

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.047



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



边坡支挡结构岩土荷载的分项系数计算方法

王桂林^{a,b,c}, 陈瑶^a, 杨洋^a

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆);
c. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 岩土参数的变异特性给边坡支挡结构岩土荷载的确定带来困难, 分项系数法考虑了可靠度, 且计算简单, 为此提供了解决方案。基于极限状态方程, 将抗剪强度参数视为正态分布, 采用一般分离法, 通过分项系数的求解, 推导了边坡支挡结构岩土荷载的分项系数以及荷载值计算公式; 对单一滑面和折线型滑面两类典型滑面边坡案例分析表明: 利用该方法能较容易地获得不同边坡目标可靠度指标值对应的支挡结构岩土荷载值; 根据分项系数法计算得到的荷载值所设计的边坡, 其由蒙特卡罗法获得的可靠度指标与目标可靠度指标存在一定偏差; 其中, 单一滑面边坡主要是负偏差, 偏差最大约 6%, 对于折线型滑面边坡, 当目标可靠度指标为 1.65 时, 是负偏差, 偏差约 7%, 但当目标可靠度指标大于 1.65 时出现正偏差。由分项系数法计算得到的支挡结构荷载值总体上安全可控。

关键词: 支挡结构; 岩土荷载; 分项系数法; 可靠度; 蒙特卡罗法

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)05-0001-07

Partial coefficient determination method for loadings of slope retaining structure

WANG Guilin^{a,b,c}, CHEN Yao^a, YANG Yang^a

(a. School of Civil Engineering; b. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas; c. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The geotechnical parameters of slope have great variability which makes it difficult to determine the load of the support structure accurately. The partial coefficient method, which considers design uncertainty and is simple to calculate, is capable of solving this problem effectively. Based on the limit state equation, this study takes the shear strength parameter as normal distribution, derived the calculation formulas of the partial coefficients and the loading of the slope support structure via the general separation method. Then it analyzed two typical slope cases: single sliding surface and polyline sliding surface, by using this proposed method. The results show that the loading values corresponding to the target reliability index of different slopes can be easily obtained; and there is a deviation between the reliability index

收稿日期: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505504)

作者简介: 王桂林(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究, E-mail: glw@cqu.edu.cn.

Received: 2020-08-27

Foundation item: National Key R&D Program of China (No. 2018YFC1505504)

Author brief: WANG Guilin (1970-), PhD, professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: glw@cqu.edu.cn.

obtained by the Monte Carlo method and the target reliability value by the presented method; for single slide slope, the deviation is mainly negative about 6%, while for polyline sliding type, when the target reliability index is 1.65, the negative deviation is about 7%, but when the target reliability index is greater than 1.65, the deviation became positive. Therefore, the load value of the retaining structure calculated by the partial coefficient method is generally unconservative.

Keywords: retaining structure; rock and soil load; partial coefficient method; reliability; Monte Carlo method

目前,边坡(滑坡)支挡结构岩土荷载常采用单一安全系数法来确定^[1-2],但安全系数受工程经验影响较大,不能充分反映支挡结构设计的岩土参数变异性与安全裕度^[3-5]。因此,学者们对边坡支挡结构岩土荷载计算进行了深入研究。

方玉树^[6]分析了支挡结构岩土荷载取值方法,认为应根据稳定性进行计算,并指出支挡结构岩土荷载既不是滑坡推力也不是主动土压力。付文光等^[7]指出相关标准中稳定安全系数计算公式存在着 5 类抗力与荷载错位、不符合安全系数定义的现象,导致有时工程安全储备不足或较大浪费。Wu 等^[8]首次提出利用可靠度理论评价边坡稳定性,此后,利用可靠度理论求解边坡支挡结构岩土荷载的方法逐渐发展。祝玉学^[9]对可靠度用于边坡工程做了专门的解释;唐小松等^[10]基于 Copula 理论研究了有限信息情况下的边坡可靠度研究方法;周泽华^[11]系统研究了抗剪强度参数的联合分布与边坡可靠度的关系。但可靠度方法计算繁琐复杂,未能在实际工程中得到推广使用。分项系数极限状态设计方法是一种与规定目标可靠度相联系的设计方法,通过各变量的分项系数反映其变异水平,使结构功能函数通过显示方式表达,提高了准确度,广泛应用于桥梁、水利、灾害防护等多个结构工程领域的安全性研究^[12-14]。在边坡工程方面,陈祖煜^[15]根据安全系数与可靠指标提出了相对安全率的概念,并研究其作为安全判据在重力坝边坡等工程中的适用性。黎康平^[16]通过对比基于可靠度的安全系数标准和分项系数标准,研究了重力墙及土石坝的稳定性。李昂

等^[17]研究了几何和强度参数对分项系数的影响规律,提出了对应小、中、大 3 种变异水平的分项系数推荐值。但现有边坡工程设计对分项系数法的应用与规定还较为简单,有待进一步研究。

为了进一步探索分项系数法在边坡支挡结构设计方面的适用性,笔者采用一般分离法推导出边坡的分项系数以及荷载值的计算公式,将抗剪强度参数黏聚力 c 和摩擦系数 f 视为随机变量,通过算例比较分项系数法与蒙特卡罗法在单一型滑面和折线型滑面边坡可靠度的偏差,并分析其原因。

1 分项系数法

分项系数 γ 通常为变量的设计值与标准值的比值。一般情况下,影响边坡稳定性的因素分为边坡的抗滑力 R 与边坡的下滑力 S ,描述边坡稳定性的函数定义为其功能函数 Z ,表示为 $Z = g(R, S) = R - S$ 。现将支挡结构岩土荷载 R_0 加入到功能函数,得到边坡的功能函数在极限状态下的表达式,见式(1),示意图见图 1。

$$Z = R + R_0 - S = 0 \quad (1)$$

式中: R_0 为支挡力,kN,其方向与所在条块滑面倾向相同; S 为边坡下滑力; R 为边坡抗滑力,计算公式见式(2)、式(3)。

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i \quad (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^n l_i c + \sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i) f \quad (3)$$

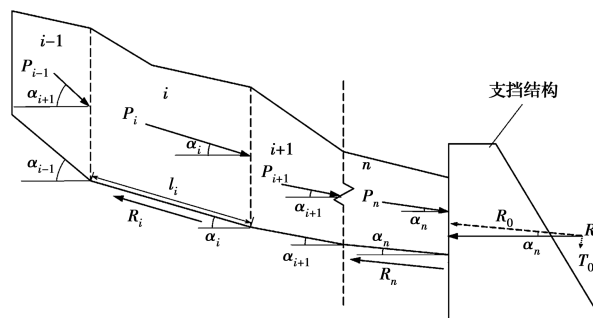


图 1 边坡滑块及支挡结构受力示意图

Fig. 1 Force diagram of slope block and supporting structure

式中: $\sum_{i=1}^n l_i$ 为折线型滑面总长度, m; c 为黏聚力, kPa; W_i 为各土条的重力, kN; α_i 为各土条滑面法线与铅垂线的夹角, ($^\circ$); f 为摩擦系数, $f = \tan \varphi$, φ 为内摩擦角, ($^\circ$).

图 1 中, P_i 为第 i 滑块的下滑力, 为该滑块的下滑力与抗滑力差值; R 为支挡结构对最底部滑块的总支挡力; R_0 和 T_0 分别为沿着底部滑块倾向和垂直底部滑块倾向的支挡分量.

根据一般分离法思想, 可对任意变量 X_i 、 X_j 进行式(4)所示的公式变换.

$$\sqrt{X_i^2 + X_j^2} = \frac{X_i^2 + X_j^2}{\sqrt{X_i^2 + X_j^2}} = \Phi_i X_i + \Phi_j X_j \quad (4)$$

式中: Φ_i 、 Φ_j 为分离函数. 对于变量 X_i ($i=1, 2, \dots, n$),

$$\text{其分离函数为 } \Phi_i = \frac{X_i}{\left(\sum_{i=1}^n X_i^2\right)^{1/2}}.$$

对抗剪参数 c 、 φ 的分项系数 γ_c 和 γ_f 进行求解. 假定下滑力 S 和抗滑力 R 均服从正态分布, 根据一般分离法及可靠度指标的表达式, 可得式(5).

$$\mu_R - \mu_S + R_0 = \beta \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)} = \beta \Phi_R \sigma_R + \beta \Phi_S \sigma_S \quad (5)$$

式中: μ_R 为抗滑力均值; μ_S 为下滑力均值; β 为可靠度; σ_R 为抗滑力标准差; σ_S 为下滑力标准差; Φ_R 、 Φ_S 为分离函数, 表达式分别见式(6)、式(7).

$$\Phi_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (6)$$

$$\Phi_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (7)$$

将式(2)和式(3)代入式(5), 可得式(8).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n l_i \mu_c + \sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i \mu_f + R_0 - \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i &= \\ \beta \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^n l_i\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right)^2 \sigma_f^2\right)} &= \\ \beta \Phi_c \sigma_c \sum_{i=1}^n l_i + \beta \Phi_f \sigma_f \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right) & \quad (8) \end{aligned}$$

根据变异系数的定义, 抗剪参数均值与标准差存在关系

$$\sigma_c = \delta_c \mu_c, \sigma_f = \delta_f \mu_f$$

式中: δ_c 、 δ_f 分别为黏聚力和摩擦系数的变异系数, 将其代入式(8), 可得式(9).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n l_i \mu_c + \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right) \mu_f - \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + R_0 &= \\ \beta \Phi_c \delta_c \mu_c \sum_{i=1}^n l_i + \beta \Phi_f \delta_f \mu_f \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right) & \quad (9) \end{aligned}$$

移项整理后得到边坡支挡结构岩土荷载的计算式, 见式(10).

$$\begin{aligned} R_0 &= \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i - \sum_{i=1}^n l_i \gamma_c \mu_c - \\ &\quad \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right) \gamma_f \mu_f \quad (10) \end{aligned}$$

式中: γ_c 为黏聚力的分项系数, $\gamma_c = 1 - \beta \Phi_c \delta_c$, 当 $\gamma_c < 0$ 时, 取 $\gamma_c = 0$; γ_f 为摩擦系数的分项系数, $\gamma_f = 1 - \beta \Phi_f \delta_f$, 当 $\gamma_f < 0$ 时, 取 $\gamma_f = 0$; Φ_c 、 Φ_f 分别为黏聚力和摩擦系数的分离函数, 表达式见式(11)、式(12).

$$\Phi_c = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \sigma_c}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right)^2 \sigma_f^2}} \quad (11)$$

$$\Phi_f = \frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right) \sigma_f}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i\right)^2 \sigma_f^2}} \quad (12)$$

2 与目标可靠度指标印证及讨论

由于分项系数可以反映支挡设计后边坡需要达到的可靠度指标, 因此, 按分项系数法计算所得到的荷载进行边坡支护, 支护后边坡的可靠度指标理论上应等于计算时设定的目标可靠度指标, 即分项系数设定的目标可靠度与实际可靠度之间存在相互印证, 印证的流程如图 2 所示.

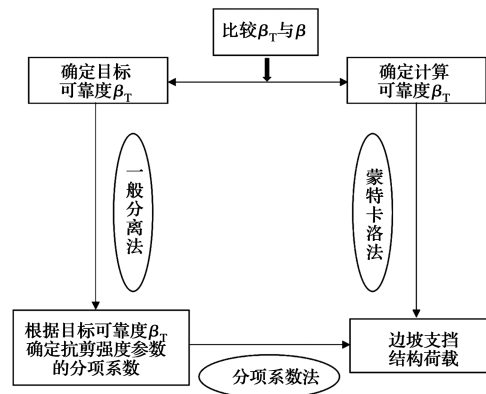


图 2 相互印证流程图

Fig. 2 Flow chart of mutual verification

印证时, 边坡实际可靠度采用蒙特卡罗法计算, 通过输入黏聚力与摩擦系数的分布区间以及分项系数法得到的支挡荷载, 计算判断边坡是否失稳破坏, 取重复次数 $N=5\ 000$, 得到失稳破坏次数与 N 的比值即为失效概率, 进而得到可靠度 β .

选取单一滑面和折线型滑面两类典型滑面的边

坡案例进行计算印证。根据概率统计知识,当功能函数服从正态分布时,失效概率 P_f 与可靠度指标 β 的关系见表 1。

表 1 失效概率与可靠度指标大小关系
Table 1 Relationship between failure probability and reliability index

失效概率 P_f	目标可靠度指标 β_T
0.05	1.65
0.01	2.33
0.001	3.1
0.000 1	3.72
0.000 01	4.25

2.1 算例一

取单一滑面的边坡模型,上部为土层,下部为岩体,边坡几何参数有上覆土层厚度 H ,滑面倾角 α ,如图 3 所示。模型参数取值分别为 $H=5\text{ m}$ 、 $\alpha=45^\circ$,土体重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ 。抗剪强度参数黏聚力 c 和摩擦系数 f 为随机变量,其统计特征见表 2。

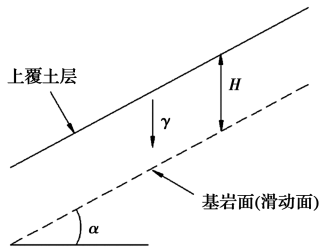


图 3 算例 1 边坡计算模型

Fig. 3 Slope model of example 1

表 2 黏聚力和摩擦系数的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of cohesion and friction coefficient

变量	均值	标准差	变异系数	分布
黏聚力	11.00 kPa	4.40	0.4	正态
摩擦系数	0.577 4	0.115 5	0.2	正态

2.1.1 边坡支挡结构岩土荷载计算 分离函数只与抗剪强度参数标准差有关,与目标可靠度指标无关,根据式(11)和式(12)计算分离函数。

黏聚力的分离函数

$$\Phi_c = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \times \sigma_c}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \theta_i\right)^2 \sigma_f^2}} = 0.646 2$$

摩擦系数的分离函数

$$\Phi_f = \frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \theta_i\right) \times \sigma_f}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\sum_{i=1}^n W_i \cos \theta_i\right)^2 \sigma_f^2}} = 0.763 2$$

按照式(10)进行支挡结构岩土荷载的计算。不同目标可靠度指标情况下,分项系数及支挡结构岩土荷载见表 3。

表 3 不同目标可靠度指标下支挡结构岩土荷载

Table 3 Load of retaining structure under different target reliability indexes

目标可靠度 指标 β_T	Φ_c	γ_c	Φ_f	γ_f	支挡结构 岩土荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
1.65	0.646 2	0.573 5	0.763 2	0.748 2	1 882.21
2.33	0.646 2	0.397 8	0.763 2	0.644 4	2 436.88
3.10	0.646 2	0.198 7	0.763 2	0.526 8	3 126.50
3.72	0.646 2	0.038 5	0.763 2	0.432 2	3 736.22
4.25	0.646 2	0(-0.098 4)	0.763 2	0.351 3	4 175.45

2.1.2 支挡后可靠度与目标可靠度对比 根据表 3 的边坡支挡结构岩土荷载对边坡进行支挡设计,应用蒙特卡罗法求得支挡后边坡的可靠度指标 β ,并与分项系数法目标可靠度 β_T 进行比较,结果见表 4。

表 4 目标可靠度指标与支挡后边坡可靠度指标对比

Table 4 Comparison between the target reliability index and the reliability index of the slope after the retaining

失效概 率 P_f	目标可靠度 指标 β_T	支挡后边坡 可靠度指标 β	支挡后边坡 失效概率 P_f	相对误差 ($\beta - \beta_T$)/ β_T
0.05	1.65	1.635	0.051 05	-0.909 1%
0.01	2.33	2.312	0.010 39	-0.772 5%
0.001	3.10	3.034	0.001 21	-2.129 0%
0.000 1	3.72	3.503	0.000 23	-5.833 3%
0.000 01	4.25	4.013	0.000 03	-5.576 4%

表 4 给出了目标可靠度指标 β_T 和对应的支挡后边坡可靠度指标 β 以及二者之间的相对误差。支挡后边坡可靠度指标 β 与目标可靠度指标 β_T 相对误差绝对值在 0.9%~5.8% 之间,其原因有:1)可靠度指标的计算方法不同,分项系数法计算过程是线性运算,而蒙特卡罗法的可靠度是由概率计算获得;2)抗剪强度参数变异性处理方式不同,分项系数法只考虑了抗剪强度参数概率上的变异性,而蒙特卡罗法采用随机场理论,考虑了抗剪强度参数的空间变异性。

2.2 算例二

某实际折线型滑面边坡上部主要为次生红黏土,少量碎石土和素填土,下面为岩体,滑动面为土岩分界面。边坡剖面高约 420 m,长约 120 m,土体重度 $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 视为随机变量,统计特征见表 5,边坡的计算剖面见图 4,本算例不考虑地下水作用。

根据式(11)和式(12),得到黏聚力的分离函数 $\Phi_c=0.306 2$;摩擦系数的分离函数 $\Phi_f=0.952 0$ 。

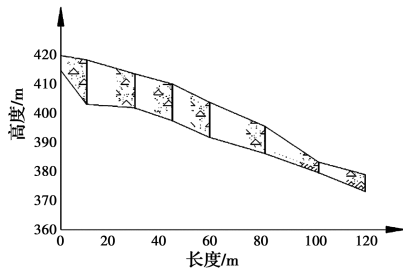


图 4 计算剖面图

Fig. 4 Calculation sectional view

表 5 黏聚力和摩擦系数的统计特征

Table 5 Statistical characteristics of cohesion and friction coefficient

变量	均值	标准差	变异系数	分布
黏聚力	21.07 kPa	1.939 6	0.092 1	正态
摩擦系数	0.23	0.036 7	0.159 6	正态

2.2.1 边坡支挡结构岩土荷载计算 分别取目标可靠度指标进行支挡结构岩土荷载的计算,在不同目标可靠度指标情况下,其分项系数及支挡结构岩土荷载见表 6。

表 6 不同目标可靠度指标下支挡结构岩土荷载

Table 6 Load of retaining structure under different target reliability indexes

目标可靠度指标 β_T	Φ_c	γ_c	Φ_f	γ_f	支挡结构岩土荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
1.65	0.306 2	0.953 7	0.952 0	0.749 8	561.03
2.33	0.306 2	0.934 6	0.952 0	0.646 7	1 159.65
3.10	0.306 2	0.913 1	0.952 0	0.530 0	1 851.53
3.72	0.306 2	0.895 7	0.952 0	0.436 0	2 419.78
4.25	0.306 2	0.880 8	0.952 0	0.355 6	2 913.65

由表 6 可以看出,随着目标可靠度指标 β_T 取值的增加,支挡结构岩土荷载大幅度增加,需要支护。目标可靠度指标 β_T 的选取对支挡结构的设计有重要

影响。

2.2.2 支挡后可靠度与目标可靠度对比及讨论

根据表 6 得到的支挡结构岩土荷载对边坡进行支挡设计,应用蒙特卡罗法求得支挡后边坡的可靠度指标 β ,并与分项系数法目标可靠度 β_T 进行比较,结果见表 7。

表 7 目标可靠度指标与支挡后边坡可靠度指标对比

Table 7 Comparison between the target reliability index and the reliability index of the slope after the retaining

失效概率 P_f	目标可靠度指标 β_T	支挡后边坡可靠度指标 β	支挡后边坡失效概率 P_f	相对误差 $(\beta-\beta_T)/\beta_T$
0.05	1.65	1.528	0.063 20	-7.39%
0.01	2.33	3.199	0.000 69	37.29%
0.001	3.1	3.615	0.000 15	16.61%
0.000 1	3.72	4.108	0.000 02	10.43%
0.000 01	4.25	大于 4.25	0	

表 7 给出了目标可靠度指标 β_T 和对应的支挡后边坡可靠度指标 β ,以及二者之间的相对误差。可以看出,相比算例 1,算例 2 中目标可靠度 β_T 和支挡后边坡可靠度指标 β 相差较大,当目标可靠度 β_T 为 1.65 时,存在负偏差 -7.39%,当目标可靠度 β_T 大于 1.65 时则为正偏差,可见总体上是安全可控的。

β_T 和 β 产生误差的原因:除可靠度指标计算方法和抗剪强度参数变异性处理方式不同外,与计算过程结构功能函数是显式表达式 $Z=R+R_0-S$ 且忽略了条块间力传递的假定有关;除此之外,假定抗剪强度参数服从正态分布,未考虑各参数之间的关联性,然而,实际工程中岩土体参数分布类型的拟合并不都是正态分布,且各参数之间存在一定的关联性。

后续研究可从以上几个方面改进分项系数计算方法,并通过大量实例对相互印证过程进行对比分析,通过对比结果确定其相互印证程度,并采取有效措施改进分项系数计算方法和分项系数极限状态设计方法。

3 结论

采用一般分离法推导了边坡支挡结构岩土荷载分项系数表达式,并经算例进行了目标可靠度与实际可靠度的对比。结果表明:

1)通过分项系数法能方便地获得不同边坡目标可靠度指标值对应的支挡结构岩土荷载值。

2)在指定目标可靠度指标值时,单一滑面边坡的可靠度主要出现负偏差,偏差绝对值最大约6%;对于折线型滑面边坡,当目标可靠度指标为1.65时,是负偏差,偏差约7%,但目标可靠度指标大于1.65时,出现正偏差,总体上是安全可控的。

3)导致偏差的主要原因有:分项系数法与可靠度法可靠度指标的具体计算方法不同;抗剪强度参数变异性处理方式不同;结构功能函数忽略了条块间力;岩土体参数分布类型仅假定为正态分布且参数之间无关联。

4)单一滑面和折线型滑面边坡可靠度分析中,目标可靠度与支挡后边坡可靠度相对大小并不是固定的,即便如此,由于分项系数法可以考虑工程的安全裕度,计算简单,符合工程设计习惯,在工程中具有应用价值。

参考文献:

- [1] 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, 2013.
Technical code for building slope engineering: GB 50330-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [3] 赵尚毅, 郑颖人, 王建华, 等. 基于强度折减安全系数的边坡岩土侧压力计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1760-1766.
ZHAO S Y, ZHENG Y R, WANG J H, et al. Discussion on calculation method of slope rock-soil lateral pressure based on factor of safety with strength reduction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1760-1766. (in Chinese)
- [4] 赵尚毅, 郑颖人, 何平, 等. 边坡侧向荷载计算方法讨论[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 434-441.
ZHAO S Y, ZHENG Y R, HE P, et al. Discussion on calculation methods of slope lateral load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 434-441. (in Chinese)
- [5] 李广信. 关于《建筑边坡工程技术规范 GB 50330—2013》的讨论[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2322-2326.
LI G X. Discussions on “Technical code for building slope engineering (GB 50330-2013)” [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2322-2326. (in Chinese)
- [6] 方玉树. 边坡与滑坡抗滑支护结构岩土荷载既不是主动土压力也不是剩余下滑力[J]. 重庆建筑, 2016, 15(9): 27-33.
FANG Y S. Rock and soil load of anti-sliding support structure of side slope and landslide is neither active earth pressure nor residual slide force [J]. Chongqing Architecture, 2016, 15(9): 27-33. (in Chinese)
- [7] 付文光, 陈双, 王振威. 稳定安全系数计算公式中荷载与抗力错位影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 556-563.
FU W G, CHEN S, WANG Z W. Discussion of dislocation phenomena of resistance and load in formula for stability safety factor [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 556-563. (in Chinese)
- [8] WU T H, KRAFT L M Jr. Safety analysis of slopes [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(2): 609-630.
- [9] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
ZHU Y X. Slope reliability analysis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [10] 唐小松, 李典庆, 周创兵, 等. 基于Copula函数的抗剪强度参数间相关性模拟及边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2284-2291.
TANG X S, LI D Q, ZHOU C B, et al. Modeling dependence between shear strength parameters using Copulas and its effect on slope reliability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2284-2291. (in Chinese)
- [11] 周泽华. 岩土参数的联合分布识别与边坡稳定性动力可靠度分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
ZHOU Z H. Identification of the joint distribution of rock and soil parameters and analysis for slope dynamic reliability. [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 李梦, 高晓军, 王启鸿. 基于分项系数法对拱坝抗滑稳定的分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 136-137, 141.
LI M, GAO X J, WANG Q H. Analysis on stability against sliding of arch dam based on partial coefficient method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 136-137, 141.

- (in Chinese)
- [13] DE BIAGI V, MARCHELLI M, PEILA D. Reliability analysis and partial safety factors approach for rockfall protection structures [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110553.
- [14] BLOMFORS M, LARSSON IVANOV O, HONFÍ D, et al. Partial safety factors for the anchorage capacity of corroded reinforcement bars in concrete [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 579-588.
- [15] 陈祖煜. 建立在相对安全率准则基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 521-544.
- CHEN Z Y. Reliability analysis and safety criterion in geotechnical engineering based on the index of safety margin [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 521-544. (in Chinese)
- [16] 黎康平. 基于可靠度理论的土工构筑物抗滑稳定安全标准研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- LI K P. Research on safety standards in earth works stability against sliding based on reliability theory [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 李昂, 罗强, 张文生, 等. 土坡稳定分析中考虑参数变异水平的分项系数取值[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(2): 341-350.
- LI A, LUO Q, ZHANG W S, et al. Discussion on the value of partial factors considering variation level of geotechnical parameter in slope stability analysis [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(2): 341-350. (in Chinese)

(编辑 胡玲)