

# 抗滑桩模糊优化设计

张 洁, 尚岳全, 吕 庆

(浙江大学土木工程系, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 抗滑桩设计模型中含有大量的模糊参数。考虑抗滑桩设计中参数的模糊性, 根据相关规范在抗滑桩普通优化模型基础上建立了抗滑桩实用模糊优化模型, 给出了求解该模糊优化模型的计算方法, 通过一个具体实例显示了该模型和方法的优化效果, 并与普通优化模型优化结果做出了比较。结果显示, 考虑参数模糊性后优化方案更为优秀、合理。

**关键词:** 滑坡; 抗滑桩; 模糊; 优化

**中图分类号:** P642.22 TU47

**文献标识码:** A

在滑坡治理工程中, 大量使用抗滑桩。如浙江省上(虞)三(门)高速公路建设中的 6 号滑坡就采用抗滑桩多达 206 根, 工程费用巨大。因此, 研究抗滑桩的优化设计具有重要的意义。

传统的优化模型假设所有的设计参数都是确定的, 但是绝大多数实际工程都很难精确描述, 本质上是模糊的。忽视实际工程的模糊性, 可能导致设计变量和目标函数不能达到应有的取值范围, 漏掉真正的优化方案<sup>[1-3]</sup>。抗滑桩优化设计模型也含有大量的模糊因素, 如规范或工程经验规定的容许量值、抗滑桩的物理力学性质参数等。因此, 在抗滑桩优化设计中考虑实际工程的模糊性也即进行模糊优化设计是必要的。但是, 长期以来各种抗滑桩分析模型中都没有考虑参数的模糊性, 而近期提出的抗滑桩分析模型<sup>[4]</sup>也是把各种参数当成确定的。

王光远<sup>[5]</sup>于 20 世纪 80 年代初提出了结构模糊优化设计的概念, 张立翔<sup>[6]</sup>将此理论初步应用于工程实际。其他学者就模糊优化理论的工程应用也做了一些研究, 但都局限于模糊优化设计概念或某一类问题的研究上, 对具体工程进行系统模糊优化设计国内还很少见<sup>[7]</sup>。本文结合抗滑桩设计规范建立抗滑桩实用模糊优化模型, 将模糊优化理论

系统应用于滑坡治理中抗滑桩的设计, 使优化设计更为合理。

## 1 抗滑桩端面普通优化设计数学模型

为突出问题的主要矛盾, 假定抗滑桩的内力分布, 抗滑桩的长度, 锚固深度都已知或是按照经验确定<sup>[8]</sup>, 在此基础上进行抗滑桩的优化设计。这里选定桩的截面高度  $h$ , 截面宽度  $b$ , 纵向受拉钢筋截面积  $A_s$  为设计变量

$$X = [x_1, x_2, x_3]^T \\ = [h, b, A_s]$$

工程结构优化设计中一般均以工程造价最低为目标, 所以抗滑桩选用的目标函数为

$$f(X) = \sum \text{某材料单价比} \times \text{桩长} \times \text{截面面积} \quad (1)$$

根据抗滑桩设计规范<sup>[8]</sup>, 抗滑桩的设计要考虑最大配筋要求、最小配筋率要求、正截面抗弯要求、斜截面抗剪要求、斜截面强度要求、最小配箍要求、几何尺寸上下限要求共 12 个约束。为了节约篇幅, 这里只列出了最大配筋要求及其处理方法。其余约束均应按相同方法整理成下面的统一形式。最大配筋要求为

收稿日期(Received date): 2003-09-11; 改回日期(Accepted): 2003-11-10.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(49972091) [The Item is Funded by National Natural Science Foundation of China (No. 49972091)]

作者简介(Biography): 张洁(1980-), 男(汉), 湖北京山人, 现为浙江大学土木工程系研究生, 电话: 0571-87951987。 [Zhang Jie (1980-), Male, the Han Nationality, Born in Hubei Province, China. Graduate student of Civil Engineering Department, Zhejiang University.]

$$\frac{A_s}{bh_0} \leq \frac{0.544 f_{cm}}{f_y} \quad (2)$$

式中  $f_{cm}$  为混凝土弯曲抗压强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>);  $f_y$  为纵向受拉钢筋抗拉强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>); 0.544 是指钢筋混凝土构件的相对界限受压区高度  $\xi_b$  (II级钢)。

为了编程以及建立模糊优化模型的方便,上式整理成

$$g_1(X) = 1 - 0.544 f_{cm} (x_1 - a_0) x_2 / (x_3 f_y) < 0 \quad (3)$$

根据上述目标函数、自变量、约束方程的定义,可得抗滑桩优化设计模型为

$$\begin{aligned} & X, \min f(X) \\ & s. t. \quad g_i(X) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, 12) \end{aligned} \quad (4)$$

## 2 抗滑桩端面模糊优化设计数学模型

模糊性是由于不可能给事物明确的定义和评定标准而形成的不确定性,其特点是事物的边界不清晰<sup>[9]</sup>。模糊性一般以隶属函数来描述,隶属函数的曲线部分主要是表示物理量允许取值范围边界的逐渐过渡性。土木工程中常用的隶属度函数有图1中几种形式<sup>[9]</sup>。

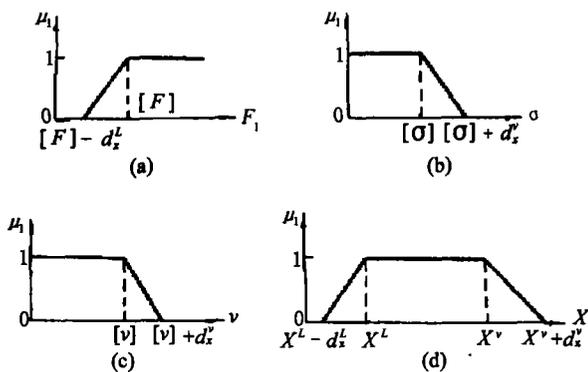


图1 土木工程中常用的隶属度函数

Fig. 1 Major membership functions in civil engineering

由于模型(4)中所有约束均取为  $g_i(X) \leq 0$  的形式,所以可以统一选取图1中(b)形式的隶属度。第  $i$  个约束对应的隶属度函数为

$$\mu[g_i(X)] = \begin{cases} 1 & g_i(X) < 0 \\ 1 - \frac{g_i(X)}{0.04\alpha_i} & 0 < g_i(X) < 0.04 \\ 0 & g_i(X) > 0.04 \end{cases} \quad (5)$$

上式中  $0.04\alpha_i$  是约束的比例模糊区间,而区别于常规的绝对模糊区间。其好处是可以把所有的模糊约束都用相同的形式来表达,从而为问题的数学处理带来方便。其中  $\alpha_i$  是与约束重要性程度有关的一个系数;当约束重要时,  $\alpha_i$  可取较小的值,相应模糊区间变小;当约束相对不重要时候,  $\alpha_i$  取较大的值,相应模糊区间变大。这样可以防止次要约束对整个优化设计方案起控制作用,或者减轻次要约束对优化设计方案的控制作用,从而使优化方案更为合理。

抗滑桩各约束按重要性程度可分为三个等级:正截面抗弯要求、斜截面抗剪要求、斜截面强度要求为强度约束、重要性水平最高,故  $\alpha_i$  取为 1.0;最大配筋要求、最小配筋率要求、最小配箍要求为构造约束,重要性水平其次,  $\alpha_i$  可取为 1.2;几何尺寸上下限约束重要性水平最低,相应  $\alpha_i$  可取为 1.5。

按上述规则依次写出隶属度函数  $\mu_i(g_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$ , 于是所建立的模糊优化模型可记做

$$\begin{aligned} & X, \min f(X) \\ & s. t. \quad g_i(X) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, 12) \end{aligned} \quad (6)$$

## 3 模糊优化问题的求解

采用水平截集法对模型(6)进行求解<sup>[10,11]</sup>,则模型(6)所示的模糊优化问题就转化为具有  $\lambda$  约束水平的非模糊优化设计问题,即求

$$\begin{aligned} & X, \min f(X) \\ & s. t. \quad g_{i\lambda}(X) \leq 0 \quad \lambda \in [0, 1] \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $g_{i\lambda}(X) < 0$  表示  $\lambda$  水平下的约束。

模型(7)可由常规结构优化设计的各种方法<sup>[12]</sup>求解出具有  $\lambda$  约束水平的最优解  $X$  和  $f$ ;取不同约束水平得到的最优设计方案  $X$ ;组成设计空间的一个优化点序列  $f$ ,这个优化点序列组成原模糊优化设计问题的解。既然模糊优化设计的结果是多个优化点,则自然存在从这些点中进一步优选最满意解的问题,也即如何确定最优约束水平  $\lambda^*$ 。  $\lambda^*$  可以由最大隶属度原则<sup>[13]</sup>确定。

文献<sup>[13]</sup>指出:考虑到  $f$  为非模糊变量,将  $f$  标准化到  $[0, 1]$  区间所得的函数看作  $f$  的隶属度函数  $\mu_f$  后,最大隶属度准则的判决准则为

$$\lambda^* = \mu_f(\lambda^*) \quad (8)$$

式(8)左侧的就是约束水平,即设计方案对可行域的隶属度;右侧为设计方案对目标函数的隶属度;所以

可以把上式理解成对目标和约束等同照顾,而使  $\mu_g = \mu_f$ 。

抗滑桩模糊优化设计中采用正弦三角函数作为  $f$  的标准化函数,而相应的隶属度函数为

$$\mu_f(\lambda) = \sin \frac{f(\lambda) - f(1)}{f(0) - f(1)} \quad (9)$$

由(8)和(9)可以确定最优约束水平  $\lambda^*$ 。

对模型(7)可采用复合型法<sup>[11]</sup>求解。对(9)的求解可以采用牛顿法<sup>[10]</sup>进行。

## 4 应用实例

下面以浙江省上三高速公路 K92 + 120 ~ K92 + 28 段的抗滑桩设计为例,用上述模型进行模糊优化设计。

该段滑坡是由路基开挖引起的,滑坡体中含角砾、碎石亚粘土层,滑面为亚粘土。通过滑带土的室内剪切试验和滑面强度的分析计算,获得滑面的强度参数为  $c = 39\text{KPa}$ ,  $\phi = 12^\circ$ 。滑体的重度为  $\gamma = 19.5\text{KN/m}^3$ 。滑体的安全系数取为 1.25,则剩余滑坡推力为  $1.5\text{MN/m}$ 。

滑坡采用人工挖孔悬臂式抗滑桩,拟定桩身截面尺寸为  $1.8\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ,桩距为  $5.0\text{ m}$ ,桩长为  $17.8\text{ m}$ ,其中基岩以上为  $12.8\text{ m}$ 。

钢筋混凝土抗滑桩采用 C<sub>25</sub>混凝土,其中  $f_c = 12.5\text{N/mm}^2$ ,  $f_{cm} = 13.5\text{N/mm}^2$ ;

纵向受拉钢筋、架立钢筋,拉结筋采用二级钢筋,其中  $f_y = 310\text{N/mm}^2$ ,  $f_{yk} = 310\text{N/mm}^2$ ;

箍筋、腰筋采用一级钢筋,其中  $f_{yk} = 210\text{N/mm}^2$ 。

由计算得抗滑桩截面弯矩、剪力为

$$M = 4.6 \times 10^{10}\text{N} \cdot \text{m}$$

$$Q = 7.8 \times 10^6\text{N}$$

按照混凝土  $280\text{元/m}^3$ ,钢筋  $3\,000\text{元/m}^3$  来对该抗滑桩进行优化设计。首先根据上述步骤建立模糊优化模型,然后应用水平截集法进行求解。水平截集法的求解思想是通过对  $\lambda$  进行离散取值,计算不同  $\lambda$  约束水平下的优化效果,从而获得离散的  $\lambda - f$  表,然后对  $\lambda - f$  表进行函数拟合,进而获得连续的,以函数形式表达的  $\lambda - f$  关系。 $\lambda$  的离散程度是否合适以离散的  $\lambda - f$  表是否能够反映  $f = f(\lambda)$  关系为准; $f = f(\lambda)$  的非线性越强, $\lambda$  的离散程度应越大。表 1 是按上述原则对  $\lambda$  进行离散进而获得的  $\lambda - f$  离散表格。

表 1 不同  $\lambda$  约束水平下的优化效果

Table 1 Optimization results for different  $\lambda$

$\lambda$	1	0.875	0.75	0.625	0.5	0.375	0.25	0.125	0
$f(\text{元})$	52261	51745	51229	50713	50197	49681	49165	48649	48133

对表 1 中数据进行拟合得

$$f(\lambda) = 52261 - 4142\lambda \quad (10)$$

将(11)代入(10)可得目标函数隶属度函数

$$\mu_f(\lambda) = \sin(1 - \lambda) \quad (11)$$

将(10)、(11)代入模型(9)并求解可以得到  $\lambda^* = 0.4895$ ,从而求出模糊最优方案为  $2\,649\text{ mm} \times 1\,694\text{ mm}$ ,钢筋面积为  $62\,002\text{ mm}^2$ ,目标函数值为  $50\,153\text{元}$ ,比原设计方案节约  $17.80\%$ 。从模糊约束满足的情况来看,高宽比基本达到临界限值,而其余约束都有不等量的富余值。因此此模糊方案是合理可靠的。

当时  $\lambda = 0$ ,所有约束都充分满足,此时对应的方案为普通最优方案,此时截面特征为  $2\,649\text{ mm} \times 1\,766\text{ mm}$ ,钢筋面积  $64\,638\text{ mm}^2$ ;相应的目标函数为  $52\,261\text{元}$ 。模糊最优方案与之相比也节约了  $4.03\%$ 。

## 5 结论

抗滑桩优化设计涉及大量的模糊因素,这些模糊因素的影响主要体现在边界不清晰上。本文在相关规范的基础上通过对抗滑桩普通优化模型边界的模糊处理,建立了抗滑桩设计的实用模糊优化模型。该模型可用水平截集法进行求解。与普通优化模型相比,文中提出的抗滑桩模糊优化模型由于考虑了事物的客观模糊性,可以获得更优越、更科学的优化方案。

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Xiuli, Liang Yinchun, Dongsben. Extended methods for fuzzy optimal design of structures[J]. *Machine Design and Research*, 1999, (2): 27~29. [张秀利, 梁迎春, 董申. 扩展的结构模糊优化设计方法[J]. *机械设计与研究*, 1999, (2): 27~29.]
- [2] H.A. Jensen, A.E. Sepulveda. Use of approximation concepts in fuzzy design problems [J]. *Advances in Engineering Software*, 2000, 31 (4): 263~273.
- [3] Rao SS. Description and optimum design of fuzzy structural systems [J]. *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1987, 109: 126~32.

- [4] Wang Chenghua, Chen Yongbo, Lin Lixiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 556~559. [王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析 [J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556~559.]
- [5] Wang Guangyuan, Wang Wenquan. Fuzzy optimum design of structures [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 1984, 1(2): 67~73. [王光远, 王文泉. 结构模糊优化设计 [J]. 计算结构力学及其应用, 1984, 1(2): 67~73.]
- [6] Zhang Lixiang, Li Chongxiao. Earthquake-resistant fuzzy optimal design and fuzzy reliability analysis of structures [J]. *Journal of Civil Engineering*, 1990, 23(8): 41~50. [张立翔, 李崇孝. 框架结构抗震模糊优化设计和模糊可靠性分析 [J]. 土木工程学报, 1990, 23(8): 41~50.]
- [7] Chen Hui, Fu Chuanguo, Lou Yu. Systematical fuzzy optimal design of reinforced concrete frame dtructure [J]. *Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering*, 1997, 12(4): 18~24. [程辉, 傅传国, 娄宇. 钢筋混凝土框架结构的系统模糊优化设计 [J]. 山东建筑工程学院学报, 1997, 12(4): 18~24.]
- [8] No.2 Survey and Design Institute of Ministry of Railways. Design and computation of anti-sliding piles [M]. Beijing: Railway Press, 1983, 18~35. [铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩的设计与计算 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983, 18~35.]
- [9] Cai Xin, Wang Dexin. Fuzzy optimum design of concrete-face rock-fill dam [J]. *Journal of Hehai University*, 1997, 25(4): 8~13. [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.]
- [10] Huang Hongzhong. Fuzzy design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999. 204~215. [黄洪钟. 模糊设计. 北京: 机械工业出版社 [M], 1999. 204~215.]
- [11] D. Dubois, H. Prade. Fuzzy sets and systems: theory and applications [M]. New York: Academic Press, 1980, 52~58.
- [12] Wang Yushu. Principle, method and engineering application of optimization [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press., 1991, 55~133. [汪树玉. 优化原理、方法与工程运用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991, 55~133.]
- [13] Wang Guangyuan. Theory of soft design in engineering [M]. Beijing: Science Press, 1992, 323~326 [王光远. 工程软设计理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1992, 323~326.]

## Fuzzy Optimal Design of Anti-sliding Piles

ZHANG Jie, SHANG Yuequan, LU Qing

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310027)

**Abstract:** The relationships and statements used for the description of anti-sliding piles are imprecise due to the inherent fuzziness. There are several ways by which imprecise parameters can be represented and manipulated in engineering design calculations, and among them is fuzzy mathematics. In this paper a fuzzy model is built for anti-sliding piles optimization. The level cut method is used. An example is presented to demonstrate the practical use of this model. A comparison between this model and the conventional optimization model is also presented which shows that the fuzzy model can provide results more reasonable and economical.

**Key words:** landslide; anti-sliding piles; fuzzy; optimization