

土石坝广义模糊优化设计

蔡新¹ 杨建贵² 王海祥³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210083;
3. 江苏省滩涂开发投资有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 将广义模糊优化设计理论引入土石坝的优化设计中, 对设计变量的选取及约束条件中模糊性因素的隶属函数作了较为详细的研究. 建立了土石坝断面广义模糊优化设计模型. 采用满足度解法将广义模糊优化模型转化为确定性优化模型进行求解. 结合某面板坝工程实例进行断面优化设计, 考虑约束条件的广义模糊性, 获得了满意的计算结果. 通过初始方案与优化方案的分析比较, 肯定了土石坝断面广义模糊优化设计方案的经济性、合理性与安全可靠性的.

关键词: 优化设计; 土石坝; 模糊性; 隶属函数

中图分类号: TV641; TV314 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2002)01-0024-05

结构优化设计主要包括两大方面, 其一是设计的目标函数, 另一是设计的约束条件. 这两个方面都具有模糊性和随机性等不确定性. 对于任何结构设计问题, 目标函数和约束条件的不确定性主要来源于荷载的不确定性和结构抗力的不确定性, 因此各种不确定性优化设计的区别在于目标函数和约束条件的不确定性因素的性质. 根据约束函数是否具有模糊性, 可以把模糊优化设计分为普通模糊约束优化设计和广义模糊约束优化设计. 普通模糊约束优化是指约束允许区间具有模糊性而约束函数不具有模糊性的优化问题, 广义模糊约束优化是指约束允许区间和约束函数均具有模糊性的优化模型. 土石坝的广义模糊优化设计是考虑土石坝设计中约束允许区间、约束函数和目标函数均具有模糊性的优化设计.

1 土石坝断面优化设计数学模型^[1]

1.1 设计变量

一般土石坝断面的坝高、坝顶宽、库水位都是根据工程规划及实际要求确定的, 这些量是预定参数. 故选取描述土石坝断面形状的关键几何尺寸(如料区分界线及上下游坝坡坡度或倾角 x_i 等)作为设计变量. 图1为面板坝设计变量示意图.

1.2 目标函数

在水工结构优化设计中, 一般都以工程造价为目标值. 图1所示的面板坝由混凝土面板、垫层料、过渡料、堆石料和任意料组成. 因此土石坝坝体的总造价(即目标函数)可以表示为

$$F(X) = \sum_{\text{料区数}} (\text{某种坝料每立方米单价} \times \text{断面上该坝料区的面积}) \times \text{坝的总长}$$

对于特定的工程, 其坝长和所用坝料每立方米单价是已知的, 则优化设计主要通过调整坝体断面各料区的位置和区域范围, 使其满足约束条件, 造价又最省. 若取某种坝料的单价为1, 则其它坝料单价与它的比值即为单价比. 从而, 目标函数简化为

$$F(X) = \sum_{\text{料区数}} (\text{某种坝料单价比 } C_i \times \text{断面上该坝料区的面积}) \quad (1)$$

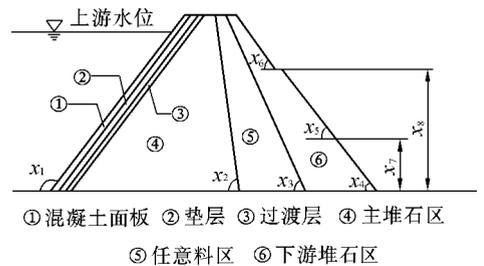


图1 面板坝设计变量示意图

Fig.1 Design variables of concrete-face rockfill dams

1.3 约束条件

a. 几何约束. 几何约束是设计变量应遵循的几何尺寸的取值范围. 土石坝边坡一般根据国内外已建工程的经验拟定.

b. 性态约束. 性态约束是保证土石坝在各种工况条件下正常工作、安全运行所要满足的稳定、应力、变形等方面的限制条件. 土石坝中的性态约束主要有坝坡稳定条件、强度条件、刚度条件、防止塑性剪切破坏条件、渗透稳定条件和防止水力劈裂条件等. 对上述条件, 应根据土石坝的不同坝型(如心墙坝或面板坝)的结构特点和不同的结构分析方法进行选择.

1.4 优化模型的求解方法

土石坝断面优化设计数学模型是单目标非线性数学规划问题. 由于目标函数和约束条件都是设计变量的隐函数, 求导十分困难, 宜采用罚函数法求解. 罚函数的基本思想是构造无约束极值问题, 即将约束条件以惩罚项的形式和目标函数共同构成罚函数, 转化为无约束问题^[2].

2 土石坝广义模糊优化设计数学模型

2.1 土石坝结构设计中的不确定性因素

土石坝作为水利工程中的一种重要的水工建筑物, 大量存在着随机性和模糊性不确定性因素, 如设计的优劣标准、荷载、设计参数、计算模型、材料强度及物理量的允许区间范围, 结构的刚度、稳定性、频率等因素, 它们既具有强烈的随机性, 又具有强烈的模糊性, 而这些因素又直接影响着结构的安全性和经济性. 在进行土石坝结构设计中通常考虑的不确定性因素主要包括: 大坝上下游水位的随机性^[3]; 地震烈度及场地等级划分的不确定性^[4]; 岩土地基或筑坝材料参数的随机性; 土石坝稳定分析和应力应变分析的计算模型的不确定性^[3]; 土石坝结构设计中的容许应力、允许位移、尺寸限制、频率禁区的模糊性; 土石坝坝体材料分区、刚度、稳定性等要求都存在模糊性.

以往土石坝结构设计中的众多值都人为地规定了明确的边界, 实际上这些物理量的边界都具有中介过渡性, 都是实数论域上的模糊子集. 文献[1]中的土石坝断面优化设计, 考虑约束允许范围的模糊性, 从而得到土石坝模糊优化设计模型, 称之为土石坝的普通模糊约束优化设计. 本节中将要讨论的是土石坝的广义模糊约束优化设计, 即同时考虑土石坝优化模型中约束允许范围、约束函数和目标函数的模糊性.

2.2 土石坝广义模糊优化数学模型

根据土石坝断面确定性优化模型, 建立土石坝广义模糊约束优化模型.

$$\left. \begin{aligned} & \text{求 } X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \\ & \min F(X) \\ & \text{s. t. } g_m(\tilde{X}) \subset G_m \quad (m = 1, 2, \dots, M) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中目标函数仍然采用式(1), 即以工程造价最低为目标函数, 同时考虑价格比系数及坝料分界线的模糊性, 并考虑设计变量尺寸限制边界的模糊性. 约束函数 $g_m(\tilde{X})$ 和约束允许区间 G_m 包括模糊性和非模糊性因素, 如考虑土石坝稳定的模糊随机可靠指标为模糊约束函数, 土石坝坝坡稳定的允许可靠指标的模糊性, 土石坝坝体或坝基允许渗透坡降 J 的模糊性以及土石坝坝料价格比系数的模糊性等. 当然, 普通约束函数和普通约束允许区间可以看作模糊约束函数和模糊约束条件的特殊型式. 在实际应用过程中, 根据具体的坝型(心墙坝或面板坝)和不同的分析方法(静力分析或动力分析)选取不同的约束条件.

式(2)中不仅目标函数具有模糊性, 而且约束函数的物理量及其取值允许范围具有模糊性, 故称为广义模糊约束优化设计问题. 若其中完全不考虑各个量的模糊性, 则广义模糊约束优化设计模型退化为常规的优化设计模型.

2.3 隶属函数的选取

隶属度表示在模糊集合中每一个元素属于模糊集合的程度, 可以通过隶属函数来表示. 在土石坝的广义模糊优化问题中, 统一采用斜线型隶属函数进行讨论. 各模糊量的隶属函数的斜线表达式主要有3种形式: 降半梯形分布、升半梯形分布和梯形分布^[5].

材料分区线的倾角 x_i (设计变量)的隶属函数采用梯形分布, 坝坡稳定可采用安全系数或可靠指标表达, 其隶属函数形式用升半梯形分布; 应力水平的隶属函数用降半梯形分布, 最大主应力 σ_1 或面板主应力的隶属函数为降半梯形分布; 坝体沉降 V 的隶属函数为降半梯形分布.

在进行土石坝断面的优化设计时, 应根据工程实例进行具体分析, 选择目标函数、设计变量和约束条件

中的模糊性因素及其隶属函数.

2.4 土石坝广义模糊优化模型的解法

对式(2)所表达的广义模糊约束优化问题,采用满足度解法求解.即先将广义模糊约束优化问题转化为普通模糊约束的优化问题,然后用“水平截集解法”求出一系列λ-水平的最优解^[4].对求得的一系列优化解,可以进一步用一维搜索法求最优设防水平和最满意方案.

3 算例

3.1 工程概况

某混凝土面板坝典型断面如图2所示,最大坝高129.0m,坝顶高程2010.0m,正常蓄水位高程2005.0m.大坝为Ⅰ级建筑物,坝基良好.坝坡稳定计算及应力应变分析(Duncan E-B模型)的材料参数见表1,试进行断面优化设计.

表1 坝料计算参数
Table 1 Calculation parameters of dam materials

材料	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	C	φ ($^\circ$)	φ_0 ($^\circ$)	$\Delta\varphi$ ($^\circ$)	K	n	K_{ur}	n_{ur}	R_f	K_b	M
垫层料	22.0	0	42	55	12.0	1000	0.32	2100	0.32	0.60	660	0.30
堆石料	21.5	0	41	54	12.0	1000	0.32	2100	0.32	0.66	630	0.30
砂砾石料	22.0	0	40	53	10.7	900	0.50	1890	0.50	0.77	500	0.40
强风化料	21.0	0	39	50	11.3	450	0.30	950	0.30	0.65	280	0.25

注:面板混凝土: $E=1.5\times 10^7\text{ kPa}$, $\mu=0.17$, $\gamma=24.0\text{ kN/m}^3$.

3.2 计算参数及模型

取设计变量为坝料分界线与水平方向的夹角,则基本设计变量 $X=[x_1, x_2, x_3, x_4]$ (以弧度表示),以造价 $F(X)$ 为目标函数.设主堆石料的价格比系数为1.0,根据该工程的实际情况,拟定强风化料、垫层过渡料、砂砾石料、混凝土面板的单价比系数分别为0.7,1.2,0.9,12.5.

按照国外工程经验取坝体允许最大沉降 $[V]=H/150$ (m)(H 为坝高,单位m);混凝土面板允许最大挠度 $[\delta]=H/200$ (m);按工程经验取坝体允许最大主应力 $[\sigma_1]=2\gamma H$ (H 为坝高, γ 为堆石体容重).

面板应力条件 $\sigma \leq [\sigma]$,蓄水期面板顺坡向应力 σ 满足模糊约束条件.普通模糊约束的允许范围取模糊边界,其隶属函数采用降半梯形分布,取 $[\sigma]=2.0\text{ MPa}$,并取 $d_\sigma^L=0$. $[\sigma]$ 坝体的最大应力水平 SL 不超过1.0.由设计院提供的几何约束条件为 $X^L=[2.485, 1.500, 0.785, 0.500]^T$, $X^U=[2.554, 2.300, 1.200, 0.650]^T$,初始方案为 $X^0=[2.52, 2.220, 1.090, 0.530]^T$.文中带上标 L 者表示该指标的下限,带上标 U 者表示该指标的上限.取几何约束条件中的上下限允许值为模糊边界,即考虑基本变量的模糊性,其隶属函数的形式采用梯形分布,取 $d_{x_i}^L=0.1x_i^L$, $d_{x_i}^U=0.1x_i^U$ ($i=1, 2, 3, 4$).

坝坡稳定约束条件 $g(X) \in G_1$,考虑坝坡稳定约束条件为广义模糊约束条件,即约束函数 g_1 和约束允许范围 G_1 均具有模糊性.约束函数 g_1 为坝坡稳定的模糊随机可靠指标,通过对坝坡进行模糊随机可靠度分析得到.其隶属函数形式采用升半梯形分布,在按国标取目标可靠指标 $\beta=3.7^{[6]}$, $d_\beta^L=0.1$.在对坝坡稳定的模糊随机可靠性分析时,考虑土石料参数的模糊性和随机性,并且土石料的容重、粘聚力和内摩擦角均服从模糊正态分布,即 $\tilde{m}_f = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha[U+c \times (\alpha-1), U+c \times (1-\alpha)]$ (U 为土性参数的均值, c 取均值的10%).设模糊随机极限状态值为三角模糊数,即 $\tilde{b} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha[0.1 \times (\alpha-1), 0.1 \times (1-\alpha)]$.土石料容重、粘聚力和内摩擦角的空间变异系数分别取0.0058,0.0,0.095.计算中不考虑不同料区之间的土石料参数的互相关性,考虑同一料区的土石料容重、粘聚力和内摩擦角之间的相关性.则该面板坝断面广义模糊优化数学模型为:

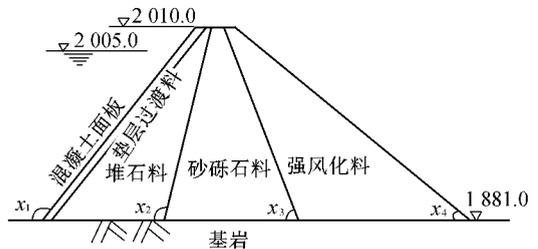


图2 某面板坝典型断面

Fig.2 Typical section of a concrete-face rockfill dam

$$\text{求 } X = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \quad \min F(X)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} W(X) \leq 0.86(\text{m}) \\ \delta(X) \leq 0.645(\text{m}) \\ \sigma_1(X) \leq 2.58(\text{MPa}) \\ SL < 1.0 \\ \alpha(X) \leq 2.0(\text{MPa}) \\ \mathbf{g}_1(X) \in \mathbf{G}_1 \\ 2.485 \leq x_1 \leq 2.554 \\ 1.500 \leq x_2 \leq 2.300 \\ 0.785 \leq x_3 \leq 1.200 \\ 0.500 \leq x_4 \leq 0.650 \end{cases} \quad (3)$$

此模型中包含有广义模糊约束、普通模糊约束及普通约束,是一个广义模糊规划问题.采用满足度解法,将广义模糊规划问题转化为非模糊规划系列,

$$\begin{aligned} & \text{求 } X_\lambda = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \quad \min F(\lambda) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} W(\lambda) \leq 0.86(\text{m}) \\ \delta(\lambda) \leq 0.645(\text{m}) \\ \sigma_1(\lambda) \leq 2.58(\text{MPa}) \\ SL < 1.0 \\ \alpha(\lambda) \leq 2.0 + 0.1 \times 2.0 \times \lambda(\text{MPa}) \\ \beta_1 \geq \lambda \\ 2.485 - 0.1 \times 2.485 \times \lambda \leq x_1 \leq 2.554 + 0.1 \times 2.554 \times \lambda \\ 1.500 - 0.1 \times 1.500 \times \lambda \leq x_2 \leq 2.300 + 0.1 \times 2.300 \times \lambda \\ 0.785 - 0.1 \times 0.785 \times \lambda \leq x_3 \leq 1.200 + 0.1 \times 1.200 \times \lambda \\ 0.500 - 0.1 \times 0.500 \times \lambda \leq x_4 \leq 0.650 + 0.1 \times 0.650 \times \lambda \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

式中: β_1 ——坝坡稳定的可靠指标对允许可靠指标的满足度; λ ——水平截集值($0 < \lambda < 1$).

对任一确定的 λ ,此模型为普通优化问题,采用混合罚函数法进行求解.

3.3 结果

a. 广义模糊优化满意解.对不同的 λ 值,求解非线性规划问题式(4)得到一系列优化解 $X^*(\lambda)$ 和相应的 $F^*(\lambda)$,计算结果见表 2,优化解中目标函数与水平截集值 λ 的关系见图 3.

表 2 具有 λ -水平的最优解

Table 2 Optimum solution of λ constraint level

设计变量和 目标函数	λ										初始方案	
	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9		1.0
$x_1^*(^\circ)$	141.9967	141.9681	141.8472	142.1434	142.1525	142.3135	143.275	143.8474	143.9499	143.9837	144.3263	144.3854
$x_2^*(^\circ)$	129.7314	129.7314	127.8292	129.7188	127.8269	127.8842	132.8895	132.8872	132.4403	127.2597	132.061	127.1966
$x_3^*(^\circ)$	68.89359	72.53187	74.7836	73.8491	73.00915	67.44172	74.1247	74.12412	74.20319	67.69897	73.97401	62.4524
$x_4^*(^\circ)$	32.66604	32.20768	31.93781	31.74874	31.27662	31.34366	31.22677	30.81482	30.81195	30.77299	30.61886	30.36676
$F^*(\lambda)$	21786.2	21819.5	21844.7	22011.9	22324.3	22480.2	22798.5	22956.6	23009.1	23141.2	23262.2	24496.1

b. 广义模糊优化最满意设计方案.根据表 2 求得的优化解,进一步考虑求最优设防水平和最满意设计方案.取该面板坝损失期望 $E(\lambda) = ae^{-(b\lambda + c)}$,由于该面板坝为 I 级建筑物,按王光远院士建议应取较大的 a, b 值,较小的 c 值,本工程可取^[7] $a = 27000, b = 5, c = 0$,即 $E(\lambda) = 27000e^{-5\lambda}$.

将图 4 中 $\lambda \sim F^*(\lambda)$ 拟合成连续曲线,有

$$F(\lambda) = 5276.8\lambda^4 - 13983\lambda^3 + 11731\lambda^2 - 1587.9\lambda + 21812$$

则综合效用目标函数可表示为

$$W(\lambda) = 27000e^{-5\lambda} + 5276.8\lambda^4 + 13983\lambda^3 + 11731\lambda^2 - 1587.9\lambda + 21812 \quad (5)$$

采用一维极小化方法可以求得 $\lambda^* = 0.8688, W_{\lambda^*} = 23318.5$,由此可以求得最满意方案为

$$X^* = [2.51281 \quad 2.24931 \quad 1.21699 \quad 0.53730]^T \quad (\text{rad})$$

或 $X^* = [143.97 \quad 128.88 \quad 69.73 \quad 30.79]^T \quad (^\circ)$

与最满意方案对应的该面板坝的造价 $F^* = 23123.8$.

3.4 结果分析

由表2可以看出,随着水平截集值 λ 的增大,设计变量 x_1 增大, x_4 减小,即随着约束水平的增强,优化方案的上下游坝坡逐渐变缓,与此相对应的优化方案的目标函数即造价逐渐增大,这与坝坡上下游模糊可靠指标的变化规律相一致,说明坝坡稳定约束是面板坝广义模糊优化设计模型中的主要约束条件,更好地解决坝坡稳定约束问题对提高土石坝优化效果具有较大作用.初始设计方案的目标函数值 $F_{初} = 24496.1$,最满意设计方案目标函数值 $F^* = 23123.8$,即最满意方案比初始设计方案在造价上节省5.6%.当 $\lambda = 1.0$ 时,可以得到只考虑约束函数的模糊性而不考虑约束函数允许范围的模糊性时的优化方案.当采用常规优化方法,即不考虑约束的模糊性时,得到最优方案的造价为 $F_{常} = 23640.1$,常规优化方案比初始方案在造价上节省3.5%.

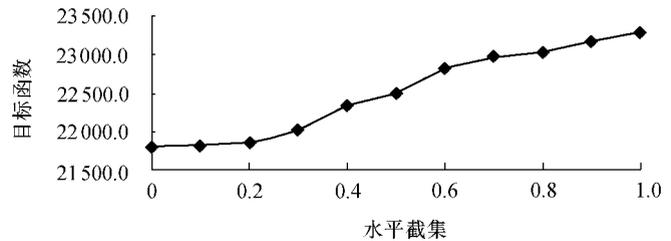


图3 满意解变化趋势

Fig.3 Variation of satisfaction solution

4 结 论

a. 土石坝广义模糊优化方案比常规优化方案具有更高的经济效益,最满意方案既考虑了面板坝当前的投资,又考虑了该工程长远的维修保养及抵抗自然灾害等方面的经济效益.

b. 本文中所提出的土石坝广义模糊优化设计比常规优化设计在计算工作量上要大多,而且处理模糊性因素时有一定的近似性,但是能够考虑到这种主观模糊性比不考虑是一大进步.

c. 本文土石坝的广义模糊断面优化设计只涉及目标函数和约束的模糊性因素,在条件成熟时,可以考虑建立土石坝普遍型模糊随机优化模型,全面地分析土石坝结构的整体性能.另外工程损失期望值无法表达为设计向量的显式函数,只能采用经验公式近似计算,其准确性有待进一步提高.

参考文献:

- [1] 蔡新, 王德信. 混凝土面板堆石坝模糊优化设计[J]. 河海大学学报, 1997, 25(4): 8~13.
- [2] 顾浩, 王德信. 混凝土面板堆石坝断面优化设计[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 96~101.
- [3] 刘宁, 郑建青. 工程随机力学及可靠性理论中的若干问题(上)[J]. 河海大学学报, 1999, 27(5): 1~7.
- [4] 王光远. 工程软设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 70~91.
- [5] 陈鸣钊, 张志烈, 樊宝康, 等. 模糊数学及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1993. 48~52.
- [6] GB50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].

Generalized Fuzzy Optimum Design of Earth-Rock Dam

CAI Xin¹, YANG Jian-gui², WANG Hai-xiang³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Bureau of Nanjing Yangtze Waterway Management, Nanjing 210083, China;

3. Jiangsu Beach Exploitation Investment Company Limited, Nanjing 210003, China)

Abstract: The generalized fuzzy optimum method is introduced into earth-rock dam design, and the membership function under constraint conditions and design variables are studied. Based on deterministic cross-section optimal design for earth-rock dams, a mathematical model of generalized fuzzy optimum is established for dam cross-section design. The model is converted into deterministic cross-section optimal design by the satisfaction degree method. A practical optimum design of a dam section proves the optimal form to be reasonable.

Key words: optimum design; earth-rock dam; fuzziness; membership function