

文章编号:1007-2993(2009)03-0130-05

GIS 支持下基于可拓物元模型的边坡稳定性评价

许冲¹ 曹建刚² 莫艳合³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;2. 中兵勘察设计研究院,北京 100053;
3. 河北建设勘察研究院有限公司,河北石家庄 050031)

【摘要】 边坡稳定性受多方面因素的影响,建立了多指标边坡稳定性评价的可拓物元模型。利用 ArcGIS Engine 二次开发平台实现了数据采集、数据管理、图形显示和评价结果可视化等功能,在此基础上集成了可拓物元模型分析模块。并通过一个实例进行了从数据录入、可拓物元模型分析到结果可视化显示等一系列操作的应用测试。

【关键词】 边坡;稳定性评价;可拓物元模型;ArcGIS Engine

【中图分类号】 P 208; TU 413.6 **【文献标识码】** A doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.03.006

GIS-based Slope Stability Evaluation Using Extension Matter-element Model

Xu Chong¹ Cao Jiangang² Mo Yanhe³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;
2. China Ordinance Industry Institute of Geotechnical Survey & Design, Beijing 100053;

3. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Company, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

【Abstract】 The stability of slopes is affected by many factors. A multi-index extension matter-element model is developed to evaluate the stability of slopes. This model is then programmed using ArcGIS Engine development platform and VB programming language. The functions, including data collection and management, and visualization of stability evaluation, are also implemented. A case study is presented to test the reliability of the model, including data input, extension matter-element model evaluation and visualization.

【Key words】 slope; stability evaluation; extension matter-element model; ArcGIS Engine

0 引言

边坡工程是一项复杂的系统工程,它涉及到我国工程建设的各个领域^[1-2]。因此,边坡稳定性评价受到了高度重视。影响边坡稳定性的因素指标多而复杂,应用经典力学模型进行边坡稳定性评价^[3]往往难以反映客观实际。

而可拓学^[4-6]提供了解决此类问题的科学方法,其在边坡工程研究领域已经取得了初步应用^[7-10]。本文建立基于可拓物元模型的多指标边坡稳定性评价模型,并在 ArcGIS Engine 二次开发平台下进行模型开发和实现,并对实际边坡进行稳定性评价。

1 可拓模型的基本原理和方法

可拓学^[4-6]是由我国学者蔡文于 1983 年提出的,它始于不相容问题的转化规律和解决方法。可拓方法是一种新的人工智能工具,在空间数据挖掘

技术中已有广泛的应用。运用可拓方法对事物进行综合评价,就是将描述或评价的对象、各特征和对象关于特征的量值组成一个整体——物元来研究,用可拓集合的关联函数值——关联度大小描述各种特征参数与所研究对象的从属关系,从而把属于或不属于的定性描述扩展为定量描述。

对于边坡稳定性评价问题,就是根据研究区域的边坡稳定性评价的标准物元模型,评价不同边坡在多个影响因素组合条件下的稳定性。首先选择边坡稳定性的影响因素,即边坡稳定性评价因子,然后构建边坡稳定性评价的可拓物元模型,建立关联函数,确定权重,计算待评边坡物元实测数据与各特征元相应类别的综合关联函数值,最后根据危险性评价等级集合的关联度大小进行边坡稳定性等级的评定。

2 边坡可拓物元综合评判模型的构建

2.1 构建可拓物元综合评判模型

2.1.1 确定经典域和节域

将边坡稳定性分为 m 级;影响边坡稳定性评价因子为 n 。令

$$R_{0j} = (N_{0j}, C, V_{0j}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & C_1 & V_{0j1} \\ & C_2 & V_{0j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{0jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & C_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_{0j} 表示一个物元; $N_{0j} (j=1, 2, \dots, m)$ 表示边坡稳定性的分级; $C_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示边坡稳定性影响因子; V_{0ji} 为 N_{0j} 关于 C_i 所规定的量值范围, 即边坡稳定性评价各等级关于对应的影响因子所取的数据范围——经典域 $\langle a_{0ji}, b_{0ji} \rangle$ 。

$$\text{令 } R_p = (P, C, C_p) = \begin{bmatrix} P & C_1 & V_{p1} \\ & C_2 & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P 表示边坡稳定性评价等级的全体; R_p 表示在该评价等级对应的物元; $V_{pi} (i=1, 2, \dots, n)$ 表示 P 关于 C_i 所取的量值范围, 即 P 的节域 $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 。

2.1.2 确定待评物元

令待评边坡用 P 表示, 把收集到的地理信息数据用物元 R_x 表示, 称为待评物元。

$$R_x = (P_x, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} P_x & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P_x 表示待评边坡的全体; V_i 为 P_x 关于影响因子 C_i 的量值, 即待评边坡各个影响因子的具体数据。

2.1.3 确定关联函数值

待评边坡第 i 个稳定性影响因子与各等级 j 的关联度值按下式计算。

$$K_j(V_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(V_i, V_{ji})}{|V_{ji}|} & (V_i \in V_{ji}) \\ \frac{\rho(V_i, V_{ji})}{\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji})} & (V_i \notin V_{ji}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\rho(V_i, V_{ji}) = \left| V_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2}$; $\rho(V_i,$

$V_{pi}) = \left| V_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$; $|V_{ji}| = |b_{ji} - a_{ji}|$;

V_{ji} 为 N_j 关于影响因子 C_i 所确定的量值范围。

2.1.4 确定待评物元关于稳定类别 j 的关联度

待评边坡 P 关于稳定级别 j 的关联度为

$$K_j(P) = \sum_{n=1}^n \lambda_i K_j(V_i) \quad (5)$$

式中: λ_i 为各评价因子 i 的权重系数, 且 $\sum_{n=1}^n \lambda_i = 1$ 。

若 $K_j(P) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(P)$ (6)

则待评边坡的稳定性属于等级 j 。

2.2 影响因子的选取和量化分级

2.2.1 影响因子的选取与权重

在边坡稳定性评价中, 影响边坡稳定性的因素众多, 各因素所起的作用也是不同的, 影响因子的选取及其权重的确定直接影响着计算结果。根据实际野外考察和资料分析, 从众多影响因子中提取以下影响因素: 坡高、坡角、岩性、岩层倾向、岩石风化程度、断裂发育、水的影响、地震烈度、植被覆盖度等 9 个指标来评价边坡稳定性^[11]。这 9 个评价指标的权重分别设定为: 0.12、0.20、0.16、0.10、0.10、0.08、0.06、0.05、0.05(见表 1)。

2.2.2 评判因子的量化分级

边坡稳定性涉及较多因素, 各因素贡献大小不同, 因此对各因素进行权重的确定, 来反映不同因素的重要性。权重的确定采取“定性分析、定量取值”的方法, 定性与定量相结合, 以定性分析结果来约束权重量化取值的范围。

根据边坡评价分级标准, 分别将 9 个影响指标量化为 5 个等级标准。其中坡高、坡角、岩层倾向、地震烈度、植被覆盖度按照表 1 中的量化准则进行分级, 岩性、风化程度、断裂发育、水的影响依据专家分类进行分级, 分类标准依据文献^[11]中的标准, 其中岩性分类打适用 RMR 方法进行评分, 量值范围为 0~100, 按照 20 一个级别平均分为 5 类; 风化程度与断裂发育的量值范围均为 0~1, 按照 0.2 的范围分为 5 级(见表 1)。

表1 边坡稳定性评价体系表

指标	稳定	较稳定	一般	较不稳定	不稳定	权重
坡高/m	<10	10~20	20~30	30~40	>40	0.12
坡角/(°)	<15	15~30	30~45	45~60	>60	0.20
岩性	坚硬,结构完整的块状岩浆岩、变质岩、沉积岩(80~100)	较坚硬,结构较完整的块状岩浆岩、变质岩、碎屑岩夹碳酸盐岩(60~80)	较破碎,结构不完整,碎屑岩类,片状、板状变质岩(40~60)	破碎,有软弱结构面,岩土体不完整,砂岩、粉砂岩、泥岩岩组(20~40)	特别破碎,软弱结构面发育,岩土体特别不完整,砂岩、粉砂岩夹软弱的泥岩、页岩岩组,松散土类(0~20)	0.16
岩层倾角/(°)	0~5	5~20	20~30	30~45	45~90	0.10
风化程度	未风化(0~0.2)	微风化(0.2~0.4)	弱风化(0.4~0.6)	强风化(0.6~0.8)	全风化(0.8~1.0)	0.10
断裂发育	极不发育,只有少量断裂(0~0.2)	不发育,只有小型断裂(0.2~0.4)	较发育,有主干断裂(0.4~0.6)	发育,有大型断裂,断裂带密集(0.6~0.8)	特别发育,有巨大断裂,断裂复合带(0.8~1.0)	0.08
水的影响	0.95~1	0.8~0.95	0.65~0.8	0.4~0.65	0~0.4	0.06
地震烈度	0~6	6~7	7~8	8~9	>9~12	0.05
植被覆盖度/%	90~100	70~90	50~70	30~50	0~30	0.05

2.3 物元的构造

将边坡稳定性级别按稳定、较稳定、一般、较不稳定、不稳定分级,分别用 N_{01} 、 N_{02} 、 N_{03} 、 N_{04} 、 N_{05} 表

示,由表1可以构造出边坡稳定性评价各等级的经典物元为 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 、 R_{04} 和 R_{05} ,边坡稳定性的节域是 R_p 。

$$\begin{aligned}
 R_{01} &= \begin{bmatrix} N_{01} & C_1 & \langle 0, 10 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 15 \rangle \\ & C_3 & \langle 80, 100 \rangle \\ & C_4 & \langle 0, 5 \rangle \\ & C_5 & \langle 0, 0.2 \rangle \\ & C_6 & \langle 0, 0.2 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.95, 1 \rangle \\ & C_8 & \langle 0, 6 \rangle \\ & C_9 & \langle 90, 100 \rangle \end{bmatrix} \\
 R_{02} &= \begin{bmatrix} N_{02} & C_1 & \langle 10, 20 \rangle \\ & C_2 & \langle 15, 30 \rangle \\ & C_3 & \langle 60, 80 \rangle \\ & C_4 & \langle 5, 20 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.2, 0.4 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.2, 0.4 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.8, 0.95 \rangle \\ & C_8 & \langle 6, 7 \rangle \\ & C_9 & \langle 70, 90 \rangle \end{bmatrix} \\
 R_{03} &= \begin{bmatrix} N_{03} & C_1 & \langle 20, 30 \rangle \\ & C_2 & \langle 30, 45 \rangle \\ & C_3 & \langle 40, 60 \rangle \\ & C_4 & \langle 20, 30 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.4, 0.6 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.4, 0.6 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.65, 0.8 \rangle \\ & C_8 & \langle 7, 8 \rangle \\ & C_9 & \langle 50, 70 \rangle \end{bmatrix} \\
 R_{04} &= \begin{bmatrix} N_{04} & C_1 & \langle 30, 40 \rangle \\ & C_2 & \langle 45, 60 \rangle \\ & C_3 & \langle 20, 40 \rangle \\ & C_4 & \langle 30, 45 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.6, 0.8 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.6, 0.8 \rangle \\ & C_7 & \langle 0.4, 0.64 \rangle \\ & C_8 & \langle 8, 9 \rangle \\ & C_9 & \langle 30, 50 \rangle \end{bmatrix} \\
 R_{05} &= \begin{bmatrix} N_{05} & C_1 & \langle 40, 80 \rangle \\ & C_2 & \langle 60, 90 \rangle \\ & C_3 & \langle 0, 20 \rangle \\ & C_4 & \langle 45, 90 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.8, 1.0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.8, 1.0 \rangle \\ & C_7 & \langle 0, 0.4 \rangle \\ & C_8 & \langle 9, 12 \rangle \\ & C_9 & \langle 0, 30 \rangle \end{bmatrix} \\
 R_p &= \begin{bmatrix} N & C_1 & \langle 0, 80 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 90 \rangle \\ & C_3 & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_4 & \langle 0, 90 \rangle \\ & C_5 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_6 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_7 & \langle 0, 1.0 \rangle \\ & C_8 & \langle 0, 12 \rangle \\ & C_9 & \langle 0, 100 \rangle \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

式中: N 为边坡稳定性; C_1 为边坡坡高; C_2 为边坡坡角; C_3 为边坡岩性; C_4 为边坡岩层倾角; C_5 为边坡岩石风化程度; C_6 为断裂发育程度; C_7 为水的影响,主要通过岩石软化系数表示; C_8 为地震烈度; C_9 为边坡的植被覆盖度。

3 模型的程序开发

3.1 开发平台的选择

综合考虑系统的数据管理和可拓计算模块的功能,采取基于 ArcGIS Engine 平台进行二次开发的方式构建系统。ArcGIS Engine 是一个基于

ArcObjects构建的可编程的嵌入式 GIS 工具包, 基于 ArcGIS Engine 开发的 GIS 应用系统能够完全脱离 ArcGIS 软件系统, 具有更强大的开发功能和独立性。

3.2 程序设计流程

基于可拓物元模型的边坡稳定性分析程序设计流程见图 1, 各步骤如下: ①进行边坡信息数据的整理和入库, 数据库采用 ArcGIS 系统的 GeoDatabase; ②建立边坡稳定性评价的标准物元模型, 提取了 9 个影响因素来进行边坡稳定性评价, 选择边坡稳定性分级; ③输入各影响因素的权重系数; ④根据标准物元模型和 9 个影响因素的权重系数进行边坡稳定性评价; ⑤将计算结果导入数据库; ⑥评价结果的可视化显示。

4 应用实例

以某高速公路沿线边坡 71 个实际边坡为例, 应

用开发的实验系统进行基于多指标可拓物元模型的边坡稳定性评价。

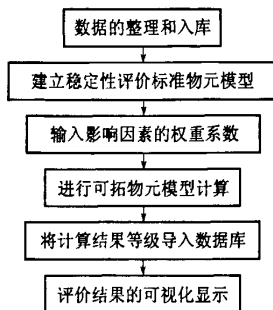


图 1 边坡稳定性评价流程图

4.1 数据录入

数据结构采用 ArcGIS 自带的 GeoDatabase 数据库, 录入数据在 ArcGIS 软件中进行, 数据录入框(属性框)见图 2。

FID	Shape *	Id	边坡位置	坡高	坡角	岩性	岩层倾角	风化程度	断裂发育	水文影响	地震烈度	植被覆盖率
0	Polygon	0	K1+606~K1	50	65	80	5	.2	.2	.95	6	90
1	Polygon	0	K2+100~K2	10	10	20	10	.2	.5	.2	6	80
2	Polygon	0	K3+610~K3	20	45	10	5	.2	.8	.2	6	80
3	Polygon	0	K3+850~K4	30	45	10	5	.2	.8	.2	6	70
4	Polygon	0	K1+606~K1	79	89	70	89	.9	.5	.9	6	90
5	Polygon	0	K5+895(右)	79	89	70	89	.9	.5	.1	6	40
6	Polygon	0	K5+950(右)	24	38	70	40	.4	.8	.4	6	50
7	Polygon	0	K6+300(右)	25	40	50	40	.6	.5	.5	6	40
8	Polygon	0	K6+900~K7	17	50	50	30	.5	.7	.6	6	30
9	Polygon	0	K7+520~K7	30	34	50	30	.5	.5	.5	6	50
10	Polygon	0	K8+095(右)	40	60	20	45	.8	.7	.4	6	80
11	Polygon	0	K8+640~K8	10	75	50	30	.5	.5	.5	6	40
12	Polygon	0	K9+260~K9	20	25	50	20	.5	.5	.5	6	70
13	Polygon	0	K10+960~K	50	40	40	20	.5	.5	.5	6	50
14	Polygon	0	K11+000~K	5	37	90	70	.15	.15	.96	6	50
15	Polygon	0	K11+490~K	15	20	70	70	.3	.8	.85	6	90
16	Polygon	0	K11+690~K	25	40	50	25	.5	.5	.7	6	30
17	Polygon	0	K12+112~K	35	50	30	85	.7	.7	.5	6	80
18	Polygon	0	K12+590~K	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 2 数据录入框

4.2 稳定性评价

数据录入对话框需要输入标准物元模型的各级参数和各影响因素的权重, 然后点击“计算”按钮进行稳定性评价(见图 3)。

4.3 评价结果的可视化显示

评价结果存储在 GeoDatabase 数据库中字段名为 Result 的属性字段中, 分为稳定、较稳定、一般、较不稳定、不稳定 5 个等级, 可将各个边坡根据稳定性分级显示在接边的地形平面图上, 见图 4。

标准物元模型参数输入框	等级1	等级2	等级3	等级4	等级5	影响因素	
坡高:	0	10	20	30	40	90	0.15
坡角:	0	15	30	45	60	90	0.25
岩性:	100	80	60	40	20	0	0.15
岩层倾角:	0	5	20	30	45	90	0.10
风化程度:	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.08
断裂发育:	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.10
水文影响:	1.0	0.95	0.8	0.65	0.4	0	0.07
地震烈度:	0	6	7	8	9	12	0.05
植被覆盖率:	100	90	70	50	30	0	0.05

图 3 可拓物元模型界面



图4 评价结果的可视化显示

4.4 评价结果分析

将沿线的71个边坡的稳定性评价情况和实际对比,表明评价结果与实际情况基本相符。在提取边坡稳定性影响因素、标准物元模型分级和影响因子权重赋值等方面值得开展深入研究。

5 结论

1)基于可拓物元模型的边坡稳定性评价方法属边坡稳定性人工智能评价方法范畴,综合考虑了影响边坡稳定的诸多因素。但是,该方法并不能取代经典的边坡稳定性力学评价方法,将二者结合起来进行边坡稳定性评价的效果会更好。

2)评价结果受边坡稳定性影响因素、标准物元模型分级和影响因子权重等因素的影响,只有根据实际情况,综合考虑边坡稳定性影响因素,划分合适的标准物元模型分级,科学分配影响因子的权重,才能够使边坡稳定性评价结果科学合理。

3)在ArcGIS Engine平台下实现了边坡稳定性评价的可拓物元模型,充分利用了GIS的数据采集、数据管理和图形显示等功能,并将稳定性评价结果按级别直观地显示在接边的地形图上。

本文将GIS技术,可拓学和边坡稳定性分析三者结合起来,较真实地反映了实际边坡的稳定性等级,评价原理简单,应用方便,可批量处理边坡数据,这为边坡稳定性评价提供了一条新的、有效的途径。

参考文献

- [1] 胡新丽,唐辉明. 斜坡工程GIS系统研究与应用[M]. 北京:中国地质大学出版社,2005.
- [2] 谢谟文,蔡美峰. 信息边坡工程学的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [3] 唐亦川,许冲,等. 基于GIS的公路边坡稳定性评价系统[J]. 公路交通科技,2005,22(9):56-58.
- [4] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报,1999,44(7):673-682.
- [5] 蔡文,杨春燕,等. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [6] 蔡文,杨春燕,等. 一门新的交叉学科——可拓学[J]. 中国科学基金,2004(5):268-272.
- [7] 谢全敏,夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(3):438-441.
- [8] 曾群华,郭跃,赵纯勇. 物元理论在危岩滑坡灾害社会经济易损性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(3):111-116.
- [9] 王亮. 岩体边坡稳定性的可拓学分析[J]. 河北冶金,1999(1):21-23.
- [10] 许冲,陈剑,等. 可拓理论在地质工程领域应用中的改进[J]. 科技导报,2009(3):35-40.
- [11] 许冲. 基于ArcObjects的公路边坡稳定性评价系统研究[D]. 西安:西安科技大学,2007.

收稿日期:2009-02-20