

引文格式:吴波,夏倩,刘聪,等.复杂环境下地铁深基坑变形可靠度分析[J].建筑科学与工程学报,2024,41(5):173-182.

WU Bo, XIA Qian, LIU Cong, et al. Deformation reliability analysis of subway deep foundation pit under complex environment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(5): 173-182.

DOI:10.19815/j.jace.2022.09107

复杂环境下地铁深基坑变形可靠度分析

吴波^{1,2,3}, 夏倩¹, 刘聪¹, 郑卫强¹, 王吾浩¹

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广东 广州 510925; 3. 宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:为计算复杂环境下地铁深基坑变形可靠度,提出了非侵入式随机有限差分法。通过构建随机有限差分接口,实现确定性分析与随机分析相融合,引入 Hermite 随机多项式,确定 3 个输出响应量与 12 个输入变量的显性函数表达式,计算基坑变形可靠度。结果表明:非侵入式随机有限差分法计算精度与蒙特卡罗法相近,但计算效率远高于蒙特卡罗法,通过计算结果验证了非侵入式随机有限差分法的可行性;由输出响应量与输入变量相关性强度可知,砂土层密度对基坑变形可靠度影响较大;将砂土密度变异系数 $Cov(\rho_s)$ 取为初始值的 2 倍,验证砂土密度的变异性对输出响应量的影响,计算得到的地表沉降、围护结构水平位移失效概率明显提高;为了提高深基坑的变形可靠度,在确定土层参数变异系数前应采集较多的试样,保证土层密度更接近于真实值。

关键词:深基坑;随机有限差分法;变形;可靠度;土体参数变异性

中图分类号: TU473.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)05-0173-10

Deformation reliability analysis of subway deep foundation pit under complex environment

WU Bo^{1,2,3}, XIA Qian¹, LIU Cong¹, ZHENG Weiqiang¹, WANG Wuhao¹

(1. School of Civil & Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Architectural Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, Guangdong, China; 3. School of Architecture and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: In order to calculate the deformation reliability of subway deep foundation pit under complex environment, a non-intrusive stochastic finite difference method was proposed. By constructing a stochastic finite difference interface, the deterministic analysis and stochastic analysis were integrated. The Hermite random polynomial was introduced to determine the explicit function expressions of three output responses and 12 input variables, and the deformation reliability of foundation pit was calculated. The results show that the calculation accuracy of the non-intrusive stochastic finite difference method is similar to that of the Monte Carlo method, but the calculation efficiency is much higher than that of the Monte Carlo method. The feasibility of the non-intrusive stochastic finite difference method is verified by the calculation

收稿日期: 2023-09-23

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168055); 江西省自然科学基金项目(20212ACB204001);

江西省“双千计划”创新领军人才项目(jxsq2020101001)

作者简介: 吴波(1971-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: 813792833@qq.com。

results. According to the correlation strength between the output response and the input variable, the density of sand layer has a great influence on the reliability of foundation pit deformation. The coefficient of variation of sand density $Cov(\rho_s)$ is set to 2 times of the initial value, the influence of the variability of sand density on the output response is verified, and the failure probability of surface settlement and horizontal displacement of retaining structure is obviously improved. In order to improve the deformation reliability of deep foundation pit, more samples should be collected before determining the coefficient of variation of soil parameters to ensure that the soil density is closer to the real value.

Key words: deep foundation pit; stochastic finite difference method; deformation; reliability; soil parameter variability

Author resume: WU Bo(1971-), male, PhD, professor, E-mail: 813792833@qq. com.

0 引言

近年来,随着城市化进程加快,城市地下空间逐渐被开发利用。然而,地下工程具有不确定性和隐蔽性,如何保障城市地下空间安全,如何精准评价地下空间设施韧性是现在的热门话题^[1-2]。影响地铁深基坑稳定性的主要因素有围护结构嵌入深度不足、支护结构强度不足以及地下水变化等,如何定量分析基坑开挖过程中支护结构及土体位移的变化,是保障基坑稳定性^[3]的关键。

国内外学者针对上述问题做了多尺度研究。Xu 等^[4]基于 PLAXIS 有限元模拟基坑,研究济南地区基坑支护的应力和变形特性,并提出优化建议。Lin 等^[5]运用 MIDAS/GTS 模拟三维基坑开挖,得到的模拟值与实际监测值近似吻合,提出可以通过改变开挖方式对基坑进行优化。Zhang 等^[6]提出了贝叶斯网络和模糊层次分析法,应用于施工期间基坑坍塌动态风险分析并预测基坑坍塌中的潜在风险。由于岩土体饱含特殊性,采用概率方法定量分析土体性状和工程性能已成为一种趋势,因此,可靠度理论正广泛应用于岩土工程领域。Cao 等^[7]开发了一种基于神经网络集成的参数敏感性分析范式,综合各神经网络灵敏度分析结果来判断相关参数的敏感性。李俊松等^[8]基于蒙特卡罗法与瑞典条分法,建立基坑失稳功能函数,根据评价结果制定了风险控制措施。杨林德等^[9]将蒙特卡罗与有限元技术结合,对基坑变形的稳定性进行可靠度分析,并通过重构响应面来提高蒙特卡罗计算效率。

随着研究的深入,学者们提出了非侵入式随机分析方法,此方法较蒙特卡罗法具有计算量小的特性,相较于神经网络具有收敛效果好的特性。非侵入式随机分析法与商业有限元软件有机融合,可以

大大提高可靠度的计算效率。Sudret 等^[10]为分析不同荷载作用下地基沉降的可靠度而提出一种多项式展开与可靠性相结合的方法。Berveiller 等^[11]基于最小二乘回归分析的非侵入式方法研究地基沉降。李典庆等^[12]基于非侵入式随机有限元法分析地下洞室变形可靠度,并验证了此法较传统蒙特卡罗法的效率优越性。张顷顷等^[13]以弱层台阶边坡为例,采用随机场和蒙特卡罗法进行数值计算,得出随机场较蒙特卡罗法更为精确的结论。由于基坑工程的影响因素较多且基坑自身具有强复杂性,在土层分布广泛情况下,土层的物理力学性质对基坑可靠度有一定影响,同时,采用非侵入式法分析基坑工程可靠度的研究相对较少。因此,本文以软土深基坑为研究对象,采用非侵入式随机有限差分法研究软土基坑的变形可靠度。

1 非侵入式随机有限差分法

1.1 输出响应量代理模型

由蒙特卡罗法计算可靠度可知,直接对基坑进行三维数值模拟的计算工程量大且耗时长。在保证计算精度的前提下,为了适当简化计算量,建立输出响应量和输入变量之间的显示函数关系式。由于输出响应量与输入变量的数量并不唯一,二者只能构成非线性隐式函数,鉴于此,可采用代理模型解决上述矛盾。目前常用的代理模型有随机多项式展开、支持向量机及克里金^[14-15]。其中,Hermite 随机多项式展开考虑了变量间交叉项的影响,具有正交特性且收敛性好,能够较准确地呈现整个样本空间内结构输出响应量的变化过程,故本文选用 Hermite 随机多项式展开作为连接输出响应量与输入参数之间的桥梁。输出响应量 $F(U)$ 与输入参数间的计算表达式为

$$F(U) = a_0 \Gamma_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} \Gamma_1(U_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1 i_2} \Gamma_2(U_{i_1}, U_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} \Gamma_3(U_{i_1}, U_{i_2}, U_{i_3}) + \cdots + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} \cdots \sum_{i_n=1}^{i_{n-1}} a_{i_1 i_2 \cdots i_n} \Gamma_n(U_{i_1}, U_{i_2}, U_{i_3}, \cdots, U_{i_n}) \quad (1)$$

式中: U 为独立标准正态空间随机输入参数, $U = (U_1, U_2, \cdots, U_n)$; Γ_n 为 n 阶 Hermite 多项式; a_0 、 a_{i_1} 、 \cdots 、 $a_{i_1 \cdots i_n}$ 为多项式展开待定系数。

对 n 个随机变量的 p 阶多项式展开待定系数数目 M 为

$$M = \frac{(n+p)!}{n! p!} \quad (2)$$

拉丁超立方采样技术^[16]工作原理是对输入参数的概率分布进行分层,从分层中随机抽取样本,其特点是减少抽样的迭代次数,准确地重建分布。本文采用拉丁超立方抽样随机抽取输入变量,再利用有限差分接口导出输出响应量,最后建立线性函数关系式求解待定系数。通过式(3)~(6)计算输出响应量的均值 μ_F 、标准差 σ_F 、偏度 δ_F 、峰度 κ_F 。

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (3)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^2} \quad (4)$$

$$\delta_F = \frac{1}{N\sigma_F^3} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^3 \quad (5)$$

$$\kappa_F = \frac{1}{N\sigma_F^4} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^4 \quad (6)$$

式中: F_i 为第 i 个输出响应量; N 为某个输出响应量的个数。

1.2 随机有限差分接口

将有限差分数值模拟与可靠度分析相结合,引用 Python 模块编写批量处理计算结果文件的程序代码,具体过程如下:

(1)首先提取地勘资料中随机输入参数的均值、标准差以及变异系数,随机变量呈正态分布,利用拉丁超立方采样抽取 N_p 组样本。

(2)根据项目资料建立有限差分数值模型,并保存为计算源文件。依托项目资料、基坑结构图,按 1:1 还原基坑模型图,定义模型尺寸、划分网格、设置边界条件、确定收敛条件和计算精度,按照实际开挖支护情况建立动态开挖模型,将计算结果文件保存为“.dat”格式的源文件。

(3)将提取出的 N_p 组样本代入源文件中批量计算,调用计算结果文件,提取输出响应量,例如变形、安全系数、应力、应变等。

(4)确定输出响应量与输入参数间的近显示表达式,建立基坑变形安全与可靠度分析的功能函数,求解基坑变形可靠度,将蒙特卡罗法的计算结果看作精确解,验证 Hermite 随机多项式展开的可行性。

(5)整理确定性分析中提取的输出响应量统计特征参数,比较各输入变量与各输出响应量之间的相关性强弱,找出相关性强的输入变量,改变该变量的变异系数,重复上述步骤,比较不同变异系数下的基坑变形失效概率。

1.3 基坑变形可靠度极限功能函数

在基坑工程中引入结构可靠度^[17]概念,设 $X_1 \sim X_n$ 为影响结构功能的 n 个随机变量,随机函数 $Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 为结构功能函数,当满足 $Z > 0$ 时结构处于可靠状态, $Z = 0$ 时结构处于极限状态, $Z < 0$ 时结构处于失效状态。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》^[18]、《建筑基坑工程监测技术标准》^[19]、《广州地铁集团有限公司建设事业总部轨道交通工程监测管理办法》,对基坑工程监测预警等级进行分级处理。将基坑失效模式视为串联体系,若围护结构水平位移、周边地表沉降值中任意指标超过基坑监测最大警戒值,则判定基坑失效。围绕基坑变形建立 3 个极限状态函数 $g_1(x) \sim g_3(x)$,分别表示基坑的 3 种失效模式,如式(7)~(9)所示。

$$g_1(x) = h_1^{\max} - h_1^a \quad (7)$$

$$g_2(x) = h_2^{\max} - h_2^a \quad (8)$$

$$g_3(x) = s_1^{\max} - s_1^a \quad (9)$$

式中: g_1 为围护结构 X 方向水平位移极限状态方程; g_2 为围护结构 Y 方向水平位移极限状态方程; g_3 为周边地表沉降极限状态方程; h_1^{\max} 为围护结构 X 方向位移警戒值, $h_1^{\max} = 24$ mm; h_1^a 为围护结构 X 方向位移实际值; h_2^{\max} 为围护结构 Y 方向位移警戒值, $h_2^{\max} = 30$ mm; h_2^a 为围护结构 Y 方向位移实际值; s_1^{\max} 为周边地表沉降警戒值, $s_1^{\max} = 27$ mm; s_1^a 为周边地表沉降实际值。

2 应用实例

2.1 工程概况

广州市某地铁车站总长 220 m,标准段宽 25.55 m,采用明挖顺作法施工,基坑开挖深度为 26.3 m,车站主体围护结构采用地下连续墙+内支撑形式,

地下连续墙平均深度为 35 m。车站平面如图 1 所示。

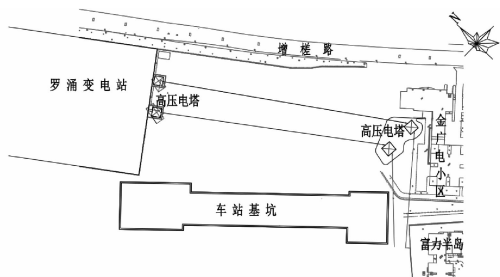


图 1 车站基坑分布

Fig. 1 Station foundation pit distribution

车站施工范围内地质主要为填土层、淤泥层、透水性砂层、强风化砂岩层、灰岩层覆盖层,根据地质勘察报告,车站地质剖面如图 2 所示。

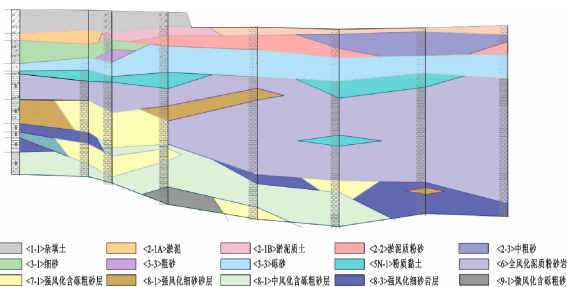


图 2 地质剖面图

Fig. 2 Geological section map

基于车站主体纵断面图和基坑设计图,将土层简化为 5 层土,各土层间的物理力学参数建议值如表 1 所示。地下连续墙厚度取 1 m,采用 C35 混凝土浇筑而成;基坑开挖过程中设置了 4 层支撑,其中,前 3 层为混凝土支撑,第 4 层为钢支撑。土层与支护结构参数如表 1 所示。

表 1 土层与支护结构参数

Table 1 Soil layer and support structure parameter

参数	h/m	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	ν
杂填土	5.0	1.46	12.0	29.20	12	0.43
淤泥质土	1.8	1.65	12.9	4.10	4	0.45
砂土层	8.5	1.90	1.0	28.00	60	0.35
黏性土	1.4	1.94	22.0	18.00	20	0.28
强风化岩	15.3	1.98	56.4	27.25	250	0.28
地下连续墙		25.00			3×10^4	0.30
混凝土内支撑		25.00			3×10^4	0.30
钢管内支撑		78.50			20.9×10^4	0.25

注: h 为涂层厚度; ρ 为密度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

2.2 有限差分数值模拟

采用摩尔库伦本构模型,根据圣维南原理^[20]及

实际工程经验设置边界条件,利用 FLAC3D 建立三维基坑数值模型,模型尺寸如图 3 所示。模型底面设置法向及切向约束,模型四周仅设置法向约束,模型顶面自由,模型底部及四周设置非透水边界。基坑开挖数值模拟最大程度还原实际现场施工情况。本文考虑基坑降水对变形的影响,在基坑分层开挖前将坑内水位降至开挖面以下 1 m。

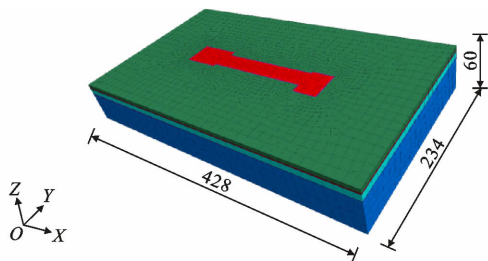


图3 基坑数值模型(单位:m)

Fig. 3 Numerical model of foundation pit (unit:m)

基坑开挖下的位移云图如图 4 所示。由图 4(a)可知:围护结构水平位移最大值在地连墙深度 1/3 处;坑外地表沉降分布在开挖面两端,地表沉降最大值在基坑坑边 5~10 m 范围内,且距离坑边越远沉降值越小,最终趋于 0。Peck^[21]通过分析大量基坑实例总结得出,基坑开挖深度、基坑地质条件以及基坑宽度能在一定程度上影响坑外地表沉降,并提出了预估地表沉降的经验公式。基坑开挖下变形曲线如图 5 所示。从图 5(a)可知,围护墙水平位移呈“外凸”抛物线形,水平位移最大值在开挖面以下 15 m 左右。从图 5(b)可知,坑外地表沉降呈“凹槽”状,坑外地表沉降最大值距离围护墙 10 m 左右。在既定条件下,基坑开挖引起坑外地表及围护结构变形符合 Peck 定理。

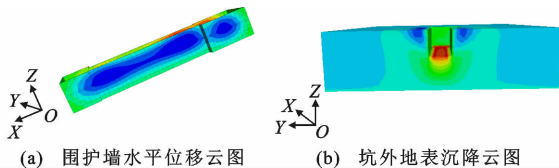


图 4 基坑开挖下的位移云图

Fig. 4 Displacement cloud map under foundation pit excavation

2.3 随机输入变量敏感性分析

根据项目资料收集到的土层参数统计特征如表 2 所示,其中黏聚力、摩擦角、弹性模量、密度均服从正态分布。

为了提高复杂三维深基坑可靠度的计算效率,引入参数敏感性分析^[22]来评判各个输入参数的敏感性程度,相对敏感性指标 α 越大,则影响程度越

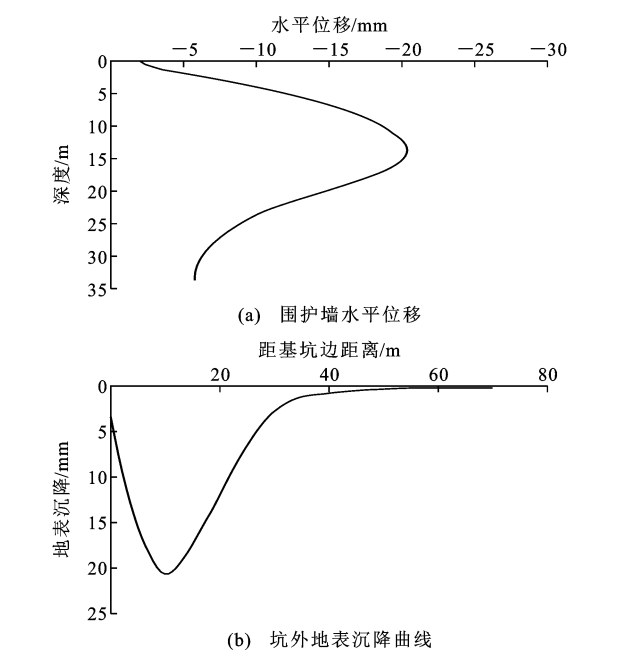


图 5 基坑开挖下变形曲线

Fig. 5 Deformation curve under foundation pit excavation

表 2 土层参数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil layer parameters

参数		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	ν
素填土	均值	12	29.2	12	1.46	0.43
	变异系数	0.27	0.27	0.03	0.07	
	标准差	3.24	8.01	0.36	0.11	
淤泥质土	均值	12.9	4.1	4	1.65	0.45
	变异系数	0.24	0.38	0.047 5	0.04	
	标准差	3.07	1.56	0.19	0.06	
砂土层	均值	1	28	30	1.90	0.35
	变异系数	0.46	0.07	0.024	0.05	
	标准差	0.46	2.03	0.73	0.08	
黏性土	均值	22	18.0	60	1.94	0.28
	变异系数	0.37	0.29	0.1	0.04	
	标准差	8.14	5.17	6.2	0.10	
强风化岩	均值	56.4	27.25	250	1.98	0.28
	变异系数	0.03	0.20	0.106	0.04	0.14
	标准差	1.57	5.96	26.6	0.08	

大。选取对深基坑稳定性影响大的参数,剩余的参数作为常量参与计算,此过程可提高计算效率。由于 $\mu \pm 2\sigma$ (μ 为参数均值, σ 为参数标准差)在概率密度分布图中落入 95.4%的可信区间,考虑了抽样误差,克服了点估计的缺点,故本文中采用 $\mu \pm 2\sigma$ 来分析参数的敏感性,计算相对敏感性指标[式(10)和式(11)]^[23]。为了简便计算,将基坑分为 5 层土,计算得出 3 层土稳定性较差,因此以前 3 层土为分析对象。随机变量个数为 12 个,以第 1 层土为例, c_1

为第 1 层土的黏聚力, φ_1 为第 1 层土的摩擦角, E_1 为第 1 层土的弹性模量, ρ_1 为第 1 层土的密度,其他土层依次类推。整个参数敏感性分析过程需要进行 13 次基坑数值计算,计算结果如表 3 所示。

$$\eta_{SR,i} = \left| \frac{[g(\mu_i + 2\sigma_i) - g(\mu_i - 2\sigma_i)]/g(\mu_i)}{[(\mu_i + 2\sigma_i) - (\mu_i - 2\sigma_i)]/\mu_i} \right| \quad (10)$$

$$\alpha(X_i) = \frac{\eta_{SR,i}}{\sum_{i=1}^n \eta_{SR,i}} \quad (11)$$

式中: $\eta_{SR,i}$ 为第 i 个输入参数的敏感率, $i=1,2,3,\cdots,N$; $g(\mu_i)$ 为参数 μ_i 计算得到的变形量; $g(\mu_i + 2\sigma_i)$ 为参数 $\mu_i + 2\sigma_i$ 计算得到的变形量; $g(\mu_i - 2\sigma_i)$ 为参数 $\mu_i - 2\sigma_i$ 计算得到的变形量; $\alpha(X_i)$ 为第 i 个输入参数的敏感性指标。

表 3 输入参数相对敏感性指标

Table 3 Relative sensitivity index of input parameters

参数	η	α
c_1	0.137 880	0.004 202
φ_1	0.185 502	0.005 654
E_1	0.696 395	0.021 224
ρ_1	12.579 080	0.383 378
c_2	0.420 679	0.012 821
φ_2	1.144 179	0.034 872
E_2	2.380 364	0.072 547
ρ_2	10.226 470	0.311 676
c_3	4.297 198	0.130 967
φ_3	0.216 486	0.006 598
E_3	0.277 531	0.008 458
ρ_3	0.249 431	0.007 602

由表 3 可知,黏聚力、弹性模量、密度的相对敏感性指标值较大,现将这 3 个参数作为非侵入式随机有限差分法的随机变量,采用拉丁超立方方法抽取 1 000 组输入样本。由于土层的物理力学参数间存在相关性,故采用 Spearman^[24] 相关矩阵分别分析前 3 层土的相关性,3 层土中随机输入参数之间的相关系数小于 0.2(极低相关),土层间的相关系数具体值见图 6。

2.4 基坑变形可靠度分析

Hermite 多项式(PCE)在无穷区间上具有正交性,且向高阶递推过程相对简单,常常作为数值拟合的基函数。在分析过程中,往往会存在多个随机变量,为了满足精度要求而选取高阶的 Hermite 多项式拟合。本文选取 9 个输入变量,依次代入二阶、三阶、四阶 Hermite 多项式中,通过最小二乘回归分析计算随机多项式展开的待定系数,最后确定了输

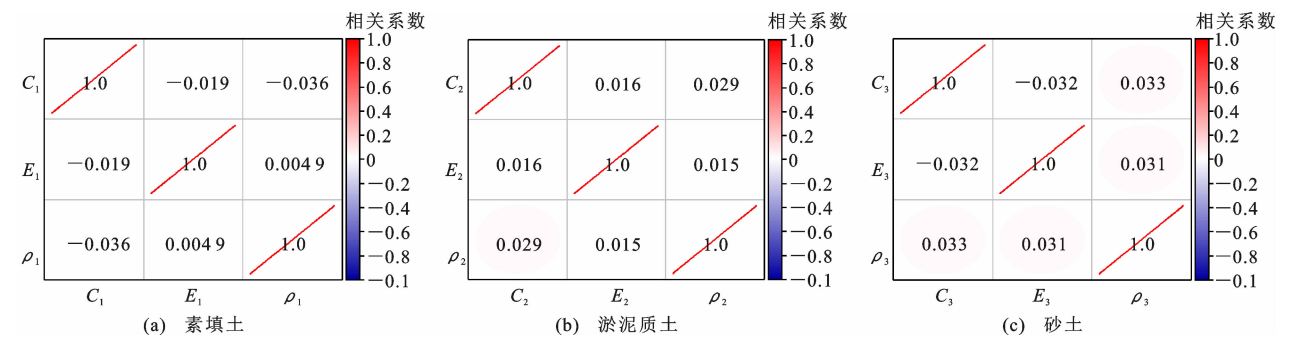


图 6 各土层物理力学参数的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient of physical and mechanical parameters of each soil layer

入变量与输出响应量的显示函数表达式。表 4 列举了二、三、四阶输出响应量统计特征参数,以验证不同阶次对输出响应量的影响。

从表 4 中可以看出:不同阶次的输出响应量其均值和标准差大致相同,但偏度和峰度存在明显差异;三阶、四阶 PCE 法偏度值在 $(-0.5, 0.5)$ 之间,偏向于正态分布,故偏度不明显。分析表中相关性系数可知,地表沉降、围护结构 X 方向水平位移与第 1、3 层土的密度呈强负相关关系,围护结构 Y 方向水平位移与第 1、3 层土的密度呈强正相关关系。由于在实际施工过程中对第 1 层土做了加固处理,故重点分析第 3 层土的密度对输出响应量的影响。输出的功能函数分布如图 7~9 所示,因输出响应量不唯一,本文仅以地表沉降功能函数(图 7)为例进行分析。由图 7(a)的概率密度函数(PDF)图可知,二阶 PCE 法与三阶 PCE 法计算得到的地表沉降概率分布结果几乎一致,而四阶 PCE 法的收敛速度更快,说明随着阶次的增加,收敛效果更好。图 7(b)

为地表沉降累积分布函数(CDF)图,图中平行于 Y 轴的虚线为临界线,虚线左边定义为失效,二、三、四阶 PCE 法计算得到的地表沉降失效概率 p_f 分别为 8.39×10^{-3} 、 8.55×10^{-3} 和 7.05×10^{-2} 。此外,表 4 中二、三、四阶 PCE 法下的地表沉降偏度分别为 -0.788 、 -0.242 、 -0.171 ,偏度为负,PDF 曲线左偏态。

为了验证 PCE 法计算可靠度的准确性,将蒙特卡洛法(MCS)计算结果判定为精确解。为简化计算,随机抽取 1×10^5 组样本,采用 MCS 模拟计算基坑变形可靠度。表 5 给出了输出响应量在不同阶次下的失效概率,其变异系数 $\text{Cov}(\rho_3)$ 为 0.05。用三阶、四阶 PCE 法计算地表沉降的相对误差分别为 0.68%、5.52%,计算围护结构 Y 方向水平位移相对误差分别为 3.18%、4.79%,计算围护结构 X 方向水平位移相对误差分别为 0.12%、0.79%,误差随着阶次的增大而增大,但相对误差控制在 10%以内。四阶地表沉降、围护结构 Y 方向水平位移以及

表 4 输出响应量统计特征参数

Table 4 Statistics characteristic parameters of output response

参数		地表沉降			Y 方向围护水平位移			X 方向围护水平位移		
阶次		二阶	三阶	四阶	二阶	三阶	四阶	二阶	三阶	四阶
位移均值/mm		-22.660	-22.500	-22.380	27.652	27.554	27.472	-20.100	-20.049	-19.981
位移标准差/mm		1.867	1.921	1.919	1.692	1.668	1.665	1.092	1.115	1.115
偏度		-0.788	-0.242	-0.171	0.733	0.295	0.218	-0.672	-0.249	-0.170
峰度		0.502	0.251	0.091	0.550	0.269	0.153	0.390	0.198	0.146
相关系数	ρ_{c_1}	0.160	0.051	0.043	-0.054	-0.010	-0.028	0.075	0.021	0.029
	ρ_{E_1}	-0.190	-0.110	0.014	0.130	0.100	8.5×10^{-5}	-0.120	-0.097	-0.003
	ρ_{ρ_1}	-0.690	-0.690	-0.710	0.700	0.670	0.690	-0.670	-0.640	-0.660
	ρ_{c_2}	-0.005	0.084	0.041	-0.154	-0.099	-0.053	0.028	0.082	0.029
	ρ_{E_2}	-0.095	0.070	-0.048	0.083	-0.064	0.046	-0.079	0.063	-0.053
	ρ_{ρ_2}	-0.045	-0.150	-0.130	0.025	0.150	0.140	-0.028	-0.160	-0.140
	ρ_{c_3}	0.130	0.008	0.022	-0.110	-0.019	-0.035	0.097	-0.010	0.012
	ρ_{E_3}	0.021	-0.077	0.034	0.033	0.081	-0.039	-0.034	-0.084	0.026
	ρ_{ρ_3}	-0.580	-0.650	-0.640	0.650	0.680	0.680	-0.700	-0.710	-0.710

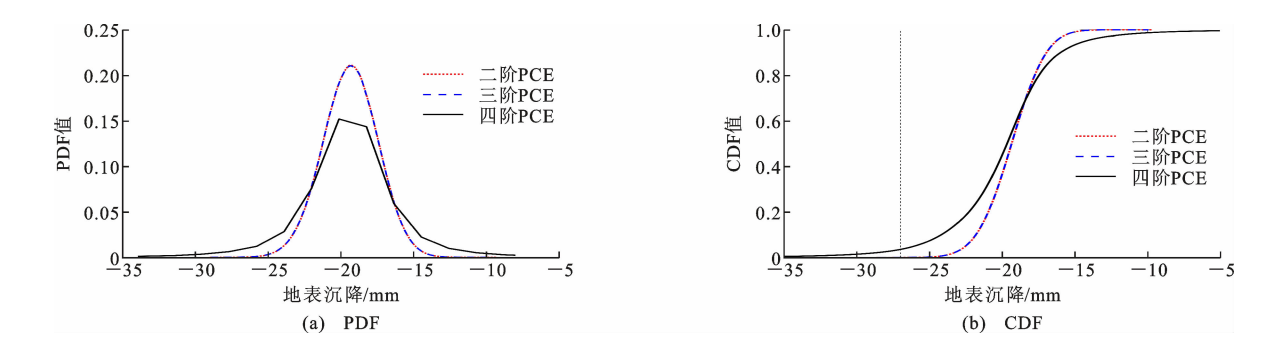


图 7 地表沉降功能函数分布

Fig. 7 Surface subsidence function distribution

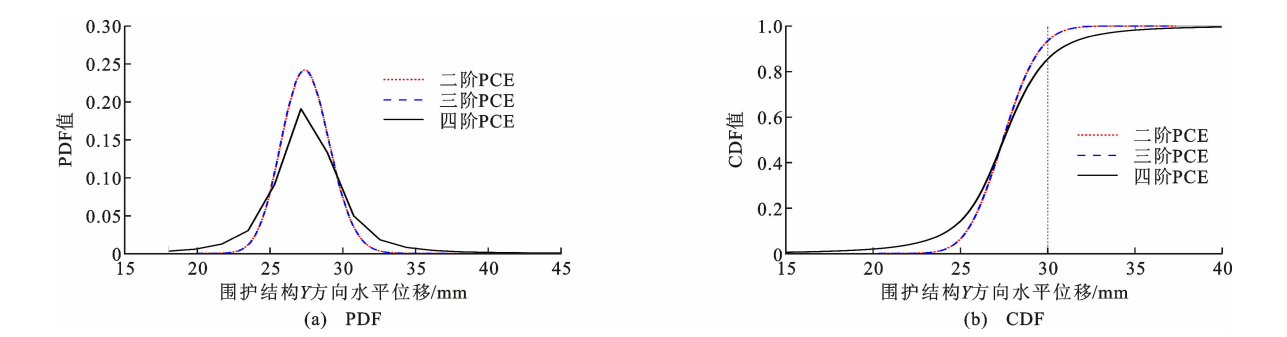


图 8 围护结构 Y 方向功能函数分布

Fig. 8 Envelope Y direction function distribution

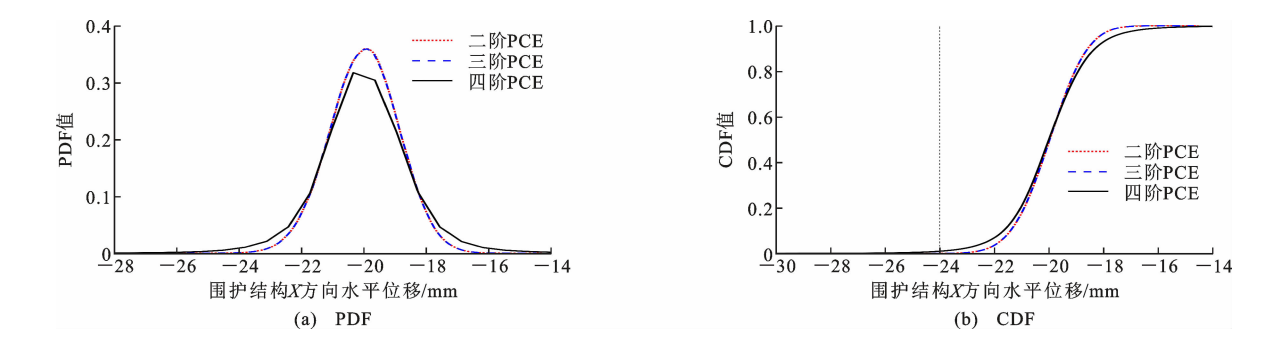


图 9 围护结构 X 方向功能函数分布

Fig. 9 Envelope X direction function distribution

表 5 不同方法下可靠度结果比较[Cov(ρ_3)=0.05]

Table 5 Comparison of reliability results under different methods [Cov(ρ_3)=0.05]

参数	计算次数/ 10^5	方法	样本组数	M	p_i	拟合优度/%
地表沉降	100	二阶 PCE	1 000	55	8.39×10^{-3}	98.80
		三阶 PCE		220	8.55×10^{-3}	99.45
		四阶 PCE		715	7.05×10^{-2}	99.97
	1	MCS	10 000		1.53×10^{-2}	
围护结构 Y 方向 水平位移	100	二阶 PCE	1 000	55	6.52×10^{-2}	99.47
		三阶 PCE		220	6.53×10^{-2}	99.57
		四阶 PCE		715	1.45×10^{-1}	99.97
	1	MCS	10 000		9.71×10^{-2}	
围护结构 X 方向 水平位移	100	二阶 PCE	1 000	55	2.72×10^{-4}	99.97
		三阶 PCE		220	2.39×10^{-4}	99.85
		四阶 PCE		715	9.96×10^{-3}	99.99
	1	MCS	10 000		1.39×10^{-3}	

围护结构 X 方向水平位移的拟合优度 R^2 分别为 99.97%、99.97% 和 99.99%。展开阶次越高,拟合优度 R^2 越大且越接近 1,拟合效果越好,验证了此法研究基坑变形可靠度的可行性。

上文提到输出响应量与第 3 层土的密度呈现强相关性,为了验证砂土密度的变异性对输出响应量的影响,将砂土密度变异系数 $\text{Cov}(\rho_3)$ 取 0.10(初始值的 2 倍),其余参数保持不变,二、三、四阶 PCE 法计算基坑可靠度结果如表 6 所示,各输出响应量的功能函数曲线如图 10~12 所示。

表 6 不同方法下可靠度结果比较[$\text{Cov}(\rho_3)=0.10$]

Table 6 Comparison of reliability results under different methods [$\text{Cov}(\rho_3)=0.10$]

参数	计算次数/ 10^5	方法	样本组数	M	p_i	拟合优度/%
地表沉降	100	二阶 PCE	1 000	55	6.52×10^{-2}	99.49
		三阶 PCE		220	6.48×10^{-2}	99.78
		四阶 PCE		715	8.62×10^{-2}	99.97
	1	MCS	10 000		7.00×10^{-2}	
围护结构 Y 方向水平位移	100	二阶 PCE	1 000	55	1.67×10^{-1}	99.74
		三阶 PCE		220	1.68×10^{-1}	99.81
		四阶 PCE		715	1.92×10^{-1}	99.99
	1	MCS	10 000		1.77×10^{-1}	
围护结构 X 方向水平位移	100	二阶 PCE	1 000	55	9.94×10^{-3}	99.90
		三阶 PCE		220	9.71×10^{-3}	99.93
		四阶 PCE		715	1.73×10^{-2}	100.00
	1	MCS	10 000		1.20×10^{-2}	

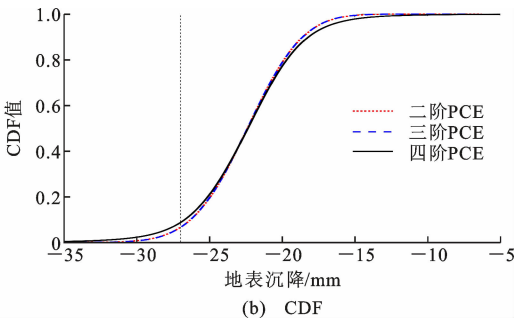
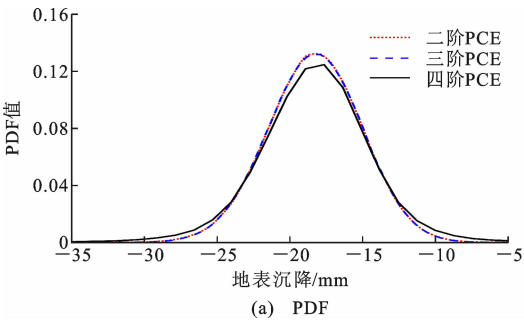


图 10 地表沉降功能函数分布[$\text{Cov}(\rho_3)=0.10$]

Fig. 10 Surface subsidence function distribution [$\text{Cov}(\rho_3)=0.10$]

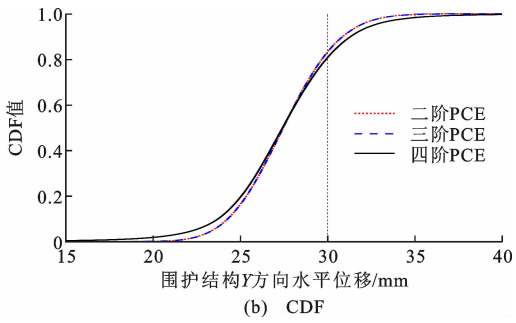
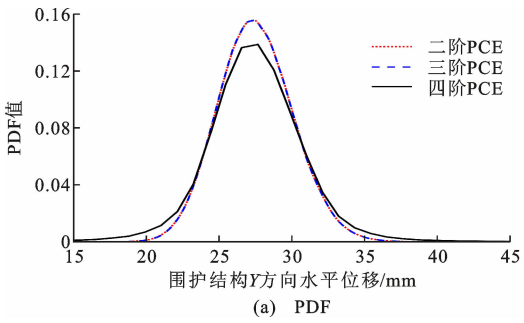


图 11 围护结构 Y 方向功能函数分布[$\text{Cov}(\rho_3)=0.10$]

Fig. 11 Envelope Y direction function distribution [$\text{Cov}(\rho_3)=0.10$]

由于篇幅有限,以图 10 地表沉降功能函数曲线为例进行分析,当 $\text{Cov}(\rho_3)=0.10$ 时,二、三、四阶 PCE 法下地表沉降 PDF 曲线和 CDF 曲线走势与 $\text{Cov}(\rho_3)=0.05$ 的功能函数图相近,但基坑地表沉降失效概率水平显著提高,四阶 PCE 法计算地表沉降失效概率为 8.62×10^{-2} ,与表 5 中四阶 PCE 法计算的地表沉降失效概率相对误差为 22.26%。土层分布往往非均匀,故在地勘工作中,要准确测量土体的密度。

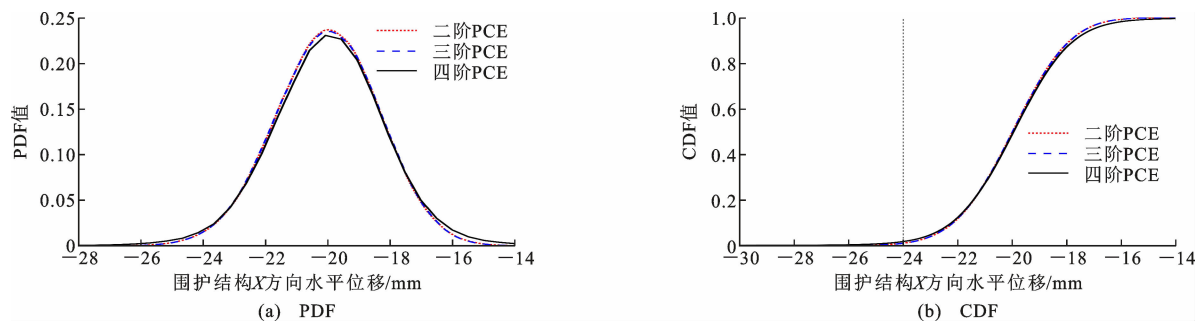


图 12 围护结构 X 方向功能函数分布 $[Cov(\rho_3)=0.10]$

Fig. 12 Envelope X direction function distribution $[Cov(\rho_3)=0.10]$

3 结 语

(1)通过 FLAC3D 内置 Python,编写批处理源文件并命名为“. dat”格式,从而实现确定性与随机性相融合。

(2)将非侵入式随机有限差分应用到基坑领域,以广州某地铁车站为研究对象,采用不同阶 PCE 法计算基坑变形可靠度,得出四阶 PCE 法计算 715 次与直接 MCS 法计算 10 000 次的结果相接近,故四阶 PCE 法应用于本工程上的收敛效果更好。此外,多项式展开阶数越高,精度也越高,可以根据自身收敛特性选择最优阶多项式展开。

(3)计算输出响应量与输入变量的敏感性可知,砂土层的密度与输出响应量具有强相关性,比 $Cov(\rho_3)=0.10$ (初始值 2 倍)下的基坑失效概率明显提高,证实密度的空间变异性对基坑可靠度有明显的影响。

参考文献:

References:

[1] 郑 刚,程雪松,周海祚,等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. 土木工程学报,2022,55(7):1-38.
ZHENG Gang, CHENG Xuesong, ZHOU Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal,2022,55(7):1-38.

[2] 于 汐,薄景山,唐彦东. 风险与重大岩土工程风险基本概念研究[J]. 自然灾害学报,2019,28(6):110-118.
YU Xi,BO Jingshan,TANG Yandong. Study on fundamental conception of risk and major geotechnical project risk[J]. Journal of Natural Disasters,2019,28(6):110-118.

[3] 吴贤国,王 雷,冯宗宝,等. 多失效模式下的地铁深基坑系统可靠度分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(4):167-175.

WU Xianguo, WANG Lei, FENG Zongbao, et al. Analysis on the reliability of metro deep foundation pit system under multiple failure modes[J]. Modern Tunnelling Technology,2022,59(4):167-175.

[4] XU Q C,BAO Z H,LU T,et al. Numerical simulation and optimization design of end-suspended pile support for soil-rock composite foundation pit[J]. Advances in Civil Engineering,2021,2021:5593639.

[5] LIN P,LIU P,ANKIT G,et al. Deformation monitoring analysis and numerical simulation in a deep foundation pit[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering,2021,58(1):56-62.

[6] ZHANG G H,WANG C T,JIAO Y Y,et al. Collapse risk analysis of deep foundation pits in metro stations using a fuzzy Bayesian network and a fuzzy AHP[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020,2020:4214379.

[7] CAO M S,PAN L X,GAO Y F,et al. Neural network ensemble-based parameter sensitivity analysis in civil engineering systems[J]. Neural Computing and Applications,2017,28(7):1583-1590.

[8] 李俊松,仇文革. 基于可靠度的基坑失稳风险评价与控制研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(6):1136-1141,1220.
LI Junsong, QIU Wenge. Study on instability risk analysis and management for foundation pit based on reliability theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2012,8(6):1136-1141,1220.

[9] 杨林德,徐 超. Monte Carlo 模拟法与基坑变形的可靠度分析[J]. 岩土力学,1999,20(1):15-18.
YANG Linde,XU Chao. Monte Carlo simulation and reliability analysis on the deformation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics,1999,20(1):15-18.

[10] SUDRET B,BERVEILLER M,LEMAIRE M. A stochastic finite element procedure for moment and reliability analysis[J]. European Journal of Computational Mechanics,2006,15(7/8):825-866.

- [11] BERVEILLER M, SUDRET B, LEMAIRE M. Stochastic finite element; a non intrusive approach by regression[J]. *European Journal of Computational Mechanics*, 2006, 15(1/2/3): 81-92.
- [12] 李典庆, 蒋水华, 周创兵. 基于非侵入式随机有限元法的地下洞室可靠度分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(1): 123-129.
LI Dianqing, JIANG Shuihua, ZHOU Chuangbing. Reliability analysis of underground rock caverns using non-intrusive stochastic finite element method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(1): 123-129.
- [13] 张顷顷, 王来贵, 张华宾, 等. 弱层台阶边坡可靠度非侵入式随机分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(11): 33-39.
ZHANG Qingqing, WANG Laigui, ZHANG Huabin, et al. Non-intrusive random analysis on reliability of weak layers bench slope[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(11): 33-39.
- [14] OLIVER M A, WEBSTER R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, 4(3): 313-332.
- [15] CERVANTES J, GARCIA-LAMONT F, RODRIGUEZ-MAZAHUA L, et al. A comprehensive survey on support vector machine classification: applications, challenges and trends [J]. *Neurocomputing*, 2020, 408: 189-215.
- [16] LOH W L. On Latin hypercube sampling[J]. *The Annals of Statistics*, 1996, 24(5): 2058-2080.
- [17] 武清玺. 结构可靠度理论、方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- WU Qingxi. Theory, method and application of structural reliability[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [18] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [19] 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Technical standard for monitoring of building excavation engineering: GB 50497—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [20] TOUPIN R A. Saint-venant's principle [J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1965, 18(2): 83-96.
- [21] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]//ISSMGE. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: ISSMGE, 1969: 225-229.
- [22] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(1): 9-16.
CAI Yi, XING Yan, HU Dan. On sensitivity analysis [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2008, 44(1): 9-16.
- [23] SHEN H, ABBAS S M. Rock slope reliability analysis based on distinct element method and random set theory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 61: 15-22.
- [24] NELSEN R B. An introduction to copulas[M]. Berlin: Springer, 2007.