

渐进结构拓扑优化在重力坝中的应用研究

孙素敏 苏志敏* 谷俊芹 刘壮添¹

(昆明理工大学电力工程学院,昆明 650051;珠江水科科学研究院¹,广州 510611)

摘要 实体重力坝是重力坝坝型的发展趋势。文章以 ANSYS10.0 为平台,结合 APDL 语言,在传统的渐进结构优化(ESO)思想的基础上,采用结构的应变能删除准则,对实体重力坝非溢流坝段进行拓扑优化。优化结果表明:结构的应力和抗滑稳定性均满足规范要求,且优化结果与工程实际要求较吻合,同时也从数值上验证了此方法对实体重力坝非溢流坝段进行拓扑优化是可行和有效的。

关键词 重力坝 拓扑优化 渐进结构 ANSYS

中图法分类号 TV642.3; **文献标志码** A

渐进结构优化(Evolutionary Structural Optimization, ESO)^[1]的设计理论与方法是由澳大利亚华裔学者谢亿民于1993年提出的,简称渐进法,主要用于连续体结构拓扑优化设计问题。通过逐渐将无效或低效的材料删除,实现连续结构拓扑优化,避免了多变量数学规划求解。渐进法的思想源自于力学准则法,代表了一类基于力学准则法的拓扑优化设计方法。

渐进法的优点是:物理概念明确,利用计算机的分析能力进行求解,简单实用,避免了0—1整数规划的求解困难;与均匀化方法相比较,渐进法具有设计变量少(每个单元只有1个存在与否的状态变量,而在均匀化方法中每个二维单元有3个设计变量、三维单元有6个设计变量等);可借助已有的有限元分析软件,通过迭代过程在计算机上实现,迭代过程算法的通用性好;灵敏度值通过对有限元分析结果进行后处理近似得到,可节省结构重分析时间。渐进法缺点是迭代次数较多,计算效率较低;算法的收敛性还没有得到证明,但许多算例表明了渐进法在解决实际问题中是非常成功的。

总体而言,渐进优化方法尚属一种正在发展中的方法,在解决结构优化问题上虽然具有其它方法不具备的优势,但还存在计算效率低下等诸多缺点,且目前的优化目标主要集中在应力或主应力趋于均匀。

近年来我国在建和拟建的重力坝坝型均采用实体重力坝,形成了以实体重力坝为主的趋势。现尝试用渐进结构拓扑优化方法对实体重力坝非溢流断面进行优化设计。

1 基于应变能准则的实体重力坝拓扑优化设计

重力坝体型的选择,必须适合地形和地质条件,并使工程更为经济,施工与运行较为方便。常见的重力坝体型按断面结构型式一般分为实体重力坝、宽缝重力坝,空腹重力坝和预应力锚索重力坝,根据工程地质和枢纽布置的需要,还出现了具有重力坝特点的混合坝型,如湖北清江隔河岩大坝为上重下拱坝形,就具有了重力坝和拱坝的双重特点。随着时代的发展,设计理论的逐步完善,施工机械水平的提高,为更好地适应机械化施工,缩短施工工期,提前发挥工程效益,近年来我国在建和拟建的重力坝坝型均采用实体重力坝,形成了以实体重力坝为主的趋势^[2]。为此对实体重力坝采用应变能准则进行拓扑优化设计,对实体重力坝进行

2009年7月20日收到

第一作者简介:孙素敏(1979—),河北石家庄人,硕士研究生,研究方向:水工结构分析理论及其工程应用。

通信作者简介:苏志敏(1961—),男,云南昆明人,教授,E-mail:ysszsm@163.com。

拓扑优化的另一个优点是可以避免刚度矩阵病态甚至奇异。

1.1 应变能准则

弹性体在外力作用下,力所做的实功将转化为应变能储存于弹性体中。结构的整体应变能:

$$U = \int_{\Omega} A(\varepsilon) d\Omega \quad (1)$$

式(1)中 $A(\varepsilon)$ 为微元 $d\Omega$ 内由于变形而储存的应变能密度; Ω 为结构区域。

式(1)中, $A(\varepsilon) = \frac{1}{2} \sigma^T \varepsilon$ (2)

式(2)中 $\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T$, $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}]^T$ 。

对系统进行离散,取出一单元分析,则任意一点的应力和应变为

$$\varepsilon = B_e \delta_e, \sigma = D\varepsilon \quad (3)$$

式(3)中: D 为弹性矩阵, $D^T = D$; δ_e 为单元节点位移列阵; B_e 为单元应变矩阵。

$$U_e = \int_{v_e} \frac{1}{2} \delta_e^T B_e^T D B_e \delta_e dv = \frac{1}{2} \delta_e^T k_e \delta_e \quad (4)$$

式(4)中 $k_e = \int_{v_e} B_e^T D B_e dv$ 为单元的刚度矩阵。将各单元的应变能累加,得整个结构的应变能

$$U = \sum_e U_e \quad (5)$$

由应变能的计算式可见,应变能与应力、应变等单一指标相比具有显著的优点:(1)综合性强,可综合考虑到应力、应变等方面;(2)能量是标量,不涉及方向问题,容易计算和比较分析;(3)从应变能出发,考虑结构的性能更加全面。

1.2 基于应变能准则的渐进结构优化设计方法

1.2.1 基于应变能准则的渐进结构优化设计方法的基本算法

应变能能够综合考虑到应力、应变、位移等方面。比用应力或应变单一指标考察结构更加全面,因此可以考虑将应变能准则应用到拓扑优化中。将优化的指标替换为应变能,可得到删除准则;一个理想的结构,其每一部分的应变能应该接近相同的安全水平。由此导得基于局部应变能水平的删除准则;在某一局部,假设应变能较小的材料处于

没有充分利用的状态,于是将该局部材料删除。如此逐渐地删除低应变能的材料,逐渐更新设计,使经过优化后的结构应变能水平变得更均匀。

考虑到传统渐进优化设计方法存在的奇异性,结合重力坝以实体重力坝为主的趋势,提出基于应变能准则的实体重力坝渐进结构优化设计方法。删除低应变能单元时,程序会检查如删除该单元是否会使结构产生空心,如果能产生空心则不删除该单元,以确保优化过程中结构为实体,确保结构不出现奇异。其主要步骤如下。

(1) 根据设计要求,建立有限元模型,定义优化区和非优化区,设定初始删除率 R_{D0} 和终止删除率 R_D 。

(2) 对离散结构进行线性静力分析,提取单元最大压应力,并求出每个单元的应变能 U_e 。

(3) 验证单元最大压应力 σ_-^{\max} 是否满足下式,如满足进入下一步;不满足,结束。

$$\sigma_-^{\max} < [\sigma] \quad (6)$$

式(6)中, σ_-^{\max} 为单元最大压应力

(4) 验证单元应变能 U_e 是否满足式(7),如满足,则检查该单元是否在优化区域的外边界,如是则删除该单元,这样可确保结构内部不出现空腔,也不会出现奇异单元。

$$U_e \leq R_{Di} U_e^{\max} \quad (7)$$

式(7)中, R_{Di} 为单元删除率,按下式计算

$$R_{Di+1} = R_{Di} + R_E \quad (8)$$

式(8)中, R_E 为进化率。 R_{D0} 和 R_E 取值一般为 0.01% ~ 1%,并通过试算来确定。

(5) 优化区域循环一次,则增加删除率。

(6) 用增加的删除率重复步骤(2)~步骤(5),直到单元最大压应力 $\sigma_-^{\max} \geq [\sigma]$ 或达到终止删除率。同样地,在优化过程中,每增加一次删除率,按式(9)和式(10)计算两个性能指标 PI 值(I_{pj})。

$$I_{pj} = \frac{(U_e^{\max})_0 V_0}{(U_e^{\max})_j V_j} \quad (9)$$

其中, $(U_e^{\max})_0$ 为初始最大应变能, $(U_e^{\max})_j$ 为迭代到 j 次时的最大应变能, V_0 为初始设计域的体积, V_j 为迭代到 j 次时的体积。

在优化过程中,性能指标公式能反映拓扑设计

的效率,性能指标 I_p 也能综合反映设计域的体积和应变能的变化水平。 I_p 是无量纲的量^[3]。

1.2.2 迭代停止准则及计算结果验证

为使优化过程能够顺利进行,并能得到结构的最优拓扑,优化过程必须在合适的时刻能够终止。采用的迭代停止准则有:竖向正应力准则(压应力)和应变能删除率准则。

(1) 竖向正应力准则(压应力)

在荷载作用下的应力水平直接体现了结构的安全性,也是结构设计者最为关心的问题。以单元的竖向正应力(压应力)作为优化过程的控制参数之一。若 $\sigma_z^{\max} \geq [\sigma_z]$ 则表明结构已经受压破坏,停止迭代。

(2) 应变能删除率准则

每次优化前,可以定义应变能的初始删除率和终止删除率,在上一个迭代停止准则的基础上,加入此准则目的是在压应力在容许范围内使程序停止迭代,以便进行抗滑稳定计算和拉应力检查。

(3) 抗滑稳定计算

沿坝基的抗滑稳定安全系数 K_s ;

由抗剪强度公式 $K_s = f(\sum W - U)/\sum P$;

设接触面的摩擦系数为 0.6。

(4) 拉应力检查

《混凝土重力坝设计规范》(SL319-2005) 规定,用有限元法计算坝基应力,其上游面拉应力区宽度,宜小于坝底宽度的 0.07 倍或小于坝踵至帷幕中心线的距离。

提取上游 6% 坝宽处节点,列表显示其正应力值,检查其是否出现拉应力。

2 基于应变能准则的实体重力坝拓扑优化设计实例

下面用实体重力坝拓扑优化算法对一实例进行拓扑优化,单元尺寸为 $2 \times 2 \text{ m}^2$,初始删除率定为 0.001,终止删除率定为 0.030。终止准则的最大竖向压应力设为 10 MPa。单元采用 PLANE82 单元,坝体砼的弹性模量 $2.5 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比 0.16,密度

2700 kg/m^3 ;基岩的弹性模量 $2.9 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比 0.3,密度 2600 kg/m^3 。

优化前的初始尺寸见图 1,其中坝高 100 m,坝宽 75 m,坝顶宽 9 m,坝基取 2 倍坝高范围内的半圆。上游水位 98 m,下游水位 5 m,泥沙淤积厚度为 30 m,淤沙的内摩擦角取为 14° ,泥沙的浮容重为 8 kN/m^3 ;灌浆帷幕设在距上游面 10 m 处,扬压力折减系数为 0.25。混凝土与基岩间的摩擦系数取 0.6,用抗剪强度公式来计算坝体沿坝基的抗滑稳定安全系数 K_s 。

优化后的图形见图 2。

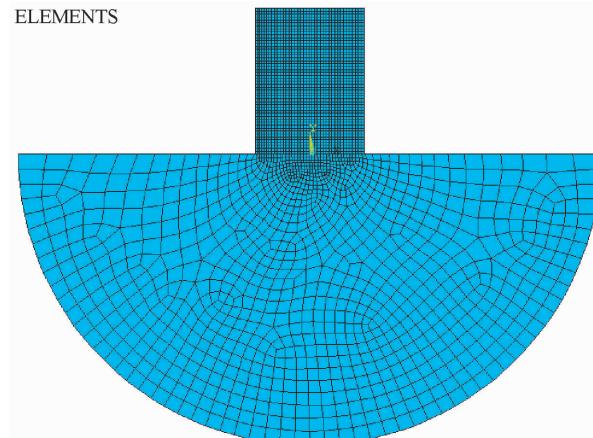


图 1 优化前初始拓扑图

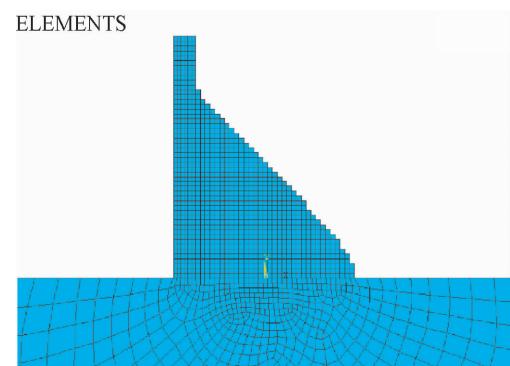


图 2 优化后拓扑图

优化后查看计算结果,计算过程共迭代了三十次。下面给出每次迭代的单元最大竖向压力、单元最大应变能、坝体断面面积、性能指标 I_p 等参数的变化(图 3—图 6):

3 结论

(1) 从图3和图4可直观看出单元最大应变能

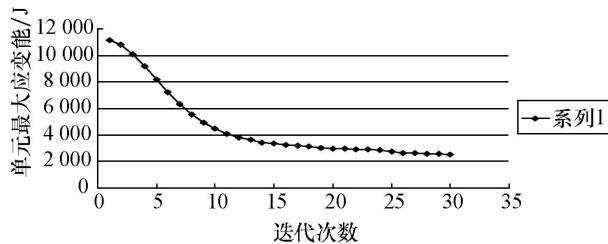


图3 单元最大应变能随迭代次数的变化过程图

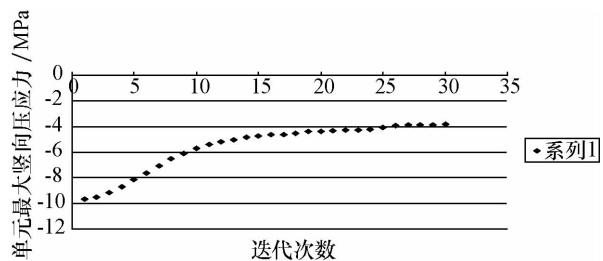


图4 单元最大竖向压应力随迭代次数的变化过程图

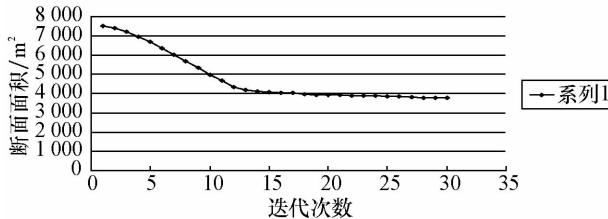


图5 坝体断面面积随迭代次数的变化过程图

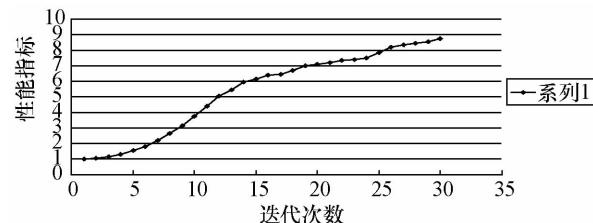


图6 性能指标随迭代次数的变化过程图

和单元最大竖向压应力随迭代次数的变化趋势:随着迭代次数的增加,单元最大应变能和单元最大竖向压应力都呈现逐渐减小的趋势。单元最大竖向压应力未超出限值。

(2) 坝体断面的面积变化如图5所示。可以看出,坝体断面的初始值为7 500 m²,第三十次迭代的断面面积为3 763 m²。优化图形与传统实体重力坝设计是一致的。

(3) 数值算例表明,本方法具有较好的计算稳定性,较好的最优拓扑外形及最优断面面积。

参 考 文 献

- 1 Xie Y M, Steven G P. Evolutionary structural optimization. London: Springer-Verlag London Limited, 1997:30—60
- 2 周建平, 钮新强, 贾金生. 重力坝设计二十年. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- 3 蔡文炳. 基于应变能准则的斜拉桥结构优化设计研究. 南京: 河海大学, 2007

Application of Evolutionary Structural Topology Optimization in Gravity Dam Design

SUN Su-min, SU Zhi-min*, GU Jun-qin, LIU Zhuang-tian¹

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, P. R. China;

Pearl River Hydraulic Research Institute¹, Guangzhou 510611, P. R. China)

[Abstract] The solid gravity dam is the trade of the gravity dam. A topology optimization is made in solid gravity dam using strain energy removal strategy based on the traditional evolutionary structural optimization(ESO) and in terms of ANSYS analysis software platform, as well as APDL language. The calculation results indicate that: the stress and the stability against sliding are fit for the design specification, and the shape of topology structure approaches the one in engineering practical requirements. Which indicates that the proposed method is feasible and effective for the solid gravity dam topology optimization.

[Key words] gravity dam topology optimization evolutionary structural optimization ANSYS