

文章编号: 1005-0523(2005)05-0016-04

基于物元模型的高陡路堑边坡岩体质量评价方法

陈宇亮¹, 王惠勇², 芮勇勤³

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江苏交通科学研究所 道桥设计所, 江苏 南京 210017;
3. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 针对山区高速公路建设中出现的岩质边坡病害问题, 基于层次分析法的物元模型, 建立了岩质边坡稳定性等级综合评判分析方法, 实例分析了典型岩质边坡的综合稳定性。

关键词: 物元模型; 岩质边坡; 层次分析方法; 边坡稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

0 引言

对岩质边坡体进行分类是一个较为复杂的过程, 主要通过岩体的单轴抗压强度、RQD、完整性系数、结构面强度系数和地下水等 5 个方面对岩体的质量进行综合评分。目前常用的不确定分析方法^[2~5], 这些方法虽然有各自的优点, 但是也存在着一定的不足。

鉴于此, 本文引入蔡文 1983 年以来提出的物元分析方法^[1](是描述人脑思维出点子、想办法解决矛盾问题的工具), 它以促进事物转化、解决不相容问题为核心, 是研究解决矛盾问题的规律和方法。它通过建立多指标参数的质量评定模型并能以定量的数据来表示评定结果, 从而能比较合理、完整的反映岩质边坡体的综合状况。同时, 由于评估系统的可靠性在很大程度上依赖于各种评价指标的权值, 这里引入层次分析法(AHP 法)来评价各指标的权重。

1 物元模型以及综合评价过程

1.1 物元基本概念

给定事物的名称 N , 它关于特征 C 的量值为 X , 以有序三元 $R=(N, C, X)$ 组作为描述事物的基本元, 简称为物元。同时把事物的名称、特征和量值称为物元三要素。一个事物

有多个特征, 如果事物 N 以 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 和相应的量值 X_1, X_2, \dots, X_n 表述, 表示为

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

这时, 称 R 为 n 维物元, 简记为 $R=(N, C, X)$ 。

1.2 确定经典域和节域矩阵

如果 N_j 表示所划分的 j 个评价类别, C_i 表示评价类别 N_j 对应的的评价指标(特征); $X_{ji}=(a_{ji}, b_{ji})$ 表示评价指标 C_i 所对应的量值范围, 即各类别 N_j 关于对应的评价指标 C_i 所取的数据范围称为经典域矩阵 R_j 。

$$R_j = (N_j, C_i, X_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & C_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果 N_p 为评价类别的全体, $X_p=(a_{pi}, b_{pi})$ 表示 N_p 关于 C_i 所对应的量值范围, 则节域矩阵 R_p 表示为:

$$R_p = (N_p, C, X_p) = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

收稿日期: 2005-04-11

作者简介: 陈宇亮(1977-), 男, 江西南昌人, 道路与铁道工程专业, 硕士, 主要从事路基路面工程的科研教学工作。

1.3 确定待评物元(体)

对于待评价的事物 P , 把所检测到的数据或分析结果用物元矩阵

$$R_x = \begin{bmatrix} P & C_1 & x_1 \\ & C_2 & x_2 \\ & \dots & \dots \\ & C_n & x_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

表示, R_x 称为事物 P 的待评物元, x_i 为待评事物 P 所检测到的具体实验数据.

1.4 确定待评事物的关联度

所谓关联度, 是指待评事物 P 与各等级 j 关联性大小的量度, 关联度 $K_j(P)$ 为

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_i, X_{ji})}{\Delta \rho} & \Delta \rho \neq 0 \\ -\rho(x_i, X_{ji}) - 1 & \Delta \rho = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\rho(x_i, X_{ji}) = |x_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2}| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2}$; $\Delta \rho = \rho(x_i - X_{pi}) - \rho(x_i, X_{ji})$.

对评价指标 C_i , 若取权系数为 W_i , 则

$$K_j(P) = \sum_{i=1}^n W_i K_j(x_i) \quad (6)$$

1.5 关联度综合等级评定

考虑到关联度 $K_j(P)$ 的取值有正负, 为了便于分析, 故对各指标的关联度进行规格化处理, 新的关联度取值范围是 $0 \sim 1$, 令

$$\bar{K}_j(p) = \frac{K_j(p) - \min_j K_j(p)}{\max_j K_j(p) - \min_j K_j(p)} \quad (7)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \cdot \bar{K}_j(p)}{\sum_{j=1}^m j \cdot \bar{K}_j(p)} \quad (8)$$

若 $K_{j^*} = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} \bar{K}_j$, 则评定 P 属于等级 j_0 , 同时称 j^* 为的级别偏向变量特征值, 从 j^* 值可以看出其偏向相邻级别的程度.

2 用层次分析法确定评价指标的权系数

层次分析法是一种确定权系数的有效方法, 它把复杂问题中的各因素划分为互相联系的有序层, 使之条理化, 根据对客观实体的模糊判断, 就每一层次的相对重要性给出定量的表示.

1) 比较矩阵一致性较好时权系数的确定方法

求解步骤如下:

step 1. 构造判断矩阵. 判断矩阵元素的值反映了人们对各元素相对重要性的认识, 一般采用 $1 \sim 9$ 及其倒数的标度方法. 由决策者两两比较目标准则相对重要程度, 得判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $a_{ij} = W_i / W_j$ 为 i 目标准则重要性程度 W_i 与 j 目标准则重要性程度 W_j 之比.

step 2. 用幂法计算判断矩阵 A 的最大特征根 λ_{\max} 及其对应的特征向量, 并对该特征向量进行归一化处理, 即得到各评价指标的重要性排序, 也即是权系数的分配.

表 1 平均随机一致性指标系数 RI 与阶数

| 阶数 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | ... |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| RI | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | ... |

step 3. 一致性检验. 为进行判断矩阵的一致性检验, 需计算一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)}$ 和查表求平均随机性指标 RI 的值. 当随机一致性比率 $CR < 0.1$ 时, 认为层次分析排序的结果有满意的一致性, 即权系数的分配是合理的. 否则, 说明判断矩阵的矛盾性很大, 特征权向量和实际权向量之间差别较大, 故不宜使用.

2) 比较矩阵一致性较差时权系数的确定方法

对于判断矩阵 A 一致性较差时, 采用最小 Euclid 范数来确定权重, 其主要求解步骤为:

step 1. 建立优化模型求解误差平方和最小时对应的权向量

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} W_j - W_i)^2 \quad (10)$$

step 2. 构造拉格朗日函数 $L(W)$, 来求解上述优化问题

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} W_j - W_i)^2 + 2\lambda (\sum_{i=1}^n W_i - 1) \quad (11)$$

对 W_k 求偏导数, 并令其为 0, 即

$$\sum_{i=1}^n (a_{ik} W_k - W_i) a_{ik} - \sum_{j=1}^n (a_{kj} W_j - W_k) + \lambda = 0 \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

联立 $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ 及 (12) 式可求得权重向量的分向量 W_i , 其中: λ 为拉格朗日乘子.

3 岩质边坡体稳定性分类实例分析

广南高速公路 G 标段 K51+297 左侧电塔边坡地层岩性复杂, 属山岭重丘区, 发育有典型鸡爪沟地形, 由于红层软岩地层岩性, 开挖高陡边坡破坏、失稳是一个重要问题. 按该边坡的整体岩性特征以及开挖顺序, 将该边坡由坡脚至坡顶分为一、二、三级.

其 5 项评价标准列于表 2, 岩质边坡试验资料列于表 3 所示. 对岩质边坡稳定性, 根据公路路基设计规范及国内外岩质边坡分类经验, 采用五级分类: N_1 (稳定)、 N_2 (基本稳定)、 N_3 (稳定性差)、 N_4 (不稳定)、 N_5 (极不稳定).

其中, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 分别指的是: 岩石质量指标 $RQD(\%)$ 、湿抗压强度 $R_w(\text{MPa})$ 、完整性系数 k_0 、结构面强度系数 k_f 、地下水渗水量 $W(\text{L} \cdot \text{min}/10\text{m})$.

表2 岩质边坡稳定性单因素分类标准

| 评价指标 | N_1 (稳定) | N_2 (基本稳定) | N_3 (稳定性差) | N_4 (不稳定) | N_5 (极不稳定) |
|-------|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| C_1 | 100~90 | 90~75 | 75~50 | 50~25 | 25~0 |
| C_2 | 200~120 | 120~60 | 60~30 | 30~15 | 15~0 |
| C_3 | 1.0~0.75 | 0.75~0.45 | 0.45~0.30 | 0.30~0.20 | 0.20~0 |
| C_4 | 1.0~0.8 | 0.8~0.6 | 0.6~0.4 | 0.4~0.2 | 0.2~0 |
| C_5 | 0~5 | 5~10 | 10~25 | 25~125 | 125~300 |

表3 K51+297 左侧岩质边坡稳定性评价因素原始指标值

| 所处位置 | RQD | R_w | K_e | K_f | W | 备注 |
|------|-----|-------|-------|-------|-----|------|
| 三级 | 40 | 45 | 0.25 | 0.4 | 20 | 中风化, |
| 二级 | 70 | 90 | 0.40 | 0.35 | 20 | 有节理 |
| 一级 | 77 | 88 | 0.58 | 0.45 | 5 | 两组 |

3.1 确定物元的经典域、节域以及待评价的物元

根据表2,取五个等级: N_1 (稳定)、 N_2 (基本稳定)、 N_3 (稳定性差)、 N_4 (不稳定)、 N_5 (极不稳定)对应的取值范围作为经典域矩阵 R_0 .

$$R = \begin{bmatrix} & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ C_1 & \langle 100, 90 \rangle & \langle 90, 75 \rangle & \langle 75, 50 \rangle & \langle 50, 25 \rangle & \langle 25, 0 \rangle \\ C_2 & \langle 200, 120 \rangle & \langle 120, 60 \rangle & \langle 60, 30 \rangle & \langle 30, 15 \rangle & \langle 15, 0 \rangle \\ C_3 & \langle 1.0, 0.75 \rangle & \langle 0.75, 0.45 \rangle & \langle 0.45, 0.3 \rangle & \langle 0.3, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0 \rangle \\ C_4 & \langle 1.0, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 0.6 \rangle & \langle 0.6, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0 \rangle \\ C_5 & \langle 0.5 \rangle & \langle 5, 10 \rangle & \langle 10, 25 \rangle & \langle 25, 300 \rangle & \end{bmatrix}$$

节域矩阵 R_p 是根据岩质边坡稳定性等级评价标准全体 (N_1, N_2, N_3, N_4, N_5) 对应的取值范围而定的. 根据表3, 待评岩质边坡样本对应的物元矩阵也可求出.

$$R_p = \begin{bmatrix} \{ N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 \} & \\ & C_1 \langle 100, 0 \rangle \\ & C_2 \langle 200, 0 \rangle \\ & C_3 \langle 1.0, 0 \rangle \\ & C_4 \langle 1.0, 0 \rangle \\ & C_5 \langle 0, 300 \rangle \end{bmatrix}$$

表4 全部岩质边坡样本稳定性等级综合评价结果

| $\overline{K_j}(P)$ | N_1 (稳定) | N_2 (基本稳定) | N_3 (稳定性差) | N_4 (不稳定) | N_5 (极不稳定) | J^* | 等级 j_0 |
|---------------------|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------|----------|
| 三级 | 0 | 0.257 | 0.867 | 1.000 | 0.896 | 3.839 | N_4 |
| 二级 | 0 | 0.848 | 1.000 | 0.751 | 0.932 | 3.501 | N_3 |
| 一级 | 0 | 1.000 | 0.721 | 0.417 | 0.772 | 3.330 | N_2 |

从表4可以看出,采用层次分析和物元模型综合方法得到的结果与现场调查的边坡稳定情况基本一致,说明了该方法的科学性、适用性.从输出的级别偏向变量特征值 j^* 可以更准确地评判岩质边坡体的实际等级,从而为经济、合理地防护与整治岩质边坡质量带来的工程问题提供更科学的依据.

$$R_x = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 \\ \text{样本1} & 40 & 45 & 0.25 & 0.40 & 20 \\ \text{样本2} & 70 & 90 & 0.40 & 0.35 & 20 \\ \text{样本3} & 77 & 88 & 0.58 & 0.45 & 5 \end{bmatrix}$$

3.2 确定岩质边坡各评价指标对应权系数

考虑岩质边坡各评价指标对岩质边坡稳定性的影响程度,并结合专家意见,得判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 & 3 & 2 & 1 \\ 4 & \frac{1}{3} & 1 & 4 & 1 \\ 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

用幂法计算判断矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max} = 5.407$ 及其对应的归一化处理后的特征向量为 $W = [0.070 \quad 0.330 \quad 0.257 \quad 0.132 \quad 0.211]$.

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} = 0.091 < 0.1$, 故认为层次分析排序的结果有满意的一致性,即权系数的分配是合理的. 否则,需按照前述方法重新进行计算.

3.3 岩质边坡等级综合关联度计算以及等级评定

本文编制了基于层次分析法和物元模型的综合评估程序 AHP-MEM,得到岩质边坡样品对应的稳定性评定结果,列于表4所示.可以得到岩质边坡样本关于各质量等级的综合关联度 $\overline{K_j}(P)$ 、评价等级 j_0 .

4 小结

1) 采用层次分析和物元模型综合方法进行岩质边坡等级综合评判是合理的、可行的,同时也为类似工程问题的综

合评判提供了一种新的思路和手段.

2) 层次分析法通过各元素重要性之间的两两比较来确定权重显然要比一次性确定所有因素的权重的方法易于把握,因而结果也更为准确,一定程度上克服了主观、人为影响因素过多的缺陷.

3) 级别偏向变量特征值 j^* 对于更加准确、科学地预测岩质边坡质量带来的工程问题以及采取相应经济、合理的支护加固措施提供了更可靠的依据.

参考文献:

- [1] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [2] 刘沐宇. 基于范例推理的边坡稳定性智能评价方法研究[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2001.
- [3] 陈良顺. 基于梯形灰类白化函数的聚类分析[J]. 矿冶工程, 2000, 20(1).
- [4] 马洪生, 胡卸文. 神经网络在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(1).
- [5] 王锦国, 周志芳, 袁永生. 可拓评价方法在环境质量综合评价中的应用[J]. 河海大学学报, 2002, 30(1).

The Appraise Method of Mass Quality of the High Rock Slope Based on Matter Element Model

CHEN Yu-liang¹, WANG Hui-yong², RUI Yong-qin³

(1. School of Engineering & Architecture, East China Jiaotong University Nanchang 30013; 2. Jiangsu Communications Science Research Academic Road and Bridge Design Institute Nanjing 210017; 3. School of Road Engineering, Changsha University of Science & Technology Changsha 410076, China)

Abstract: As for earlier hazard of rock slope freeway construction, matter element model based on AHP is applied to build rock slope stability analysis method. Typical rock slope synthetic stability is analyzed by engineering examples.

Key words: matter element model; rock slope; AHP; slope stability