念的提升,重力坝的修建高度达到了数百米级,如瑞士的狄克逊重力坝,其高度达到了285 m^[1,2]. 但是,众所周知,重力坝是依靠自身重力来维持坝体的稳定,难以在安全和经济之间达到一个平衡状态,而坝体的剖面形状是控制坝体应力应变、坝基抗滑稳定以及建设投资的重要控制标准. 因此,坝体剖面形状的优化设计是平衡重力坝安全与经济矛盾的重要手段.

所谓重力坝剖面优化设计是基于应力应变计算和稳定分析结果,设定优化变量,再根据一定的约束条件,通过最优化理论确定最优的体形参数,使得结构在满足安全的基础上能够达到较好的经济指标^[3].

根据规范(SL319-2005),重力坝应力分析的主要方法包括材料力学法和有限单元法. 其中,材料力学法计算简单,设计经验十分丰富,但是该方法的假设较多,对于较低的坝较为适用. 然而,对于高度较高的坝,其应力分布十分复杂,有限单元法则成为了一种更为适用的工具,同时随着数值计算技术的不断发展,更加开拓了该方法的运用空间. 本文基于有限单元法确定坝体的应力分布特征,同时根据规范设立约束条件,采用非线性规划理论,提出了一套重力坝剖面优化设计的方

法,并结合实例,证实了该方法的可靠性.

1 理论框架

重力坝剖面优化设计方法首先根据水文计算结果以及规范(SL319-2005)的要求,确定坝体的高程、坝顶的横向长度^[4,5]. 然后基于有限元计算坝体应力,提取坝基、坝趾和坝踵处所有单元的应力分布,构建坝基、坝趾、坝踵的强度约束条件和坝基抗滑稳定的非线性约束条件. 同时,以坝体体积最小为目标函数,编写非线性

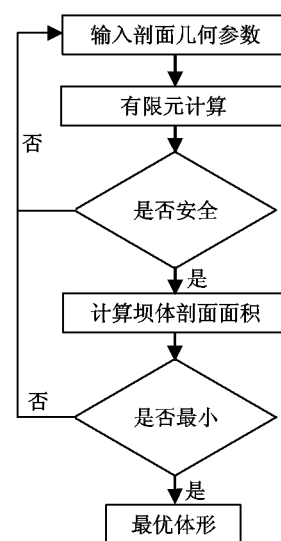


图1 重力坝剖面优化设计

收稿日期:2017-08-10

作者简介:樊任华(1984-),男,硕士,工程师.

规划计算迭代代码,通过程序计算确定最优的剖面形状。其具体流程图见图 1。

2 实例验证

重力坝的坝高、坝顶宽度通常可以根据水文计算结果及规范(SL319-2005)确定,难以确定的是上、下游的坡度,其值也是决定重力坝剖面及受力的重要参数^[6]。上游坡度是控制坝踵应力状态的重要控制参数,而下游坡度是控制坝体稳定性的重要参数。根据规范(SL319-2005),上游坡度(n)的取值范围为 0~0.2,下游坡度(m)的取值范围为 0.2~0.8。而本文正是针对这两个参数,将其作为设计变量,将剖面的混凝土用量最小(即剖面面积最小)作为优化条件,其约束条件为上游拉应力、基岩压应力和抗滑稳定安全系数满足要求。

2.1 计算概况

如图 2 所示为某重力坝的典型剖面,其坝高、坝顶宽度分别是 155.00 m 和 18.00 m,假设坝体的材料为 C25 混凝土,坝基的抗压强度为 42 MPa,其余的材料计算参数如表 1 所示。上游水头为 152.00 m,下游水头为 50.00 m。

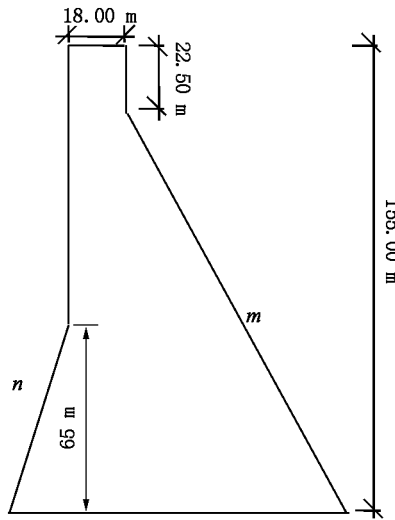


图 2 重力坝剖面

表 1 计算参数

项目	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /(kg/m^3)
坝体	2.8×10^4	0.167	2 400
坝基	1.5×10^4	0.25	2 600

2.2 优化控制条件

坝基剖面最优是以剖面面积最小作为优化条件,其计算公式如下:

$$S = 18 \times 155 + \frac{0.5 \times (155m - 18)^2}{m} + 0.5 \times 65^2 n \quad (1)$$

根据如下的控制条件可以对式(1)进行非线性规划求解:

(1)根据有限元计算结果确定坝体对坝基的法向抗压应力,该应力不能大于基岩的抗压强度,因此得到坝基基底压应力的约束条件:

$$0 \leq \sigma_n \leq 42 \text{ MPa} \quad (2)$$

式中: σ_n 是坝体对坝基的压应力。

(2)坝踵不能出现拉应力且坝趾的抗压强度必须小于混凝土的抗压强度,其约束条件分别为:

$$\sigma_1 < 0 \quad (3)$$

$$-12.5 \text{ MPa} < \sigma_3 < 0 \quad (4)$$

式中: σ_1 是坝踵的第一主应力,必须避免拉应力的存在。 σ_3 是坝趾的第三主应力,应该满足 C25 的抗压强度条件。

(3)根据规范(SL319-2005)要求,为了保证坝体的抗滑稳定条件,还应该满足如下的坝基抗滑稳定条件:

$$K = \frac{\sum \tau_f}{\sum \tau} \geq 2.5 \quad (5)$$

式中: K 表示抗滑稳定系数;等式右边分母项为坝基单元剪切应力的积分值,而分子为阻滑力。

(4)根据规范(SL319-2005)要求,重力坝的上、下游坡度分别在 0~0.2 和 0.2~0.8 之间取值,故,对 n 和 m 的取值约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq n \leq 0.2 \\ 0.2 \leq m \leq 0.8 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 计算结果

基于有限元计算结果并结合式(2)、(3)、(4)、(5)和(6),以(1)式为优化条件,进行非线性规划求解,其计算结果表明:当上游坡度 n 取 0.19,下游坡度 m 取为 0.79 时,达到最优条件。此时,坝体及坝基的受力结果如图 3 所示。

根据图(3)的计算结果可以明显看出,通过优化设计后的坝体应力条件和坝基抗滑稳定系数($K=4.8$)均能满足要求,并且能够达到面积最小,其值为 3 278.70 m^2 。

为了检验有限单元法的计算结果,采用规范(SL319-2005)规定的材料力学法对案例进行验证,计算公式如文献^[4]所示。计算结果表明:坝基处最大的竖直应力 $\sigma_n = 2.5 \text{ MPa}$,坝踵处的第一主应力 $\sigma_1 = -0.0052 \text{ MPa}$,坝趾处的第三主应力 $\sigma_3 = 4.6 \text{ MPa}$,坝

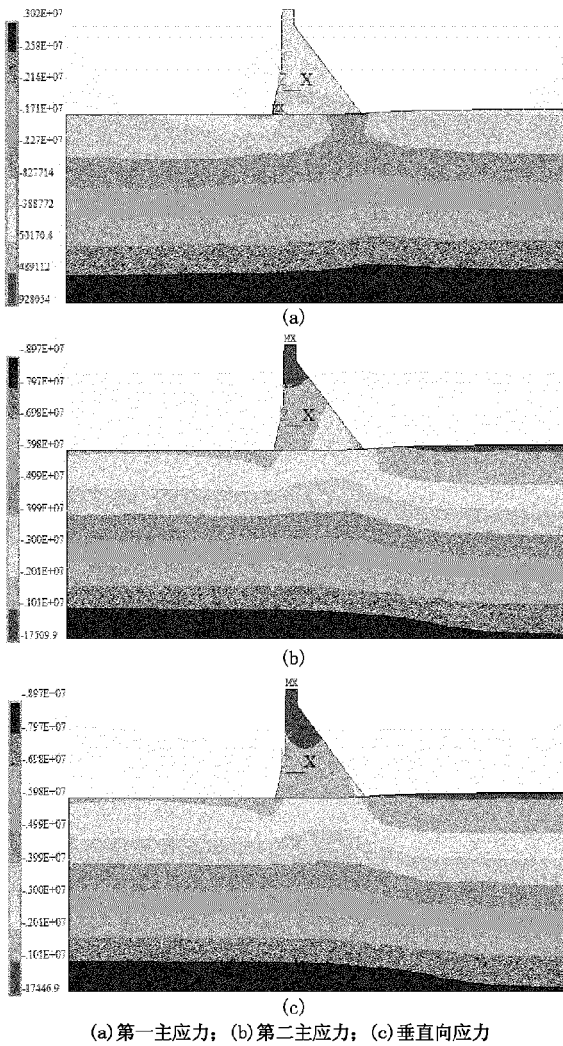


图 3 计算结果

底抗滑稳定系数 $K = 4.3$ 。而有限元的计算结果为坝基处最大的竖直应力 $\sigma_n = 2.15$ MPa, 坝踵处的第一主应力 $\sigma_1 = -0.0014$ MPa, 坝趾处的第三主应力 $\sigma_3 = 3.37$ MPa, 坝底抗滑稳定系数 $K = 4.8$, 两者的结果虽然有些偏差, 但是基本接近, 这些误差可能与两种方法的基本假定、有限元网格大小、坝高的尺度效应等有关。

3 结 论

较优的重力坝剖面不仅能够满足坝体及坝基的应力和安全条件, 而且还能保证坝体的材料用量最小。本文基于最优化理论和有限元分析, 提出了一套坝体剖面优化设计的思路, 通过实例, 对该方法进行了验证, 并且与材料力学法进行了对比, 结果表明: 该方法能够较好的运用在重力坝剖面设计中。

参考文献:

- [1] 李林科, 张爱军. 混凝土重力坝三维数值模拟及优化设计[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 125 ~ 127.
- [2] 张迪. 重力坝实用剖面的优化设计及体型分析[D]. 西北农林科技大学, 2007.
- [3] 钱波. 基于重力坝应力计算及稳定分析的优化设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 52 ~ 55.
- [4] 左东启, 王世夏, 林益才. 水工建筑物(上册)[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.
- [5] 潘家铮. 重力坝的设计和计算[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [6] 李兴印, 辛全才. 上、下游面坡度对重力坝抗震性能的影响[J]. 水力发电, 2013, 39(1): 44 ~ 45.

编辑: 张绍付

Study on optimization design of gravity dam section

FAN Renhua¹, FAN Yiyong¹, CHENG Jianshe²

- (1. Shangrao Municipal Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Consulting Co. Ltd, Shangrao 334000, China;
2. Ruichang Water Conservancy Bureau of Jiangxi Province, Ruichang 332200, China)

Abstract: Gravity dam as an important dam of water conservancy projects, has been widely used, but the dam section optimization has been a problem plagued the designer. Based on the nonlinear programming and the finite element method, the paper puts forward a set of ideas for the optimal design of the dam section, and proves the idea with the example. and the results show that the calculation results of fully meet the requirements, which can be used in the design of profile of gravity dam.

Key words: Gravity dam; Optimization design; Nonlinear programming; Finite element analysis

翻译: 樊任华