

# 基于 Monte Carlo 模拟的软土基坑隆起分析

李明<sup>1,2</sup>, 吴波<sup>1,3</sup>, 张焕明<sup>4</sup>, 周鹏<sup>4</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;  
3.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 4.中交一公局厦门工程有限公司, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于圆弧滑动模型确定的安全系数, 将基坑隆起破坏的不利事件划分为 5 种情况, 利用 Monte Carlo 模拟确定不利事件发生概率, 提出了考虑基坑隆起破坏引起的不利事件发生概率及经济损失的风险评估模型。将所提方法应用于福州地铁 2 号线某基坑工程中, 结果表明, 当围护结构插入比小于 1.2 时, 加固对基坑隆起破坏损失期望减小效果显著; 当围护结构插入比大于 1.2 时, 加固对基坑隆起破坏损失期望减小效果一般; 当插入比小于 0.8 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“严重”; 当插入比介于 0.8~1.2 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“需要考虑”; 当插入比大于 1.2 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“可忽略”。

**关键词:** Monte Carlo 模拟方法; 基坑隆起; 圆弧滑动; 风险评估

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)06-0541-06

## Analysis of soft soil foundation pit heave based on Monte Carlo simulation

LI Ming<sup>1,2</sup>, WU Bo<sup>1,3</sup>, ZHANG Huanming<sup>4</sup>, ZHOU Peng<sup>4</sup>

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Underground Engineering, Fuzhou 350118, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

4. Xiamen Engineering Co. Ltd., CCCC First Highway Engineering Group, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The adverse events of foundation pit heave were divided into five cases based on the safety factor of circular arc-sliding model. The probability of adverse events was determined by Monte Carlo simulation. A risk assessment model considering the probability and economic loss of adverse events caused by foundation pit heave was put forward. The proposed method was applied to a foundation pit of Fuzhou Metro Line NO. 2. Results show that the reducing effect of reinforcement on foundation pit heave's loss expectation is remarkable when the insertion ratio of the enclosure structure is less than 1.2. The effect of reinforcement on the loss expectation of foundation pit heave is generally reduced when the insertion ratio of enclosure structure is greater than 1.2. When the insertion ratio is less than 0.8, the loss expectation grade of foundation pit uplift damage is "serious". When it is between 0.8 and 1.2, the loss expectation grade of foundation pit uplift is "consideration needed". When it is greater than 1.2, the loss expectation grade of foundation pit uplift is "negligible".

**Keywords:** Monte Carlo simulation method; foundation pit heave; circular arc sliding; risk assessment

收稿日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478118, 51678164); 福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT160329)

第一作者简介: 李明(1988-), 男, 甘肃陇南人, 讲师, 博士, 研究方向: 软土地下工程方面。

我国东南沿海地区多为软土地基,地下水位高、土体力学强度低,在基坑施工过程中容易产生各种类型的灾害事件,其中基坑底部隆起破坏是较常见、影响较大的一类<sup>[1]</sup>。学者基于极限平衡法、极限分析法等提出了多种基坑抗隆起稳定性分析方法<sup>[2-3]</sup>,并且在相关工程中得到了应用,但目前的研究往往忽略了岩土体的随机性,相关研究指出考虑岩土力学参数的随机性,基于概率的计算、设计更符合工程实际<sup>[4-5]</sup>。本文采用基坑抗隆起稳定性分析中最常用的圆弧滑动模型,提出基于 Monte Carlo 模拟及圆弧滑动模型计算安全系数的方法,利用安全系数概率分布确定基坑隆起概率,结合潜在经济损失进行基坑隆起风险评估,最后将其应用于福州某地铁车站基坑隆起稳定性分析中,相关结论为工程施工提供参考依据。

## 1 基坑抗隆起分析的圆弧滑动法

软土地区多采用圆弧滑动模型对基坑隆起进行分析,假定基坑隆起破坏面是一圆弧,圆弧上部土体产生滑动力,圆弧滑动面提供抗滑力,通过分析抗滑力与滑动力的比值判断基坑隆起稳定性。圆弧滑动分析模型如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

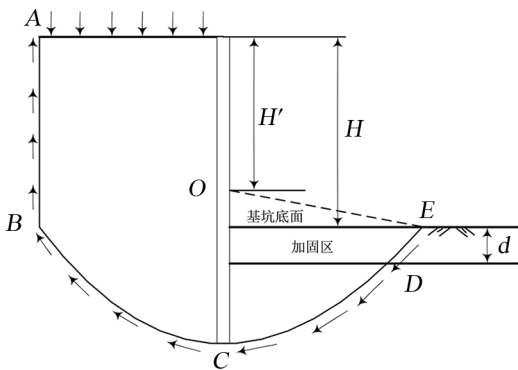


图 1 基坑抗隆起圆弧滑动模型

Fig.1 Circular arc sliding model of heave-resistance in foundation pit

相关学者假定滑动面圆心在最下道支撑点  $O$  处,推导了基坑抗隆起安全系数的计算公式,其中滑动面  $AB$ 、 $BC$ 、 $CE$  上的抗滑力矩依次为<sup>[6]</sup>:

$$M_{AB} = \frac{\gamma D' H'^2}{2} K_a \tan \varphi + D' H' (q K_a \tan \varphi + c) \quad (1)$$

$$M_{BC} = \frac{\pi}{4} D'^2 q_f \tan \varphi + \frac{2}{3} \gamma D'^3 \tan \varphi +$$

$$\frac{\pi}{4} K_a D'^2 q_f \tan \varphi + \frac{1}{3} K_a \gamma D'^3 \tan \varphi + \frac{1}{2} c D'^2 \quad (2)$$

$$M_{CE} = \gamma D'^3 \tan \varphi \left( \cos \alpha - \frac{\cos^3 \alpha}{3} \right) - \gamma D'^3 \tan \varphi \sin \alpha$$

$$\left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right] + K_p \gamma D'^3 \tan \varphi \frac{\cos^3 \alpha}{3} -$$

$$K_p \gamma D'^3 \tan \varphi \sin \alpha \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right] +$$

$$c D'^2 \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \quad (3)$$

加固区提供的附加抗滑力矩为:

$$M_a = \frac{B}{B+L} (c' - c) \left( \arcsin \frac{H-H'+d}{D'} - \alpha \right) \quad (4)$$

滑动面上部土体产生的滑动力矩为:

$$M_s = \frac{1}{2} (\gamma H' + q) D'^2 +$$

$$\frac{1}{2} \gamma D'^2 (H - H') \cos^2 \alpha + \frac{1}{3} \gamma D'^3 \sin^3 \alpha \quad (5)$$

则基坑隆起稳定性安全系数为:

$$K_s = \frac{M_{AB} + M_{BC} + M_{CE} + M_a}{M_s} \quad (6)$$

式中,  $\gamma$ 、 $c$ 、 $\varphi$  分别为土体加权平均容重、黏聚力、内摩擦角;  $c'$  为加固后土体内聚力;  $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ ;  $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ ;  $q_f$  为开挖面深度处的竖向土压力值;  $q$  为地面超载;  $D$  为围护结构插入坑底土体深度;  $H$  为基坑开挖深度;  $H'$  为最下道支撑深度; 为滑动圆弧半径,  $D' = D + H - H'$ ;  $\alpha$  为  $OE$  与水平面夹角;  $B$  加固体宽度;  $L$  加固体净间距;  $d$  为加固体深度。

## 2 Monte Carlo 模拟的基本原理

Monte Carlo 模拟法,又称统计试验法,是一种通过随机变量的数字模拟和统计分析来求解工程问题近似解的数值方法<sup>[7]</sup>。其基本思想是若某函数  $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$  的自变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为随机变量且其概率分布已知,用随机抽样方法获得  $N$  组随机数  $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i (i = 1, 2, \dots, N)$ , 带入函数得到  $N$  组函数值。

$$Z_i = g(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

对  $Z_i (i = 1, 2, \dots, N)$  进行统计分析,则可获得自变量  $Z$  的概率分布。

### 3 基坑隆起风险分析的基本理论

工程风险是指不利事件或事故发生的概率及其损失的组合,常定义为<sup>[8]</sup>:

$$R = p \times C \quad (8)$$

其中, $R$  表示工程损失期望值; $p$  表示不利事件或事故发生的概率; $C$  表示不利事件或事故发生带来的损失。

工程实践表明,当基坑抗隆起稳定性系数  $K_s$  较低时,有可能发生围护结构整体倒塌、变形超限、踢脚破坏等一系列不利事件,相关规范<sup>[9]</sup>规定,对一级基坑工程抗隆起稳定性安全系数  $K_s$  应大于 2.5,本文参考文献<sup>[9]</sup>,基于圆弧滑动模型确定的基坑抗隆起稳定性系数  $K_s$ ,将潜在不利事件划分为 5 种情况,如表 1 所示。

表 1 基坑隆起破坏不利事件可能性等级

Tab.1 Probability level of adverse events caused by foundation pit heave

$K_s$	$(-\infty, 1.0)$	$[1.0, 1.5)$	$[1.5, 2.0)$	$[2.0, 2.5)$	$[2.5, +\infty)$
不利事件	整体倒塌	局部倒塌	踢脚破坏	轻微踢脚	局部渗漏
概率	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$

若基坑抗隆起稳定性系数  $K_s$  的概率密度函数为  $f(K_s)$ ,则潜在不利事件发生概率  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 、 $p_5$  可分别由式(9)求得:

$$p_i = \int_a^b f(K_s) dK_s (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (9)$$

式中, $a$ 、 $b$  分别为对应区间的上下限。

不同的不利事件对工程的影响程度不同,带来的损失也多种多样,本文参考文献<sup>[10]</sup>,将基坑隆起破坏不利事件的严重程度以相应的经济损失划分为 5 种情况,如表 2 所示。

表 2 基坑隆起破坏不利事件经济损失等级

Tab.2 Economic loss level of adverse events caused by foundation pit heave

不利事件	整体倒塌	局部倒塌	踢脚破坏	轻微踢脚	局部渗漏
严重程度	灾难性	很严重	严重	需考虑	可忽略
经济损失 (百万元)	$[10, \infty)$	$[5, 10]$	$[1, 5]$	$[0.5, 1]$	$[0, 0.5]$

结合表 2, 基坑发生隆起破坏的损失期望值为:

$$R = p_1 C_1 + p_2 C_2 + p_3 C_3 + p_4 C_4 + p_5 C_5 \quad (10)$$

其中, $p_i (i=1, 2, \dots, 5)$  表示不利事件发生的概率; $C_i (i=1, 2, \dots, 5)$  表示不利事件发生后的经济损失。

### 4 工程实例分析

#### 4.1 工程概况

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 1.1,基坑开挖深度约 16 m,基坑长约 200 m,宽约 20 m,车站主体采用明挖法施工,采用地下连续墙支护。基坑设 4 道支撑,第 1 道为混凝土支撑,其余为钢支撑,基坑竖向分 4 步开挖完成,每次开挖约 4 m 深度。基坑工程地质条件、岩土体力学参数如图 2、表 3 所示。

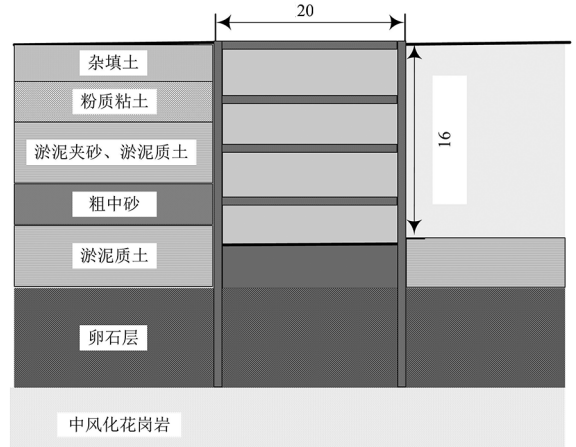


图 2 基坑剖面示意图(单位:m)

Fig.2 Sketch map of foundation pit profile (unit: m)

表 3 材料力学参数

Tab.3 Mechanical parameters of materials

材料	厚度/ m	$\gamma / (kN \cdot m^{-3})$		$c/kPa$		$\varphi / (^\circ)$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
杂填土	3	18.5	3.7	6	1.2	12	2.4
粉质粘土	3	18.7	3.74	27	5.4	15	3.0
淤泥夹砂	4	16.0	3.2	14	2.8	10	2.0
粗中砂	3	18.8	3.76	4	0.8	25	5.0
淤泥质土	6	16.7	3.34	16	3.2	11	2.2
弱加固				58.1	11.62		
强加固				148.6	29.72		

注: $\mu$  为力学参数均值; $\sigma$  为力学参数方差;弱加固水泥掺量为 5%;强加固水泥掺量为 20%。

### 4.2 不同工况下基坑隆起破坏风险分析

假设岩土体力学参数服从正态分布,基于表 3 中的岩土力学参数及式(6),基于 Matlab 软件编写计算程序,采用 Monte Carlo 方法抽样获得插入比  $D/H$  分别为 0.4,0.6, ..., 2.0, 基坑底部不加固、弱加固、强加固情况下的抗隆起稳定性系数  $K_s$  的概率密度如图 3~5 所示(自左至右  $D/H$  分别为 0.4,0.6, ..., 2.0 的概率密度)。

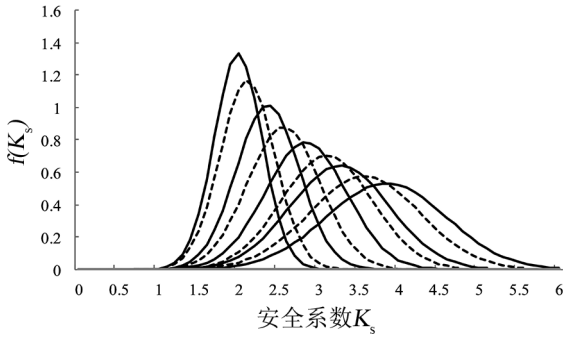


图 3 不加固情况下基坑抗隆起稳定性系数  $K_s$  概率密度  
Fig.3 Probability density of the stability coefficient  $K_s$  of foundation pit heave without reinforcement

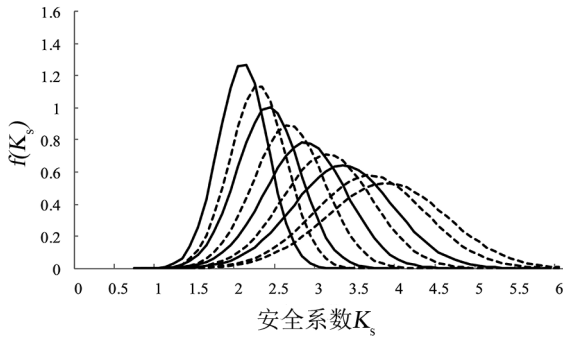


图 4 弱加固情况下基坑抗隆起稳定性系数  $K_s$  概率密度  
Fig.4 Probability density of the stability coefficient  $K_s$  of foundation pit heave with weak reinforcement

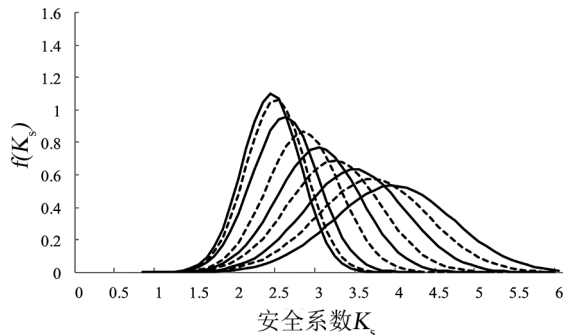


图 5 强加固情况下基坑隆起破坏不利事件发生概率  
Fig.5 Probability density of the stability coefficient  $K_s$  of foundation pit uplift with strong reinforcement

基于抗隆起稳定性系数  $K_s$  的概率密度,利用表 1 和式(9)获得不加固、弱加固、强加固情况下的基坑隆起破坏不利事件发生概率  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 、 $p_5$ 如图 6-8 所示。

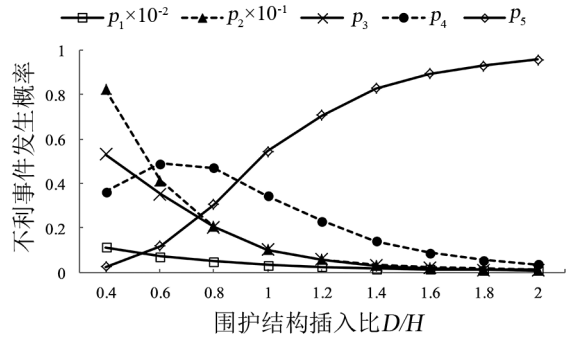


图 6 不加固情况下基坑隆起破坏不利事件发生概率  
Fig.6 Probability of adverse events caused by foundation pit heave without reinforcement

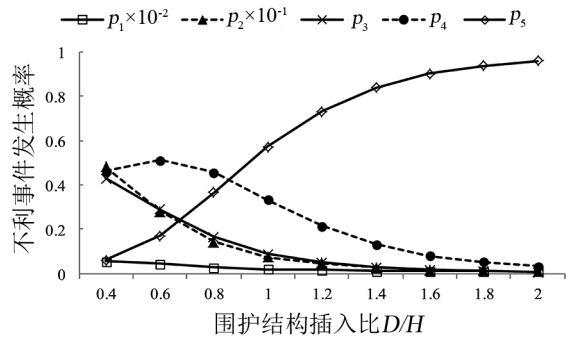


图 7 弱加固情况下基坑隆起破坏不利事件发生概率  
Fig.7 Probability of adverse events caused by foundation pit heave with weak reinforcement

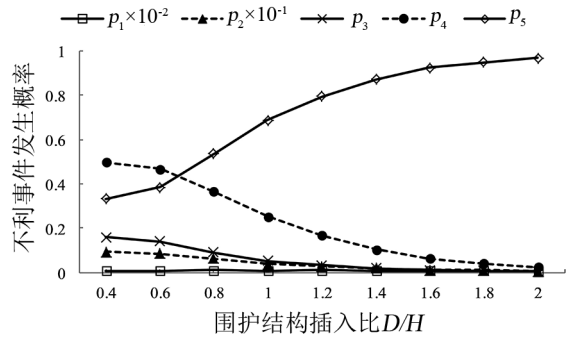


图 8 强加固情况下基坑隆起破坏不利事件发生概率  
Fig.8 Probability of adverse events caused by foundation pit heave with strong reinforcement

依据表 2,取不利事件的经济损失为  $C_1 = 1\ 000$  万元、 $C_2 = 750$  万元、 $C_3 = 300$  万元、 $C_4 = 75$  万元、 $C_5 = 25$  万元,由式(10)获得不同插入比  $D/H$

$H$  情况下, 基坑隆起破坏损失期望值如图 9 所示。

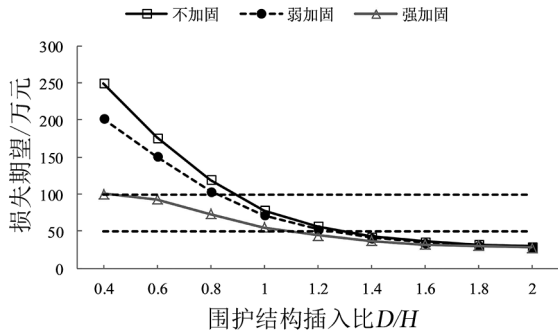


图 9 基坑隆起破坏损失期望值

Fig.9 Expected value of losses caused by foundation pit heave

由图 9 可知, 当插入比  $D/H$  小于 1.2 时, 基坑底部加固对隆起破坏损失期望的减小效果显著, 但当插入比  $D/H$  大于 1.2 时, 基坑底部加固对隆起破坏损失期望的减小效果不明显; 基坑不加固、弱加固情况下, 当插入比  $D/H$  小于 0.8 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“严重”; 当插入比  $D/H$  介于 0.8~1.2 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“需要考虑”; 当插入比  $D/H$  大于 1.2 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“可忽略”。

结合以上结果并综合考虑安全性、经济性, 福州地铁 2 号线上街地铁车站基坑插入比  $D/H$  选择为 1.1, 基坑底部采用强加固, 基坑施工过程中未发生围护结构倒塌、踢脚破坏等事故, 所选方案保证了基坑工程的顺利完成, 基坑施工现场如图 10-12 所示。



图 10 基坑开挖准备

Fig.10 Foundation pit excavation preparation



图 11 基坑开挖施工

Fig.11 Excavation construction of foundation pit

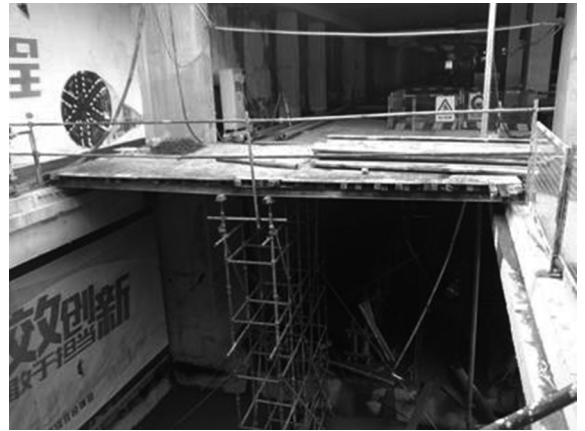


图 12 主体结构施工完成

Fig.12 Construction completion of main body structure

## 5 结论

1) 针对传统的基坑工程抗隆起稳定性分析中忽略岩土体离散型的缺陷, 提出了考虑基坑隆起破坏引起的不利事件发生概率及经济损失的风险评估模型。

2) 对于福州地铁 2 号线上街车站基坑工程, 当围护结构插入比小于 1.2 时, 加固对基坑隆起破坏损失期望减小效果显著; 当围护结构插入比大于 1.2 时, 加固对损失期望减小效果不明显。

3) 对于福州地铁 2 号线上街车站基坑工程, 当插入比介于 0.8~1.2 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“需要考虑”; 当插入比大于 1.2 时, 基坑隆起破坏的损失期望等级属于“可忽略”, 综合考虑安全性、经济性, 选择插入比为 1.1, 且基坑底部强加固的方案, 实践证明所选方案合理可行。

**参考文献:**

- [1] 周红波, 蔡来炳, 高文杰. 城市轨道交通车站基坑事故统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 67.
- [2] 黄茂松, 秦会来. 基坑抗隆起稳定分析的现状与进展[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 182-186.
- [3] 唐雨耕. 黏土层基坑工程隆起分析之可靠度评估[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 586-589.
- [4] 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.
- [5] 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(S2): 3526-3532.
- [6] 王洪新, 陈建军, 刘冀山. 基坑抗隆起稳定安全系数实用计算分析与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S1): 3223-3230.
- [7] 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(2): 164-168.
- [8] 黄建华, 杨思, 吴波. 基于贝叶斯网络的基坑围护工程施工风险评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(5): 733-739.
- [9] 上海市勘察设计协会. 基坑工程设计规程: DBJ08-61-97[S]. 上海: 上海市建筑建材市场管理总站, 1997.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: GB50652-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(责任编辑: 陈雯)