

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.11

基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下 溶洞顶板稳定性评价

秦 溯, 李云安, 孙 琳

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性影响因素取值的不确定性及其样本数量的有限性, 给桩基下溶洞顶板稳定性的评价带来了一定困难。根据现有研究成果, 建立桩基下溶洞顶板抗冲切、抗剪切和抗弯力学简化模型, 并从理论上推导相应的稳定性验算公式。在此基础上, 结合区间分析理论和结构非概率可靠性度量方法, 提出了基于区间非概率可靠性方法的桩基下溶洞顶板稳定性评价方法。该方法采用 MATLAB 中的 INTLAB 工具箱进行区间运算, 并运用截断法消除运算过程中的区间扩展现象, 最后通过比较溶洞顶板体系的非概率可靠性指标 η 与 1 的大小来判断桩基下溶洞顶板稳定性。以丹霞高速互通中 D 匝道 2# 桩基下溶洞为例, 计算出该桩基下溶洞顶板体系的非概率可靠性指标 $\eta = 7.95$, 该值大于 1 说明该桩基下溶洞顶板处于稳定状态, 且评价结果与工程实际相符, 表明了该方法的合理性与可行性。分别以 3 种功能函数为单位, 研究当区间变量的变异系数 C 不同时 (C 从 0.01 递增至 0.1), 对应非概率可靠性指标 η 的变化规律。研究表明, 随各区间变量变异系数 C 的增大, 相应非概率可靠性指标呈不同程度的降低, 其中溶洞顶板厚度 h 的变异性对评价结果影响最大, 其次为桩端阻力分担比 T , 桩顶反力 F 的影响相对最小。

关键词: 岩溶区; 桩基下溶洞顶板; 稳定性评价; 区间非概率可靠性方法; 非概率可靠性指标; 变异性

中图分类号: TU457; P642.235

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0081-08

Stability evaluation of karst cave roof under pile in karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method

QIN Su, LI Yunan, SUN Lin

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The uncertainty and finiteness of the factors affecting the stability of karst cave roof under pile in karst areas bring about some difficulties to the evaluation of the stability of karst cave roof under pile. According to the existing research results, the punching, shearing and bending mechanical simplified models of karst cave roof under pile tip are established, and the corresponding stability checking formulas are derived. Combined with the interval analysis theory and structural non-probabilistic reliability measurement method, the stability evaluation method of karst cave roof under pile tip based on interval non-probabilistic reliability method is proposed. This method uses the INTLAB toolbox in MATLAB to perform interval operations, and then uses the truncation method to eliminate the interval expansion phenomenon in the process. The stability of karst cave roof under pile is judged by comparing the relationship between the non-probabilistic reliability index η and 1. The karst cave under the D ramp 2# pile in the Danxia grade separation area is taken as an

收稿日期: 2019-03-21; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金委与广东省联合基金重点基金项目资助“基于地学大数据的城市地质灾害智能监测、模拟、管控、预警”(U1711266)

第一作者: 秦溯(1994-), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程研究工作。E-mail: suqin9401@foxmail.com

通讯作者: 李云安(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、地质工程研究。E-mail: liyunan@cug.edu.cn

example, and the non-probabilistic reliability index η of the karst cave roof under 2# pile is calculated to be 7.95. η greater than 1 indicates that the karst cave roof under 2# pile is in a stable state. The evaluation result is consistent with the actual situation, indicating the rationality and feasibility of the method. The three performance functions are used as the unit to study the variation law of the non-probabilistic reliability index η when the coefficient of variation C of the interval variable is different (C increases from 0.01 to 0.1). The results show that with the increase of the coefficient of variation C of each interval variable, the corresponding non-probabilistic reliability indexes are reduced to varying degrees. The variability of the thickness of karst cave roof h has the greatest influence on the evaluation results, followed by the sharing ratio of pile tip resistance T , and the counterforce of pile tip F has the least influence.

Keywords: karst area; karst cave roof under pile; stability evaluation; interval non-probabilistic reliability method; non-probabilistic reliability index; variability

修建于岩溶地区的工程,多采用桩基础来维持上部结构的稳定。实际工程中,许多桩基并未完全穿越下伏溶洞,而是嵌于距溶洞之上一定厚度的基岩中(溶洞顶板),在保证安全稳定的前提下,可节省一定的工期和成本。因此,对桩基下溶洞顶板稳定性的准确评价显得至关重要。

目前,对于溶洞顶板稳定性的评价方法可大致归结为3类:定性评价法^[1-2]、半定量评价法^[3-9]和定量评价法^[10-15]。其中,定性评价法以综合分析影响溶洞顶板稳定性的因素(顶板岩性、裂隙状况、埋藏条件和地下水等)为基础,结合类似工程经验,对岩溶地基稳定性作出定性的判断。定性评价法可操作性强,但评价结果较粗略,主要适用于工程初步勘察阶段或重要程度不高的工程。半定量评价法的一般思路是通过将桩基与溶洞顶板的地质模型进行简化后得到物理模型,然后从力学角度将物理模型转换为数学模型,最后通过将计算结果与实际情况对比来判断桩下溶洞顶板的稳定性。由于半定量评价法可操作性强,评价结果可靠,因此在岩溶工程中已得到了广泛的应用。定量评价法一般需先作出适当的假设,然后建立桩基与溶洞相互作用的物理力学模型,并设置适当的边界条件,最后利用计算机强大的计算能力进行分析和计算。虽然定量评价法分析较全面,且所得评价结果直观、可靠,但其实施过程复杂,在实际工程中应用较少。值得注意的是,现有的桩基下溶洞顶板稳定性评价方法多基于确定的参数,即桩参数、溶洞的几何参数、岩土体的物理力学参数等都是确定的值。实际上,由于桩基下溶洞具有潜伏性,加上现有技术条件的限制,很难准确把握溶洞的真实发育形态和岩土体的物理力学参数值,给溶洞顶板稳定性评价过程带来了较大不确定性。曹文贵等^[16]采用三角模糊数表示计算参数取值可能性分

布,采用模糊能度可靠性理论,提出了基桩桩端岩溶顶板稳定性模糊能度可靠性分析方法。程晔等^[17]将多级模糊评判理论、AHP法和灰色关联分析法相结合,提出了高速公路下伏溶洞顶板稳定性的模糊综合评判法,并结合实际工程进行应用,评判结果能够较准确地反映溶洞顶板的稳定性。赵帅等^[18]采用蒙特卡洛抽样法对盐穴储气库顶板安全可靠进行了分析,通过计算出盐穴储气库顶板的失效概率和可靠性指标来描述其可靠度。可以看出,上述方法的共同点都是以概率(客观概率或主观概率)为基础,需要从一定数量的数据样本中统计出概率特征,而在实际工程中,桩基下溶洞顶板的数据样本数量往往是有限的。

鉴于此,本文引入区间非概率可靠性方法,通过计算出溶洞顶板体系的非概率可靠性指标来判断其稳定性。由工程实例验证了本文方法的合理性与可行性,并对各区间变量的敏感性进行了分析。

1 桩基下溶洞顶板力学简化模型

溶洞顶板在桩基荷载作用下的破坏形式主要有3种,即冲切破坏、剪切破坏和弯拉破坏^[19]。根据现有研究成果,假设溶洞顶板岩层产状近乎水平,分别从抗冲切、抗剪切和抗弯角度建立桩基下溶洞顶板力学简化模型,并推导出相应稳定性验算公式。

1.1 抗冲切力学简化模型

溶洞顶板在桩基荷载作用下发生冲切破坏时,冲切体多为圆台状。此时,向上的作用力为作用于冲切体侧面的岩体拉力及作用于冲切体底部的充填物顶托力,具体模型如图1所示。

根据力平衡条件可知,维持溶洞顶板稳定而不受冲切破坏,需满足下式:

$$K_1 P \leq Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

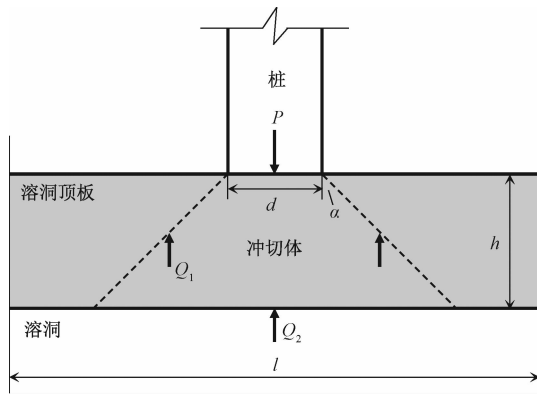


图1 抗冲切力学简化模型

Fig. 1 Simplified punching mechanical model

P —桩端作用力/kN; Q_1 —顶板岩体抗拉力/kN; Q_2 —充填物顶托力/kN;

l —溶洞跨度/m; h —顶板厚度/m; d —桩径/m; α —冲切角/(°)

式中, K_1 为顶板抗冲切安全系数, 根据相关规范确定。由于充填物顶托作用微小, 基本可以忽略, 故视 $Q_2 = 0$ 。考虑作用于顶板上的桩端作用力 P 来源于桩顶反力和桩自重, 具体计算公式见式(2)。 Q_1 的计算公式见式(3)。

$$P = T(F + \frac{\pi d^2 L \gamma}{4}) \quad (2)$$

$$Q_1 = \pi \frac{h}{\cos \alpha} (d + h \tan \alpha) R_t \quad (3)$$

式中: T ——桩端阻力分担比;

F ——桩顶反力/kN;

γ ——桩体重度/(kN·m⁻³);

R_t ——顶板岩体抗拉强度/kPa;

L ——桩长/m。

其余参数意义同前。

除此之外, 当岩体完整性较好, 产状近水平时, 可取 $\alpha = 45^\circ$ 。为保守起见, 将顶板岩体抗拉强度 R_t 乘以折减系数 0.75。联立式(1)、式(2)和式(3)可得:

$$K_1 \leq \frac{3\sqrt{2}\pi h(d+h)R_t}{T(4F + \pi d^2 L \gamma)} \quad (4)$$

1.2 抗剪切力学简化模型

溶洞顶板在桩基荷载作用下也可能因为岩体抗剪强度不足而发生剪切破坏, 剪切体呈圆柱状, 具体模型见图2。图2中, τ 为顶板岩体抗剪强度/kPa, 其余参数意义同前。

同理, 根据力平衡条件可知, 维持溶洞顶板稳定而不受剪切破坏, 需满足下式:

$$K_2 P \leq \pi d h \tau \quad (5)$$

式中, K_2 为顶板抗剪切安全系数, 根据相关规范确定。

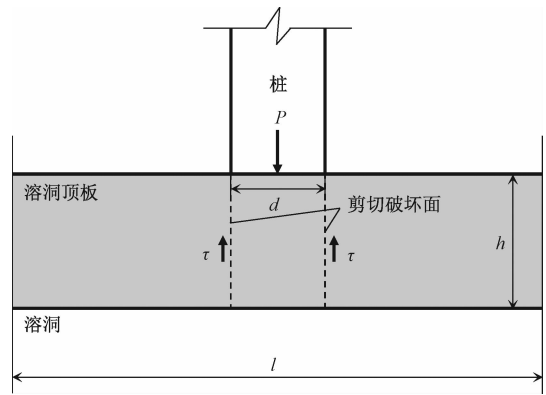


图2 抗剪切力学简化模型

Fig. 2 Simplified shearing mechanical model

将式(2)与式(5)联立可得:

$$K_2 \leq \frac{4\pi d h \tau}{T(4F + \pi d^2 L \gamma)} \quad (6)$$

1.3 抗弯力学简化模型

当溶洞顶板厚跨比较小时, 在桩基荷载作用下很可能因为顶板岩体抗弯能力不足而发生弯拉破坏。由结构力学可知, 在中部局部荷载的作用下, 简支梁的最大弯矩值要大于同几何尺寸下的两端固定梁的最大弯矩值。故出于工程上偏保守的考虑, 将溶洞顶板作为简支梁考虑, 具体模型见图3。

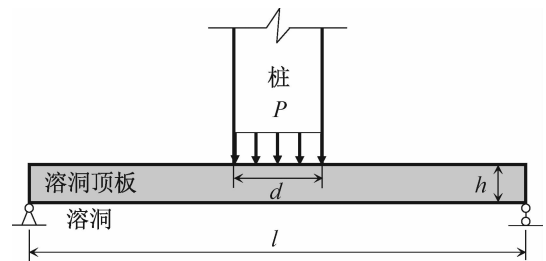


图3 抗弯力学简化模型

Fig. 3 Simplified bending mechanical model

图3中, 通过计算出简支梁中部在局部均布荷载作用下的最大弯矩, 进而计算出对应的最大拉应力。当计算出的最大拉应力不大于顶板岩体的抗拉强度时, 溶洞顶板稳定而不受弯拉破坏, 具体列式如下:

$$q = \frac{P}{d} \quad (7)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{4} q d l - \frac{1}{8} q d^2 \quad (8)$$

$$W_z = \frac{B h^2}{6} \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \quad (10)$$

$$K_3 \cdot \sigma_{\max} \leq R_t \quad (11)$$

式中: K_3 ——顶板抗弯安全系数,据相关规范确定;

B ——溶洞宽度/m;

q ——考虑桩端作用力下的均布线荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

$M_{\max}$ ——考虑桩端作用力下的对应简支梁中部最大弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$);

W_z ——抗弯截面系数/ m^3 ;

其余参数意义同前。

将式(2)与式(7)~(11)联立可得:

$$K_3 \leq \frac{16Bh^2R_t}{3T(4F + \pi d^2L\gamma)(2l - d)} \quad (12)$$

式(4)、式(6)与式(12)即分别为由对应桩基下溶洞顶板力学简化模型推导出的抗冲切、抗剪切和抗弯稳定性验算公式。

2 桩基下溶洞顶板稳定区间非概率可靠性评价方法

基于前述建立的桩基下溶洞顶板抗冲切、抗剪切和抗弯稳定性验算公式,分别构建出抗冲切、抗剪切和抗弯功能函数 g_1 、 g_2 和 g_3 ,并设溶洞顶板体系的功能函数为 M ,具体列式如下:

$$g_1 = \frac{3\sqrt{2}\pi h(d+h)R_t}{T(4F + \pi d^2L\gamma)} - K_1 \quad (13)$$

$$g_2 = \frac{4\pi dh\tau}{T(4F + \pi d^2L\gamma)} - K_2 \quad (14)$$

$$g_3 = \frac{16Bh^2R_t}{3T(4F + \pi d^2L\gamma)(2l - d)} - K_3 \quad (15)$$

$$M = g_i (i = 1, 2, 3) \quad (16)$$

由于桩基下溶洞顶板稳定性评价中存在诸多不确定因素,进而导致式(13)~(15)中右侧的变量(输入变量)具有不确定性。这里采用区间来表示输入变量的不确定性,即式(13)~(15)中部分输入变量变为区间变量。对于区间变量的运算,采用基于 MATLAB 环境的区间运算工具箱 INTLAB 进行编程运算,进而得到式(13)~(15)中左侧的变量(响应变量)对应的区间 $g_i = [g_i^l, g_i^u]$ ($i = 1, 2, 3$),其中 g_i^l 为区间下界限, g_i^u 为区间上界限。

区间运算过程中会产生区间扩展现象,使得响应变量区间变宽而失去真实性。区间截断法是一种能有效解决区间扩展现象的典型方法^[20],其具体实施过程为:设 $a = [a^l, a^u]$, $b = [b^l, b^u]$ 为输入区间变量,经区间运算后得到响应区间变量 $c = [c^l, c^u]$ 。由输入区间变量 a, b 对应的中心值 $a_0 = (a^l + a^u)/2$ 和 $b_0 = (b^l +$

$b^u)/2$,求得 c 的中心值 $c_0 = (c^l + c^u)/2$ 。此时,若 c_0 接近于 0,则截断法失效;反之,则用下面的公式分别计算出响应区间变量的上下界限(c^u 和 c^l)与其中心值 c_0 的相对偏差 Δ_1 和 Δ_2 。

$$\Delta_1 = \left| \frac{c^l - c_0}{c_0} \right| \quad (17)$$

$$\Delta_2 = \left| \frac{c^u - c_0}{c_0} \right| \quad (18)$$

进一步地,设响应变量的最大相对偏差为 $2t$, t 可取所有输入变量相对其中心值偏差最大的值。最后,通过以下条件进行区间截断,并用截断后的区间 $[d^l, d^u]$ 来代替响应变量 c 的取值区间。

当 $\Delta_1 \leq t$, $\Delta_2 \leq t$ 时,取

$$d^l = c^l$$

$$d^u = c^u$$

当 $\Delta_1 > t$, $\Delta_2 > t$ 时,取

$$d^l = c_0 + t(c^l - c_0)$$

$$d^u = c_0 + t(c^u - c_0)$$

当 $\Delta_1 \leq t$, $\Delta_2 > t$ 时,取

$$d^l = c^l$$

$$d^u = c_0 + t(c^u - c_0)$$

当 $\Delta_1 > t$, $\Delta_2 \leq t$ 时,取

$$d^l = c_0 + t(c^l - c_0)$$

$$d^u = c^u$$

通过采用区间截断法解决区间扩展问题后,得到更真实的响应变量区间 $g_{iN} = [g_{iN}^l, g_{iN}^u]$ ($i = 1, 2, 3$)。随后,采用下式求解各响应区间变量的非概率可靠性指标^[21]:

$$\eta_i = \frac{g_{iN}^u + g_{iN}^l}{g_{iN}^u - g_{iN}^l} (i = 1, 2, 3) \quad (19)$$

根据结构可靠性理论可知,当 $\eta_i > 1$ ($i = 1, 2, 3$) 时,则相应的功能函数 $g_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$) 恒成立,结构稳定可靠;反之,则结构不可靠。桩基下溶洞顶板需同时满足抗冲切、抗剪切和抗弯条件,溶洞顶板体系才算稳定,即溶洞顶板体系的非概率可靠性指标满足 $\eta = \min\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\} > 1$ 时,则溶洞顶板体系安全稳定。

3 工程实例与分析

丹霞高速互通位于中国广东省韶关市境内,包括已建成运营多年的韶赣高速主线(大体呈 EW 走向)、新建成投入运营的仁新高速(大体呈 SN 走向)以及 8 条互通匝道(A~H)。10 条线路中,除韶赣高速主线和 F 匝道全为路基段外,其余线路均含有路基段和桥

基段。丹霞高速互通下伏基岩主要为泥盆系锡矿山组砾状灰岩(图 4),为可溶性岩,且地下水运动活跃。经钻探和物探发现该地区岩溶强烈发育(图 5),且存在有桥梁桩基嵌于溶洞顶板之上的情况。为确保线路运营期的安全稳定,需对桩基下伏溶洞顶板进行稳定性评价。以 D 匝道 2#桩下溶洞为例,2#桩桩径 d 为 1.4 m,桩长 L 为 26.0 m。由于勘察技术有限,桩下溶洞的几何参数、物理力学参数等不能准确确定,具有较大的不确定性,故采用区间变量来描述不确定性,具体取值见表 1。根据工程要求,为便于计算取顶板抗冲切、抗剪切和抗弯安全系数 $K_1 = K_2 = K_3 = 2$ 。

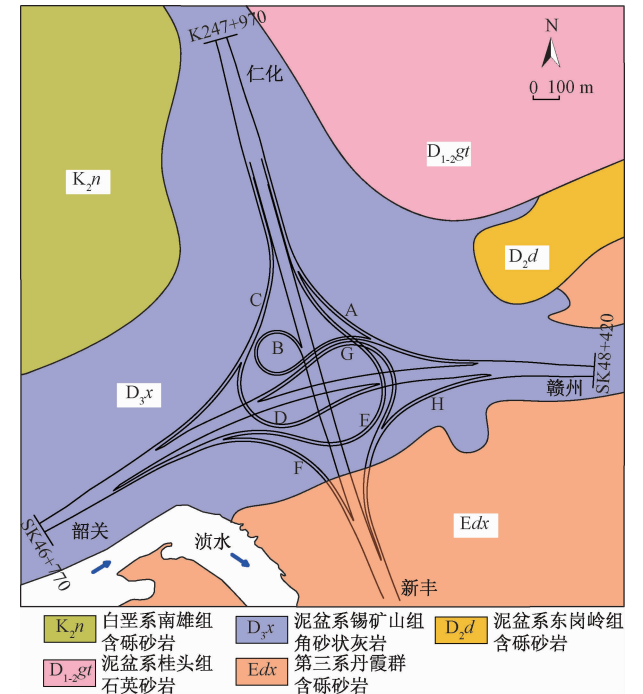


图 4 丹霞高速互通工程地质平面图
Fig. 4 Engineering geological map of the Danxia grade separation area



图 5 钻孔揭示溶洞
Fig. 5 Boreholes revealing the development situation of karst cave

表 1 区间变量及其取值范围
Table 1 Interval variables and their range

区间变量	变量所在区间
溶洞顶板厚度 h/m	$[3.4, 4.8]$
溶洞顶板跨度 l/m	$[4.5, 5.0]$
顶板岩体抗拉强度 R_t/kPa	$[4852, 5325]$
顶板岩体抗剪强度 τ/kPa	$[6793, 7455]$
桩顶反力 F/kN	$[4860, 5400]$
桩端阻力分担比 T	$[0.20, 0.25]$

3.1 区间非概率可靠性方法计算

下面采用前述的区间非概率可靠性方法,分别计算出 2#桩下溶洞顶板的抗冲切、抗剪切和抗弯非概率可靠性指标(η_1 、 η_2 和 η_3),进而得到溶洞顶板体系的非概率可靠性指标(η),通过对比 η 与 1 的大小关系来评价桩下溶洞顶板的稳定性。

(1) 计算抗冲切非概率可靠性指标 η_1

将各参数代入式(13),利用 INTLAB 区间运算工具箱进行编程运算,可得到响应区间变量 g_1 的取值范围为 $[162.98, 448.51]$ (即 $g_1^l = 162.98, g_1^u = 448.51$)。由于区间运算过程中存在区间扩展,导致响应区间变量 g_1 的取值范围被放大失真,这里采用区间截断法解决区间扩展问题,计算结果见表 2。

表 2 响应区间变量 g_1 区间截断法计算结果
Table 2 Calculation results of g_1 with the interval truncation method

计算参数	计算结果
g_1	$[162.89, 448.51]$
$h_0 \mid \Delta_h$	$4.1 \text{ m} \mid 0.1707$
$R_{t0} \mid \Delta_{R_t}$	$5089 \text{ kPa} \mid 0.0464$
$F_0 \mid \Delta_F$	$5130 \text{ kN} \mid 0.0526$
$T_0 \mid \Delta_T$	$0.225 \mid 0.1111$
g_{10}	275.19
Δ_1	0.4081
Δ_2	0.6298
t	0.18
g_{1N}	$[254.98, 306.39]$

由表 2 可知,截断后响应区间变量 $g_{1N} = [254.98, 306.39]$,根据式(19)可计算出抗冲切非概率可靠性指标 $\eta_1 = 10.92$ 。

(2) 计算抗剪切非概率可靠性指标 η_2

同理,将参数代入式(14),利用 INTLAB 区间运算工具箱得到响应区间变量 $g_2 = [61.48, 132.28]$,采用区间截断法缩小区间扩展,计算结果见表 3。

由表 3 可知,截断后响应区间变量 $g_{2N} = [85.79, 98.54]$,根据式(19)可计算出抗剪切非概率可靠性指标 $\eta_2 = 14.46$ 。

表 3 响应区间变量 g_2 区间截断法计算结果Table 3 Calculation results of g_2 with the interval truncation method

计算参数	计算结果
g_2	[61.48, 132.28]
$h_0 \mid \Delta_h$	4.1 m 0.1707
$\tau_0 \mid \Delta_\tau$	7124 kPa 0.0464
$F_0 \mid \Delta_F$	5130 kN 0.0526
$T_0 \mid \Delta_T$	0.225 0.1111
g_{20}	91.13
Δ_1	0.3254
Δ_2	0.4516
t	0.18
g_{2N}	[85.79, 98.54]

(3) 计算抗弯非概率可靠性指标 η_3

将参数代入式(15),经区间运算得到响应区间变量 $g_3 = [22.46, 89.82]$,其截断后的结果见表 4。

表 4 响应区间变量 g_3 区间截断法计算结果Table 4 Calculation results of g_3 with the interval truncation method

计算参数	计算结果
g_3	[22.46, 89.82]
$h_0 \mid \Delta_h$	4.1 m 0.1707
$R_{t0} \mid \Delta_{R_t}$	5089 kPa 0.0464
$F_0 \mid \Delta_F$	5130 kN 0.0526
$T_0 \mid \Delta_T$	0.225 0.1111
$l \mid \Delta_l$	4.75 m 0.0526
g_{30}	56.14
Δ_1	0.5170
Δ_2	0.9321
t	0.18
g_{3N}	[42.16, 54.29]

由表 4 可知,截断后响应区间变量 $g_{3N} = [42.16, 54.29]$,根据式(19)可计算出抗弯非概率可靠性指标 $\eta_3 = 7.95$ 。

通过上述计算可知,2#桩下溶洞顶板体系的非概率可靠性指标 $\eta = \min\{10.92, 14.46, 7.95\} = 7.95$,大于 1,进而可判断出 2#桩下溶洞顶板是稳定的。事实上,丹霞高速互通中 D 匝道自建成通车至今,运营状态良好,未出现桩基失稳问题,说明了本方法具有较好的工程实用性。

3.2 区间变量敏感性分析

为进一步研究区间变量的变异性对桩下溶洞顶板非概率可靠性指标的影响规律,引入变异系数 C 。以建立的抗冲切、抗剪切和抗弯功能函数为单位,研究当各功能函数中区间变量的变异系数 C 不同时(C 从 0.01 递增至 0.1),对应的非概率可靠性指标 η_i ($i=1,$

2,3)的变化规律。在区间变量敏感性分析过程中,每次只改变一个区间变量。最后得到各非概率可靠性指标与各区间变量变异系数的变化曲线,见图 6~8。

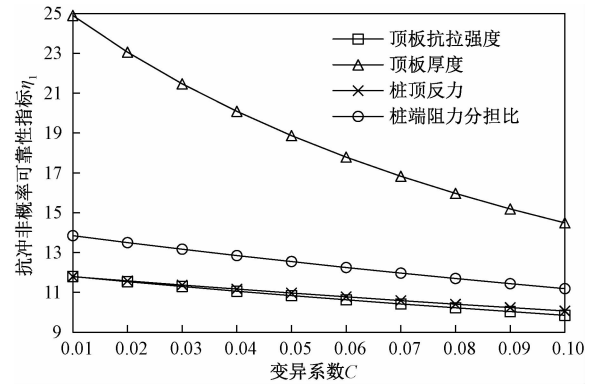


图 6 抗冲切非概率可靠性指标与各区间参数变异系数曲线

Fig. 6 Curve of the punching non-probabilistic reliability index and the coefficient of variation of each interval parameter

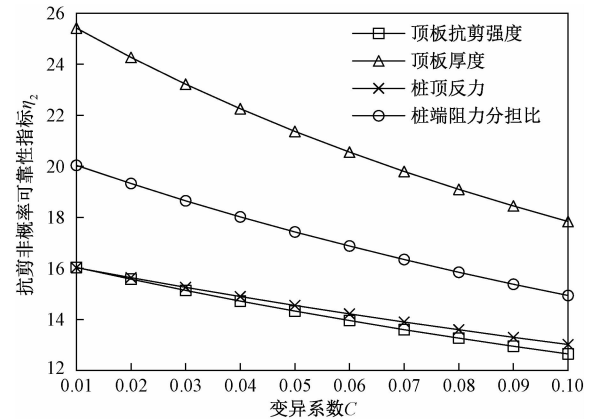


图 7 抗剪切非概率可靠性指标与各区间参数变异系数曲线

Fig. 7 Curve of the shearing non-probabilistic reliability index and the coefficient of variation of each interval parameter

从图 6~8 可以看出,总体上来说,3 种非概率可靠性指标(η_1 、 η_2 和 η_3)随各区间变量变异系数的增大而降低,但降低程度不同。笔者通过计算出各曲线的割线斜率绝对值 K 来描述敏感性的大小,曲线对应的割线斜率绝对值越大,相应的非概率可靠性指标随区间变量变异系数增大而降低的程度就越大,敏感性也就越高。图 6 中,各曲线的割线斜率绝对值计算结果及排序为: $K_1 - h(115.67) > K_1 - T(29.56) > K_1 - Rt(21.67) > K_1 - F(19.11)$;图 7 中,各曲线的割线斜率绝对值计算结果及排序为: $K_2 - h(84.33) > K_2 - T(56.57) > K_2 - \tau(37.67) > K_2 - F(33.44)$;图 8 中,各

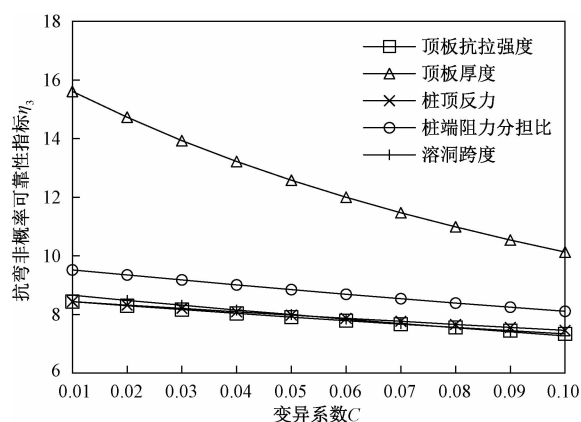


图8 抗弯非概率可靠性指标与各区参数变异系数的曲线

Fig. 8 Curve of the bending non-probabilistic reliability index and the coefficient of variation of each interval parameter

曲线的割线斜率绝对值计算结果及排序为: $K_3 - h$ (60.89) > $K_3 - T$ (15.67) > $K_3 - l$ (15.44) > $K_3 - Rt$ (12.22) > $K_3 - F$ (10.89)。通过上述计算结果可明显看出, 溶洞顶板厚度 h 的变异性对3种非概率可靠性指标影响最大, 其次为桩端阻力分担比 T , 桩顶反力 F 的影响相对最小。由此可见, 在进行桩基下溶洞顶板区间非概率可靠性分析时要特别注意区间变量的变异系数, 只有将区间变量的变异系数控制在一定范围内, 才能得到更准确的溶洞顶板稳定性评价结果。

4 结论

(1) 桩基下溶洞顶板稳定区间非概率可靠性评价方法以抗冲切、抗剪切和抗弯稳定性验算公式为基础建立功能函数, 借助 MATLAB 中的 INTLAB 区间运算工具箱进行区间运算, 并采用区间截断法消除运算过程中的区间扩展现象, 最后通过比较溶洞顶板体系的非概率可靠性指标 η 与 1 的大小来判断桩基下溶洞顶板的稳定性。

(2) 以丹霞高速互通中 D 匝道 2# 桩基下溶洞为例, 计算出该桩基下溶洞顶板体系的非概率可靠性指标 $\eta = 7.95 > 1$, 溶洞顶板处于稳定状态。该评价结果与工程实际相符, 表明了本方法的合理性与可行性。

(3) 随各区间变量变异系数的增大, 相应非概率可靠性指标呈不同程度的降低, 其中溶洞顶板厚度 h 的变异性对评价结果影响最大, 其次为桩端阻力分担比 T , 桩顶反力 F 的影响相对最小。因此, 得到准确评价结果的前提是将各区间变量的变异系数控制在合理范围以内。

参考文献:

- [1] 孟庆山, 陈勇, 汪稔. 岩溶洞穴工程地质条件与顶板稳定性评价[J]. 土工基础, 2004, 18(15): 55-58. [MENG Q S, CHEN Y, WANG R. Evaluation on roof stability and engineering geology condition of karst cave [J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(15): 55-58. (in Chinese)]
- [2] LUIS J B, REBECA M G, ANA M Z, *et al.* Stability assessment of shallow limestone caves through an empirical approach: application of the stability graph method to the Castañar Cave study site (Spain) [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1469-1483.
- [3] JIANG C, ZHAO M H, CAO W G. Stability analysis of subgrade cave roofs in karst region [J]. Journal of Central South University, 2008, 15(Sup2): 38-44.
- [4] JIANG C, LIU L, WU J P. A new method determining safe thickness of karst cave roof under pile tip [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(3): 1190-1196.
- [5] 韩红艳, 吴燕舞, 黑亮, 等. 岩溶路基溶洞顶板稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 1078-1082. [HAN H Y, WU Y W, HEI L, *et al.* Stability analysis of karst cave roof beneath highway subgrade [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 1078-1082. (in Chinese)]
- [6] 梁冠亭, 肖开乾, 郑宏伟, 等. 基于尖点突变理论的岩溶区嵌岩桩溶洞顶板安全厚度研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 67-72. [LIANG G T, XIAO K Q, ZHENG H W, *et al.* A study of the safety thickness of cave roof under rock-socketed pile in karst area based on the cusp catastrophe theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 67-72. (in Chinese)]
- [7] 陈记, 秦溯, 李云安, 等. 岩溶地区高速公路路桥基下伏溶洞顶板力学简化计算模型研究[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(6): 177-182. [CHEN J, QIN S, LI Y A, *et al.* Mechanical simplified calculation model of karst cave roofs under highway roadbed and bridge foundation in karst area [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(6): 177-182. (in Chinese)]
- [8] 汪华斌, 刘志峰, 赵文峰, 等. 桥梁桩基荷载下溶洞顶板稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3650-3657. [WANG H B, LIU Z F, ZHAO W F, *et al.* Research on stability of cave roof

- under pile loading in bridge construction engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (Sup 2): 3650 – 3657. (in Chinese)]
- [9] 罗强,谭捍华,龙万学,等. 岩溶地区公路桥基勘察与洞穴稳定性评价[J]. 公路交通科技, 2006, 23 (2): 111 – 114. [LUO Q, TAN H H, LONG W X, *et al.* Survey of highway bridge foundation and stability evaluation of cave in carst region [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (2): 111 – 114. (in Chinese)]
- [10] NIU J R, OYEDIRAN I A, LIU D A, *et al.* Quantitative foundation stability evaluation of urban karst area; Case study of Tangshan, China [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(3): 493 – 503.
- [11] ZUO J P, PENG S P, LI Y J, *et al.* Investigation of karst collapse based on 3-D seismic technique and DDA method at Xieqiao coal mine, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78 (4): 276 – 287.
- [12] 张俊萌,方从启,朱俊峰. 桩基下岩溶顶板稳定性有限元阶段分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 78 – 85. [ZHANG J M, FANG C Q, ZHU J F. Finite element phase analysis of karst-roof stability under pile foundation [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 78 – 85. (in Chinese)]
- [13] 赵明华,邱志博,张锐. 岩溶区地基极限承载力上限有限元数值模拟分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 57 – 62. [ZHAO M H, QIU Z B, ZHANG R. Numerical simulation analysis of foundation ultimate bearing capacity in karst area using upper bound finite element method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 57 – 62. (in Chinese)]
- [14] 戴自航,范夏玲,卢才金. 岩溶区高速公路路堤及溶洞顶板稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35 (增刊1): 382 – 390. [DAI Z H, FAN X L, LU C J. Numerical analysis of stability of highway embankments and karst cave roofs in karst region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (Sup1): 382 – 390. (in Chinese)]
- [15] 张林,杨志刚,钱庆强. 溶洞顶板稳定性影响因素正交有限元分析[J]. 中国岩溶, 2005, 24 (2): 156 – 159. [ZHANG L, YANG Z G, QIAN Q Q. Analysis to factors affecting the stability of karst cave ceiling with orthogonal definite element method [J]. Carsologica Sinica, 2005, 24 (2): 156 – 159. (in Chinese)]
- [16] 曹文贵,颜艳芬,张永杰. 基桩桩端岩溶顶板稳定性模糊能度可靠性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 88 – 94. [CAO W G, YAN Y F, ZHANG Y J. Fuzzy possibilistic reliability analysis method for stability of karst roof under pile tip [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 88 – 94. (in Chinese)]
- [17] 程晔,曹文贵,赵明华. 高速公路下伏岩溶顶板稳定性二级模糊综合评判[J]. 中国公路学报, 2003, 16 (4): 21 – 24. [CHENG Y, CAO W G, ZHAO M H. Synthetic judgement on the two stage fuzzy of the stability of karst top slab beneath expressway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (4): 21 – 24. (in Chinese)]
- [18] 赵帅,闫相祯,韩丽玲. 基于蒙特卡洛法的地下盐穴储气库顶板可靠性分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(36): 10908 – 10912. [ZHAO S, YAN X Z, HAN L L. Reliability analysis of natural gas storage roof based on Monte Carlo Method [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(36): 10908 – 10912. (in Chinese)]
- [19] 柏华军. 考虑溶洞顶板自重时桩端持力岩层安全厚度计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2945 – 2952. [BAI H J. A method for calculating the safety rock thickness of pile bearing strata with considering deadweight of karst cave roof [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (10): 2945 – 2952. (in Chinese)]
- [20] RAO S S, BERKE L. Analysis of uncertain structural systems using interval analysis [J]. Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997, 35(4): 727 – 735.
- [21] 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 S X, LU Z Z, FENG Y S. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1): 56 – 60. (in Chinese)]

编辑:张明霞