

区域斜坡不稳定空间预测*

王建锋

(中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室,北京 100080)

摘要 将场地斜坡稳定随机模拟分析结果与区域斜坡空间不稳定性预测结合起来,基于层次分析建立了区域斜坡空间破坏概率的多层模糊稳定分析方法,实现了场地斜坡稳定非确定性模型评价结果与区域稳定性研究相结合,借助这一关系模型可以实现空间点评价向空间面评价的过渡.以川南经济开发区区域斜坡空间破坏概率预测为例进行了方法验证,结果显示这种方法可以克服区域斜坡不稳定性评价中的量化困难,物理意义更加明确.

关键词 区域斜坡稳定,破坏概率,层次分析,模糊综合评判,稳定系数,滑坡

中图分类号 P642.2

作者简介 王建锋,男,副教授,1964年生,1997年毕业于中国地质大学(武汉),获工学博士学位,现为中国科学院力学研究所博士后研究人员,主要从事工程地质、岩土学研究.

从斜坡稳定工程地质研究阶段顺序看,应当首先进行区域斜坡稳定性的宏观概略研究,以缩小进一步研究的靶区,进入到具体潜在变形破坏地段、具体崩滑点及具体斜坡工程上来,然而区域性的概略研究也必须以研究范围内若干具体场地斜坡稳定性的详细研究为已知单元并作为基础.那些已知单元通常作为区域性预测的统计样本,并且这种预测属于稳健预测,因此场地斜坡稳定与区域斜坡稳定研究存在本质上的联系.本文试图将场地斜坡稳定随机模拟评价结果与区域斜坡稳定性研究相结合,建立二者之间关系模型,以实现空间点评价向空间面评价的过渡.具体理论模型即为多层模糊稳定分析法.

1 多层模糊稳定分析法(MLFS)基本原理

1.1 基本原理

一般地,区域斜坡不稳定性空间预测评价的数字制图,可藉助于数据统计、概率及信息理论、类比法等实现定性到定量的评价预测,但其定量结果主要作定性判定.目前所发展的评价方法很多,但总体上可划分为统计学方法和模糊学方法两类.大量研究和实践表明,一般的统计学方法由于依赖已知单

元选择且不便考虑专家权重,其精度不甚稳定;而一般的模糊学方法在处理多元因素时,因各因素权重分配过小,合成运算中往往会被“混灭”,故合成结果常常失真且利用信息不完善^[1].上述两种方法的共性和缺点还在于不稳定性等级的相对性,因此将上述两种方法与传统的确定性模型如斜坡点稳定性系数法相结合将是解决问题的有效途径.这种结合的意义在于可使区域斜坡不稳定性预测具有较明确的物理意义.这里所发展的多层模糊稳定分析方法,即试图实现统计学方法、模糊学方法等相对性评价与绝对性评价的二方面结合,以克服精度不稳、信息丢失、结果相对不足等缺点.

“多层模糊稳定分析法”的思想是将层次分析法、模糊综合评判方法和点稳定性系数法相结合,其中后两种方法及其结合在工程地质领域已得到初步发展^[1],有关层次分析方法原理可参阅文献[2,3].

层次分析决策过程与斜坡稳定性空间预测过程极为类似,若将层次分析与模糊综合评判相结合,通过成对比较的方法确定每一层的影响斜坡稳定各因素的相对重要性的权重,直至计算出目标层所划分单元所属各类不稳定性等级的相对权重,然后再与各自等级的场地稳定性概率分析结果相叠加,即可得到该单元的具有明确物理意义的稳定性判断.

1.2 基本方法步骤

1.2.1 建立层次结构模型 根据区域斜坡不稳定性野外地质调查资料,构造有目标层A,中间层B₁,

1998年4月8日收稿.

*中国博士后科学基金、中国科学院王宽诚博士后奖励基金联合资助.

B_2, \dots , 指标层 C 的多层次结构模型, 具体分析采用系统论中的分离概念, 即把问题分解成一些因素, 而每一因素又由更低一级的因素定出, 这样一直分离到直接获得信息的初始因素上, 形成树状结构。

1.2.2 构造判断矩阵求权向量 权向量 A 是关于各影响因素对斜坡不稳定性影响程度和敏感性的描述, 常用方法有专家打分法、反演法、二元穷尽对比法等。这里应用 Satty^[3] 提出的层次排序法 (AHP 法): (1) 建立问题的递阶层次结构; (2) 构造两两判断矩阵; (3) 由判断矩阵计算被比较元素的相对权重; (4) 计算各层元素的组合权重。

1.2.3 隶属函数的确定 隶属度的确定意味着每个因素属于各种状态的程度。由于影响斜坡稳定因素的相互作用、相互影响及其本身的复杂性、模糊性, 因此隶属函数的确定通常可借助专家经验的统计确定。

1.2.4 多层 fuzzy 综合评判 多层次模型是在变量的不同组合层次上分级进行综合评判。设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, P 是把 U 分成 k 个子集的一种方法, 且满足

$$\bigcup_{i=1}^k U_i = U \text{ 及 } U_i \cap U_j = \emptyset, \quad (i \neq j, j = 1, 2, \dots, k), \quad (1)$$

则称 P 是 U 的一个划分, 将 U 在 P 划分之下得到的集合记为

$$U/P = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}, \quad (2)$$

以二级评判为例, 其具体算法如下。

第一步: 确定评判级数。 根据斜坡地质环境系统特征, 评判时划为 2 级, 并对其中各变量标志分组, 即确定划分 P , 这里 $U/P = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ 为二级因素集, 记 $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{it}\}$, ($i = 1, 2, \dots, k$), $|U_i| = \sum_{t=1}^n t_i = n$ 。

第二步: 对每个 U_i 的 t_i 个因素, 按一级模型作综合评判。 设 U_i 的诸因素的权重分配为 \underline{A}_i , U_i 的一级评价矩阵为 \underline{R}_i , 则有

$$\underline{B}_i = \underline{A}_i \circ \underline{R}_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}),$$

$$(i = 1, 2, \dots, k)$$

式中: \underline{B}_i 为基于 U_i 诸因素的一级综合评判结果, 对 U/P 而言则是单因素 (U_i) 评判。其中: \circ 为某种 fuzzy 算子, 为突出主因素时可取广义算子 $M(\circ, \nu)$ 。

第三步: 设 U/P 中各因素的权重分配为 \underline{A} , 总

评价矩阵为

$$R = (B_1, B_2, \dots, B_k)^T = (b_{ij})_{k \times m}, \quad (3)$$

则 $\underline{B} = \underline{A} \circ \underline{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ 即为最终二级评价结果。上述二级模型可概括为

$$\underline{B} = \underline{A} \circ \underline{R} = \underline{A} \circ \begin{bmatrix} \underline{A}_1 \circ \underline{R}_1 \\ \underline{A}_2 \circ \underline{R}_2 \\ \dots \\ \underline{A}_k \circ \underline{R}_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.5 求取单元稳定系数及其破坏概率 以各隶属度 b_j 的幂为权取加权平均, 按下式求取单元的稳定性系数 K_s 及其破坏概率 P_f

$$\left. \begin{aligned} K_s &= \frac{\sum_{j=1}^n b_j K_{sj}}{\sum_{j=1}^n b_j} \\ P_f &= \frac{\sum_{j=1}^n b_j P_{fj}}{\sum_{j=1}^n b_j} \end{aligned} \right\} P \quad (5)$$

式中: K_{sj} , P_{fj} 为稳定性等级为 V_j 时斜坡稳定性系数、破坏概率规定值, 可根据已知单元场地滑坡稳定性确定性模型随机模拟分析计算结果得到, 指数

视具体问题而定, 可取 $\nu = 1 \sim 2$ 。(5) 式中 $b_j / \sum_{j=1}^n b_j$ 实际上具权的意义, 它反映了同一单元中处于某类稳定性等级的斜坡对单元总体稳定度的贡献; b_j 为单元对评价因素 j 的隶属度。

(5) 式有两大优点: 其一是克服 fuzzy 分类中取极大的“确定性”判别, 避免了信息丢失; 其二是给出了区域斜坡空间上稳定性系数 K_s 和破坏概率 P_f , 将场地详细研究结果外推向区域, 实现了场地评价与区域评价的有机结合。其主要缺点是场地研究程度低时, 影响外推结果准确性。此时, 可据经验或工程地质类比法, 粗略确定 K_s , P_f 值, 原则是: (1) 从安全系数角度出发, 取通常意义的安全系数 1.25, 若单元斜坡实际稳定性系数 K_s 与 1.25 之比等于 1, 则认为是对应于空间评价中较不稳定相对级别状况; 若其比值大于 1, 则认为是对应于较稳定或稳定状态; $K_s < 1.00$ 时, 考虑安全系数后显然被视为不稳定状态。(2) 据研究, 一般斜坡饱水后, 其 K_s 值要降低 20%, 因此 $K_s < 1.25$ 时, 斜坡饱水后均可能产生变形破坏, 故将 1.25 作为较不稳定与较稳定的界限点, 较稳定与稳定两级之间的界限 1.50 可由数学上的等间距法确定, 具有一定人为性, 但可理解为 $K_s > 1.50$ 时斜坡破坏的可能性是很低的。(3) 在理论上 K_s 与 P_f 存在一定的严格函数关系, 这种关系



表 1 场地斜坡 K_s , P_f 与区域斜坡不稳定相对等级关系

Table 1 Comparison between mean safety factor K_s , failure probability P_f of site slopes and relative instability grade degree of regional slopes

| 不稳定等级 | 极稳定区 | 稳定区 | 不稳定区 | 极不稳定区 |
|-------|--------|-------------|-------------|--------|
| K_s | > 1.50 | 1.50 ~ 1.25 | 1.25 ~ 1.00 | < 1.00 |
| P_f | < 5 % | 5 % ~ 50 % | 50 % ~ 90 % | > 90 % |

取决于作用于斜坡的荷载概率分布特征和其强度概率分布特征. 然而, 一般情况下, 当二者均为正态分布且变异系数为 20 % 时, K_s 与 P_f 间具普遍的对应关系. (4) 据已知单元场地斜坡稳定性确定评价结果与区域斜坡不稳定性相对等级评价结果之间统计关系外推. 据此, 可建立一般的斜坡不稳定性空间预测相对性评价结果与场地斜坡稳定性绝对性评价结果的大致对应关系(表 1). 其中破坏概率 P_f 的划分依据源于文献[4].

1.2.6 精度检验 预测结果精度可用下式检验

$$P = M / N, \tag{6}$$

式中: M 为区域上已知单元中评价所得 $K_s > 1.25$ 或 $P_f < 50\%$ 所占面积总和, N 为区域上已知单元极稳定区、稳定区所占面积总和. 预测结果精度亦可采用与其他方法预测结果相对比进行估计. 显然 P 值愈接近于 1, 则预测精度愈高.

1.2.7 数字制图及应用 一般按 K_s , P_f 等值线图给出. 在精度满足的情况下, 可用于减灾与环境开发保护之中.

2 实例:川南经济区(南区)区域斜坡空间破坏概率研究

首先进行区域斜坡稳定性空间预测评价因素选取及其分级. 它是根据已知单元调查数据进行统计分析, 最后据 20 余位专家经验估计综合分析事先建

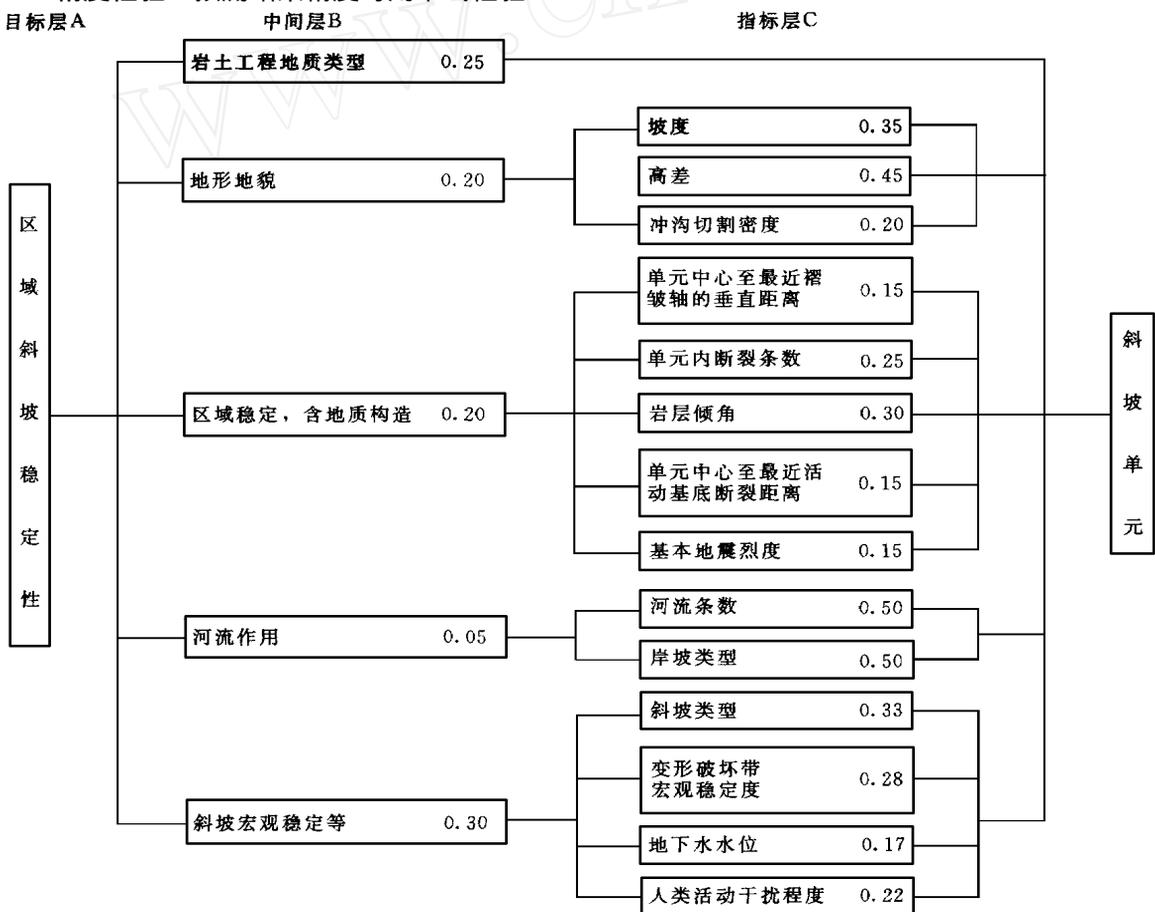


图 1 区域斜坡不稳定性预测评价层次分析结构模型

Fig. 1 Structural model of analytical hierarchy used in the prediction of regional slope instability

图中数值为各评价层次相对权重

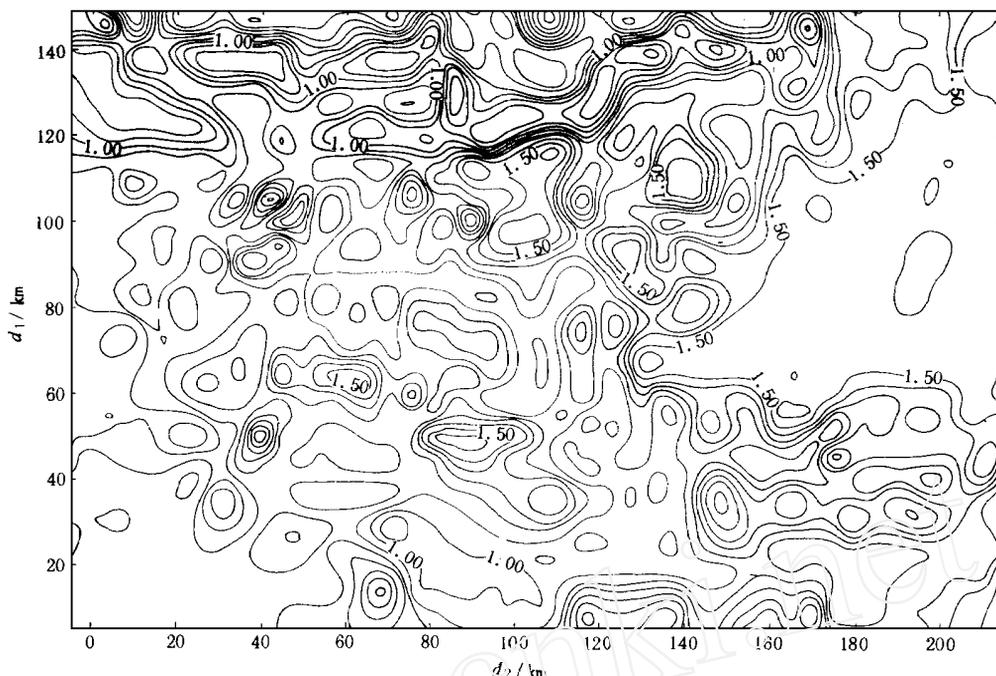


图 2 川南经济区(南区)区域斜坡空间中值稳定系数 \bar{K}_s 等值线图(等高距 0.10)

Fig. 2 Contour map of mean safety factor \bar{K}_s of regional slopes in the South Sichuan Province

表 2 MLFS 法预测结果统计

Table 2 Summary of regional slope stability prediction using the multi-layer fuzzy system analysis method (MLFS)

| 区号 | K_s | P_f | 空间稳定性等级 | 单元数 | 比例/ % | 面积/ km ² |
|----|-------------|-------------|---------|-----|-------|---------------------|
| A | > 1.50 | < 5 % | 极稳定 | 70 | 7.18 | 1 750 |
| B | 1.50 ~ 1.25 | 5 % ~ 50 % | 稳定 | 300 | 30.77 | 7 500 |
| C | 1.25 ~ 1.00 | 50 % ~ 90 % | 不稳定 | 302 | 30.97 | 7 550 |
| D | < 1.00 | > 90 % | 极不稳定 | 303 | 31.07 | 7 575 |

立的地区标准.主要考虑了影响斜坡稳定性的宏观因素,避开了除已知单元外场地斜坡稳定性机理分析和评价所需的大量详查工作.总体预测评价要求是要体现区域性、规律性、实用性,并可进一步缩小、圈定未来研究对象及其范围.其中斜坡中人类活动干扰程度或环境地质问题发育程度主要是基于对斜坡环境的扰动及其可资利用性的考虑所选取的.考虑预测对象的小比例尺区域性和预测方便之目的,按 1:20 万地形图、地质图之地理坐标划分正方形网格,网格面积为 25 km²,研究区总面积为 19 930 km²,总计划分 975 个单元,实测评价预测面积为 24 375 km².

图 1 为其 APH 结构模型及由 APH 法所得到的各层次相对权重.借助于 MLFS. C 程序进行了斜坡稳定性 K_s 值、 P_f 值计算,并分别绘制其等值线图

(图 2,3).表 2 给出了研究区不同等级所占比例.可以看出,A,B 区与 C,D 区面积大体呈 1:2,斜坡稳定性总体不高.评价结果精度检验采用 2 种方法:第一,用式(6)检验,考虑区内斜坡岩土工程类型、斜坡变形破坏带宏观稳定程度、斜坡地下水水位及人工干扰程度等 4 大要素对斜坡空间稳定性影响极为显著和敏感.因此,可用此 4 要素差、中等标志分布情况说明预测结果精度.经检验 4 大要素之差、中等标志分布在不稳定区、极不稳定区的比例分别为 60.0%,62.5%,64.0%,65.0%,总体比例为 86.4%.第二,用信息模型检验,将经过专家评定的 70 个斜坡极不稳定单元和 70 个斜坡极稳定单元作为已知单元,建立信息量预测模型.信息模型得到精度

四川省地质矿产厅 208 地质队,中国地质大学(武汉)环境科学与工程学院.川南经济区 1:20 万水文地质、工程地质与环境地质质量综合评价:[科研报告].1994

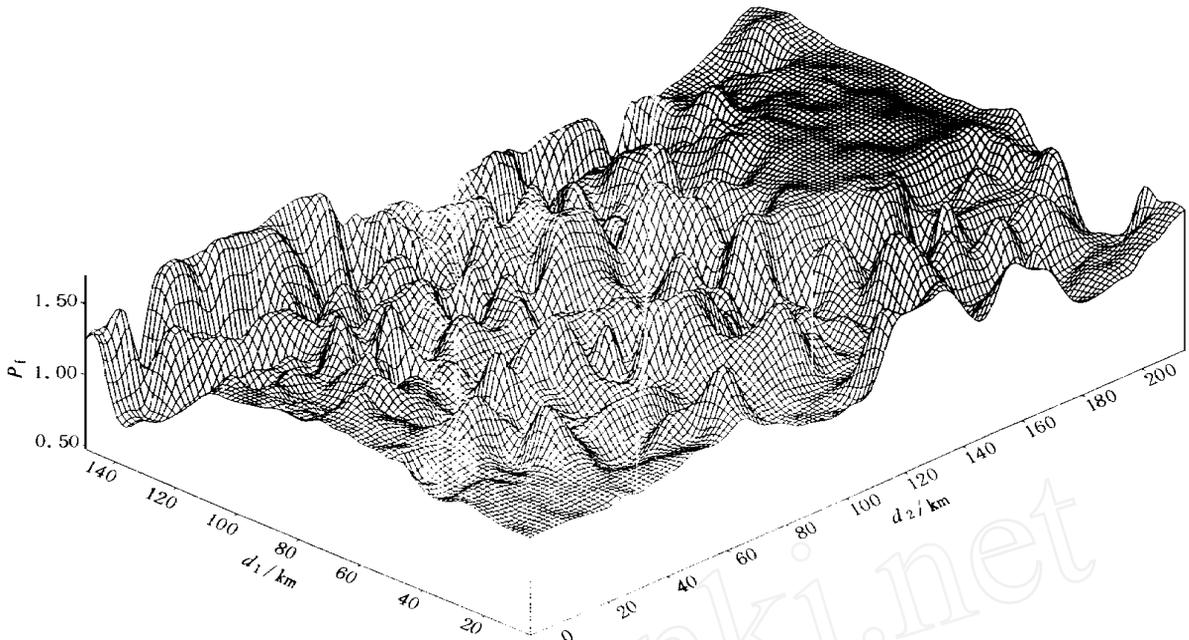


图 3 川南经济区(雨区)区域斜坡空间中值破坏概率 P_f 等值线图

Fig. 3 Surface contour map of mean failure probability P_f of regional slopes in the South Sichuan Province

82%, 其 A, B, C, D 各区分布总体趋势与 MLFS 法预测结果相同且具有较高的吻合率, 非吻合单元多数只差一个等级。本区若干重大崩塌、滑坡、泥石流、采空拉裂等斜坡失稳均发生于 A 类单元。因此评价结果是可靠的, 可用于指导实践。

3 结语

区域斜坡不稳定性空间预测评价的本质是在斜坡静态规律认识基础上所进行的条件与作用因素对斜坡的影响程度研究, 其主要手段是工程地质测绘制图^[5]。一般认为, 预测的结果主要是斜坡不稳定性问题的相对属性, 而非绝对数量概念; 但它是定性、定量预测的基础。

但是必须注意这种区域斜坡不稳定性制图技术, 一般都无一定的可靠程度检验, 仅是一种相对性结论。因为在稳定地区的情况, 潜在斜坡不稳定性不是那么容易验证的, 其可靠性的真正检验只有经过相当长的历程之后才可能有效。目前所谓的检验仅是用几种不同方法对同一地区所提供的内部相对等级校核, 或对已知样本区的后验概率验证; 因此, 考虑工程建设的阶段性, 相应的斜坡地质环境的开发研究也应有相应的阶段性过程, 一步到位的工作方

式是不可取的。理想的工作方式应是随研究范围、对象的逐步明确, 基于确定模型的岩土工程方法应逐步加强, 由非确定性模型所作区域斜坡不确定性预测评价研究方法逐步过渡到确定模型(也考虑概率)所作场地斜坡不稳定性预测研究方法上来。必须明确, 尽管可用岩土工程方法减小斜坡不稳定性预测评价结果的不确定性, 但是详细的逐点调查方法对区域乃至全球滑坡灾害评估毕竟太昂贵, 也不必要。为此, 随研究阶段深入有必要建立和不断完善区域非确定预测与场地确定性预测相结合的数值模型。这项工作在今日国土资源规划管理中更有深刻意义。

区域斜坡不稳定性空间预测评价主要是基于工程地质类比法、区域斜坡演化过程的平稳性与滑坡空间分布的时空等效性^[5]。虽然从理论上讲, 还没有寻找到能与确定性模型直接联系的统计预测方法, 但这一原理的目的系尽可能实现区域统计预测结果的相对性向绝对性的过渡, 当然这种绝对性本身尚包含有部分相对性, 需要在未来的研究中不断检验深化。不过可以肯定, 在一定程度上, 确定性模型与统计模型或信息模型相结合的预测评价方法将会取得更为理想的成果, 成为斜坡不稳定性预测研究的发展趋势。

参 考 文 献

1 李智毅,张欣海,王建锋.重庆市沿江地带斜坡稳定性研究.见:中国地质学会工程地质专业委员会编.第四届全国工程地质大会论文选集(一).北京:海洋出版社,1992. 457~468

2 王莲芬,许树柏.层次分析法引论.北京:中国人民大学出版社,1989

3 Satty T L. The analytical hierarchy process. New York: Mc Graw-Hill Inc, 1980

4 黄润秋,张倬元,王士天.高边坡稳定性的系统工程地质研究.成都:成都科技大学出版社,1991. 173

5 晏同珍.水文工程地质与环境保护.武汉:中国地质大学出版社,1994. 6

SPATIAL PREDICTION OF FAILURE PROBABILITY OF REGIONAL SLOPES USING ANALYTICAL HIERARCHY METHOD

Wang Jianfeng

(Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Combining the results of random simulation for single site slope stability with that of instability zoning of regional slopes by fuzzy and information value qualitative techniques, the author develops a multi-layer fuzzy system analysis method for determining space failure probability of regional slope instability. The new method is aimed at resulting assessment conveyance of slope stability from site landslide hazard to regional slope instability. The application of the methodology developed herein is also presented for a set of landslide surveys of sediment rocks in the South Sichuan of China. The results indicate that the method can solve these quantitative problems and clarify physical expression in the spatial prediction. Therefore this method is well suited to the assessment of regional slope instability.

Key words regional slope stability, failure probability, hierarchical analysis, fuzzy multiple assessment, safety factor, landslide.

《地球科学——中国地质大学学报》加入 China Info 网络信息服务系统

《地球科学——中国地质大学学报》于 1998 年加入“ChinaInfo(中国信息)网络资源系统《电子期刊》”,本刊录用的稿件将一律由编辑部统一纳入 ChinaInfo 网络信息服务系统. ChinaInfo 系统是由国家科技部立项,中国科技信息研究所组织实施,万方数据网络中心编辑制作的开放式因特网网络信息资源系统,《电子期刊》作为国家“九五”科技攻关项目,是 ChinaInfo 系统中的重要信息服务栏目.《地球科学——中国地质大学学报》将按照统一格式制作编入 ChinaInfo 系统《电子期刊》,读者可直接进入 ChinaInfo 系统,免费(一年后开始酌情收费)查询检索本刊内容,也欢迎各界朋友通过 ChinaInfo 系统向《地球科学——中国地质大学学报》编辑部提出宝贵意见、建议,或征订本刊.

本刊网址: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/dqkx>