

三峡永久船闸高陡边坡 整体稳定性的多因素综合评价

苏怀智^{1,2}, 吴中如¹, 戴会超², 温志萍³

(1. 河海大学 水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 440113;
3. 南京工程学院 计算机系, 江苏 南京 210013)

摘要: 三峡永久船闸高陡边坡工程是一个开放的复杂巨系统, 对其整体稳定性的评价需要综合考虑地质资料、数值分析计算成果以及监测数据等多源信息, 基于多因素优化融合的思想, 采用定性与定量综合集成的方法。基于系统工程的观点, 借助可拓学理论, 依据菱形思维模式和物元的可拓性, 建立了三峡永久船闸高陡边坡工程整体稳定性的多指标多层次综合评价体系。采用物元的概念将研究对象、评价指标和量值结合为一体, 应用物元变换建立整体稳定性评价的物元模型, 从而实现对三峡永久船闸高陡边坡整体稳定性的质与量的综合描述, 并结合其随时间的变化趋势, 可以完成对高陡边坡整体稳定性的三维动态评估。另外应用优化理论, 进行了评价指标的主、客观组合赋权。经计算得出边坡整体稳定性属1级, 特征值为1.86, 介于优与良之间。同时, 所述方法亦可应用于大坝健康性态整体评价、岩体质量评估、大坝老化评估等其他领域。

关键词: 岩石力学; 高陡边坡; 整体稳定性; 可拓理论; 综合评价; 三峡永久船闸

中图分类号: TU 452; TV 223.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)01-0023-10

MULTIPLE-INDEX ASSESSMENT FOR GLOBAL STABILITY OF HIGH-STEEP ROCK SLOPE OF THE THREE GORGES PROJECT PERMANENT SHIPLOCK

SU Huai-zhi^{1,2}, WU Zhong-ru¹, DAI Hui-chao², WEN Zhi-ping³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation, Yichang 440113, China;
3. Department of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: It is a controversial problem to assess comprehensively the global stability of high-steep rock slope of the Three Gorges Project permanent shiplock. The information on slope stability includes geological data, results of numerical analysis, measuremental data, experiential knowledge, and so on. Therefore, a suitable analytical methodology of system engineering integrating the comprehensive qualitative and quantitative information is needed. A multi-index system and model, which is able to evaluate comprehensively the global stability of high-steep rock slope by using extension theory, is proposed. The qualitative grade and quantitative degree for the global stability of high-steep rock slope by the index system and model can be obtained. The slope stability can be assessed dynamically. Analytic Hierarchy Process method has been used to compute the subjective weights of evaluation indexes. The objective weights can be obtained by calculating the relational degree between evaluation indexes and grades with extension theory. By combination of the views of both the subjective and

收稿日期: 2004-01-13; **修回日期:** 2003-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50139030); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 河海大学科技创新基金(2003411443)

作者简介: 苏怀智(1973-), 男, 博士, 1996年毕业于河海大学, 现任讲师, 同时在中国长江三峡工程开发总公司做岩土工程方向的博士后, 主要从事水工结构工程和岩土工程安全监控方面的教学和科研工作。E-mail: suhz@163.com。

objective weights, an optimization theory has been used to calculate the weights for index evaluation. The results have shown that for the high-steep rock slope of the Three Gorges Project permanent shiplock its grade and degree of global stability are 1 and 1.86, respectively. Then the global stability can be ranged between excellent and good. The numerical example has shown that the proposed method is feasible and effective and the evaluation results are reasonable. In addition, this method can also be used to assess dam health, rock quality, and dam aging.

Key words :rock mechanics ;high-steep rock slope ;global stability ;extension theory ;comprehensive evaluation ; Three Gorges Project permanent shiplock

1 引言

三峡工程永久船闸为双线五级船闸,由上游引航道、闸室段、下游引航道组成,总长 6 422 m,是世界上规模最大的船闸工程。其中,上游引航道 2 113 m,主体段 1 607 m,下游引航道 2 722 m。整个闸室段均在前震旦系花岗岩山体中开挖修建,开挖后形成南、北两侧高陡边坡。边坡一般高度为 100~160 m,最高达 170 m,闸室边墙为 50~70 m 的直立坡,两线间保留宽为 50~60 m 的岩体中隔墩。船闸部位岩石强度高、整体性好,主要地质构造面与船闸轴线的交角均大于 45°。为了保证高陡边坡的稳定并限制其变形,除施工期及时进行锚杆和喷混凝土支护外,边坡设有约 3 600 余束 300 t 级的预应力锚索和约 10 万根高强系统结构锚杆。在南、北两侧高边坡岩体内,各布置了 7 层排水洞,在中隔墩和两侧边墙岩体内各布置了 1 条排水隧洞。为监测船闸施工期和运行期的安全,永久船闸设置了大量的安全监测系统,包括地面变形精密三角测量系统、地下水观测系统、岩体深部变形观测仪埋设系统、锚杆锚索应力-应变观测系统、爆破振动影响和岩体松弛监测等。

三峡永久船闸高陡岩石边坡兼有突出的高度、陡度与长度,开挖形态复杂,其长期稳定性是运营管理部门需要高度关注的一个重要问题。为此,工程设计、施工、管理方面和各高等院校、科研单位合作攻关,在地质勘测、岩石力学试验、工程设计、监测、监理、施工等方面开展了大量科研工作,获得了大量的有关三峡永久船闸高陡边坡工程稳定的经验、数值分析和计算成果以及监测数据等定性和定量信息,为科学评价三峡永久船闸高陡边坡稳定性提供了宝贵的信息资源和依据。但三峡永久船闸高陡边坡工程是一个开放的复杂巨系统^[1,2],其稳定性是质与量的统一体。在进行高边坡稳定性综合评价的过程中,既要考虑量的变化,也要考虑质

的变化;既要依据专家经验和工程对比等定性知识,又要利用数值分析和计算以及原型监测数据等定量信息。不仅要考虑单个项目的评价,而且更重要的是,要考虑不同项目所反映出的边坡工程整体稳定性的综合评价。这是一个多指标、多层次递推过程。如何充分利用具有多样性、可变性、不确定性(随机性、模糊性)和不完全性特征的多源信息,实现对三峡永久船闸高陡边坡稳定性的科学评价,显然是一个较为复杂的矛盾问题。多种数学方法与传统方法相融合相渗透,是目前解决岩石边坡稳定性综合评价问题的一个新思路。文[3~5]将建立在不确定性概念之上的概率方法与定值方法相结合,使它们互为补充、相互映证,克服了安全系数法没有充分考虑岩土体中实际存在的不确定性和相关性,如材料参数(摩擦系数、粘聚力、容重)的变异性、相关性,孔隙水压力及外荷载的波动性,计算模型的不确定性等缺点;文[6,7]将边坡工程存在的随机性与模糊性融合在一起,提出了边坡模糊可靠度和模糊可靠性指标的概念及计算方法;文[8]根据影响边坡稳定性的内在因子和外在因子,运用模糊数学的基本原则和方法,建立了边坡稳定性分析评价的综合指标模型,得到了边坡稳定性等级分类指数,据此,可以判断出边坡的稳定性情况;文[9,10]针对传统方法对于各因素复合影响及之间的主次关系难以确定的不足,引入灰色系统的灰色关联分析理论,通过边坡稳定性的灰关联分析,确定进行边坡稳定性评价时应着重考虑的影响因素。这些新理论和新方法在边坡工程稳定性评价中的运用研究,具有扬长避短的功效,对提高评价过程智能化水平起到了极大的帮助作用^[11~13]。

针对三峡永久船闸高陡边坡自身特点,基于立足全局的系统观,应用可拓理论^[14~16],通过对工程整体性评价物元可拓性的研究,从物元分析的观点出发,将与工程稳定性相关的每个研究对象用一个信息物元来进行表达,而多个研究对象按一定的结构形成信息物元系统(高陡边坡整体稳定性综合评

价体系), 信息的处理过程则抽象为物元变换, 并通过关联函数刻画研究对象具有某种特征的程度, 从而实现三峡永久船闸高陡边坡工程整体稳定性从定性到定量的综合集成评价。

2 边坡整体稳定性综合评价体系

岩石高边坡作为一个开放的复杂巨系统, 可以用多个指标和环节刻画其稳定性^[17]。归纳来说, 可以分为岩质基础、工程措施和工程效果 3 个环节, 每个环节又可以由多个指标来反映, 如岩质基础可以由地质结构、质量参数等几个指标进行刻画, 而地质结构又可以由地质构造、岩体结构等指标来描述。依次开拓直至最底层, 从而建立完整的边坡工程整体稳定性综合评价指标体系, 如图 1 所示。

3 边坡整体稳定性综合评价机理

对岩石高边坡整体稳定性的综合评价是一个从基层到顶层(第 1 层)递推运算的过程。设 X 为评价对象, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为评价对象的评价指标集, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 为权重集, $N = (N_1, N_2, \dots, N_m)$ 为评价等级集(备择集), 将各个指标特征值按一定的评价模型 $f(\cdot)$ 递归运算为能反映评价对象特性的性能值 S , 根据某种识别准则 $R(\cdot)$, 判别评价对象应属于哪一评价类 \tilde{N} 。评价过程示意如图 2 所示, 这一评价过程适合于综合评价体系的每一层评价。

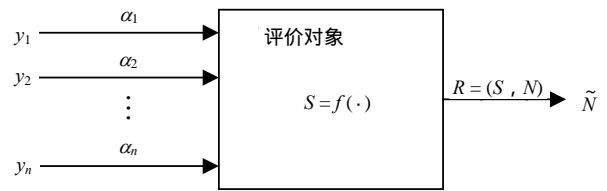


图 2 岩石边坡工程稳定性综合评价机理示意图
Fig.2 Mechanism of comprehensive assessment for global stability of rock slope engineering

(1) 稳定性评价指标备择集

对于各评价指标, 需规定其备择集, 亦即根据规范、实验数据、工程类比数据以及专家经验等, 对评价对象划分出若干个不同的等级, 确定各等级的数值范围, 并对各等级赋予简明的评语。为了与文[16]进行成果对比分析, 统一采用 5 级评分标准: $N = (N_1, N_2, N_3, N_4, N_5) = (\text{优}, \text{良}, \text{中等}, \text{差}, \text{极差})$ 。

(2) 稳定性评价指标权重集

在多层次、多指标的评价体系中, 由于各评价指标对边坡稳定性的影响程度不同, 并具有转异特征, 因此, 它们对整个稳定性综合评价的贡献也不同。为此, 应当分别确定同一层次中各指标在评价体系中对于上层研究对象的相对重要性——赋权, 然后, 将各指标的权重与其实际性状综合考虑, 才能得出对其上层研究对象的合理评价, 如此逐步递归, 直至得到整体稳定性的综合评价结果。

(3) 稳定性评价物元模型

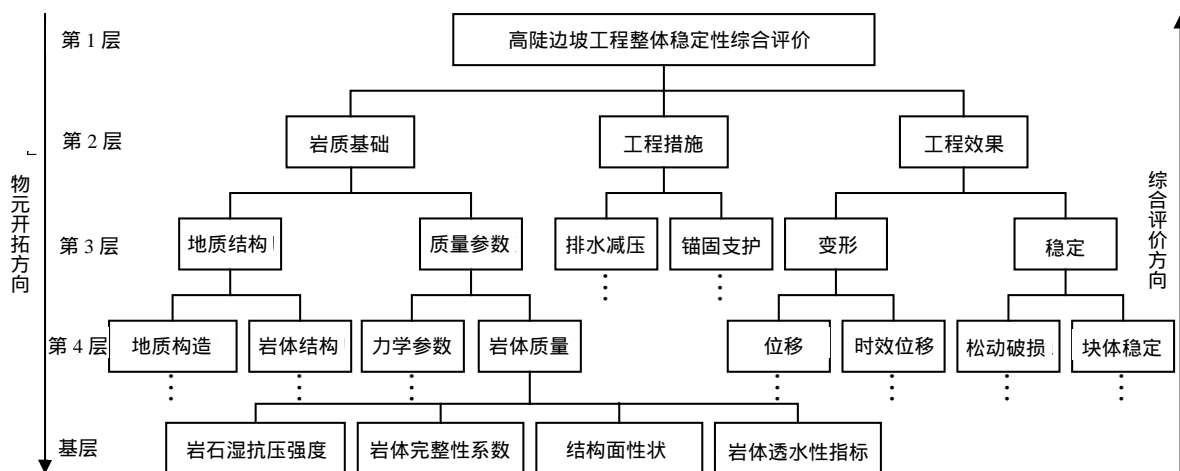


图 1 岩石边坡工程整体稳定性综合评价指标体系

Fig.1 Index system of comprehensive assessment for global stability of rock slope engineering

利用可拓学实现图 1 中某研究对象综合评价的基本思路：首先确定各评价指标备择集，再将待评物元的指标特征值代入各等级的集合中进行多指标评价，评价的结果按它与各等级集合的关联度进行比较。关联度越大，它与某等级集合的符合程度愈佳。它既不同于经典数学所描述的确定性概念，也不同于模糊数学所描述的模糊性概念；它描述的是研究对象的可变性，把是与非的定性描述发展为定量描述。

4 边坡稳定性综合评价模型

岩石边坡稳定性综合评价的依据是稳定性评价物元的可拓性，核心是可拓域的确定，实现手段是可拓域中元素的物元变换。

4.1 稳定性评价物元

以边坡稳定性综合评价体系中研究对象为事物，评价指标为特征，评价指标的取值为特征值，边坡稳定性评价物元可描述为

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} N, C_1, V_1 \\ C_2, V_2 \\ \vdots \\ C_n, V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{对象, 评价指标 } I_1, I_1 \text{ 特征值 } V_{I_1} \\ \text{评价指标 } I_2, I_2 \text{ 特征值 } V_{I_2} \\ \vdots \\ \text{评价指标 } I_n, I_n \text{ 特征值 } V_{I_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

物元作为可拓学的逻辑细胞，把质与量有机结合起来，将事物 N (如边坡工程稳定性)、事物的特征 C (如岩质基础、工程措施、工程效果等) 及相应的量值 V (指标特征值) 作为一个整体 $R = (N, C, V)$ 来研究，运用定性定量相结合的方法去解决矛盾问题。因而，物元的引进为高陡边坡整体稳定性综合评价问题的形式化解决提供了可行的工具。

(1) 基于物元可拓性的边坡整体稳定性的分层次多指标综合评价体系

着眼于系统工程建立的边坡工程整体稳定性综合评价指标体系，是边坡工程稳定性物元发散性的重要体现。而实际的评价工作，逆向进行，逐层收敛，最终完成整体稳定性的综合评价。这种先发散后收敛的菱形思维方式，能很好地描述人们的创造性思维过程，可以将综合评价过程形式化、程序化和准确化，使得用计算机模拟人的创造性思维过

程成为可能。

(2) 利用物元的发散性实现岩石边坡工程稳定性的多角度综合刻划

如图 1 所示的分层次多指标综合评价体系中紧邻的上下层对应元素组成一个多维物元，充分体现了一物多征的特征。通过对下层多个特征的综合分析，运用单指标和多指标关联函数，可以刻画其对上层对象单一和综合影响的程度，从而全面、客观地实现对上层对象所属等级和程度的定性与定量的综合描述。

4.2 点综合评价模型

取边坡整体稳定性综合评价体系中某一研究对象(如岩体质量)，仅依据相邻下层对应的评价指标进行综合评价，称为点综合评价。它是整体综合评价的基础。

(1) 经典域、节域、待评物元

经典域物元

根据边坡整体稳定性综合评价体系中各评价指标的备择集，可得边坡稳定性综合评价体系中研究对象的经典域物元：

$$R_{0j} = (N_{0j}, C_i, V_{0ij}) = \begin{bmatrix} N_{0j}, C_1, V_{01j} \\ C_2, V_{02j} \\ \vdots \\ C_n, V_{0nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j}, C_1, \langle a_{01j}, b_{01j} \rangle \\ C_2, \langle a_{02j}, b_{02j} \rangle \\ \vdots \\ C_n, \langle a_{0nj}, b_{0nj} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： N_{0j} 为研究对象(如岩体质量)等级 ($j = 1, 2, \dots, m$)， m 为所划等级数，取 $m = 5$ ； C_i 为边坡稳定性综合评价体系中研究对象评价指标 ($i = 1, 2, \dots, n$)； n 为边坡稳定性综合评价体系中研究对象评价指标个数； $\langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ 为 N_{0j} 关于评价指标 C_i 所规定的量值范围，即各等级关于对象的评价指标所取的经典域。

节域物元

$$R_p = (P, C_i, V_{Pi}) = \begin{bmatrix} P, C_1, V_{P1} \\ C_2, V_{P2} \\ \vdots \\ C_n, V_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P, C_1, \langle a_{P1}, b_{P1} \rangle \\ C_2, \langle a_{P2}, b_{P2} \rangle \\ \vdots \\ C_n, \langle a_{Pn}, b_{Pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： P 为研究对象等级的全体； $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 为边坡稳定性综合评价体系中研究对象评价指标 C_i 的所有取值范围，即 P 的节域。

待评物元

对边坡稳定性综合评价体系中研究对象 N (如岩体质量)，把某时期(或时刻) t 各评价指标实际状态数值描述为

$$R_t = (N(t), C_i, v_i(t)) = \begin{bmatrix} N(t), C_1, v_1(t) \\ C_2, v_2(t) \\ \vdots \\ C_n, v_n(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $N(t)$ 为边坡稳定性评价体系中的待评对象， $v_i(t)$ 为某时期(或时刻) t 评价指标 C_i 的取值。

式(4)所示物元称为边坡稳定性评价体系中研究对象 N 的待评物元。

(2) 单指标关联度

边坡稳定性综合评价体系中待评对象 N 的第 i 个评价指标关于等级 j 的关联度为

$$K_j(v_i(t)) = \begin{cases} \frac{\rho(v_i(t), V_{0ij})}{\rho(v_i(t), V_{pi}) - \rho(v_i(t), V_{0ij})} & (\rho(v_i(t), V_{pi}) - \rho(v_i(t), V_{0ij}) \neq 0) \\ -\rho(v_i(t), V_{0ij}) - 1 & (\rho(v_i(t), V_{pi}) - \rho(v_i(t), V_{0ij}) = 0) \end{cases} \quad (5)$$

而

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

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

(3) 多指标综合关联度

边坡稳定性综合评价体系中待评对象 N 关于等级 j 的关联度为

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(v_i) \quad (8)$$

式中： α_i 为第 i 个评价指标的权重分配系数，其满足 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。

(4) 等级评定

若

$$K_{j_0}(N) = \max_j(K_j(N)) \quad (9)$$

则边坡稳定性综合评价体系中待评对象 N 属于等级 j_0 。

令

$$\bar{K}_j(N) = \frac{K_j(N) - \min_j(K_j(N))}{\min_j(K_j(N)) - \min_j(K_j(N))} \quad (10)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_j(N)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N)} \quad (11)$$

则称 j^* 为 N 所属等级的特征值，表示待评对象属于等级 j_0 的程度。例如， $j_0 = 3$ ， $j^* = 3.4$ ，表示研究对象 N 属于 3 级偏向 4 级(严格说来应属于 3.4 级)。

(5) 点综合评价流程

实现边坡稳定性点综合评价的流程见图 3。

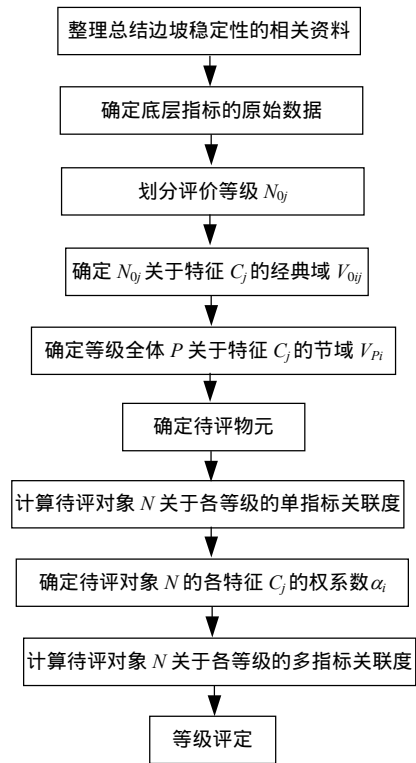


图 3 边坡工程稳定性点综合评价流程

Fig.3 Flowchart of point comprehensive assessment for slope stability

4.3 整体稳定性综合评价模型

依据边坡整体稳定性综合评价体系，按照上述评价步骤对边坡稳定性综合评价体系中底层各对象逐个评价后，再进行上层评价，最后收敛至顶层，从而实现边坡整体稳定性的综合评价。

4.4 整体稳定性动态评价模型

按上述边坡稳定性综合评价原理，对岩石边坡工程在 T 个不同时期(或时刻)的稳定状况进行分析，得到了 T 个不同时期(或时刻)的边坡工程稳定性等级和等级特征值，分别记为 $j_0(t)$ ， $j^*(t)$ ($t=1, 2, \dots, T$)，则可分析 $j_0(t)-t$ ， $j^*(t)-t$ 的变化趋势。若 $j_0(t)$ 的等级很高，说明该边坡的稳定性差，应引起高度重视，及时采取相关加固措施。若 $j_0(t)$ 等级较高，且 $j^*(t)$ 随着时间 t 的推移而逐渐增大(趋坏型)，说明该边坡的稳定性在变坏，应加强监测，提高警戒水平；若 $j^*(t)$ 随着时间 t 的推移基本持平(稳定型)或逐渐减小(趋好型)，说明该边坡基本稳定或向好的方向发展；若 $j_0(t)$ 等级较低， $j^*(t)$ 也未随着时间 t 的推移而逐渐增大，说明该边坡稳定状况良好。

5 组合赋权法

目前，关于指标权重的确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法 2 类。主观赋权法是根据各指标在评价体系中的地位、作用，依据决策者主观重视程度进行赋权的方法，这类赋权方法在传统中应用很多，如层次分析法(AHP)^[17]；客观赋权法是各个指标根据一定的规则进行自动赋权的方法^[18]。作者采用关联函数法来实现对权值的客观量化。主、客观赋权法均有一定的局限性，基于某种最优化准则将主、客观赋权法进行组合，是实现指标权重既包含主观信息，又包含客观信息的有效途径。

(1) 主观权

确定评价指标权值的层次分析法(AHP)，源自人们对于岩石边坡工程稳定性综合评价指标体系中每一层次各评价指标的相对重要性给出的判断。这些判断通过引入合适的标度(如 1~9 比率标度)用数值表示出来，从而形成专家判断矩阵。该矩阵表示对于上层某研究对象，本层中与之有关的评价指标之间相对重要性的比较。由判断矩阵，可计算出矩阵的最大特征根及其对应的特征向量，前者用于一致性检验，后者即为某一层次评价指标对于上一层研究对象的相对重要性权值 α_i ，称为主观权。

(2) 客观权

事实上，各指标的相对重要性是随着过程的进行而不断变化的，也就是说，是随着指标之间的组态(或水平)变化而变化的。从边坡工程稳定的角度考虑，指标的实际性态值越恶化，该指标对边坡工程的安全影响越不利。可拓理论中的关联函数是用

来计算点和一个区间的关联程度的定量工具。通过将评价指标特征值的分级，运用关联函数，可以定量地刻划指标特征值对边坡工程稳定性各等级的隶属程度，从而动态地确定各指标随着实际情况的变化而对边坡工程稳定性影响贡献量的变化。利用可拓理论中的关联函数确定各指标在综合评价体系中的客观权 α_{2i} 的具体过程如下：

评价指标简单关联度

根据某研究对象的经典域、节域和待评物元，设 $v_i \in V_{P_i}$ (节域) ($i=1, 2, \dots, n$)，则研究对象各评价指标关于各评价等级的简单关联度为

$$K_{ij}(v_i, V_{0ij}) = \begin{cases} \frac{2(v_i - a_{0ij})}{b_{0ij} - a_{0ij}} \left(v_i < \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \right) \\ \frac{2(b_{0ij} - v_i)}{b_{0ij} - a_{0ij}} \left(v_i > \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \right) \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$) (12)

各评价指标的最大关联度

研究对象各评价指标的最大关联度 $K_{ij\max}$ 为

$$K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max}) = \max_j (K_{ij}(v_i, V_{0ij})) (i=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

由 $K_{ij\max}$ 确定相应级别 j_{\max} 。

确定各评价指标的相对权重 α_i''

如果评价指标 i 的数据落入的等级越大，该指标应赋以越大的权重，则 α_i'' 取

$$\alpha_i'' = \begin{cases} j_{\max} [1 + K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max})] & (K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max}) \geq 0.5) \\ 0.5j_{\max} & (K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max}) < 0.5) \end{cases} \quad (14)$$

反之，如果评价指标 i 的数据落入的等级越大则该指标应赋以越小的权重，则 α_i'' 取

$$\alpha_i'' = \begin{cases} (m - j_{\max} + 1)[1 + K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max})] \\ (K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max}) - 0.5) \\ 0.5(m - j_{\max} + 1) & (K_{ij\max}(v_i, V_{0ij\max}) < 0.5) \end{cases} \quad (15)$$

式(12)~(15)中各符号的含义同式(1)~(11)。

从边坡稳定的角度考虑，评价指标 i 的数据落入的等级越大，该指标对边坡稳定的影响越是不利，应赋以越大的权重，所以通常用式(14)来计算权重。

各评价指标权重归一化

根据

$$\alpha_{2i} = \alpha_i'' / \sum_{i=1}^n \alpha_i'' \quad (16)$$

对各指标权重 α_i'' 归一化, 得到研究对象各评价指标的客观权 α_{2i} 。

(3) 组合权

假设采用 L 种方法确定研究对象评价指标 i 的权重, 记对指标 i 采用第 l 种方法确定的权重为 α_{li} ($l = 1, 2, \dots, L$)。同时, 假设组合权重中第 l 种方法的加权系数为 w_l ($l = 1, 2, \dots, L$), 并且满足归一化约束条件:

$$\sum_{l=1}^L w_l = 1 \quad (17)$$

进一步记评价指标 i 的组合权重结果为 α_i , 显然, α_i 对群组权重值 α_{li} 的逼近程度愈近愈好。因此, 可取最优化准则为

$$\min J_i = \sum_{l=1}^L w_l (\alpha_i^p - \alpha_{li}^p)^2 = 1, \quad p \neq 0 \quad (18)$$

由式(17), (18)可推知评价指标权重组合模型为

$$\alpha_i = \left(\sum_{l=1}^L w_l \alpha_{li}^{p^2} \right)^{1/p} \quad (19)$$

式中: p 为权重组合模型的可调参数, $p \neq 0$ 。

6 工程应用

应用上述理论和方法, 对三峡永久船闸高陡边坡工程整体稳定性进行综合分析评价。实例中的部分原始数据来自于文[17, 19~33], 由于篇幅所限, 相关资料整理分析未给出, 且仅给出部分计算成果, 另外未进行动态评估。

6.1 点综合评价

以岩体质量评价为例, 运用点综合评价模型, 以岩体质量为研究对象, 岩石单轴湿抗压强度 R_{cw} 、岩体完整性系数 K_v 、结构面性状 J_s 和岩体透水性指标 w_n 等作为评价指标。

(1) 岩体质量评价备择集

将岩体质量划分为 5 个等级, 通过规范、岩石力学分析计算、工程类比、实验资料以及专家经验打分等方式, 确定各评价指标的分级标准和实际状况, 如表 1, 2 所示。

(2) 确定岩体质量经典域、节域、待评物元

经典域物元

$$R_0 = \begin{bmatrix} \text{岩体质量}(N) & N_1 & N_2 \\ R_{cw}(C_1) & [90, 110] & [75, 90] \\ K_v(C_2) & [0.75, 1.0] & [0.55, 0.75] \\ J_s(C_3) & [25, 30] & [20, 25] \\ w_n(C_4) & [80, 100] & [20, 25] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} N_3 & N_4 & N_5 \\ [50, 75] & [30, 50] & [0, 30] \\ [0.35, 0.55] & [0.15, 0.35] & [0, 0.15] \\ [15, 20] & [5, 15] & [0, 5] \\ [40, 50] & [20, 40] & [0, 20] \end{bmatrix}$$

节域物元

$$R_p = \begin{bmatrix} P, C_1, [0, 110] \\ C_2 [0, 1.0] \\ C_3 [0, 30] \\ C_4 [0, 100] \end{bmatrix}$$

待评物元

$$R_t = \begin{bmatrix} \text{岩体质量}N(t), C_1, 105 \\ C_2 0.87 \\ C_3 22 \\ C_4 30 \end{bmatrix}$$

(3) 计算待评岩体质量的单指标关联度和多指标综合关联度

采用层次分析法和简单关联函数法的优化组合得到岩体质量各评价指标权值后, 根据上述给出的经典域、节域、待评物元, 分别用式(5)~(7)和式(8)计算待评岩体质量关于各等级的单指标关联度和多指标综合关联度, 计算结果见表 3, 4。

(4) 确定待评岩体质量的等级和等级特征值

根据式(9)~(11)确定了岩体质量的等级为 1 级, 等级特征值为 1.28, 说明该岩体质量介于优与良之间。

6.2 边坡工程整体稳定性综合评价

应用与上述相似的步骤, 完成同层其他对象的评价后, 再按从底层到顶层逐层递归的方式, 最终得到整体稳定性的综合关联度、稳定性等级及特征值。部分结果见表 4。从表 4 可以看出, 三峡永久船闸高陡边坡工程整体稳定性安全度高, 稳定级别介于优与良之间, 且偏向于很稳定。另外, 与文[17]的评价结果对比, 可以看出, 2 种方法得出的结论基本一致。而等级特征值可以反映出整体稳定性偏向另一等级的程度, 因此, 结论更加合理、可信。

表1 岩体质量分级
Table 1 Grade of rock quality

岩体质量等级标准	单轴湿抗压强度 /MPa	完整性系数	结构面性状	透水性指标	评语
			评分	/%	
N_1 (优)	90 ~ 110	0.75 ~ 1.00	25 ~ 30	80 ~ 100	岩体强度高, 结构完整, 裂面新鲜或轻微风化, 平直稍粗为主, 闭合无充填, 不连续, 极微透水
N_2 (良)	75 ~ 90	0.55 ~ 0.75	20 ~ 25	50 ~ 80	岩体强度高, 结构较完整, 裂面大部分轻微风化, 平直稍粗为主, 不连续, 微 ~ 弱透水
N_3 (中等)	50 ~ 70	0.35 ~ 0.55	0.15 ~ 0.35	0 ~ 0.15	岩体强度中等, 结构较破碎, 裂面平直稍糙、起伏粗糙均可见, 连续性好, 弱 ~ 较强透水
N_4 (差)	30 ~ 50	0.15 ~ 0.35	5 ~ 15	20 ~ 40	岩体强度低, 结构破碎, 碎块夹碎屑, 性状较差, 中 ~ 较强透水(局部微弱)
N_5 (极差)	0 ~ 30	0 ~ 0.15	0 ~ 5	0 ~ 20	岩体强度很低, 破碎散体结构, 碎屑夹泥, 性状极差, 透水性极不均匀

表2 岩体质量评价指标实际状况
Table 2 Actual values of assessment index for rock quality

方法	单轴湿抗压强度/MPa	完整性系数	结构面性状/评分	透水性指标/%
本文	105	0.87	22	30
文[17]	100 ~ 110	0.75	稍张, 平直稍粗, 无充填, 少数为岩屑	滴水

表3 岩体质量关于各等级的单指标关联度
Table 3 Single-index associated function value on rock quality

指标	K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}	K_{5i}
单轴湿抗压强度	4.000 0	- 0.750 0	- 0.857 1	- 0.916 7	- 0.937 5
岩体完整性系数	12.000 0	- 0.480 0	- 0.711 1	- 0.800 0	- 0.847 1
结构面性状	- 0.272 7	0.333 3	- 0.200 0	- 0.466 7	- 0.680 0
岩体透水性指标	- 0.625 0	- 0.400 0	- 0.250 0	0.500 0	- 0.250 0

注: $i = 1, 2, 3, 4$ 。

表4 研究对象的可拓评价结果
Table 4 Assessment result of evaluated objects in system

对象	综合关联度					等级 j_0	等级特征值 \hat{j}^*	文[17]的评价		评语
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5			分值	等级	
岩体质量	3.775 6	- 0.324 2	- 0.504 6	- 0.420 8	- 0.678 6	1	1.28	0.87	B^+	质量好
岩质基础	- 0.217 3	0.450 0	- 0.420 0	- 0.637 5	- 0.792 9	2	2.05	0.86	B^+	岩石基础好, 说明岩石工程的先天条件好
工程措施	0.100 0	0.250 0	- 0.500 0	- 0.687 5	- 0.821 4	2	1.86	0.86	B^+	工程措施设计得当, 施工符合要求, 在工程量上留有高的储备
工程效果	0.203 1	- 0.032 4	- 0.440 0	- 0.650 0	- 0.800 0	1	1.85	0.85	B^+	工程效果好, 监测结果显示稳定性高
边坡整体稳定性	0.048 3	- 0.040 0	- 0.360 0	- 0.520 0	- 0.616 0	1	1.86	0.86	B^+	整体稳定, 质量好, 安全度高

7 结 语

三峡永久船闸高陡边坡的规模和难度是空前

的, 既具有常见的岩土工程的复杂性和不确定性, 又要满足结构工程的严格要求, 尤其是变形和稳定的要求。对其进行整体稳定性综合评价是一个多层次多指标的复杂的系统分析工程。应用可拓理论,

在充分应用定性与定量的源信息的基础上,研究了评价指标体系、评价模型等关键技术,以期实现对三峡永久船闸岩石高陡边坡稳定性整体的、动态的综合评价。经实例分析,所提方法分析得到的结论是合理的。

(1) 多层次多指标的综合评价体系是物元可拓性和菱形思维方法的集中体现,而这两者是可拓学用来解决岩石高边坡工程整体稳定性综合评价这一矛盾问题的依据和思路。

(2) 在整体稳定性的可拓评价中,将研究对象、评价指标和指标特征值结合成一物元,以物元表述的物元关系式建立高陡边坡稳定性评价的物元模型,既可以利用物元的可拓性进行定性的分析,又可以利用可拓集合论,通过关联函数进行定量计算,实现稳定性等级归属(定性)和归属程度的量化描述(定量),真正实现定性与定量的综合集成描述。同时可根据对等级特征值随时间变化的分析,实现对稳定性的动态评价和预测。

(3) 通过层次分析法和可拓关联函数法的组合,从主、客观 2 个角度,实现了对评价指标的赋权,使得评价指标的权值更加合理。

(4) 实例表明,利用可拓理论对岩石高陡边坡整体稳定性进行综合评价是合理的、可行的,且该方法具有一定的普适性,也可应用于大坝安全评价、大坝老化评估等涉及多指标评价的领域。但可拓学分析作为一种方法,必须渗透到各应用领域才有实用价值。

参考文献(References):

- [1] Zhang Chuhan. Numerical Modeling of Concrete Dam-Foundation-Reservoir System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [2] 姚兆明. 岩石工程系统理论在边坡稳定性评价中的应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, 23(4): 23-27.(Yao Zhaoming. Application of rock engineering system theory in the slope stability estimate[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 23(4): 23-27.(in Chinese))
- [3] 罗文强, 龚珏. Rosenblueth 方法在斜坡稳定性概率评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 232-235.(Luo Wenqiang, Gong Jue. Application of Rosenblueth moment estimation method into probabilistic analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 232-235.(in Chinese))
- [4] 汪汉生, 赵丰功. 边坡稳定计算中的可靠度分析[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(1): 153-156.(Wang Hansheng, Zhao Fengong. Reliability analysis of slope stability[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(1): 153-156.(in Chinese))
- [5] 彭小云, 高德彬, 毕选生等. 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.(Peng Xiaoyun, Gao Debin, Bi Xuansheng, et al. Probabilistic analysis of high and steep slope stability[J]. Journal of Chang an University (Earth Science), 2003, 25(3): 67-70.(in Chinese))
- [6] 贾厚华, 贺怀建. 边坡稳定模糊随机可靠度分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 657-660.(Jia Houhua, He Huaijian. Analysis of fuzzy-random reliability of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 657-660.(in Chinese))
- [7] Dodagoudar G R, Venkatachalam G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27(2): 101-115.
- [8] 沈良峰, 张永红, 廖继原. 边坡稳定性分析预测的综合指标模型[J]. 建筑科学, 2003, 19(3): 30-33.(Shen Liangfeng, Zhang Yonghong, Liao Jiyan. Comprehensive guideline model for slope stability analysis and forecasting[J]. Building Science, 2003, 19(3): 30-33.(in Chinese))
- [9] 王晓颖, 陈宁生, 梁岳伟. 都江堰周家院场区边坡稳定性影响因素的灰色关联分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 285-289.(Wang Xiaoying, Chen Ningsheng, Liang Yuewei. Gray correlation analysis of influential factors of slope stability of Zhoujiayuan site in Dujiangyan[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Natural Science), 2003, 30(3): 285-289.(in Chinese))
- [10] 蒋永远. 灰色理论在岩石边坡稳定分析和预测中的应用[J]. 土工基础, 2003, 17(3): 54-57.(Jiang Yongyuan. Application of gray theory in the prediction of a rock slope stability analysis[J]. Soil Engineering and Foundation, 2003, 17(3): 54-57.(in Chinese))
- [11] 张鲁渝, 欧阳小秀, 郑颖人. 国内岩土边坡稳定分析软件面临的问题及几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 166-169.(Zhang Luyu, Ouyang Xiaoxiu, Zheng Yingren. Problems and thoughts of development of slope stability analysis software in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 166-169.(in Chinese))
- [12] Abdallah I Husein Malkawi, Hassan Waleed F, Abdulla Fayed A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. Structural Safety, 2000, 22(2): 161-187.
- [13] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.(Feng Xiating. Introduction of Intelligent Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))
- [14] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程研究[J]. 中国工程科学, 2000, 2(12): 90-96.(Yang Chunyan, Cai Wen. Study on extension engineering[J]. China Engineering Science, 2000, 2(12): 90-96.(in Chinese))
- [15] 胡宝清. 区域水环境质量的区间可拓评价方法及应用[J]. 中国工程科学, 2001, 3(6): 53-56.(Hu Baoqing. The interval extension assessment method of water environmental quality and its

- application[J]. China Engineering Science, 2001, 3(6) : 53-56.(in Chinese))
- [16] 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.(Jia Chao, Xiao Shufang, Liu Ning. Application of extenics theory to evaluation of tunnel rock quality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5) : 751-756.(in Chinese))
- [17] 王思敬,李焯芬. 三峡永久船闸岩石工程整体质量[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5) : 589-596.(Wang Sijing, Lee C F. Global quality of rock works for permanent shiplock of the Three Gorges Project on Yangtze River, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5) : 589-596.(in Chinese))
- [18] 胡宝清. 可拓评价方法在围岩稳定性分类中的应用[J]. 水利学报, 2000, (2) : 66-70.(Hu Baoqing. Application of extension assessment method to stability classification of surrounding rocks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (2) : 66-70.(in Chinese))
- [19] 吴海斌. 三峡永久船闸高边坡工程稳定措施[J]. 河海大学学报, 2000, 28(1) : 72-75.(Wu Haibin. Measures for stability of permanent shiplock high slope at Three Gorges Project[J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(1) : 72-75.(in Chinese))
- [20] 徐麟祥,杨启贵. 三峡船闸高陡岩石开挖边坡设计研究[J]. 人民长江, 1997, 28(10) : 27-29.(Xu Linxiang, Yang Qigui. Study on high excavated rock slope at TGP shiplocks[J]. Yangtze River, 1997, 28(10) : 27-29.(in Chinese))
- [21] 高书胜. 三峡上游隔流堤深槽段高边坡填筑稳定分析[J]. 人民长江, 2003, 34(9) : 28-29.(Gao Shusheng. Analysis of high slope stability in Three Gorges[J]. Yangtze River, 2003, 34(9) : 28-29.(in Chinese))
- [22] 黄宏伟,孙钧. 三峡工程船闸区高边坡稳定性的系统动态预报反演模型[A]. 见:中国岩石力学与工程学会第四次学术大会论文集[C]. 北京:中国科学技术出版社, 1996. 274-280.(Huang Hongwei, Sun Jun. Forecast and Feedback Model of High Slope Stability in Shiplock Region of Three Gorges Project[A]. In: Proceedings of the 4th Academic Conference of the Chinese Rock Mechanics and Engineering Society[C]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. 274-280.(in Chinese))
- [23] 张有天,周维恒. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.(Zhang Youtian, Zhou Weiheng. Deformation and Stability of High Rock Slope[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [24] 王家柱. 三峡工程及其几个岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5) : 597-602.(Wang Jiazhu. The Three Gorges Project and several rock mechanics problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5) : 597-602.(in Chinese))
- [25] 哈秋龄. 三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5) : 603-618.(Ha Qiuling. Study on the anisotropic unloading rock mass mechanics for the steep-high rock slope of the Three Gorges Project permanent shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5) : 603-618.(in Chinese))
- [26] 长江水利委员会. 三峡工程地质研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 1997.(Water Conservancy Committee of Yangtze River. Geologic Research for Three Gorges Project[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [27] Zhu W, Zhang Y. Effect of reinforcing the high jointed slopes of Three Gorges flight lock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(1) : 63-77.
- [28] Feng Xiating, Zhang Zhiqiang, Shen Qian. Estimating mechanical rock mass parameters relating to Three Gorges Project permanent shiplock using intelligent displacement back analysis method[J]. Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., 2000, 37(7) : 1039-1054.
- [29] 陈德基,余永志,马能武. 三峡工程永久船闸高边坡稳定性研究中的几个主要问题[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1) : 7-15.(Chen Deji, Yu Yongzhi, Ma Nengwu. Main problems for stability of high slope of the Three Gorges Project permanent shiplock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1) : 7-15.(in Chinese))
- [30] 陈孝英. 三峡永久船闸锚固工艺中的几项技术创新[J]. 中国三峡建设, 2001, 8(1) : 18-20.(Chen Xiaoying. Innovation of anchor technology in the Three Gorges Project permanent shiplock[J]. China Three Gorges Construction, 2001, 8(1) : 18-20.(in Chinese))
- [31] 董学晟,夏熙伦. 三峡工程船闸高边坡历年力学试验成果综合分析[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(6) : 29-33.(Dong Xuesheng, Xia Xilun. A comprehensive analysis of rock mechanics test results on high rock slope of TGP shiplock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(6) : 29-33.(in Chinese))
- [32] 徐平,杨庭青,徐春敏等. 三峡船闸高边坡岩体时效特性及长期稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2) : 163-168.(Xu Ping, Yang Tingqing, Xu Chunmin, et al. Creep characteristic and long-term stability of rock mass in ship lock high slope of the Three Gorges Projects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2) : 163-168.(in Chinese))
- [33] 孙钧. 三峡工程高边坡岩体长期变形与稳定研究[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3) : 253-257.(Sun Jun. Study on long term deformation and stability of the high rock slope of Three Gorges Project on Yangtze River[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(3) : 253-257.(in Chinese))