

# 边坡失效概率分布特性影响因素研究

王桂林<sup>1,2</sup>, 杨 洋<sup>1</sup>, 孙 帆<sup>1</sup>, 向林川<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045)

**摘要:** 受诸多因素的影响, 边坡失效概率不是定值, 实际上是具有一定置信度水平的置信区间分布的. 以无限边坡为例, 借助 Bootstrap 法判定抗剪强度参数最优边缘分布函数, 采用 Copula 函数描述抗剪强度参数间互相关性, 构建抗剪强度参数的联合分布函数, 并从分布特性的角度研究了抗剪强度参数联合分布函数、边坡稳定性设计控制标准及参数变异水平对边坡失效概率的影响. 研究表明: 针对本算例, 五类联合分布函数所得失效概率相近, 其中 No. 16 函数所得失效概率相对较大, Gaussian 函数所得结果相对较小, Copula 加权组合函数所得失效概率精确度相对较高; 随着边坡设计控制标准的提高, 则边坡稳定安全系数取值不断增加, 边坡失效概率逐渐减小且趋近于 0; 边坡失效概率均随  $\delta_\varphi$  的增加而增加, 随  $\delta_c$  的增加呈“增加-减小-增加”的趋势, 并且边坡失效概率对内摩擦角  $\varphi$  的变异水平较黏聚力  $c$  更为敏感.

**关键词:** 边坡; 失效概率; Copula 函数; 稳定安全系数; 变异水平; 置信区间

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0463-07

## Study on factors affecting the distribution characteristics of slope safety failure probability

WANG Guilin<sup>1,2</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, SUN Fan<sup>1</sup>, XIANG Linchuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Affected by many factors, slope failure probability is not a fixed value, but a confidence interval distribution with a certain level of confidence. Taking the infinite slope as an example, the optimal edge distribution functions of the shear strength parameters are determined by the Bootstrap method, the cross-correlation between the parameters is described by Copula function and the joint distribution function is constructed. The influence of the joint distribution functions, the slope stability safety factor and the variation level of shear strength parameters on slope failure probability are studied from the aspect of distribution characteristics. The research shows that the slope failure probabilities obtained by five joint distribution functions are similar. Specifically, the failure probability obtained by No. 16 function is larger relatively, of which Gaussian Copula function is smaller, and Copula weighted combination function is more accurate; With the improvement of the slope design control standard, the value of the slope stability safety factor increases continuously, and the slope failure probability gradually decreases and approaches 0; The slope failure probability increases with the increase of  $\delta_\varphi$ , and there is a tendency of “increasing-decreasing-increasing” with the increase of  $\delta_c$ ; The slope failure probability is more sensitive to the internal friction angle  $\varphi$  than the variation of cohesion  $c$ .

**Key words:** slope; failure probability; Copula function; stability safety factor; variation level; confidence interval

在边坡工程中, 传统安全系数法难以考虑边坡稳定性分析中存在的多种不确定性因素, 如抗剪强度参数天然变异性导致的物理不确定性, 因此, 以边坡失效概率或可靠度指标为评价依据的可靠度理论为该问题提供了有效途径, 许多学者对此进行了研究, 并取得了丰硕成果<sup>[1-6]</sup>, 但大多研究未考虑抗

剪强度参数之间的互相关性. 已有研究表明<sup>[7]</sup>, 岩土体的抗剪强度参数黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  之间存在统计负相关性, 并且未考虑黏聚力和内摩擦角相关性会使边坡失效概率的计算结果偏大<sup>[8]</sup>. 研究中常用 Gaussian、Plackett、Frank 或 No. 16 等 Copula 函数描述抗剪强度参数间相关结构, 进而建立联合

收稿日期: 2020-02-08

修改稿日期: 2020-07-13

基金项目: 国家重点研发计划课题资助项目(2018YFC1505501)

第一作者: 王桂林(1970—), 男, 教授, 工学博士, 从事岩土工程与地质工程的科研与教学. E-mail: glw@cqu.edu.cn

通讯作者: 杨洋(1994—), 女, 硕士生, 主要从事岩土工程领域的研究. E-mail: 2950110427@qq.com

分布函数,且已有效应用于岩土工程领域<sup>[9-11]</sup>。《建筑边坡工程技术规范》<sup>[12]</sup>(以下简称边坡规范)针对各种工况提出了相应的稳定安全系数 $F_{st}$ 作为设计安全裕度,然而稳定性系数 $F_{st}$ 满足规范要求时仍存在边坡失效问题,但已有研究对失效概率受稳定安全系数 $F_{st}$ 影响的变化幅度及规律没有深入探讨。

有研究表明<sup>[13-14]</sup>,受计算方法、岩土体抗剪强度参数概率分布形式和变异水平等因素的影响,边坡失效概率计算值并不是一个定值。为了研究边坡失效概率的分布特性,本文以无限边坡为例,借助 Bootstrap 法判定抗剪强度参数最优边缘分布函数,采用 Copula 函数描述抗剪强度参数间互相关性,探讨参数联合分布函数、边坡设计控制标准以及参数变异水平对边坡失效概率的影响规律,并将失效概率表示为具有一定置信度水平的置信区间<sup>[15]</sup>,研究获得的边坡失效概率分布特性变化规律,可为边坡设计提供一定的科学依据。

## 1 失效概率计算方法及算例模型

### 1.1 边坡失效概率计算

本文将应用 Copula 函数结合 Bootstrap 法<sup>[16-18]</sup>和蒙特卡罗法进行边坡失效概率的计算,并将失效概率表示为具有一定置信度水平的置信区间。本文中 Bootstrap 法抽样次数为 10 000 次<sup>[19]</sup>,选择置信度为 90% 的两侧置信区间,并以 5% 和 95% 分位数值作为其上下限。确定边坡失效概率的方法如图 1 所示:

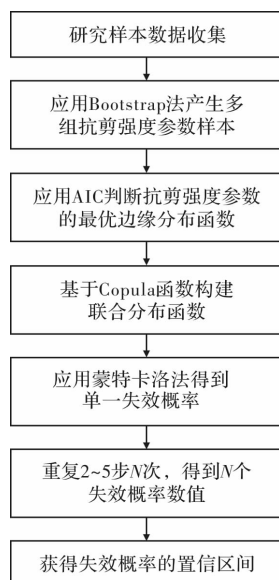


图 1 计算边坡失效概率置信区间的流程图

Fig. 1 Flow chart for calculating the confidence interval of the slope failure probability

### 1.2 算例模型

本算例为无限边坡稳定分析模型,如图 2 所示,其中:土体参数来自文献<sup>[20]</sup>,具体数据如表 1 所示; $c$ 、 $\varphi$  分别为潜在滑动面上土体的有效黏聚力和有效内摩擦角; $H$  为潜在滑动面以上土层厚度; $\alpha$  为边坡倾角; $\gamma$  为天然重度。将  $H$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$  视为确定量,分别为  $H=5$  m、 $\alpha=40^\circ$  和  $\gamma=17$  kN/m<sup>3</sup>。

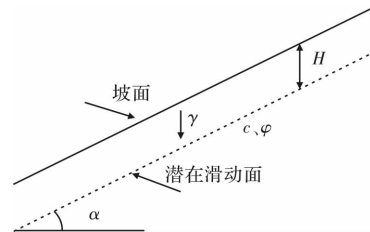


图 2 无限边坡稳定性分析模型

Fig. 2 Stability analysis model of infinite slope

表 1 抗剪强度参数试验数据<sup>[20]</sup>

Tab. 1 Test data of shear strength parameters

序号	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	序号	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
1	9	33	13	10	37
2	14	30	14	11	33
3	19	25	15	14	29
4	13	32	16	7	35
5	8	36	17	12	33
6	12	31	18	16	31
7	18	29	19	12	34
8	8	33	20	12	34
9	9	30	21	8	35
10	11	29	22	6	38
11	10	35	23	9	32
12	14	31	24	16	31

由于计算模型较简单,本文采用显示功能函数计算边坡稳定性系数 $F_s$ ,其表达式为

$$F_s = \frac{c}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

当  $F_s < 1$  时,判断边坡失稳破坏。

## 2 联合分布函数类型对边坡失效概率的影响

### 2.1 边坡抗剪强度参数联合分布函数

岩土工程中常用 Gaussian、Plackett、Frank 和 No. 16 Copula 函数来描述抗剪强度参数黏聚力

$c$  与内摩擦角  $\varphi$  的互相关性<sup>[21]</sup>, 但不同评价方法<sup>[22-25]</sup>得到的最优 Copula 函数不唯一. 研究发现<sup>[26-27]</sup>, 多种 Copula 函数经过线性加权组合可形成一种新的 Copula 函数. 因此, 本文对以上四类 Copula 函数进行加权组合形成新函数, 称为 Copula 加权组合函数. 此外, 采用与边缘分布无关的

Kendall 秩相关系数  $\tau$  对 Copula 函数的参数  $\theta$  进行估计. 基于五类 Copula 函数的二维联合分布函数, 密度函数及参数范围见表 2.

为求得基于 Copula 加权组合的联合分布函数, 首先求出 Gaussian、Plackett、Frank 和 No. 16 四类函数的权重系数, 结果如表 3 所示.

表 2 5 类 Copula 的分布函数、参数表达式及参数范围

Tab. 2 Five distribution functions, expressions and value ranges of their parameters

Copula 函数类型	分布函数 $C(u_1, u_2; \theta)$	$\theta$ 与 $\tau$ 关系式	参数 $\theta$ 范围
Gaussian	$\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi \sqrt{1-\theta^2}} \exp\left[-\frac{x_1^2 - 2\theta x_1 x_2 + x_2^2}{2(1-\theta^2)}\right] dx_1 dx_2$	$\tau = \frac{2\arcsin\theta}{\pi}$	$[-1, 1]$
Plackett	$\frac{S - \sqrt{S^2 - 4u_1 u_2 \theta(\theta - 1)}}{2(1 - \theta^2)}, S = 1 + (\theta - 1)(u_1 + u_2)$	$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u_1, u_2; \theta) dC(u_1, u_2; \theta) - 1$	$(0, \infty) \setminus \{1\}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln\left[1 + \frac{(e^{-\theta u_1} - 1)(e^{-\theta u_2} - 1)}{e^{-\theta} - 1}\right]$	$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left(\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt - 1\right)$	$(-1, 1) \setminus \{0\}$
No. 16	$\frac{1}{2}(S + \sqrt{S^2 + 4\theta}), S = u_1 + u_2 - 1 - \theta\left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} - 1\right)$	$\tau = 1 + 4 \int_0^1 \frac{\varphi_\theta(t)}{\varphi_\theta(t)} dt,$ $\varphi_\theta(t) = \left(\frac{\theta}{t} + 1\right)(1 - t)$	$[0, \infty)$
加权组合	$\sum_{i=1}^4 w_i C_i(u_1, u_2; \theta_i)$		

注: ①表中  $u_1, u_2$  分别为黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的边缘分布函数;

②  $w_i$  为各 Copula 函数的权重系数, 由  $w_i = \exp(-AIC/2) / \sum_{i=1}^4 \exp(-AIC/2)$ <sup>[28]</sup> 可得, 且满足:  $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^4 w_i = 1$

表 3 四类 Copula 的权重系数

Tab. 3 Weight coefficients of the four Copulas

	Gaussian	Plackett	Frank	No. 16
AIC 值	-17.173 3	-9.919 8	-13.325 2	-0.439 4
权重系数 $w_i$	0.852 6	0.022 7	0.124 5	0.000 2

2.2 不同联合分布函数对失效概率的影响

表 4 为 Gaussian、Plackett、Frank、No. 16 和 Copula 加权组合函数所得边坡失效概率  $p_f$  的分

布特性, 图 3 所示为五类函数所得边坡失效概率的对比图.

表 4 基于五类联合分布函数所得失效概率统计表

Tab. 4 Failure probability statistics table with different distribution functions

	90% 双侧置信区间/%	置信区间宽度/%	均值/%	标准差/%
Gaussian	(39.062 1, 42.863 2)	3.801 1	40.991 8	0.234 1
Plackett	(43.255 6, 47.139 3)	3.883 7	45.012 3	0.278 2
Frank	(40.198 0, 44.059 7)	3.861 7	41.981 0	0.263 9
No. 16	(43.910 2, 48.004 3)	4.094 1	46.176 2	0.336 3
加权组合函数	(39.695 5, 43.336 1)	3.640 6	41.532 4	0.187 2

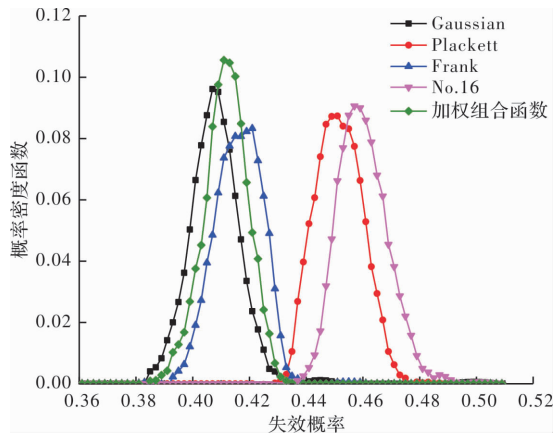


图3 不同联合分布函数所得边坡失效概率分布图

Fig. 3 Slope failure probability distribution with different joint distribution functions

对比五类函数所得结果可以看出,相较于其他 Copula 函数类型,采用 Gaussian 函数所得边坡失效概率均值最小且变异系数较大, No. 16 函数所得结果均值最大且变异系数较小, Plackett 和 Frank 函数所得结果均值大小居中. 与以上四类函数结果相比, Copula 加权组合函数所得结果与 Gaussian 函数接近但并不极端,这是因为 Gaussian 函数所占权重系数较大;基于加权组合函数的变异系数最小,这表明基于加权组合函数所得结果离散程度小,结果较精确. 因此结合均值以及变异系数来看, Copula 加权组合函数所得结果较为精确且数值既不保守也不高估.

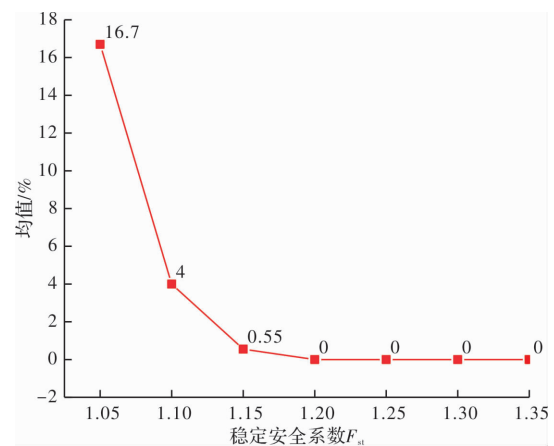
### 3 边坡设计控制标准对边坡失效概率的影响

在边坡规范中,边坡稳定性的设计控制标准主要是通过对边坡稳定安全系数  $F_{st}$  的取值来实现,本文按边坡规范选取  $F_{st} = 1.05 \sim 1.35^{[12]}$ , 步长 0.05, 并以 Copula 加权组合函数作为联合分布函数,探究当边坡稳定性系数  $F_s$  满足规范设计要求(即  $F_s \geq F_{st}$ )时  $F_{st}$  取值对边坡失效概率  $p_f$  的影响. 为使研究具有可比性,根据坡率法设计原理通过调整边坡倾角,使其稳定性系数  $F_s$  恰好分别等于各设计工况下的稳定安全系数  $F_{st}^{[14]}$ , 得到相应的边坡失效概率  $p_f$ .

本节基于 Copula 加权组合函数,在不同边坡稳定安全系数  $F_{st}$  下,对前文的无限长边坡稳定分析模型进行失效概率计算. 图 4 所示为边坡失效概率  $p_f$  均值随  $F_{st}$  的变化趋势.

从图 4 可以看出,当  $F_s = F_{st}$  时,边坡失效概率均值随  $F_{st}$  的增大而减小且逐渐趋近于 0, 这说

明当边坡稳定性满足规范要求的设计控制标准时,  $F_{st}$  越大, 边坡的失稳可能性越小. 当稳定性系数  $F_s > 1$  时, 边坡仍存在一定的失稳可能性, 所以规范中根据各工况设置相应的稳定安全系数以增加工程的安全裕度是十分合理的, 但当  $F_{st} \geq 1.20$  时, 失效概率均值为 0, 若此时再提高边坡稳定性设计控制标准进行边坡设计, 于边坡工程的安全可靠性没有实质意义, 且不利于边坡工程的经济合理性, 因此建议将《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)中的稳定安全系数限值由 1.35 降为 1.20, 但由于考虑到失效概率存在一定的变异性, 因此建议将稳定安全系数限值改为 1.25.

图4 不同  $F_{st}$  下所得失效概率均值Fig. 4 Means value of slope failure probability with different  $F_{st}$ 

### 4 不同抗剪强度参数变异水平对边坡失效概率的影响

内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  是边坡稳定性分析的重要参数, 为研究二者对失效概率的影响程度, 本节对黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  进行控制变量分析, 即在黏聚力  $c$  一定的情况下, 生成与  $\varphi$  的原始数据均值相同, 标准差不同的几组数据, 从而改变其离散程度. 在此基础上, 求出基于 Copula 加权组合函数的失效概率, 并通过分析其分布特性研究考虑抗剪强度互相关性时失效概率对内摩擦角  $\varphi$  变异水平的敏感程度, 以同样的方法研究失效概率对黏聚力  $c$  变异水平的敏感程度.

#### 4.1 内摩擦角 $\varphi$ 和黏聚力 $c$ 变异水平的划分

本文参照文献[29]对内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  变异水平进行划分, 将其变异水平划分为小变异、较小变异、中变异、较大变异、大变异共五类变异水平, 为方便定量描述其变异性对失效概率的影响, 下文中每一种变异水平人为取下限值为代

表值进行边坡稳定性分析, 具体分级标准见表 5.

表 5 土体抗剪强度参数的变异水平划分

Tab. 5 The division of the variation level of soil shear strength parameters

变异水平	变异系数	
	黏聚力 $c$	内摩擦角 $\varphi$
小变异	0.20~0.25/0.20	0.10~0.15/0.10
较小变异	0.25~0.30/0.25	0.15~0.20/0.15
中变异	0.30~0.35/0.30	0.20~0.25/0.20
较大变异	0.35~0.40/0.35	0.25~0.30/0.25
大变异	0.40~0.45/0.40	0.30~0.35/0.30

4.2 内摩擦角  $\varphi$  的变异水平对边坡失效概率的影响

表 6 为不同  $\delta_\varphi$  下边坡失效概率的分布特性, 为直观感受边坡失效概率的变化情况, 将其呈现

表 6 不同  $\delta_\varphi$  下所得边坡失效概率统计表

Tab. 6 Slope failure probability statistics table with different  $\delta_\varphi$

变异水平	90% 双侧置信区间/%	置信区间宽度/%	均值/%	标准差/%
小变异	(25.923 2, 29.257 5)	3.334 3	27.445 0	1.127 0
较小变异	(30.879 8, 34.285 4)	3.405 6	32.020 0	1.155 5
中变异	(39.088 3, 42.576 2)	3.487 9	40.605 0	1.170 6
较大变异	(40.677 8, 44.203 4)	3.525 6	43.147 5	1.200 1
大变异	(45.980 3, 49.694 5)	3.714 2	47.922 5	1.221 5

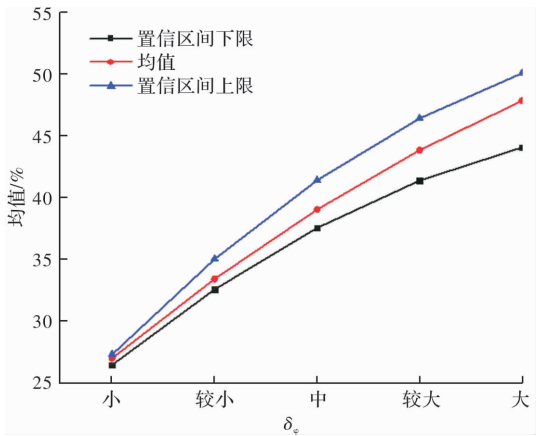


图 5 不同  $\delta_\varphi$  下失效概率均值

Fig. 5 Means value of failure probability with different  $\delta_\varphi$

4.3 黏聚力  $c$  的变异水平对边坡失效概率的影响

表 7 为不同  $\delta_c$  下边坡失效概率的分布特性, 为直观感受边坡失效概率的变化情况, 将其呈现在图中: 图 7 所示为边坡失效概率均值及置信区间上下限与黏聚力变异系数  $\delta_c$  的关系, 图 8 为边坡失效概率标准差与黏聚力变异系数  $\delta_c$  的关系, 此时内摩

在图中. 图 5 所示为边坡失效概率均值及置信区间上下限与内摩擦角变异系数  $\delta_\varphi$  的关系, 图 6 为边坡失效概率标准差与内摩擦角变异系数  $\delta_\varphi$  的关系, 此时黏聚力  $c$  的变异系数  $\delta_c=0.3$ .

由表 6 可以看出,  $\delta_\varphi$  由 0.1 增加到 0.3 过程中, 失效概率均值从 27.45% 增加到 47.92%, 增大了 20.47%; 标准差从 1.127% 增加到 1.2215%, 增大了 0.0945%.

由图 5、图 6 可以看出, 边坡失效概率均值随  $\delta_\varphi$  的增加显著增加, 这说明  $\delta_\varphi$  的增加会引起边坡的失效概率增加; 失效概率的置信区间宽度随  $\delta_\varphi$  的增加而变大, 与标准差的变化相吻合(随  $\delta_\varphi$  的增加而增加), 这说明内摩擦角的变异性越大, 失效概率的离散程度越大, 即所求得的失效概率不确定性越大, 对内摩擦角变异性大的边坡应充分考虑所求得失效概率的不确定性.

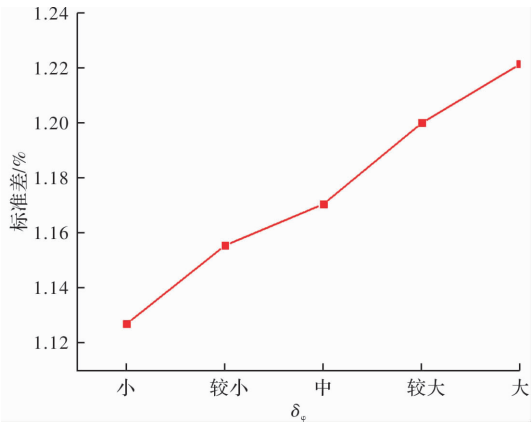


图 6 不同变异系数  $\delta_\varphi$  下失效概率变异系

Fig. 6 Standard deviation of failure probability with different  $\delta_\varphi$

擦角  $\varphi$  的变异系数  $\delta_\varphi=0.1$ .

由表 7 可以看出,  $\delta_c$  由 0.2 增加到 0.4 过程中, 失效概率均值变化幅度不大, 最大变化幅度为 5.7616%; 失效概率标准差变化幅度也较小, 最大变化幅度为 0.1455%.

由图 7 可以看出, 失效概率均值随  $\delta_c$  的增加呈

“增加-减小-增加”的变化规律,但变化不大,这说明 $\delta_c$ 对失效概率均值影响不大;由图8可以看出,失效概率标准差大小在1.12%上下波动,没

有明显变化规律,这说明不同 $\delta_c$ 下失效概率的离散程度相近,这说明 $\delta_c$ 对所求失效概率的精确度影响甚微.

表7 不同 $\delta_c$ 下所得边坡失效概率统计表

Tab. 7 Slope failure probability statistics table with different  $\delta_c$

变异水平	90%双侧置信区间/%	置信区间宽度/%	均值/%	标准差/%
小变异	(22.369 8, 25.053 1)	2.683 3	23.378 9	1.120 3
较小变异	(25.312 3, 27.781 9)	2.469 6	26.381 6	1.081 0
中变异	(20.901 2, 23.616 6)	2.715 4	21.942 1	1.191 0
较大变异	(19.992 0, 22.089 6)	2.097 6	20.620 0	1.045 5
大变异	(23.998 2, 26.622 4)	2.624 2	25.052 6	1.155 4

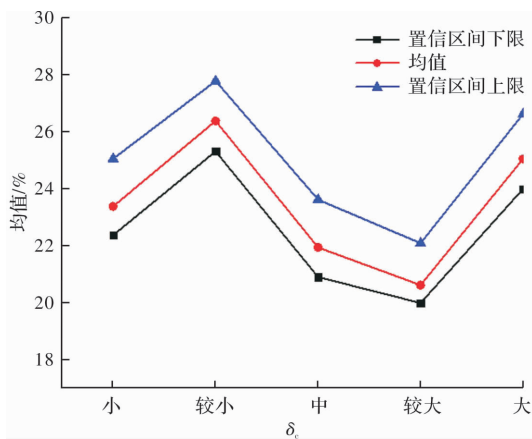


图7 不同 $\delta_c$ 下失效概率均值

Fig. 7 Means value of failure probability with different  $\delta_c$

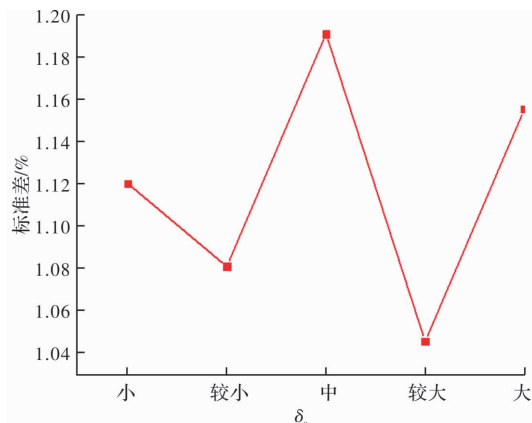


图8 不同 $\delta_c$ 下失效概率标准差

Fig. 8 Standard deviation of failure probability with different  $\delta_c$

通过对比 $\delta_\varphi$ 和 $\delta_c$ 对边坡失效概率的影响可以发现,考虑抗剪强度互相关性时失效概率对内摩擦角 $\varphi$ 的变异水平较黏聚力 $c$ 更为敏感:随 $\delta_\varphi$ 变化,失效概率均值最大变化幅度高达20.4775%,其标准差变化为0.0945%;而随 $\delta_c$ 变化,失效概

率均值最大变化幅度为5.7616%,标准差变化为0.1455%.

## 5 结论

以无限边坡为例,在考虑抗剪强度参数黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 互相关性的基础上,将失效概率表示为具有一定置信度水平的置信区间,分析了参数联合分布函数、边坡稳定安全系数以及参数变异水平对边坡失效概率分布特性的影响规律,主要结论如下:

(1)五类联合分布函数所得边坡失效概率均值相近,相较于其他函数, No. 16 函数所得失效概率均值和离散程度较大; Gaussian 函数所得失效概率均值和离散程度较小,结果偏小易导致高估边坡的可靠度; Plackett 与 Frank 及 Copula 加权组合函数所得结果居中,但 Copula 加权组合函数离散程度最小.

(2)即使边坡稳定性满足规范要求,仍存在边坡失稳问题,但随着边坡设计控制标准的提高,则相应的稳定安全系数取值的增加,失效概率均值大幅度减小并趋于0,若失效概率均值非常小时,再提高稳定性控制标准进行设计,对工程安全裕度并不会进一步得到提高,因此建议将《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)中的稳定安全系数限值由1.35降为1.25.

(3)考虑抗剪强度参数互相关性时,边坡失效概率均随 $\delta_\varphi$ 的增加而增加,随 $\delta_c$ 的增加呈“增加-减小-增加”的变化规律但变化不大;相比于黏聚力 $c$ ,失效概率对内摩擦角 $\varphi$ 的变异水平更敏感.

(4)为保证工程的安全可靠性,在确定边坡稳定安全系数取值时,除应考虑边坡的工况和安全等级外,还需考虑抗剪强度参数的变异水平.

## 参考文献 References

- [1] 郑荣跃, 梧松. 基于 Spencer 法的边坡稳定性可靠度指标分析[J]. 岩土力学, 2006(1):147-150, 154.  
ZHENG Rongyue, WU Song. Reliability index analysis of slope stability based on Spencer's method. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(1):147-150, 154.
- [2] 朱彬, 裴华富, 杨庆. 基于高斯过程回归的响应面法及边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 209-212.  
ZHU Bin, PEI Huaifu, YANG Qing. Gaussian process regression-based response surface method and reliability analysis of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1):209-212.
- [3] 邓志平, 牛景太, 潘敏, 等. 考虑地层变异性和土体参数空间变异性的边坡可靠度全概率设计方法[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6):1083-1090.  
DENG Zhiping, NIU Jingtai, PAN Min, et al. Full probabilistic design method for slopes considering geological uncertainty and spatial variability of soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6):1083-1090.
- [4] 陈祖煜, 徐佳成, 孙平, 等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析:(一)相对安全率方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3):148-159.  
CHEN Zuyu, XU Jiacheng, SUN Ping, et al. Reliability analysis on sliding stability of gravity dams: Part I, An approach using criterion of safety margin ratio [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 148-159.
- [5] 陈祖煜, 徐佳成, 陈立宏, 等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析:(二)强度指标和分项系数的合理取值研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3):160-167.  
CHEN Zuyu, XU Jiacheng, CHEN Lihong et al. Reliability analysis on sliding stability of gravity dams: Part II, Determination of shear strength parameters and partial factors[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3):160-167.
- [6] 李典庆, 周强, 曹子君. 基于广义可靠指标相对安全率的岩土工程设计安全判据[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3977-3986.  
LI Dianqing, ZHOU Qiang, CAO Zijun. Safety criteria for geotechnical design based on the generalized reliability ratio of safety margin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10):3977-3986.
- [7] 范明桥, 盛金保. 土强度指标  $\varphi$ ,  $c$  的互相关性[J]. 岩土工程学报, 1997(4):100-104.  
FAN Mingqiao, SHENG Jinbao. Cross-correlation of soil strength index  $\varphi$ ,  $c$  [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997(4):100-104.
- [8] DAS G. K., HAZRA B., GARG A, et al. Stochastic hydro-mechanical stability of vegetated slopes: An integrated Copula based framework[J]. Catena, 2018, 160:124-133.
- [9] 唐小松, 李典庆, 周创兵, 等. 基于 Copula 函数的基桩荷载-位移双曲线概率分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1):171-178.  
TANG Xiaosong, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing et al. Probabilistic analysis of load-displacement hyperbolic curves of single pile using Copula[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1):171-178.
- [10] WU X Z. Probabilistic slope stability analysis by a Copula-based sampling method[J]. Computational Geosciences, 2013, 17(5):739-755.
- [11] 张蕾, 唐小松, 李典庆, 等. 基于 Copula 函数的岩土结构物系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(1):193-202.  
ZHANG Lei, TANG Xiaosong, LI Dianqing et al. System reliability analysis of geotechnical structures based on the Copula function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1):193-202.
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑边坡工程技术规范:GB 50330-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical code for building slope engineering:GB50330-2013[S]. BeiJing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [13] 张卫民. 土体力学参数对土坡稳定安全系数影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
ZHANG Weimin. Influence of soil parameters on soil slope safety factor of stability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [14] 黄景华, 陈朝晖, 莫玻, 等. 参数特性及分布形式对边坡稳定可靠性的影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3):23-30.  
HUANG Jinghua, CHEN Zhaozhui, MO Bo et al. Influence analysis of characteristics and distribution types of soil parameters on slope reliability[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(3):23-30.
- [15] 唐小松, 李典庆, 曹子君, 等. 有限数据条件下边坡可靠度分析的 Bootstrap 方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(3):893-901, 911.  
TANG Xiaosong, LI Dianqing, CAO Zijun et al. bootstrap method for analyzing slope reliability based on limited shear-strength parameter data [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3):893-901, 911.



- the performance of the ring damper [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32 (4): 429-435.
- [11] 李爱群. 钢筋混凝土剪力墙结构抗震控制及控制装置研究[D]. 南京:东南大学, 1992.
- LI Aiqun. Research on seismic control and control device of reinforced concrete shear wall structure [D]. Nanjing: Southeast University, 1992.
- [12] 李敏. 带耗能装置开缝剪力墙的设计研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
- LI Min. Design research of slotted shear wall with energy dissipation device [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [13] 袁新禧. 带竖缝及金属阻尼器的混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2015.
- YUAN Xinxi. Experimental study on seismic performance of concrete shear walls with vertical joints and metal dampers [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [14] 黄祖桓. 开缝耗能组合墙的抗震性能研究[D]. 广州:广州大学, 2017.
- HUANG Zuhuan. Research on seismic performance of slotted energy dissipation composite wall [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [15] 丁祖贤. 钢板阻尼器在预制剪力墙结构竖缝的应用研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2019.
- DING Zuxian. The study on application of steel plate dampers in vertical joints of prefabricated shear wall structures[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology
- [16] 谷玉珍. 摩擦阻尼器在预制剪力墙竖缝的应用研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2019.
- GU Yuzhen. Application of friction damper in vertical joints of prefabricated shear wall [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010. [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

(编辑 沈波)

(上接第 469 页)

- [16] BEfron. 1977 Rietz2dx Lecture-Bootstrap methods; Another look at the Jackknife[J]. The Annals of Statistics. 1979, 7(1):1-26.
- [17] 陈立宏,陈祖煜,刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005(1): 37-40, 45.
- CHEN Lihong, CHEN Zuyu, LIU Jinmei. Probability distribution of soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics. 2005, 26(1): 37-40, 45.
- [18] 苏永华,何满潮,孙晓明. 大子样岩土随机参数统计方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 117-119.
- SU Yonghua, HE Manchao, SUN Xiaoming. Approach on asymptotic approximations of polynomials for probability density function of geotechnics random parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 117-119.
- [19] ZHE Luo, ATAMTURKTUR Sez, JUANG Hsein. Bootstrapping for characterizing the effect of uncertainty in sample statistics for braced excavations[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(1): 13-23.
- [20] Harianto Rahardjo, Alfredo Satyanaga, Eng-choon Leong et al. Variability of residual soil properties[J]. Engineering Geology, 2012, 141: 124-140.
- [21] ASklar. Fonctions de répartition à dimensions et leurs marges[J]. Publications de l'Institut de Statistique de l'Université de Paris, 1959, 8: 229-231.
- [22] AKAIKE, H. New look at statistical-model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [23] ZHANG Lan. Multivariate hydrological frequency analysis and risk mapping[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2005.
- [24] Genest Christian, Remillard Bruno, Beaudoin David. Goodness of fit tests for copulas: A review and a power study[J]. Insurance Mathematics & Economics, 2009, 44(2): 199-213.
- [25] KOJADINOVIC Ivan, YAN Jun. Modeling multivariate distributions with continuous margins using the Copula R Package[J]. Journal of Statistical Software, 2010, 34(9): 1-20.
- [26] NELSEN R B. An introduction to copulas [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.
- [27] SHAMIRI A, HAMZAH N A, PIRMORADIAN A. Tail dependence estimate in financial market risk management: Clayton-gumbel Copula approach[J]. Sains Malaysiana, 2011, 40(8): 927-935.
- [28] BUCKLAND S T; BURNHAM K P; AUGUSTIN N H. Model selection: An integral part of inference[J]. Biometrics, 1997, 53(2): 603-618.
- [29] 骆飞. 小样本岩土参数统计特征估计及边坡稳定可靠性分析[D]. 重庆, 西南交通大学, 2017.
- LUO Fei. Small samples and reliability analysis of slope stability [D]. Chongqing, Southwest Jiaotong University, 2017.

(编辑 沈波)