

基于因子分析法与数模耦合的边坡稳定性评价

张俊华 魏红兵

中交第四公路工程局有限公司, 北京 100022

[摘要]针对目前边坡安全性评价体系中的指标众多、重叠性大,传统评价方法存在主观性和不切实际性的问题,文中结合实际工程案例初选影响边坡安全性评价指标,采用因子分析法甄选影响主因子;并计算权重系数,结合有限元强度折减法进行数值模拟,建立了一种适用于边坡安全性的方法。该方法将主观评价指标与客观数学理论相结合,利用严谨的数学方法进行论证,计算结果与有限元数值模拟得到的结果一致。

[关键词]因子分析法;边坡;数值模拟;综合评价

DOI: 10.33142/ec.v6i3.7972

中图分类号: U416.14

文献标识码: A

Slope Stability Evaluation Based on Factor Analysis Coupled with Numerical Simulation

ZHANG Junhua, WEI Hongbing

CCCC Fourth Highway Engineering Co., Ltd., Beijing, 100022, China

Abstract: In view of the numerous and overlapping indicators in the current slope safety evaluation system, and the problems of subjectivity and impracticality in traditional evaluation methods, this paper uses factor analysis to select the main influencing factors based on the preliminary selection of influencing slope safety evaluation indicators based on actual engineering cases; A method suitable for slope safety is established by calculating the weight coefficient and conducting numerical simulation using the finite element strength reduction method. This method combines subjective evaluation indicators with objective mathematical theory, and uses rigorous mathematical methods to demonstrate. The calculation results are consistent with those obtained by finite element numerical simulation.

Keywords: factor analysis method; slope; numerical simulation; comprehensive evaluation

引言

随着经济的迅速发展,岩土工程的也在迅速的开展,在水利、地质、土木交通以及环境等大型工程之中,人工开挖或者天然的边坡稳定性的问题也越来越突出。边坡稳定性评价的问题也愈发地重要,它会直接影响到工程资金的投入和人民的生命和财产安全。因此,边坡的稳定性评价问题,边坡的稳定预测问题以及边坡的发展趋势具有重要的工程实际意义。

重庆市位于我国的西南地区,重庆地区的地质条件复杂且边坡数量较多,降雨量丰富,地形起伏较大,而相对规模较小,发生滑坡失稳的几率较大。对于重庆地区边坡失稳现象方面的研究历史数据较少,并且由于边坡的稳定性不单单只是受到一个因素的影响,所以如何根据重庆地区的地质条件、地形特点,采用科学合理的方式对边坡的稳定性进行合理的评价,以便于更有针对性地对边坡进行科学的养护。本文针对重庆地区的边坡进行安全稳定性评价。

近年来,就边坡的稳定性评价问题,国内外学

者提出来了不同的评价方法。例如:王斌等人提出了物点法评价边坡的稳定性^[1],阮航、张勇慧等人提出了改进的模糊评价方法来评价边坡的稳定性^[2],谢全敏、夏元友等人提出了遗传算法评价边坡的稳定性^[3],吴大国^[4]等

人提出了模糊集的评价方法,石根华^[5]等将块体体系不连续变形的分析方法和数值流形法应用于边坡的安全性评价,专家们尽可能多地收集边坡稳定性评价的指标,但是过多的评价指标很难在处理问题中发挥优势,甚至会造成更多的麻烦,所有应该寻找多种方法分析边坡的稳定性问题。

1 因子分析法的理论

1.1 因子分析法的基本思想

因子分析法是根据相关性的大小将变量分组,使得同组内的变量间的相关性较高,不同组的变量间的相关性较低^[6]。

1.2 建立因子分析法的模型

1.2.1 因子数据的标准化

设有 m 个样本,每个样本有 n 个因子和一个评价指标。我们记样本中评价因子构成的矩阵为 $H = (h_{ab})_{m \times n} (a=1,2,\dots,m; b=1,2,\dots,n)$,为了消除量纲的影响,我们将数据的样本进行标准化处理。

$$X_{ab} = \frac{h_{ab} - \bar{h}_b}{S_b} \quad (1)$$

式中的 $\bar{h}_b$ 为因子 b 的平均值, S_b 为因子 b 的标准差。

$$S_b = \frac{1}{m} \sum_{a=1}^m (h_{ab} - h_b)^2 \quad \text{其中 } b = (1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

1.2.2 因子的相关性评价

因子的相关系数公式为：

$$t_{ab} = \frac{\left| \sum_{a=1}^m x_{ab} x_{ac} \right|}{\sqrt{\sum_{a=1}^m x_{ab}^2} \sqrt{\sum_{a=1}^m x_{ac}^2}} \quad (a=1, 2, \dots, n, b=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

那么相关系数矩阵 T ，那么 $T = (t_{ab})_{n \times n}$

式中的 $t_{ab} (a=1, 2, \dots, n, b=1, 2, \dots, n)$ 表示因子 a 与因子 b 之间的相关系数，它是用来衡量因子之间的相似程度。

2 工程应用实例分析

2.1 工程的信息

白果树边坡位于重庆市万州区某村内，其地理位置位于重庆市版图东北部，地处四川盆地东部，地层土层多为堆积土层，根据地质勘测报告获得边坡的含水率、重度、比重、孔隙比等数据信息。

2.2 边坡评价指标的选择

近些年来，研究者对于边坡稳定安全性评价的指标选择不一致，李思平等人^[7]选取了重度、粘聚力、内摩擦角、边坡角、边坡的高度等指标进行对边坡的稳定性进行评价，何翔等^[8]人选取了土体的重度、土体的粘聚力、内摩擦角、边坡的坡脚、孔隙水压力等指标。评价指标的选取直接影响边坡稳定性评价的准确性。因此，本文在参考前人选取的指标的基础上和工程的实际情况地选取了含水率、重度、孔隙比、饱和度、液性指数、黏聚力、内摩擦角七个指标进行边坡的稳定性分析。

各个指标选择的依据如下表 1：

(1) 含水率 (E_1)：边坡的含水率越大，边坡的孔隙水压越大，有效应力越小，边坡越不稳定。

(2) 重度 (E_2)：边坡的重度越大，稳定安全系数越小，边坡的稳定性越差。

(3) 孔隙比 (E_3)：孔隙比反映土体的紧密程度，孔隙比越小，土体越密实，边坡越稳定。

(4) 饱和度 (E_4)：饱和度反映了土体被水充满的程度，饱和度越大，边坡越不稳定。

(5) 液性指数 (E_5)：液性指数反映土体的软硬与干湿状况，液性指数越大，土体越软，边坡越不稳定。

(6) 黏聚力 (E_6)：黏聚力越大，土体的抗滑稳定性越好，边坡越稳定。

(7) 内摩擦角 (E_7)：边坡的内摩擦角越小，内摩擦系数越小，土体的抗滑稳定性越差，边坡越不稳定。

根据因子分析法的步骤进行计算，将数据标准化后得到的因子矩阵为，进而得到相关系数矩阵，通过相关系数矩阵，对因子进行提取一个主成分 Z ，其总方差解释见下表 2：

表 1 各例土质边坡评价指标值

编号	(E_1)	(E_2)	(E_3)	(E_4)	(E_5)	(E_6)	(E_7)
TY01	24.4	19.09	0.667	99.53	0.32	14.3	8.9
TY02	22.5	19.19	0.612	99.71	0.26	15.8	10.3
TY03	24.8	19.09	0.678	99.81	0.42	15	5.4
TY04	27.5	19.21	0.776	96.76	0.62	18.7	8.8
TY05	29.1	19.21	0.798	99.53	0.66	16.4	7.7
TY06	27.2	19.31	0.763	97.36	0.6	14.2	5.5
TY07	25.2	19.05	0.711	96.37	0.46	13.2	5.2
TY08	24.3	19.7	0.682	96.71	0.37	23.4	17.8
TY09	23.8	19.7	0.675	95.86	0.32	20.2	13.8
TY10	26.3	19.4	0.729	97.81	0.51	25.6	15.5
TY11	24.7	19.7	0.681	98.25	0.35	26.3	15.2
TY12	22.1	19.89	0.636	94.51	0.21	19.4	12.1
TY13	20.9	19.99	0.612	92.86	0.01	22.9	17.4
TY14	25.2	20.4	0.726	94.73	0.44	25.5	16.1
TY15	24.3	19.31	0.716	92.28	0.32	19.6	12.3
TY16	26.3	20.4	0.729	97.81	0.53	20.8	16.2
TY17	25.5	20.31	0.733	94.65	0.37	23.9	16.1
TY18	27.2	19.31	0.756	97.83	0.49	19.1	13.1
TY19	21.9	19.89	0.627	94.6	0.15	22.6	18.2
TY20	24.7	19.8	0.673	99.47	0.44	17.7	18.7
TY21	23.2	19.8	0.653	96.31	0.26	21.6	12.2
TY22	21.5	19.89	0.628	93.12	0.17	18.8	17.2
TY23	20.7	19.99	0.609	92.4	0.08	21.4	15.8
TY24	23.4	19.6	0.684	93.34	0.26	19.5	11.4

表 2 总方差解释

初始特征值提取载荷平方和

成分总计方差百分比累计 (%) 总计方差百分比累计 (%)

1	4.065	58.071	58.071	4.065	58.071	58.071
2	1.762	25.177	83.248	1.762	25.177	83.248
3	0.665	9.503	92.751	0.665	9.503	92.751
4	0.313	4.469	97.22			
5	0.162	2.311	99.53			
6	0.033	0.464	99.995			
7	0	0.005	100			

在获得因子的总方差的基础上，根据图表，提取三个因素作为主因子，从而得到了主因子的载荷矩阵和旋转后的因子载荷矩阵以及因子得分系数矩阵如表 3：

表 3 因子得分系数矩阵

指标	(E_1)	(E_2)	(E_3)	(E_4)	(E_5)	(E_6)	(E_7)
F_1	0.342	0.08	0.449	-0.17	0.304	0.114	-0.061
F_2	0.068	0.349	0.021	0.142	0.06	0.421	0.431
F_3	0.018	-0.071	-0.338	1.056	0.094	0.052	0.307

上表给出了三个主因子的得分系数矩阵,由上表可以得到,主因子 F_1 、 F_2 、 F_3 的成分得分函数表达式,如下:
(e_i^* 是指标 E_i 标准化后的数值)

$$F_1=0.342e_1+0.08e_2+0.449e_3-0.17e_4+0.304e_5+0.114e_6-0.61e_7$$

$$F_2=0.068e_1+0.349e_2+0.021e_3-0.142e_4+0.06e_5+0.42e_6-0.431e_7$$

$$F_3=0.018e_1-0.071e_2-0.338e_3+1.056e_4+0.094e_5+0.052e_6-0.307e_7$$

将原始数据标准化处理,把标准化处理后的数据代入上式,进而得到各个勘测点的主因子得分。

文中采用综合得分函数对边坡的稳定性进行定量的评价分析,采用综合评价函数:

$$F_{\text{综合}}=(C_1/0.92751)F_1+(C_2/0.92751)F_2+(C_3/0.92751)F_3$$

式中: C_1 : 公因子 F_1 的方差贡献率

C_2 : 公因子 F_2 的方差贡献率

C_3 : 公因子 F_3 的方差贡献率

将式带入式得到回归方程如下:

$$F_{\text{综合}}=0.234e_1+0.138e_2+0.252e_3+0.04e_4+0.216e_5+0.11e_6+0.11e_7$$

从而得到各个勘测点的综合得分,将综合因子的得分结果分为两种类型的边坡,第一类边坡失稳的类型,综合因子得分范围为 $[-1.5, 1]$,第二类边坡失稳类型之外,综合因子得分范围为: $[1, 1.5]$,具体的综合因子得分情况和稳定性情况。

为了验证评价结果的合理性,本文采用了边坡稳定性分析的大型模拟软件 Slide 进行边坡的模拟,根据工程实际情况,对模拟的边坡建模,并且划分地下水位,具体模拟结果如下所示:

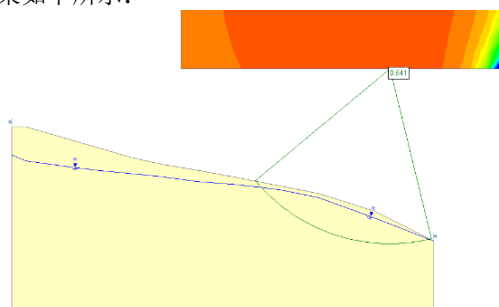


图1 TY01 勘测点的边坡稳定性分析

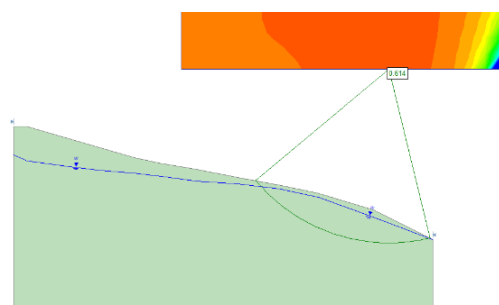


图2 TY02 勘测点的边坡稳定性分析

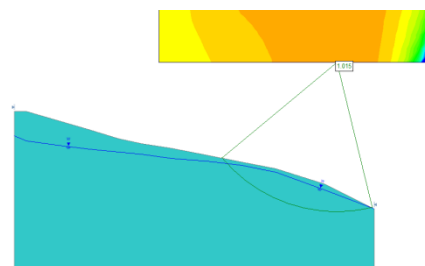


图3 TY08 勘测点的边坡稳定性分析

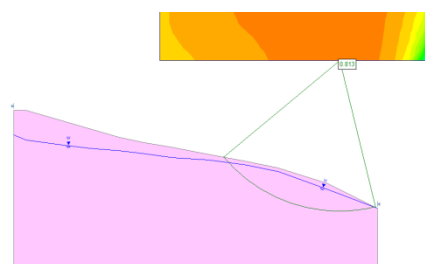


图4 TY09 勘测点的边坡稳定性分析

由于文章篇幅的限制,本文随机选择留出勘测点的稳定性分析云图,其余的勘测点的边坡稳定系数以图表的方式列出。

表4 模拟的稳定安全系数和计算安全系数对比

编号	计算的安全系数	稳定安全系数	边坡稳定等级
TY01	-0.909	0.541	不稳定
TY02	-1.244	0.614	不稳定
TY03	-0.749	0.415	不稳定
TY04	0.424	0.605	不稳定
TY05	0.626	0.529	不稳定
TY06	0.048	0.413	不稳定
TY07	-0.697	0.387	不稳定
TY08	1.196	1.015	稳定
TY09	-0.374	0.813	不稳定
TY10	0.584	0.962	不稳定
TY11	0.166	0.963	不稳定
TY12	-0.883	0.738	不稳定
TY13	0.998	0.982	不稳定
TY14	0.660	0.986	不稳定
TY15	-0.423	0.748	不稳定
TY16	0.715	0.917	不稳定
TY17	0.516	0.961	不稳定
TY18	0.334	0.769	不稳定
TY19	1.024	1.02	稳定
TY20	0.999	0.954	不稳定
TY21	-0.526	0.777	不稳定
TY22	-0.948	0.921	不稳定
TY23	-1.101	0.909	不稳定
TY24	-0.629	0.714	不稳定

根据 Slide 模拟的白果树边坡的稳定性以及得出的边坡稳定性安全系数的值,对比两者的评价结果具有一致性,说明因子分析法对于边坡的稳定性评价具有适用性。

结合白果树滑坡勘探的实例分析,造成白果树滑坡的原因是边坡的土质为粉质粘土,粉质粘土呈灰黄色,含水率高,压缩性强,黏聚力小,土体的内摩擦角小,而黏聚力和内摩擦角对边坡的稳定性影响较大。

3 结论

(1) 本文通过因子分析法中的降维思想将白果树边坡中的 7 个指标降维为 3 个主因子,降低了计算的复杂性和分析的难度,消除了各个指标之间的相关性,使得指标之间相互独立。

(2) 在因子分析法的基础上,利用大型边坡模拟软件 Slide 进行边坡的分析模拟,得到的评价等级和因子分析法所得到的评价等级具有一致性。本文将因子分析法中的主观和 Slide 软件模拟的客观相结合,充分证明本文方法的可行性。

(3) 本文选取的工程案例为重庆市万州区内的白果树滑坡,造成边坡不稳定的因素为重庆市降雨量较为丰富的地区,该边坡又存在地下水位,极易造成滑坡的现象。

[参考文献]

[1]王斌,冯夏庭,潘鹏志,等.物质点法在边坡稳定性评价

中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(9):2146-2155.

[2]阮航,张勇慧,朱泽奇,等.一种改进的公路边坡稳定性模糊评价方法研究[J].岩土力学,2015,36(11):3337-3344.

[3]谢全敏,夏元友.基于遗传算法的边坡稳定性评价的动态聚类法[J].岩土力学,2002(2):170-172.

[4]吴大国,汪明武,张薇薇.基于模糊集对分析的黄土路堑边坡稳定性评价方法[J].岩土力学,2008,29(1):435-438.

[5]Shi G H. A Geometric method for stability analysis of discontinuous rocks[J]. Science in China, Ser. A, 1982(3):318-336.

[6]向东进,李宏伟,刘小雅.实用多元统计分析[M].武汉:中国地质大学出版社,2005.

[7]李思平,孙连英.基于非线性理论的边坡稳定性评价模型[J].水文地质工程地质,2002(2):11-14.

[8]何翔,李守巨,刘迎曦,等.岩土边坡稳定性预报的人工神经网络方法[J].岩土力学,2003(2):73-76.

作者简介:张俊华(1982-),高级工程师,一直从事高速公路施工技术和高速公路边坡的研究;魏红兵(1983-),高级工程师,主要从事边坡研究。