

优化设计方法在浆砌石重力坝设计中的应用

李旺林¹ 刘希成²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013)

摘要 采用优化设计理论,对某水库浆砌石坝横断面进行单变量和双变量优化设计,并讨论优化模型的简化问题,得出以下结论:最佳的优化断面面积比普通的设计断面面积小 22.8%;双变量优化设计断面小于单变量优化设计断面;考虑坝顶交通时,坝顶较宽,采用空腹浆砌石坝比实体浆砌石坝更经济;在优化设计时,忽略不必要的约束条件,可大大简化数学模型。

关键词 浆砌石重力坝;断面设计;单变量优化设计;双变量优化设计

中图分类号:TV641.3+2 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2005)S1-0079-03

在一些中小型工程设计中,常常不考虑优化设计问题,得出的设计断面偏于保守^[1]。本文以某水库浆砌石重力坝设计为例,在传统设计方案的基础上进行了优化设计,得到的优化断面比原设计断面小。

1 浆砌石坝设计简介

某水库浆砌石坝,长 58 m,最大坝高 10 m。坝体材料为 M10 浆砌块石,初拟设计断面见图 1。坝基为中等风化的页岩,岩基容许承载力大于 500 kPa。

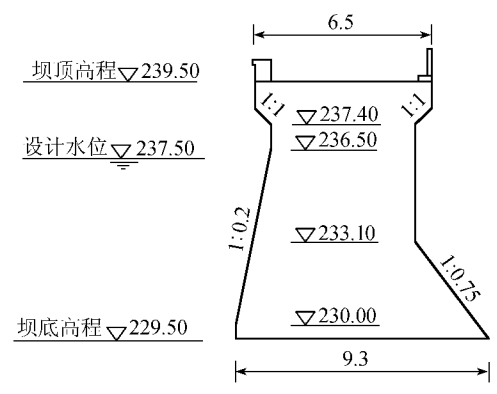


图 1 浆砌石坝标准设计断面(单位:m)

设计中按照规范^[2]的要求进行了抗滑稳定分析和坝体应力分析。

设计中共考虑 5 种计算工况:①施工完建期,考虑的荷载有自重和土压力;②兴利水位正常挡水,考虑的荷载有自重、水压力、扬压力和土压力;③设计洪水水位挡水,考虑的荷载有自重、水压力、扬压力和土压力;④兴利水位挡水加 7 度地震,考虑的荷载有自重、水压力、扬压力、土压力和地震荷载;⑤校核洪

水位挡水,考虑的荷载有自重、水压力、扬压力和土压力。其中前 3 种为基本荷载组合,后 2 种为特殊荷载组合。计算截面取坝体 229.50 m 高程处。

抗滑稳定安全系数 K 的计算公式为

$$K = \frac{\sum (fW)}{\sum P} \tag{1}$$

式中: f 为滑动面上的抗滑摩擦系数; W 为垂直力; $\sum P$ 为水平向滑动力。

稳定计算结果表明:各种工况的抗滑稳定安全系数均满足规范要求,其中工况④为控制工况。

坝体应力计算的内容有上游和下游坝面的垂直正应力、水平正应力、剪应力、主应力。规范^[2]要求坝面应力小于材料的容许应力,并要求下游坝基面的最小垂直正应力不超过 100 kPa(允许拉应力)。坝体应力计算采用文献[3]中推荐的公式,针对该水库岩基上的浆砌石坝,经过计算分析,起控制作用的应力条件为下游坝面垂直正应力 σ_y^d ,计算公式为

$$\sigma_y^d = \frac{\sum W}{T} - \frac{6 \sum M}{T^2} \tag{2}$$

式中: T 为坝体宽度; $\sum W$ 为全部垂直力之和; $\sum M$ 为全部垂直力及水平力对截面形心的力矩之和。

由于坝基容许承载力大于 500 kPa,坝基应力和坝基沉降对该坝不起控制作用。

2 优化设计数学模型

优化设计包括两方面的内容,一是用数学语言

描述实际问题,即建立数学模型;二是分析建立的数学模型,并选用适当的最优化数学方法,求出优化模型的最优解^[4,5]。

浆砌石坝的最优化数学模型包括:①能够表达设计断面和材料的特性,并且反映投资最小的目标函数或方程。对于由单一材料组成的浆砌石坝,其优化模型的目标函数主要由坝体设计断面面积决定。②反映能够表示几何尺寸、抗滑稳定、坝体应力要求的约束条件。约束条件由四部分组成:第一为结构的几何约束,要求变量的几何条件具有实际意义,并满足工程要求;第二为各种工况下抗滑稳安全系数不等式,要求安全系数大于相应规范^[2]要求的最小值;第三为各种工况下坝体应力的不等式,即上游和下游坝面的垂直正应力、水平正应力、剪应力、主应力满足规范的要求;第四为各种工况下坝基应力和坝基沉降不等式,即坝基应力、坝基沉降也满足规范的要求。

3 单变量浆砌石坝优化设计

单变量优化设计假定目标函数中只有一个因素起决定作用,并把这个因素作为自变量,而其他因素不起决定作用,仅按照规范的要求或根据经验确定。

对于浆砌石重力坝,上游坝坡一般较陡且接近直立,而下游坝坡有一定的坡度,因而在进行优化设计时,假定上游坝坡为铅直面,下游坝坡按有关规范取值,这样就可将设计断面形状简化成直角梯形断面,以简化优化的复杂性。影响浆砌石重力坝横断面的主要因素有坝高、坝顶宽度和上、下游坝坡。坝高通常由洪水位及有关因素决定,而与断面的大小无关,对于该坝可看作常量;上、下游坝坡的缓陡影响断面的优化,但对于重力式浆砌石坝而言,一般坝坡较陡,变化幅度有限,不一定起主要作用;只有坝顶宽度决定断面的大小。单变量浆砌石坝优化设计只考虑坝顶宽度一个因素,其计算简图见图2。

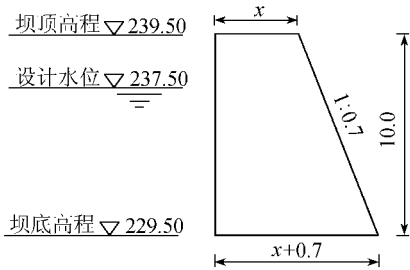


图2 单变量浆砌石坝优化模型(单位:m)

单变量均质材料浆砌石坝优化设计的目标函数可用断面面积表示,而约束条件,如果表示齐全的话,5种工况至少需要50个不等式,增加了优化设计的复杂性。这里假定,在常规设计中起决定作用的约束条件,在优化设计中也起决定作用。根据经验,对于岩基上的浆砌石坝,约束条件可取2个,抗滑稳

定工况中只考虑兴利水位加地震工况,坝体应力和地基应力条件为考虑兴利水位加地震工况的下游坝面垂直应力。

设计变量 x 为坝顶宽度,如图2所示。单变量浆砌石坝优化设计数学模型由式(3)~(6)组成:

$$\min f(x) = 10x + 35 \tag{3}$$

$$\text{s.t. } g_1(x) = x \geq 0 \tag{4}$$

$$g_2(x) = 7.84x - 11.14 \geq 0 \tag{5}$$

$$g_3(x) = 26x^2 + 500.5x + 779.88 \geq 0 \tag{6}$$

式中; $f(x)$ 为目标函数,表示浆砌石坝断面面积; $g_1(x)$ 为坝体顶宽为非负数的几何约束条件; $g_2(x)$ 为由抗滑稳定约束条件得到的简化不等式; $g_3(x)$ 为由坝体应力约束条件得到的简化不等式。浆砌石坝上游坝坡取铅直坡面,下游坝坡取规范规定的平均值1:0.7。

分析单变量浆砌石坝优化模型可知,这是一个非线性约束的优化问题。但通过分析约束条件 $g_3(x)$,发现在 $x \geq 0$ 的条件下, $g_3(x)$ 恒大于0,因而式(6)可以去掉。这样单变量浆砌石坝优化设计数学模型由式(3)~(5)组成,显然这是一个单变量线性优化问题,可直接求解,其最优解为 $x^* = 1.42$, $f(x^*) = 49.2$ 。由此可知,单变量优化设计得出的结果为:坝顶宽度为1.42m,最小断面积为49.2m²。

4 双变量浆砌石坝优化设计

在单变量浆砌石坝优化设计中,只考虑了坝顶宽度一个因素,现在再考虑坝坡对优化设计的影响,这里只考虑下游坡的变化,上游坝坡仍为铅直坡面。双变量浆砌石坝优化设计计算简图见图3。

设计变量 X 取坝顶宽度 x_1 和下游坝坡坡度 x_2 , $X = [x_1, x_2]^T$,如图3所示。双变量浆砌石坝优化设计数学模型由式(7)~(12)组成:

$$\min f(X) = 10x_1 + 50x_2 \tag{7}$$

$$\text{s.t. } g_1(X) = x_1 \geq 0 \tag{8}$$

$$g_2(X) = 7.84x_1 + 29.63x_2 - 31.88 \geq 0 \tag{9}$$

$$g_3(X) = 26x_1^2 + 760x_1x_2 - 31.5x_1 + 2600x_2^2 - 157.5x_2 - 383.87 \geq 0 \tag{10}$$

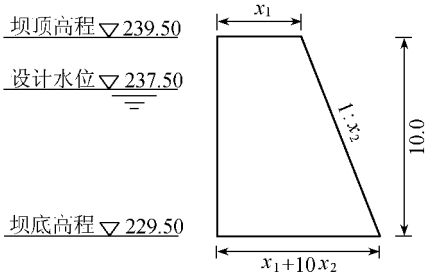


图3 双变量浆砌石坝优化模型(单位:m)

g4(X) = x2 ≥ 0.6 (11)

g5(X) = x2 ≤ 0.8 (12)

式中 f(X), g1(X), g2(X), g3(X) 的含义同单变量优化设计数学模型; g4(X) 和 g5(X) 代表下游坝坡的约束条件。

显然双变量浆砌石坝优化设计数学模型, 也是一个非线性约束的优化问题, 可采用外部罚函数法或 Lagrange 乘子法求解。但通过分析约束条件 g3(X) 发现在 x1 ≥ 0 和 0.8 ≥ x2 ≥ 0.6 的条件下, g3(X) 恒大于零, 因而式 (10) 可以去掉。这样双变量浆砌石坝优化模型就简化为一个双变量线性优化问题, 可采用图解法求解, 其最优解为 X* = [1.79, 0.6]T, f(X*) = 47.9。双变量优化设计得出的结果为: 坝顶宽度为 1.79 m, 下游坡坡度为 1:0.6, 最小断面面积为 47.9 m²。

5 浆砌石坝断面优化设计成果

浆砌石坝单、双变量优化设计与普通设计坝体断面主要参数和成果见表 1。

表 1 浆砌石坝优化设计与普通设计比较

设计方法	坝顶 宽度/m	坝底 宽度/m	上游坡 坡度	下游坡 坡度	断面 面积/m²
普通设计	6.50	9.30	1:0.7	1:0.2	65.9
单变量优化设计	1.42	8.42	1:0.7	1:0	49.2
双变量优化设计	1.79	7.79	1:0.6	1:0	47.9
断面优化设计	6.50	9.30	1:0.7	1:0.2	50.9

从表 1 可以看出: 在满足几何尺寸、抗滑稳定、坝体应力要求的前提下, 双变量优化设计可以得到较优的设计方案, 断面较小, 投资较省。同时也说明, 原设计为了考虑交通要求而采用 5~6 m 的坝顶宽度时, 设计实体浆砌石坝是不经济的, 应考虑采用空腹浆砌石坝。

在进行空腹浆砌石坝的优化设计时, 其分析原理与实体浆砌石坝相同, 但需要增加空腹浆砌石坝应力分析约束条件。从经济的角度出发, 在考虑单、双变量优化设计成果的基础上, 参考原设计, 对原设计断面进行适当的优化, 得到空腹浆砌石坝优化设计断面, 见图 4。

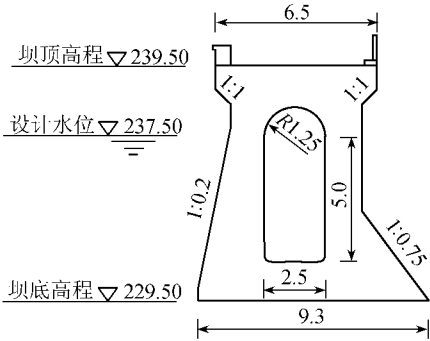


图 4 浆砌石坝优化设计断面(单位: m)

对优化设计断面进行了抗滑稳定分析和有限元坝体应力分析, 结果表明, 抗滑稳定满足规范要求, 坝体内部和表面最小拉应力小于 100 kPa, 满足设计要求。空腹浆砌石坝优化设计同原设计的实体浆砌石坝相比, 断面面积减少 22.8%, 可节约大量工程投资。

6 结 论

a. 双变量优化设计能比单变量优化设计得出更优的设计结果。

b. 在进行单变量优化设计分析时, 如果下游坡坡度也取规范建议的最小值 1:0.6, 同样会得出与双变量优化设计相同的结果。

c. 单、双变量优化设计得出的最小断面面积 (分别为 49.2 m², 47.9 m²) 均比通常设计得出的断面 (65.9 m²) 小 25% 左右, 说明在工程中运用优化设计的理论可得到更经济合理的成果, 从而达到节省工程投资的目的。

d. 如果坝顶有交通要求, 坝顶宽度必须较宽时 (如 5~6 m), 采用实体浆砌石坝将是不经济的, 这时可采用空腹浆砌石坝, 断面面积可减少 22.8%。

e. 在求解优化设计的问题时, 分析和简化约束条件对求解优化数学模型十分重要。本文所讨论的单、双变量优化设计数学模型, 均含有一个非线性的约束条件, 虽说求解非线性约束优化模型并不复杂, 但同线性优化模型相比还是比较复杂的, 通过分析约束条件或实际情况, 简化和去掉一个或多个约束条件, 有可能会大大减轻求解优化模型的工作量。在进行浆砌石坝优化设计时, 如果考虑所有的约束条件, 将是一个含有几十个约束条件的非线性优化问题。本文所涉及到的优化问题, 在忽略次要约束条件和分析实际约束条件独立性的基础上, 将约束条件简化为 3~4 个线性约束条件, 只要采用比较简单的方法就可以得到解答。

以上分析表明: 优化设计的理论和思想对于工程设计具有重要的现实意义, 如果工程设计采用优化设计将会使设计成果更加经济合理。

参考文献:

[1] 王光远, 董明耀. 结构优化设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
[2] SL25—91, 浆砌石坝设计规范[S].
[3] DL5108—1999, 混凝土重力坝设计规范[S].
[4] 孙林松, 王德信, 许世刚. 进化策略在重力坝优化设计中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(4): 104-106.
[5] 杨威, 苏超. 基于的重力坝参数化建模子系统开发[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 21-23.

(收稿日期: 2005-05-23 编辑: 骆超)