

基于可拓工程法的黄土路堑边坡 稳定性评价方法

王东耀, 折学森, 叶万军

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

[摘要] 针对影响黄土路堑边坡稳定性因素的复杂性和模糊性, 重视实践中的经验, 将可拓工程方法与路堑边坡稳定性评价相结合, 提出了路堑边坡稳定性评价的物元关联函数及物元关联度的计算方法。建立了适合可拓学理论的边坡稳定性分类标准, 实现了定性与定量评价黄土路堑边坡的结合。实例评价结果与定值计算、工程实际调查结果一致。

[关键词] 路堑边坡; 可拓学; 关联度; 物元模型; 稳定性

[中图分类号] P642.2; U416.13 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)03-0057-04

Method for Stability of Loess Slope of Cut Based on Topology

WANG Dong-yao, SHE Xue-sen, YE Wan-jun

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: This paper analyzes the calculation means of connective function and dependent degree in the appraise of slope of cut stability, and establishes the classification criteria of slope of cut stability which is adapted to extension theory, combined with Topology engineering method and the appraise of slope of cut stability. The example evaluation consequence agrees with the result of fixed value calculation and project reality investigation. The appraisal method of slope of cut stability based on extension theory supply a new feasible path for the problem which can settle the slope of cut stability appraise.

Key words: slope of cut; topology; dependent degree; material element model; stability

0 引言

路堑边坡的稳定性是在山区修筑公路常见的典型公路岩土工程问题。边坡稳定性分析与评价是边坡工程的重要内容之一, 它贯穿于边坡工程的始终。因此, 边坡稳定性分析与评价结果的正确与否直接关系边坡工程的成败^[1-3]。20世纪70年代以前, 边坡稳定性评价是以定性描述与分析为主, 这种方法应用起来有较大的随意性, 不便于设计应

用且需要有较丰富的工程经验。70年代以来, 边坡工程学科的发展进入了一个以定量模型为主的研究阶段。由于影响边坡稳定性的因素多, 定量计算所需指标在获取时具有一定的片面性、随机性和不确定性, 故定量方法不能全面反映边坡稳定性, 有时甚至会出现误判, 且不同定量模型是在简化的约束条件下, 以牺牲可靠性、实用性为代价, 而且, 过于追求定量化研究, 忽视在实践中积累起来的宝贵经验知识, 使得在处理诸如边坡这类开放复杂的系统时, 显得力不从心^[3]。为了将边坡稳定性的定性

[收稿日期] 2005-10-09
[基金项目] 陕西省交通厅交通科技项目(03-18K)
[作者简介] 王东耀(1959—), 男, 陕西富平人, 博士研究生, 从事路基工程研究。

与定量评价有机结合起来,引入模糊数学判别法来弥补以上缺陷,采用了多指标判别模型,如灰色聚类法、关联度方法等,避免了用单因子判别的缺陷,但模糊数学或灰色关联度法在分析过程中评价指标采用了某一确定值,实际为区间值,对不同稳定等级区别也不能具体反映。近年来,人们尝试用神经网络的“反向传播”模型来反映边坡稳定性同其物理力学试验指标之间的非线性关系,克服了传统的统计回归方法隐含着判别因子同稳定性之间存在着某种确定性关系的假定,但该法有一定的适用范围和局限性^[1-3]。边坡是复杂的岩土体,影响和控制边坡稳定性及其危害的诸多因素是相互联系、相互依存、相互作用的,被评价对象具有随机性和模糊性以及在不同条件下的可变性,其评价不仅需要从多个指标综合考虑,且应解决在对一个标准作综合评定时,各单项指标评定等级出现相互矛盾的问题,即把单项指标评定结果的不相容性转化为相容性是关键。近年来发展起来的可拓学就是用形式化的工具,从定性和定量两个角度去研究解决矛盾问题的规律和方法,在许多领域得到成功应用^[4-11],此也为边坡稳定性的综合评价分析提供了新的途径。笔者试图以可拓论为基础,建立边坡稳定性等级可拓综合评价模型,以期从另一角度探求边坡稳定性等级综合分析方法。

1 边坡稳定性评价模型

1.1 可拓评价方法基本原理^[5]

可拓学以物元为逻辑细胞,以物元理论和可拓集合理论为理论基石,创立物元和可拓集合两个新概念来描述事物属性及其转化以及不具有某种性质的事物向具有某种性质的事物的转化过程。物元是以有序的三元组 $R = (\text{事物}, \text{特征}, \text{量值}) = (N, C, V)$ 来表达。其中, N 表示事物, C 表示事物特征的名称, V 表示 N 关于 C 所取的量值,这三者称为物元的三要素。可拓集合是解决矛盾问题的定量化工具,定义如下:设论域为 U ,若对 U 中任一元素 $u, u \in U$,都有一实数 $K(u) \in (-\infty, +\infty)$ 与之对应,则称 $A = \{(u, y) \mid u \in U, y = K(u) \in (-\infty, +\infty)\}$ 为论域 U 上的一个可拓集合,其中 y 为 A 的关联函数, $K(u)$ 为 u 关于 A 的关联度,它能体现“既是又非”的临界概念,且在类内可区分不同层次,从而可描述“是变为非,非变为是”的事物可变性过程。

1.2 边坡稳定性可拓评价模型的建立

1.2.1 确定边坡稳定性评判的物元

$$R = (N_i, C, V) = \begin{bmatrix} N_i & c_1 & V_{i1} \\ & c_2 & V_{i2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{in} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: N_i 表示边坡稳定性等级的全体; c_j 表示边坡稳定性等级 N_i 的特征 ($j = 1, 2, \dots, n$); V_{ij} 为 N_i 关于 c_j 的量值。

1.2.2 确定经典域

按照一定的评价类别标准,将边坡稳定性划分为 j 种质量等级,则可以得到边坡岩土体质量的经典域物元 R_0

$$R_{0j} = (N_{0j}, C, V_{0j}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & V_{0j1} \\ & c_2 & V_{0j2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{0jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N_{0j} 表示所划分的边坡稳定性等级 ($j = 1, 2, \dots, m$); c_j 表示边坡稳定性等级 N_{0j} 的特征,即影响边坡稳定性的主要因素 ($j = 1, 2, \dots, n$); V_{0ji} 分别为 N_{0j} 关于 c_i 所规定的量值范围,即边坡稳定性等级关于对应特征所取的数值范围——经典域 $\langle a_{0ji}, b_{0ji} \rangle$ 。

1.2.3 确定节域

$$R_{0i} = (P, C, V_P) = \begin{bmatrix} P & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P 表示边坡稳定性等级的全体; V_{pi} 为 P 关于 c_i 所取得量值范围,即 P 的节域。

1.2.4 确定边坡稳定性待评物元的关联度

根据可拓集合的关联函数,待评物元关联度为

$$K_i(p) = \sum_{i=1}^n a_i K_j(v_i) \quad (4)$$

$$K_i(v_i) = \frac{\rho(v_i, V_{0ji})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{0ji})} \quad (5)$$

$$\rho(v_i, V_{0ji}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{0ji} + b_{0ji}) \right| - \frac{1}{2}(a_{0ji} - b_{0ji}) \quad (6)$$

$$\rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(a_{pi} - b_{pi}) \quad (7)$$

式中: $K_i(p)$ 表示待评边坡的稳定性 p 关于稳定性

等级 j 的可拓关联度; a_i 为权系数, 且 $\sum_{i=1}^n a_j = 1$ 。

1.2.5 边坡稳定性评价

对待评边坡的稳定性 p , 首先用非满足不可的特征 c_k 的量值 v_k 评价:

(1) 若 $v_k \in V_{0\bar{k}}$, 则表示 p 已不在所划分的各稳定性等级之中, 出现了新的量值, 应重新确定经典域与节域。

(2) 若 $v_k \in V_{0\bar{k}}$, 则由式(4) 计算出 $K_j(p)$ 。
若 $K_{j_0}(p) = \max_{j_0 \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(p)$ (8)
则待评边坡的稳定性 p 属于等级 j_0 类。

2 工程实例

2.1 黄土路堑边坡稳定性的分类标准

黄土路堑边坡的稳定性受多种因素的影响, 必须考虑黄土地层的工程性质及其构造特征, 边坡稳定性的影响因素集 $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\}$, 7 个影响因素为: 坡高、边坡坡角、天然重度、土的内摩擦角、土的内聚力、地震烈度及孔隙水压力比。

根据黄土物理学特性资料, 将黄土边坡稳定性进行评价(表 1)。

表 1 黄土边坡稳定性评定分级标准

指 标	评定级别				
	稳定	较稳定	一般	不稳定	极不稳定
坡高/m	< 6	6~20	20~30	30~90	> 90
坡度/(°)	< 15	15~30	30~45	45~60	> 60
天然容重/(kN·m ⁻³)	> 18	17~18	16~17	15~16	< 15
内摩擦角/(°)	> 35	30~35	20~30	15~20	< 15
粘聚力/kPa	> 55	40~55	25~40	20~25	< 20
地震烈度	< 3	3~5	5~7	7~8	> 8
孔隙水压力比	< 0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	> 0.4

对表 1 数据进行无量纲化处理, 列于表 2。据表 2, 可获得边坡稳定性等级经典域和相应的节域。

2.1.1 经典域

稳定

$$R_{01} = \begin{bmatrix} c_1, \langle 1, \infty \rangle \\ c_2, \langle 1, \infty \rangle \\ c_3, \langle 1, \infty \rangle \\ c_4, \langle 1, \infty \rangle \\ c_5, \langle 1, \infty \rangle \\ c_6, \langle 1, \infty \rangle \\ c_7, \langle 1, \infty \rangle \end{bmatrix}$$

较稳定

$$R_{02} = \begin{bmatrix} c_1, \langle 0.38, 1 \rangle \\ c_2, \langle 0.67, 1 \rangle \\ c_3, \langle 0.67, 1 \rangle \\ c_4, \langle 0.75, 1 \rangle \\ c_5, \langle 0.57, 1 \rangle \\ c_6, \langle 0.60, 1 \rangle \\ c_7, \langle 0.67, 1 \rangle \end{bmatrix}$$

一般

$$R_{03} = \begin{bmatrix} c_1, \langle 0.71, 0.83 \rangle \\ c_2, \langle 0.33, 0.67 \rangle \\ c_3, \langle 0.33, 0.67 \rangle \\ c_4, \langle 0.25, 0.75 \rangle \\ c_5, \langle 0.14, 0.57 \rangle \\ c_6, \langle 0.20, 0.60 \rangle \\ c_7, \langle 0.33, 0.67 \rangle \end{bmatrix}$$

不稳定

$$R_{04} = \begin{bmatrix} c_1, \langle 0, 0.71 \rangle \\ c_2, \langle 0, 0.33 \rangle \\ c_3, \langle 0, 0.33 \rangle \\ c_4, \langle 0, 0.25 \rangle \\ c_5, \langle 0, 0.14 \rangle \\ c_6, \langle 0, 0.20 \rangle \\ c_7, \langle 0, 0.33 \rangle \end{bmatrix}$$

极不稳定

$$R_{05} = \begin{bmatrix} c_1, \langle -\infty, 0 \rangle \\ c_2, \langle -\infty, 0 \rangle \\ c_3, \langle -\infty, 0 \rangle \\ c_4, \langle -\infty, 0 \rangle \\ c_5, \langle -\infty, 0 \rangle \\ c_6, \langle -\infty, 0 \rangle \\ c_7, \langle -\infty, 0 \rangle \end{bmatrix}$$

2.1.2 节域

$$R_p = (P, C, V_p)$$

$$\begin{bmatrix} P, & c_1, \langle 0, 1 \rangle \\ & c_2, \langle 0, 1 \rangle \\ & c_3, \langle 0, 1 \rangle \\ & c_4, \langle 0, 1 \rangle \\ & c_5, \langle 0, 1 \rangle \\ & c_6, \langle 0, 1 \rangle \\ & c_7, \langle 0, 1 \rangle \end{bmatrix}$$

表 2 黄土边坡稳定性评定分级标准

指 标	评定级别				
	稳定	较稳定	一般	不稳定	极不稳定
坡高/m	> 1	0.83~1	0.71~0.83	0~0.71	< 0
坡度/(°)	> 1	0.67~1	0.33~0.67	0~0.33	< 0
天然容重/(kN·m ⁻³)	> 1	0.67~1	0.33~0.67	0~0.33	< 0
内摩擦角/(°)	> 1	0.75~1	0.25~0.75	0~0.25	< 0
粘聚力/kPa	> 1	0.57~1	0.14~0.57	0~0.14	< 0
地震烈度	> 1	0.60~1	0.20~0.60	0~0.20	< 0
孔隙水压力比	> 1	0.67~1	0.33~0.67	0~0.33	< 0

2.2 算例

黄一延高速公路位于陕北黄土高原南部, 属典型的黄土台塬、黄土梁峁及沟壑区, 修筑出现大量的黄土路堑边坡, 其边坡的稳定性成为主要地质工程问题之一。现取道南隧道高边坡、燕麦沟边坡为例用可拓学理论进行评价。

结合研究项目, 对沿线边坡进行了工程地质调查, 其结果见表 3。经极差化无量纲处理后, 可构成边坡稳定性评价的待评物元, 见 R_{I} 、 R_{II} 。

$$R_I = \begin{bmatrix} N_I & c_1, 0.023 \\ & c_2, 0.738 \\ & c_3, 0.860 \\ & c_4, 1.540 \\ & c_5, 1.571 \\ & c_6, 0.400 \\ & c_7, 0.500 \end{bmatrix}$$

$$R_{II} = \begin{bmatrix} N_{II} & c_1, 0.119 \\ & c_2, 0.708 \\ & c_3, 0.200 \\ & c_4, 0.314 \\ & c_5, 1.038 \\ & c_6, 0.400 \\ & c_7, 0.800 \end{bmatrix}$$

对这两个边坡的各个因素关于稳定性分级的关联度计算结果见表 4。

表 3 黄土边坡稳定性主要影响因素实测值

Tab. 3 Measurement Results of Main Influence Indexes for Loess Slope Stability

影响因素	道南隧道边坡(Ⅰ)	燕麦沟边坡(Ⅱ)
坡高/m	88.00	80.00
综合坡度/(°)	30.61	31.69
天然重度/(kN·m ⁻³)	17.58	15.60
内摩擦角/(°)	45.80	21.82
土的内聚力/kPa	75.00	56.33
地震烈度	6.00	6.00
孔隙水压力比	0.25	0.10

表 4 黄土边坡各个因素关于稳定性分级的关联度

Tab. 4 The Dependent Degree of Every Factor of Loess Slope for Stability Classification

因 素	道南隧道边坡(Ⅰ)			
	稳定	较稳定	一般	不稳定
坡高/m	−0.970	−4.747	−5.725	0.032 3
综合坡高/(°)	−0.202	0.206	−0.200	−1.236
天然重度/(kN·m ⁻³)	−0.140	0.424	0.559	−1.606
内摩擦角/(°)	0.46	−2.16	−1.58	−5.16
土的内聚力/kPa	0.43	−2.28	−2.326	−10.21
地震裂度	−0.6	−0.5	0.5	−1.0
孔隙水压力比	−0.500	−0.515	0.515	−0.515

因 素	燕麦沟边坡(Ⅱ)			
	稳定	较稳定	一般	不稳定
坡高/m	−0.801	−3.712	−4.258	−0.719
综合坡高/(°)	−0.292	0.115	−0.112	−1.145
天然重度/(kN·m ⁻³)	−0.800	−1.424	−0.382	0.393 9
内摩擦角/(°)	−0.686	−1.744	−0.128	−0.256
土的内聚力/kPa	0.038	−0.152	−1.088	−6.414
地震裂度	−0.6	−0.5	0.5	−1.0
孔隙水压力比	−0.200	0.394	0.382	1.424

利用关联度计算公式,计算关于各级稳定性的关联度,并与其他方法进行比较,结果见表 5。

从表 5 可知,道南隧道边坡物元关联度在 $j=2$ 时获得最大,说明待评边坡的稳定性等级属于较稳

定,裂隙法和圆弧法计算的结果分别为 1.69 和 1.73;燕麦沟边坡物元关联度在 $j=3$ 时获得最大,说明待评边坡的稳定性等级属于一般稳定,裂隙法和圆弧法计算的结果分别为 1.20 和 1.25。

表 5 物元关联度 $K_i(p)$ 计算结果及对比

Tab. 5 Results from Material Element Dependent Degree $K_i(p)$ Assessment And its Contrast

边坡工程实例	$K_1(p)$	$K_2(p)$	$K_3(p)$
道南隧道边坡(Ⅰ)	0.106 90	6.213 927	−1.235 930
燕麦沟边坡(Ⅱ)	−0.043 56	−0.201 880	3.835 386

边坡工程实例	$K_4(p)$	裂隙法	圆弧法
道南隧道边坡(Ⅰ)	0.038 300	1.69	1.73
燕麦沟(Ⅱ)边坡	0.045 151	1.20	1.25

3 结论

利用可拓论评判思想,建立可拓学路堑边坡稳定性评价模型与方法,并应用在工程中,取得了良好效果。实例应用表明,该方法能较真实地反映实际路堑边坡稳定性等级水平,且易于计算机进行规范化评价,排除了人为因素对分析、评定结果的干扰,具有较强的识别评判能力和简便、定量严密的特点。

[参 考 文 献]

[1] 崔政权,李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[2] 叶万军,折学森. 基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 82-85.

[3] 彭小云,高德彬. 高陡边坡稳定性的概率分析[J]. 长安大学学报:地球科学版, 2003, 25(3): 67-70.

[4] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.

[5] 蔡 文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报, 1999, 44(7): 673-682.

[6] 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.

[7] 贾 超,肖树芳,刘 宁. 可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 751-756.

[8] 汪明武,金菊良,李 丽. 可拓学在膨胀土胀缩等级评判中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 754-757.

[9] 蔡 文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,2000.

[10] 周汉民. 岩体质量的可拓学评价方法在边坡工程中的应用[J]. 矿业快报, 2003(12): 13-15.

[11] Xie Quanmin, Zhu Ruigeng. Greyclassification for evaluating the stability of dangerous rock-block masses[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, 2000, 15(1): 73-77.