2017年2月 February 2017

文章编号: 1004-0609(2017)-02-0325-10

爆破荷载下巷道关键块体区间的 非概率可靠性



高赛红^{1,2}, 曹平¹, 汪胜莲², 陈瑜¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083;2. 江西理工大学 应用科学学院,赣州 341000)

摘要:在关键块体稳定性的研究过程中,传统方法需要通过力学试验获得岩体力学参数,然而由于岩体结构复杂,力学试验样本数量有限,很难确定某一个力学参数的概率密度分布,严重影响传统随机概率可靠性分析方法 的准确性。当采用区间非概率可靠性分析方法计算可靠度时,通常采用区间数来表示参数的取值,能够较好地反 映样本数据较少时参数取值的不确定性,确定某一参数的取值范围比确定参数的概率分布容易。根据区间数学理 论,采用区间数表示参数取值,在分析参数取值特性基础上,采用岩体区间强度值,以此反映围岩可靠性分析的 不确定性特征。通过探讨区间非概率可靠性指标求解方法,建立爆破荷载下区间可靠性综合分析模型。将提出的 方法应用到具体工程中。结果表明:区间非概率可靠性分析与安全系数区间范围和随机可靠度相比,具有无需求 解概率密度函数,通过较少样本的区间表示即可实现可靠性分析,能够表征关键块体整体稳定可靠特征的优点。 关键词:爆破荷载;损伤;巷道;关键块体;区间非概率可靠性

中图分类号: TU457

文献标志码: A

在采矿开挖工程中,由于岩体被节理等结构面切 割成大小不同、形状不一的各种岩块,其中暴露在临 空面上的某些块体在失去原有的静力平衡状态后,会 沿着结构面滑移并导致局部掉块,进而产生连锁反应, 造成一定范围内岩体的局部失稳,因此块体稳定性是 研究地下工程围岩整体稳定性的一项极为重要的内 容。由 GOODMAN^[1]和石根华^[2]提出的块体理论是近 年来发展和完善起来的一种适合于工程岩体稳定性分 析的有效方法。

目前,考虑围岩稳定可靠性分析方法研究取得了 卓有成效的成果,如基于概率理论的可靠性分析方法 逐渐被应用于岩土工程稳定可靠性分析^[3-4],为考虑不 确定性因素影响的岩土工程计算提供了一种行之有效 的方法。

尽管基于概率理论的可靠性分析方法在围岩稳定 性研究中取得了不同程度的进展,但仍然存在诸多不 足。其一,围岩稳定性概率可靠性分析均需确定参数 概率分布形式,这在勘察取样点及试验数据有限的情 况下是困难的,且概率分布形式的假定存在适用性的 基于区间理论的非概率可靠性分析方法^[5-6]为本 文作者研究提供了一个良好的思路,区间数能够较好 地反映样本数据较少时参数取值的不确定性,减少了 对数据信息量的过多依赖。在工程研究中,某个力学 参数范围的确定往往比确定单一的具体定值或参数的 概率分布要容易得多,因此,采用区间非概率可靠性 分析方法对地下巷道节理岩体稳定性进行评价成为本 文研究的重点。

另一方面,因开挖和爆破作业,特别是频繁爆破 作业,会在一定程度上造成岩体损伤,从而导致岩体 完整性降低和力学参数弱化。爆破开挖损伤区,亦称

问题,不同形式所对应的可靠性指标存在较大差异 性^[4-5]。其二,概率可靠性分析模型对参数取值的敏感 性很强,分布函数截尾数据的小误差能导致不可接受 的可靠性指标分析结果,这在数据量有限时往往难以 避免^[5]。其三,围岩是否稳定,是相对性,没有严格 的区分指标,存在模糊性。因此,有必要针对上述存 在的问题展开进一步研究,建立在数据量较少的情况 下,也能有效地分析围岩体可靠性的分析方法。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51274249)

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-12-25

通信作者: 曹 平, 教授, 博士; 电话: 13973128263; E-mail: pcao_csu@sina.com

爆破开挖扰动区,此区域内的岩体,由于卸载交替作 用和爆破动应力产生的累积损伤效应, 岩体逐渐从未 扰动状态向完全扰动状态过渡。爆破规模较大或距离 爆源较近的岩体,爆破损伤较严重,受扰动程度也较 大,甚至产生断裂或破碎,反之,则爆破损伤较轻, 受扰动程度也较小,其至不会受到爆破开挖的影响。 因此, 岩体爆破开挖损伤程度, 以及受扰动程度与岩 体开挖方法,爆破作业规模、爆心距以及岩体质量、 岩体结构种类等因素密切相关。岩体爆破开挖损伤程 度和受扰动程度不同,则岩体完整性降低程度和岩体 力学参数的弱化程度也不同。Hoek-Brown 经验公式只 考虑了未扰动和扰动岩体两个极端情况,而不考虑岩 体实际受扰动程度对岩体力学参数弱化程度的影响, 必然导致计算结果产生较大偏差。开挖方法影响系数 d_f,考虑了不同开挖方法对岩体扰动程度的影响,对 m_b和s的取值方法进一步完善,然而给出的开挖方法 影响系数 df 难以确定,不便于工程应用。在确定 mb 和 s 的取值时, 对介于未扰动状态和完全扰动状态之 间的岩体, 若按未扰动岩体处理, 会导致岩体力学参 数取值偏高; 若按照完全扰动岩体处理, 又会导致岩 体力学参数取值偏低。因此,如何有效地、简便地确 定开挖和爆破带来的影响,真实地反映岩体受扰动程 度,以便能够更好地确定介于未扰动状态和完全扰动 状态之间岩体的力学参数,已成为 Hoek-Brown 经验 公式计算岩体力学参数的关键问题之一。由于岩体受 扰动程度与爆破损伤程度、岩体完整性系数密切相关, 为克服 Hoek-Brown 经验准则及其上述改进公式的不 足,更好地描述岩体受扰动程度对岩体力学参数的影 响,准确地表征不同扰动程度状态下参数 mb 和 s 的取 值,考虑爆破损伤作用时 Hoek-Brown 法 D 值取值根 据区域爆破损伤参数确定,即已有岩体损伤量的表征 为单个测量点,或者单个测量剖面岩体的损伤提供有 效途径。但在实际工程中,人们主要关注的是区域岩 体的损伤情况,单个剖面或者单个点的结果无法表征 或者代表区域岩体的损伤情况。为此,本文作者提出 基于正态分布和指数正态分布方法确定区域岩体损伤 的指标。

综上所述,本文作者根据区间数学理论^[7],采用 区间数表示参数取值,在分析参数取值特性基础上, 采用岩体区间强度值^[8–9],以此反映围岩可靠性分析的 不确定性特征。在充分考虑爆破损伤的情况下,通过 探讨区间非概率可靠性指标求解方法,建立爆破荷载 下地下巷道围岩可靠性综合分析方法,并与随机可靠 度的计算结果进行比较,以期进一步完善岩体稳定可 靠性的分析方法与理论。

爆破荷载下关键块体区间非概率 可靠性模型

1.1 爆破荷载下关键块体区间非概率可靠性分析的 功能函数

块体沿单结构面滑动和沿双结构面滑动的稳定可 靠性分析极限状态方程可表示为

$$g(\varphi, c) = Q\cos\alpha \tan\varphi + cS - Q\sin\alpha \tag{1}$$

$$g(\varphi_i, \varphi_j, c_i, c_j) = N_i \tan \varphi_i + N_j \tan \varphi_j + c_i S_i + c_j S_j - Q \sin \alpha$$
(2)

式中: Q、c、 \u03c9、S 分别为块体质量、考虑爆破作用的粘聚力、考虑爆破作用的内摩擦角、滑动面面积; \u03c9_i、c_i、\u03c9_j、c_j分别为考虑爆破损伤的滑动面 i 和滑动面 j 的内摩擦角和粘聚力; N 为正应力(该正应力考虑了爆破荷载的作用,具体原理参见文献[10-11]), \u03c9 为重力和正应力的夹角

为了便于分析,根据区间值标准化方法先将区间 功能函数式转化为标准形式,即

$$Z_{1} = g(\delta_{1}) = Q \cos \alpha \tan(\varphi_{i}^{c} + \varphi_{i}^{r} \delta_{\varphi_{i}}) + (c_{i}^{c} + c_{i}^{r} \delta_{c_{i}}) S - Q \sin \alpha$$
(3)

$$Z_{2} = g(\delta_{2}) = (c_{i}^{c} + c_{i}^{r} \delta_{c_{i}})S_{i} + (c_{j}^{c} + c_{j}^{r} \delta_{c_{j}})S_{j} + N_{i} \tan(\varphi_{i}^{c} + \varphi_{i}^{r} \delta_{\varphi_{i}}) + N_{j} \tan(\varphi_{j}^{c} + \varphi_{j}^{r} \delta_{\varphi_{j}}) - Q\sin\theta$$

$$(4)$$

式中: $\tan(\varphi_i^c + \varphi_i^r \delta_{\varphi_i})$ 、 $(c_i^c + c_i^r \delta_{c_i})$ 与 $\tan(\varphi_j^c + \varphi_j^r \delta_{\varphi_j})$, $(c_j^c + c_j^r \delta_{c_j})$ 分别为结构面 i、j的区间抗剪强度; $\delta_1 = \left[\delta_{\varphi_i}, \delta_{c_i}\right]$ 、 $\delta_2 = \left[\delta_{\varphi_i}, \delta_{c_i}, \delta_{\varphi_j}, \delta_{c_j}\right]$ 为标准化区间值 向量; 其中, $c_i^c = (c_i^L + c_i^R)/2$, $c_i^r = (c_i^R - c_i^L)/2$, $\left[c_i^L, c_i^R\right] = c_i^c \pm c_i^r \delta_{c_i}$, $\delta_c \in [-1,1]$, 其余类推, 其中 c_i^L 为其下限值; c_i^R 为其上限值。

1.2 区间非概率可靠性求解方法

由非概率可靠性理论可知标准化区间功能函数式 (3)与(4)的非概率可靠性指标 η_m (m=1, 2)的求解式^[6] 为

$$\eta_m = \min\left\{ \left\| \boldsymbol{\delta}_m \right\|_{\infty} \right\} \tag{5}$$

并满足条件:

$$Z_m = g(\boldsymbol{\delta}_m) = 0 \tag{6}$$

针对非概率可靠性指标 η_m 的求解方法,江涛等^[6]

在前人研究基础上提出了一维优化算法,能有效避免 复杂功能函数运算过程中的区间扩展,在本研究中将 采用此方法进行非概率可靠性指标的求解。具体分析 过程如下:

1) 先讨论以弯沉表达的极限方程情况下区间非 概率可靠性的求解问题,列出 δ_1 扩展空间 $C_{\delta_1}^{\infty} = \{\delta_1 : \delta_{1k} \in (-\infty, +\infty), k=1, 2\}$ 的原点 $O_{\delta_1}^{\infty} = \{\delta_1 : \delta_{1k} = 0, k=1, 2\}$ 和 δ_1 形成的对称凸域 $C_{\delta_1} = \{\delta_1 : |\delta_{1k}| \leq 1, k=1, 2\}$ 的顶点 $P_{\delta_1}^j = \{\delta_1 : |\delta_{1k}| = 1, k=1, 2\}$ (*j*=1, 2²)的 2²⁻¹条超射线,记为 $\delta_{11} = \pm \delta_{12}$,并满足 $\delta_1 \in C_{\delta_1} \subset C_{\delta_1}^{\infty}$;

2) 将 $\delta_{11} = \pm \delta_{12}$ 及*m*=1 分别代入非概率可靠性指标求解需满足的方程式(5)和(6),得到2个一元高次非线性方程,采用数值方法求解可得非概率可靠性指标的解集合 { η_{11}, η_{12} };

3) 舍去复数解,并取实数解的绝对值,最小的即 为结构区间非概率可靠性指标 η。

同理,应力表达的极限方程(5)的求解问题同 1)、 2)和 3),求得非概率可靠性指标解集合,进而由式(6) 可得结构区间非概率可靠性指标 η₂。

1.3 关键块体滑动力学模型中爆破荷载的确定

爆破地震惯性力计算如何确定呢?块体动力稳定 性分析是将分布在块体上的动态爆破惯性力拟静力 化,然后作为一种荷载作用参与块体稳定性计算。这 种方法分析简便,概念清晰,避开爆破地震特有的复 杂性,且能较好地结合工程现场实测资料,具体计算 公式如下:

$$F = \beta_{\rm d} K_{\rm d} W \tag{7}$$

式中: β_d 为爆破动力系数,取 0.1~0.2; K_d 为地震系数, $K_d = a/g(a)$ 为质点最大震动加速度; g为重力加速度); W为岩体重力,单位为 kN。由式(7)可知,确定爆破地震惯性力 F的关键是获得块体上介质质点最大震动加速度值。

目前,国内一致认为块体等整体性构筑物的破坏 与质点震动速度关系较为密切,而且采用质点震动速 度可将地震波所携带的能量与所产生的动应力相联系 起来。同时质点震动速度测试又较为简便,所以质点 震速已成为衡量爆破地震效应的最常用指标^[12-14]。

对于简谐振动,速度与加速度峰值间存在下面的 关系:

$$a_{\max} = 2\pi f v_{\max} \tag{8}$$

借助于这一基本关系,可将同样的关系推广到爆 破振动的统计规律中来,而此时的 *f* 不再是某一确定 简谐振动的频率,而应该是具有确定统计意义、有代 表性的频率值^[15-17]。由于地震波是多频率成分组成的 复杂震动,且各频率成分的贡献各有大小^[18-20],如果 选取贡献最大的频率作为*f*,文献[15]显示其结果是安 全的。因此,采用文献[14]方法,将爆破振动信号进 行小波包分析,即可得爆破震动信号在不同频带上的 能量分布图以及各频带上的主频,并将其中贡献最大 的主频率作为*f*。

1.4 考虑爆破损伤作用时 Hoek-Brown 法 D 值取值

首先测量研究区域内的未损伤的若干剖面波速值 *V_i*,再测量爆破损伤后的波速值*DV_i*,对波速值*V_i*正态分布进行正态分布拟合,求解*V_i*的正态分布与指数 正态分布的概率密度函数,求出*V_i*在正态分布中概率 密度最大值对应的*V_i*,记作*NV_i*,求出*V_i*在指数正态 分布中概率密度最大值对应的*V_i*,记作*EV_i*;同理求 出爆破损伤后*DV_i*对应的*NDV_i*,*EDV_i*则该区域基于 正态分布和指数正态分布的损伤量的*ND*和*ED*分别 可以表示为

$$ND = 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{NDV_i}{NV_i}\right)\right]^2 \tag{9}$$

$$ED = 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{EDV_i}{EV_i}\right)\right]^2 \tag{10}$$

区域损伤的95%参考值范围亦可以通过以上求得 概率密度函数得到,计算思路同上。取95%参考值范 围下限可求得区域损伤95%参考值范围的下限,取 95%参考值范围上限可求得区域损伤95%参考值范围 的上限。

2 工程应用与讨论

2.1 工程概况

一露天和地下联合开采矿山,有6种力学介质,即矽卡岩、硅化岩、次英安斑岩、硫铁矿体、褐铁矿、花岗闪长斑岩。根据岩体结构特征、岩体分级指标和 工程经验,综合选取的岩体力学参数。

分析区域采场顶板为硅化岩岩组,该岩组为近矿 体围岩蚀变形成,为块状结构,主要发育5组节理, 其产状分别为: 332°∠65°、53°∠52°、26°∠85°、 179°∠72°、213°∠50°,节理长度大于1.5 m,同一地 点大约3组节理,局部填充有少量方解石、铁质和泥 质,节理面平直,裂隙水微弱,开挖面产状260°∠15°。 本研究中选取巷道断面为三心拱,其净宽为 4.2 m,墙 高为 3.0 m,拱高度为 1.4 m。

主要力学参数如下: 弹性模量 6130~6256 MPa; 泊松比 0.12~0.15; 密度 2736~2849 kg/m³; 抗拉强度 0.85~1.03 MPa。

采用 Hoek-Brown 法确定爆破扰动下粘结力和内 摩擦角,计算中 D 的取值根据 1.4 节区域损伤的方法 求解,求得粘结力为 1.12~1.91 MPa;内摩擦角为 28°~ 36°。

该矿山巷道由于结构面的切割,在巷道周围形成 了大量的块体。矿山爆破与开挖等作业过程经常会对 这些块体造成扰动,不但对矿山生产是一个巨大隐患, 而且对人员的安全也构成了巨大的威胁。为了保证安 全生产,需要对巷道周围的块体进行稳定性分析。拟 通过块体分析软件进行分析,得到块体相关数据,然 后计算其区间非概率可靠度和随机可靠度,并进行比 较分析。

2.2 结果与讨论

根据第1节的理论计算方法,各结构面的赤平投 影见图 1。本研究中每次参与组合的结构面最多为3 条,由于该巷道受 5 条结构面切割,故共需进行 10 次分析。任选一组结构面,切换到 3D 块体预览界面 即可从不同角度分析由该组结构面切割所形成的块 体,见图 2。

进行地应力分析时,在地应力可视化界面可以看 到块体的每一个面上不同位置处的应力,有正应力和 切应力两种视图,不同的颜色代表不同大小的应力。 图 3 和 4 所示分别为正应力视图和切应力视图。从图 3 和 4 可以看出,由该组结构面切割形成的块体各面



图 1 各结构面的赤平投影图 Fig. 1 Stereographic projections of structural planes



图 2 3D 块体透视图

Fig. 2 3D view of blocks formed



图 3 3D 正应力透视图 Fig. 3 3D Distributions of normal stress



图 4 3D 切应力侧视图

Fig. 4 3D distributions of shear stress

上的正应力大部分集中在 0~2.0 MPa 之间,其中,最 小正应力为 0.067 MPa,最大正应力为 1.875 MPa;切 应力大部分集中在 0~0.8 MPa 之间,最小切应力为 0.06 MPa,最大切应力为 0.873 MPa。

为分析计算结果,可以通过 3D 视图或等高线图 表征在不同的倾向与倾角时形成的块体的各种特征, 如所需支持力、最大块体体积、最大块体质量以及最 小安全系数等。图 5~7 所示分别为不同的倾向与倾角 时块体所需支持、不同的倾向与倾角时的最大块体体 积、不同的倾向与倾角时的最大顶高度 3D 视图;图 8~10 所示分别为不同倾向与倾角时所需支持力、不同



Fig. 5 3D view of needed supporting stress at different trends and inclination angles



图 6 不同的倾向与倾角时的最大块体体积 3D 视图 Fig. 6 3D view of maximum block volumes at different trends and inclination angles



图 7 不同的倾向与倾角时的最大顶高度 3D 视图 Fig. 7 3D view of maximum roof heights at different trends and inclination angles

倾向与倾角时最大块体质量、不同倾向与倾角时块体最 大顶高度等高线图。从图中可以发现,在选定的结构面 组合中,当巷道选取不同的倾向和倾角时,所需的支持 力的大小、切割形成块体的最大体积和最大可见高度等



图 8 不同倾向与倾角时所需支持力等高线图

Fig. 8 Contour map of needed supporting stress at different trends and inclination angles



图 9 不同倾向与倾角时最大块体质量等高线图

Fig. 9 Contour map of maximum block mass at different trends and inclination angles



图 10 不同倾向与倾角时块体最大顶高度等高线图

Fig. 10 Contour map of maximum roof height at different trends and inclination angles

是不同的。当倾向为 90°, 倾角为 0°时, 所需支持力的 大小最大, 为 0.061 MPa; 当倾向为 270°、倾角为 50° 时, 切割形成的块体体积最大, 为 43.291 m³, 此时的 块体质量也是最大的; 当岩体允许暴露面积为 43.40 m², 倾向为 258°, 倾角为 53°时, 巷道能够承受的高 度最大, 为 4.36 m。可见, 当倾角或倾向逐渐变化时, 选定的结构面组合切割形成的块体的所需支持力、最 大质量、最大顶高度以及最小安全系数都是不同的。

不同的结构面组合所形成块体的相关参数,包括 块体编号、安全系数、块体体积、块体质量、滑动结 构面、滑动面面积、滑动面正应力和滑动方向,将结 果分别记录在表1中。

表1 不同结构面形成块体的相关参数

 Table 1
 Parameters of rock blocks formed by varying structural planes

Plane	Block position	Block No.	Safety index	Volume/ m ³	Mass/kg	Sliding plane	Area of sliding plane/m ²	Normal stress/MN	Sliding direction
	Floor	2	Stable	8.034	23367	Stable			
100	Lower left	3	0.976, 2.772	0.787	2245	Joint 1	1.54	0.004	4, 61
123	Lower right	6	14.606, 30.624	0.720	2143	Joints 2 and 3	1.31, 2.28	0.020, 0.019	113, 33
	Roof	7	0	2.908	8469	Falling wedge			
	Floor	1	Stable	50.527	146939	Stable			
124	Lower left	2	4.339, 7.005	0.639	1837	Joints 1 and 2	2.80, 0.21	0.002, 0.005	29, 49
124	Lower right	7	0.387, 10.157	0.803	2347	Joint 4	4.96	0.010	151, 70
	Roof	8	0	21.671	62959	Falling wedge			25, 72
	Floor	1	Stable	4.435	12857	Stable			
	Upper left	4	2.885, 8.499	0.563	1633	Joint 1	3.46	0.003	4, 61
125 134 135	Lower right	5	45.401, 73.649	0.285	816	Joints 2 and 5	0.12, 1.41	0.003, 0.006	133, 12
	Upper right	7	19.214, 69.988	0	0	Joint 5	0.01	0	220, 50
	Roof	8	0	0.856	2449	Falling wedge			
	Floor	1	Stable	61.146	177755	Stable			
134	Lower left	2	2.253, 6.604	0.553	1633	Joint 1	2.63	0.003	4, 61
	Lower right	7	0.387, 10.411	0.646	1837	Joint 4	4.09	0.008	151, 70
	Roof	8	0.685, 0.594	33.465	97245	Joint 3	12.07	0.170	23, 85
	Floor	1	76.147, 126.154	0.432	1224	Joints 3 and 5	1.91, 3.19	0.007, 0.013	297, 7
125	Upper left	4	4.976, 9.543	0.879	2551	Joints 1 and 3	4.14, 1.04	0.011, 0.010	306, 63
135	Lower right	5	Stable	0.277	816	Stable			
	Upper right	8	5.715, 5.310	0.236	714	Joint 3	0.90	0.001	23, 85
	Floor	2	Stable	131.744	382959	Stable			
1.4.5	Lower left	4	4.989, 14.812	0.149	408	Joint 1	1.61	0.001	4, 61
145	Lower right	5	3.311, 10.350	0.149	408	Joint 5	0.58	0.003	220, 50
	Roof wedge	7	1.835, 5.366	122.706	356735	Joints 4 and 5	120.36, 64.25	0.949, 3.108	251, 43
22.4	Floor	4	Stable	98.798	287245	Stable			
234	Upper right	5	3.533, 4.429	96.183	279592	Joints 3 and 4	97.47, 77.39	1.512, 2.447	110, 48
	Upper right	4	20.410, 10.562	6.581	19184	Joints 2 and 3	7.31, 14.97	0.185, 0.173	113, 33
025	Lower left	5	45.644, 55.912	3.741	10918	Joints 3 and 5	11.11, 7.03	0.061, 0.115	297, 7
235	Upper left	6	0	0.001	0	Falling wedge			
	Roof	8	56.645, 60.474	0	0	Joint 3	0.01	0	23, 85
245	Lower left	3	Stable	14.737	42857	Stable			
	Upper right	6	0.387, 3.499	15.261	44388	Joint 4	30.57	0.192	151, 70
	Upper left	8	0.000	0.005	0	Falling wedge			
	Lower Left	3	29.307, 47.479	3.000	8673	Joints 3 and 5	3.67, 8.37	0.049, 0.092	297, 7
345	Upper right	6	0.387, 4.837	6.047	17551	Joint 4	417.18	0.076	151, 70
	Upper left	8	9.308, 8.678	0.053	204	Joint 3	0.33	0	23, 85
			*						

通过调查统计,得到5组结构面的抗剪强度区间 参数,结果见表2。 根据本文方法进行区间可靠度计算,将其计算结 果列在表3中,另外,表3也列出了安全系数、随机

表2 结构面抗剪强度参数

Table 2	Shear strength	parameters of structural	planes
---------	----------------	--------------------------	--------

Structural plane number	Cohesion, c/MPa	Friction angle, $\varphi/(^{\circ})$	Friction coefficient
1	0.01-0.03	20-24	0.364-0.4452
2	0.013-0.025	15-19	0.2679-0.3443
3	0.032-0.07	35-40	0.7002-0.8391
4	0-0.005	30-33	0.5774-0.6494
5	0.008-0.022	25-28	0.4663-0.5317

表3 不同块体的区间可靠度和随机可靠度

 Table 3
 Interval and random reliabilities of different blocks

Plane	Block position	Block No.	Safety index	Interval reliability	Random reliability
	Floor wedge	2	Stable	Stable block	Stable block
102	Lower Left wedge	3	0.976, 2.772	1.0026	3.1332
123	Lower Right wedge	6	14.606, 30.624	2.8251	10.3024
	Roof wedge	7	0	Dropping block	Dropping block
	Floor wedge	1	Stable	Stable block	Stable block
124	Lower Left wedge	2	4.339, 7.005	1.6506	5.2682
124	Lower Right wedge	7	0.387, 10.157	0.346	-1.0524
	Roof wedge	8	0	Dropping block	Dropping block
	Floor wedge	1	Stable	Stable block	Stable block
	Upper Left wedge	4	2.885, 8.499	1.671	5.0646
125	Lower Right wedge	5	45.401, 73.649	2.3557	7.7945
	Upper Right wedge	7	19.214, 69.988	2.1429	
	Roof wedge	8	0	Dropping block	Dropping block
	Floor wedge	1	Stable	Stable block	Stable block
124	Lower Left wedge	2	2.253, 6.604	1.5685	4.7675
134	Lower Right wedge	7	0.387, 10.411	0.3687	-0.8428
	Roof wedge	8	0.685, 0.594	1.1478	-3.5294
	Floor wedge	1	76.147, 126.154	2.6149	10.9677
125	Upper Left wedge	4	4.976, 9.543	2.0178	8.2257
155	Lower Right wedge	5	Stable	Stable block	Stable block
	Upper Right wedge	8	5.715, 5.310	2.2982	6.9125
	Floor wedge	2	Stable	Stable block	Stable block
145	Lower Left wedge	4	4.989, 14.812	2.2982	5.4995
145	Lower Right wedge	5	3.311, 10.350	1.6696	5.1213
	Roof wedge	7	1.835, 5.366	1.1432	5.5168
224	Floor wedge	4	Stable	Stable block	Stable block
234	Upper Right wedge	5	3.533, 4.429	2.5879	9.3132
	Upper Right wedge	4	20.410, 10.562	2.9155	10.3105
225	Lower Left wedge	5	45.644, 55.912	2.8451	10.5679
255	Upper Left wedge	6	0	Dropping block	Dropping block
	Roof wedge	8	56.645, 60.474	2.6842	
	Lower Left wedge	3	Stable	Stable block	Stable block
245	Upper Right wedge	6	0.387, 3.499	2.948	-9.4448
	Upper Left wedge	8	0	Dropping block	Dropping block
	Lower Left wedge	3	29.307, 47.479	2.8648	12.7096
345	Upper Right wedge	6	0.387, 4.837	1.8327	-1.4713
	Upper Left wedge ^[8]	8	9.308, 8.678	2.3832	7.1635

可靠度计算结果。值得说明的是,结构面 123 所形成 的块体中,块体 2 在巷道底部,为稳定块体,无需进 行可靠度计算;块体 3 沿结构面 1 滑动;块体 6 沿结 构面 2 和 3 滑动;块体 7 为直接垮落块体。

由表 3 中数据可以看出,结构面 1 参与构成的可 动块体共有 19 个,结构面 2 参与构成的块体共有 17 个,结构面 3 参与构成的块体共有 17 个,结构面 4 参与构成的块体共有 16 个,结构面 5 参与构成的块体 共有 19 个,且结构面 1 和结构面 2 参与构成的块体中, 直接垮落块体和不稳定块体最多,因此要考虑重点监 测由结构面 1 和结构面 2 构成的块体,采取适当的支 护方式以保证施工过程中的安全。

在工程问题的研究过程中,由于调查数据是有限 的,因此很难确定某一个参数准确的概率分布,而采 用区间可靠度分析方法计算可靠度时,通常用区间数 来表示参数的取值,能够较好地反映样本数据较少时 参数取值的不确定性,确定某一参数的取值范围也比 确定参数的概率分布容易。随机可靠度在计算中,先 根据调查数据以及经验公式假设了参数的概率分布, 但是不能确定假定的概率分布是否满足适用条件。同 时,由于随机可靠度分析模型对于参数取值的敏感性 很强,采用不同形式的概率分布进行计算时,得到的 可靠度指标也存在较大差异。对比分析表 3 中计算所 得的结果, 块体 1348、块体 2456 和块体 3456 的区间 可靠度与随机可靠度差别较大,究其原因是随机可靠 度计算中参数的概率分布的适用性存在问题, 而采用 区间可靠度得到的结果与实际情况一致。块体 1247 和块体 1347 采用两种方法计算得到的可靠度指标均 小于 1,为不可靠块体,应当采取适当的支护方式进 行支护。其余块体采用这两种方法计算得到的可靠度 均大于 1, 认为是可靠的。通过比较区间安全系数、 随机可靠度及区间可靠性的计算结果可以发现, 安全 系数分析只能实现特定参数的单一稳定性评估,安全 系数的区间为两个极端情况,很难在工程中应用,且 不能系统性对关键块体进行评估;随机可靠度的计算 结果变化幅度较大,概率密度函数较难确定,数据需 求量大,工程应用存在一定困难;区间概率可靠度分 析时无需求解概率密度函数,通过较少样本的区间表 示即可实现可靠性分析,能够表征关键块体整体的稳 定可靠特征。

但是,地下工程中块体的滑落并不是一次性完成 的,而是逐渐发生变化的一个动态的过程,因此不能 因为某次计算结果是稳定的,就完全肯定某块体是可 靠的而不予重视,在后续爆破作业等的影响下,会导 致某些结构面或裂隙的加剧,最终使原本稳定的块体 发展成为不稳定的块体。因此,为了保证作业过程中 人员及设备的安全,需要对所有有运动倾向的块体进 行监测,及时采取措施,并进行合理的支护。

3 结论

在关键块体稳定性的研究过程中,由于调查数据是有限的,因此很难确定某一个参数准确的概率分布,而采用区间可靠度分析方法计算可靠度时,通常用区间数来表示参数的取值,能够较好的反映样本数据较少时参数取值的不确定性,确定某一参数的取值范围也比确定参数的概率分布容易。

2)根据区间数学理论,采用区间数表示参数取 值,在分析参数取值特性基础上,采用岩体区间强度 值,以此反映围岩可靠性分析的不确定性特征,通过 探讨区间非概率可靠性指标求解方法,建立了爆破荷 载下区间可靠性综合分析模型。

3)将提出的方法应用到具体工程中,并同时计算 了区间安全系数、随机可靠度,结果显示,安全系数 分析只能实现特定参数的单一稳定性评估,不能系统 地对关键块体进行评估;随机可靠度的计算结果变化 幅度较大,概率密度函数较难确定,数据需求量大, 工程应用存在一定困难;而区间概率可靠度分析时无 需求解概率密度函数,通过较少样本的区间表示即可 实现可靠性分析,能够表征关键块体整体的稳定可靠 特征。

REFERENCES

- GOODMAN R E. SHI G H. Block theory and its application torock engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [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 stabilization in rock mass stability analysis[J]. Science in China, 1981, 4: 487–495.

 [3] 阚卫明,孙万禾,闫澍旺.根据土的抗剪强度指标变异性和 安全域检验地基承载力的可靠性[J].土木工程学报,2001, 34(2):101-104.

KAN Wei-ming, SUN Wan-he, YAN Shu-wang. Reliability analysis for bearing capacity of foundation based on variation of shear strength and safety zone[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 101–104.

[4] POPESCU R, DEODATISB G, NOBAHARC A. Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(6): 324-341.

- [5] 郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠 性模型[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 56-60.
 GUO Shu-xiang, LÜ Zhen-zhou, FENG Yuan-sheng. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis[J]. Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1): 56-60.
- [6] 江 涛,陈建军,姜培刚,拓耀飞.区间模型非概率可靠性指标的一维优化算法[J].工程力学,2007,24(7):23-27. JIANG Tao, CHEN Jian-jun, JIANG Pei-gang, TUO Yao-fei. A one-dimensional optimization algorithm for non-probabilistic reliability index[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 23-27.
- [7] ALEFELD G, MAYER G. Interval analysis: Theory and applications[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 121: 421–464.
- [8] 董陇军,李夕兵.地下硐室节理岩体区间非概率可靠性分析 方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2011(7): 1007-1013.
 DONG Long-jun, LI Xi-bing. Interval non-probabilistic reliability method for surrounding jointed rock mass stability of underground caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(7): 1007-1013.
- [9] 董陇军,李夕兵. 岩石试验抗压、抗拉区间强度及代表值可信度研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1969–1974.
 DONG Long-jun, LI Xi-bing. Study of interval parameters and credibility of representative value of rock tensile and compression strength tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1969–1974.
- [10] 张子新,孙 钧. 块体理论赤平解析法及其在硐室稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1756-1760.
 ZHANG Zi-xin, SUN Jun. Stereo-analytic method for block theory and its application in stability analysis of a cave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1756-1760.
- [11] GOODMAN R E. SHI G H. Block theory and its application torock engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [12] PARIDA A, MISHRA M K. Blast vibration analysis by

difference predict approaches-A comparison[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 337–345.

- [13] A'LVAREZ-VIGIL A E, GONZA 'LEZ-NICIEZA C, GAYARRE F L, A'LVAREZ-FERNA'NDEZ M I. Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 55: 108–116.
- [14] DONG Long-jun, WESSELOO Johan, POTVIN Yves, LI Xi-bing. Discriminant models of blasts and seismic events in mine seismology[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 282–291.
- [15] KHANDELWAL M, SINGH T N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(7): 1214–1222.
- [16] ZHANG Ke, CAO Ping, LIU Zi-yao, HU Hui-hua, GONG Dao-ping. Simulation analysis on three-dimensional slope failure under different conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 2490–2502.
- [17] YILDIRIM E, GÜLBAĞ A, HORASANG, DOĞAN E. Discrimination of quarry blasts and earthquakes in the vicinity of Istanbul using soft computing techniques[J]. Comput Geosci, 2011, 37: 1209–1217.
- [18] KUYUK H, YILDIRIM E, DOGAN E, HORASAN G. An unsupervised learning algorithm: application to the discrimination of seismic events and quarry blasts in the vicinity of Istanbul[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2011, 11: 93–100.
- [19] ZHAO Guo-yan, MA Ju, DONG Long-jun, LI Xi-bing, CHEN Guang-hui, ZHANG Chu-xuan. Classification of mine blasts and microseismic events using starting-up features in seismograms[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 3410–3420.
- [20] GARCIA B F, ALEJANO L, GONZA'LEZ-CAO J. Predicting the extent of blast-induced damage in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 56: 44–53.

Non-probability reliability of key blocks of roadways subjected to blasting loads applying interval theory

GAO Sai-hong^{1, 2}, CAO Ping¹, WANG Sheng-lian², CHEN Yu¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Applied Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The mechanical parameters of rock obtained from laboratory tests are vital important to the stability investigations on key blocks. However, due to the restraints from the complicated rock structure and the limitation of available test data, it is difficult to determine the accurate probabilistic distribution of any mechanical parameter. Therefore, problems might be encountered in the traditional reliability analysis characterized by random probability. In the reliability indication process characterized by non-probabilistic reliability with interval theory, parameters are represented by the intervals which reflect the uncertainty caused by the limited sample data. In addition, it is easier to determine the value range rather than the probabilistic distribution of specific parameters. Based on the interval mathematical theory and the related analysis of parameter properties, the uncertainty of the reliability analysis of surrounding rock was indicated by the interval values of rock strength. The comprehensive analytical model was established by probing the computing method for the index of interval non-probability. Moreover, the interval value of safety index and the random reliability are obtained by applying proposed method in a specific engineering scenario. The following results were concluded, safety analysis index can only be used in the single stability evaluation of a specific parameter. While systematic evaluation of key blocks can not be conducted by applying safety index analysis. The engineering application of the random probabilistic method is restrained by the obtained result varying in a large range. The difficulties encountered in the indication process of probabilistic density function and the great data volume are needed, the determination of the probabilistic density function is not required when applying non-linear reliability analysis based on interval theory and, thus, the reliability analysis can be conducted based on interval presentation of limited sample data. The entire reliability characteristics of key blocks stability can be represented accordingly. Key words: blasting loads; damage; tunnels; key block; non-probabilistic reliability analysis applying interval theory

Foundation item: Project(51274249) supported by the Natural Science Foundation of China **Received date:** 2016-05-30; **Accepted date:** 2016-12-25

Corresponding author: CAO Ping; Tel: +86-13973128263; E-mail: pcao_csu@sina.com

(编辑 龙怀中)