

文章编号: 1000-7598(2011)01-0224-06

基于系统评价的块体可靠度指标分析及应用

申艳军¹, 徐光黎¹, 朱可俊²

(1. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 成都 610072)

摘 要: 利用条件概率评价及系统工程理论, 将关键块体作为块体系统一个重要组成部分, 分析了关键块体可靠度指标评价办法, 探讨了关键块体与次生关键块可靠度内在关系, 由此类推, 提出块体系统评价方法, 推导出块体系统可靠度计算公式, 实现对块体系统的失稳概率的评价计算。并选择一工程实例, 对评价方法予以验证。结果表明: 传统关键块体可靠度评价办法忽略块体间内在影响, 结果偏向风险; 而文中方法综合考虑块体之间影响, 并建立了系统评价模型, 对块体系统评价更接近实际情况, 对块体系统理论的研究有一定借鉴意义。

关 键 词: 岩石力学; 块体可靠度; 条件概率; 系统模型

中图分类号: O 213.2

文献标识码: A

Analysis and application of reliability of blocks based on systematic quantitative methodology

SHEN Yan-jun¹, XU Guang-li¹, ZHU Ke-jun²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Consulting Group, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on conditional probability evaluation method and systematic engineering theory, considering key block as the important part of blocks system, the evaluation method of reliability of key block was analyzed, then we discussed the inner-relationship between key block and secondary key block, and following the same thought, we knew the relationship between secondary key block and the following block easily, so it would be possible to establish the systematic blocks evaluation model if we had gotten the reliability result of each block. With the reliability evaluation formula of Series System, we could calculate the reliability of systematic block. The suggested method was applied to a hydropower project in Southwest China so as to test its reasonableness. The results demonstrated that it was more coincidence to practical situation of the engineering than traditional evaluation of key-block theory. It would have some extent reference for the research of systematic blocks theory.

Key words: rock mechanics; reliability of blocks; conditional probability; systematic model

1 引 言

关键块体理论由我国学者石根华及美国学者 Goodman 首次提出^[1-3], 它假定岩体结构面为平面、结构面切割而成的块体为刚体, 利用几何拓扑方法分析岩体不同的开挖面上可能失稳的块体类型, 并结合刚体力学平衡分析, 研究块体的稳定性及支护措施。现已成为解决非连续岩体稳定问题的重要方法之一。

考虑到块体结构面几何特征和力学参数随机性的特点, 传统的确定性方法已不能准确地反映块体

特性。因此, 利用可靠度分析指标进行块体稳定性分析是一条行之有效的途径^[4]。目前, 国内外许多学者对此方法予以了不少有益的探讨, 王英学等^[5-6]基于块体尺寸大小的随机分布特征对块体可靠度予以了研究; 赵奎等^[7]同时考虑节理面间距和延展性随机特性的情况下构成块体体积的理论公式, 进而分析了节理间距、延展性随机特性与构成块体体积的关系; 何满朝、谢全敏等^[8-9]针对结构面抗剪强度参数分布的随机性对块体的失稳概率分析; 张奇华^[4]同时考虑块体几何参数与力学参数的不确定性, 选择将结构面倾角和力学参数作为随机变量进

收稿日期: 2009-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40572152)。

第一作者简介: 申艳军, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事地下洞室围岩结构特征及稳定性评价工作。E-mail: shenyanjun993@sina.com

行块体可靠度分析；此外孙树林、王雍等^[10-11]对块体予以分区，建立了破坏概率和分界边长的函数关系，并分析了不同分界间隔对块体破坏概率偏差的影响，进而实现对块体失稳概率的评价。国外 Tonon^[12]引入随机理论对块体进行分析，得出岩块大小与可能失稳概率的关系式。Muralha 等^[13]结合 Monte Carlo 法与可靠度方法对关键块体的失稳概率予以探讨。不胜枚举。

但以上研究多就单个关键块体稳定性进行可靠度分析，较少探讨该块体的稳定性对次生关键块乃至整个体系（如边坡、洞室等）的影响状况。本文采用条件概率评价法及系统工程可靠度理论，在对关键块体稳定性评价的基础上，探讨关键块（key block）与次生关键块（secondary key block）及整体系统（total system）失稳概率的内在关系，进而实现对整体系统的可靠度指标评价。同时为检验理论的适用性及可行性，引入一工程实例予以验证。

2 理论基础

2.1 关键块体可靠度评价方法

在块体稳定可靠度分析中，主要考虑块体的抗力 R 和荷载效应 S ，并定义 R 与 S 的差值 Q 为块体的安全余量，则块体的失稳概率 p_f 可表示为

$$p_f = p[Q < 0] = p[R - S < 0] \quad (1)$$

假定块体的抗力 R 和荷载效应 S 均满足标准正态分布，定义块体的可靠度指标 β 满足：

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (2)$$

式中： $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布的反函数

已知块体的 3 种常见失稳模式：坍塌掉块、单面滑移、双面（多面）滑移。在进行可靠度分析时，同时考虑块体几何参数和力学参数的随机性，选取块体几何参数（组成块体的各个结构面倾角 α_i ）及结构面力学参数（摩擦因数 f_i 和黏聚力 c_i ）作为随机变量进行可靠度计算。

坍塌掉块模式是指块体受到重力作用沿结构面垂直下落，这种破坏模式发生在洞室顶拱时比较危险。假定不考虑地应力，其表达式为

$$F = W_i - c_i A_i \quad (3)$$

则其极限状态方程为

$$g(\alpha_i, f_i, c_i) = W_i - c_i A_i \quad (4)$$

单面滑动模式一般是指沿单一结构面滑动，且主动力合力只有重力作用，其表达式为

$$F = W_i \sin \alpha_i - W_i \cos \alpha_i f_i - c_i A_i \quad (5)$$

相应极限状态方程为

$$g(\alpha_i, f_i, c_i) = W_i \cos \alpha_i f_i + c_i A_i - W_i \sin \alpha_i \quad (6)$$

双面滑动模式一般指沿两个结构面交棱滑动，而主动力合力也只考虑重力作用，设块体结构面 i, j 倾角为 (α_i, α_j) ，摩擦因数 (f_i, f_j) 和黏聚力 (c_i, c_j) ，两结构面的交棱倾角 δ ，夹角为 (γ_i, γ_j) ，其他符号如上，其表达式为

$$F = W \sin \delta - W \cos \delta \frac{\sin \gamma_i}{\sin(\gamma_i + \gamma_j)} f_i - W \cos \delta \frac{\sin \gamma_j}{\sin(\gamma_i + \gamma_j)} f_j - c_i A_i - c_j A_j \quad (7)$$

则极限状态方程可表达为

$$g(\delta, \gamma_i, \gamma_j, f_i, c_i, f_j, c_j) = W \sin \delta - W \cos \delta \cdot \frac{\sin \gamma_i}{\sin(\gamma_i + \gamma_j)} f_i - W \cos \delta \frac{\sin \gamma_j}{\sin(\gamma_i + \gamma_j)} f_j - c_i A_i - c_j A_j \quad (8)$$

据文献[8, 14]介绍，结构面的倾角、摩擦因数及黏聚力均服从标准正态分布或对数正态分布。本文按照标准正态分布考虑，由以上 3 种模式的极限状态函数的特点，采用目前可靠度计算最常用的 JC 法（一次二阶矩验算点法），本方法设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 是 n 个相互独立的基本正态随机变量，其均值与方差为 μ_{x_i} 及 σ_{x_i} ，极限状态方程表示欧式 n 维空间的一个曲面（极限状态曲面），相应方程可写为

$$g(\bar{X}_1 \sigma_{x_1} + \mu_{x_1}, \bar{X}_2 \sigma_{x_2} + \mu_{x_2}, \dots, \bar{X}_n \sigma_{x_n} + \mu_{x_n}) = 0 \quad (9)$$

式中：

$$\bar{X}_i = \frac{X_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

在标准正态空间中，原点到极限状态曲面的最短距离即为可靠度指标 β 值，设该线段在曲面上的交点为 P ，将式（9）在 P 点处做泰勒级数展开，得到验算点坐标 X_i^* 及方向余弦 $\cos \theta_{x_i}$ ，计算式如下：

$$X_i^* = \mu_{x_i} + \cos \theta_{x_i} \beta \sigma_{x_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$\cos \theta_{x_i} = \left[-\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_P \cdot \sigma_{x_i} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_P \cdot \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

式中： $\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_P$ 表示函数 g 在 P 点对 X_i 求偏导，联立（9）~（11）可实现对可靠度指标 β （线段 OP 的

长度)的求解。

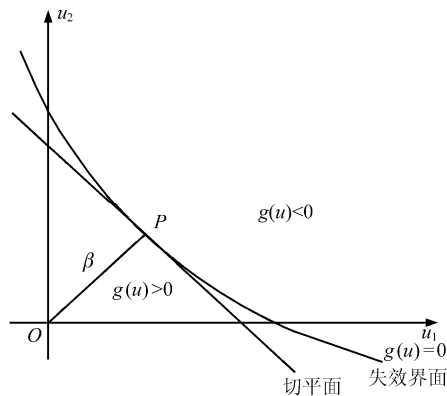


图1 二维标准正态空间中的可靠度指标求解

Fig.1 The reliability index in two-dimensional standard normalized space

2.2 条件概率评价法

按照条件概率论观点,研究对象 B 的发生往往依赖于其先决对象 A 的发生,即 A 是研究对象 B 发生的必要条件,因此,在对研究对象 B 进行概率估计时,需要获得其先决对象 A 的发生概率 $P(A)$,然后依据先验概率分布及期望值(或效用值),采用条件概率计算准则对研究对象 B 进行概率计算,得到其概率值 $P(B|A)$ 。这种概率评价方法称之为条件概率评价法。其计算公式如下:

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)} \quad (12)$$

2.3 关键块体与次生关键块可靠度关系分析

Wibowo^[15]于1997年首次探讨了关键块体与次生关键块的关系、发生转化条件以及次生关键块的判断方法等。对于关键块体与次生关键块体关系,由图2可知(具体分析见文献[15]),编号1块体为关键块体,编号2a、2b块体为次生关键块体。在块体1未失稳之前,编号2a、2b块体可视为稳定块体,但一旦块体1失稳,2a、2b块体就变成成为关键块体,存在着继续失稳的可能。而按照传统的块体理论及相应块体搜索办法,我们只关心关键块体,而忽视了考虑次生关键块的稳定性问题,可见这是一种冒险的做法。因此,对于岩体工程而言,必须要分析关键块体与次生关键块体的稳定性内在关系,为后期支护衬砌提供技术支持。考虑次生关键块体的发生前提是关键块体的失稳,本文在探讨两者可靠度内在关系时,引入2.2小节的条件概率评价法,则次生关键块体的可靠度指标 β_2 可表示为

$$\beta_2 = \Phi^{-1}[1 - P(B|A)] = \Phi^{-1}\left[1 - \frac{P(AB)}{P(A)}\right] \quad (13)$$

上式中,可以利用2.1小节中讨论的 β_1 (此处认为是关键块体的可靠度)与 $P(A)$ 的内在关系,实现用 β_1 表示 $P(A)$;对于 $P(AB)$ 而言,在此处的物理意义表示在关键块体 A 失稳前提下,原来的次生关键块 B 演变成关键块体后的失稳概率。此时次生关键块 B 失稳概率的求解完全可以参考对2.1小节关键块体失稳概率的评价方法,得到其等效可靠度 β'_1 ,于是式(13)可表示为

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \Phi^{-1}[1 - P(B|A)] = \Phi^{-1}\left[1 - \frac{P(AB)}{P(A)}\right] = \\ &\Phi^{-1}\left[1 - \frac{P(AB)}{1 - \Phi(\beta_1)}\right] = \Phi^{-1}\left[1 - \frac{1 - \Phi(\beta'_1)}{1 - \Phi(\beta_1)}\right] \end{aligned} \quad (14)$$

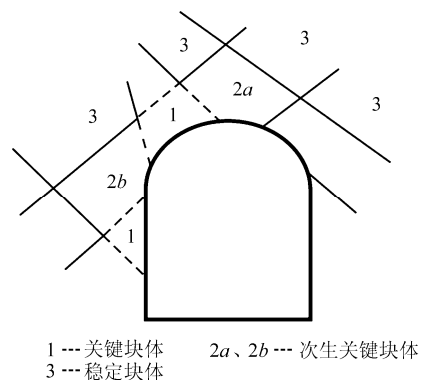


图2 关键块体与次生关键块体的内在失稳关系

Fig.2 Instability relationship between key-block and secondary key block

2.4 块体系统模型及可靠度分析

上文分析了关键块体与次生关键块可靠度关系,由上分析延伸可知,次生关键块失稳后还可能导致后面的块体失稳,依次类推。可见,块体之间的失稳存在着一个链条关系,现站在系统论的角度,将这一系列块体作为一个系统,将每个块体作为系统里面的成员,将临空面作为系统成员的通道的出口,考虑临空面一般为单面,即该系统仅存在单一出口,建立一个“单通道串联系统模型”,如图3所示。

对于本系统模型,关键块体掌握着通道的“钥匙(key)”,该系统失稳、破坏的先决条件是关键块体的失稳,即打开了通道的“门”,关键块体失稳有可能引发其后块体的连续失稳。基于以上考虑,对于块体系统可靠度的分析,可以延展关键块体与次生关键块的可靠度关系式予以实现。为实现对块体

系统的量化评价，在此引入 Hohenbichler 和 Johnson^[16-17]推荐的串联系统失效概率评价公式：

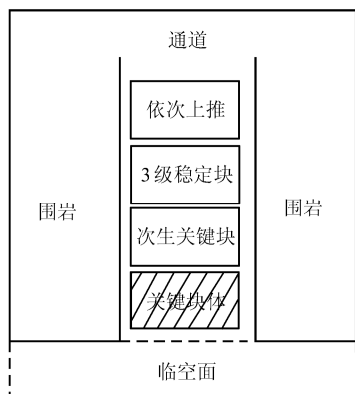


图3 块体系统模型示意图

Fig.3 Sketch of block systematic model

$$p_s = p\left\{\bigcup_{i=1}^n g_i(X_i) \leq 0\right\} = p\left\{\bigcup_{i=1}^n g_i(X_i) \leq 0\right\} = 1 - \Phi(\beta_i; \rho) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(x) \left[1 - \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\beta_i + \sqrt{\rho}}{\sqrt{1-\rho}}\right)\right] dx \quad (15)$$

式中： $\phi(x)$ 为标准正态概率密度函数； ρ 为系统内成员之间相关系数，对于岩体工程而言，系统块体之间的相关性影响因子较多，涉及到块体尺寸、形态、破坏模式及结构面切割关系等，但考虑工程实际情况，系统块体内各子块体多由相互平行的各组结构面切割，具有相似的形态及破坏模式，仅尺寸从下至上存在正比例放大或缩小现象，即块体间相关性系数主要与块体间尺寸比例值有关。对于具体的断面，块体间尺寸比例值应大致相等，则其系统内成员的相关性系数应大致相同，即认为 ρ 为常数，参考串联模型中的处理办法，选取串联模型中任意相邻成员可靠度比值表示，本文采用 β_2/β_1 的比值来表示相关性系数 ρ ^[18]。

利用条件概率算法，逐级求得下一级块体的可靠度指标 β_i ，然后代入到式(15)中，可以求得该系统的失稳概率 p_s ，相应地，该系统的可靠度指标 β_s 可利用下式求得：

$$\beta_s = \Phi^{-1}(1 - p_s) \quad (16)$$

由此可实现对本系统可靠度指标的评价。

3 工程实例

3.1 工程概况

某大型水电站位于四川省西部大渡河中游石棉

县境内，该水电站是大渡河干流梯级开发的大型水电工程之一，坝址处控制流域面积达6.27万km²，多年平均流量为1 010 m³/s，电站正常蓄水位为1 130 m，最大坝高为210 m，总库容7.42亿m³，电站装机容量为2 600 MW。

地下厂房布置在左岸I~III线，由主厂房、主变室、尾水调压室3大洞室及母线洞、尾水连接洞等组成。3大洞室平行布置，轴线方向N55°E，垂直埋深为390~520 m，水平埋深310~530 m。岩性主要为澄江期黑云二长花岗岩、正长花岗岩及后期侵入的辉绿岩脉等，岩体相对完整，局部节理裂隙切割造成掉块、块体失稳等。

3.2 节理裂隙统计及组合

厂房内发育有5组节理裂隙以及2条规模较大、产状相近的岩脉(β_{80} 、 β_{81})。结构面基本特征及参数概率分布分别见表1及表2。

表1 某大型水电站地下厂房各组结构面发育情况

Table 1 Joint set data in an underground power house zone

结构面	产状	迹长/m	f	c /MPa	发育程度
①	NE85°/NW∠80°	5~8	0.63	0.14	优势节理
②	NW50°/SW∠75°	15~25	0.65	0.16	优势节理
③	NE45°/SE∠73°	5~10	0.65	0.16	一般发育
④	NE25°/NW∠35°	3~5	0.61	0.09	一般发育
⑤	NW50°/NE∠80°	5~10	0.64	0.14	局部发育
β_{80-81}	NW25°/SW∠70°	>30	0.43	0.11	夹次生岩脉

表2 地下厂房各组结构面参数概率分布情况

Table 2 Probabilistic distribution types of each group structural planes parameters in an underground power house zone

结构面	产状	f		c /MPa		倾角/(°)	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ
①	NE85°/NW∠80°	0.63	0.008	0.14	0.012	80	2
②	NW50°/SW∠75°	0.65	0.011	0.16	0.014	75	5
③	NE45°/SE∠73°	0.65	0.010	0.16	0.011	73	2
④	NE25°/NW∠35°	0.61	0.008	0.09	0.012	35	3
⑤	NW50°/NE∠80°	0.64	0.009	0.14	0.006	80	2
β_{80-81}	NW25°/SW∠70°	0.63	0.008	0.14	0.012	70	8

3.3 关键块体分析^[19]

考虑第⑤组结构面及辉绿岩脉(β_{80} 、 β_{81})为局部发育，与其他结构面组合产生块体的概率偏小，因此，选取①+②+③+④的组合来搜索关键块体，并利用全空间赤平投影图(见图4)实现对其地下厂房块体分析。

考虑地下厂房洞轴向开挖方向为NE55°，对以上节理组合予以分析得到不同临空面存在的可移动块体，另结合块体稳定性分析，可判断出相应的关键块体。详见表3。

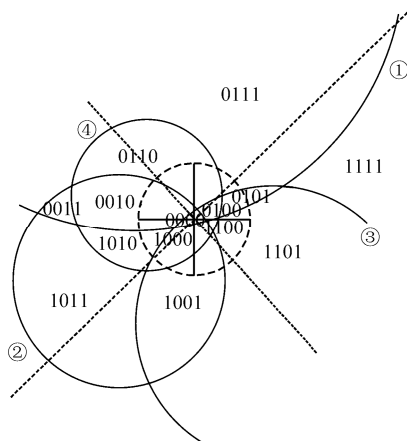


图 4 节理组合下的全空间赤平投影分析
Fig.4 Stereographic projection analysis of joint sets

表 3 不同临空面存在的可移动块体及关键块体
Table 3 Removable block and key block in different free-faces

编号	临空面	块体编号		
①	上游边墙	1001	1100	1101*
②	下游边墙	0010*	0011	
③	左端墙	1100	0100	0101
④	右端墙	1100	0100	0101
⑤	顶拱	1111*	0011	1011

注：带“*”表示关键块体。

3.4 关键块体可靠度计算

上文利用全空间赤平投影及块体稳定性法则已辨别出各临空面内可能存在的关键块体，再利用洞室开挖面的地质素描图可确定各类关键块体具体位置，进而得到块体尺寸及体积大小，以实现对该类关键块体的可靠度评价。

根据 2.1 小节中讨论的关键块体可靠度评价方法，首先确定关键块体的失稳模式，在已知其具体位置、周围结构面切割情况下，对这一判断是显而易见的。而后代入各自的极限状态方程内，再利用相应的可靠度计算方法可实现对其可靠度的评价。

为方便问题的研究，本文选择了该大型水电站主厂房 I~II 层开挖阶段作为研究对象，并选取 3 个典型断面，选取的断面分属不同围岩类别，断面内发育的块体形态及失稳模式不同，可基本反映主厂房目前开挖阶段的块体分布情况，分别计算各断面上的关键块体可靠度评价结果。具体地质素描图及块体可靠度计算结果分别见图 5、表 4。

3.5 块体系统可靠度评价

利用前文讨论的关键块体与次生关键块可靠度关系，可以容易计算出次生关键块可靠度值，相应逐级递推，考虑工程实际情况，采用递推算法，编写 VC++ 程序，当计算的块体失稳概率小于 0.000 5%

时停止计算，认为此块体为本块体系统模型的下限值。得到各块体的可靠度指标后，代入式 (15)、(16) 中可得到块体系统的可靠度指标，实现对块体系统可靠度量化评价。计算结果见表 5。

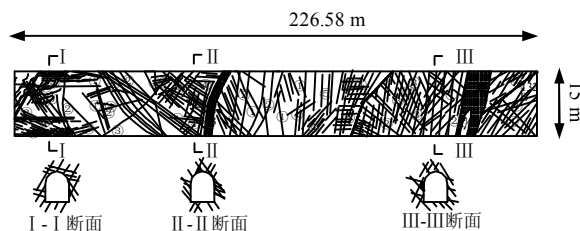


图 5 某大型水电站地下厂房地质素描及典型断面图
Fig.5 Geologic sketch and typical section drawings of underground power-house of a hydropower station

表 4 3 个典型剖面上关键块体可靠度指标计算结果
Table 4 Reliability results of key-block in three cross-sections

方位	块体编号	失稳模式	块体体积/m ³	失稳概率/%	可靠指标
I-I D	0011	单面滑动	6.55	2.28	1.95
II-II A	1111	顶拱坍塌	4.15	3.35	1.72
III-III U	1101	双面滑动	9.06	0.38	2.63

注：D 表示下游边墙 A 表示顶拱 U 表示上游边墙。

表 5 3 个典型剖面上块体系统可靠度指标评价结果
Table 5 Reliability results of block-system in three cross-sections

方位	失稳概率/%			可靠度指标		
	关键块	次生块	系统块	关键块	次生块	系统块
I-I D	2.28	0.006 7	2.37	1.95	3.68	1.89
II-II A	3.35	0.038 9	3.57	1.72	3.43	1.65
III-III U	0.377	0.008 9	0.377	2.63	4.62	2.52

注：II-II A 中三级块体仍在计算范围之内，但数值很小，未作罗列。

4 分析与讨论

由表 5 结果可知：

(1) 系统块体模型的失稳概率与关键块体的大小成正比，关键块体是决定系统模型是否失稳的先决条件，这与关键块体理论的评价结果是一致的；同时系统失稳概率计算结果略大于关键块体的失稳概率，可见传统关键块体理论中只考虑关键块体的失稳概率的分析办法是趋于不安全的，相应后期支护衬砌措施也会偏向不安全，综合考虑整个块体系统的失稳概率对工程而言，更接近实际情况。

(2) 随着关键块体失稳概率值的增大，系统块体的失稳概率的增幅明显变大。可见关键块体是作为“触发器”存在的，特别对失稳概率较大的关键块体，其触发作用效果更明显。对工程实际而言，对于高危的关键块体应予以特别重视，采取必要措施予以及时治理，以免引发更大的系统块体坍塌。

(3) 本系统计算方法对次生关键块体失稳概率

计算结果明显偏小, 与工程实际不太符合, 这与建模时的假设条件及计算过程的简化处理有关, 有待于进一步探讨。

5 结 论

(1) 采用可靠度分析指标进行块体稳定性分析研究相较传统的分析方法而言, 更接近工程实际。

(2) 对于块体可靠度分析时, 需综合考虑关键块体对次生关键块体乃至整个系统块体的内在影响, 采用整体、系统的方法对块体稳定性进行研究。

(3) 本文借助条件概率评价法及系统工程理论建立了块体系统模型, 引入系统工程学中串联模型的定量评价公式, 并结合工程实例, 将理论分析与现场实践相结合, 计算结果与现场情况较吻合, 说明本文提出的模型的理论基础是相对可靠的, 对于块体系统稳定性研究有一定借鉴。

(4) 本文在建立系统定量评价模型时, 参考了系统工程中串联模型可靠度计算公式, 对块体间相关性系数定量值的选择, 予以了一定简化处理, 使得递推计算结果值相对偏小, 与实际情况有一定偏差。因此, 对于适合块体系统模型的定量评价公式仍需要进一步的研究探讨, 予以完善。

参 考 文 献

- [1] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 1977, (3): 260—271.
- [2] 石根华. 岩体稳定分析的几何方法[J]. 中国科学, 1981, (4): 487—495.
SHI Gen-hua. Geometrical approach of rock mass stability analysis[J]. *Science in China*, 1981, (4): 487—495.
- [3] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its applications to rock engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [4] 张奇华. 块体理论的应用基础研究与软件开发[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [5] 王英学, 王建宇. 考虑节理尺寸的随机块体可靠度及其出现概率分析[J]. 铁道工程学报, 1999, (3): 73—77.
WANG Ying-xue, WANG Jian-yu. Block appearing possibility and stability analysis on considering of the dimension of block[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1999, (3): 73—77.
- [6] 王英学, 高波. 节理岩体的块体尺寸特征分析及其可靠度评价[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 397—400.
WANG Ying-xue, GAO Bo. The block dimension and stability analysis in the joint rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(4): 397—400.
- [7] 赵奎, 王晓军, 赵康, 等. 节理面构成块体的概率公式及其工程应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 369—372.
ZHAO Kui, WANG Xiao-jun, ZHAO Kang, et al. A new probability formula of blocks cut by joint planes and its engineering application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 369—372.
- [8] 何满潮, 苏永华, 景海河. 块状岩体的稳定可靠性分析模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 343—348.
HE Man-chao, SU Yong-hua, JING He-hai. Reliability analysis model of block rock mass stability and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 343—348.
- [9] 谢全敏, 朱瑞赓, 程康. 可疑关键块体成为真正关键块体的概率分析[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(3): 98—100.
XIE Quan-min, ZHU Rui-gen, CHENG Kang. Probabilistic analysis of a suspected key block forming a complete key block[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 1998, 20(3): 98—100.
- [10] 孙树林, 朱杰. 节理化岩质边坡的关键块体可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 131—136.
SUN Shu-lin, ZHU Jie. Reliability analysis of key block for a jointed rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 131—136.
- [11] 王雍, 赵红敏. 多结构面三维块体极限稳定新方法探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 197—201.
WANG Yong, ZHAO Hong-min. Research on limit stability new method for three-dimensional block with multi-con-structural surfaces[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Supp.1): 197—201.
- [12] TONON F. Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, 70(3): 263—282.
- [13] MURALHA J, TRUNK U. Stability of rock blocks—evaluation of failure probabilities by the Monte Carlo and first order reliability methods[C]//Proceedings of the 4th Annual IEEE Conference on Visualization. [S. l.]: [s. n], 1993, 11: 25—29.
- [14] 张全恒. 岩石结构面抗剪强度的确定[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(增 1): 113—119.
ZHANG Quan-heng. Determination of shear strength along rock stratum plane[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 14(Supp.1): 113—119.
- [15] WIBOWO J L. Consideration of secondary blocks in key-block analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3-4): 508—520.
- [16] JOHNSON N L, KLOTZ S. Distributions in statistics: Continuous multi-variety distributions[M]. New York: John Wiley & Sons, 1972.
- [17] HOHENBICHER M, RACKWITZ R. First order concepts in system reliability[J]. *Structural Safety*, 1983, 1: 177—186.
- [18] B. S. 迪隆(加). 系统设计和应用的可靠性工程[M]. 周广涛译. 北京: 宇航出版社, 1987.
- [19] 刘锦华, 吕祖珩. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.