

从优化角度看重力坝三角形断面的物理意义

刘 毅, 金 峰

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:为探讨重力坝三角形基本断面设计的物理机制, 利用细啃渐进结构优化(ESO)方法的基本概念, 建立了坝顶顺河向位移敏感度准则. 以四边形为初始域, 以重力坝的稳定和坝踵拉应力为约束条件, 对基本荷载作用下的重力坝基本断面形状进行优化. 不同网格、不同初始域、不同坝高工况下的结果表明, 三角形基本断面是重力坝在基本荷载作用下使得坝顶位移最小的一种断面形状.

关键词:重力坝; 三角形断面; 渐进结构优化; 形状优化

中图分类号: TB12; TU314

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)05-0037-03

Physical meaning of triangular section of gravity dams in view of optimization//LIU Yi, JIN Feng (Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A criterion of the minimum displacement of the top of dam bodies along the stream direction was developed by use of the basic concept of nibble evolutionary structural optimization (ESO) for discussion of the physical meaning of the triangular section of gravity dams. The shape of cross section of gravity dams under basic loads was optimized from an initial quadrilateral region with the stability of dam bodies against sliding and the tensile stress in dam heels taken as restraints. The results in the cases of different meshes, different initial regions, and different heights of dam bodies show that the triangular section can ensure the minimum displacement of the top of dam bodies under basic loads.

Key words: gravity dam; triangular section; evolutionary structural optimization (ESO); shape optimization

重力坝的强度和稳定性主要靠坝的重量来保证, 而坝的重量主要取决于坝的形状和尺寸. 重力坝的基本断面是重要的设计内容. 一般设计过程中, 习惯上选取重力坝的基本断面为三角形, 但并没有说明这样选取的理由^[1].

1993 年, 文献[2]提出了渐进结构优化(ESO)方法, ESO 方法最初的基本概念是逐步删除应力最小的单元得到满应力结构. 近年来, 研究人员发展了具有应力^[3]、刚度^[4]、位移^[3]、频率^[5]等多种准则的 ESO 方法. ESO 方法最大的特点就是物理概念简单, 且容易嵌入现有的有限元软件中. 文献[6]发展了可控孔数的 ESO 方法, 在 ESO 方法中引入一个参数, 来控制优化过程中新的孔洞产生的时机. 设置适当的孔数控制参数可以在优化过程中只改变边界形状, 而不改变结构拓扑, 这就是细啃 ESO 方法.

本文利用细啃 ESO 方法对一个方形初始域进行优化, 从坝顶顺河向位移最小这一简单物理准则出发, 得到了不同条件下重力坝基本断面的最优形状, 阐述了重力坝三角形基本断面的物理意义.

本文研究步骤如下: 第一步, 建立足够大的初始域, 并且施加重力、水压、扬压力这 3 个主要荷载以及相应的边界条件; 第二步, 建立坝顶位移敏感度准则, 并自动地对初始域进行优化; 第三步, 以重力坝的稳定和应力约束条件作为优化的终止条件, 得到最优体形, 并且分析在不同准则下的最优体形, 同时说明这些最优体形的物理意义.

1 考虑位移约束的细啃 ESO 方法

1.1 位移敏感度准则

在有限元计算中, 式(1)和式(2)分别是单元移走前后两个状态的有限元基本方程:

$$Ku = P \quad (1)$$

$$(K + \Delta K)(u + \Delta u) = P + \Delta P \quad (2)$$

式中: K 为总体刚度矩阵; u 为位移向量; P 为荷载向量; $\Delta K = -K_i$ 表示因为单元移走而引起的总体刚度矩阵的变化; Δu 为由于单元移走而引起的位移变化量; ΔP 为相应的荷载变化量. 两式相减得

$$K\Delta u + \Delta Ku + \Delta K\Delta u = \Delta P \quad (3)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579028)

作者简介: 刘毅(1979—), 男, 湖南安化人, 博士研究生, 从事水工结构优化研究.

略去高阶项:

$$K\Delta u + \Delta Ku = \Delta P \quad (4)$$

整理得

$$\Delta u = K^{-1}(\Delta P + K_i u) \quad (5)$$

那么在坝顶处顺河向位移的敏感度为

$$\alpha_i = \Delta u_{ij} = \gamma_j^T \Delta u = u_j^T (\Delta P + K_i u) \quad (6)$$

式中: γ_j 为坝顶处顺河向位移单位向量; $u_j = K^{-1} \gamma_j$ 为在坝顶处施加顺河向单位荷载所产生的位移向量。

1.2 细啃 ESO 方法的流程

图 1 所示为应用于重力坝体形优化的细啃 ESO 方法的简要流程。

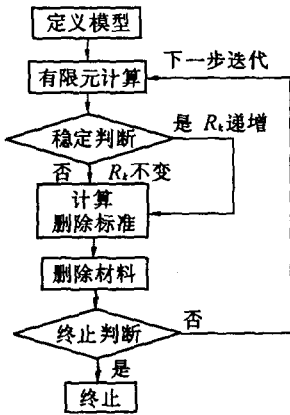


图 1 细啃 ESO 方法流程

经过第 $k-1$ 次迭代及相应的有限元计算,可以得到每一个节点的位移值。如果第 k 次迭代没有去掉单元,则表示稳定状态达到, $R_k = R_{k-1} + \Delta R$, R_k 是第 k 步的比例系数, ΔR 是预先设定的常数;反之, $R_k = R_{k-1}$ 。

按照公式(6)计算每个单元的坝顶顺河向的位移敏感度。在边界单元中检验删除条件,如果第 i 个单元满足式(7),那么删除该单元。

$$\alpha_i \leq R_k \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_j \quad (7)$$

以坝体的稳定和应力约束作为体形优化的终止条件。根据相应的规范,稳定约束的抗剪强度公式为

$$K = f \frac{\sum W}{\sum F} \quad (8)$$

式中: K 为坝基面抗滑稳定安全系数; f 为坝体混凝土与坝基接触面的抗剪摩擦系数; $\sum W$ 和 $\sum F$ 分别为作用于坝体上全部荷载对滑动平面的法向分量和切向分量。

考虑到有限元应力计算的网格敏感性,本文选取离坝踵 0.03 倍坝高处的混凝土应力值作为约束条件。如果稳定或者应力约束不满足,那么,优化终止。否则,继续进行下一步迭代计算。

2 计算条件及初始域

如图 2 所示为重力坝断面优化的初始域。初始坝块为梯形,高度为 h ,上部坝块宽为 B_2 ,下部坝块宽为 $B_1 + B_2$ 。沿宽度和高度方向各取 1 倍坝高。在地基上施加铰支约束,施加重力、水压力、扬压力荷载。混凝土的弹性模量取为 20 GPa,泊松比为 0.2,密度取为 2.4 t/m³。考虑到建坝时地基沉降已经完成,不考虑地基的重力,地基密度取为零。地基弹性模量与坝体弹性模量取为一致。

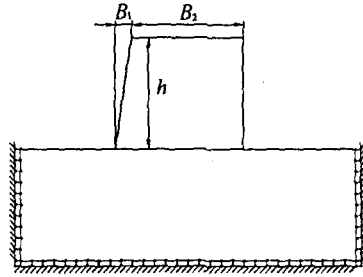


图 2 初始域示意图

为了考察不同条件重力坝最优基本断面,考虑以下几种工况:①工况 1, $B_1 = 0$ m, $B_2 = h = 100$ m;②工况 2, $B_1 = 0$ m, $B_2 = h = 100$ m,坝体网格取为 5 m × 5 m,是工况 1 坝体网格的 2 倍;③工况 3, $B_1 = 0$ m, $B_2 = 1.5h = 150$ m;④工况 4, $B_1 = 0$ m, $B_2 = h = 200$ m;⑤工况 5, $B_1 = 0.1h = 10$ m, $B_2 = h = 100$ m。除工况 2 外,其他工况的坝体网格都取为 2.5 m × 2.5 m。

本文中取坝基面抗滑稳定安全系数为 1.1,应力安全系数取为 2.5,容许拉应力取为 0.5 MPa。

3 计算结果分析

图 3 至图 7 分别是达到稳定或应力安全终止条件时的重力坝最优基本断面,坝踵处为坐标原点,顺河向方向为 x 向,竖直方向为 y 向。表 1 为达到终止条件时相应的指标。

需要说明的是,由于有限元网格的影响,坝面坡度等基本参数不可能连续变化,因此造成了表 1 所反映出的不同工况下下游边坡比等数值的差异。

图 3 至图 7 的结果表明了三角形基本断面是重

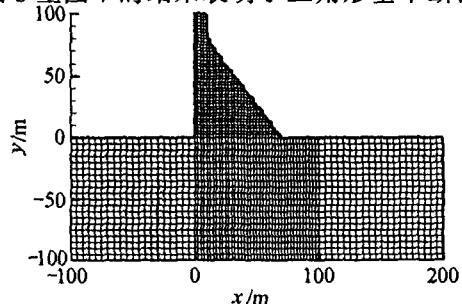


图 3 工况 1 最优基本断面

力坝的重力、水压力、扬压力基本荷载作用下使得坝顶位移最小的坝形。

通过工况 1 与工况 2、工况 3 的比较,可知有限

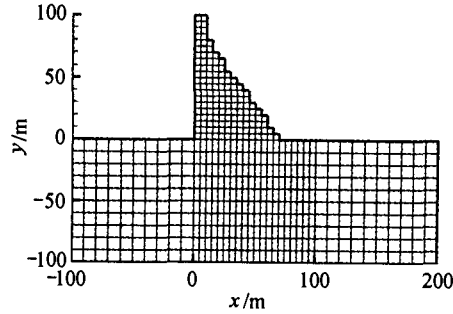


图 4 工况 2 最优基本断面

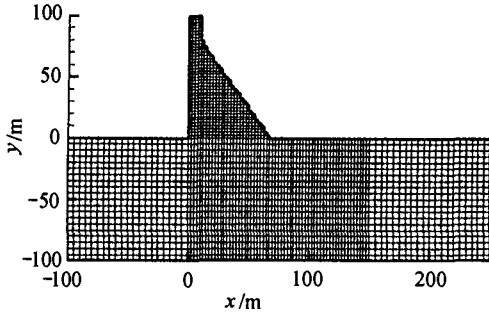


图 5 工况 3 最优基本断面

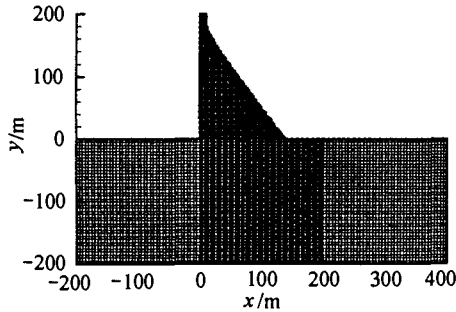


图 6 工况 4 最优基本断面

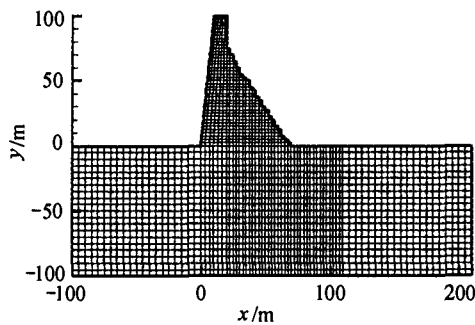


图 7 工况 5 最优基本断面

表 1 不同工况重力坝基本断面优化参数

工况	坝高/ m	坝体断 面面积/ m ²	抗滑稳 定安全 系数	离坝踵 0.03 倍坝高处的 应力/MPa	坝顶顺 河向位 移/m	下游 边坡比
1	100	3393	1.14	0.061	0.0229	0.750
2	100	3475	1.14	0.730	0.0220	0.750
3	100	3300	1.11	0.191	0.0250	0.720
4	200	13000	1.13	0.754	0.1045	0.732
5	100	3325	1.12	0.387	0.0252	0.667

元网格对于重力坝基本剖面的形状没有影响,只是在其精度上有一些差别.可以预见的是,如果采用足够的网格精度,本文中的方法能得到较为平滑的优化解。

通过工况 1 与工况 4 的比较,可知坝高对于基本断面形状优化结果没有影响.而工况 1 与工况 5 的情况说明:当上游坝坡比不为零的时候,重力坝最优剖面仍然是三角形,所不同的是下游边坡显著降低了,这也符合我们的一般概念。

4 结 论

本文运用近些年来发展的结构渐进优化方法,建立坝顶位移约束准则,对重力坝基本断面在基本荷载下的最优断面形状进行了研究,得到了三角形基本断面是重力坝在基本荷载作用下使得坝顶位移最小的一种断面形状的结论,具有一定的理论意义。

需要指出的是,重力坝的体形选择需要考虑稳定、坝体应力、温度控制、施工等多方面因素,忽视任何一个重要因素都会带来很不利的影响。

参考文献:

- [1] 张光斗,王光纶.水工建筑物[M].北京:水利电力出版社,1992.33—54.
- [2] Xie Y M, Steven G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. Computers & Structures, 1993, 49 (5):885—896.
- [3] Li Q, Steven G P, Ouerin O M, et al. Evolutionary shape optimization for stress minimization[J]. Mechanics Research Communications, 1999, 26(6):657—664.
- [4] Chu D N, Xie Y M, Hira A, et al. Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1996, 21(4):239—251.
- [5] Xie Y M, Steven G P. Evolutionary structural optimization for dynamic problems[J]. Computers & Structures, 1996, 58(6):1067—1073.
- [6] Kim H, Querin O M, Steven G P, et al. Method for varying the number of cavities in an optimized topology using evolutionary structural optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2000, 19(2):140—147.

(收稿日期:2004-07-30 编辑:熊水斌)

