

# 基于灰关联法的边坡稳定影响因子敏感性分析

魏海兵<sup>1</sup>, 焦永春<sup>2</sup>, 高静<sup>2</sup>

(1. 中国人民武装警察部队 水电第八支队, 重庆 410320; 2. 中国人民武装警察部队 水电第三总队, 四川 成都 611130)

**摘要:**基于灰关联法,对影响边坡稳定的坡高 $h$ 、坡角 $\alpha$ 、容重 $\gamma$ 、粘聚力 $C$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、中间主应力参数 $b$ 和Lode应力参数 $\mu$ 七个主要因子进行了敏感性分析,通过分析,得出了其对边坡稳定性的不同影响,研究成果对边坡稳定设计和治理具有一定的参考价值。

**关键词:**灰关联法;边坡稳定;敏感性分析;统一强度理论

**中图分类号:**TU457;[TU42]

**文献标识码:**B

**文章编号:**1001-2184(2016)04-0009-03

## 1 研究背景及意义

边坡稳定问题是岩土工程三大经典问题之一。近年来,各种地质灾害频发,而滑坡灾害首当其冲,其对人民生命财产安全造成的威胁日益加大,损失难以估量。因此,边坡稳定性的研究对于国民生计意义重大。

## 2 影响边坡稳定性的因素

经过长时间的研究,人们发现影响边坡稳定性的因素可以归为两类:一是边坡的几何形态,如坡高、坡角;二是边坡自身材料的性质,如容重、粘聚力、内摩擦角。

但近年来国外的一些学者深入到土体破坏准则层面进行研究发现:基于Mohr-Coulomb强度准则的土质边坡稳定分析与实验结论不相符,如Von Karman和Boker所作的砂岩实验<sup>[1,2]</sup>。究其原因,Mohr-Coulomb强度理论仅仅考虑了单元体三个主应力中的最大主应力 $\sigma_1$ 和最小主应力 $\sigma_3$ ,而不考虑中间主应力 $\sigma_2$ ,而中间主应力 $\sigma_2$ 却对强度分析具有一定的影响作用。为了考虑这种影响,我国学者俞茂宏经过多年的研究,提出了统一强度理论,该理论成功地将中间主应力 $\sigma_2$ 的影响融入到破坏准则中,并通过中间主应力参数 $b$ 和Lode应力参数 $\mu$ 来表征这种影响。双剪统一强度理论数学表达式为<sup>[3]</sup>:

$$F = \tau_{13} + b\tau_{12} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) = C$$

$$\tau_{12} + \beta\sigma_{12} \geq \tau_{23} + \beta\sigma_{23}$$

$$F' = \tau_{13} + b\tau_{23} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) = C$$

$$\tau_{12} + \beta\sigma_{12} \leq \tau_{23} + \beta\sigma_{23}$$

收稿日期:2016-07-19

笔者将这七个因素进行综合考虑,应用灰关联法对其进行敏感性分析。

## 3 灰关联法

### 3.1 定义

客观世界是一个已知和未知共存的系统,我们将既含有已知信息,又含有未知信息的不确定系统称为灰色系统。就边坡系统而言,其既存在已知信息,如边坡几何形态;也存在未知信息,如地震或降雨导致的内部应力变化,故边坡系统是一个灰色系统。

假设存在两个或多个灰色系统,这些不同系统内的因素其随时间或所处环境变化而表现出的关联性大小称为关联度。在系统发展变化过程中,若两个因素的变化趋势一致,则认为二者关联度较高;反之,则较低。因此,灰关联法是根据因素之间变化趋势的相似或相异程度作为衡量因素间关联程度的一种方法。

### 3.2 计算步骤

灰关联分析的具体计算步骤如下<sup>[4]</sup>:

(1)确定参考数列和比较数列;

(2)对参考数列和比较数列进行无量纲化处理;

(3)求参考数列与比较数列的灰色关联系数;

(4)求关联度;

(5)关联度排序。

## 4 实例分析

### 4.1 确定参考数列和比较数列

基本算例中的各参数如表1所示。

表1 算例相关信息表

算例 出处	计算参数					计算 简图
	$h$ /m	$\alpha$ /°	$\gamma$ /kN·m <sup>-3</sup>	$C$ /kPa	$\varphi$ /°	
文献 [5]	20	45	20	40	20	图1

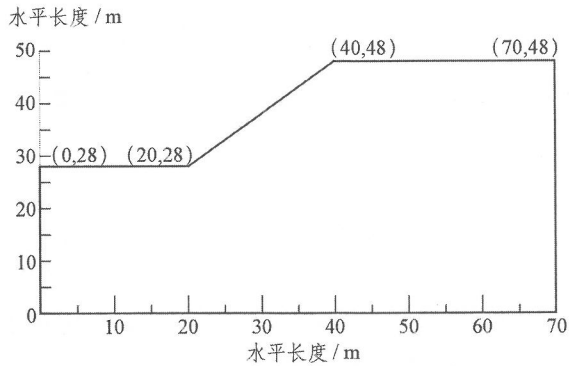


图1 边坡计算简化模型图

在此基础上,增加中间主应力参数  $b$  和 Lode 应力参数  $\mu$  两个参数,分别取  $b = 0.5, \mu = 0.5$ 。边坡稳定的安全系数  $F_s$  的计算方法采用工程中常用的简化 Bishop 法,将该算例的计算结果作为参考数列,其比较数列见表 2~8。

表2  $F_s$  随坡高  $h$  变化数列表

项目	$h$ / m						
	5	10	15	20	25	30	35
$F_s$	3.583	2.186	1.7	1.447	1.289	1.181	1.1

表3  $F_s$  随坡角  $\alpha$  变化数列表

项目	$\alpha$ / °						
	30	35	40	45	50	55	60
$F_s$	1.899	1.717	1.571	1.447	1.339	1.242	1.151

表4  $F_s$  随容重  $\gamma$  变化数列表

项目	$\gamma$ / kN·m <sup>-3</sup>						
	10	15	20	25	30	35	40
$F_s$	2.186	1.7	1.447	1.289	1.181	1.1	1.038

表5  $F_s$  随粘聚力  $C$  变化数列表

项目	$C$ / m						
	25	30	35	40	45	50	55
$F_s$	1.146	1.249	1.349	1.447	1.543	1.638	1.731

表6  $F_s$  随内摩擦角  $\varphi$  变化数列表

项目	$\varphi$ / °						
	5	10	15	20	25	30	35
$F_s$	0.917	1.103	1.277	1.447	1.62	1.799	1.992

表7  $F_s$  随中间主应力参数  $b$  变化数列表

项目	$b$						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$F_s$	1.35	1.386	1.418	1.447	1.474	1.498	1.52

表8  $F_s$  随 Lode 应力参数  $\mu$  变化数列表

项目	$\mu$						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$F_s$	1.332	1.368	1.406	1.447	1.49	1.495	1.41

4.2 灰关联分析

根据以上数列,建立参数矩阵  $X$  和安全系数矩阵  $Y$ :

$$X = \begin{bmatrix} 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 \\ 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 55 & 60 \\ 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 \\ 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 55 \\ 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 3.583 & 2.186 & 1.700 & 1.447 & 1.289 & 1.181 & 1.1 \\ 1.899 & 1.717 & 1.571 & 1.447 & 1.339 & 1.242 & 1.151 \\ 2.186 & 1.700 & 1.447 & 1.289 & 1.181 & 1.1 & 1.038 \\ 1.146 & 1.249 & 1.349 & 1.447 & 1.543 & 1.638 & 1.731 \\ 0.917 & 1.103 & 1.277 & 1.447 & 1.62 & 1.799 & 1.992 \\ 1.332 & 1.368 & 1.406 & 1.447 & 1.49 & 1.495 & 1.41 \end{bmatrix}$$

4.3 矩阵无量纲化处理

矩阵无量纲化处理方式为:

$$X'_i = [X'_i(1), X'_i(2), X'_i(3), \dots, X'_i(n)]$$

其中:

$$X'_i(j) = \frac{X_i(j) - \min_j X_i(j)}{\max_j X_i(j) - \min_j X_i(j)}$$

据此,无量纲化后的参数矩阵  $X'$  和安全系数矩阵  $Y'$  分别为:

$$X' = \begin{bmatrix} 0 & 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 \\ 0 & 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 \\ 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 & 1.167 \\ 0 & 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 \\ 0 & 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 \\ 0 & 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 \\ 0 & 0.167 & 0.333 & 0.5 & 0.667 & 0.833 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y' = \begin{bmatrix} 1 & 0.437 & 0.242 & 0.14 & 0.076 & 0.033 \\ 1 & 0.757 & 0.561 & 0.396 & 0.251 & 0.122 \\ 1 & 0.577 & 0.356 & 0.219 & 0.125 & 0.054 \\ 0 & 0.176 & 0.347 & 0.515 & 0.679 & 0.841 \\ 0 & 0.173 & 0.335 & 0.493 & 0.654 & 0.82 \\ 0 & 0.212 & 0.4 & 0.571 & 0.729 & 0.871 \\ 0 & 0.221 & 0.454 & 0.706 & 0.969 & 1 \end{bmatrix}$$

4.4 求灰色关联系数

灰色关联系数按照下列公式求解:

$$\Delta_{ij} = |Y'_i(j) - X_i(j)|$$

$$\Delta_{\min} = \min(\Delta_{ij})$$

$$\Delta_{\max} = \max(\Delta_{ij})$$

$$V_{ij} = \frac{X_i(j) - \min_j X_i(j)}{\max_j X_i(j) - \min_j X_i(j)}$$

据此求得关联系数矩阵 V:

$$V = \begin{bmatrix} 0.368 & 0.683 & 0.864 & 0.618 & 0.497 & 0.422 & 0.368 \\ 0.368 & 0.497 & 0.719 & 0.848 & 0.584 & 0.451 & 0.368 \\ 0.412 & 0.706 & 0.802 & 0.566 & 0.452 & 0.381 & 0.333 \\ 1 & 0.984 & 0.977 & 0.976 & 0.98 & 0.987 & 1 \\ 1 & 0.989 & 0.977 & 0.976 & 0.98 & 0.978 & 1 \\ 1 & 0.928 & 0.897 & 0.892 & 0.903 & 0.94 & 1 \\ 1 & 0.915 & 0.829 & 0.74 & 0.658 & 0.778 & 0.528 \end{bmatrix}$$

4.5 求关联度

关联度按照下式求解:

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

据此求得关联度矩阵 R:

$$R = [0.546, 0.548, 0.522, 0.986, 0.99, 0.937, 0.778]$$

4.6 关联度排序

按照从大到小的顺序排列,各因素影响大小分别为:

$$\varphi > C > b > \mu > \alpha > h > \gamma$$

5 结语

综上所述,笔者得出的结论如下:

(1)中间主应力参数 b 和 Lode 应力参数 μ 确实对边坡稳定性有一定的影响。

(上接第 8 页)

一个长期的演化过程,长期的冻融作用可能会导致岩体结构发生巨变。

参考文献

[1] 朱立平,王家澄,彭万威,陶兆祥. 寒冻条件下热力作用对岩石破坏的模拟实验及其分析[J]. 地理研究,2000,19(4):437-443.

[2] 杨更社,蒲毅彬,等. 冻融循环条件下岩石损伤扩张初探[J]. 煤炭学报,2002,27(4):357-360.

[3] 周志东,陶然,等. 高原高寒地区边坡变形破坏机制与综

(2)通过灰关联分析可得,在影响边坡稳定性的七个主要因素中,土体内摩擦角 φ 和粘聚力 C 对边坡稳定性影响最为敏感,中间主应力参数 b 和 Lode 应力参数 μ 对边坡稳定的影响次之,坡角 α 和坡高 h 对边坡稳定性的影响较小,而容重 γ 对边坡稳定性的影响最小。

(3)在边坡优化设计和治理中,可以通过改变敏感性较强的因素,如内摩擦角 φ 和粘聚力 C 等,进而达到明显的改善效果。

参考文献:

[1] 李小春,许东俊,刘世煌,等. 真三轴应力状态下拉西瓦花岗岩的强度、变形及破裂特性试验研究[D]. 北京:中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集,中国科学出版社,1994,153-159.

[2] Zhou Wei-yuan, The development and state of art of rock mechanics in China: Application of computer methods in Rock Mechanics, Shaanxi Sci and Tech Press, 1993, Vol. 1, 81-88

[3] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.

[4] 甘勇,胡卫东. 边坡稳定性影响因素的灰色关联分析[J]. 大众科技,2010,18(7):87-88.

[5] 马景洋. 滑坡的稳定性分析与治理措施[J]. 江西建材,2014,36(15):131-132.

作者简介:

魏海兵(1987-),男,陕西延安人,助理工程师,硕士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

焦永春(1986-),男,青海西宁人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

高静(1984-),女,河南新乡人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

合治理技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2015.

作者简介:

周志东(1969-),男,湖南新化人,高级工程师,博士,中科院冻土工程国家重点实验室客座研究员,从事水利水电工程施工技术与应急救援等工作;

陈世杰(1983-),男,甘肃高台人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术研究工作;

高静(1984-),女,河南新乡人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)