

基于总位移指标的反倾岩质边坡倾倒变形影响因子敏感性分析

王雪辉¹, 刘卫²

(1. 新疆建设职业技术学院, 新疆乌鲁木齐 830026; 2. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830013)

[摘要]为分析反倾边坡倾倒变形影响因子敏感性差异,本文采用数值模拟与灰色关联相结合的方法进行研究。首先将边坡几何特征参数、岩体物理力学参数、岩层力学参数定为反倾边坡第一级倾倒变形影响因子,并从各一级因子中进一步划分出边坡坡度、岩层倾角、岩层柔度等12个次级影响因子;然后对各二级影响因子分别选取11个水平数,并将12个二级影响因子、11级水平数随机组合成11套数值模拟方案,采用 UDEC 进行各方案数值模拟分析;最后,采用灰色关联理论以坡顶倾倒变形水平位移为参考序列对12个二级影响因子进行关联度计算,并进一步分析出了3个一级影响因子敏感性大小。研究结果表明:(1)12个二级影响因子对倾倒变形影响最大的是岩层倾角;(2)三个一级影响因子中几何特征参数对倾倒变形影响最大,岩层层理力学参数对反倾边坡变形影响次之,岩块物理力学参数对反倾边坡变形影响最小。

[关键词] 灰色关联 反倾边坡 数值模拟 影响因子 敏感性

[中图分类号] P642.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2019)05-08

Wang Xuehui, Liu Wei. Sensitivity analysis of toppling deformation at a reverse-dip rock slope based on total displacement[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(5): 1268-1275.

0 引言

反倾边坡是指斜坡体岩层走向与斜坡走向相近但倾向相反的一类边坡,一般认为此类边坡稳定性较好,因此对其研究相对较少,但是随着人类工程活动的不断扩大,在许多大型工程建设中,大量反倾斜坡稳定性问题日益突出,严重威胁着工程的安全建设和运营(Bohme et al., 2013; 黄润秋等, 2017)。反倾边坡变形机理复杂、影响因素较多,20世纪90年代以前,国内外学者主要着重于研究反倾边坡的形成条件及稳定性评价方法,伴随岩土工程研究理论与技术的不断发展,特别是数值模拟技术的快速发展,国内外学者开始借助数值模拟、物理模型等方法进行反倾边坡影响因素分析(陈祖煜等, 1996; 汪小刚等, 1996; 徐佩华等, 2004; 蔡跃等, 2008; 刘云鹏等, 2011; Chen et al., 2016)。韩贝传和王思敬(1999)通过有限元 Ansys 软件模拟反倾边坡倾倒变形破坏,认为边坡初始应力场、开挖深度与坡度、岩体物理力学参数等为倾倒变形主要影响因素。程东

幸等(2005)通过三维离散元软件 3DEC 模拟龙滩水电站左岸边坡,分别获得出边坡结构特征、岩体物理力学参数、初始应力场等对反倾边坡倾倒变形的影响特征;Adhikary and Dyskin(2007)通过离心机试验发现,决定破坏模式的关键摩擦角度值范围为 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$,内聚力和内摩擦角对倾倒变形破坏机理的影响差异较大。

虽然目前对反倾边坡倾倒变形的影响因子进行了大量相关研究(程东幸等, 2005; 左保成等, 2005; 谢莉等, 2009; 王林峰等, 2013; 吴建川和邹国庆, 2015),但各研究均主要集中在少量因子对倾倒变形的影响,缺乏对各倾倒变形因子系统全面的对比分析,而对各因子间相对敏感性分析的研究成果则更少。为此,本文在系统分析影响反倾边坡倾倒变形各种内在因子的基础上,采用灰色关联法结合数值模拟分析影响反倾边坡变形破坏各影响因子的敏感性。

1 灰色关联法计算过程

灰色关联法是一种基于多因子的复杂系统(部

[收稿日期] 2018-10-15; [改回日期] 2019-07-26; [责任编辑] 陈伟军。

[第一作者] 王雪辉(1988年-),女,硕士,讲师,主要从事建筑工程技术教学与科研工作。E-mail: 451809683@qq.com。

分信息清晰、部分信息不清晰)影响因子关联度统计分析方法,它依托各自变量因子和参考因子组合关系,定量评价各自变量因子关联强弱。与传统试验方法相比,灰色关联法只需较少的试验数即可准确地计算出各因子的关联度。因而灰色关联法非常适合于系统较复杂、且影响因子数和水平数较多时的因子敏感性分析计算(覃伟等,2016;陈绪新等,2017;陈绪新等,2018;张欣等,2018)。

使用灰色关联法前,要选取能真实表征该系统特征行为的参考序列 X_0 (评价指标集)与自变量序列 X_i (影响因子集),其中参考序列的选取非常重要,它关系着最终的因子关联度结果合理与否。

当因子数量较多时,各因子单位会存在较大差异,为避免各因子单位对模型质量和分析结果的影响,需对各因子统一无量纲化。由于灰色关联法分析时所需样本数量较少,为避免偶然因素对结果的干扰,本文采用 Z-score 法进行无量纲化(公式1)。

$$x_i(k) = \frac{X_i(k) - \bar{x}_i}{s_i} \quad (1)$$

式中 $\bar{x}_i$ 为数据集的平均值, s_i 为数据集方差。

原始数据无量纲化处理后,按公式(2)开始分别计算各序列值与平均值的差的绝对值。

$$\Delta_i(k) = |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}| (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

从公式(2)计算结果中取最大差值与最小差值序列,其中,最大差计算公式为:

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}| \quad (3)$$

最小差计算公式为:

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}| \quad (4)$$

然后根据公式(5)分别计算各自变量因子(影响因子)序列与参考序列对应元素的关联系数:

$$L_{0i}^{(k)} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

其中: ρ 为分辨率,在(0,1)范围内取值,一般 ρ

取 0.5。

确定关联系数后,对各自变量序列分别计算关联系数的算术平均值,该值直接反映各自变量序列与参考序列的关联度大小。

$$R_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n L_{0i}^{(k)} \quad (6)$$

根据 R_{0i} 的大小确定各因子敏感性大小,关联度愈接近 1,说明敏感性愈高。

2 倾倒变形影响因子分析及参考序列选取

2.1 倾倒变形影响因子体系建立

反倾边坡倾倒变形发育的基本几何条件为:

(1)斜坡体岩层反倾,走向与坡面近平行或小角度相交;(2)岩层倾角陡倾,最好为 45° 以上陡倾角;(3)具有一个天然或人工开挖而成的高陡临空面(谭儒蛟等,2009;Claudia et al., 2013;Zhang et al., 2015)。上述反倾边坡在重力场作用下,坡体中、上部岩体会发生倾倒拉裂变形,坡脚岩体会发生滑移剪切变形,岩层在倾倒变形过程中类似悬臂梁,其中反倾边坡倾倒变形主要受控于浅层区拉应力大小,一旦拉应力超过岩体极限承载强度,拉裂纹将逐级贯穿整个岩层,并诱发斜坡发生弯曲倾倒破坏(臧亚君等,2008;邹丽芳等,2009;刘寒鹏和毛彦龙,2010;田小甫等,2012)。因此,边坡几何特征条件、岩块与岩层力学参数均控制着倾倒变形发育规模(李高勇等,2013;Faysal et al., 2014;Zhang et al., 2014)。基于此,本文首先将边坡几何特征、岩体物理力学参数、岩层层理力学参数作为反倾边坡倾倒变形的第一级影响因子,然后对各一级倾倒变形影响因子细分次级影响因子(图1),并着重分析各次级影响因子关联度大小,进而确定一级影响因子敏感性(殷跃平等,2017;张立博等,2017;张树轩等,2017)。

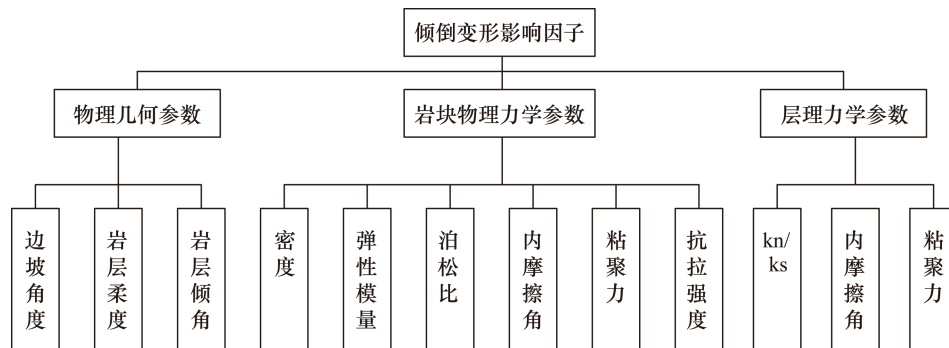


图1 边坡倾倒变形影响因子体系

Fig.1 The system of impact factors for bending and toppling deformation at anti-dip slopes

2.2 参考序列选取

参考序列的选取直接关系着各影响因子敏感性计算结果,因此选择合理的参考序列才能保证计算结果的科学合理。倾倒变形演化过程本质上能量的转化过程,及斜坡体势能转化为变形能(孙英勋,2006;尹锡杰等,2007),因此同一级量的势能既可以转化为大面积岩土体小变形,亦可转化为小面积岩土体大变形,因此本文选用总位移作为参考序列。总位移指标为变形量(矢量)与单元面积(标量)的乘积(公式7),变形面积为模型发生倾倒变形的区域(图2阴影区域),通过离散元软件 UDEC 自带的 fish 语言编程遍历所有单元,获取相应面积和位移

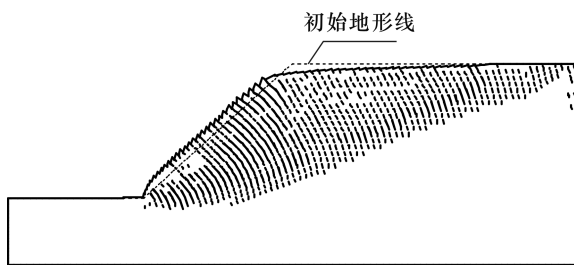


图2 倾倒变形层理拉裂区分布图

Fig.2 Distribution of tension cracks in beds under toppling deformation

值即可计算出总位移,为提高计算速率,对变形量小于毫米级的单元视为未变形区,不予统计。

总位移计算公式如下:

$$S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot s_i \quad (7)$$

其中 s 为单元变形量, A 为其对应单元面积。

3 倾倒变形数值模拟

为使研究成果更具普适性,建立如图3所示简化数值模型,模型高120m(其中坡高100m),宽250m。模拟软件采用离散元 UDEC,通过迭代计算可获得边坡最终倾倒变形位移云图(图4)。

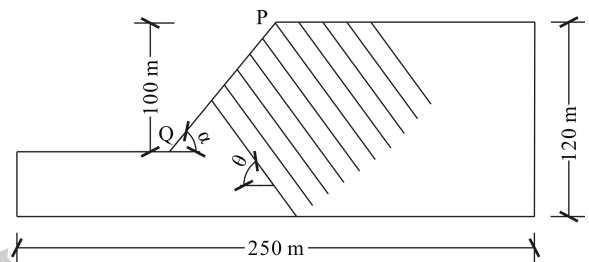


图3 数值模拟简化图

Fig.3 A simplified model for numerical stimulation of bending and toppling deformation

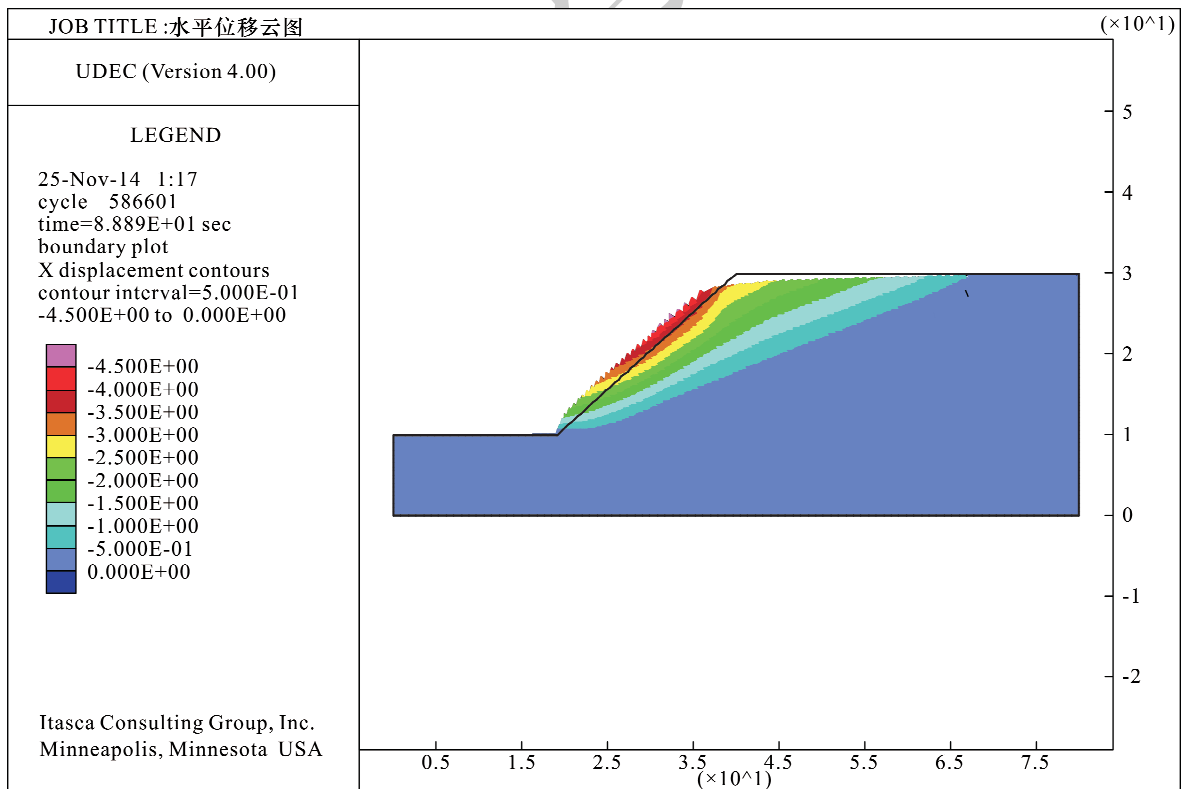


图4 倾倒变形位移云图

Fig.4 Displacement cloud of toppling deformation

3.1 倾倒变形边坡模型设计

结合实际工程实例对所取 12 个二级影响因子分别选取 11 个等级水平数,并采用随机组合各参数

得出 11 套数值模拟方案(表 1)。方案中边坡模型坡度的改变主要采用固定坡顶坐标(图 3 中 P 点)、变化坡脚坐标(图 3 中 Q 点)来实现。

表 1 各数值模拟方案参数取值表
Table 1 Parameters of numerical stimulation schemes

几何特征参数			岩体参数							层理参数		
$\begin{matrix} i \\ k \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
序号	坡度 °	柔度	倾角 °	密度 $\text{kg} \times \text{m}^{-3}$	弹性模量 MPa	泊松比	内摩擦角 °	粘聚力 Mpa	抗拉强度 MPa	ks/kn	内摩擦角 °	粘聚力 MPa
A	30	0.063	80	2700	6000	0.35	58	31	8	0.60	30	0.40
B	35	0.019	70	2800	14000	0.27	62	34	3	0.50	45	0.55
C	70	0.075	75	2450	15000	0.26	50	22	10	0.90	15	0.05
D	75	0.013	45	2500	9000	0.32	42	37	11	0.40	40	0.20
E	60	0.025	60	2550	10000	0.31	66	40	4	1.00	35	0.15
F	55	0.031	55	2850	12000	0.29	70	28	2	0.70	25	0.50
G	80	0.056	50	2350	13000	0.28	54	25	9	0.80	10	0.30
H	65	0.038	65	2400	7000	0.34	46	10	6	0.05	50	0.35
I	40	0.044	35	2650	8000	0.33	30	16	1	0.20	55	0.10
J	45	0.050	40	2600	11000	0.30	34	13	5	0.10	5	0.25
K	50	0.069	30	2750	16000	0.25	38	19	7	0.30	20	0.45

3.2 模拟结果分析

数值模拟主要是获取边坡倾倒变形总位移值,对各方案进行相同循环迭代次数计算获取了各方案

总位移值(即参考序列)(图 5)。图中可知总位移值序列可表示为:

$$X_o(k) = [2.6691\text{E} - 04 \quad 1.0191\text{E} - 03 \quad 4.8831\text{E} - 02 \quad 1.2792\text{E} - 03 \quad 2.1096\text{E} - 02 \\ 4.0885\text{E} - 05 \quad 9.1214\text{E} - 05 \quad 1.8645\text{E} - 02 \quad 2.9348\text{E} - 04 \quad 8.2314\text{E} - 04 \quad 1.2990\text{E} - 04]$$

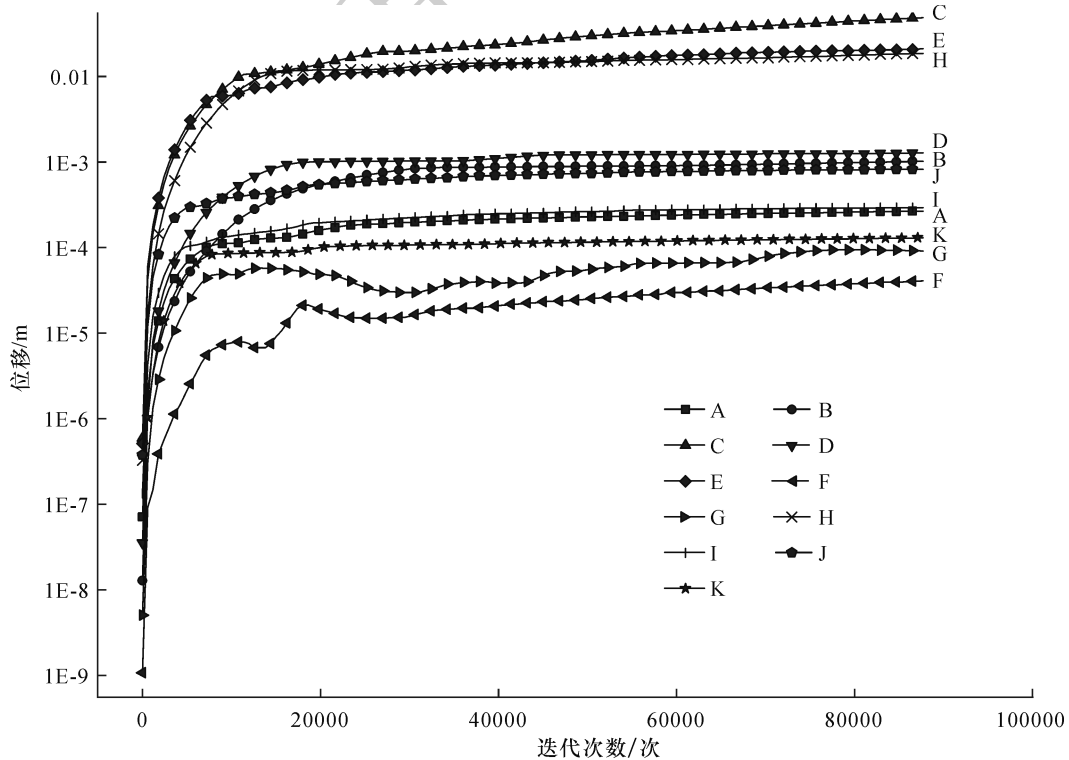


图 5 各模拟方案总位移值监测曲线
Fig.5 Curves of simulated total displacements by every scheme

4 倾倒变形强弱敏感性因子分析

利用 MATLAB 软件程序化灰色关联法,并用于计算各因子敏感性。关联度分析前需对自变量

序列 X_i (倾倒变形二级影响因子) 与数值模拟获得的参考序列 X_0 (总位移) 进行无量纲化。通过 Z-score 标准法分别对 X_0 、 X_i 进行无量纲化结果如下:

$$X_0(k) = [-0.525 \quad -0.477 \quad 2.608 \quad -0.460 \quad 0.820 \quad -0.540 \quad -0.537 \quad 0.658 \quad -0.524 \quad -0.489 \quad -0.534]$$

$$X_i(k) = \begin{bmatrix} -1.508 & -1.206 & 0.905 & 1.206 & 0.302 & 0.000 & 1.508 & 0.603 & -0.905 & -0.603 & -0.302 \\ 0.905 & -1.206 & 1.508 & -1.508 & -0.905 & -0.603 & 0.603 & -0.302 & 0.000 & 0.302 & 1.206 \\ 1.508 & 0.905 & 1.206 & -0.603 & 0.302 & 0.000 & -0.302 & 0.603 & -1.206 & -0.905 & -1.508 \\ 0.603 & 1.206 & -0.905 & -0.603 & -0.302 & 1.508 & -1.508 & -1.206 & 0.302 & 0.000 & 0.905 \\ -1.508 & 0.905 & 1.206 & -0.603 & -0.302 & 0.302 & 0.603 & -1.206 & -0.905 & 0.000 & 1.508 \\ 1.508 & -0.905 & -1.206 & 0.603 & 0.302 & -0.302 & -0.603 & 1.206 & 0.905 & 0.000 & -1.508 \\ 0.603 & 0.905 & 0.000 & -0.603 & 1.206 & 1.508 & 0.302 & -0.302 & -1.508 & -1.206 & -0.905 \\ 0.603 & 0.905 & -0.302 & 1.206 & 1.508 & 0.302 & 0.000 & -1.508 & -0.905 & -1.206 & -0.603 \\ 0.603 & -0.905 & 1.206 & 1.508 & -0.603 & -1.206 & 0.905 & 0.000 & -1.508 & -0.302 & 0.302 \\ 0.294 & -0.014 & 1.219 & -0.322 & 1.527 & 0.603 & 0.911 & -1.401 & -0.939 & -1.247 & -0.631 \\ 0.000 & 0.905 & -0.905 & 0.603 & 0.302 & -0.302 & -1.206 & 1.206 & 1.508 & -1.508 & -0.603 \\ 0.603 & 1.508 & -1.508 & -0.603 & -0.905 & 1.206 & 0.000 & 0.302 & -1.206 & -0.302 & 0.905 \end{bmatrix}$$

4.1 次级影响因子敏感性分析

在完成无量纲化后,通过公式(5)、(6)在 MAT-

LAB 中可求得各因子关联度矩阵为:

$$R_{oi} = [0.7721 \quad 0.7042 \quad 0.7800 \quad 0.6500 \quad 0.6986 \quad 0.7348 \quad 0.7115 \quad 0.7005 \quad 0.7072 \quad 0.7522 \quad 0.7284 \quad 0.6917]^T$$

计算结果表明所取 12 个二级影响因子对反倾边坡倾倒变形影响从大到小的排列顺序为:岩层倾角 > 边坡坡角 > kn/ks > 泊松比 > 层理内摩擦角 > 岩块内摩擦角 > 岩块抗拉强度 > 柔度 > 岩块粘聚力 > 弹性模量 > 层理粘聚力 > 密度。即:岩层倾角、边坡坡度、层理面刚度比对倾倒变形影响相对较大,岩体弹性模量、层理粘聚力、岩体密度对倾倒变形影响相对较小。

4.2 一级影响因子敏感性分析

在次级影响因子分析的基础上,为进一步揭示反倾边坡倾倒变形受一级影响因子敏感性大小,对隶属各一级影响因子的次级影响因子分别求取平均值,计算如下:

$$R_{o物理几何} = \frac{\sum_{i=1}^3 R_{oi}}{3} = 0.7521$$

$$R_{o岩块物理学} = \frac{\sum_{i=4}^9 R_{oi}}{6} = 0.7004$$

$$R_{o层理力学} = \frac{\sum_{i=10}^{12} R_{oi}}{3} = 0.7241$$

计算结果表明一级主控影响因子中,物理几何参数与反倾边坡倾倒变形关联度最大(0.7521),即对倾倒变形影响最大,层理力学参数与反倾边坡倾倒变形关联度次之(0.7241),岩块物理力学参数与反倾边坡倾倒变形关联度最小(0.7004),即对倾倒变形影响最小。

5 结论

通过采用灰色关联法与数值模拟相结合的方法分析反倾边坡倾倒变形影响因子敏感性,本文主要得出如下结论:

(1) 基于反倾边坡的形成条件及倾倒变形机制,分析并建立了反倾边坡倾倒变形影响因子集,因子集由 3 个一级影响因子、12 个二级影响因子组成,并依据因子集建立反倾边坡模型分析各因子敏感性。

(2) 12 个二级影响因子对倾倒变形影响从大到小顺序为:岩层倾角 > 边坡坡角 > kn/ks > 泊松比 > 层理内摩擦角 > 岩块内摩擦角 > 岩块抗拉强度 > 柔度 > 岩块粘聚力 > 弹性模量 > 层理粘聚力 > 密度。

(3) 物理几何参数与反倾边坡倾倒变形关联系数为 0.7521, 即对倾倒变形影响最大, 层理力学参数与反倾边坡倾倒变形关联系数为 0.7241, 岩块物理力学参数与反倾边坡倾倒变形关联系数为 0.7004, 即对倾倒变形影响最小。

[References]

- Adhikary D P, Dyskin A. 2007. Modeling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40:349 – 362.
- Bohme, Martina, Hermanns, Reginald L, Oppikofer, Thierry, Fischer, Luzia, Bunkholt, Halvor S S, Eiken, Trond, Pedrazzini, Andrea, Derron, Marc – Henri Jaboyedoff, Michel, Blikra, Lars H, Nilsen, Bjorn. 2013. Analyzing complex rock slope deformation at Stampa, western Norway, by integrating geomorphology, kinematics and numerical modeling[J]. *Engineering Geology*, 154:116 – 130.
- Cai Yue, Mitani Yasuhiro, Esaki Tetsuro. 2008. Numerical analysis of slope stability of anti – dip layered rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(12):2517 – 2522 (in Chinese with English abstract).
- Chen Congxin, Zheng Yun, Sun Chaoyi. 2016. An analytical approach on flexural toppling failure of counter – tilt slopes of layered rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35:2174 – 2187.
- Chen Xuxin, Fu Houli, Qin Zhe, Zhang Libo, Wang Guozhen. 2017. Stability analysis of altered rock slope under different saturated conditions[J]. *Geology and Exploration*, 53(1):151 – 156 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xuxin, Qin Zhe, Fu Houli, Liu Xing, Li Sen. 2018. Stability analysis of saturated water slope based on cusp catastrophe model[J]. *Geology and Exploration*, 54(2):376 – 380 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zuyu, Zhang Jianhong, Wang Xiaogang. 1996. A simplified method for slope stability analysis of rock slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 18(6):96 – 99 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Dongxing, Liu Daan, Ding Enbao, Chen Weihong, Pan Wei, Liu Yanhui, Guo Huafeng. 2005. Three – dimensional numerical simulation of deformation characteristics of anti – dip rock slopes: Taking the slope of Longtan Hydropower Station as an example for 3D deformation analysis[J]. *Journal of Engineering Geology*, 13(2):222 – 226 (in Chinese with English abstract).
- Claudia Pereira L, Sabino Lana M, Costa Melo F, Trindade Lopes P F. 2013. Modeling aspects of block toppling in rock slopes. 23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2013 [A]. Antalya, Turkey, Antalya, Turkey: Chamber of Mining Engineers of Turkey:463 – 474.
- Faysal A, Ahmed, Babiker, Smith, Colin C, John P, Matthew Gilbert. 2014. Non – associative limit analysis of the toppling – sliding failure of rock slopes[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 71:1 – 11.
- Han Beichuan, Wang Sijing. 1999. Analysis of formation mechanism and influencing factors of slope dumping deformation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 7(3):213 – 217 (in Chinese with English abstract).
- Huang Runqiu, Li Yusheng, Yan Ming. 2017. The implication and evaluation of toppling failure in engineering geology practice[J]. *Journal of Engineering Geology*, 25(5):1165 – 1181 (in Chinese with English abstract).
- Li Gaoyong, Liu Gao, Xie Yujiang. 2013. Study on aging deformation of a dumping body in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 21(6):835 – 841 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hanpeng, Mao Yanlong. 2010. Study on dynamic stability of high slope of dump pit in open pit mine[J]. *Geology and Exploration*, 46(4):728 – 732 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yunpeng, Huang Runqiu, Deng Hui. 2011. Experimental study on vibration physical simulation of anti – rolling plate rock slope[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 38(4):413 – 421 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yingxun. 2006. Discussion on the treatment classification and governance mode of landslide[J]. *Geology and Prospecting*, 42(1):85 – 88 (in Chinese with English abstract).
- Tan Wei, Xu Zhibin, Li Donglin. 2016. Influence of permeability and rainfall intensity on stability of accumulation landslide[J]. *Geology and Exploration*, 52(4):743 – 750 (in Chinese with English abstract).
- Tan Rujiao, Yang Xuchao, Hu Ruilin, Liu Guoquan. 2009. Numerical simulation of deformation process and failure mechanism of large anti – dip reservoir rock mass[J]. *Journal of Engineering Geology*, 17(4):476 – 482 (in Chinese with English abstract).
- Tian Xiaofu, Sun Jinzhong, Liu Lipeng, Zheng Xiaoyan, Jia Lei. 2012. Numerical simulation of the influence of structure on rock slopes[J]. *Geology and Exploration*, 48(4):840 – 846 (in Chinese with English abstract).
- Wang Linfeng, Chen Hongkai, Tang Hongmei. 2013. Study on mechanical mechanism of failure of anti – dip rock slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(5):884 – 889 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Zhao Yajie, Li Jiachun. 2012. Disaster identification based on the principle of roadbed engineering geological analysis[J]. *Subgrade Engineering*, 164(5):17 – 19 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaogang, Jia Zhixin, Chen Zuyu, Zhang Jianhong. 1996. Stability analysis method for dumping failure of rock slope[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 3(3):7 – 12 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jianchuan, Zou Guoqing. 2015. Evolution process and engineering treatment of rock slope deformation[J]. *Hydroelectric Power Generation*, 41(4):19 – 23 (in Chinese with English abstract).
- Xie Li, Li Yusheng, Cao Jianjun, Liu Genliang. 2009. Numerical simulation of rock mass dumping deformation of right abutment of a hydropower station in Minjiang River[J]. *Geology in China*, 36(4):907 – 914 (in Chinese with English abstract).

- Xu Peihua, Chen Jianping, Huang Runqiu, Yan Ming. 2004. Discussion on deformation mechanism of anti - dip high slope in Jiepinggou of Jinping hydropower station [J]. Journal of Engineering Geology, 12(3):247 - 252 (in Chinese with English abstract).
- Yin Xijie, Yan Echuan, Sun Zhaolai. 2007. Determination of the failure surface of an anti - dip shale slope and its stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 28(S1):595 - 598 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping, Wang Wenpei, Zhang Nan, Yan Jinkai, Wei Yunjie, Yang Longwei. 2017. Study on characteristics of long - range disasters of high landslides in strong earthquake area - Taking Xinmo landslide in Mao County, Sichuan Province as an example [J]. Geology in China, 44(05):827 - 841 (in Chinese with English abstract).
- Zang Yajun, Liu Dongyan, Jiang Kefeng. 2008. Analysis of the genesis of the skeletal landslide in Chongqing mining area [J]. Geology and Exploration, 44(4):87 - 92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Libo, Fu Houli, Qin Zhe, Liu Xing, Chen Xuxin. 2017. Study on the saturation line and stability of rock slope in open pit [J]. Geology and Exploration, 53(6):1174 - 1180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Sherong, Tan Yaosheng, Wang Chao, Wang Kuan. 2014. Research on deformation failure mechanism and stability of slope rock mass containing multi - weak interlayers [J]. Rock and Soil Mechanics, 35:1695 - 1702.
- Zhang Shuxuan, Yang Weimin, Cheng Xiaojie, Tian You, Li Hao, Huang Xiao. 2017. Analysis on the genesis and stability of Hongqishan loess landslide group in Tianshui, Gansu Province [J]. Geology in China, 44(5):924 - 937 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Wang Yunsheng, Liang Ruifeng. 2018. GIS - based landslide hazard assessment of the middle and north sections of Xiaojiang fault [J]. Geology and Exploration, 54(3):623 - 633 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zelin, Liu Gao, Wu Shuren, Tang Huiming, Wang Tao, Li Gaoyong, Liang Changyu. 2015. Rock slope deformation mechanism in the Cihaxia hydropower station, northwest China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74:943 - 958.
- Zou Lifang, Xu Weiya, Ning Yu, Zheng Wentang. 2009. Review on the mechanism of dumping deformation and failure of anti - dip layered rock slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 26(5):25 - 30 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Baocheng, Chen Congxin, Liu Xiaowei, Shen Qiang. 2005. Experimental study on failure mechanism of anti - dip rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(19):107 - 113 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 蔡跃, 三谷泰浩, 江崎哲郎. 2008. 反倾层状岩体边坡稳定性的数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 27(12):2517 - 2522.
- 陈绪新, 付厚利, 秦哲, 张立博, 王国珍. 2017. 不同饱水条件下铈变岩边坡稳定性分析 [J]. 地质与勘探, 53(1):151 - 156.
- 陈绪新, 秦哲, 付厚利, 刘兴, 李森. 2018. 基于尖点突变模型饱水边坡稳定性分析 [J]. 地质与勘探, 54(2):376 - 380.
- 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 1996. 岩石边坡倾倒稳定分析的简化方法 [J]. 岩土工程学报, 18(6):96 - 99.
- 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 陈卫红, 潘炜, 刘艳辉, 郭华锋. 2005. 反倾岩质边坡变形特征的三维数值模拟研究—以龙滩水电站工程边坡为例进行三维变形特征分析 [J]. 工程地质学报, 13(2):222 - 226.
- 韩贝传, 王思敬. 1999. 边坡倾倒变形的形成机制与影响因素分析 [J]. 工程地质学报, 7(3):213 - 217.
- 黄润秋, 李渝生, 严明. 2017. 斜坡倾倒变形的工程地质分析 [J]. 工程地质学报, 25(5):1165 - 1181.
- 李高勇, 刘高, 谢裕江. 2013. 黄河上游某倾倒体的时效变形研究 [J]. 工程地质学报, 21(6):835 - 841.
- 刘寒鹏, 毛彦龙. 2010. 露天矿排土场高边坡动力稳定性研究 [J]. 地质与勘探, 46(4):728 - 732.
- 刘云鹏, 黄润秋, 邓辉. 2011. 反倾层状岩体边坡振动物理模拟试验研究 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(4):413 - 421.
- 孙英勋. 2006. 滑坡的处治分类与治理模式探讨 [J]. 地质与勘探, 42(1):85 - 88.
- 覃伟, 徐智彬, 李东林. 2016. 渗透性与降雨强度对堆积层滑坡稳定性的影响 [J]. 地质与勘探, 52(4):743 - 750.
- 谭儒蛟, 杨旭朝, 胡瑞林, 刘国权. 2009. 大型反倾库岸岩体变形过程及破坏机制数值模拟 [J]. 工程地质学报, 17(4):476 - 482.
- 田小甫, 孙进忠, 刘立鹏, 郑小燕, 贾雷. 2012. 结构面对岩质边坡地震动影响的数值模拟研究 [J]. 地质与勘探, 48(4):840 - 846.
- 汪小刚, 贾志欣, 陈祖煜, 张建红. 1996. 岩质边坡倾倒破坏的稳定分析方法 [J]. 水利学报, 3(3):7 - 12.
- 王林峰, 陈洪凯, 唐红梅. 2013. 反倾岩质边坡破坏的力学机制研究 [J]. 岩土工程学报, 35(5):884 - 889.
- 王威, 赵亚杰, 李家春. 2012. 基于路基工程地质分析原理的灾害识别 [J]. 路基工程, 164(5):17 - 19.
- 吴建川, 邹国庆. 2015. 岩质边坡倾倒变形演化过程及工程治理 [J]. 水力发电, 41(4):19 - 23.
- 谢莉, 李渝生, 曹建军, 刘根亮. 2009. 澜沧江某水电站右坝肩岩体倾倒变形的数值模拟 [J]. 中国地质, 36(4):907 - 914.
- 徐佩华, 陈剑平, 黄润秋, 严明. 2004. 锦屏水电站解放沟反倾高边坡变形机制的探讨 [J]. 工程地质学报, 12(3):247 - 252.
- 尹锡杰, 晏鄂川, 孙兆来. 2007. 某反倾页岩边坡破坏面确定及其稳定性分析 [J]. 岩土力学, 28(S1):595 - 598.
- 殷跃平, 王文沛, 张楠, 闫金凯, 魏云杰, 杨龙伟. 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究—以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. 中国地质, 44(5):827 - 841.
- 臧亚君, 刘东燕, 蒋克锋. 2008. 重庆矿区矸石山滑坡成因分析 [J]. 地质与勘探, 44(4):87 - 92.
- 张立博, 付厚利, 秦哲, 刘兴, 陈绪新. 2017. 露天矿坑岩质边坡浸润线及稳定性研究分析 [J]. 地质与勘探, 53(6):1174 - 1180.
- 张树轩, 杨为民, 程小杰, 田尤, 李浩, 黄晓. 2017. 甘肃天水红旗山黄土滑坡群成因及稳定性分析 [J]. 中国地质, 44(5):924 - 937.
- 张欣, 王运生, 梁瑞锋. 2018. 基于 GIS 的小江断裂中北段滑坡灾害危险性评价 [J]. 地质与勘探, 54(3):623 - 633.

邹丽芳,徐卫亚,宁宇,郑文棠. 2009. 反倾层状岩质边坡倾倒变形破坏机理综述[J]. 长江科学院院报,26(5):25-30.

左保成,陈从新,刘小巍,沈强. 2005. 反倾岩质边坡破坏机理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,24(19):107-113.

Sensitivity Analysis of Toppling Deformation at a Reverse - Dip Rock Slope Based on Total Displacement

WANG Xuehui¹, LIU Wei²

(1. Xingjiang Vocation & Technical College of Construction, Urumqi, Xinjiang 830026; 2. Economic Research Institute of Xinjiang Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Urumqi, Xinjiang 830013)

Abstract: This paper analyzes the sensitivity of impact factors of bending and toppling deformation at a reverse - dip slope using numerical simulation combined with the grey association method. Firstly, the parameters of geometry, physics and mechanics of the rock are defined as three first - order deformation impact factors, from which 12 second - order impact factors are divided including slope gradient, strata dip and strata compliance. Then for each second - order impact factor, 11 levels are selected, respectively. And the 12 second - order impact factors and 11 levels are randomly grouped into 11 sets for numerical simulation schemes, and UDEC is used to perform simulation on each scheme. Finally, the grey association method is used to calculate the correlation of each impact factor with bending and toppling deformation and to determine the sensitivity of the three first - order impact factors. The results show that (1) the strata dip has the greatest impact on the bending and toppling deformation in the 12 second - order impact factors. (2) In three first - order impact factors, the geometry of the slope can pose the largest impact on the bending and toppling deformation of the reverse - dip slope, followed by the mechanical parameters of joints, and the physical and mechanical parameters of rock masses have the minimum impact.

Key words: grey relation method, reverse - dip slope, numerical simulation, impact factor, sensitivity

