

基于截尾概率分布的基坑突涌模糊可靠度分析*

李明¹, 吴波^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004)

摘要: 岩土工程可靠度分析中, 计算参数具有随机性, 稳定性评价具有模糊性。传统的 Monte Carlo 模拟方法计算可靠度时, 往往假定参数概率分布在正负无穷之间分布, 与真实情况不符, 而且其计算效率也往往较低。规范推荐的基坑突涌验算公式, 计算结果往往偏于保守。引入截尾概率分布的确定方法, 对参数概率分布进行截尾处理; 提出拉丁超立方抽样与最大熵原理结合来确定结构响应概率分布的方法, 并将其与模糊可靠度原理结合, 构建了基于抽样模拟的模糊可靠度计算模型; 推荐了考虑土体抗剪强度的突涌验算公式。将所提方法应用于某深基坑工程突涌分析中, 其结果表明, 基于截尾分布的抽样可以有效避免参数抽样值为负数的情况, 所提计算模型效率明显优于传统的 Monte Carlo 模拟方法, 模糊可靠度的计算结果比经典可靠度更符合工程实际情况。

关键词: Monte Carlo 模拟方法; 拉丁超立方抽样; 最大熵原理; 模糊可靠度; 基坑突涌

中图分类号: TU921

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0294-09

Fuzzy Reliability Analysis on Water Inrush in Foundation Pit Based on Truncated Probability Distribution

Li Ming¹, Wu Bo^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P.R. China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P.R. China)

Abstract: In the reliability analysis of geotechnical engineering, the calculation parameters have characteristic of random and the stability evaluation is fuzzy. It is usually assumed that the parameters are distributed between the positive and negative infinity when the Monte Carlo simulation is applied to calculate the reliability, but this is inconformity with the real case. The computational efficiency of the Monte Carlo simulation is often low. The calculation results tend to be conservative by using the formula which is recommended by the specification for check calculation the foundation pit inrush. The parameters probability distributions are truncated by utilizing the method of the truncated probability distribution. The method for determining structure response probability distribution is proposed by combing the Latin hypercube sampling method and the maximum entropy principle, and it is used in fuzzy reliability principle to establish fuzzy reliability calculation model based on sampling simulation. It is used in fuzzy reliability principle to establish fuzzy reliability calculation model based on sampling simulation. The formula which includes shear strength of soil for check calculation the foundation pit inrush is recommended. The presented method is applied to analyze deep foundation pit inrush, the results show that the sampling based on the truncated probability distribution can efficiently avoid the situation that the sampling value is negative. The efficiency of the proposed calculation model is obviously better than the traditional Monte Carlo simulation method. The result of fuzzy reliability is more accord with the engineering practice than the classical reliability result.

Keywords: Monte Carlo simulation; Latin hypercube sampling; maximum entropy principle; fuzzy reliability; foundation pit inrush

* 收稿日期: 2018-08-15(修改稿)

作者简介: 李明(1988-), 男, 甘肃陇南人, 博士, 讲师, 主要从事地下工程结构分析方面的研究工作。

E-mail: lm20080808@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51478118, 51678164); 福建省自然科学基金(2018J01624); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT160329)

0 引言

工程实践表明^[1-3],当基坑所处环境中存在承压水时,施工过程、运营过程中基坑底部存在发生突涌破坏风险。规范^[4]给出了承压水条件下基坑突涌验算方法,但相关学者^[5]通过具体工程案例指出,规范推荐方法只考虑了岩土体重度,其计算结果与现场情况有一定偏差,明显偏于保守。针对这一问题,学者利用材料力学、弹性力学相关理论、离心模型试验、数值模拟等方法,建立了考虑基坑内隔水层土体内抗剪强度的突涌验算公式^[5-9]。相关学者的研究成果为认识突涌发生机理并进行基坑突涌风险分析奠定了基础。但目前对基坑突涌验算是以岩土体力学参数的试验均值为输入参数,安全系数作为指标进行评价,是一种确定性分析方法,未考虑岩土参数的随机性。

岩土体由于受到形成原因、赋存环境、工程活动等因素的影响,其力学参数具有很大的离散性,研究指出,考虑参数的随机性,基于概率的可靠度计算和设计更符合工程实际^[10]。可靠度分析涉及两个主要问题:计算参数的概率分布和计算方法。岩土体参数概率分布的确定已有很多研究成果^[11-12],但传统的概率分布模型往往假定参数变化是趋向于无穷的,这与工程实际明显是不符的^[13-14]。目前常用的结构可靠度计算方法有一次二阶矩法、Monte-Carlo法等。Monte-Carlo方法与一次二阶矩法相比,由于其不受功能函数是否为非线性、随机变量是否为正态等条件的限制,无论状态函数是否非线性、随机变量是否非正态,其均能得到较为精确的计算值^[15],因此在工程中得到较为广泛的应用^[10,16-17],但其计算效率问题一直未得到很好的解决。

岩土工程的稳定性分析除了受到随机性影响外,其稳定性的评价还具有模糊性,即“绝对安全”与“完全失效”之间不存在一个明显的界限,而是一个逐渐过渡的状态,传统的可靠性分析中利用极限状态方程将其硬性划分为“失效”、“安全”两个区域具有不合理性。针对稳定性的评价具有模糊性的问题,学者提出了模糊可靠度计算方法^[18],近几年来在边坡工程、路基工程等可靠性分析方面得到了应用^[19-21],并取得满意的效果。但目前隶属度函数的确定具有一定的随意性^[22],并未形成统一标准,而且相关计算过程往往较为复杂,工程实践中不具有很强的实用性。

本文以福州地铁二号线上街车站深基坑为工程背景,在相关研究的基础之上开展了以下工作:岩土参数的变动并不是趋向于无穷,而是在某一区间内变动的,引入截尾分布对其概率密度函数进行修正;将Latin超立方抽样和最大熵原理^[23-25]结合,确定结构响应的概率密度函数;基于结构稳定性评价的特点,提出利用柯西分布描述失效隶属度,并给出参数确定的方法;最后,构建了基于截尾分布的模糊可靠度计算模型,将所建立计算模型应用于实际工程中,分析了不同承压水头高度下基坑突涌概率,为基坑安全施工提供重要参考依据。

1 随机变量的截尾概率分布

设随机变量 X 的概率密度函数为 $f(x)$,传统的概率分布中往往要求 $x \in (-\infty, +\infty)$,但实际工程中,计算参数往往只在某一实数区间内变动,因此,相关学者提出对概率分布进行截尾处理的方法(图1)。对于概率密度两端尾部截断相等的情况,由下式确定截断点^[13]:

$$f(x_b) = f(x_l) = C_r f(x^*) \quad (1)$$

式中: x_b 为左截断点; x_l 为右截断点; x^* 为概率密度最大点; C_r 为概率密度截断率,一般在区间 $[0, 0.2]$ 内取值。

采用加权增量方式,确定截尾后的概率密度函数和累积分布函数为^[13]:

$$\bar{f}(x) = \frac{f(x)}{F(x_l) - F(x_b)} \quad (2)$$

$$\bar{F}(x) = \frac{F(x) - F(x_b)}{F(x_l) - F(x_b)} \quad (3)$$

式中: $\bar{f}(x)$ 为随机变量截尾概率密度函数; $f(x)$ 为随机变量原概率密度函数; $\bar{F}(x)$ 为随机变量截尾累积分布函数; $F(x)$ 为随机变量原累积分布函数。

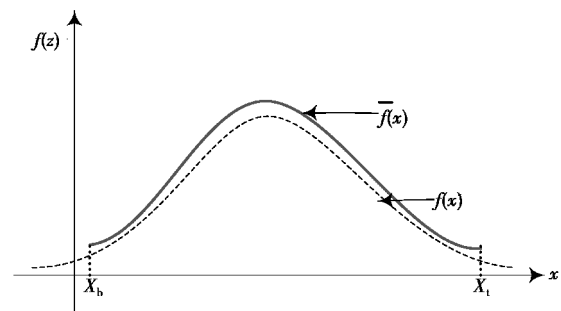


图1 截尾概率分布

Fig. 1 The truncated probability distribution

2 截尾分布的拉丁超立方抽样

Monte Carlo 模拟法又称统计试验法,是一种直接抽样法,其通过随机变量的数字模拟和统计分析来求取相关问题的近似解。对截尾正态分布,结合式(1)~(3),利用反函数法确定其抽样公式如下^[13]:

$$x_r = \mu + \sigma \Phi^{-1} \left[\Phi \left(\frac{x_b - \mu}{\sigma} \right) + r \left(\Phi \left(\frac{x_t - \mu}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{x_b - \mu}{\sigma} \right) \right) \right] \quad (4)$$

式中: x_r 为每次抽样产生的随机数; μ 为随机变量均值; σ 为随机变量均方差; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数; x_b 为左截断点; x_t 为右截断点; r 为在区间 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

利用常规的 Monte Carlo 模拟法计算失效概率 p_f 时,计算量非常大。为解决这一问题,学者提出了许多降低模拟方差以提高抽样效率的方法,其中拉丁超立方抽样方法是代表性的一种^[16-17]。

拉丁抽样法属于一种受约束的抽样法,若要生成 N 个随机数,拉丁超立方抽样的基本过程如下:首先,将区间 $[0,1]$ 等分成 N 个互不重叠的子区间,然后在每个子区间内分别进行独立的等概率抽样。于是,第 i 个子区间内的随机数为:

$$r_i = \frac{U}{N} + \frac{i-1}{N} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中: r_i 为从属于第 i 个子区间的随机数; U 为 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数。

将每个子区间内的随机数 r_i 带入式(4)转化为样本值,对所有随机变量的样本值进行随机组对得到计算所需抽样值。

3 最大熵原理确定概率密度函数

若结构功能函数为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6)$$

由于 X_1, X_2, \dots, X_n 为 n 个随机变量,故功能函数响应值,即结构响应 Z 也为某区间 $[a, b]$ 上的随机变量,依据最大熵原理其概率密度函数可近似表达为^[23-25]:

$$f(z) = \exp \left(\lambda_0 + \sum_{i=1}^s \lambda_i z^i \right) \quad (7)$$

其满足如下限制条件:

$$\int_a^b f(z) dz = 1 \quad (8)$$

$$\int_a^b x^k f(z) dz = \mu_k \quad (i=1, \dots, m) \quad (9)$$

式中: $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为待定系数; μ_k 为样本的第 k 阶原点矩。

将由随机抽样获得 N 组随机数 $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i$ ($i=1, 2, \dots, N$),带入式(6)得到 N 个功能函数响应值 z :

$$z_i = g(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

则可求得随机变量 Z 的样本矩为:

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^k \quad (11)$$

由于 Z_1, Z_2, \dots, Z_n 相互独立且同分布,根据大数定律,可证样本矩依 A_k 概率收敛于总体原点矩 u_k ,即当 N 充分大时有:

$$A_k = u_k \quad (12)$$

故依据抽样样本 z_i ($i=1, 2, \dots, n$)即可求得随机变量 Z 的概率密度函数 $f(z)$ 。文献[23]、[24]、[25]中给出了依据样本值 z_i ($i=1, 2, \dots, N$)求解待定系数 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ 的方法,限于篇幅,本文此处略去。

4 模糊可靠度分析原理

实际工程中,“失稳”是一个模糊的概念,很难有一个明确的界限来划分“完全失稳”和“完全稳定”两种状态。因此,学者提出利用模糊数学描述失稳,经典稳定状态划分与模糊稳定状态划分如图2所示。

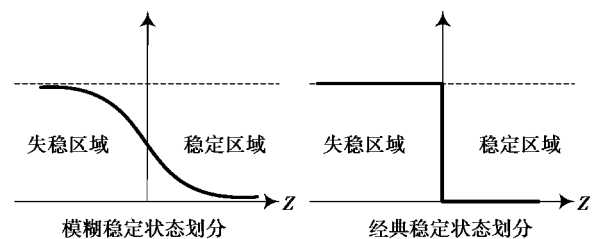


图2 模糊与经典稳定状态划分

Fig. 2 The stability statements division of fuzzy and tradition

若集合 A 表示“失稳”,则功能函数的任意一个计算值 z 属于“失稳”的程度可以用隶属度函数 $\mu_A(z)$ 表示。结构的失稳既具有模糊性,又具有随机性,故其为一模糊随机事件。根据模糊数学的理论,结构“失稳”的模糊概率可由下式求出^[18-19, 21-22]:

$$\hat{p}_f = \int_a^b f(z) \mu_A(z) dz \quad (13)$$

式中: \hat{p}_f 为模糊失稳概率; $f(z)$ 为结构响应的概率

密度; $\mu_A(z)$ 为失稳隶属度函数; a, b 为积分区间,一般情况下为 $\pm\infty$,截尾概率分布情况下分别为功能函数的最小值 z_{\min} (要求 $z_{\min} < 0$)、最大值 z_{\max} 。

模糊可靠度计算中隶属度函数的选取是一个关键^[22],目前对于隶属度函数的选取尚无统一标准,结合稳定状态划分的特点,本文选用柯西分布为隶属度函数。截尾概率分布情况下,依据结构响应概率分布形式的不同(图3),结构稳定状态划分为以下3种情况:

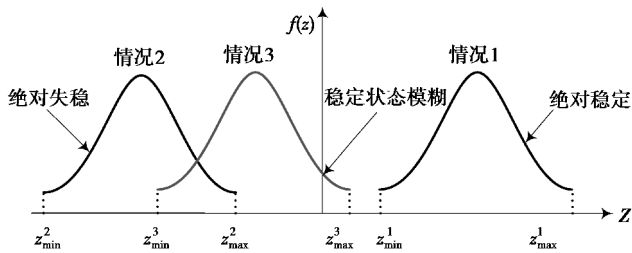


图3 结构响应概率分布形式

Fig. 3 The probability distribution form of the structural response

情况1:当功能函数值的最小值 z_{\min} 大于零时,结构必然稳定,即:

$$\mu_A(z) = 0 (z_{\min} \geq 0) \quad (14)$$

情况2:当功能函数值的最大值 z_{\max} 小于零时,结构必然失稳,即:

$$\mu_A(z) = 1 (z_{\max} \leq 0) \quad (15)$$

情况3:当功能函数值的最小值 z_{\min} 小于零且最大值 z_{\max} 大于零时,结构稳定状态划分具有模糊性,选用柯西分布描述稳定状态的模糊性,即若 $z_{\min} \leq 0, z_{\max} \geq 0$ 则:

$$\mu_A(z) = \frac{1}{1 + \alpha (z - a)^\beta} (z_{\min} < z < z_{\max}) \quad (15)$$

式中: α, a, β 为待定常数;

一般认为当功能函数值为0时,为最模糊状态,即 $\mu_A(0) = 0.5$,结合 $\mu_A(z_{\min}) = 1, \mu_A(z_{\max}) \approx 0.001$ (若取 $\mu_A(z_{\max}) = 0$,会导致参数 α, a, β 不存在,故此处取为0.001),可知柯西分布隶属度函数的参数可由下式求出:

$$\begin{cases} a = z_{\min} \\ \beta \approx \log(999)/\log[-(z_{\max} - z_{\min})/z_{\min}] \\ \alpha \approx (-z_{\min})^\beta \end{cases} \quad (16)$$

式中: z_{\min} 为功能函数值的最小值; z_{\max} 为功能函数

值的最大值。

5 工程应用

福州地铁2号线上街站为一地下二层岛式车站,车站基坑支护工程安全等级为一级,重要性系数为1.1。基坑开挖深度约16.3~19.0 m,基坑长约200 m,宽约19.7~23.8 m。车站主体采用明挖法施工,采用地下连续墙支护,基坑底部采用旋喷桩抽条加固处理。勘察资料显示,基坑所处环境有承压水作用,承压水层水头与基坑不透水层底部高差约16~18 m,坑底不透水层厚度仅为3~5 m(图4),开挖过程中有发生基底突涌的可能性。为保证基坑施工安全,有必要对不同承压水头下基坑发生突涌水的概率进行分析。

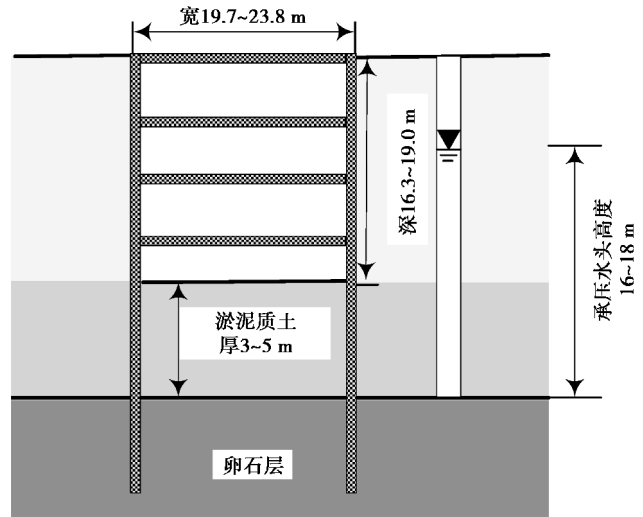


图4 基坑剖面示意图

Fig. 4 The cross section drawing of the foundation pit

5.1 基坑突涌判别的功能函数

相关学者在离心模型试验、数值模拟、工程实例等研究的基础上提出考虑基坑底部不透水层抗剪强度的突涌验算模型^[5-9, 26-27](图5),并建立了突涌验算公式^[8]。在此基础上,本文给出基坑突涌判别的功能函数:

$$Z = \gamma_m h S + (ch + 0.5K_0 \gamma_m h^2 \tan \varphi) C - 1.1 \gamma_w H_w S \quad (17)$$

式中: γ_m 为基坑底部隔水土层的饱和重度; h 为隔水土层的厚度; γ_w 为水的重度; H_w 为承压水头距离隔水土层底面高度; c 为隔水土层内聚力; K_0 为隔水土层土体静止侧压力系数, $K_0 = 1 - \sin \varphi$; φ 为隔水土层内摩擦角; S 为基坑开挖平面面积, $S = a \times b$; C 为基坑开挖周长, $C = 2(a + b)$,其中 a 为基坑宽度; b 为基坑开挖长度。

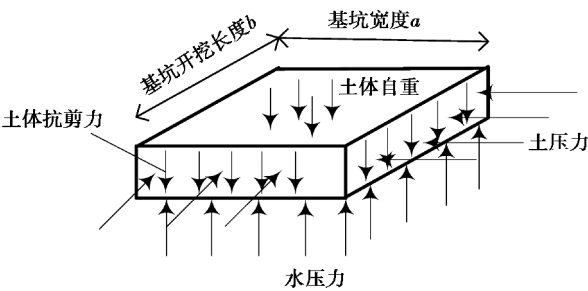


图 5 基坑隔水土层受力示意图

Fig. 5 Diagram of load on pit anti-water layer

对于福州地铁 2 号线上街站的计算分析中,基坑底部隔水土层厚度取 3 m ($h=3\text{ m}$),基坑宽度取 20 m,基坑分段开挖,每次开挖长度约为 15 m,即 $S=300\text{ m}^2$ 。隔水土层相关岩土力学参数服从正态分布,相关统计量如表 1 所示。

表 1 岩土力学参数均值与标准差

Table 1 Mean value and standard deviation of soil mechanics parameters

参数	均值	标准差
$\gamma_m (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	16.9	5.1
c/kPa	16	4.8
$\varphi/(\circ)$	10	3

5.2 岩土参数截尾概率分布抽样

限于篇幅,此处取内聚力 c 为研究对象,对比分析了正常概率分布与截尾率为 0.05 ($C_{fr}=0.05$) 情况下的截尾概率分布抽样,抽样结果如图 6、7 所示。

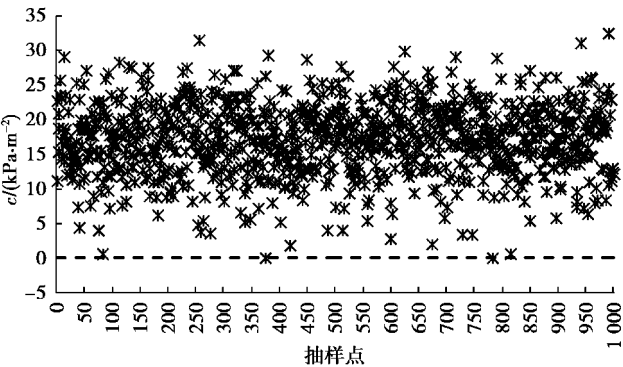


图 6 正常概率分布抽样

Fig. 6 A random sample of the normal probability distribution

由图 6、7 所示的抽样结果可知,正常概率分布情况下的抽样存在内聚力 c 接近 0 甚至为负数的

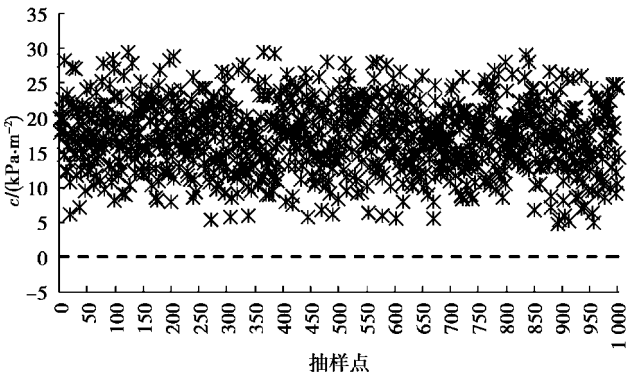


图 7 截尾概率分布抽样

Fig. 7 A random sample of the truncated probability distribution

情况,而这明显是违背常识的,而基于截尾概率分布的抽样则有效地避免了这一情况的发生,抽样结果更符合实际情况。

5.3 模糊可靠度计算

基于拉丁超立方抽样与最大熵原理结合,构建了基于抽样模拟的模糊可靠度计算模型,其计算流程如图 8 所示。

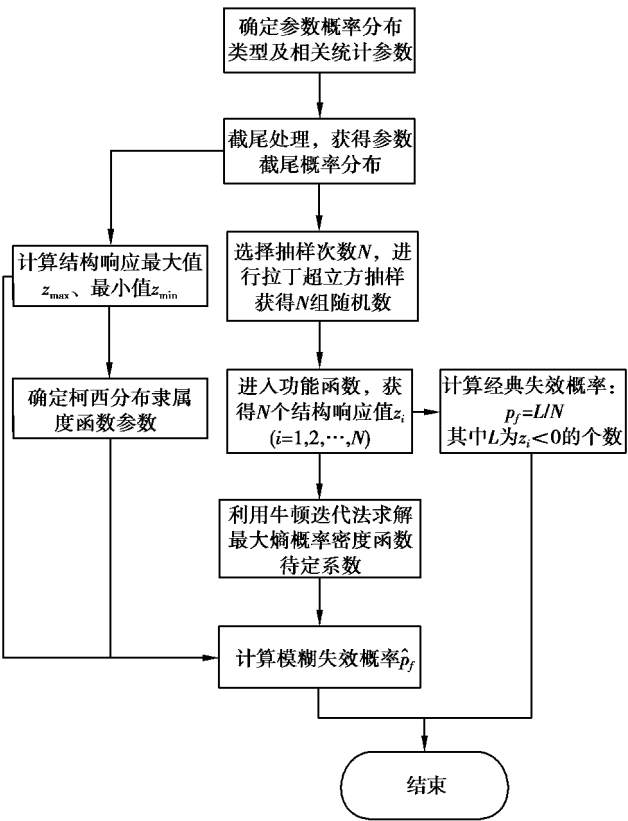


图 8 模糊可靠度计算流程图

Fig. 8 Flow chart of fuzzy reliability calculation

基于 Matlab 软件编制计算程序实现相关计算,其中由于最大熵密度函数对样本阶数的要求不高,一般仅需取前四、五阶矩即能获得良好的效

果^[24-25]。本文选择四阶矩,即 $f(z) = \exp(\lambda_0 + \lambda_1 z + \lambda_2 z^2 + \lambda_3 z^3 + \lambda_4 z^4)$,采用牛顿迭代法求解其系数。

此处以抽样次数 $N = 1\ 000$ 、承压水头高度 $H_w = 7\text{ m}$ 、不考虑基坑底部加固情况为例,对所提方法及计算程序的计算效果进行说明。计算得到最大熵密度函数与样本统计频率的关系如图9所示,柯西分布隶属函数如图10所示。

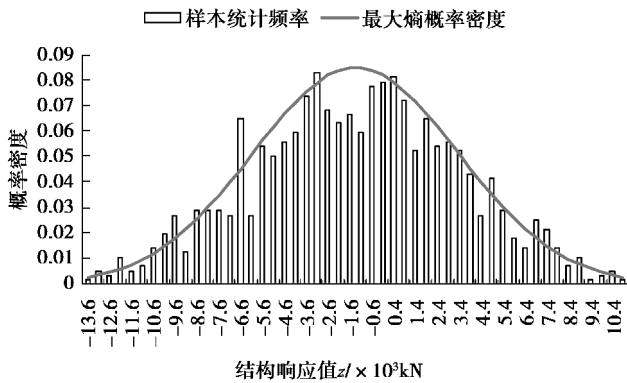


图9 最大熵概率密度与样本统计频率

Fig. 9 The maximum entropy probabilistic density and the sample statistical frequency

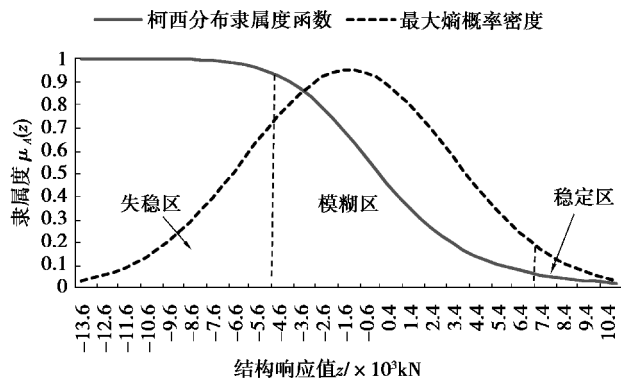


图10 柯西分布隶属度函数

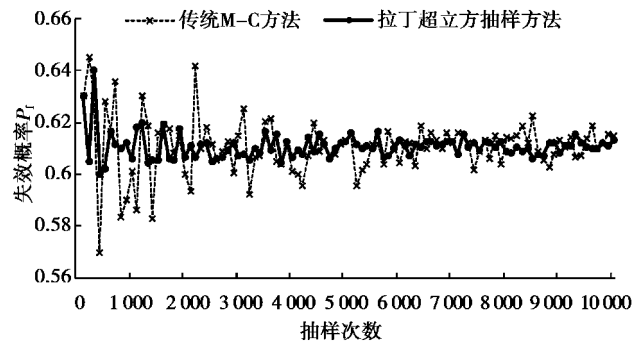
Fig. 10 The Cauchy membership function

由图9可知,基于最大熵原理确定的概率密度函数可以有效地描述的随机变量 Z 的分布特征。由图10可知,柯西分布有效的将结构响应划分为3个区域,即 $\mu_A(z) \approx 1$ 的失稳区, $\mu_A(z) \approx 0$ 的稳定区, $0 < \mu_A(z) < 1$ 的模糊区域,其与人们对“稳定”评价的认识是很接近的。

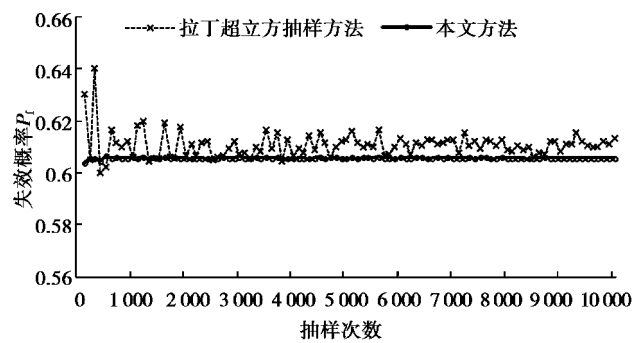
5.4 计算效率对比分析

由于工况较多,此处以承压水头高度 $H_w = 7\text{ m}$ 且不考虑基坑加固效果情况下基坑突涌概率为例,分别以传统 M-C 方法、拉丁超立方抽样方法、本文所提方法计算了抽样次数分别为 100、200、…、10 000 情况下的失效概率,计算结果如图11、12所

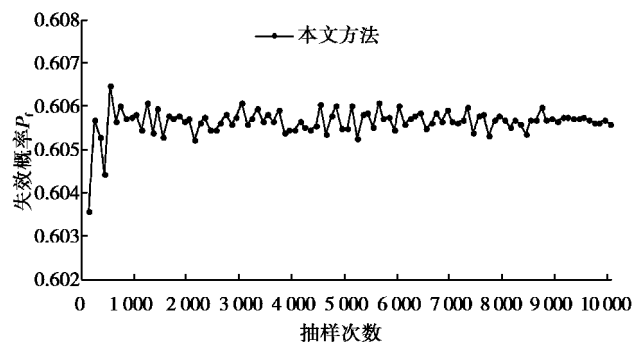
示(为了便于读图,此处将计算结果分别绘制与三幅图中)。



(a)



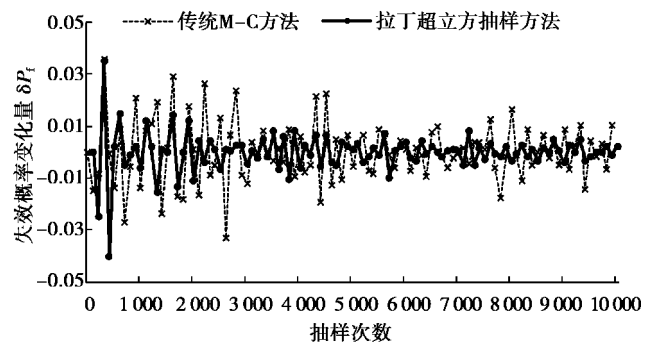
(b)



(c)

图11 失效概率与抽样次数关系

Fig. 11 The relationship between failure probability and sample size



(a)

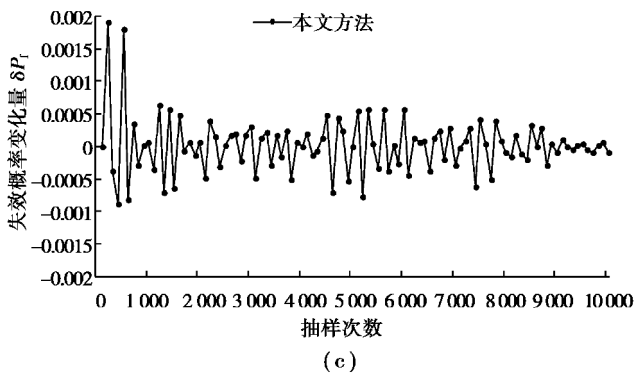
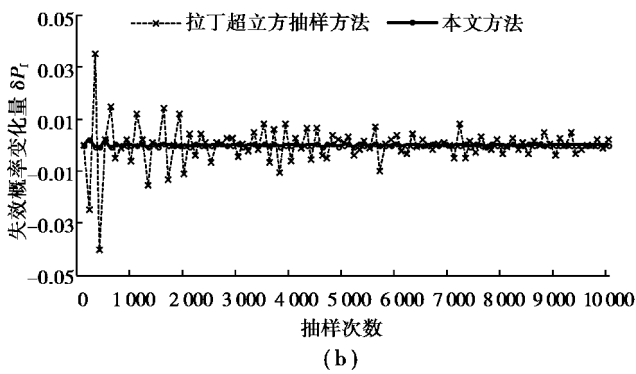


图 12 失效概率变化量与抽样次数关系

Fig. 12 The relationship between variation of failure probability and sample size

其中,本文方法所计算失效概率为模糊失效概率 \hat{p}_f ,而失效概率变化量(δp_f)是指后一次抽样试验计算值减去本次抽样试验计算值。

由图 11(a)、12(a)可知,拉丁超立方抽样方法当抽样次数达到约 1 500 次以后,失效概率计算值和变化量趋于稳定,而传统 M-C 方法当抽样次数达到约 5 000 次以后,失效概率计算值和变化量才趋于稳定,因此,拉丁超立方抽样方法优于传统 M-C 方法。

由图 11(b)、11(c)、12(b)、12(c)可知,本文提出的将拉丁超立方抽样方法与最大熵原理结合的计算方法计算结果波动较小,即在抽样次数较低的情况下即可得到较精确的计算结果,其计算效率相比于拉丁超立方抽样方法有进一步提升。

5.5 不同承压水头下基坑突涌模糊概率

首先,利用规范^[4]推荐的验算方法分析了不同承压水头下基坑抗突涌的安全系数,计算结果如图 13 所示。

由计算结果可知,依据规范推荐验算方法,基坑施工过程中承压水头应该控制在大约 4 m 以下。

工程实践表明,坑底在加固后土体强度较之原

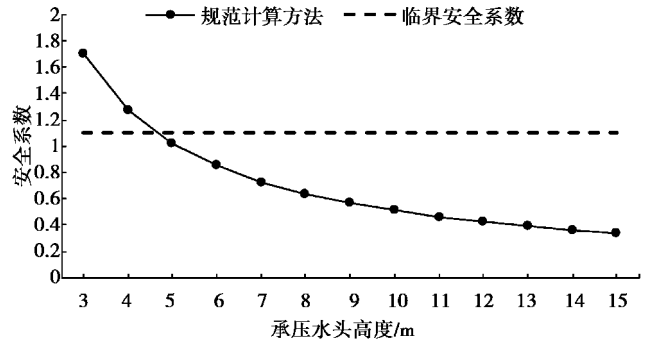


图 13 规范推荐方法验算结果

Fig. 13 The result of the specification recommended method
状土已大大提高,尤其是对土体的内聚力提高明显,现场实测等资料表明其大约可提高 4 倍左右,土体强度的提高一定程度上可以有效地降低基坑突涌灾害的发生。基于此,分析了不同承压水头下坑底未加固和坑底在加固后发生突涌的概率,计算结果如图 14~16 所示。

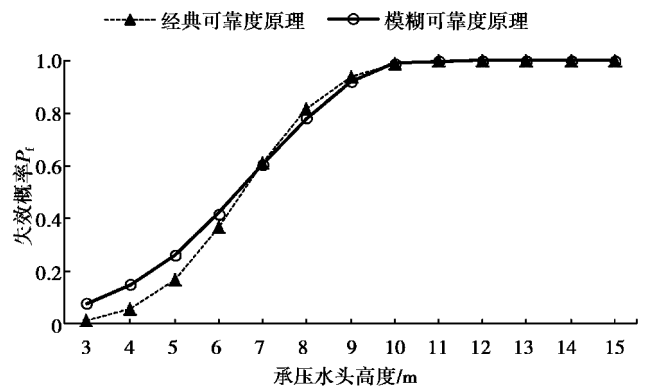


图 14 基坑底部未加固突涌发生概率

Fig. 14 The intruding probability of pit bottom without reinforcement

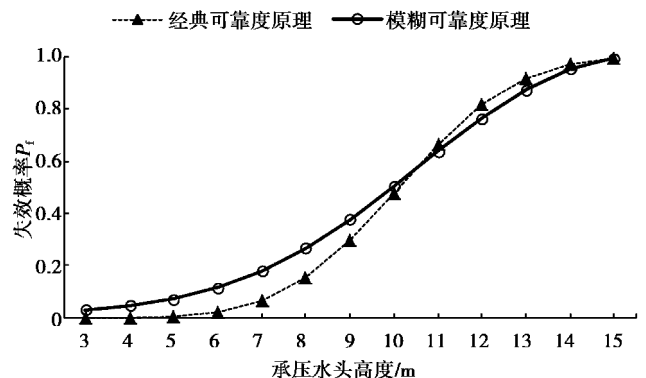


图 15 基坑底部加固后突涌发生概率

Fig. 15 The intruding probability of pit bottom without reinforcement

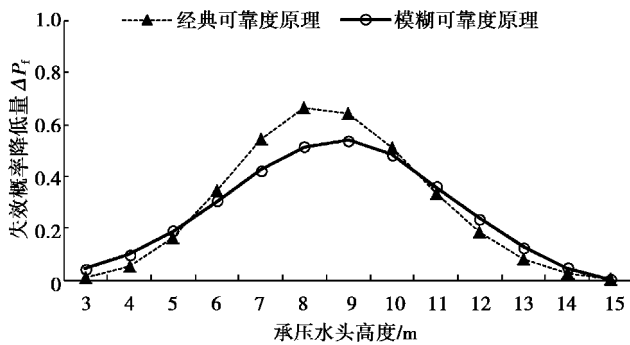


图 16 基坑底部加固后失效概率降低量

Fig. 16 The reduction of The intruding probability of pit bottom without reinforcement

由计算结果可知,当结构处于低失效概率状态时,模糊可靠度方法计算的失效概率大于传统抽样方法计算的失效概率,这与相关的研究结果相似^[21]。实际工程中某些情况下,基于传统方法计算的结构失效概率很低,但还是存在结构失稳的情况,原因之一是低估了结构的失效概率。因此,模糊可靠度方法在计算原理及计算结果上更接近真实情况。

基坑坑底加固可以有效地降低突涌水事故的发生。由图 16 可知,最大可使其发生概率降低约 66%,即基坑坑底加固可以提供有效的安全储备。

由图 15、16 的计算结果可知,考虑土体抗剪强度和加固效果,承压水头控制在 6~7 m 左右即可达到相应的安全要求,相比于规范推荐验算方法,承压水头高度可提高约 50%~75%,可带来可观的经济效益。实际施工过程中,承压水头控制在 5 m 左右,基坑开挖至底部时,未见大量渗水,整个施工过程中基坑底部达到安全标准。

6 结论

(1)传统概率分布往往假定随机变量在正负无穷之间分布,利用抽样方法计算可靠度时,存在抽样值为负值的情况。截尾概率分布抽样则有效地避免了参数抽样值可能为负值这一情况的发生,抽样结果更符合实际情况。

(2)相比较与传统 Monte Carlo 模拟方法,本文所提的利用拉丁超立方抽样与最大熵原理结合,计算模糊失效概率的方法,计算效率较高,即其在抽样次数较低的情况下也可得到较精确的计算结果。

(3)相比于经典可靠度理论,模糊可靠度方法计算原理更合理,其计算结果上更接近真实情况,更具参考性。

(4)基坑加固可以有效地降低突涌水事故的发生,最大可使其发生概率降低约 66%左右。考虑土体抗剪强度和加固效果,相比于规范推荐验算方法,承压水头高度可提高约 50%~75%,可带来可观的经济效益。

本文所提方法对其他类似工程具有一定的借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] 徐长节,徐礼阁,孙凤明,等.深基坑承压水的风险控制及处理实例[J].岩土力学,2014,35(增1):353-358.(Xu Changjie, Xu Lige, Sun Fengming, et al. Risk control and dealing example of confined water of deep foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Supp.1): 353-358. (in Chinese))
- [2] 翁其平,王卫东.深基坑承压水控制的设计方法与工程应用[J].岩土工程学报,2008,30(增):343-348.(Weng Qiping, Wang Weidong. Design and application of control of confined groundwater in deep foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (Supp.): 343-348. (in Chinese))
- [3] 秦尚林,王红亮,克高果.深井降水基坑涌水涌砂原因分析及对策[J].岩土力学,2005,26(增):271-275.(Qin Shanglin, Wang Hongliang, Ke Gaoguo. Analysis of water and sand gushing out of a foundation pit and prevention countermeasures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.): 271-275. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国建设部.建筑地基基础设计规范(GB 50007-2002)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation(GB 50007-2002)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 梁勇然.条形基坑的突涌分析[J].岩土工程学报,1996,18(1):75-79.(Liang Yongran. Intrush analysis of strip foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 75-79. (in Chinese))
- [6] 马石城,印长俊,邹银生.抗承压水基坑底板的厚度

- 分析与计算[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 204-208. (Ma Shicheng, Yin Changjun, Zou Yinsheng. Analysis and calculation of the pit base plate thickness of bearing resistance water foundation[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 204-208. (in Chinese))
- [7] 潘泓, 曹洪, 谭泽新, 等. 基坑抗突涌计算方法的对比分析及应用探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3529-3534. (Pan Hong, Cao Hong, Tan Zexin, et al. Discussion on comparison analysis and application of calculation methods to anti-uprush of foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3529-3534. (in Chinese))
- [8] 孙永玉, 周顺华, 肖红菊. 承压水基坑抗突涌稳定判定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 399-405. (Sun Yuyong, Zhou Shunhua, Xiao Hongju. Study of stability judgement method of confined water in rushing in foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 399-405. (in Chinese))
- [9] 杨建民, 郑刚. 基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 261-264. (Yang Jianmin, Zheng Gang. Classification of seepage failures and opinion to formula for check bursting instability in dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 261-264. (in Chinese))
- [10] 尹小涛, 王水林. 基于可靠度理论的滑坡稳定性及其影响因素分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1551-1556. (Yin Xiaotao, Wang Shuilin. Stability and its influential factors analysis of landslides based on reliability theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1551-1556. (in Chinese))
- [11] 李夕兵, 宫凤强. 岩土力学参数概率分布的推断方法研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007, 4(1): 1-8. (Li Xibing, Gong Fengqiang. A research review of the method to deduce the probability distribution of geotechnical mechanics parameters[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2007, 4(1): 1-8. (in Chinese))
- [12] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3527-3532. (Zhang Jizhou, Miao Linchang. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 3527-3532. (in Chinese))
- [13] 许福友, 陈艾荣. 基于截尾概率分布的结构可靠性分析[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 52-57. (Xu Fuyou, Chen Airong. Structural reliability analysis based on truncated probabilistic distribution[J]. Engineering mechanics, 2006, 23(11): 52-57. (in Chinese))
- [14] 张建仁, 许福友. 计算结构可靠指标的子域抽样法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 39-43. (Zhang Jianren, Xu Fuyou. Subdomain sampling method for calculating structural reliability index[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12): 39-43. (in Chinese))
- [15] 傅旭东, 赵善锐. 用蒙特卡洛(Monte-Carlo)方法计算岩土工程的可靠度指标[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(2): 164-168. (Fu Xudong, Zhang Shanrui. Applying the Monte-Carlo simulation to calculate the geotechnical reliability index[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(2): 164-168. (in Chinese))
- [16] 王林, 徐青. 基于蒙特卡罗随机有限元法的三维随机渗流场研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 287-292. (Wang Lin, Xu Qing. Analysis of three dimensional random seepage field based on Monte-Carlo stochastic finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 287-292. (in Chinese))
- [17] 伍国军, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 基于拉丁超立方抽样的有限元可靠度程序开发及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 550-554. (Wu Guojun, Chen Weizhong, Tan Xianjun, et al. Program development of finite element reliability method and its application based on Latin hypercube sampling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 550-554. (in Chinese))
- [18] 王光远, 刘玉彬. 结构模糊随机可靠度的实用计算方法[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(3): 38-45. (Wang Guangyuan, Liu Yubin. Practical calculation method for fuzzy random reliability of structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(3): 38-45. (in Chinese))
- [19] 贾厚华, 贺怀建. 边坡稳定模糊随机可靠度分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 657-660. (Jia Houhua, He Huaijian. Analysis of fuzzy-random reliability of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 657-660. (in Chinese))