

# 基于 Info-gap 理论的支护围岩稳健可靠性分析

司天琪, 苏永华, 肖 旺

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘 要:** 围岩支护结构稳定性是地下结构设计的关键。针对深部隧道围岩参数信息统计不足, 引入 Information-gap 理论, 建立支护围岩结构非概率可靠性分析方法。给出了无量纲不确定水平参数的 Info-gap 模型, 根据系统模型和性能要求得到可靠度分析的稳健函数, 并将结构发生失效前能够容许的不确定参数的最大波动幅值作为稳健可靠度指标。结合剪切滑移线场理论, 推导了均质弹塑性围岩最优支护阻力, 建立围岩支护结构稳定分析的响应函数。实例工程展示了稳健可靠度分析的具体操作程序。参数分析表明, 支护阻力越大, 结构越稳健性; 同时, 提高巷道围岩的内摩擦角和黏聚力是增加支护结构稳健性的关键。该方法在参数信息少、样本数据有限情况下, 是处理不确定问题的一种合理有效方法。

**关 键 词:** 支护围岩; Info-gap 模型; 稳健性评价; 响应函数; 滑移线场

**中图分类号:** U 451+2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7598 (2017) 03-0827-07

## Robust reliability analysis of support surrounding rock based on Info-gap theory

SI Tian-qi, SU Yong-hua, XIAO Wang

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** The stability of surrounding rock support structure is the key to the design of underground structure. To overcome the insufficiency of statistical information on surrounding rock parameters of deep tunnels, the information-gap theory is introduced to develop a non-probabilistic reliability analysis method for surrounding rock. The info-gap model of dimensionless parameters is given based on the uncertainty level, and the robust function of reliability analysis is obtained according to the system model and performance requirements. The maximum fluctuation amplitude of uncertainty parameter which can be tolerated before structural failure is taken as a robust reliability index. An optimal support resistance of homogeneous elastoplastic surrounding rock is obtained based on the slip-line field theory. Then a response function of stability analysis of surrounding rock support structure is established. The engineering example illustrates the specific operation procedures of robust reliability analysis. The parameter analysis shows that the greater the support resistance is, the more stable the structure is. In the meanwhile, it is shown that increasing the internal friction angle and cohesion of the surrounding rock is the key to improve the stability of the support structure. The proposed procedure is a reasonable and effective method to deal with the uncertain problem when the parameter information and sample data are limited.

**Keywords:** support surrounding rock; Info-gap model; robust evaluation; response function; slip-line field

## 1 引 言

深部隧道围岩由于其赋存的地层条件、施工环境和运营的特殊性, 在很大程度上存在着随机性、离散性和不确定性<sup>[1]</sup>。设计时根据围岩级别和地质环境选择不同的支护方式。目前, 支护围岩的稳定性分析方法主要分为 2 类: 一是将有限元数值模拟和工程实例结合<sup>[2-3]</sup>, 分析隧道周边的位移及应力状态, 并将塑性区贯通或拱顶极限位移作为失稳判据;

二是采用不确定分析方法<sup>[4-5]</sup>, 引入区间理论或模糊理论, 以区间数或隶属函数描述不确定参量, 建立可靠性度量的区间指标或模糊可靠度指标。

然而, 上述方法在分析地下结构可靠性时存在着诸多不足。首先, 地下结构不确定参量的样本采集非常困难, 获得的数据信息十分有限, 隶属函数及数值模拟不能完全体现岩土力学参数的真实分布。其次, 采用区间理论建立的非概率可靠性分析方法过于保守, 区间模型求解方法有待解决<sup>[6]</sup>。最

收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51378195, No.51078136)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378195, 51078136).

第一作者简介: 司天琪, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事地下结构与隧道工程方面的研究工作。E-mail: 15200932464@126.com

后,数值模拟对初始条件、边界条件和荷载条件等问题处理过于简化,且失稳判据有待进一步研究<sup>[7]</sup>。这些因素使得上述方法在处理地下结构不确定性时受到一定限制。

基于稳健设计思想, Ben-Haim 提出了 Information-gap (即 Info-gap) 非概率可靠性分析方法<sup>[8-10]</sup>, 它能在数据信息非常稀缺的情况下模拟和处理不确定性。首先, Info-gap 模型对数据信息要求很低, 无需掌握不确定参量的分布特征而仅需知道参量的取值范围。其次, Info-gap 理论采用稳健指标作为可靠性度量, 可以较好的反映参量动态变化对系统性能的影响。最后, Info-gap 稳健可靠性强调系统可接受性能波动的范围, 系统波动范围越小, 设计越可靠, 从而可以选择最优设计。这些特点使稳健可靠性方法为地下结构不确定分析提供了一条新途径<sup>[11]</sup>。

基于此, 本文引入 Info-gap 理论。采用 Info-gap 模型描述不确定参量实际值在名义值附近的波动, 建立基于 Info-gap 模型的稳健可靠性分析方法。然后, 由剪切滑移线场理论得到支护围岩结构最优支护阻力, 建立支护围岩稳定分析的响应函数。最后, 将该方法应用于实例工程, 分析了支护性能和不确定参量对结构稳健性能的影响, 为隧道工程结构的稳定性评价提供依据。

## 2 基于 Info-gap 模型的稳健可靠性

工程设计和施工过程中通常存在着很多的不确定性, 特别是在动态环境下, 这些不确定性变量从可操作层面上(可控和不可控)可以分为两类。如锚杆长度、锚杆强度等在设计过程中可以调整和控制, 属于设计变量, 用  $q$  表示; 另一类如岩石内摩擦角和黏聚力等参数, 其不确定性天然存在, 真实值和设计值之间的误差不可控, 称为设计参数, 用  $u$  表示。对于设计变量, 即可控变量, 通常假设其设计值与真实值一致, 不考虑两者之间的偏差对设计结果的影响<sup>[12]</sup>。基于此, 结构状态的功能函数可表示为  $Z(q, u)$ 。

### 2.1 Info-gap 模型

Ben-Haim 认为<sup>[10]</sup>, 结构的稳健性与可靠性是等价的, 当结构能够承受较大的不确定性时, 该结构是稳健的、可靠的, 否则是不稳健、不可靠的。

为了度量不确定性的大小, Ben-Haim 提出了基于凸集合模型的 Info-gap 模型<sup>[8-10]</sup>, 它采用已知和未知信息之间的偏离程度或断缺状态来描述参量存在的不确定程度。设  $R_+$  为非负实数集,  $\xi$  为不确定

参量所在的 Banach 空间  $S^*$  的一个子集, Info-gap 模型  $U(\alpha, \tilde{f})$  表示从  $R_+ \times \xi$  到  $S^*$  的幂集合上的映射;  $U(\alpha, \tilde{f})$  是不确定参量的一个集合, 称  $\alpha$  为模型的不确定性水平参数, 用来衡量设计值和真实值之间的偏差,  $\tilde{f}$  为不确定参量的中心点或名义值, 通常取参数区间值的中值, 即  $\tilde{f} = (f^L + f^R)/2$ ,  $f^L$  和  $f^R$  分别为参数区间值的上限和下限。

Info-gap 模型有多种形式, 其中无量纲不确定性水平参数模型为一封套界限模型(envelope bound model):

$$U(\alpha, \tilde{f}) = \left\{ f : \left| \frac{f - \tilde{f}}{\tilde{f}} \right| \leq \alpha \right\}, \alpha \geq 0 \quad (1)$$

由上式可知, Info-gap 模型对样本信息量要求低, 仅需知道参数取值的边界。其描述的不确定性包含两层含义: 一是在特定的不确定水平  $\alpha = \alpha_0$  下,  $f$  在集合  $U(\alpha, \tilde{f})$  中的取值是不确定的; 二是不确定性水平参数  $\alpha$  也是不确定的,  $U(\alpha, \tilde{f})$  是一个无限扩展集合。

Info-gap 模型满足以下两个定理:

- (1) 嵌套定理  $\alpha_1 \leq \alpha_2 \Rightarrow U(\alpha_1, \tilde{f}) \subseteq U(\alpha_2, \tilde{f})$
- (2) 收缩定理:  $U(0, \tilde{f}) = \{\tilde{f}\}$

嵌套定理表明, 随着  $\alpha$  值的增大, 不确定参量  $f$  实际的可能性范围也在增大, 也表明  $\alpha$  为衡量不确定性的一种方式。收缩定理表明, 若  $\alpha = 0$ , 即不考虑不确定性因素, 那么实际值  $f$  与名义值  $\tilde{f}$  之间就无偏差, 此时 Info-gap 模型退化为确定性分析模型, 名义值  $\tilde{f}$  成为惟一可能的真实值。

### 2.2 Info-gap 稳健函数

Info-gap 模型与稳健性的关系就是将未知的不确定性水平参数  $\alpha$  作为稳健性度量, 并将其可接受的量值来评价可靠程度。不确定性水平参数  $\alpha$  的可接受值由稳健函数得到。

Info-gap 稳健函数由 3 部分组成: 不确定性模型、系统模型和性能要求。Info-gap 模型  $U(\alpha, \tilde{f})$  用来描述不确定性模型, 系统模型为系统的输出或响应, 即结构状态功能函数, 用  $Z(q, u)$  表示。稳健设计要求系统响应值必须满足一定的性能要求, 即:

$$Z(q, u) \geq 0 \quad (2)$$

表示系统性能要求结构的响应函数必须不小于 0。

不确定参量  $q$  和  $u$  对输出模型的稳健性就是满足结构性能要求的最大不确定性水平  $\alpha$ :

$$\hat{\alpha}(q, u) = \max \{ \alpha : \min_{f \in U(\alpha, \tilde{f})} Z(q, u) \geq 0 \} \quad (3)$$

上式即为 Info-gap 稳健函数,  $\bar{\alpha}(q, u)$  可由迭代试算求解。式 (3) 表明, 对于设计变量  $q$ , 设计参量  $u$  和系统性能要求, 不确定性水平参数  $\alpha$  取最大值的情况下, 输出模型  $Z(q, u)$  的响应值总是不小于 0, 即结构的稳健性由其本身能容许不确定性因素波动的最大程度来描述, 在这一过程中, 结构始终保持稳定而不失效。

### 2.3 稳健指标和稳健性评价

$\bar{\alpha}(q, u)$  越小, 结构响应模型  $Z(q, u)$  能够容许不确定性因素变化幅度越小,  $\bar{\alpha}(q, u)$  越大, 则能够容许不确定性因素变化幅度越大, 结构越稳健或越可靠。因此, 将  $\bar{\alpha}(q, u)$  作为可靠度评价指标, 满足结构稳定的稳健评价模型可表述为

$$\bar{\alpha}(q, u) \geq \alpha_s \quad (4)$$

式中:  $\bar{\alpha}(q, u)$  即为稳健指标,  $\alpha_s$  为实际测量得到的参数变化幅值, 可以由下式得到

$$\alpha_s = (f^R - \tilde{f}) / \tilde{f} = (\tilde{f} - f^L) / \tilde{f} \quad (5)$$

图 1 为稳健评价和实测参数区间的关系。

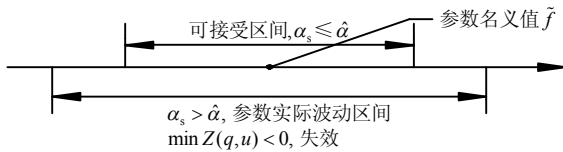


图 1 稳健评价模型

Fig.1 Robustness evaluation model

当工程设计满足上述稳健评价模型时, 实测不确定参量波动在可接受区间内, 结构满足性能要求, 处于稳定状态。

## 3 支护围岩结构响应模型

支护围岩结构稳定分析的响应函数是稳健分析的基础, 现不考虑围岩对支护结构施加的弹性反力, 围岩支护结构功能函数可以表示为

$$Z = R - S \quad (6)$$

式中:  $P$  为支护结构提供的抗力;  $S$  为作用在支护结构上的荷载或收敛-约束曲线中围岩不出现剪切滑移破坏的最小支护阻力。

### 3.1 轴对称开挖隧道的的基本模型

目前, 用于分析支护与围岩的相互作用仍然采用简单的轴对称开挖模型。图 2 为开挖半径为  $R$  的圆形隧道, 处于均质、连续且各向同性的无限大地层中, 原岩应力为静水压力  $q_0$ , 假设隧道洞壁周边

径向支护压力均相等且为  $p_a$ , 隧道在开挖前洞室周边径向压力等于原岩初始地应力, 即  $p_a = p_0$ , 隧道开挖后,  $p_a$  由  $q_0$  逐渐减小到  $p_i$ 。若  $p_i$  小于隧道的临界应力  $p_{cr}$  (即达到应力极限强度), 洞室周边将形成半径为  $R_p$  的塑性圈, 位于塑性圈内的围岩将出现塑性变形, 而位于塑性区以外的围岩仍处于弹性状态。将该问题作为平面应变问题处理, 分析时不考虑围岩自重影响。

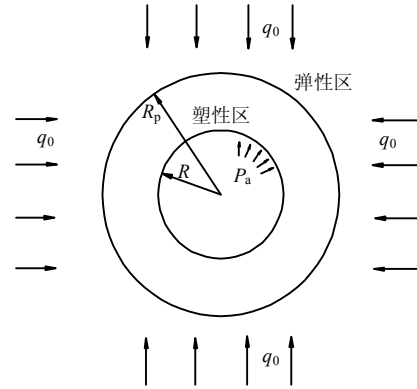


图 2 静水应力场的开挖模型

Fig.2 Excavation model of hydrostatic stress field

### 3.2 最小支护阻力

最小支护阻力  $p_{min}$  是支护设计的关键, 但目前确定  $p_{min}$  还没有较好的计算方法, 本文采用滑移线场理论估算<sup>[13-14]</sup>。滑移线场法就是在岩土受力体中构造相应的滑移线网, 然后利用滑移线的性质和边界条件, 求出塑性区应力场的分布和极限荷载。

取具有无限边界的地下圆形巷道为理论分析模型, 围岩为典型的  $\varphi$ - $c$  材料, 破坏区滑移线为两族旋转方向不同、极点在巷道中心的斜交同心对数螺旋线 (见图 3), 虚线为巷道围岩发生剪切滑移破坏的弹塑性交界面。

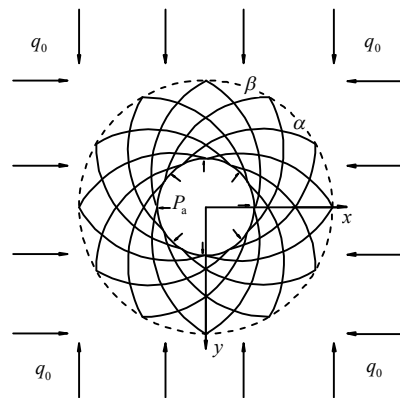


图 3 圆形巷道剪切滑移线应力边界条件

Fig.3 Stress boundary condition of shear slip-line of a circular tunnel

由特征线解法可以得到有重  $\varphi$ - $c$  型岩土材料沿  $\alpha$  线和  $\beta$  线的滑移线平均应力  $p_m$  以及边界主应力与  $y$  轴夹角  $\theta$  的差分方程为

$$\left. \begin{aligned} \alpha: dp_m - 2(p_m + \sigma_c) \tan \varphi d\theta &= \frac{\gamma \sin(\theta + \mu) dy}{\cos \varphi \cos(\theta - \mu)} \\ \beta: dp_m + 2(p_m + \sigma_c) \tan \varphi d\theta &= -\frac{\gamma \sin(\theta - \mu) dy}{\cos \varphi \cos(\theta + \mu)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_c = c \cot \varphi$ ,  $\sigma_c$  为黏聚内应力;  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角;  $\mu$  为两条滑移线方向与边界主应力作用方向之间的夹角。

孟波<sup>[14]</sup>通过塑性区边界面上的应力屈服条件 (Mohr-Coulomb 屈服准则) 及边界条件, 得到两向等压条件下圆形巷道最小支护阻力的理论解 (差分方程的特解) 为

$$P_{\min} = (q_0 + \sigma_c) e^{2(\theta_1 - \theta_2) \tan \varphi} - \sigma_c \quad (8)$$

式中:  $P_{\min}$  为最小支护阻力或最优支护阻力;  $q_0$  为原岩应力;  $(\theta_1 - \theta_2)$  为同一条剪切滑移线终点和起点处边界主应力与  $y$  轴夹角插值, 是表征巷道围岩变形破坏特征参数, 通过实测得到。

### 3.3 支护抗力确定

支护结构通常根据围岩状况和地质环境选择。本文在确定支护抗力时仅以锚喷支护为例, 计算时认为支护与围岩紧密接触且压力分布均匀。锚喷支护抗力由混凝土支护抗力、金属网支护抗力、锚杆支护抗力和岩石承压拱支护抗力组成。一般情况下, 上述 4 者不可能同时达到抗力最大值。为简化处理, 假设结构体系的抗力为以上 4 者同时发挥最大效应时的抗力叠加。

(1) 喷射混凝土支护抗力为

$$P_1 = \frac{2d\tau_s}{b \sin \phi} \quad (9)$$

式中:  $d$  为混凝土喷层厚度;  $\tau_s$  为喷层的抗剪强度;  $\phi$  为喷层的破坏剪切角,  $\phi = 45^\circ - \varphi/2$ ;  $b$  为剪切体的总高度,  $b = 2(D-d) \cos \phi$ ,  $D$  为滑动区域高度范围内的坑道平均半径。

(2) 金属网支护抗力为

$$P_2 = \frac{2F_w \tau_m}{A b \sin \phi} \quad (10)$$

式中:  $\tau_m$  为钢筋网的抗剪强度;  $F_w$  为单根横向钢筋的面积;  $A$  为钢筋网横向钢筋的间距。

(3) 锚杆支护抗力为

$$P_3 = \frac{2a_0 F_G \sigma_t \cos \omega}{b S_1 S_b} \quad (11)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_b$  分别为锚杆沿隧道横向和纵向间距;  $a_0$  为剪切滑移体弧长之半,  $a_0 = a\pi(90^\circ - \phi)/180^\circ$ ;  $F_G$  为单根锚杆截面积;  $\sigma_t$  为锚杆的抗拉强度;  $\omega$  为锚杆的平均倾角,  $\omega = 45^\circ - \phi/2$ 。

(4) 岩石承压拱支护抗力为

$$P_4 = \frac{2a}{b} (\tau^R \cos \psi - \sigma_n^R \sin \psi) \quad (12)$$

式中:  $\tau^R$ 、 $\sigma_n^R$  分别为作用于岩石支撑环区域内楔形滑动岩块滑动面上的剪应力和正应力。  $\psi$  为岩石支撑环区域内楔形滑动岩块滑动迹线的平均倾角。

由式 (9) ~ (12) 可以得到锚喷支护总支护抗力为

$$P_a = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (13)$$

于是, 支护围岩稳定分析的响应函数可以写为

$$Z = P_a - [(q_0 + \sigma_c) e^{2(\theta_1 - \theta_2) \tan \varphi} - \sigma_c] \quad (14)$$

由式 (14) 可以看出, 响应函数为原岩应力  $q_0$ 、围岩内摩擦角  $\varphi$ 、黏聚力  $c$ 、破坏特征参数  $(\theta_1 - \theta_2)$  和支护抗力  $P_a$  的函数。下面通过实例工程展示支护围岩结构稳健评价的具体操作流程。

## 4 工程案例分

### 4.1 工程概况

新上海一号煤矿位于内蒙古自治区鄂托克前旗境内<sup>[14]</sup>。矿井初期采用主、副、风 3 个中央并列式设计, 其中副井净直径为 8.0 m, 采用双层钢筋混凝土井壁结构设计。副井井壁在马头门施工后的第 3 个月即出现裂缝, 前后进行了 3 次修复, 第 3 次修复完成井壁仍继续变形破裂, 两侧马头门及其上方的管子也发生大规模变形破坏。最终井筒处出现多条裂缝, 裂缝最长达 5 m, 井壁整体内移近 1.2 m, 壁后原岩破裂。破裂处井壁竖筋多成拉剪断裂, 断口处有缩颈特征。

### 4.2 锚固支护参数

井筒围岩破坏后, 围岩内部节理、裂隙发育, 形成滑移线。现场利用岩石钻孔剪切仪对井筒围岩进行了测试, 并选取 2 号和 3 号测点 (松动范围内破裂围岩) 参数进行支护设计。经过对测试结果的线性回归分析, 测点处围岩的黏聚力为 0.15 ~ 0.18 MPa, 围岩内摩擦角为 30.4 ~ 31.8°, 根据相

邻钻孔摄像资料推断，锚固范围外围岩破裂特征角取  $120^\circ$ 。利用水压致裂法测得井底车场水平井筒 18~24 m 深度范围内最大原岩应力为 26 MPa。为了确保支护措施满足要求，设计按照支护阻力 1.949 MPa 进行支护方案设计。

### 4.3 分析过程及结果

(1) 不确定参量的确定。最小支护阻力是基于静水压力条件得到的，实际工程中围岩受力状态复杂，并且设计中不确定参量较多，为简化分析并使分析结果可靠，仅选取内摩擦角及黏聚力为不确定变量，其他参量取最不利情况。计算各不确定参量对应的名义值分别为： $\bar{\varphi} = 31.1^\circ$ ， $\bar{c} = 0.165$  MPa。由现场实测，原岩应力  $q_0 = 26$  MPa， $(\theta_2 - \theta_1) = 120^\circ$ 。根据设计方案，支护抗力  $P_a = 1.949$  MPa

(2) 实测参数变化幅值  $\alpha_s$ 。由 Info-gap 模型可以得到各参量的实测参数变化幅值： $\alpha_s(\varphi) = 0.022\ 50$ ， $\alpha_s(c) = 0.090\ 91$ 。为了使围岩支护结构在设计参数最大波动情况下仍保持稳定，选取参数变化幅值的最大值作为实测参数变化幅值： $\alpha_s = 0.090\ 91$ 。

(3) 稳健指标的求解。稳健指标  $\bar{\alpha}(q, u)$  即为求解最优化问题：

$$\bar{\alpha}(q, u) = \max\{\alpha : \min_{f \in U(\alpha, \bar{f})} (P_a - P_{\min}) \geq 0\} \quad (15)$$

由迭代法求得  $\bar{\alpha}(q, u) = 0.110\ 45$ 。

(4) 稳健评价。将稳健指标  $\bar{\alpha}(q, u)$  和  $\alpha_s$  比较， $\bar{\alpha}(q, u) > \alpha_s$ ，即参数实测波动范围在允许波动范围内，因此，按照支护阻力 1.949 MPa 设计是稳健的。

现场修复采用锚喷网索和高强度格栅混凝土支护，通过 4 个月的连续观测，井筒基本无变形，围岩压力趋于稳定。

## 5 参数分析与讨论

### 5.1 支护性能对稳健指标的影响

当巷道围岩黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和破坏特征参数  $(\theta_2 - \theta_1)$  与原设计相同，表 1 为支护阻力从 1.2 MPa 增加到 2.4 MPa 时稳健指标的变化。

表 1 支护性能对稳健指标的影响

Table 1 Influence of support performance on robustness

支护阻力/MPa	稳健指标 $\bar{\alpha}(q, u)$	支护阻力/MPa	稳健指标 $\bar{\alpha}(q, u)$
1.2	0	2.0	0.117 46
1.4	0.024 95	2.2	0.143 73
1.6	0.058 49	2.4	0.168 27
1.8	0.089 17		

由表 1 可知，在原岩应力和围岩力学参数相同

的情况下，支护阻力越大，稳健指标也越大，结构越稳健。例如支护阻力从 1.8 MPa 增加到 2.0 MPa，稳健指标增长 0.028 29，相对增长 31.73%，意味着支护结构在不失效情况下允许不确定参量在更大的范围内波动。结构稳健性是以牺牲经济利益为前提，为了得到更高的稳健性，必须花费更多的金钱来增加支护阻力。因此，在设计时必须权衡稳健性和经济利益的关系，根据结构安全和经济的最佳平衡点确定稳健指标。在目前的稳健可靠度研究中，稳健指标并没有规范的标准值，通常只能根据经验来定。

当支护阻力等于 1.2 MPa 时， $\bar{\alpha}(q, u) = 0$ ，意味着不确定参数的微小波动都会导致结构失效，设计是不稳健、不可靠的，因此，要避免此种情况发生。

### 5.2 参数敏感性分析

现考虑内摩擦角和黏聚力对稳健指标的影响。当原岩应力、支护阻力和破坏特征参数与原设计相同，表 2 和图 4 为黏聚力名义值分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 MPa，内摩擦角名义值从  $27^\circ$  增加到  $41^\circ$  时，稳健指标的变化情况。

表 2 不确定参数对稳健指标的影响

Table 2 Influence of uncertain parameters on robustness

内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力/MPa			
	0.1	0.3	0.5	0.7
27	0	0.017 73	0.065 740	0.108 23
29	0.032 46	0.080 51	0.122 286	0.160 60
31	0.093 55	0.135 73	0.173 380	0.207 12
33	0.146 98	0.184 69	0.218 360	0.248 72
35	0.194 65	0.228 39	0.258 700	0.286 15
37	0.237 27	0.267 64	0.295 060	0.320 01
39	0.275 60	0.303 09	0.328 020	0.350 79
41	0.310 27	0.335 25	0.358 020	0.378 89

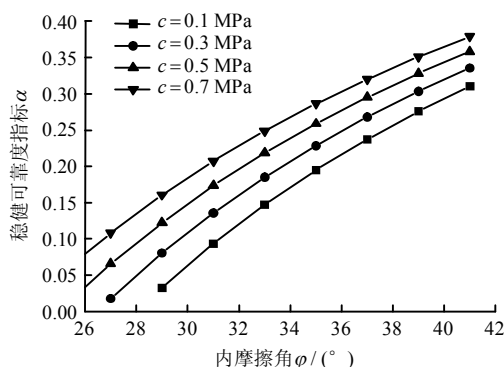


图 4 黏聚力对稳健性的影响

Fig.4 Influence of rock cohesion on robustness

对于图中的每一条曲线，随着内摩擦角名义值的增加，稳健指标呈非线性增加。例如，黏聚力  $\bar{c} = 0.3$  MPa，内摩擦角从  $29^\circ$  增加到  $31^\circ$  时，稳健

指标增加 0.055 22, 内摩擦角增加到  $33^\circ$  时, 稳健指标增加 0.104 18。当控制内摩擦角不变时, 黏聚力越大, 稳健指标也越大。因此, 围岩力学参数越好, 稳健指标也越大, 系统能够允许不确定参数在更大的范围内波动, 结构越稳健。

一般来说, 围岩级别越高, 岩石力学参数越好, 内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  也越大。洞室开挖后, 巷道周边围岩黏聚力和内摩擦角通常发生不同程度的降低, 支护时采取注浆措施以及锚杆挤压作用能合理改善围岩力学性质, 进而提升支护结构的稳健性。另一方面, 当设计要求相同的稳健性时, 围岩级别越高所需要的支护阻力越小。

在参数敏感性分析时, 内摩擦角和黏聚力作为不确定变量, 其增量是参数的名义值和参数的区间值同时发生变化。因此, 以稳健指标进行的参数敏感性分析考虑了参数的不确定性, 更贴近工程概念。

## 6 结 论

(1) 引入 Info-gap 理论, 建立了基于 Info-gap 模型的稳健可靠度分析方法, 稳健可靠度指标越大, 结构越稳健。该方法在参数信息少、样本数据有限情况下, 是处理不确定问题的一种合理有效方法。

(2) 假定围岩为理想弹塑性材料, 基于剪切滑移线场理论得到支护结构的最优支护阻力, 由此得到围岩支护体系稳定可靠度分析的显示功能函数, 避免了稳健函数求解时繁复的迭代试算问题。

(3) 设计支护阻力越大, 结构越稳健, 同时意味着必须牺牲一定经济效益; 稳健指标随内摩擦角  $\varphi$  及黏聚力  $c$  呈非线性增长, 增加围岩的内摩擦角和黏聚力是提高支护体系稳健性的关键。

(4) 稳健可靠度方法为岩土工程不确定性分析提供了一种新的途径。稳健指标的确定以及将稳健可靠分析模型和概率可靠性模型相结合, 是进一步发展稳健可靠度分析方法的重点。

## 参 考 文 献

- [1] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.  
LI Zhi-ye, ZENG Yan-hua. Design principles and methods of underground structures[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.
- [2] 肖同强, 柏建彪, 王襄禹, 等. 深部大断面厚顶煤巷道围岩稳定原理及控制方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1874—1820.  
XIAO Tong-qiang, BO Jian-biao, WANG Xiang-yu, et al. Stability principle and control of surrounding rock in deep coal roadway with large section and thick top-coal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1874—1820.
- [3] 肖明, 张雨霆, 陈俊涛, 等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2613—2618.  
XIAO Ming, ZHANG Yu-ting, CHEN Jun-tao, et al. Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2613—2618.
- [4] 邵国建, 苏静波. 区间可靠性分析方法及在地下隧道结构计算中的应用[J]. 计算力学学报, 2013, 30(1): 71—75.  
SHAO Jian-guo, SU Jing-bo. Interval reliability analysis method and its application to underground tunnel structure[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2013, 30(1): 71—75.
- [5] 孙杰, 张晓, 牟在根. 不同隶属函数对地下连续墙模糊可靠度影响的分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 838—840.  
SUN Jie, ZHANG Xiao, MOU Zai-gen. Analysis of effect of different membership function on calculation of fuzzy reliability in underground continuous wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 838—840.
- [6] RAMON E, MOORE R, BAKER K, et al. Introduction to interval analysis[M]. U.S.: Society for Industrial & Applied Mathematics, 2009.
- [7] 刘镇, 周翠英, 房明. 隧道变形失稳过程的非线性动力学分析与破坏判据研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3887—3892.  
LIU Zhen, ZHOU Cui-ying, FANG Ming. Failure criterion and deformation instability evaluation analysis of a tunnel by nonlinear dynamics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3887—3892.
- [8] BEN-HAIM Y. Info-gap decision theory for engineering design, or: Why 'Good' is preferable to 'Best'[M]. Boca Raon: CRC Press, 2005.
- [9] BEN-HAIM Y. Value at risk with Info-gap uncertainty[J]. **The Journal of Risk Finance**, 2005, 6(5): 388—403.
- [10] BEN-HAIM Y. Design certification with information-gap uncertainty[J]. **Structural Safety**, 1999: 269—289.
- [11] 苏永华, 李翔. 基于 Info-gap 理论的地下结构稳健性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(2): 227—233.  
SU Yong-hua, LI Xiang. Robust reliability analysis for underground structures based on Info-Gap theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 32(2): 227—233.