

基于灰色关联分析法的边坡敏感性分析

牛岩¹, 鲍小成¹, 熊宗海², 王永卫^{3,4}

(1. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉丰达地质工程有限公司, 武汉 430074;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 4. 中国地质大学江城学院, 武汉 430200)

摘要:综合考虑边坡坡高、角度、岩土体黏聚力、摩擦角和容重等因素对边坡稳定性的影响,通过有限单元应力法建立数值模型,进行应力分析,最后计算得到边坡安全系数,这一方法将数值分析和极限平衡方法有机地融合在一起,达到优势互补的效果;然后基于灰色关联分析法对有限单元应力法得到的数据建立数学模型,对各影响因素与安全系数进行关联分析,最后得到各影响因素对边坡稳定性影响的敏感性。结果表明:影响边坡稳定性的因素敏感性依次为黏聚力、容重、摩擦角、边坡角度和坡高。利用敏感性分析结果,可对边坡加固位置提出设计改进,将有限的加固措施加于敏感性较高的位置,能够更有效地提高边坡的稳定性。

关键词:灰色关联分析;边坡;敏感性分析;有限单元应力法

中图分类号:TU457

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2014)03-0202-03

一般来说,排土场稳定性是多种因素共同作用的结果,研究边坡稳定性的各个影响因素的敏感度,从众多影响因素中找出各个因素敏感性具有重要意义^[1-2]。

灰色关联分析法^[3]可以对多种因素进行分析,然后从整体观念出发进行综合评价。笔者拟根据有限单元应力法^[4-5]获取灰色关联分析所需的源数据,采用灰色关联分析法进行各因素敏感性分析。

1 有限单元应力法

有限单元应力法是指在传统的极限平衡分析中输入有限元的应力计算结果,然后根据这些计算结果求得每一条块底部中点的法向力和下滑剪切应力,最后按照安全系数的定义,即滑移面上条块抗滑力之和与条块下滑力的比值,求得安全系数。而极限平衡方法求解的安全系数是基于条块间力假设的解析解。因此有限单元应力法求解安全系数更接近于真实解^[6-7]。

2 基于有限单元应力法生成数据

考虑边坡坡高、角度、岩土体黏聚力、摩擦角和容重等因素对边坡稳定性的影响,采用 GeoStudio 中 SIGMA/W 模块进行应力分析^[8],然后将计算结果导入 SLOP/W 模块进行极限平衡分析。计算模型网格划分如图 1 所示,计算得到总应力云图如图 2 所示,将应力结果导入到 SLOP/W 模块进行极限

平衡分析,计算结果如图 3 所示。计算方案和结果见表 1。其中岩土体统一取变形模量 30 MPa,泊松比 0.3^[9]。

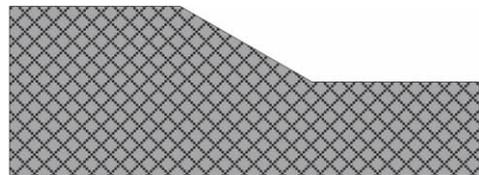


图1 有限单元网格

Fig.1 Finite element mesh

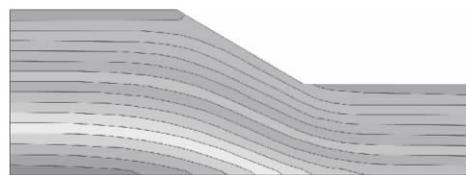


图2 总应力云图

Fig.2 Total stress contour line

表1 计算方案和计算结果

Table 1 Calculation scheme and calculation results

序号	计算方案					计算结果
	坡高 h/m	边坡角度/ (°)	黏聚力 c/kPa	摩擦角 α/(°)	容重/ (kN·m ⁻³)	安全系数
1	90	30	90	20	16	1.378
2	110	35	80	23	18	1.268
3	150	40	70	25	20	1.041
4	180	45	60	28	22	0.967
5	210	50	50	30	24	0.774

收稿日期: 2013-01-03

编辑: 杨勇

作者简介: 牛岩(1984—),男,现正攻读工程地质专业硕士学位,主要从事工程地质研究。E-mail:49075262@qq.com

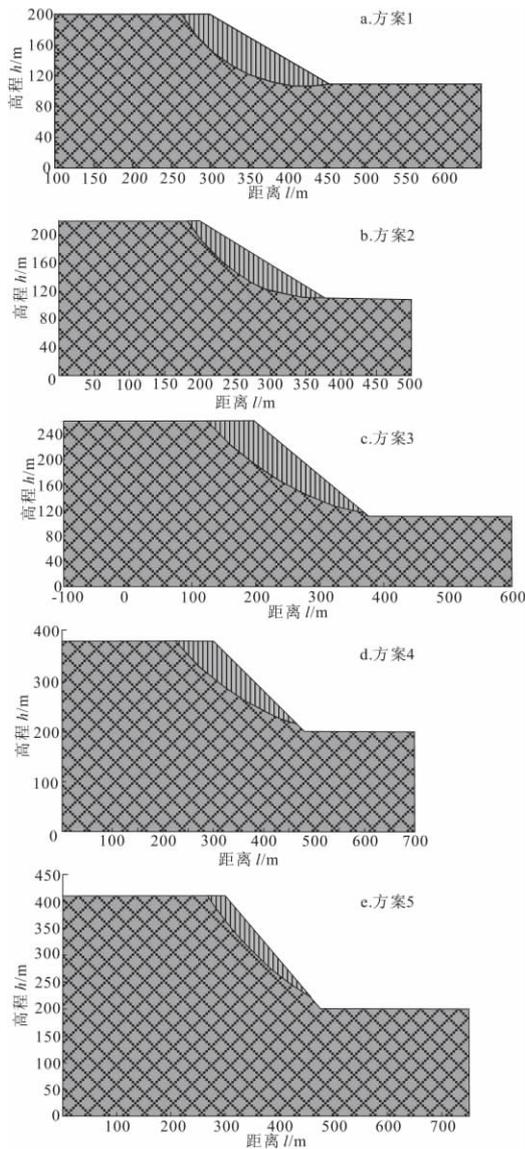


图 3 计算结果

Fig.3 Calculation results

3 基于灰色关联分析法数据建模

灰色关联分析法可以从系统中凌乱的、随机的行为特征量(观测数据或者计算数据)中确定因素间的关联程度。它的基本思想是根据诸多因素(比较序列)接近程度,分析和确定它们对目标要素(参考序列)的贡献程度。

3.1 参考数据和比较数据

应用灰色关联分析法对受多种因素影响的事物和现象进行综合评价,首先要选取反映系统特征行为的参考序列 X_0 ,参考序列是系统分析中最为重要的因素,也是关键讨论的问题。确定了系统参考序列之后,获得系统相关因素行为序列 X_i (也称为比较序列)^[10]。根据参考序列和比较序列计算关联系数,最后求得相应影响因素关联度。系统的参考序列为:

$$X_0(k) = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)) \quad (1)$$

比较序列为:

$$x_i(k) = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & x_3(1) & \dots & x_n(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & x_3(2) & \dots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1(m) & x_2(m) & x_3(m) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix}; \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

以表 1 中安全系数为参考序列:

$$X_0 = (1.304, 1.205, 0.991, 0.876, 0.707)^T,$$

影响因素为比较序列,其中边坡坡高、边坡角度、岩土体黏聚力、摩擦角、容重依次为: $x_1 = (90, 110, 150, 180, 210)^T$; $x_2 = (30, 35, 40, 45, 50)^T$; $x_3 = (90, 80, 70, 60, 50)^T$; $x_4 = (20, 23, 25, 28, 30)^T$; $x_5 = (16, 18, 20, 22, 24)^T$ 。

3.2 数据无量纲化

由于很多数据的单位不同,为保障建立模型的质量和系统分析结果的正确,必须使数据具有可比性。因此在进行关联分析之前,一般要对原始数据进行无量纲化处理。笔者采用均值变换处理比较序列,结果见表 2。均值变换公式如式(3)所示:

$$xx(k) = \frac{x(k)}{\bar{x}}; \bar{x} \neq 0, k = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

表 2 无量纲化后数据

Table 2 Dimensionless data

序号	坡高	边坡角度	黏聚力	摩擦角	容重
1	0.608	0.750	1.286	0.794	0.800
2	0.743	0.875	1.143	0.913	0.900
3	1.014	1.000	1.000	0.992	1.000
4	1.216	1.125	0.857	1.111	1.100
5	1.419	1.250	0.714	1.190	1.200

4 灰色关联分析法处理边坡数据

根据关联系数公式(4)分别计算每个比较序列与参考序列对应元素的关联系数 e_i :

$$e_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (4)$$

式中: ρ 为分辨系数,在(0, 1)内取值,通常 ρ 取 0.5^[11]。

计算关联系数后,分别计算各评价对象(比较序列)关联系数的均值,以反映各评价对象与参考序列的关联关系,并称其为关联度 $r^{[12-13]}$ 。

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m e_i(k) \quad (5)$$

灰色关联模型的建立充分体现了灰色关联公理——规范性、整体性、偶对称性和接近性,其计算着重考虑了点与点之间的距离远近对关联度的影响。其中, ρ 称为分辨系数,若 ρ 越小,则关联系数

间差异越大,区别能力越强,若 ρ 越大,则关联系数间差异越小,区别能力越弱。分辨系数避免了系统因子观测序列的异常值支配整个系统的关联度,能够使关联度更好地体现系统的整体性。对数据进行计算得关联系数如表3所示^[14]。

表3 关联系数

Table 3 Relation coefficient

序号	关联系数	坡高	边坡角度	黏聚力	摩擦角	容重
1	e_1	0.357	0.407	0.863	0.425	0.428
2	e_2	0.453	0.530	0.808	0.557	0.547
3	e_3	0.999	0.967	0.967	0.949	0.967
4	e_4	0.650	0.759	0.833	0.779	0.795
5	e_5	0.400	0.479	0.926	0.514	0.508

由表1~3根据式(5)计算得到每个影响因素的关联度: $r(X_0, X_1) = 0.572, r(X_0, X_2) = 0.628, r(X_0, X_3) = 0.879, r(X_0, X_4) = 0.645, r(X_0, X_5) = 0.649$ 。比较关联度发现,与安全系数的关联程度由大到小依次为:黏聚力>容重>摩擦角>边坡角度>坡高。

5 结论

(1)对边坡敏感性分析发现,各影响因素与安全系数的关联程度由大到小依次为:黏聚力>容重>摩擦角>边坡角度>坡高。利用敏感性分析结果,可对边坡加固位置提出设计改进,将有限的加固措施加于敏感性较高的位置,能够更有效地提高边坡的稳定性。

(2)利用有限单元法计算边坡应力,然后将计算结果输入到极限平衡计算模块,无需对边坡内力进行简化假设,这一方法将数值分析和极限平衡法有

机地融合在一起,达到了优势互补的效果,且得到的结果更接近于现实情况,较之传统的边坡稳定性因素敏感性分析方法具有明显的优越性。

参考文献:

- [1] 郑敏洲,简文彬,吴茂明. 滑坡敏感因子分析及治理措施研究[J]. 岩土工程界, 2004, 7(12): 29-31.
- [2] 姚爱军,易武,王尚庆. 杨家岭滑坡稳定性影响因素及敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 390-395.
- [3] 曹军义,展辰辉,王改山. 土质高边坡稳定因素的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5350-5354.
- [4] 张旭辉,龚晓南,徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.
- [5] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.
- [6] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [7] 秦卫星,陈胜宏,陈士军. 有限单元法分析边坡稳定的若干问题研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 586-590.
- [8] 胡敏萍. 极限平衡法和有限单元法分析复杂边坡的稳定性[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- [9] 康亚明,杨明成,胡艳香. 极限平衡法和有限单元法混合分析土坡稳定[J]. 中国矿业, 2006, 15(3): 74-77.
- [10] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626-628.
- [11] 曹明霞. 灰色关联分析模型及其应用的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [12] 王浙明,史惠祥,苏雨生. 灰色关联模型用于工程方案优化[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1): 80-83.
- [13] 赵选民. 概率论与数理统计典型题分析解集[M]. 第2版. 西安:西北工业大学出版社, 2001.
- [14] 季夜眉. 概率与数理统计[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.

Sensitivity Analysis of Slope Based on the Grey Relation Analysis

Niu Yan¹, Bao Xiaocheng¹, Xiong Zonghai², Wang Yongwei^{3,4}

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Fengda Geological Engineering Co. Ltd., Wuhan 430074, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

4. Jiangcheng College, China University of Geosciences, Wuhan 430200, China)

Abstract: Slope stability is a complex system involving the interaction of many factors. Considering the influence of slope height, angle, rock and soil cohesion, friction angle and bulk density on slope stability, this paper establishes a numerical model by the finite element stress method, then conducts stress analysis, and finally calculates the slope safety factor. This method combines the limit equilibrium method and numerical analysis. Then, based on the gray relational analysis method, we use the data from finite element stress method to establish a numerical model. After that, we analyzed relationships of each factor and safety factors, and finally determine the sensitivity of each factor. The results show that: the factors that affected the sensitivity of slope stability were cohesion, bulk density, friction angle, slope angle and slope height. The sensitivity analysis results can improve the design of slope reinforcement location. It can save cost and can more effectively improve the stability of slopes.

Key words: grey relation analysis; slope; sensitivity analysis; the finite element stress method