

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.011

胶凝面板堆石坝优化设计

蔡 新¹ 施 金² 郭兴文³ 武颖利¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 采用非线性数学规划法对胶凝面板堆石坝进行断面优化设计,建立了以大坝的关键几何尺寸为设计变量,以造价为目标函数,以坝体稳定、应力、应力水平及几何尺寸为约束条件的优化设计数学模型,并采用罚函数法求解此优化模型。与原设计方案比较,优化设计方案的堆石方量少、造价低。与普通面板堆石坝相比,胶凝面板堆石坝的优化方案坝坡可以更陡,堆石方量更少、造价更低,且满足应力、稳定的约束条件,得到的断面安全可靠、经济合理。

关键词 胶凝面板堆石坝;优化设计;设计造价;罚函数法

中图分类号 :TV642 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)01-0043-03

Optimal design of cemented concrete face rockfill dam//CAI Xin¹, SHI Jin², GUO Xing-wen³, WU Yin-li¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The nonlinear mathematical programming method was used for optimal design of cemented concrete face rockfill dam. A mathematic model for optimal design was constructed with the key geometric size of the dam as the design variables, the cost as the objective function, and the stability, stress, stress level, and geometric sizes of the dam body as the constraint conditions, and the penalty function method was employed to solve the optimal model. Compared with the original scheme, the optimal scheme for cemented concrete face rockfill dams is characterized by small rockfill quantity and low cost, and the slope of the cemented concrete face rockfill dam is steeper than that of the common concrete face rockfill dam. The optimal scheme meets the stress and stability constraint conditions, and the cross sections obtained are reliable and economical.

Key words : cemented concrete face rockfill dam; optimal design; cost design; penalty function method

胶凝面板堆石坝是国内外一些坝工专家在总结混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝建筑经验的基础上提出的一种兼有这两种坝型优点的新坝型。用胶凝堆石来反映筑坝材料的特点,用混凝土面板及趾板来体现其防渗结构的特点^[1]。这种新坝型在国外已得到应用,据统计,目前世界上已有 10 多座胶凝面板堆石坝建成或完成设计,如法国的 StMartinde Londerss 坝^[2]、日本的 Nagashima 大坝围堰和水库拦沙坝^[3]。国内对此坝型研究甚少,且尚未付诸于实践。胶凝面板堆石坝较普通面板坝的优点在于有较强的抗冲、抗剪、抗压强度,有更高的变形模量,坝体变形小,可确保面板缝和周边缝的防渗体系工作更安全可靠;与碾压混凝土坝相比,胶凝面板堆石坝对坝体无防渗要求,温度效应小,适应较软的地基,有较高的稳定性和抗震性,还可简化施工。因而该新坝型有较强的竞争力和发展应用前景。本文采用非

线性数学规划方法优化胶凝面板堆石坝断面,计算坝体和面板的应力变形,并进行坝坡稳定分析,为该坝型的设计提供了较为可靠的理论依据,从而为该坝型的推广应用做一些前期的准备工作。

1 优化模型的建立与求解

结构优化设计数学模型的一般形式为

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$$

极小化目标函数 $\min F(X)$

满足约束条件

$$\begin{cases} a_i \leq x_i \leq b_i & (i = 1, 2, \dots, n) \\ h_j(X) = 0 & (j = 1, 2, \dots, p) \\ g_k(X) \geq 0 & (k = 1, 2, \dots, m) \end{cases}$$

式中: b_i, a_i 分别为设计变量 x_i 的上、下限; n 为设计变量的个数; p 为等式约束个数; m 为不等式约束个数。

胶凝面板堆石坝基本断面主要由胶凝堆石、混

凝土面板组成。在断面设计中,其坝高、坝顶宽度及上下游水位都是根据工程规划要求而确定的不变参数。混凝土面板的厚度也已有一定的经验数据供选择,可不作为设计变量。这样描述胶凝面板堆石坝断面的设计变量可取为断面的其他几何特征量,如上下游坝坡的倾角等。

胶凝面板堆石坝在国内还没有付诸于实践,研究时的一些参数和条件参考了国内一些已建混凝土面板堆石坝的资料。某胶凝面板堆石坝拟建于基岩上,设计坝高 35.0 m,上游正常高水位 32.8 m。拟定上下游坡为 1:1.4,坝顶宽度 7 m,混凝土面板厚度 0.35 m。断面如图 1 所示。按大坝工程等级,其坝坡稳定安全系数为 1.15,面板顺坡向允许拉应力为 1000 kPa。普通堆石料的综合比价,分别取为 1.55,考虑胶凝堆石料中掺入了胶凝材料,比价略增大,胶凝堆石料一和胶凝堆石料二(后面文中两组材料)的综合比价分别取 1.6 和 1.58,混凝土面板材料综合比价为 19.3。

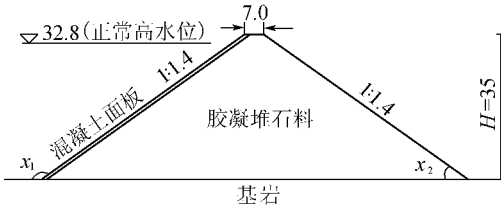


图 1 胶凝面板堆石坝断面(单位:m)

本算例的坝体考虑同一级配和胶凝含量的胶凝堆石,设计变量选上下游坝坡倾角,设计变量的数量为 2 个,参见图 1, $X=[x_1\ x_2]^T$ 。如考虑胶凝堆石料的分区,则设计变量可作相应调整。

工程结构优化设计中一般均以工程造价最低为目标。胶凝面板堆石坝由胶凝堆石填筑而成,故坝断面的总造价可表示为

$$F(X)=\sum_{材料数}C_iS_i$$

式中: C_i 为某类材料的单位比价; S_i 为断面上该种材料的面积。

根据胶凝面板堆石坝的结构特点和工作性态,库水压力作用于上游坝坡,由坝体自重和面板上的水重所产生的抗滑力远大于水平推力,一般不存在整体滑动问题。因而优化设计时的约束条件一般取下列形式:

a. 几何约束。根据国内外工程经验,建造在基岩上的面板坝,上下游可采用 1:1.3~1:1.5 的坝坡。碾压混凝土坝的下游坝坡一般为 1:0.6~1:0.8。考虑到胶凝面板堆石坝的坝坡一般介于普通面板堆石坝与碾压混凝土坝之间,从而可取胶凝面板堆石坝上下游坝坡的上下限为

$$1:1.5\leq|\tan x_i|\leq1:0.6\quad(i=1,2)$$

b. 性态约束。性态约束是规范等对各种工况下大坝应力、稳定等方面的限制。

$$坝坡稳定条件:F_s\geq[F_s]=1.15$$

$$面板应力条件:\sigma\leq[\sigma]=1000\text{ kPa}$$

$$坝体不发生塑性剪切破坏条件:最大应力水平S_L<1.0$$

则图 1 所示基本结构的最优化设计数学模型为

$$\begin{aligned} & \text{求} && X=[x_1\ x_2]^T \\ & \text{使} && \min F(X)=\sum_{材料数}C_iS_i \\ & && \text{s.t.} \begin{cases} 2.395\leq x_1\leq 2.486 \\ 0.656\leq x_2\leq 0.747 \\ F_s\geq 1.15 \\ \sigma\leq 1000 \\ S_L<1.0 \end{cases} \end{aligned}$$

该优化设计问题的目标函数和约束条件都是设计变量的非线性函数,且性态约束都是设计变量的隐函数,因此需选用直接搜索法或将此约束优化问题转化为一系列无约束优化问题的优化方法来求解。本文采用罚函数法求解此最优化模型^[4]。

2 结构分析

为建立性态约束条件必须进行结构的应力应变分析和稳定分析。

应力应变非线性有限元计算中胶凝堆石料的本构模型采用比较成熟的邓肯 $E-\mu$ 模型。面板与垫层堆石间设置无厚度接触面单元。

胶凝堆石材料的性质介于混凝土与岩石之间,研究成果表明^[5],胶凝材料用量增加引起的邓肯模型参数的变化趋势为 c 、 φ 、 k 、 n 、 R_f 增大,而 γ 、 G 、 F 、 D 减小。根据此变化趋势,参考了国内外已建工程的经验,查阅了有关材料手册和岩石力学手册,对比混凝土与岩石的参数,在变化范围内选取两种不同胶凝材料含量的胶凝堆石料的模型参数,两种胶凝堆石料中胶凝材料的含量及用水量如表 1 所示^[6]。各参数选取如表 2 所示。

表 1 两种胶凝堆石料的胶凝含量

坝体材料	水泥用量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粉煤灰用量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	用水量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
胶凝堆石料一	18	9	56
胶凝堆石料二	20	0	50

面板混凝土采用线弹性模型,弹性模量 E 取 $24\times10^6\text{ kPa}$,泊松比 μ 取 0.17,密度 ρ 取 $2.4\times10^3\text{ kg/m}^3$ 。接触面单元参数也参考了公伯峡面板堆石坝的计算资料取定^[7],其中 c 、 K_n 、 K_t 、 m_1 、 δ 、 R_f 依

表 2 各类堆石料的参数

坝体材料	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	K	n	R_f	G	F	D	K_{pr}	n_{pr}
普通堆石料	2.15	0	41.0	1000	0.320	0.660	0.46	0.160	5.200	2100	0.320
胶凝堆石料一	2.12	10.0	43.4	2000	0.330	0.703	0.35	0.140	4.700	2200	0.330
胶凝堆石料二	2.13	8.0	42.1	1850	0.325	0.686	0.40	0.150	4.850	2150	0.325

注：表中参数来源于文献[7]。

次取为 20.0 kPa, 1.0×10^8 A 800 0.56 36.6° 0.74。

坝坡稳定分析采用规范规定的瑞典条分法。

3 成果分析

3.1 优化成果分析

根据 3 种不同坝料的坝截面,分别进行了优化设计研究,得到的成果见表 3 和表 4。

表 3 不同坝料的优化成果比较

坝体材料	上游坝坡		下游坝坡	
	优化前	优化后	优化前	优化后
普通堆石料	1:1.4	1:1.33	1:1.4	1:1.32
胶凝堆石料一	1:1.4	1:0.891	1:1.4	1:0.905
胶凝堆石料二	1:1.4	1:0.989	1:1.4	1:0.983

表 4 不同坝料优化前后的造价比较

坝体材料	坝体断面面积/ m^2		工程造价(比价)		节省造价百分比/%
	优化前	优化后	优化前	优化后	
普通堆石料	1960.0	1868.1250	3712.8	3578.0	3.60
胶凝堆石料一	1960.0	1583.3125	3819.5	2842.7	25.57
胶凝堆石料二	1960.0	1583.3125	3776.8	2977.5	21.16

从表 3、表 4 可以看出,胶凝面板堆石坝优化后的坝坡在 1:1.3 与 1:0.8 之间,验证了胶凝面板堆石坝的坝坡在面板堆石坝与碾压混凝土坝之间,并且坝坡随着胶凝含量的不同可以比较接近碾压混凝土坝。

胶凝面板堆石坝与普通面板堆石坝相比,优化后的坝截面更小,坝坡更陡,所用筑坝材料比较少。胶凝面板堆石坝优化后的坝坡随胶凝材料含量的增加逐渐变陡,上游坝坡从 1:0.989 增大到 1:0.891,下游坝坡从 1:0.983 增大到 1:0.905。优化前后的坝体断面比较见图 2 和图 3。

从图 2、图 3、表 3 和表 4 中可以看出,由于胶凝面板堆石坝中掺入了胶凝材料,单位面积的比价略

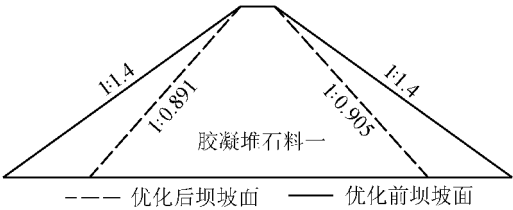


图 2 优化前后坝体断面比较(胶凝堆石料一)

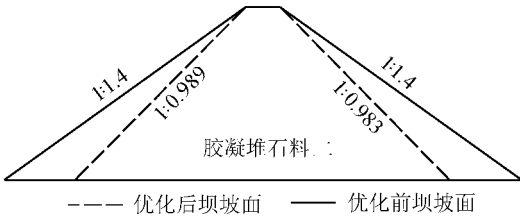


图 3 优化前后坝体断面比较(胶凝堆石料二)

有增大,优化前的胶凝面板堆石坝造价略有增加。优化后,由于胶凝面板堆石坝上下游坝坡倾角的变化,坝体断面的面积显著减小,从而使造价明显减少。胶凝面板堆石坝节省造价百分比比普通堆石坝的大很多。而且,随着胶凝材料含量的增加,节省造价的百分比更可观。

3.2 结构分析结果

坝坡稳定安全系数计算结果见表 5,坝体和面板的应力位移最大值见表 6。

表 5 优化后的坝坡稳定安全系数(瑞典条分法)

坝体材料	上游坝坡	下游坝坡
普通堆石料	1.159 5	1.153 1
胶凝堆石料一	1.153 0	1.167 0
胶凝堆石料二	1.158 8	1.153 8

坝坡稳定安全系数随着胶凝材料含量的增加增大明显。由于坝坡变陡,优化后的安全系数减小了。各类堆石料的坝坡稳定安全系数均将达到临界值 1.15。

表 6 应力、位移最大值

坝体材料	坝体最大竖向位移/cm		坝体最大水平位移/cm		坝体最大大主应力/kPa		坝体最大小主应力/kPa	
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
普通堆石料	-4.94	-5.04	-5.14/5.05	-3.84/5.72	580.30	617.52	367.56	416.71
胶凝堆石料一	-3.28	-3.30	-2.39/2.27	-0.90/2.79	582.69	618.44	257.71	284.53
胶凝堆石料二	-3.73	-3.81	-2.96/2.81	-1.59/3.42	576.84	612.02	300.00	329.63
坝体材料	应力水平		面板最大顺坡向应力/kPa		面板最大法向位移/cm			
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
普通堆石料	0.789	0.769	217.88	-122.06/28.11	-0.16	-1.15		
胶凝堆石料一	0.688	0.715	241.70	-163.45/97.66	-0.14	-1.55		
胶凝堆石料二	0.730	0.746	245.77	-144.94/66.45	-0.13	-1.34		

[6] SMITH T ,ETTEMA R. Flowresistance in ice covered alluvial channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1997 ,123(7) : 15-17.

[7] 姚昆中 ,程原生. 黄河小北干流河津段冰凌灾害及抢险措施[J]. 山西水利 ,2000(1) :24-25.

[8] 罗德传. 电测深法在工程设计中的应用[J]. 物探与化探 ,1985 ,19(4) :307-311.

[9] 蔡琳 ,卢杜田. 水库防凌调度数学模型的研制与开发[J]. 水利学报 ,2000(6) :67-71.

[10] 陈守煜 ,冀鸿兰. 冰凌预报模糊优选神经网络 BP 方法[J]. 水利学报 ,2004(6) :1-7.

[11] LI Jun-heng ,MICHEL A N ,POROD W. Analysis and synthesis of a class of neural networks : linear systems operating on a closed hypercube[J]. IEEE Trans ,1989(11) :1405-1422.

[12] 顾明林 ,王静. 黄河内蒙古河段冰凌研究与冰凌预报数据库系统的设计[J]. 甘肃农业大学学报 ,1999 ,34(3) : 287-290.

[13] 茅泽育 ,吴剑疆 ,余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报 ,2000(1) :153-161.

(收稿日期 2007-01-12 编辑 方宇彤)

(上接第 49 页) 在以下方面加强应对能力的建设^[10] :

- ① 针对应急预案的预见性、针对性和可操作性 ,完善水库防汛应急预案。一旦发生险情 ,能够立即组织下游公众撤离至安全区。
- ② 完善大坝安全监测和分析系统 ,争取 2h 以上的溃坝预警能力。
- ③ 加强对下游公众的安全宣传教育和组织联络工作 ,防患于未然。
- ④ 进一步提高及时组织居民疏散撤离的能力。

5 结 语

沙河水库东副坝溃坝生命损失是在分析溃坝洪水的基础上 ,考虑了溃坝洪水严重性程度、风险人口、警报时间和风险人口对溃坝洪水严重性的理解程度 4 个方面 ,采用 Graham 法估算的 ,可为水库防洪决策提供支撑。虽然生命损失各个参数和计算结果有不确定性成分 ,但是这种计算分析方法已经在国外使用多年 ,有较多的使用经验。随着我国对突发事件生命损失的重视和深入研究 ,参数的不确定性问题将会逐步得到解决。

参考文献 :

[1] 黄玲 ,谈祥. 江苏省溧阳市沙河水库大坝安全评价报告[R]. 上海 :上海勘测设计研究院 ,2006.

[2] 齐宏宇 ,蔡纬良. 江苏省溧阳市沙河、大溪水库大坝安全鉴定地质专题报告[R]. 上海 :上海勘测设计研究院 ,2006.

[3] 李侠 ,霍玉仁. 江苏省溧阳市沙河水库大坝现场安全检查报告[R]. 上海 :上海勘测设计研究院 ,2006.

[4] 谢世勋 ,周锦文 ,郑浩杰. 沙河水库工程水文手册(1958 ~ 1988) [R]. 溧阳 :溧阳县沙河水库管理处 ,1989.

[5] 江苏省溧阳市沙河水库管理处. 溧阳市沙河水库 2006 年控制运用计划[R]. 溧阳 :江苏省溧阳市沙河水库管理处 ,2006.

[6] 李雷 ,盛金保 ,彭雪辉 ,等. 江苏省沙河水库东副坝风险分析研究报告[R]. 南京 :南京水利科学研究院 ,2007.

[7] FREAD D L. An erosion model for earthen dam failures[M]. Maryland : National Weather Service ,1991.

[8] FREAD D L ,LEWIS J M. NWS FLDWAV model[M]. Maryland : National Weather Service ,1998.

[9] 李雷 ,周克发. 大坝溃决导致生命损失估算方法研究现状[J]. 水利水电科技进展 ,2006 ,26(2) :76-80.

[10] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究[D]. 南京 :南京水利科学研究院 ,2006.

(收稿日期 2007-02-27 编辑 方宇彤)

(上接第 45 页) 胶凝面板堆石坝优化后的坝体和面板的应力、位移均不大 ,且有较好的分布规律。

综合应力、变形、稳定的计算结果看 ,优化方案是安全可靠的 ,且有一定的安全储备。

4 结 论

- a. 采用非线性数学规划法对胶凝面板堆石坝进行断面优化设计是可行有效的。
- b. 胶凝面板堆石坝优化方案经济合理、安全可靠。比较优化前后大坝的堆石方量与造价 ,相对于普通面板堆石坝 ,胶凝面板堆石坝优化后的坝坡可以更陡、节省的堆石方量多、造价低。从应力与变形、应力水平、稳定分析结果看 ,优化后的胶凝面板堆石坝均能满足要求 ,是安全可靠的。

参考文献 :

[1] 陆述远 ,唐新军. 一种新坝型——面板胶结堆石坝简介[J]. 长江科学院院报 ,1998 ,15(2) :54-56.

[2] LONDE P. Hardfill dam ,the faced symmetrical fardfill dam :a new concept for R. C. C.[J]. International Water Power & Dam Construction ,1990(2) :19-24.

[3] 李永新 ,何蕴龙 ,乐治济. 胶结砂砾石坝应力与稳定有限元分析[J]. 中国农村水利水电 ,2000(7) :35-38.

[4] 蔡新 ,郭兴文 ,张旭明. 工程结构优化设计[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2003 :87-95.

[5] 李志强 ,侯永峰 ,吕鹏. 茅坪溪土石坝沥青混凝土心墙的材料力学特性[J]. 岩土工程界 ,2003 ,6(1) :73-74.

[6] 唐新军 ,陆述远. 胶结堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1997 ,30(6) :15-18.

[7] 陆希. 公伯峡水电站面板堆石坝应力应变计算[J]. 西北水电 ,2000(1) :34-38.

(收稿日期 2006-12-14 编辑 方宇彤)

