

# 岩体地下结构围岩稳定非概率可靠性的 凸集合模型分析方法

苏永华<sup>1</sup>, 何满潮<sup>2</sup>, 曹文贵<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 中国矿业大学(北京校区) 岩土工程研究所, 北京 100083)

**摘要:** 在岩体地下结构围岩稳定可靠性分析中, 由于岩体的物理力学参数本身的特点, 通常只能在岩体分类的基础上给出其变化的区间, 要得到其概率密度分布函数和隶属函数是非常困难的。采用传统的统计概率和模糊概率模型得出的概率结论只具有理论上的意义。针对岩体地下结构围岩的特点, 引进非概率的可靠性分析方法, 采用凸集合模型描述基本参数的不确定性, 将结构功能函数转化为仿射函数, 对于给出了设计安全域的地下结构, 利用仿射函数在凸集合域上求得响应输出区间, 通过比较设计安全域和响应区间, 确定其可靠性; 对于没有明确给出设计安全域的结构, 通过分析功能函数在凸集合模型上的均值与离差关系, 给出其可靠性度量的非概率指标。在非概率凸集合模型分析方法中不必拟合概率密度函数和隶属函数, 所需信息量少、准确度高, 实例分析展示了凸集合模型分析方法的实用性。

**关键词:** 隧道工程; 岩体地下结构; 围岩; 非概率可靠性; 凸集合模型; 仿射函数

**中图分类号:** TU 473.2; TP 301.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6915(2005)03-0377-07

## NON-PROBABILISTIC RELIABILITY CONVEX MODEL METHOD FOR STABILITY ANALYSIS OF SURROUNDING ROCK MASS OF UNDERGROUND STRUCTURE

SU Yong-hua<sup>1</sup>, HE Man-chao<sup>2</sup>, CAO Wen-gui<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Geotechnical Engineering Research Institute, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In reliability analysis of stability of surrounding rock mass for underground engineering, due to the particular characteristics of physical and mechanical parameters of rock mass, the variation interval of these parameters can only be obtained based on rock mass classification, while it is very difficult to obtain probability density function and subjection function of these parameters for rock mass. Therefore, the stability and reliability of surrounding rock mass, calculated by traditional probabilistic statistics model and fuzzy probability model, only has theoretical significance. Based on the characteristics of surrounding rock mass of underground engineering, the convex model is adopted to simulate uncertainties of rock mass parameters and to change state equation into affine function. For the underground structure with specified design safety margin, the response output interval of structure can be calculated through affine function whose independent variable is defined in convex set. The stability and reliability of the surrounding rock mass of underground structure can be determined by comparing design safety interval with response output interval. For the underground structure without design safety margin,

**收稿日期:** 2003-06-01; **修回日期:** 2003-08-21

**基金项目:** 国家自然科学基金委创新研究群体基金资助项目(50221402); 湖南大学引进人才基金项目和重点科学基金资助项目(531103011143, 521101619)

**作者简介:** 苏永华(1966-), 男, 博士, 1993年于北京科技大学工程力学专业获博士学位, 现为副教授, 主要从事地下结构、岩土工程等科研和教学工作。E-mail: syh5327@hnu.cn.

non-probabilistic stability reliability index is defined through the analysis of ratio of average value in limit state equation to its deviation on convex set. Probability density function and subsection function need not be fitted in non-probability convex model methods. Therefore, non-probability convex model methods need less information than traditional stability reliability analysis method. The analysis results of non-probability methods are more accurate than that of traditional method. The results of engineering analysis show the convex model method of non-probabilistic reliability is feasible.

**Key words** : tunnel engineering ; underground rock mass structure ; surrounding rock mass ; non-probabilistic reliability ; convex model ; affine function

## 1 引言

目前结构可靠性分析方法主要有两种模型,一种是考虑参数变异性的纯概率统计方法<sup>[1]</sup>,另一种是考虑参数界限模糊性的统计模糊方法<sup>[2]</sup>。这两种方法能成功解决其参数条件下的可靠度问题,并且在某些规范中已经有所体现,对在岩体地下结构可靠性分析中的应用也作出了很多卓有成效的研究<sup>[3~5]</sup>,但其实用性难题一直没有解决,这也是这两种模型在地下工程中难以推广的主要原因。这两种模型的主要缺陷首先在于对参数进行统计分析时,构建其密度函数或隶属函数需要大量的样本数据,在数据缺乏的情况下,上述两种模型的常规处理办法为主观假设其分布形态;其次为最后的评价结论为概率,对结论难以进行试验验证,在工程上应用非常困难;再次为失效概率是分布函数的尾部概率,是一个小概率事件,而输入参量概率密度函数尾部可以忽略的误差却会引起计算结果不可接受的错误;最后为其对计算方法非常敏感,不同计算方法所得结论最大相差可达到  $10^3$  以上<sup>[6]</sup>。而岩体地下结构围岩体样本的数据往往是小样本,不可能得到大量的数据,即其为可靠度问题中的信息不完备结构。对于这种结构的稳定可靠度,利用概率进行评价,就其工程意义来说,具有很大的局限性。而岩体地下结构围岩参数的变异性和随机性确实存在,并且对其稳定性产生巨大影响。因此,对岩体地下结构的稳定可靠性分析非常必要,而目前的方法不太适应,需要提出新的思路和方法。

## 2 非概率可靠性

### 2.1 非概率可靠性含义

日常工作生活中的可靠性概念为系统容许其工作环境和自身的有关参量在一定的范围内波动,但不影响其正常工作,而不是数学上的概率。根据这

一基本定义,国外 20 世纪 90 年代提出了非概率可靠性的概念,强调结构或系统可接受行为的范围,以系统或结构能容许的不确定性的最大程度度量可靠性。认为“系统性能波动的范围越小,系统越可靠”,或者说“系统抗干扰的能力越强,系统越可靠”,称之为稳健可靠性<sup>[7,8]</sup>,亦即非概率可靠性。非概率可靠性适用于信息较少、不确定程度严重的工程问题,这对地下工程围岩的稳定可靠性分析是一种非常合适的方法。

在岩体地下工程中,影响围岩稳定的各类输入参数,如抗剪参数  $c, \varphi$ , 抗拉强度  $\sigma_t, \sigma_c$  等数据不完备时,欲得到其精确的概率密度分布函数或隶属函数是非常困难的,有时若利用初等函数就模拟不了其真实分布。但是这些参数不确定性幅度或界限确定起来却比较容易,非概率可靠性采用凸集合模型描述这些不确定性,将其表示为区间变量。凸集合模型的第 1 个特点是需要的信息量较少,能对不确定量给出更合理、更全面的描述;第 2 个特点是分析结果非常可靠<sup>[9]</sup>。通过功能函数的映射得到输出(或响应)来评价目标参量的不确定性变化范围(即区间),将此变化范围与结构可接受的行为范围比较,即得到安全程度的度量指标,称之为非概率可靠性(或稳健性可靠指标),相应地,其可靠性不是一个定值,而是一个变化区间。

### 2.2 描述不确定性的基本凸集合模型

根据拓扑学集合论中的凸概念可知,如果一个区域是凸的,那么在该区域内任何两点的连线完全在该区域内。在欧几里得空间用代数形式表示如下:设  $K$  是  $N$  维欧几里得空间  $E^N$  中的一个点的集合,如果对于任何点  $q \in K, p \in K$ , 并且对于任何实数  $\alpha$  存在的关系为

$$\alpha p + (1 - \alpha)q \in K \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

则  $K$  即为凸集合。

目前已经研究出的能够描述各种条件下不确定性的凸集合模型很多。从其内涵上有代表函数型的凸集合模型和代表数值型范围的凸集合模型。最基

本的凸集合模型有下述几种。

(1) 最大值界限凸集合模型(简称 MB 模型)

$$\Omega_{MB} = \{u(t) \in E^r : |U(t)| \leq \bar{u}_j, j = 1, 2, \dots, r\} \quad (2)$$

式中： $\bar{u}_j$  为常数或确定性函数， $j = 1, 2, \dots, r$ ， $j$  为常数； $u(t)$  为随机变量或非确定性函数； $E^r$  为  $r$  维欧几里得空间。

由于该模型的形式简单而且所需的信息少，因而得到了广泛的应用。

(2) 积分能量界限凸集合模型(简称 IEB 模型)

令输入能量有限，则有

$$\Omega_{IEB} = \left\{ u(t) : \int_0^T u^T(\tau)u(\tau)d\tau \leq E^2 \right\} \quad (3)$$

式中： $E$  为一个正的实数， $u(t)$  意义同 MB 模型。

该模型最早用来描述地震的不确定性。

(3) 椭球凸集合模型  $E(\theta, W)$

$$E(\theta, W) = \{ \delta \mid \delta^T W \delta \leq \theta^2 \} \quad (4)$$

式中： $W = (w_{ij})_{m \times m}$ ，为加权矩阵，根据具体情况视其为单位矩阵或对角矩阵； $\theta$  为椭球半径； $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\}$ ，为不确定参数列向量，为与不确定性参数相关联的变量。

该模型在空间中是一个椭球。在凸集合模型理论参数空间中，不确定性参数均可用该模型进行定量化。

此外还有即时能量有界凸集合模型、累积有界能量凸集合模型、包络有界凸集合模型、椭圆体边界凸集合模型等<sup>[7, 8, 10]</sup>。

### 3 地下岩体结构围岩凸集合模型

#### 3.1 岩体物理力学参数的特点

为了说明凸集合模型适合于地下工程围岩稳定可靠性，首先需分析一下围岩参数的通常确定方法。

根据目前岩体力学的研究进展可知，岩体的物理力学参数如弹性模量  $E$ 、抗剪参数  $c, \varphi$  等的确定，最为常见的方法为通过综合岩体的多项指标，对岩体进行评分，然后根据综合分值确定岩体的类型，再根据岩体的类型确定参数。目前在岩体力学中最为著名的 RMR 分类方法综合了<sup>[10]</sup>以下 6 个方面：

(1) 岩石材料单轴压缩强度，(2) 岩芯质量指标 (RQD)，(3) 不连续面间距，(4) 不连续面条件，(5)

地下水条件，(6) 不连续面方向。将岩体分为 5 类，然后给出了各类岩体的物理力学参数取值范围，见表 1。

表 1 RMR 分类法岩体等级及相应的物理力学参数

Table 1 Rock mass grade of RMR classification and corresponding mechanical parameters

围岩级别	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
	> 400	> 45
	300 ~ 400	35 ~ 45
	200 ~ 300	25 ~ 35
	100 ~ 200	15 ~ 25
	< 100	< 15

再如在国内对围岩物理力学参数的获得也是在分类的基础上得出一个范围，例如铁路隧道围岩物理力学参数处理方法，见表 2。

表 2 铁路隧道围岩岩体等级及相应的物理力学参数

Table 2 Rock mass grade of surrounding rock for railroad tunnel and corresponding mechanical parameters

围岩级别	重度 /kN · m <sup>-3</sup>	弹性抗力系数 /MPa · m <sup>-1</sup>	变形模量 /GPa	泊松比	粘聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
26 ~ 28	1 800 ~ 2 800	> 33	< 0.2	> 2.1	> 60	
25 ~ 27	1 200 ~ 1 800	20 ~ 33	0.2 ~ 0.25	1.5 ~ 2.1	50 ~ 60	
23 ~ 25	500 ~ 1 200	6 ~ 20	0.25 ~ 0.3	0.7 ~ 1.5	39 ~ 50	
20 ~ 23	200 ~ 500	1.3 ~ 6	0.3 ~ 0.35	0.2 ~ 0.7	27 ~ 39	
17 ~ 20	100 ~ 200	1 ~ 2	0.35 ~ 0.45	0.05 ~ 0.2	20 ~ 27	
15 ~ 17	< 100	< 1	0.4 ~ 0.5	< 0.1	< 22	

由表 1, 2 可知，岩体的物理力学参数特点为：岩体参数不同于岩石材料，其为结构综合体的等价反映，存在离散性，不是一个定值。它不是一般意义上的随机变量，信息量非常有限，要得到其概率密度分布函数是非常困难的，有时甚至是不可能的；更有甚者，它可能不服从现有的任何分布，但是确定其变化的区间范围却比较容易。

#### 3.2 岩体物理力学参数凸集合模型

根据岩体物理力学参数离散性特点，其结构围岩稳定可靠性非常适合采用非概率分析方法。在凸集合模型理论中<sup>[11]</sup>，对于基本参数空间中具有区间的不确定参数的变化范围可以用椭球  $E(\theta, W)$  进行定量化，即

$$E(\theta, W) = \{ \delta \mid \delta^T W \delta \leq \theta^2 \} \quad (5)$$

式中： $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\}$ ； $W = (w_{ij})_{m \times m}$ ，为加权矩阵； $\theta$  为椭球半径。 $W$  和  $\theta$  一起表示不确定参数的不确定程度，对岩体物理力学参数，有  $\theta \neq 0$ 。根据凸分析和凸集合模型理论<sup>[11]</sup>，当  $\theta \neq 0$  时，椭球体  $\delta^T W \delta = \theta^2$  可转化为半径为 1 的椭球体  $\delta^T (W / \theta^2) \delta = 1$ 。因此，式(5)可以写为  $E(\theta, W) = \{\delta \mid \delta^T (W / \theta^2) \delta = 1\}$ ，然后转化为区间变量的运算。

设岩体的某一物理力学参数  $X_j$  的最小值和最大值分别为  $X_j^L, X_j^U$ ，其中下标  $j = 1, 2, \dots, M$ ， $M$  代表岩体物理力学参数随机变量的个数，则有

$$X_j^0 = \frac{1}{2}(X_j^U + X_j^L), \Delta_j = \frac{1}{2}(X_j^U - X_j^L) \quad (6)$$

则

$$X_j = X_j^0 + \delta_j, \quad |\delta_j| \leq \Delta_j \quad (7)$$

式中： $X_j$  相当于在一个多维空间的超立方体  $R_X$  内变化，参数空间中不确定参数变化范围用  $E(\theta, W)$  模型表示为

$$E(\theta, W) = \{\delta \mid \delta^T W \delta = 1\} \quad (8)$$

其中，椭球面  $S = \{\delta \mid \delta^T W \delta = 1\}$  包含超立方体的顶点，按照凸集合模型分析理论<sup>[11, 12]</sup>， $E(\theta, W)$  为  $S$  的凸包，用  $ch(S)$  表示。利用 Lagrange 方法可得

$$W = \text{diag}\left(\frac{1}{h_1^2}, \frac{1}{h_2^2}, \dots, \frac{1}{h_m^2}\right), \quad h_j = \sqrt{M} \Delta_j \quad (9)$$

岩体物理力学参数离散性的超立方体  $R_X = \{\delta: |\delta_j| \leq \Delta_j\}$  为  $M$  维空间中的凸集，并且是紧集  $S_X^1 = \bigcup_{j=1}^M S_X^{1j}$  的凸包，也是紧集  $S_X^2 = \{\delta: |\delta_j| = \Delta_j\}$  的凸包， $S_X^1$  为  $R_X$  的外表面， $S_X^2$  为其顶点。 $S_X^{1j} = \{\delta: |\delta_j| = \Delta_j, |\delta_i| \leq \Delta_i\} (i=1, 2, \dots, M, i \neq j)$ 。 $R_X$  和  $S_X^1$  构成一个凸集合模型，也和  $S_X^2$  构成凸集合模型。

根据近代数学的凸分析表明，如果  $f$  为一个仿射函数， $S$  为一个紧集，那么  $f$  在  $S$  上和  $S$  的闭包  $ch(S)$  上取得相同的最大值和最小值。在岩体地下结构围岩稳定可靠性分析中， $f$  为岩体地下结构围岩稳定可靠性功能方程，为围岩、支护结构等物理力学参数的函数。根据围岩类别和支护结构类型的不同，该函数可能是线性的，也可能是非线性的或者高度非线性的。在  $S$  的闭包  $ch(S)$  上求一个函数的特征值，比在  $S$  上求特征值要方便、准确，计算工作量大大

减少。若由功能函数在  $S$  上求特征值则可能需进行无穷次运算，但在  $ch(S)$  上只通过枚举数次就可以求得。

### 3.3 围岩支护结构稳定非概率可靠性度量

在岩体地下结构围岩稳定性分析中，设某一地下工程围岩及支护结构的不确定性变量向量为  $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ ，由失效准则确定的功能函数(极限状态方程)为

$$M = g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (10)$$

式中： $g(X)$  为  $X=(X_1, X_2, \dots, X_m)$  的连续函数，即在超立方体  $R_X = \{\delta: |\delta_j| \leq \Delta_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$  上连续，如果是线性函数，可以直接在凸集合模型上进行区间分析。如果为非线性函数，可以采用优化技术或在  $X_j^0$  处进行摄动展开<sup>[12-14]</sup>：

$$M = g(X) = g(X^0) + \sum_{j=1}^M g_j^i \delta_j = g(X^0) + \delta^T \nabla g(X^0) \quad (11)$$

式中： $\nabla g(X^0)$  为函数  $g$  在  $X_0$  点的梯度。

此时  $g(X)$  为仿射函数，在  $R_X, S_X^1, S_X^2$  上取得相同的极值，通过  $g$  在  $X_0$  点的梯度可以直接决定  $S_X^2$  上极值点的大小  $M_{\max}, M_{\min}$  及位置<sup>[12]</sup>。根据凸集合模型理论<sup>[12, 13, 15, 16]</sup>，只要不确定性参数处于特定集合， $M = g(X)$  在该集合上(例如超立方体  $R_X = \{\delta: |\delta_j| \leq \Delta_j\}$ )的响应集量一定处于区间  $[M_{\min}, M_{\max}]$  内，不存在概率含义。如果该区间在围岩的支护结构设计安全区间(要求区间)内，则非概率可靠性凸集合模型理论认为，该围岩支护结构是可靠的。在许多情况下，围岩的支护结构设计安全区间没有明确给出，可按如下方法所得指标来确定其可靠性<sup>[15, 17]</sup>。

设  $M = g(X)$  的均值和离差分别为  $M^c, M^r$ ，令

$$\eta = M^c / M^r \quad (12)$$

按照一般的结构可靠性理论，超曲面  $M = g(X) = 0$  称为失效面。它将结构的基本参量空间分为失效域与安全域两部分，如图 1。 $M = g(X) < 0$  和  $M = g(X) > 0$  分别表示结构处于失效状态与安全状态。根据式(11)，只要  $\eta > 1$ ，则对于  $\forall X_j \in R_X (X_j = (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^m))$ ，均有  $g(X) > 0$ ，此时结构状态领域与失效域存在距离不相交，结构安全可靠。而当  $\eta < -1$  时，对  $\forall X_j \in R_X (X_j = (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^m))$ ，均有  $g(X) < 0$ ，结构状态领域位于失

效域内, 结构必然失效。当  $-1 < \eta < 1$  时, 对  $\forall X_j \in R_X$  ( $X_j = (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^m)$ ),  $g(X) < 0$  和  $g(X) > 0$  均有可能, 结构状态领域与失效域相交, 即结构可能安全, 也可能不安全<sup>[15]</sup>。从工程应用及非概率可靠性意义上讲, 此种情况下的结构是不可靠的。因此, 非概率可靠性理论认为, 结构只有可靠与不可靠两种确定状态。从式(12)还可以看出, 无量纲系数  $\eta$  越大, 则结构所处的状态域与失效域相隔越远, 结构的安全程度则越高。就理论分析而言, 这 2 点结论与一般工程意义上的可靠性是统一的。因而,  $\eta$  可作为围岩支护结构的可靠性度量<sup>[15]</sup>。

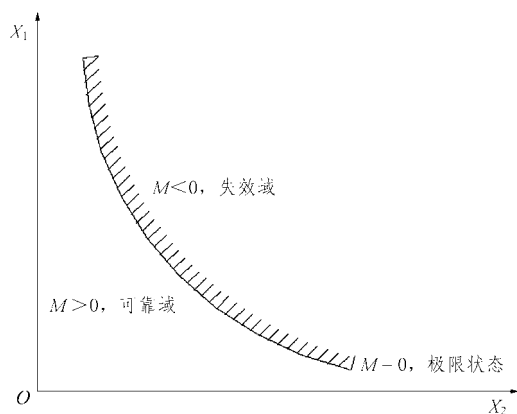


图 1 结构工作所处状态图  
Fig.1 Working state of structure

### 4 工程算例

作为工程应用实例, 下面分析一个地下软岩工程围岩支护结构的稳定可靠性问题, 该例及基本理论取自文[18]的资料。

#### 4.1 软岩隧道抗力-荷载

岩体地下结构围岩稳定可靠性方程的建立总体上涉及到两个方面的因素: 一是结构抵抗外界破坏的能力, 称为抗力, 在本文中用  $R$  表示; 另一个因素是作用在结构上的外力, 它促使结构破坏, 称为荷载, 在本文用  $S$  表示。根据安全裕量  $M$  表达的方法不同, 可靠性方程有 3 种表达方法:  $M = R - S$ ,  $M = \ln(R/S)$  或  $M = (R/S) - 1$ 。

在深部地下工程中, 由于岩体软化形成软岩。软岩结构围岩的特点是在开挖后的极短时间内冒落, 很难形成自然拱, 开挖后必须尽快进行支护, 以形成承载拱。这种情况下作用在承载拱上的荷载主要是软岩的剪胀力, 见图 2。在剪胀力  $q$  的作用下, 沿承载拱轴向单位长度的荷载合力  $S$  通过积分可得<sup>[18]</sup>

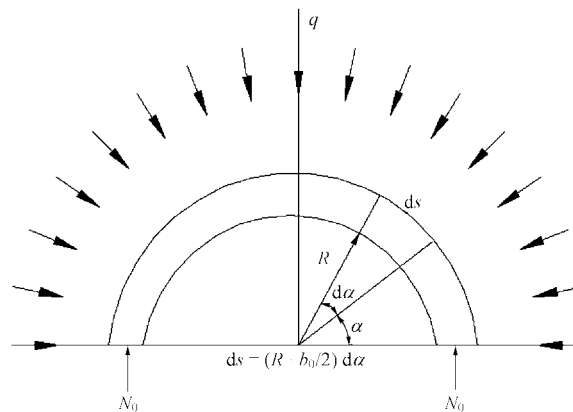


图 2 承载拱承载力计算示意图  
Fig.2 Calculation diagram of bearing Capacity for an arch

$$S = \left( R_0 + \frac{b_0}{2} \right) q \tag{13}$$

式中:  $b_0$  为承载拱厚度,  $R_0$  为巷道的等代圆半径。

对该类软岩常见而普遍的支护方式为锚喷支护。软岩中的锚喷支护组合拱内壁处承载应力  $R$  可表示为<sup>[18]</sup>

$$R = \frac{1 + \sin \phi_b Q_b}{1 - \sin \phi_b 4D^2} \tag{14}$$

式中:  $\phi_b$  为岩石内摩擦角;  $Q_b$  为锚杆约束阻力, 通常情况下等于锚杆拉拔力;  $D$  为锚杆间排距。

#### 4.2 实例

某煤矿 -490 m 水平运输大巷为半圆拱(5.0 m × 4.5 m(宽×高)), 顶板岩性为灰白泥岩、泥岩、黑泥岩和砂泥岩组成。由于受多次采动的影响, 巷道顶板较为破碎, 很难形成自然平衡拱, 巷道在首先注浆对围岩改性的基础上采用锚喷网支护。由于注浆改性, 围岩内摩擦角  $\phi_b = 40^\circ$ , 变异性很小, 在分析中将其作为确定性参数, 等代圆的半径  $R_0$  为 2.5 m。根据测试结果和统计分析, 锚杆约束阻力  $Q_b$ (kN)、围岩剪胀力  $q$ (MPa)、围岩承载拱厚度  $b_0$ (m)、锚杆间排距  $D$ (m) 等参数具有较大的变异性。 $Q_b, q, b_0, D$  的均值、离差分别为: 100, 20; 0.105, 0.015; 2.5, 0.31; 1.0, 0.14。结构离散性参数的超立方体为四维空间中的凸集, 可表示为

$$R_X = \left\{ \delta : \begin{matrix} |\delta_q| & 20, & |\delta_q| & 0.015, & |\delta_b| & 0.31, \\ |\delta_D| & 0.14 \end{matrix} \right\} = \left\{ X : \begin{matrix} |Q_b - 100| & 20, \\ |q - 0.105| & 0.015, & |b_0 - 2.5| & 0.31, \\ |D - 1.0| & 0.14 \end{matrix} \right\}$$

由于不确定性参数处于特定集合,  $M = g(X)$  在该集合上(超立方体  $R_X$ )的响应量一定处于区间  $[M_{\min}, M_{\max}]$  内。

设  $R$  的均值为  $\bar{R}$ , 离差为  $R_d$ ,  $S$  的均值为  $\bar{S}$ , 离差为  $S_d$ 。结构功能函数采用抗力-荷载模型, 则结构功能函数为  $M = R - S$ 。

功能函数  $M = M(X)$ , 为  $R, S$  的线性函数。设  $M$  的均值为  $M^c$ , 离差为  $M^r$ , 根据凸集模型理论区间运算方法<sup>[10]</sup>有

$$M^c = \bar{R} - \bar{S}$$

$$M^r = R_d + S_d$$

根据高等数学方法, 可得  $R, S, M$  在凸集模型  $R_X$  的均值和离差, 则有

$$\eta = M^c / M^r = 1.10$$

由于该地下结构没有给出明确的安全设计区间, 故采用无量纲系数  $\eta$  评价, 经计算, 无量纲系数  $\eta = 1.10 > 1.0$ , 故该支护结构稳定可靠。经检验, 该工程完工多年以来, 一直运行完好。

## 5 结 语

岩体地下结构围岩及支护结构的稳定可靠性分析一直是地下工程领域研究的难点。岩体地下结构围岩的稳定性可否采用可靠度评价也是众多研究者争论的焦点之一。其根源在于传统的可靠度分析需要拟合岩体参数的概率密度函数或隶属函数, 需要足够的信息, 而且作为评价指标的概率在工程中不便于应用。本文根据地下工程围岩的特点, 基于非概率可靠性理论, 提出了岩体不确定性参数的凸集模型表达方法及建议围岩结构的稳定可靠性评价指标及求解方法。该方法不涉及概率密度函数和隶属函数, 对信息量的要求低, 而且最后的评价指标与通常的工程概念一致, 便于应用。

### 参考文献(References) :

[1] 苏永华, 方祖烈, 高 谦. 用改进的响应面方法分析特殊地下岩体空间的稳定可靠性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1) : 54 - 59.(Su Yonghua, Fang Zulie, Gao Qian. Reliability analysis on special underground rock mass by response surface method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1) : 54 - 59.(in Chinese))

[2] 黄志全, 王思敬, 李华晔等. 岩体力学参数取值的置信度及其可靠性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1) : 33 - 35.(Huang Zhiquan, Wang Sijing, Li Huaye, et al. Exactness and reliability of

rock mechanics parameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1) : 33 - 35.(in Chinese))

[3] 刘同有, 高 谦, 马念杰. 地下巷道工程可靠度分析[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998.(Liu Tongyou, Gao Qian, Ma Nianjie. Analysis of Reliability for Underground Roadway Engineering[M]. Beijing : China University of Mining and Technology Press, 1998.(in Chinese))

[4] 何满潮, 苏永华, 景海河等. 块状岩体工程围岩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 Manchao, Su Yonghua, Jing Haihe, et al. Stability reliability analysis model of block surrounding rock for underground engineering and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3) : 343 - 348.(in Chinese))

[5] 刘 宁, 卓家寿. 节理岩体的三维随机有限元及可靠度计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4) : 297 - 305.(Liu Ning, Zhuo Jiashou. 3D random finite element and reliability calculation for joint rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4) : 297 - 305.(in Chinese))

[6] 安伟光. 结构系统可靠性和基于可靠性的优化设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.(An Weiguang. Optimization Design Based on Reliability and Reliability for Structure System[M]. Beijing : National Defense Industry Press, 1997.(in Chinese))

[7] Yakov B H. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1994, 36(14) : 227 - 245.

[8] Yakov B H. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models[J]. Structural Safety, 1995, 37(17) : 91 - 109.

[9] 何彩英, 张景会. 地震响应的凸集分析. 应用数学和力学[J]. 1997, 18(10) : 879 - 884.(He Caiying, Zhang Jinghui. The convex response set of a class of mode vibration on system[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1997, 18(10) : 879 - 884.(in Chinese))

[10] Bieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classification[M]. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1989.

[11] Ben Haim Y, Elishakoff I. Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics[M]. Amsterdam : Elsevier Science Polishers, 1990.

[12] 徐可君, 江龙平, 陈景亮等. 叶片震动的非概率可靠性研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10) : 19 - 21.(Xu Kejun, Jiang Longping, Chen Jingliang, et al. Non-probabilistic reliability research on vibration of blades[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10) : 19 - 21.(in Chinese))

[13] Elishakoff J, Lin Y K, Zhuo L P. Probabilistic and Convex Modelling of Acoustically Excited Structures[M]. Amsterdam : Elsevier Science, 1994.

[14] 邱志平, 顾元宪. 结构静力位移的非概率凸集合理论模型的摄动数

值算法[J]. 固体力学学报, 1997, 18(1): 86-89.(Qiu Zhiping, Gu Yuanxian. Perturbed numerical algorithm of non probabilistic convex set theoretical models on the static displacements of structures[J]. Acta Mechanical Solida Sinica, 1997, 18(1): 86-89.(in Chinese))

[15] 张海联, 周建平. 固体推进剂药柱结构分析的非概率凸集合理论模型[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(2): 1-5.(Zhang Hailian, Zhou Jianping. No probabilistic convex set theoretic models for structure analysis of solid propellant grain[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(2): 1-5.(in Chinese))

[16] 郭书祥, 吕震宇, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性分析模型[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 56-61.(Guo Shuxiang, Lu Zhenzhou, Feng Yuansheng. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1): 56-61.(in Chinese))

[17] 郭书祥, 吕震宇. 结构体系的非概率可靠性分析方法[J]. 计算力学学报, 2002, 19(3): 332-335.(Guo Shuxiang, Lu Zhenzhou. A procedure of the analysis of non-probabilistic reliability of structural systems[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(3): 332-335.(in Chinese))

[18] 何满潮, 苏永华. 软岩地下结构围岩稳定可靠性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 54-58.(He Mnachao, Su Yonghua. Stability model of surrounding rock of underground structure in soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 54-58.(in Chinese))

## 《岩石力学与工程学报》2004 年第 19 期被 EI 收录论文(22 篇)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
1	考虑剪胀及软化的洞室围岩弹塑性分析的统一解	范 文 俞茂宏 陈立伟等	3 213-3 220
2	准脆性材料的弹塑性损伤耦合模型	崔 崧 黄宝宗 张凤鹏	3 221-3 225
3	基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究	曹文贵 赵明华 刘成学	3 226-3 231
4	一种简化的混凝土损伤本构模型及其应用	彭向和 杨春和 万 玲	3 232-3 239
5	FSD 耦合模型在多孔水压致裂试验中的应用	李连崇 唐春安 杨天鸿等	3 240-3 244
6	材料应变局部化分析中不同内尺度律参数间相互作用问题的讨论	张洪武 张 盛 秦建敏	3 245-3 251
7	使用离散的气-水界面模拟裂隙网络非饱和渗流	宋晓晨 徐卫亚 邵建富	3 252-3 257
8	三峡花岗岩劈裂抗拉特性与弹性模量关系的研究	喻 勇 王天雄	3 258-3 261
9	基于优质块状土样的孔压静探测试结果解释	张荣堂	3 262-3 267
10	节理剪切过程中锚杆的变形分析	杨松林 徐卫亚 黄启平	3 268-3 273
11	表土沉降阶段煤矿立井井壁破裂应力分析	经来旺 刘 飞 高全臣等	3 274-3 280
12	急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究	陈卫忠 李术才 朱维申等	3 281-3 287
13	综放开采支承压力与卸压瓦斯运移关系研究	李树刚 林海飞 成连华	3 288-3 291
14	巨厚薄层状顶板回采巷道围岩裂隙演化规律的相似模拟试验研究	郜进海 康天合 靳钟铭等	3 292-3 297
15	锚网索支护软煤综放面开切眼围岩稳定性研究	张玉国 谢康和 何富连等	3 298-3 304
16	浅埋深极松软顶板采场矿压显现规律研究	李新元 陈培华	3 305-3 309
17	浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响	施成华 彭立敏 刘宝琛	3 310-3 316
18	导洞隔离桩墙结构对浅埋暗挖隧道周边地层移动的限制作用	项彦勇 贺少辉 张 弥等	3 317-3 323
19	受水压振荡时饱和砂床的液化与变形特性	鲁晓兵 张金来 王义华等	3 324-3 329
20	无限介质中波动散射问题时域求解的算法研究	陈健云 林 皋 李建波	3 330-3 336
21	水作用下岩体断裂强度探讨	汤连生 张鹏程 王 洋	3 337-3 341
22	软土复合土钉支护结构参数优化设计	万林海 余建民 冯翠红	3 342-3 347