

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.04.03

基于 NORTA-MCS 方法的香港秀茂坪岩坡失稳概率分析

孙元元, 周生通, 杜晓鹏

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对随机因素作用下香港秀茂坪岩坡的稳定可靠性问题, 建立了基于平面滑动失稳机理的含张力裂缝岩坡稳定可靠性模型, 并给出一种利用 NORTA-MCS (NORmal To Anything-Monte Carlo Simulation) 方法评估岩坡稳定可靠性的仿真方法, 该方法可适用于已知随机因素边缘分布函数和线性相关系数等部分概率信息的情况。最后基于该方法对对比分析了有限概率信息下香港秀茂坪岩坡在典型工况时的稳定可靠性问题, 结果表明: (1) 模型中随机因素间的相关性和相关程度对秀茂坪岩坡失稳概率的影响较大; (2) 合理的锚固措施是降低失稳概率的有效方法, 而忽略地震动的影响则会远远高估秀茂坪岩坡的安全性; (3) 当滑动倾角难以确定时须将其作为变量来评估秀茂坪岩坡的最大失稳概率。

关键词: NORTA-MCS 方法; 秀茂坪岩坡; 稳定可靠性; 相关随机数

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)04-0017-06

Failure probability analysis of Hong Kong Sau Mau Ping rock slope using NORTA-MCS approach

SUN Yuanyuan, ZHOU Shengtong, DU Xiaopeng

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: Considering the stable reliability problem of Hong Kong rock slope with stochastic uncertainties, a stable reliability model of Sau Mau Ping rock slope with tension crack was established according to plane sliding failure mode, and a simulation method named NORTA-MCS (NORmal To Anything-Monte Carlo Simulation) approach was presented to assess the stable reliability of rock slope. NORTA-MCS approach is suitable to the situations where only partial probability information is known, i. e. the marginal distribution functions and correlation coefficients. With the help of NORTA-MCS approach, several typical stable reliability problems of Sau Mau Ping rock slope were analyzed under the limited probability information. Example results show that (1) The correlations of parameters in the reliability model have great effects on the instable probability of Sau Mau Ping slope; (2) Suitable rock bolting measures are efficient methods for decreasing the rock instable probability, and ignoring effects of earthquake motion would greatly overestimate the rock safety of Sau Mau Ping Slope; (3) If it is difficult for the failure surface angle to be given definitely, this angle should be taken as a variable so that the maximum instable probability could be estimated for the rock slope.

Keywords: NORTA-MCS approach; Sau Mau Ping rock slope; failure probability; correlation random number

收稿日期: 2017-11-21; 修订日期: 2017-12-15

基金项目: 华东交通大学校立科研基金载运工具与装备教育部重点实验室资助基金项目(15JD06); 江西省自然科学基金(20161BAB216135); 国家自然科学基金项目(51505146)

第一作者: 孙元元(1984-), 女, 山东成武人, 硕士, 助教, 主要从事工程结构的风险评估方面研究。E-mail: 270480944@qq.com

通讯作者: 周生通(1984-), 男, 山东东明人, 博士, 讲师, 主要从事结构随机有限元与可靠度计算方面研究。E-mail: zhoushengtong@foxmail.com

0 引言

香港秀茂坪岩坡是岩土工程中一个典型的边坡稳定性案例,由于受到随机因素的影响,其稳定可靠性问题一直是国内外学者关注的重点之一^[1-4]。目前二阶矩法和 Monte Carlo 仿真(MCS)方法是分析边坡可靠性的常用方法。其中,前者属于近似解法,虽然计算效率高,但往往会过高或过低地估计可靠度结果。相反,MCS 方法虽然计算成本高、效率低,但当选取足够样本数时结果将趋近精确解,是当前工程中获得近似真实失稳概率的通用方法,而且该方法适用于任何规模、复杂度和非线性程度的可靠性问题。

不过,产生符合岩坡随机因素概率信息的样本随机数是基于 MCS 方法的岩坡可靠性评估正确实施的关键环节之一。在影响岩质边坡平面稳定性的因素中,结构面的抗剪强度、结构面倾角、张裂缝深度、张裂缝充水程度以及地震作用等都可能是不确定性的^[3-4]。这些不确定性因素在实际中的概率分布类型往往是任意的,而且因素之间还常存在相关关系,但由于受实际条件限制这些随机因素的完全概率信息多是无法获得的,尤其是在随机因素间完整依赖结构的函数关系表达方面。目前,在众多存在各种限制要求的相关随机数生成方法^[5-6]中,NORTA(NORmal To Anything)方法正是满足这一情况的可生成具有任意边缘分布和可行相关矩阵的多维随机数生成算法。它最初由 CARIO 和 NELSON^[5]提出,而后 GHOSH 和 HENDERSON^[7]讨论了其在高维情况下的性能。从本质上讲,NORTA 方法是 Nataf 变换^[8]在相关随机数生成方面的应用,其利用边缘分布和高斯 Copula 假设^[9]来构造物理空间随机因素的伪完备概率信息。

为此,本文将深入探讨联合 NORTA 方法和 MCS 方法解决相关随机因素作用下的香港秀茂坪岩坡可靠性问题,给出基于 NORTA-MCS 方法的可靠度计算基本原理和实现方法,并讨论典型工况下的香港秀茂坪岩坡稳定可靠度及影响规律等问题。

1 NORTA-MCS 方法原理

基于 MCS 方法的可靠度计算关键在于生成给定概率信息的足够样本,之后利用下式估算失稳概率:

$$P_f = E[I_{D_f}(x)] \approx \hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{D_f}(x_i) = \frac{N_f}{N} \quad (1)$$

式中: $E[\cdot]$ ——数学期望运算符;

$D_f = \{X|g(X) < 0\}$ ——失稳域;

$g(X)$ ——极限状态函数;

$I_{D_f}(x)$ ——失稳域的指示函数,当 $x \in D_f$ 时,

$I_{D_f}(x) = 1$, 否则, $I_{D_f}(x) = 0$;

N ——总样本点个数;

$N_f = \sum_{i=1}^N I_{D_f}^{(i)}$ ——样本点落入失稳域 D_f 的个数。

但往往由于概率信息有限,完全获取随机向量 $\mathbf{X}$ 的真实联合密度 $f(\mathbf{X})$ 是不可行的,只能利用有限概率信息(如边缘分布函数和相关系数)结合一定的假设得到伪完备联合密度 $\tilde{f}(\mathbf{X})$,并在此基础上生成随机数。在这种情况下,NORTA 方法则不失为一种行之有效的折中方法。NORTA 方法的基本原理公式可表达为:

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} F_1^{-1}[\Phi(Y_1)] \\ F_2^{-1}[\Phi(Y_2)] \\ \vdots \\ F_m^{-1}[\Phi(Y_m)] \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布的累积分布函数;

$F_i^{-1}(\cdot)$ ——变量 X_i 累积分布函数的逆函数;

m ——随机变量个数。

那么即通过式可将一个维数为 m 、相关系数矩阵为 $\mathbf{R}_0$ 的多维标准正态向量 $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]^T$ 变换为实际物理随机向量 $\mathbf{X}$,而基于此一组服从 $\mathbf{Y}$ 的高斯相关随机数即可转换为服从 $\mathbf{X}$ 的相关随机数。不过需要注意的是,依据 Copula 理论可知上述变换式等同于在 $\mathbf{X}$ 中引入了高斯 Copula 假设^[9]。由式(2)得 $\mathbf{X}$ 的概率密度函数为:

$$\tilde{f}(\mathbf{X}) = \varphi_m(\mathbf{Y}, \mathbf{R}_0) \prod_{i=1}^m \frac{f_i(x_i)}{\varphi(y_i)} \quad (3)$$

式中: $\varphi_m(\mathbf{Y}, \mathbf{R}_0)$ —— m 维标准正态联合密度函数;

$\mathbf{R}_0$ ——向量 $\mathbf{Y}$ 的相关系数矩阵,可由物理向量 $\mathbf{X}$ 的相关系数矩阵 $\mathbf{R}_x$ 得到;

$\varphi(\cdot)$ ——标准正态分布的概率密度函数;

$f_i(\cdot)$ ——变量 X_i 的概率密度函数。

式(3)即为基于 $\mathbf{X}$ 的边缘密度函数 $f_i(x_i)$, $i=1, 2, L, m$ 及其相关系数矩阵 $\mathbf{R}_x$,并结合高斯 Copula 假设得到的伪完备联合概率密度函数,亦称为 Nataf 分布^[8]。

但 NOTRA 方法的难点也是其应用的关键在于能否顺利求解 $\mathbf{R}_0$ 并对其进行 Cholesky 分解。若用 $\rho_{x,ij}$ 表示变量 X_i 和 X_j 在相关矩阵 $\mathbf{R}_x$ 中对应的元素,那么其与 $\mathbf{R}_0$ 中元素 $\rho_{0,ij}$ 的映射关系为:

$$\sigma_i \sigma_j \rho_{x,ij} + \mu_i \mu_j = \int_{x_i \in D \subset X_i} \int_{x_j \in D \subset X_j} x_i x_j \tilde{f}(x_i, x_j) dx_i dx_j = \int_{y_i \in R} \int_{y_j \in R} F_i^{-1}[\Phi(y_i)] \cdot F_j^{-1}[\Phi(y_j)] \cdot \varphi_2(y_i, y_j, \rho_{0,ij}) dy_i dy_j \quad (4)$$

式中: μ_i, σ_i ——分别是变量 X_i 的均值和标准差。

由式(4)可知 $\rho_{X,ij}$ 和 $\rho_{0,ij}$ 之间是一个连续的非减函数关系。在非正态边缘分布情况下, $\rho_{0,ij}$ 的求解是一个含有二维积分问题的非线性方程求根问题。本文借助开源的自适应多维积分程序——Cubature^[10] 直接实现对式中的二维积分求解, 且采用了其中对低维 (≤ 3) 积分非常有效的 p -adaptive 算法。但需要注意的是, 只有当 $\rho_{X,ij}$ 处于可行域时式才有解, 即需满足 $\rho_{X,ij} \in (\underline{\rho}_{X,ij}, \bar{\rho}_{X,ij})$, 其中 $\bar{\rho}_{X,ij}$ 为可行域下界, 在 $\rho_{0,ij} = -1$ 时达到, 表达式为:

$$\bar{\rho}_{X,ij} = \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} \left(\int_{y \in R} F_i^{-1}[\Phi(y)] \cdot F_j^{-1}[\Phi(-y)] \cdot \varphi(y) dy - \mu_i \mu_j \right) \quad (5)$$

$\bar{\rho}_{X,ij}$ ——可行域上界, 在 $\rho_{0,ij} = +1$ 时达到, 表达式为

$$\bar{\rho}_{X,ij} = \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} \left(\int_{y \in R} F_i^{-1}[\Phi(y)] \cdot F_j^{-1}[\Phi(y)] \cdot \varphi(y) dy - \mu_i \mu_j \right) \quad (6)$$

综上可知, 基于式(4)、(5)和(6)即可计算得到 R_0 , 然后在检验并确认 R_0 非负定的情况下, 即可利用式(2)中的变换原理生成具有给定边缘分布和相关系数的相关随机数, 最后利用这些随机数和式(1)表征的 MCS 求失稳概率的方法, 即可实现结构可靠度计算。本文将这一可靠性分析过程称为 NORTA-MCS 方法。

2 秀茂坪岩坡的稳定可靠性模型

秀茂坪岩坡的岩体是带有席状节理的未风化花岗岩, 属于平面滑动失稳机理, 可用图1所示带有张力裂缝的岩坡模型描述其稳定性。基于该模型可推导出秀茂坪岩坡的安全系数 S 函数表达式为^[4]:

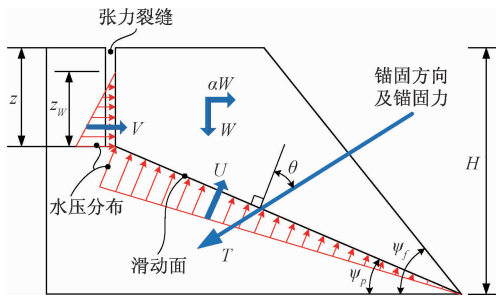


图1 带张力裂缝的秀茂坪岩坡模型

Fig.1 Sau Mau Ping rock slope model with tension crack

$$S = \frac{cA + [W(\cos\psi_p - \alpha\sin\psi_p) - U - V\sin\psi_p + T\cos\theta]\tan\phi}{W(\sin\psi_p + \alpha\cos\psi_p) + V\cos\psi_p - T\sin\theta} \quad (7)$$

式中: A ——滑动面单位宽度面积/ m^2 ;

W ——滑动面上方岩体的重力/ t ;

U ——滑动面上水压产生的上举力/ t ;

V ——张力裂缝中水压产生的水平力/ t 。

上述各量的计算式分别为:

$$A = (H - z)/\sin\psi_p \quad (8)$$

$$W = 0.5\gamma H^2 [(1 - (z/H)^2) \cot\psi_p - \cot\psi_f] \quad (9)$$

$$U = 0.5\gamma_w r z A \quad (10)$$

$$V = 0.5\gamma_w r^2 z^2 \quad (11)$$

在计算时, 式中参数的取值通常为:

$H = 60$ m——总坡高/ m ;

$\psi_f = 50^\circ$ ——坡度/ $(^\circ)$;

$\psi_p = 35^\circ$ ——滑面倾角/ $(^\circ)$;

$\gamma = 2.6$ t/m^3 ——岩石比重/ (t/m^3) ;

$\gamma_w = 1.0$ t/m^3 ——水比重/ (t/m^3) ;

$c = 10$ t/m^3 ——黏聚力/ (t/m^3) ;

$\phi = 35^\circ$ ——内摩擦角/ $(^\circ)$;

$\alpha = 0.08$ ——水平地震加速度系数;

T ——锚索拉力/ t , 依据实际情况取值;

θ ——拉力倾角/ $(^\circ)$, 依据实际情况取值, 在自然工况下(即未采取锚固措施), $T = 0, \theta = 0^\circ$;

z ——张力裂缝深度/ m , 通常取为 $z = H(1 - \sqrt{\cot\psi_f \tan\psi_p}) \approx 14.0$ m , 该值是在岩坡干涸状态下可使式中安全系数最小的裂缝深度^[4];

$r = z_w/z$ ——为张力裂缝的充水程度;

z_w ——裂缝水深/ m , 与当地雨水天气有关, 计算时一般取为 0.5 。

从公式中可以看出, 该岩坡稳定模型除考虑了岩体重力、滑面摩擦阻力等内部因素的影响外, 还考虑了地震、裂缝水压以及人工锚固等外部因素的作用。

在模型参数取为上述定值情况下, 可得自然工况下秀茂坪岩坡的安全系数约为 1.22 。按照传统观点, 该岩坡是稳定的且有一定裕度。但现实是模型中的部分参数通常是无法准确测定或确定的, 而更应该以随机量来表征这些参数, 例如: 材料不确定参数 c 和 ϕ , 几何不确定参数 z 以及外界环境或载荷不确定参数 z_w, r 和 α 等, 研究还发现诸如黏聚力和摩擦角 ϕ 之间、充水程度 r 与张裂缝深度 z 之间还存在有明显的负相关性^[1,4]。按照不确定性传播原理, 受不确定性因素影响的秀茂坪岩坡稳定安全系数也将具有不确定性, 这就会使得确定条件下认定为安全的岩坡在实际不确定性因素影响下的安全性受到质疑。

为此基于结构可靠性理论, 本文以 c, ϕ, z, r, α 五

个参数为随机参量,构建秀茂坪岩坡稳定可靠性模型,即在式基础上定义极限状态函数:

$$g(X) = S(X) - 1 \quad (12)$$

式中: $S(\cdot)$ ——安全系数函数,即式(7);

$X = [c, \phi, z, r, \alpha]^T$ ——物理空间不确定参量组成的随机向量。

进而,岩坡失稳概率表达为:

$$P_f = \int_{D_f} f(X) dX \quad (13)$$

式中: $f(X)$ ——随机因素的联合概率密度函数。

式(7)、(12)和(13)共同构成了香港秀茂坪岩坡稳定可靠性模型。而利用上节给出的 NORTA-MCS 方法即可实现对该可靠性模型进行求解。

3 结果分析与讨论

表 1 是秀茂坪岩坡稳定可靠性模型中的随机参数信息,有关取值参考文献[4],同时考虑实际情况将各个随机参量取为截尾分布类型。在此基础上,本节将基于 NORTA-MCS 方法分别对自然工况、相关性、锚固措施以及地震动影响下的秀茂坪岩坡稳定性进行分析和对比,最后还讨论了岩坡滑面倾角不确定时的岩坡稳定性问题。

表 1 秀茂坪边坡稳定可靠性模型的随机参数

Tab.1 Parameters in reliability model of Sau Mau Ping slope

变量名称	截尾分布	原均值	原标准差	下限	上限
粘聚力 $c/(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	正态	10	2	0	25
内摩擦角 $\phi/(\circ)$	正态	35	5	15	60
张裂缝深度 z/m	正态	14	3	0.1	24.75
充水程度 r	指数	0.5	0.5	0.0	1.0
地震加速度系数 α	指数	0.08	0.08	0.0	0.16

3.1 自然工况时的失稳概率

自然工况下秀茂坪岩坡未采取任何预防失稳的锚固措施(即 $T=0, \theta=0^\circ$),此时若取 $\rho_{c\phi} = \rho_{zr} = -0.5$ (即 c 与 ϕ 以及 z 与 r 之间负相关性),那么利用前述 NORTA-MCS 方法即可求得该工况下岩坡失稳概率的估算值约为 $\hat{P}_f = 0.022\ 116$ 。表明受到参数随机不确定性的影响自然工况下秀茂坪岩坡存在约为 2.21% 的失稳可能,而考虑到秀茂坪边坡对面人口密集的居民区,这一失稳概率是不能够被轻易忽视的,需要采取一定措施进行预防。

此外,值得指出的是,基于式(4)计算相关矩阵 R_0 是 NORTA-MCS 方法的关键之一。秀茂坪岩坡中粘聚力 c 与内摩擦角 ϕ 以及张力裂缝 z 和充水程度 r 之间存在相关关系,因而必须利用它们的边缘分布函数和相关系数求出在标准正态 Y 向量中的相关系数。图 2

给出了 z 和 r 相关情况下,实际相关系数 $\rho_{x,zr}$ 与 Y 中相关系数 $\rho_{0,zr}$ 间的映射情况。可以看到,随着 z 和 r 实际相关依赖性的增强(即 $\rho_{x,zr}$ 逐渐接近 ± 1),在 Y 中的相关依赖性也随着增强,且当在 Y 中完全相关($\rho_{0,zr} = \pm 1$)时,实际相关系数分别达到最大值 0.962 6 和最小值 -0.963 0。这一规律与验证了式中 $\rho_{0,zr}$ 和 $\rho_{x,zr}$ 之间的递增关系以及 $\rho_{x,zr}$ 的取值受到可行域($\bar{\rho}_{X,zr}, \bar{\rho}_{X,zr}$)的限制。最后经过计算,在 $\rho_{c\phi} = \rho_{zr} = -0.5$ 时,有 $\rho_{0,c\phi} \approx -0.500\ 001$, $\rho_{0,zr} \approx -0.519\ 3$,而 ρ_{zr} 的可行域为 $[-0.999\ 997\ 24, 0.999\ 997\ 45]$ 。

对比可以发现,由于 c 和 ϕ 服从的截尾正态分布与正态分布差别不大,故其的可行域非常接近 $[-1, 1]$ 区间,且相应 Y 中的相关系数也与 X 中的相关系数仅存微小差别。而 z 和 r 由于两者分布类型不同,且 r 服从的截尾指数分布与正态分布差别较大,故可行域缩小明显且变换前后的相关系数差别也比较明显。

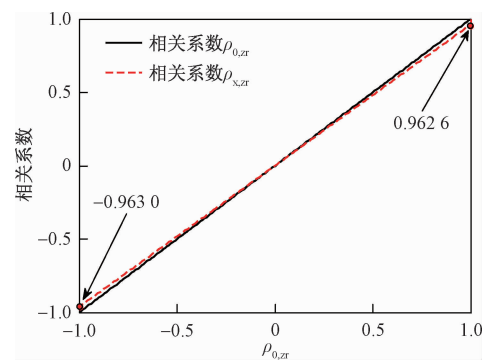


图 2 相关系数 $\rho_{0,zr}$ 和 $\rho_{x,zr}$ 的映射关系

Fig.2 The mapping relationship between $\rho_{0,zr}$ and $\rho_{x,zr}$

3.2 相关性对失稳概率的影响

秀茂坪岩坡中粘聚力 c 与内摩擦角 ϕ 、张力裂缝深度 z 和充水程度 r 之间具有明显相关性,如果忽略这些相关性或不恰当地指定相关系数就很可能对岩坡失稳概率估算结果造成较大影响。为此,本节分三种情形讨论这种影响:

情形 1: $\rho_{zr} = -0.5, \rho_{c\phi} = -0.5; 0.01; 0.5$;

情形 2: $\rho_{c\phi} = -0.5, \rho_{zr} = -0.5; 0.01; 0.5$;

情形 3: $\rho_{c\phi} = \rho_{zr} = -0.5; 0.01; 0.5$ 。

其中,情形 1 考虑了 c 与 ϕ 相关性的变化,由于实际中它们多为负相关性,因而 $0 \sim 0.5$ 的正相关关系是虚设的;情形 2 考虑了 z 和 r 的相关性变化,其中 $0 \sim 0.5$ 的正相关系数可以反映 Low 指出的由流行地下水位控制的正相关工况;情形 3 则是一种虚设情形,当两者同时为 0 时,代表不考虑相关关系的独立工况。由图 3 可以看到,在 $[-0.5, 0.5]$ 的相关系数范围内,随

着相关系数代数值的变大,三种情况下的岩坡失稳概率均逐步增大且近似呈线性变化。在情形3的独立工况时失稳概率(6.510 8%)约是自然工况(2.21%)下的3倍,可见忽略相关性对秀茂坪岩坡失稳的评估影响非常大。从情形2中的 z 和 r 间正相关关系(0~0.5)可以看到,流行地下水位控制下的岩坡张力裂缝充水工况将使得岩坡失稳概率增大,因而实际中非常有必要弄清岩坡张力裂缝充水的原因,正确判断 z 和 r 间的相关性质。另外,从变化程度来看, c 和 ϕ 间相关性的变化对失稳概率的影响程度要比 z 和 r 的大。例如:忽略 c 和 ϕ 间相关性(情形1: $\rho_{zr} = -0.5, \rho_{c\phi} = 0$)时,失稳概率由原来自然状态下的2.21%变化为5.075 6%;而忽略 z 和 r 间相关性(情形2: $\rho_{zr} = 0, \rho_{c\phi} = -0.5$)时,失稳概率变化为3.633 6%。因而实际中要更注重对岩坡材料相关性的精确测定。需要注意到,图4中失稳概率变化曲线并非光滑曲线,这是MCS仿真结果的随机性导致的。

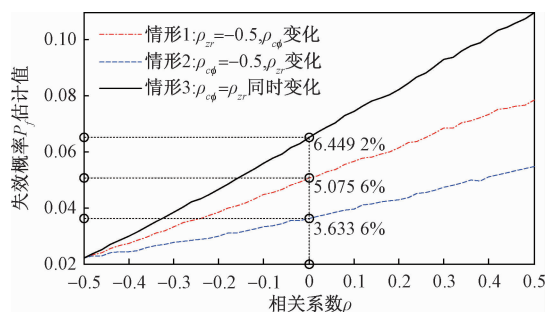


图3 不同情形下岩坡失稳概率随相关系数变化的规律

Fig.3 Instability probability of rock slope with the changed correlation coefficients for different cases

3.3 锚固措施对失稳概率影响

作为最常见的岩坡失稳预防措施,本节探讨锚固措施($T \neq 0$ 时)对岩坡失稳概率的影响规律。取锚索拉力变化范围为 $T = [0, 300]$ (t),拉力角变化范围为 $\theta = [0, 55]$ (°)(即拉力方向按顺时针方向由垂直于坡面变化为水平方向,见图1),分析秀茂坪岩坡失稳概率随着锚索拉力 T 及拉力角 θ 的变化规律,结果如图4所示。

可以看到:当 $\theta = 0^\circ$ (即拉力方向垂直于坡面时),随着 T 增加至300 t的力,失稳概率 $\hat{P}_f$ 可由无锚固措施时的2.21%降低至0.347 4%,而进一步增大 θ 至 55° (锚固拉力处于水平方向),失稳概率可继续下降至0.033 0%。总体来说,无论增大 T 还是 θ 将都使得岩坡的抗滑动能力增大,促使失稳概率呈下降趋势。但从经济角度讲, T 和 θ 的增大也势必使锚固防护的成本大大增加,因而合理的 T 和 θ 取值问题实为岩坡

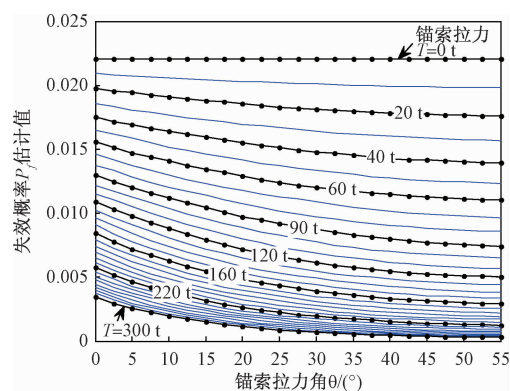


图4 岩坡失稳概率随锚索拉力 T 及拉力角 θ 的变化曲线
Fig.4 Instability probability of rock slope with the changed anchor tension force T and the inclination θ

失稳概率与锚固防护成本之间的最优化问题。

3.4 地震动对失稳概率的影响

香港地区虽不是强震区域,但小震也是会发生的。前述含地震动作用的工况中,水平地震加速度系数 α 取值为0.08是基于专家经验考虑到10年一遇的水平地震而设定的。如果在岩坡失稳评估中忽视现实中可能存在的地震动作用,重新计算秀茂坪岩坡失稳概率为 $\hat{P}_f = 0.119 2\%$ 。可以看到,相比考虑地震动作用影响时自然工况下的失稳概率(2.21%),不考虑地震动作用的失稳概率要低很多,数值上降低近20倍。说明在存在地震发生可能性的区域,一定要考虑地震动影响,否则一旦发生地震,即使震级较低,也常会造成的严重的次生灾害,如岩坡失稳。因而对于地震因素在岩坡失稳评价中必须加以考虑和重视。

3.5 滑面倾角不确定时的最大失稳概率

通常复杂岩坡的结构面产状较为离散且有限条件下常无法确定其确切分布,此时岩坡稳定模型中的滑面倾角 ψ_p 便无法准确确定。这时一种常见的分析方法是:将 ψ_p 看作变量寻找岩坡失稳概率最大的滑面,即转化为一个概率最优化问题。本节采用文献[3]中的方法,即:通过在一系列确定性的 ψ_p 值之下,得到一系列对应的岩坡失稳概率值;然后拟合得到最大失稳概率所对应的滑面倾角,以该滑面倾角计算岩坡最大失稳概率值。一系列确定性的 ψ_p 值确定方法可在HOEK和BRAY给出的滑面临界倾角附近取值,该临界倾角的估算公式为^[3]:

$$\alpha_{cr} = (\psi_f + \phi) / 2 = (50^\circ + 35^\circ) / 2 = 42.5^\circ$$

式中: ψ_f ——坡度;

ϕ ——内摩擦角。

为了考察滑动倾角选取对失稳概率的影响,这里

在临界倾角 α_{cr} 附近取一较大范围 $[25^\circ, 49^\circ]$, 使滑面倾角 ψ_p 在该范围内变化(间隔取为 1°)。分别计算各角度下秀茂坪岩坡的失稳概率 P_f 值(图 5)。进一步, 通过 MATLAB 曲线拟合工具箱拟合 $[35^\circ, 44^\circ]$ 范围内的失稳概率数据(取 4 次多项式进行拟合, 其中 $R^2 = 0.9999$, 可见拟合程度很高), 并从拟合曲线中读得极值失稳概率为 2.745 2%, 其对应的滑面倾角为 38.27° 。最后, 以该倾角重新计算失稳概率, 可得 $\hat{P}_f$ 为 2.738 8%, 与拟合的极值结果误差约为 0.23%。可见, 将发生最大失稳概率时的滑面倾角取为 38.27° 是可信的, 而此时秀茂坪边坡失稳概率为 2.738 8%, 比原来滑面倾角确定性工况时的失稳概率高出约 0.53%。

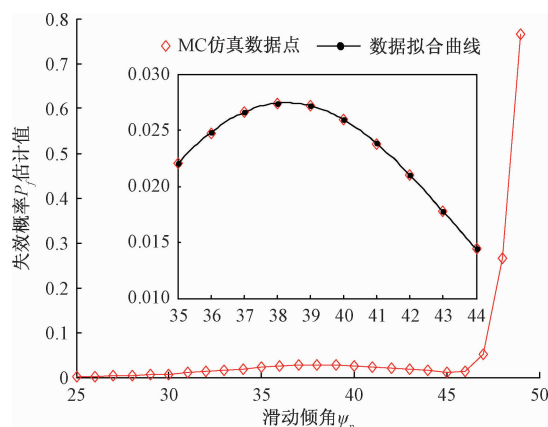


图 5 不同滑动倾角时的岩坡失稳概率

Fig. 5 Instable probability of rock slope for different failure surface angles

4 结论

(1) 在高斯 Copula 假设下, NORTA 方法可仅基于随机参量的边缘分布和线性相关系数产生所需的相关随机数, 在结合 MCS 方法的基础上实现岩坡有限概率信息下的稳定可靠性评估。

(2) 忽略相关关系的秀茂坪岩坡失稳概率要比自然工况下的高出约 3 倍; 且整个岩坡的失稳概率会随着黏聚力 c 与内摩擦角 ϕ 以及张力裂缝深度 z 与充水程度 r 间相关依赖性的增大而增大。因而, 正确考虑和评估各变量间的相关关系和相关程度是准确评估秀茂坪岩坡失稳概率的前提。

(3) 相比自然工况下的秀茂坪岩坡失稳概率, 合理的人工锚固措施可有效地降低岩坡失稳概率, 而忽略地震动作用的岩坡稳定性评估结果则会远远高估现实秀茂坪岩坡的安全性, 从而埋下安全隐患。在另一方面, 当滑动倾角难以确定时, 应该将其作为变量来考查秀茂坪岩坡的稳定可靠性, 求出最大的失稳概率作

为岩坡稳定性预防的决策指标。

参考文献:

- [1] LI D, CHEN Y, LU W, et al. Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(1): 58-68.
- [2] 贺子光, 吴博, 赵法锁, 等. 蝙蝠优化算法在边坡可靠性分析中的应用[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 31-38.
HE Ziguang, WU Bo, ZHAO Fasuo, et al. The application of Bat Algorithm in analysis of slope reliability [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 31-38.
- [3] 张崇波. 基于 LHS 方法的岩质边坡平面滑动可靠性分析[D]. 南京: 南京大学, 2015: 21-52.
ZHANG Chongbo. Probabilistic analysis of planar failure in rock slope based on Latin Hypercube Sampling method [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 21-52.
- [4] HOEK E. Practical rock engineering[M]. Chapter 7: a slope stability problem in Hong Kong; and Chapter 8: factor of safety and probability of failure; 2007: 92-114. (www.rocksience.com/learning/hoek-corner/books).
- [5] CARIO M C, NELSON B L. Modeling and generating random vectors with arbitrary marginal distributions and correlation matrix[R]. Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1997.
- [6] NIAKI S, ABBASI B. Generating correlation matrices for normal random vectors in NORTA algorithm using artificial neural networks [J]. Journal of Uncertain Systems, 2008, 2(3): 192-201.
- [7] GHOSH S, HENDERSON S G. Chessboard distributions and random vectors with specified marginals and covariance matrix [J]. Operations Research, 2002, 50(5): 820-834.
- [8] DER KIUREGHIAN A, LIU P. Structural Reliability under Incomplete Probability Information [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(1): 85-104.
- [9] LEBRUN R, DUTFOY A. An innovating analysis of the Nataf transformation from the copula viewpoint [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2009, 24(3): 312-320.
- [10] JOHNSON S G. Cubature [CP/OL]. http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Cubature_%28multi-dimensional_integration%29.