

文章编号: 1673- 0062(2009) 04- 0107- 04

基于可靠度的圆弧滑动边坡经济风险分析模型优化方法

曾 晟, 杨仕教, 谭凯旋*, 喻 清

(南华大学 核资源与核燃料工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 边坡工程的设计和治理所需要考虑的成本和安全因素存在广泛的不确定性. 为了使边坡工程的安全性问题和经济性问题的得到较好的统一, 用费用-效益分析方法, 以最小总期望造价为目标函数, 以坡型、坡比为设计变量, 以边坡稳定性可靠度指标为主要约束条件, 建立了圆弧滑动边坡的经济风险分析模型. 以 Bishop 法为基础, 利用 MATLAB 遗传算法工具箱实现最危险圆弧滑动的搜索. 并基于可靠度编写了圆弧滑动边坡工程设计优化的 MATLAB 程序. 通过工程实例研究, 应用该方法能获得最优坡比和坡型设计方案, 并且程序运算速度快、精度高, 有一定的实用价值.

关键词: 边坡工程; 圆弧滑动边坡; 遗传算法; 可靠度; 经济风险分析

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A

Study of Economical Risk Analysis Model and Intelligent Optimization Methods for Circular Sliding Slopes Based on the Reliability

ZENG Sheng YANG Shi-jiao TAN Kai-xuan*, YU Qing

(School of Nuclear Resources and Nuclear Fuel Engineering University of South China
Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract Because of the extensive uncertainties of the cost and safety factors in slope engineering design and treatment in order to make the security and economical problems obtain better unification, the economical risk analysis model of the soil slope was established by using a cost-benefit analysis method taking the minimum total expected cost as the objective function, using the slope-type and slope-ratio as design variables and the reliability index of the slope stability as the main constraint conditions. Based on the Bishop method the most dangerous circle sliding surface with the genetic algorithm toolbox of MATLAB was searched. A MATLAB program for optimization design of the circular sliding slopes engineering was compiled based on reliability. Through practical project research, the method was used to design the slope engineering and the optimum slope-type and

收稿日期: 2009- 04- 07

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目 (08C758)

作者简介: 曾 晟 (1977-), 男, 湖南常德人, 南华大学核资源与核燃料工程学院讲师, 博士研究生. 主要研究方向: 岩石力学与岩土工程、溶浸采矿. * 通讯作者.

slope-ratio were obtained The result shows that the program has good stability, high computational speed, high precision and practical value

Key words slope engineering; circular sliding slope; genetic algorithm; reliability; economical risk analysis

0 前言

在边坡工程的稳定分析和工程治理过程中, 边坡体的物理力学参数和作用荷载一般呈现概率性变化, 这些因素对边坡稳定性的影响常用边坡的可靠性分析反映. 目前, 安全系数法^[1-2]为衡量指标的边坡工程安全性评价研究已经成熟, 并且在规范中已有规定, 设计和治理时可以参考使用. 但在边坡工程的设计和治理中, 还没有形成以可靠性分析为基础的设计规范, 从而产生了怎样运用可靠性分析的结果正确地对边坡进行评价和优化设计的问题^[3-5]. 边坡常规分析往往只给出边坡的破坏概率或可靠性指标, 但是对边坡的经济风险评价往往没有重视. 边坡的经济风险水平和破坏概率是两个不同的概念. 前者具有经济损失的含义, 后者是一个纯技术指标. 风险离不开经济, 它是经过某些假设和判断之后得到的技术和经济综合指标^[6-7]. 近年发展很快的一些仿生算法如遗传算法具有很强的适应度、鲁棒性, 擅长搜索全局最优解的优化算法. 因此, 许多学者将遗传算法引入边坡稳定分析和设计中, 克服了传统方法容易陷入局部最优解的缺点, 取得了一系列的成果^[8-10]. 作者以 Bishop法^[11-12]、MATLAB遗传算法工具箱^[13]为基础, 编写了边坡临界滑动面位置的搜索程序和边坡稳定可靠度分析程序. 从边坡工程的经济风险分析出发, 基于投资最省的原则来确定边坡可接受的可靠性指标或破坏概率, 判定边坡的稳定性和最优的治理方案.

1 边坡经济风险分析模型

边坡工程的投资, 一般包括初建费、失稳损失费、因失稳造成的维修费^[14]. 要使投资方案最优, 也就是使边坡的总费用现值最小. 边坡失稳造成的损失难于估计, 因该损失包括有形损失和无形损失, 经济指标包括直接损失和间接损失、公用事业的损失、个人生命财产的损失以至威信的损失, 最难估计的经济损失数字是由于边坡失稳带来的社会威信的损失^[15]. 应此, 无形损失系数只有根据工程情况, 结合当地的经济指标和专家意见确定.

设如图 1 边坡, 台阶高皆为 h , 单级坡角为 θ , 总坡角为 α , 台阶宽皆为 l (一般为 $1.5 \sim 2\text{ m}$), 总坡高为 H , 无形损失系数 λ , 开挖该边坡土方单价为 A 元 m^3 , 滑塌后的坡面维护费用单价为 B 元 m^2 , 破坏概率为 P_f , 自然坡面方程为 $f(x)$, V 为设计坡面下的需开挖土体体积, 总费用价值为 C 元, 建立边坡设计的目标函数式 (1).

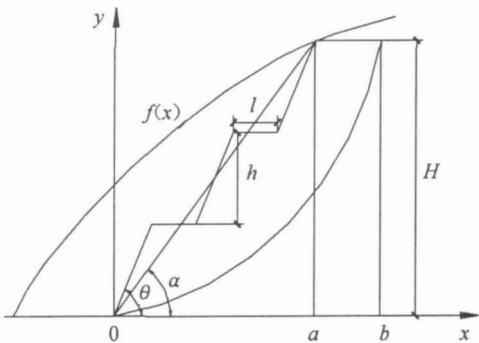


图 1 开挖后边坡计算图

Fig 1 The sketch of slope after excavation

$$\begin{cases} C_1 = \left(\int_0^a f(x) dx - V \right) \times A \\ C_2 = P_f \times \left(\int_0^a f(x) dx - V \right) \times A \\ C_3 = \lambda \times P_f \times \left(V + \int_0^b f(x) dx - \int_0^a f(x) dx \right) \times A \\ C_4 = \tau \times P_f \times \left(\int_0^b \sqrt{1 + (\tan \theta)^2} dx \right) \times B \\ C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_1 为初建费; C_2 为不稳定而追加的造价; C_3 为失稳损失费; C_4 为失稳造成的维修费.

通过 MATLAB遗传算法工具箱编写的搜索边坡临界滑动面位置的程序, 可得出边坡滑动面的方程如式 (2),

$$y = \left(\sqrt{x_3^2 - (x - x_1)^2} + x_2 \right) \quad (2)$$

式中, x_1 , x_2 , x_3 分别为最危险滑动面的圆心横坐标、纵坐标、半径.

设计坡面下需开挖土体积 V 的表达式如 (3).

$$\begin{cases} V = \frac{n^2 h^2}{2} \cot \alpha \\ \tan \alpha = y' = \frac{(x_3^2 - (x - x_1)^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot (-2x + 2x_1)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

边坡稳定性和总费用价值是优化设计的两个重要指标, 边坡的优化目的就是在边坡稳定的前提下, 追求最好的经济效益, 并寻求总费用最小情况下一组最优的坡高和坡角. 由数理统计与概率论可知可靠度指标与破坏概率成——对应关系, 可靠度约束指标用破坏概率值替代, 而边坡设计可接受的破坏概率的限值, 还未形成统一的标准, 确定设计可靠度或可接受风险水平阈值并非容易的事, 研究表明^[16] 通常比较高的破坏概率是可以接受的, 因此本文确定破坏概率约束为 $0 \leq P_f \leq 0.1$ 由文献^[17], 确定总坡角的范围为 $30^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ 和单级坡角的范围为 $45^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$. 根据文献^[18], 得到如式 (4) 的台阶式各单级坡的最大高度.

$$H_i = \frac{C}{0.11 F_s \gamma} \quad (4)$$

式中, C 为 H_i 坡范围内土平均内聚力, kPa ; F_s 安全系数; γ 为 H_i 坡范围内土平均天然重度, kN/m^3 .

根据以上的设计变量、目标函数、约束条件, 可建立边坡经济风险分析优化设计的模型,

$$\begin{cases} m \ln C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ 0 \leq P_f \leq 0.1 \\ h \leq 15\text{m} \\ 30^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ \\ 45^\circ \leq \theta \leq 70^\circ \\ 1.5\text{m} \leq L \leq 2\text{m} \end{cases} \quad (5)$$

根据所建立的模型, 基于 BISHOP 法, 编写 SLIDE SURFACE M 程序, 利用 MATLAB 工具箱对最危险圆弧滑动面实现遗传算法搜索, 并基于 MATLAB 平台编写 SLOPE - GA, CONSTRAINT CONDITION 和 SLOPE - GA - M N 程序, 实现了圆滑动边坡可靠度指标计算和边坡投资方案最优决策, 确定边坡的可靠指标、确定破坏概率和安全、经济的边坡坡角. 具体程序框图如图 2^[19].

2 实例分析

2.1 工程概况

某高速公路进行路堑开挖后, 在公路的右侧形成了 300 多米长的边坡. 根据该边坡的钻探资

料可知, 边坡主要由高液限粘土层、石英砂岩全风化层、砂岩全风化层、砂岩弱风化层等构成. 边坡开挖后只经过初步削坡处理, 最初处理剖面如图 3 曾陆续出现滑坡现象, 其中一处坡顶出现贯通的张裂缝, 且在第二级坡和第一级坡之间的 1.5 m 小平台上产生局部塌方, 塌方沿两组节理产生, 部分小平台已滑塌, 坡顶裂缝离公路轴线的水平距离最远约 46.5 m. 在另一处边坡已产生滑坡, 坡顶出现贯通的裂缝和滑壁面, 坡顶裂缝离公路轴线的水平距离最远 50.8 m. 滑坡面处于石英砂岩全风化层和砂岩全风化层中, 滑坡的形式主要为圆弧滑动形式. 该公路边坡因多次发生滑坡, 必须进行边坡治理.

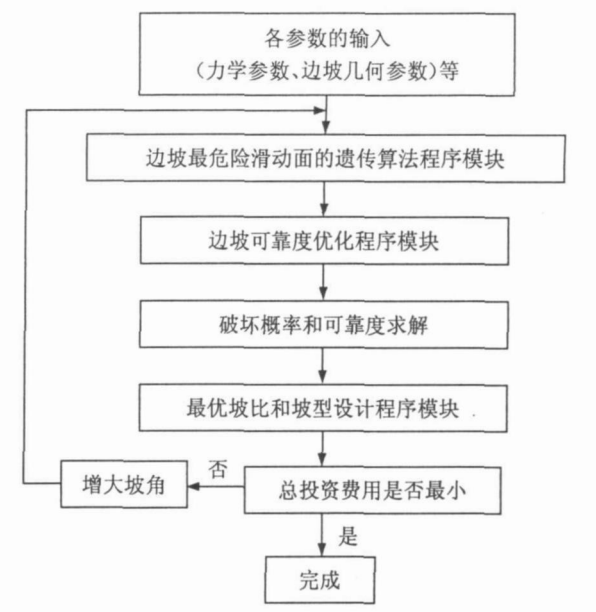


图 2 圆弧滑动边坡经济风险分析模型优化框图
Fig 2 The program diagram of economical risk analysis model for circular sliding slope

2.2 边坡治理优化设计

边坡开挖后经过初步削坡处理, 因此利用 MATLAB 拟合得出边坡自然坡面方程, 如式 (6),

$$f(x) = -0.0227x^2 + 1.707x + 1.021 \quad (6)$$

根据本文的土质边坡经济风险分析模型的优化过程框图, 对该边坡进行优化分析. 根据征求专家意见和参考文献^[20], 确定风险系数 $\lambda = 10$ 综合考虑滑面维护与修复费用, 将 T 取为 1. 取土单价为 8元/m^3 , 浆砌石护坡单价为 127元/m^3 .

通过优化分析得到, 当坡度为 45° 时, 总费用价值最小, 而且边坡的安全系数为 1.15 是安全的. 所以认为, 坡度为 45° 时, 边坡是安全和经济的. 边坡处理前后坡形线如图 3.

3 结论

1)用 MATLAB 遗传算法工具进行边坡最危险滑动面搜索,简单、快速、实用,得到的结果准确、理想.将验算点法用于土质边坡可靠度计算,比其它的可靠度计算方法要更为方便.

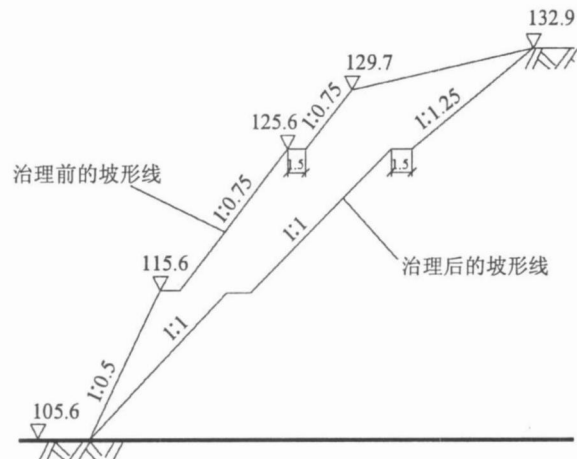


图 3 边坡处理前后坡形线

Fig 3 Slope shape of before and after slope excavation

2)在边坡设计时,如果坡角取的越小,边坡越安全,失效概率越小,但土方量越大,因而施工造价越大,但因失效而造成的损失越小;相反坡角取较大,降低了施工造价,但是失效概率会增大,而要支付较大的失效代价.因而必然存在一个最佳的坡角,使总费用现值最小.

3)以安全可靠为主要约束条件,以总费用现值最小为目标函数,提出了土质边坡的优化模型,能有效的进行边坡的优化设计.

参考文献:

[1] Li K S White W. Rapid evaluation of the critical slip surface in slope stability problems [J]. International Journal for Numerical and Methods in Geomechanics, 1987, 11: 449-473.

[2] 弥宏亮,陈祖煜.遗传算法在确定边坡稳定最小安全系数中的应用 [J].岩土工程学报,2006,28(4):475-479.

[3] 叶万军,折学森,陈志新,等.基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计 [J].地球科学与环境学报,2005,27

(2): 82-85

[4] 郭长宝,张永双.陕北砂黄土高边坡可靠度分析及边坡优化设计 [J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):5-10.

[5] 边世斌,王琛,赵军,等.基于期望造价的黄土路堑高边坡优化设计模型 [J].西安工业大学学报,2008,28(1):1-85.

[6] 肖芳林,仇俊林.风险贴现率法在工程项目风险决策分析中的运用 [J].建筑管理现代化,2004(4):19-21.

[7] 李翠平,王丽.工程项目风险分析方法和应对措施 [J].石家庄经济学院学报,2004,27(2):179-183.

[8] 肖专文,张奇志,梁力,等.遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用 [J].岩土工程学报,1998,20(1):44-46.

[9] 安关峰,殷坤龙,唐辉明.遗传算法在边坡数值计算中的应用 [J].地球科学——中国地质大学学报,2002,27(2):177-180.

[10] 万文,曹平,冯涛,等.基于加速混合遗传算法搜索复杂边坡的最危险滑动面 [J].岩土工程学报,2006(4):475-479.

[11] 蒋斌松,康伟.边坡稳定性中 BISHOP 法的解析计算 [J].中国矿业大学学报,2008,37(3):287-290.

[12] 李明,丁德馨.边坡最危险滑动圆弧圆心位置的程序搜索及其应用 [J].南华大学学报(自然科学版),2004,18(4):63-66.

[13] 陈广洲,解华明,鲁祥友. Matlab 遗传算法工具箱在非线性优化中的应用 [J].计算机技术与发展,2008,18(3):246-249.

[14] 王燕平,王选仓,王秉纲.公路路堤结构目标可靠度研究 [J].西安公路交通大学学报,1997,17(2):15-20.

[15] 田平.公路工程经济 [M].北京:人民交通出版社,2005.

[16] 祝玉学.边坡可靠性分析 [M].北京:冶金工业出版社,1993.

[17] 叶万年.基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计 [D].西安:长安大学,2003.

[18] 贾韵洁.浅谈公路黄土边坡坡面防护 [J].科学之友,2007(8):38-39.

[19] 胡松波.基于经济风险分析的公路土质边坡设计方法研究与应用 [D].衡阳:南华大学,2007.

[20] 李东升,朱正伟,刘东燕.基于风险评价的边坡防灾决策分析 [J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(6):907-910.