

文章编号:1673-0062(2017)04-0025-07

## 考虑坡顶交通量影响的路堤边坡失稳敏感性分析

严谭路<sup>1</sup>,杨仕教<sup>1\*</sup>,刘杰<sup>1</sup>,冯磊<sup>1</sup>,刘标琿<sup>2</sup>,黄根满<sup>3</sup>

(1.南华大学核资源工程学院,湖南衡阳 421001;2.湖南省地勘局 405 队,  
湖南吉首 416000;3.湖南省地勘局 403 队,湖南常德 415000)

**摘要:**目前对边坡稳定影响因子敏感性的研究主要是针对边坡的内部因素,在分析路堤边坡稳定时,车辆荷载等外部因素对边坡稳定的影响不容忽视.本文同时考虑内部因素和外部因素,选择边坡土体重度 $\gamma$ 、边坡土内摩擦角 $\varphi$ 、边坡土粘聚力 $C$ 、边坡坡度 $\theta$ 及交通量 $Q$ 作为边坡稳定安全系数敏感性分析的影响因子,5个因子都具有广泛的分布随机性.以金鞭公路某标段路堤边坡为例,制定了5因子5水平的正交试验方案,利用传递系数法分别计算不同工况下的边坡稳定安全系数,再利用SPSS统计分析各影响因子对路堤边坡稳定安全系数的敏感性.研究表明:路堤边坡稳定性受内部因素和外部因素共同作用,影响因子敏感性大小依次为:边坡坡度 $\theta$ >边坡土内摩擦角 $\varphi$ >交通量 $Q$ >边坡土粘聚力 $C$ >边坡土体重度 $\gamma$ .本研究可为该边坡失稳治理设计提供依据.

**关键词:**路堤边坡;边坡稳定;影响因子;交通量;敏感性

中图分类号:P642 文献标志码:A

### Analysis on Sensitivity to Instability of Embankment Slope in Consideration of the Top of Slop Traffic Volume

YAN Tan-lu<sup>1</sup>, YANG Shi-jiao<sup>1\*</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, FENG Lei<sup>1</sup>, LIU Biao-hun<sup>2</sup>, HUANG Gen-man<sup>3</sup>

(1.School of Nuclear Resources Engineering college, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2.405 Team of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Jishou, Hunan, 416000, China; 3.403 Team of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Changde, Hunan 415000, China)

**Abstract:** At present, the research on the sensitivity of slope stability factor is mainly aimed at the internal factors of slope. In analyzing the stability of embankment slope, external factors such as vehicle load have some influence on slope stability, which can not be ignored. The author selects slope soil weight  $\gamma$ , internal friction angle of slope soil  $\varphi$ , cohesion of

收稿日期:2017-11-17

作者简介:严谭路(1991-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究工作.E-mail:729460720@qq.com.\*通信作者:杨仕教,E-mail:cute1088@sina.com

slope soil  $C$ , slope angle  $\theta$  and traffic volume  $Q$  as factors affecting the sensitivity analysis of slope stability safety according to external and internal factors. Five factors have a wide distribution of randomness. Taking Jinbian Expressway Embankment Slope as an example, the author developed 5 factors and 5 levels of orthogonal test program, using the transfer coefficient method to calculate the slope safety factor under different conditions respectively, and then using SPSS statistical analysis to study the sensitivity of each factor to the stability of embankment slope stability. The results show that embankment slope stability is influenced by the internal factors and external factors together. The sequence of the sensitivity from better to less is: slope angle  $\theta$  > internal friction angle of slip soil  $\varphi$  > traffic volume  $Q$  > cohesion of slope soil  $C$  > slope soil weight  $\gamma$ . This study can provide the basis for the design of slope instability management.

**key words:** embankment slope; slope stability; influence factor; traffic volume; sensitivity

## 0 引言

湖南湘西地区为山地丘陵区,地质情况复杂、降雨集中以及人类工程活动强烈,滑坡地质灾害发生频繁,影响边坡稳定的因素众多,例如岩土体类型、岩体软弱结构面发育情况、岩土体物理力学性质、滑坡所在区域地形地貌特征、植被覆盖情况、人类工程活动强烈程度、降雨量、边坡坡度及坡面形态特征等<sup>[1-5]</sup>。在众多影响因素中,具体何种因素对滑坡稳定性影响最大,研究人员进行了大量工作<sup>[6-11]</sup>。吴森、李虎杰等<sup>[12]</sup>以四川平昌县250余处滑坡为研究对象,采用贡献率权重法结合 Geographic Information System (GIS) 空间分析原理,探讨了区域内影响滑坡稳定的五个影响因子对滑坡稳定的敏感性,并指出该地区对滑坡失稳最主要的因素为坡面形态。李艳萍、洗国栋、吴森等<sup>[13-14]</sup>人以数理统计方法为手段,建立了滑坡贡献率模型,对我国石油管道滑坡灾害情况进行了定量分析,并对滑坡影响因子按照敏感性程度进行了划分。张万涛<sup>[15]</sup>针对目前单因子分析方法无法考虑滑坡稳定影响因子间的相互作用的局限性,根据正交试验分析方法,对三峡库区某二次滑坡进行了全面分析,综合比较了五个影响因子的敏感性大小。刘长春、殷坤龙等<sup>[16]</sup>人考虑到岩土参数具有随机性、多变不稳定性特点,采用蒙特卡洛方法结合正交分析原理,对不同工况条件下的滑坡稳定影响因子进行了划分,并绘制了各影响因子与滑坡安全系数的关系图表,应用于实际工程治理与监测。以上众多研究方法中,在研究滑坡稳定影响因子时,主要研究范围大多局限于滑坡内部影响因素或自然因素。

本文在考虑路堤边坡上方二级公路交通量大

小 $Q$ 这一外部因素的基础上,另外选取对边坡稳定性影响较为显著的路堤边坡坡度 $\theta$ 、边坡土内摩擦角 $\varphi$ 、边坡土黏聚力 $C$ 及边坡土体重度 $\gamma$ 等4个影响因子,综合考虑5个不同影响因子间相互影响作用,通过正交试验方法分析探索影响因子对边坡稳定性的敏感性。

## 1 基本原理及分析步骤、原则

### 1.1 基本原理

正交试验方法就是根据不同因素不同水平条件,选择合适的正交表并安排试验,然后对试验结果进行研究评价的一种基本方法。原理是利用数理统计学与正交,从所有试验点中选择具有典型代表性的试验点并合理安排在正交表中。由于其具有“均匀散布、有序可比”的特点,所以能反映各影响因子对所求边坡稳定安全系数影响的客观规律。

### 1.2 分析步骤、原则

正交试验的步骤:1)根据自身因素、水平,选择一张适合设计方案的正交表,记为 $Ln(t^m)$ ;其中 $L$ 代表正交表符号, $n$ 代表所选正交表表格的行数, $t$ 代表各不同因素的水平数量的个数, $m$ 代表所选正交表的表格列数;2)将各不同因素任意填入正交表的首行,此为表头设计;3)在不同因素的不同水平条件下,进行方案试验,实施试验;4)试验结果分析。

正交试验原则:1)不同数字在任意列中出现的次数相等;2)任意两列中数字的排列顺序均衡整齐。

## 2 工程概况

### 2.1 滑坡地理位置及区域地质构造

金鞭公路某标段路堤边坡位于湖南省张家界

市武陵源区,距张家界森林公园入口南东方向约 700 m.行政隶属武陵源区锣鼓塔街道办事处,中心地理坐标为东经 110°44'18",北纬 29°31'09".边坡前上方为旅游区金鞭公路,交通运输条件良好,交通流量大.武陵源区位于扬子地台的二级构造单元-鄂黔台褶带的东南缘,南邻江南古陆.在漫长的地质发展史中,境内经历了雪峰、海西、印支、燕山等运动,构造复杂、形迹多样、断裂和褶皱均很发育,构造线方向受总的大区域构造所控制.

### 2.2 滑坡基本情况及岩土体特征

金鞭公路某标段路堤边坡长约 299.5 m,后缘宽约 158.0 m,前缘宽约 176.8 m,滑体厚 3.5~19.1 m,形

成的滑坡体积约  $1.66 \times 10^5 \text{ m}^3$ .边坡前缘海拔标高 395.0 m,后缘海拔标高 450.0 m,相对高差约 55.0m 左右.位于侵蚀构造中低山地貌区,为斜坡坡麓地带,山坡陡而直,一般 45°左右,顺向坡较缓,逆向坡陡峻,呈梯形状.斜坡原始坡度约 15~28°,局部坡脚切坡稍陡,坡度可达 60°以上.根据 1:2×10<sup>5</sup> 区域地质资料及现场勘查成果,勘查区出露地层自上而下为第四系冲洪积层、残坡层,志留系下统龙马溪组,奥陶系上统牯牛潭~五峰组、下统大湾组等.根据对该路堤边坡剖面图、坡面形态与坡度、现场勘查资料进行综合分析,选择最危险剖面 I-I 剖面为主断面,I-I 工程地质剖面图如图 1 所示.

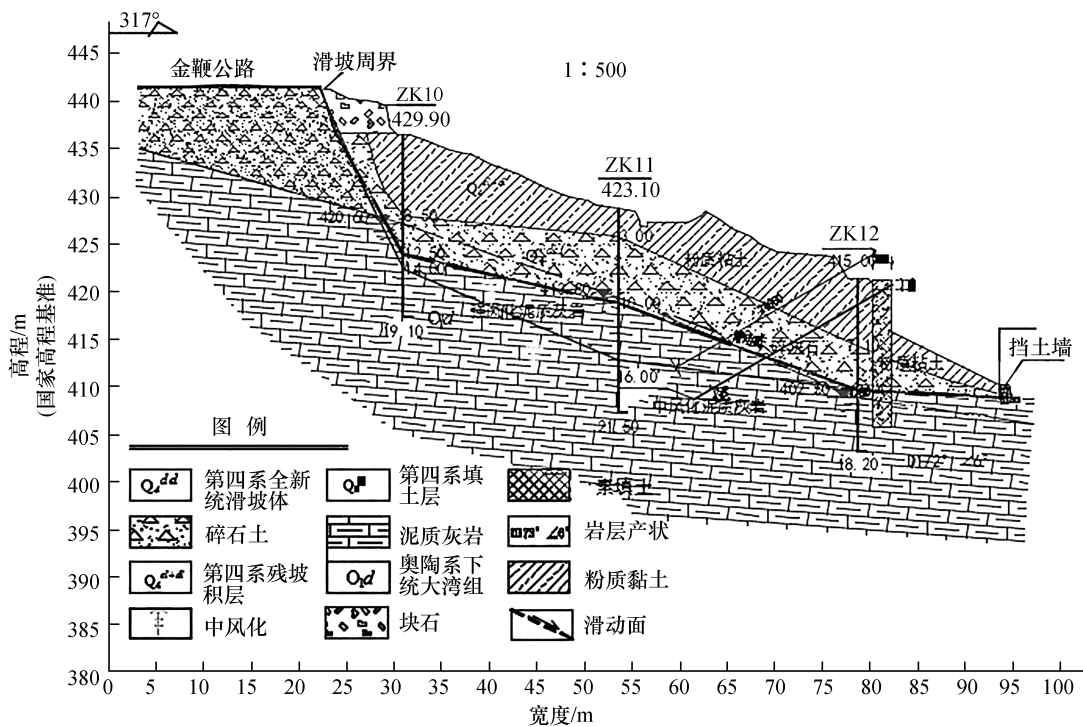


图 1 I-I 工程地质剖面

Fig.1 I-I Engineering geological profile

### 3 敏感因素及水平的选取

根据金鞭公路某标段路堤边坡形成的条件、影响因素,结合边坡变形特征分析,该边坡主要受各种自然因素及强烈人为因素的影响.因此选择该边坡稳定影响因子时,务必考虑外部因素影响.本文选择坡顶金鞭公路交通量大小  $Q$  为外部因素.另还选择对边坡失稳较常见的几个内部因素为影响因子.这里选择边坡坡度  $\theta$ ,边坡土体内摩擦角  $\varphi$ ,边坡土黏聚力  $C$ 、边坡土重度  $\gamma$ .一共 5

个影响因子,试验指标则选择可用传递系数法计算得到的边坡稳定安全系数  $F_s$ .边坡稳定性分析坡面抗剪强度指标  $C$ 、 $\varphi$  值及边坡土重度  $\gamma$  的选取根据室内试验、工程类比及参考地区经验综合确定.边坡坡度  $\theta$  则根据边坡现场量测及边坡工程地质剖面图进行确定.最终确定为:边坡土黏聚力  $C$  取值范围为 4.1~14.7 kPa,内摩擦角  $\varphi$  取值范围为 12.0~17.7°,边坡土重度  $\gamma$  取值范围为 17.1~25.1 kN/m<sup>3</sup>,边坡坡度  $\theta$  取值范围确定为 14.5~56.2°,而边坡上方金鞭公路为二级公路设

计标准,设计交通流量大小为1 400~2 500 pcu/h.考虑到金鞭公路靠近张家界国家森林公园,旅游旺季时,交通量明显增大,所以上限值应乘上一个放大系数  $K$ ,根据当地相关部门统计资料显示,金鞭公路最大交通量达2 970 pcu/h,所以此处放大系数取1.2较为合理.故实际交通量取值范围为1 400~3 000 pcu/h.求解路堤边坡稳定安全系数时,交通量按照最不利行车情况换算成当量车辆荷载(国家建筑标准设计图集,2004),交通量与当量车辆荷载换算公式如下,并对换算结果进行适当调整,根据换算结果划分交通量水平如表1所示.最终根据4种内部因素分布范围及一种外部因素—交通量大小划分5种因素的水平为5个,各因素水平划分详细情况如表2所示.

$$Q_k = \frac{\sum G}{B_0 \times L_0} = \frac{\sum \frac{Q}{t} \times q_u}{B_0 \times L_0} \quad (1)$$

式中,  $Q_k$  为当量车辆荷载;

$\sum G$  为布置在所研究范围内的所有车辆的重力和;

$B_0, L_0$  分别为所研究路段的道路宽度、长度;

$Q$  为交通量大小;

$t$  为研究时间;

$q_u$  为不同车型换算成标准车型小客车后的荷载大小.

表1 交通量水平划分表

Table 1 Chart of the classification of traffic volumes

交通量/(pcu·h <sup>-1</sup> )	当量交通荷载/kN	交通量水平
1 400~1 700	50	I
1 700~2 000	60	II
2 000~2 300	70	III
2 300~2 600	80	IV
2 600~2 900	90	V

表2 各因素水平表

Table 2 The level of each factor

水平	1	2	3	4	5
$\gamma$	17.0	19.0	21.0	23.0	25.0
$\theta$	15	25	35	45	55
$C$	4.5	7.0	9.5	12.0	14.5
$\varphi$	12.5	13.7	14.9	16.1	17.3
$Q$	I	II	III	IV	V

#### 4 正交试验设计方案及敏感性分析

根据影响边坡稳定因素个数及水平情况,最终确定选用合适的正交表为  $L_{25}(5^6)$ , 多余一列留用做误差列,供极差、方差分析使用.在不考虑5种因素间彼此相互影响的情况下安排试验,根据正交表所确定的试验方案,对每种不同情况下利用理正岩土软件采用传递系数法对边坡稳定安全系数进行求解.最终方案及结果如表3所示.

表3 正交试验方案及结果

Table 3 Scheme and result of Orthogonal test

方案	边坡土体重度 $\gamma$ / (kN·m <sup>-3</sup> )	交通量 $Q$ / (pcu·h <sup>-1</sup> )	边坡土黏聚力 $C$ / kPa	边坡土内摩擦角 $\varphi$ / (°)	边坡坡度 $\theta$ / (°)	空白列	边坡稳定安全系数 $F_s$
1	17.0	I	4.5	12.5	15	-	1.016 0
2	17.0	II	7.0	13.7	25	-	0.978 4
3	17.0	IV	9.5	14.9	35	-	0.965 8
4	17.0	IV	12.0	16.1	45	-	1.045 9
5	17.0	V	14.5	17.3	55	-	1.324 5
6	19.0	II	9.5	16.1	55	-	0.986 3
7	19.0	III	12.0	17.3	15	-	1.058 6
8	19.0	IV	14.5	12.5	25	-	1.148 7
9	19.0	V	4.5	13.7	35	-	1.256 3
10	19.0	I	7.0	14.9	45	-	1.097 2
11	21.0	III	14.5	13.7	45	-	0.964 5
12	21.0	IV	4.5	14.9	55	-	1.028 7
13	21.0	V	7.0	16.1	15	-	1.265 3
14	21.0	I	9.5	17.3	25	-	1.014 5
15	21.0	II	12.0	12.5	35	-	1.896 5
16	23.0	IV	7.0	17.3	35	-	1.487 6



续表

方案	边坡土体重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	交通量 $Q$ / ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ )	边坡土黏聚力 $C$ / kPa	边坡土内 摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	边坡坡度 $\theta$ /( $^\circ$ )	空白列	边坡稳定 安全系数 $F_s$
17	23.0	V	9.5	12.5	45	-	1.084 6
18	23.0	I	12.0	13.7	55	-	1.169 8
19	23.0	II	14.5	14.9	15	-	1.196 4
20	23.0	III	4.5	16.1	25	-	0.998 6
21	25.0	V	12.0	14.9	25	-	0.784 6
22	25.0	I	14.5	16.1	35	-	1.125 6
23	25.0	II	4.5	17.3	45	-	1.247 0
24	25.0	III	7.0	12.5	55	-	1.549 1
25	25.0	IV	9.5	13.7	15	-	1.422 3

### 5 结果分析

SPSS 作为一种数据分析软件,具有操作简单、分析速度快等特点,只需将数据简单输入,SPSS 软件便可像“计算机”一样自动计算出分析结果.根据 SPSS 软件的极差、方差分析模块,可得到本次正交试验的极差分析结果、方差分析结果如表 4、5 所示.根据表 4 和表 5 可分别作出各影响因子的极差大小图、变差平方和大小图分别如图 2、图 3 所示.

表 4 极差分析结果

Table 4 Results of Range analysis

各水平 参数	边坡土 体重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	交通量 $Q$ / ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ )	边坡土 黏聚力 $C$ /kPa	边坡土 内摩擦 角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	边坡 坡度 $\theta$ /( $^\circ$ )
$K_1$	5.330 6	5.423 1	5.546 6	6.694 9	5.958 6
$K_2$	5.547 1	6.304 6	6.377 6	5.791 3	4.926 6
$K_3$	6.169 5	5.536 6	5.473 5	5.072 7	6.731 8
$K_4$	5.937 0	6.133 2	5.957 2	5.421 7	5.439 2
$K_5$	6.128 6	5.715 3	5.759 7	6.132 2	6.058 4
极差 $R$	0.838 9	0.881 5	0.904 1	1.622 2	1.805 2

表 5 方差分析结果

Table 5 Results of variance analysis

来源	自由度	变差平 方和 $S$	均方	$F$ 值	显著值
修正模型	20	1.018	0.05	0.662	0.000
交互	1	33.90	33.90	440.99	0.000
$\gamma$	4	0.106	0.26	0.343	0.321
$Q$	4	0.109	0.27	0.354	0.054
$C$	4	0.116	0.29	0.378	0.312
$\varphi$	4	0.316	0.79	1.028	0.430
$\theta$	4	0.371	0.93	1.206	0.490
误差	4	0.308	0.77	—	—
总和	25	35.228	—	—	—
修正总和	24	1.325	—	—	—

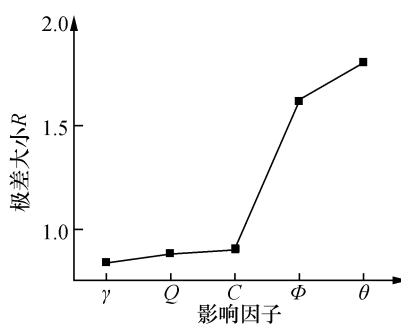


图 2 影响因子与极差大小关系

Fig.2 Diagram of the relations between impact factor and range size

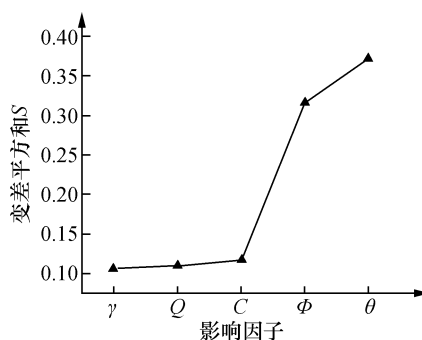


图 3 影响因子与变差平方和  $S$  大小关系

Fig.3 Diagram of the impact factor and the sum of  $S$  squares of variation

由表 4、图 2 中的极差大小可直观获得影响金鞭公路某标段路堤边坡稳定的 5 种影响因子中,边坡坡度  $\theta$ 、边坡土内摩擦角  $\varphi$  对路堤边坡稳定影响较显著,外部因素交通量  $Q$  对边坡稳定性也有一定影响.重度对该路堤边坡稳定显著性影响最小,最终确定 5 种影响因素的敏感性顺序依次为:边坡坡度  $\theta$ >边坡土内摩擦角  $\varphi$ >交通量  $Q$ >边坡土粘聚力  $C$ >边坡土体重度  $\gamma$ .根据表 5、图 3 的方差分析结果中显著值大小和变差平方和的大

小同样可确定敏感性顺序为:边坡坡度  $\theta$  > 边坡土内摩擦角  $\varphi$  > 交通量  $Q$  > 边坡土粘聚力  $C$  > 边坡土体重度  $\gamma$ . 与表 4、图 2 相吻合, 可相互验证统计结果的正确性.

在保持边坡坡度  $\theta$ 、边坡土内摩擦角  $\varphi$ 、边坡土粘聚力  $C$ 、边坡土体重度  $\gamma$  不变的前提下, 把交通量  $Q$  作为单一变量, 利用 SPSS 软件对单因素交通量进行统计分析, 可获得交通量因素不同水平条件下与稳定安全系数均值  $F_s$  的关系, 如下表 6 所示, 值得注意的是表 6 中  $F_s$  为某一因素不同水平下计算结果的统计平均值.

表 6 交通量水平与稳定安全系数均值关系表

Table 6 Table of traffic volume and stability safety factor

水平	交通量水平	稳定安全系数 $F_s$
1	I	1.286
2	II	1.245
3	III	1.143
4	IV	1.133
5	V	1.129

根据表 6 可得路堤边坡稳定安全系数与交通量大小的关系曲线图. 如图 4 所示. 由表 6 及图 4 可知: 路堤边坡稳定安全系数随着交通量的增大而非线性减小, 当交通量较小时, 交通量的增长对路堤边坡稳定影响较明显, 交通量增大到一定程度时, 对路堤边坡稳定的影响越来越小. 当交通量达到 IV 水平以后, 交通量大小的改变量对路堤边坡稳定安全系数的影响基本可以忽略, 且最后边坡稳定安全系数趋于一稳定值. 因此合理控制交通量, 对路堤边坡稳定具有重要影响. 在进行路堤边坡失稳治理设计时, 务必考虑交通量对路堤边坡稳定的影响, 进行边坡设计时应相应提高安全系数.

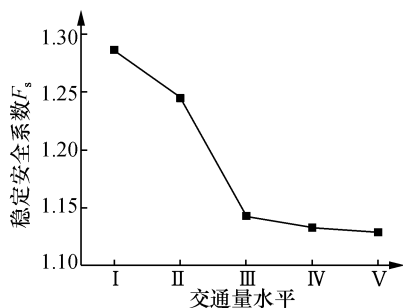


图 4 稳定安全系数与交通量大小关系

Fig.4 Diagram of stability safety factor and traffic volume

## 6 结 论

1) 金鞭公路某标段路堤边坡稳定同时受内部因素与外部因素共同影响. 内部影响因素众多且是该路堤边坡失稳的主要因素. 外部因素交通量大小也对边坡稳定有一定影响, 在分析路堤边坡稳定时, 应综合考虑内外因素对边坡稳定的影响.

2) 影响边坡稳定性的影响因子分布均具有广泛的随机性, 用正交试验方法能较好的分析各影响因子的敏感性. 经敏感性分析可知, 对该路堤边坡稳定影响的敏感性顺序依次为: 边坡坡度  $\theta$  > 边坡土内摩擦角  $\varphi$  > 交通量  $Q$  > 边坡土粘聚力  $C$  > 边坡土体重度  $\gamma$ . 内部因素边坡坡度大小影响最显著, 因此在边坡治理设计时, 合理选择放坡坡度对边坡稳定具有重要影响.

3) 坡顶交通量的增大会使坡顶荷载增大, 从而影响边坡的稳定, 在计算交通量时, 大型货车、客车满载、超载换算成小客车时会大大增加交通量大小, 因此应尽量控制坡顶二级公路的交通量大小在设计交通量范围内, 避免出现大型货车、客车超载现象发生. 该路堤边坡动态施工过程中应增加对不同交通量下的边坡的变形位移监测与观测.

4) 利用 SPSS 软件对试验结果进行分析, 操作简单, 工作量少, 且得到极差分析结果与方差分析结果, 两者均能分析敏感性大小, 可相互验证结果的正确性.

### 参考文献:

- [1] 罗立哲, 胡志根, 刘全, 等. 土石围堰边坡稳定的多因素综合风险分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(7): 617-622.
- [2] 黄聪, 杨仕教, 罗辉. 基于 AHP-Monte Carlo 的高速公路边坡风险等级界定及应用[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2017, 31(1): 107-112.
- [3] 陈荣, 杨仕教, 李锐. 高填土边坡中双排桩扶壁式挡墙设计方法研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(2): 117-122.
- [4] 陈鹏. 公路顺层岩质边坡稳定及其影响因素分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] 付建军, 邱山鸣, 赵海斌, 等. 基于灰色关联度的边坡稳定影响因素分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(1): 53-57.
- [6] 文畅平, 肖宏彬, 曾娟娟. 基于突变级数法的滑坡稳定性评价[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(2): 68-73.
- [7] 饶运章, 张永胜, 饶睿, 等. 离子型稀土原地浸矿边坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(9): 60-63. (下转第 36 页)

## 4 结 论

弥散型颗粒燃料的随机分布特性给传统的堆芯物理计算方法带来的困难与挑战.针对该问题,详细介绍了基于蒙特卡罗中子输运计算方法对弥散型颗粒燃料进行临界计算时,利用子网格模型进行弥散颗粒燃料随机建模的基本方法和原理.基于自定义的 TRISO 燃料颗粒模型,对子网格随机模型的建模效率和计算精度进行了研究、测试和比较.从数值结果中可以看出,在一定的误差范围内,子网格随机模型的计算结果与参考模型的结果符合较好,证明其是正确的和有效的.同时,子网格模型所采用的网格尺寸会对子网格模型的建模效率与临界计算精度产生较大影响.综合考虑建模效率和计算精度两个方面,本文推荐以  $R$  作为子网格模型建模时网格尺寸的最佳选择.

### 参考文献:

- [1] FUTTERER M A, LI F, SINK C, et al. Status of the very high temperature reactor system[J]. Progress in nuclear energy, 2014, 77: 266-281.
- [2] 朱贵凤. 氟盐冷却球床高温堆钍利用研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2015.
- [3] BAE G, HONG S G. A small long-cycle PWR core design concept using fully ceramic micro-encapsulated (FCM) and  $UO_2$ - $ThO_2$  fuels for burning of TRU[J]. Journal of nuclear science and technology, 2015, 52(12): 1540-1551.
- [4] 秦冬, 巨海涛, 强胜龙, 等. 双重非均匀性对燃耗计算影响的初步分析[J]. 科技创新导报, 2015, 12(24): 247-249.
- [5] 李冠兴, 武胜. 核燃料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [6] LI F. Very high temperature reactor system[R]. Chiba, Japan: GIF Symposium, 2015.
- [7] BROWN F B, MARTIN W R. Stochastic geometry capability in MCNP5 for the analysis of particle fuel[J]. Annals of nuclear energy, 2004, 31(17): 2039-2047.
- [8] KIM T K, YANG W S, TAIWO T A, et al. Preliminary assessment of lattice physics capabilities for VHTR analysis[J]. Transactions of the American nuclear society, 2004, 91: 543-544.
- [9] BROWN F B, MARTIN W R, JI W, et al. Stochastic geometry and HTGR modeling with MCNP5[C]//LaGrange Park: American Nuclear Society, 2005: 1-11.
- [10] CHO N Z, YU H. Sub-fine lattice stochastic modeling of randomly distributed particle fuels with variability in packing fraction[C]//Gyeongju: Korean Nuclear Society, 2006: 1-2.
- [11] 余慧, Cho N Z. 蒙特卡罗计算中颗粒型燃料的随机分布模型比较[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 143-146.
- [12] MACDONALD P E, STERBENTZ J W, SANT R L, et al. NGNP point design—results of the initial neutronics and thermal-hydraulic assessments during FY-03, Rev. 1[R]. Idaho: Office of scientific and technical information technical reports, 2003.
- [8] VINOTH S., AJAY KUMAR L. Applying real time seismic monitoring technology for slope stability assessment—An Indian opencast coal mine perspective[J]. International journal of mining science and technology, 2014, 24(1): 75-80.
- [9] GUO M, GE X, WNAG S. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method[J]. Journal of rock mechanics and geo-technical engineering, 2011, 3(03): 282-288.
- [10] SIMPLICE F. E24 profile slope stability analysis in haizhou opencast coal mine of fuxin[J]. Global geology, 2007(2): 171-184.
- [11] ATAEI M, BODAGHABADI S. Comprehensive analysis of slope stability and determination of stable slopes in the Chador-Malu iron ore mine using numerical and limit equilibrium methods[J]. Journal of China university of mining & technology, 2008, 18(4): 488-493.
- [12] 吴森, 李虎杰, 陈国辉, 等. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 26-31.
- [13] 李艳萍, 洗国栋, 王维, 等. 管道应力应变监测试验规程研究[J]. 油气储运, 2008, 27(10): 21-23.
- [14] 吴森, 李虎杰, 陈国辉, 等. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 26-31.
- [15] 张万涛. 基于正交设计的滑坡敏感性分析[J]. 铁道标准设计, 2011(10): 33-36, 40.
- [16] 刘长春, 殷坤龙, 李远耀. 巴东县文家滑坡稳定性计算及其敏感性分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 113-117, 123.

(上接第30页)