

文章编号:1671-6833(2011)06-0058-05

基于分形插值模型的边坡地震稳定性评价方法

王 威^{1,2}, 田 杰², 王志涛¹, 马东辉¹, 苏经宇¹

(1. 北京工业大学 抗震减灾研究所, 北京 100124; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 借鉴分形基本理论, 提出了基于分形-插值模型的边坡地震稳定性评价方法. 该方法首先选取影响边坡地震稳定性评价的岩土体特性、新构造运动特性、坡高、坡角、年均降雨量和场地地震烈度6个参数作为岩土边坡地震稳定性综合评价的指标, 并确定指标的分级标准, 采用在每级标准中随机内插的方法, 得到50个标准样本, 用于构建边坡地震稳定性评价的分形-插值模型; 其次根据最大似然分类原则确定每个边坡地震稳定性指标的评价分维数; 然后利用加权求和法计算样本的综合评价值, 并根据样本综合评价值与经验等级之间的关系建立分形-插值评价模型; 最后, 通过实例分析表明: 该模型的评价结果合理、客观, 为边坡地震稳定性评价工作提供了一种新的研究方法思路.

关键词: 分形插值模型; 分维数; 边坡; 地震稳定性; 评价

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A

0 引言

目前对边坡地震稳定性评价的精确方法主要有拟静力法、Newmark 分析法、动力有限元时程分析法、完全动力分析法等^[1-2], 为研究边坡在动力作用下的破坏机理及稳定性评价提供了基础资料. 结合我国历史地震资料, 一些学者提出了更适合我国的边坡地震崩滑两极预测方法, 其中一级预测方法为地震崩滑的初判准则; 二级预测提出了多种方法. 例如: 高科等^[3]利用突变级数法对边坡的地震稳定性进行了综合评价研究; 王余庆等^[4]探讨了灰色理论中的灰色聚类方法预测其地震的稳定性; 董陇军, 文畅平等^[5-6]基于未知测度/属性数学理论建立岩土边坡地震崩滑预测与危险性分级的属性识别模型; 马毅等^[7]综合考虑边坡地震稳定性评价因素的多源模糊性研究了岩质边坡地震稳定性多模型组合评价方法; 高艳平等^[8]从人工神经网络的基本原理出发, 建立了边坡抗震抗滑稳定性评判的人工神经网络模型. 这些研究从不同角度对边坡的地震稳定性进行了探讨, 取得了诸多研究成果. 由于影响边坡地震稳定性的因素多, 且这些指标在获取时具有一

定的片面性、随机性和不确定性, 一些评价技术和方法不能全面地反映边坡地震稳定性特性, 有时甚至会出现误判, 且不同方法常得出矛盾的结论. 基于此, 笔者利用分形理论在揭示复杂现象与规律上的突出优势^[9-10], 建立了边坡地震稳定性评价的分形-插值模型, 试图从新的角度探索边坡地震稳定性评价方法.

1 边坡地震稳定性评价的分形-插值模型

1.1 单个指标分维数的计算

设研究边坡地震稳定性评价影响因素中第 i 个指标 X_i^* 的数据向量为

$$X_i^* = (x_{i1}^*, x_{i2}^*, \dots, x_{in}^*), i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: n 为待评价因素的样本个数; m 为待评价对象的指标个数.

(1) 数据预处理. 对于正向指标可采用

$$X_i = (X_i^* - \min(X_i^*)) / (\max(X_i^*) - \min(X_i^*));$$

对于负向指标采用

$$X_i = (\max(X_i^*) - X_i^*) / (\max(X_i^*) - \min(X_i^*)),$$

将指标值变换到 $[0, 1]$ 区间, 即得到数据规

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-09-20

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2009BAJ28B04, 2011BAK07B01, 2011BAJ08B03, 2011BAJ08B05)

作者简介: 王威(1981-), 男, 河南沈丘人, 北京工业大学助理研究员, 博士, 主要从事城市与工程安全减灾方面研究, E-mail: ieeww@bjut.edu.cn.

划后的指标数据向量为

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (2)$$

(2) 建立 1~9 维相空间(需要时可更大些)

$$\begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} \\ x_{i2} & x_{i3} \\ \dots & \dots \\ x_{in-1} & x_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{i8} & x_{i9} \\ x_{i2} & x_{i3} & x_{i4} & \dots & x_{i9} & x_{i10} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{in-8} & x_{in-7} & x_{in-6} & \dots & x_{in-1} & x_{in} \end{bmatrix}$$

一维相空间 二维相空间 九维相空间

(3) 分别计算每维相空间两点之间的距离 $r_{pq}(s)$ 与平均距离 Δx_s , 计算公式为^[9]

$$r_{pq}(s) = \sqrt{\sum_{k=1}^s (x_{pk} - x_{qk})^2} \quad (3)$$

$$\Delta x_s = \sum_{p=1}^{n-s+1} \sum_{q=1}^{n-s+1} \frac{r_{pq}(s)}{(n-s+1)^2} \quad (4)$$

式中: $p, q = 1, 2, \dots, n-s+1$ (不同相空间的点数——列数); $s = 1, 2, \dots, \omega$ (相空间维数), 其中 ω 为最大相空间维数。

(4) 分别计算每维相空间两点之间距离小于 r_{ik} 的概率 $C_k(s)$, 计算公式为

$$C_k(s) = \frac{1}{(n-s+1)^2} \sum_p \sum_q H(r_{ik} - r_{pq}(s)) \quad (5)$$

式中: r_{ik} 为指定的距离上限; H 为 Heaviside 函数, 其值分别由下式确定。

①距离上限:

$$r_{ik} = \frac{k}{10} \Delta x_s \text{ 或 } r_{ik} = \frac{2^{k-1}}{b} \Delta x_s \quad (6)$$

式中: b 为指定常数; $k = 1, 2, \dots, 14$; 本例用前者。

②Heaviside 函数:

$$H(r_{ik} - r_{pq}(s)) = \begin{cases} 1, & r_{ik} - r_{pq}(s) \geq 0 \\ 0, & r_{ik} - r_{pq}(s) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

(5) 如果存在分形, 则每维相空间有:

$$C_k(s) \propto r_{ik}^D \quad (8)$$

根据每维相空间求出的一组 ($k = 14$) $C_k(s)$ 值, 在 $C_k(s)$ 和 r_{ik} 双对数图上若为直线, 则分形存在, 其斜率为分维数, 即^[10]

$$D_i = \lim_{r_{ik} \rightarrow 0} \frac{\ln C_k(s)}{\ln r_{ik}} \quad (9)$$

(6) 若分维数随着相空间维数的升高趋向极限, 则此极限值为空间的分维数。在实际选择时, 若分维数没有严格地趋向某一极限, 则采取比较不同相空间的分维数, 选择其趋于稳定的最大者或相邻空间分维数之差满足一定精度者, 作为该

边坡地震稳定性评价单个指标的分维数。根据上述原理可求出边坡地震稳定性评价指标的分维数向量 D 。分维数越大说明该指标越重要。

1.2 分形-插值评价模型的构建

(1) 对边坡地震稳定性评价指标进行数据预处理, 消除指标的量纲和统一指标的变化方向;

(2) 在各评价标准等级范围内按均匀分布随机产生 l 个样本, 对于每个指标采用同一组随机数值, 若有 T 个评价标准等级, 则可形成 $l \times T$ 个评价样本, 每个评价样本对应的经验等级为 $y(j)$;

(3) 根据公式(1)~(9)计算指标分维数 D_i , 利用公式(10)可求得第 j 个样本的评价值:

$$z(j) = \sum_{i=1}^m D_i \times x_{ij} \quad (10)$$

(4) 对于 T 个评价等级, 设第 t 个评价等级对应的评价值 $z(j) \in [S_t, S'_t)$, 根据第 j 个样本计算的评价值 $z(j)$ 与经验等级 $y(j)$, 建立 $z(j) - y(j)$ 的散点图, 则可根据散点图可得到相应的分形插值评价。

2 边坡地震稳定性评价模型

2.1 评价指标的选取及分类标准的确定

地震作用下, 边坡的破坏模式、分布、规模等取决于地震能量以及边坡的几何和物理特征, 而边坡稳定性的影响因素则可归纳为边坡所处的地质背景、边坡的岩体结构类型和地层岩性组合、边坡的地形地貌条件以及边坡的水文地质条件等^[3-7]。笔者选取岩土体特性 x_1 、新构造运动特性 x_2 、坡高 x_3 、坡角 x_4 、年均降雨量 x_5 和场地地震烈度 x_6 等 6 个参数对岩土边坡地震崩滑进行分析评价, 将边坡地震稳定性状况分为 5 个等级: 极稳定 I、稳定 II、中等稳定 III、不稳定 IV 和极不稳定 V, 见表 1 和表 2 所示。

2.2 分形-插值模型构建

(1) 数据预处理。为消除指标的量纲和统一指标的变化方向, 进行了数据预处理, 见表 3。在上述各评价标准等级范围内按均匀分布随机产生 10 个样本, 对于每个指标采用同一组随机数值, 共形成 50 个评价样本, 将极稳定 I、稳定 II、中等稳定 III、不稳定 IV 和极不稳定 V 分别赋予经验等级 1, 2, 3, 4, 5 共 5 个等级, 见表 4 所示。

表 1 评价指标的量化分级
Tab.1 Slope seismic stability evaluation index level standard

类别	x_1	x_2	x_3/m	$x_4/(\text{^\circ})$	x_5/mm	$x_6/(\text{^\circ})$
I	0.5~1.5	0.5~1.5	0~100	0~12.5/0~32.5	0~475	0~5.5
II	1.5~2.5	1.5~2.5	100~180	12.5~20/32.5~40	475~600	5.5~6.5
III	2.5~3.5	2.5~3.5	180~319	20~30/40~50	600~1050	6.5~7.5
IV	3.5~4.5	3.5~4.5	319~450	30~37.5/50~57.5	1050~1375	7.5~8.5
V	4.5~5.5	4.5~5.5	450~550	37.5~45/57.5~65	1375~1625	8.5~10

注:对于评价指标数值超过极不稳定V级的上限值时,可按归一化数值1进行处理.

表 2 岩土体结构完整性及新构造运动特征分级与赋值表
Tab.2 Geotechnical mass structural integrity and tectonic movement feature classification and rating assignment

编号	岩土体特性	新构造运动特征	影响程度分级	赋值
1	岩石坚硬,结构完整	新构造运动微弱,没有发生过6级以上地震,只有少量小型断裂	低	1
2	岩石较坚硬,结构较完整	新构造运动不强烈,发生过少量6级以上地震,只有小型断裂较	低	2
3	岩石较破碎,结构不完整	新构造运动较强烈,发生过6级以上地震,有主干断裂	中等	3
4	岩石破碎,岩土体不完整	新构造运动强烈,发生过7级以上地震,大型断裂带,断裂较密集	高	4
5	岩石特别破碎,结构面发育,岩土体特别不完整,有易滑地层	新构造运动特别强烈,发生过多次7级以上地震,巨大断裂带,断裂密集带,断裂复合带	很高	5

(2)指标分维数计算.根据公式(1)~(9)计算边坡地震稳定性评价指标(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6)

表 3 无量纲处理的单因素指标评价标准

Tab.3 Dimensionless indices and classification criterion for assessing slope seismic stability

类别	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
I	0.000~0.200	0.000~0.200	0.000~0.200	0.000~0.278/0.000~0.500	0.000~0.292	0.000~0.550
II	0.200~0.400	0.200~0.400	0.200~0.360	0.278~0.444/0.500~0.615	0.292~0.369	0.550~0.650
III	0.400~0.600	0.400~0.600	0.360~0.638	0.444~0.667/0.615~0.769	0.369~0.646	0.650~0.750
IV	0.600~0.800	0.600~0.800	0.638~0.900	0.667~0.833/0.769~0.885	0.646~0.846	0.750~0.850
V	0.800~1.000	0.800~1.000	0.900~1.000	0.833~1.000/0.885~1.000	0.846~1.000	0.850~1.000

的分维数 $D=(0.962\ 1,0.942\ 5,0.875\ 1,0.914\ 2,0.854\ 1,0.958\ 1)$.分维数越大说明该边坡地震稳定性评价指标越重要.从计算结果可以看出,在边坡地震稳定性评价时 x_3,x_5,x_4,x_2,x_6,x_1 6个指标依次重要.

(3)建立边坡地震稳定性评价模型.根据公式(10)可计算上述50个样本的综合评价价值,则以经验等级值为纵坐标,以综合评价价值为横坐标,得到两者的散点图,具体见图1.

从图1中可以看出, $z(j)$ 与 $y(j)$ 的图形为阶梯形、上升曲线,用 a,b,c,d,e,f,g,h,i,j 分段线性插值,得到边坡地震稳定性评价的分形插值等级.

(4)分形插值模型的验证.为了验证本研究模型的有效性和可行性,对表5中的工程实例^[3-7]进行分析,并将评价结果与其他评价方法的评判结果进行对比.

从表5可以看出,10个边坡样本分形插值模型的评价结果与灰色聚类法^[4]差别较大,而与突变级数法^[3]、未确知测度分析模型^[5]、属性数学理论方法^[6]有较好的一致性,与模糊可变评价模型^[7]评价结果一致,从而说明将分形插值模型应用于边坡地震稳定性评价的判定中是有效性和可行的.

表 4 预处理后的标准样本
Tab.4 Preprocessed standard samples

序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	等级
1	0.006	0.024	0.003	0.113	0.006	0.076	1
2	0.007	0.033	0.021	0.116	0.084	0.215	1
...
11	0.216	0.201	0.211	0.281	0.302	0.562	2
12	0.217	0.217	0.239	0.332	0.303	0.584	2
...
21	0.406	0.408	0.378	0.457	0.382	0.653	3
22	0.434	0.420	0.389	0.463	0.389	0.683	3
...
31	0.612	0.606	0.638	0.669	0.655	0.755	4
32	0.619	0.617	0.785	0.683	0.657	0.773	4
...
49	0.964	0.965	0.986	0.986	0.971	0.995	5
50	0.964	0.995	0.993	0.998	0.996	0.996	5

注:坡角以滑坡的分类等级取值范围为例进行说明.

表 5 分形插值模型评价结果对比表

Tab.5 CoMPArison of results obtained with different methods of fractal interpolation model

序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	$z(j)/y(j)$	本文方法	突变级数法 ^[3]	灰色聚类法 ^[4]	未确知模型 ^[5]	属性数学理论 ^[6]	模糊可变评价模型 ^[7]
1	5	4	270	40	800	10	4.22/4	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)
2	2	5	130	33	937	6	3.16/3	Ⅲ	Ⅲ(+)	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ(+)	Ⅲ(+)
3	5	4.5	35	45	800	10	4.05/4	Ⅳ	Ⅳ(+)	Ⅴ	Ⅳ(+)	Ⅴ	Ⅳ(+)
4	5	4	10	45	900	9	3.88/4	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)
5	5	4	54	45	900	8	3.86/4	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)
6	5	4	15	60	900	7	3.71/4	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)	Ⅳ(+)
7	2	5	28	79	650	8	3.29/3	Ⅲ	Ⅲ(+)	Ⅴ	Ⅴ	Ⅲ(+)	Ⅲ(+)
8	2	4.5	40	82	800	8	3.30/3	Ⅲ	Ⅲ(+)	Ⅴ	Ⅲ(+)	Ⅲ(+)	Ⅲ(+)
9	2	4.5	20	79	800	9	3.36/3	Ⅲ	Ⅲ(+)	Ⅴ	Ⅲ(+)	Ⅲ(+)	Ⅲ(+)
10	2	4	15	80	900	9	3.31/3	Ⅲ	Ⅲ(+)	Ⅴ	Ⅲ(+)	Ⅳ	Ⅲ(+)

注:“(+)”为判别一致的样本.

3 结论

(1)针对边坡地震稳定性评价中的复杂非线性关系,利用分形理论较强的非线性数据处理能力,构建了边坡地震稳定性的分形插值评价模型,该模型可以把多维指标综合成一维指标,解决了单项评估指标结果不相容的问题.

(2)针对标准样本量少的问题,在每级标准之间随机内插构建标准样本集,并分形插值评价模型对 10 组实测工程边坡地震稳定性进行了研究,评价结果与用其他方法的分类结果基本一致,验证了该方法的客观性、可信性,对边坡地震稳定性评价具有很好的适用性.

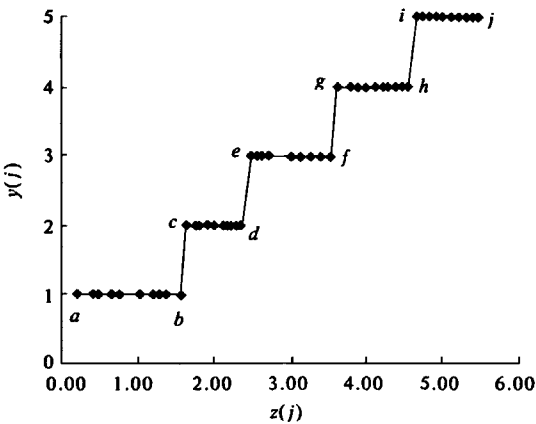


图 1 综合评价值与经验等级值的散点图
Fig.1 Scatter dots of comprehensive evaluation value and its grade

参考文献:

[1] 刘红帅,薄景山.岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J].地震工程与工程振动,2005,20(1):164-171.

[2] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等.边坡地震稳定性分析探讨[J].地震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.

[3] 高科,李夕兵,宫凤强.基于突变级数法的边坡地震稳定性综合评价[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):406-412.

[4] 王余庆,高艳平,辛鸿博.用灰色聚类方法预测边坡地震稳定性研究[J].工业建筑,2002,32(6):44-47.

[5] 董陇军,王飞跃.基于未确知测度的边坡地震稳定

- 性综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 74 - 78.
- [6] 文畅平, 杨果林. 基于属性数学理论的岩土边坡地震稳定性评价[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 8 - 14.
- [7] 马毅, 王希良, 刘振, 等. 基于模糊因素的岩质边坡地震稳定性多模型组合评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 624 - 629.
- [8] 高艳平, 王余庆, 辛鸿博. 神经网络在预测边坡地震稳定性中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(4): 431 - 433.
- [9] 王京贵, 饶安妮. 分形理论在成矿预测中的应用[J]. 华东地质学院学报, 1994(2): 23 - 25.
- [10] 刘光萍, 杜萍, 王琨. 分形理论在湖泊富营养化评价中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(6): 925 - 929.

Evaluation on Seismic Stability of Slopes Based on Fractal Interpolation Model

WANG Wei^{1,2}, TIAN Jie², WANG Zhi-tao¹, MA Dong-hui¹, SU Jing-yu¹

(1. Institute of Earthquake Resistance and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Fractal interpolation model for evaluation of seismic stability of slopes is proposed. Firstly, six key factors are selected as the factors for synthetic evaluation of slope seismic stability. In addition, because of few standard samples, fifty standard samples are produced by the way of stochastic interpolation on basis of classification standard; Secondly, through calculating the fractal dimension of single index of seismic stability of slopes, confirming the fractal dimension exponent evaluation of the index of single slope with the maximum likelihood classification principle; Thirdly, adopting weighted summation value, this method calculates the level of the colligate estimation of multi-index of slope and establishes the fractal interpolation evaluation model according to the relationship between the value of comprehensive evaluation of the samples and the experience level; Finally, ten samples are evaluated. The results show that the fractal interpolation model results are reasonable and objective, and they have better reliability and stability so as to provide a new research method and idea for seismic stability of slopes.

Keywords: fractal interpolation model; fractal dimension; slope; seismic stability; evaluation