

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0107

抗剪强度分项系数的标准差反馈标定法

朱 勇¹, 冯夏庭¹, 周 辉¹, 张传庆¹, 张铭强²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要: 基于可靠度理论的分项系数极限状态设计方法是当今岩土工程设计的一个趋势, 分项系数的标定是确定设计参数的关键。岩土材料强度分项系数需反映材料参数的变异性, 现有理论方法如安全系数校核法、一次二阶矩校核法、验算点校核法等理论标定方法, 没有明确说明分项系数如何降低参数不确定性的影响, 理论基础有待进一步完善。因此, 提出岩土材料强度分项系数的标准差反馈标定法, 该方法在目标可靠度的基础上, 通过观察均值的调整对标准差调整的抵消作用, 确定材料强度分项系数, 由此确定的分项系数能充分反映强度参数的离散性。通过算例对该标定方法的实现进行了说明, 并与验算点校核法进行了对比分析, 指出标准差反馈标定法比验算点校核法更加合理。

关 键 词: 分项系数; 标准差反馈标定法; 一阶可靠指标法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0151-07

Calibration of partial factors of shear strength parameters using standard deviation feedback method

ZHU Yong¹, FENG Xia-ting¹, ZHOU Hui¹, ZHANG Chuan-qing¹, ZHANG Ming-qiang²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou, Zhejiang 310006, China)

Abstract: Limit state design method based on reliability theory is a trend of modern geotechnical design. Calibration of the partial factors is a key to determine the design strength parameters. Although there are safety factor calibration methods, first order second moment method and designed points method to calibrate the partial factor theoretically, the mechanism of how the partial factors reflect the variance of the geotechnical materials is still unknown. The standard deviation feedback calibration method is then proposed to solve this problem. The core concept of this method is to adjust the mean value of the strength parameters to offset the influence of the standard deviation adjustment. A case study is given to illustrate the method. A comparison between this method and the design points method is taken out to see their different effects on the design strength parameters. The results show that the standard deviation feedback calibration method is more reasonable and the design points method will lead to a conservative design which would raise the budget ultimately.

Keywords: partial factor; standard deviation feedback calibration; first order reliability method

1 引 言

传统的基于安全系数的设计方法无法有效地考虑计算中各参数的变异特征和不确定性因素, 基于可靠度理论的分项系数极限状态设计方法则可以考虑不确定性的影响, 从而提高设计的可靠性。因此, 该方法已纳入欧盟国、美国、加拿大等发达国家岩土工程设计标准中^[1]。分项系数有多种类型, 如结

构重要性系数、设计状况系数、永久作用分项系数、可变作用分项系数、材料强度分项系数、结构系数等多种类型, 分别反映不同类型的不确定性。分项系数的标定是分项系数极限状态设计方法的关键环节, 一般根据历史的和经验的设计方法进行标定, 也可以按概率论方法和可靠性理论标定^[2]。对于岩土材料强度分项系数而言, Baecher 等^[3]系统阐述了材料强度分项系数的理论标定方法, 包括安全系

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (No. 2014CB046902); 国家自然科学基金项目 (No. 51279201)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046902) and the National Natural Science Foundation of China (51279201).

第一作者简介: 朱勇, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事岩土工程可靠度、稳定性、风险评估方面的研究工作。E-mail: yzhu@whrsm.ac.cn

数校核法、一次二阶矩校核法、验算点校核法。陈文^[4]、陈祖煜^[5]等所述的分项系数标定方法均属于验算点校核法。这些研究为材料强度分项系数的理论标定和推广应用奠定了基础。但上述方法没有明确说明分项系数如何反映参数不确定性的影响。其中, 验算点校核法得到的材料强度分项系数将使设计强度参数值位于参数空间中的极限状态面上, 实际应用中可能会增加治理成本。

为解决这一问题, 提出岩土材料强度分项系数的标准差反馈标定法, 该方法是在一阶可靠指标法计算可靠度的基础上, 针对某个目标可靠度, 通过观察均值的调整对标准差调整的等效作用来确定材料强度分项系数。

本文回顾了材料强度分项系数标定涉及的基本理论, 阐述了标准差反馈标定法的原理与工作思路, 采用算例对该方法标定的合理性进行了分析, 并与验算点校核法得到的材料强度分项系数进行对比, 讨论了标准差反馈标定法的意义。

2 强度分项系数标定的基本理论

材料强度分项系数标定的理论基础是结构可靠度理论, 标准差反馈标定法也是在一阶可靠指标法的基础上发展起来的, 以下简要回顾分项系数极限状态设计方法、材料强度分项系数的定义和一阶可靠指标法的原理, 作为阐述标准差反馈标定法的理论准备。

2.1 分项系数极限状态设计方法

分项系数极限状态设计方法的核心内涵是以分项系数和基本变量的代表值反映功能函数中基本变量的不确定性, 在岩土工程领域, 又称为荷载抗力因子设计法 (load and resistance factor design, 简称 LRFD)。其基本表达式为

$$\eta\mu_R \geq \delta\mu_S \quad (1)$$

式中: μ_R 为抗力均值; η 为抗力分项系数; μ_S 为荷载均值; δ 为荷载分项系数。

2.2 强度分项系数

分项系数极限状态设计方法在发展过程中, 产生了强度分项系数法和抗力分项系数法两种发展方向, 抗力分项系数非本文关注重点, 仅讨论强度分项系数。根据《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[6]的规定, 对于承载能力极限状态的验算, 其表达式为

$$\gamma_0\phi S(\gamma_G G_K, \gamma_Q Q_K, \alpha_K) \leq \frac{1}{\gamma_d} R(f_k / \gamma_m, \alpha_K) \quad (2)$$

且有

$$\gamma_m = \frac{f_k}{f_d} \quad (3)$$

式中: $S(\bullet)$ 和 $R(\bullet)$ 分别为作用效应函数结构抗力函数; G_K 、 Q_K 、 α_K 分别为永久作用、可变作用和几何参数的标准值; γ_0 、 γ_G 、 γ_Q 、 γ_d 分别为结构重要性系数、永久作用分项系数、可变作用分项系数、结构系数; ϕ 为设计状况系数; f_k 、 f_d 分别为材料强度参数标准值和设计值; γ_m 即为材料强度分项系数。

由式 (3) 可知, 分项系数的主要作用是为了确定材料强度参数设计值, 承担着反映材料参数不确定性的任务。

2.3 可靠指标

可靠度的计算方法通常有一次二阶矩法 (first order second moment method, FOSM)、Rothenblueth 点估计法 (points estimate method, PEM)、一阶可靠指标法 (first order reliability method, FORM)、二阶可靠指标法 (second order reliability method, SORM), 与可靠度计算相关的破坏概率计算方法有 Monte-Carlo 模拟方法和随机有限元法 (random finite element method, RFEM)。Fenton^[7]、吴振君等^[8]对上述方法已有较为充分的论述, 此处仅介绍 Low 等^[9]发展的电子表格法计算一阶可靠指标的基本原理。

以岩土材料强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 构成的二维原始参数空间为例 (如图 1 所示), c 的均值为 m_c , 标准差为 σ_c , ϕ 的均值为 m_ϕ , 标准差为 σ_ϕ , c 、 ϕ 相关系数为 ρ , 则其概率密度函数为

$$f_{c,\phi}(c, \phi) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_\phi\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) \quad (4)$$

式中: β 为当量正态化空间中定义的可靠度指标。最优化求解的过程相当于将该概率密度函数逐步扩大, 使其与极限状态面相切, 切点 P 即为验算点。设均值点 M 到验算点 P 的距离为 R , 均值点 M 到向量 \vec{MP} 与概率密度函数的交点处的距离为 r , 则原始参数空间中的可靠度可定义为

$$\beta = \frac{R}{r} \quad (5)$$

Low 等^[9]证明, 该定义与当量正态化空间所定义的可靠度指标具有相同的意义, 计算结果一致。

原始参数空间中定义的可靠度指标为我们理解其本质提供了一个很好的切入点, 本文提出的标准

差反馈标定法也将在原始参数空间中进行说明。

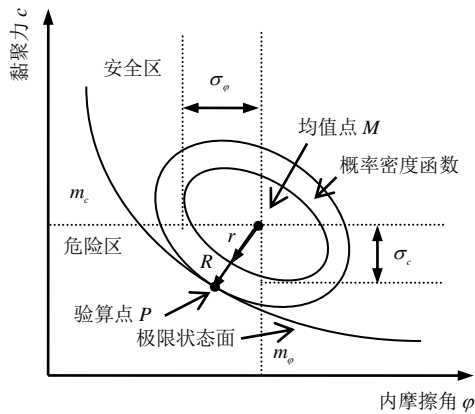


图1 原始参数空间中的可靠度指标

Fig.1 Reliability index in original parameters space

2.4 强度分项系数的验算点法校核

强度分项系数标定的验算点校核法是指按 FORM 法求解得到验算点坐标值 \bar{X}^* , 经过当量正态化逆变换之后得到参数 X^* , 以 X^* 为基础求解强度分项系数的方法。设某具体工程算例中强度参数标准值为 x_i , 经验算点校核法得到的验算点值为 x_i^* , 则有

$$\gamma_i = \frac{x_i}{x_i^*} \quad (6)$$

式中: γ_i 即为第 i 个强度参数的分项系数。

上述验算点是在求解可靠度指标 β 的过程中确定的。由可靠度指标的定义可知, 验算点均需落在极限状态面上, 亦即将验算点坐标代入功能函数, 功能函数将等于 0。如果功能函数由安全系数计算公式构成, 安全系数将等于 1, 这意味着所有待治理的岩土体均处于极限状态。

3 强度分项系数标准差反馈标定法

材料强度分项系数的功能是确定设计参数, 初衷是反映参数的变异性所带来的不确定性影响。为了达到这个目的, 避开验算点校核法存在的问题, 提出强度分项系数标准差反馈标定法。该方法从降低参数变异性的影响着手, 考察强度参数设计值相对于强度参数均值进行多大幅度的调整, 才能降低参数标准差所带来的不确定性。下面详述其基本思想与实施方案。

3.1 标准差反馈标定法的基本理论

原始参数空间中定义的可靠度指标为观察参数变异性对于可靠度指标的影响提供了直观的工具。站在纯数学的角度看, 可靠度指标值由 R 和 r 共同

决定, 前者取决于均值点在参数空间中的位置, 亦即参数平均值的大小, 后者取决于概率密度函数的面积, 面积大小由参数标准差 σ_c 和 σ_ϕ 共同决定。

因此, 对于参数均值 c 、 ϕ 已知并给定目标可靠度指标 β_D 的情况, 必然存在一组理想的标准差 σ'_c 和 σ'_ϕ 使得下式成立:

$$f_{c,\phi}(c, \phi) = \frac{1}{2\pi\sigma'_c\sigma'_\phi\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{\beta_D^2}{2}\right) \quad (7)$$

我们称式 (7) 为目标可靠度指标 β_D 的理想概率密度函数。理想概率密度函数在参数空间中构成的椭圆, 及其与原概率密度函数的空间位置关系见图 2 所示。

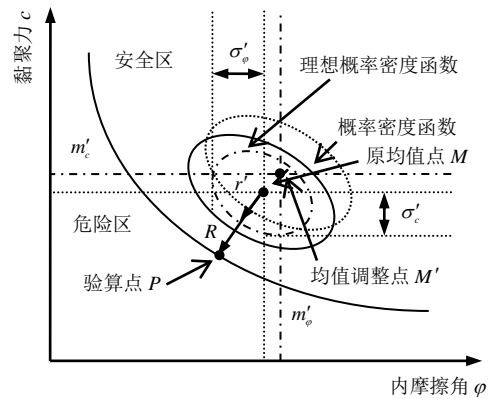


图2 标准差反馈标定法图示

Fig.2 Illustration of standard deviation feedback calibration

设均值点 M 到向量 \overline{MP} 与理想概率密度函数的交点处的距离为 r' , 则有

$$\beta_D = \frac{R}{r'} \quad (8)$$

式 (8) 表明, 对于任何强度参数均值处于安全区的岩土体, 站在数学的角度, 都可以通过调整参数标准差, 得到理想概率密度函数, 进而获得满足设计要求的可靠度。然而, 材料强度参数的变异性 (以标准差为表征) 有相当一部分属于材料自身的固有特性^[10-11], 将 r 变为 r' 的工程措施十分有限, 因此, 只能通过改变 R 来增加工程的可靠性。如图 2 所示, 将原均值点 M 调整至点 M' , 坐标为新的强度参数均值 m'_c 和 m'_ϕ , 可以起到缩小参数标准差得到设计可靠度等价的效果。

强度分项系数的标准差反馈标定法正是在这一认识的基础上建立的, 其思想内涵是, 寻找与表征参数变异性的标准差等效的均值调整, 通过均值的调整, 降低参数变异性带来的不确定性影响。其具

体做法为,对于给定目标可靠度指标 β_D ,先调整强度参数的标准差,使当前可靠度 β_0 增加(或减少)到目标可靠度 β_D ,保持调整后的标准差不变,调整参数均值,使可靠度从 β_D 恢复到 β_0 ,由此得到的均值调整幅度与标准差调整幅度效果等价。假如 m'_c 、 m'_φ 确定,则对应的分项系数可分别为

$$\gamma_c = \frac{m_c}{m'_c} \quad (9)$$

$$\gamma_\varphi = \frac{m_\varphi}{m'_\varphi} \quad (10)$$

3.2 标准差反馈标定法实施步骤

根据标准差反馈标定法的思想内涵,假设强度参数服从正态分布或对数正态分布,可将强度分项系数标定的实施步骤确定如下:

(1) 计算岩土体在当前黏聚力均值 m_c 和内摩擦角均值 m_φ 、标准差 σ_c 和 σ_φ 条件下的可靠度 β_0 ;

(2) 保持 m_c 、 m_φ 、 σ_φ 不变,调整黏聚力 c 的标准差 σ_c 至 σ_{c1} ,使岩土体的可靠度达到设计要求的可靠度 β_D ;

(3) 保持 σ_{c1} 、 m_φ 、 σ_φ 不变,调整 m_c 至 m_{c1} ,使可靠度恢复为 β_0 ;

(4) 计算黏聚力分项系数 $\gamma_c = m_c / m_{c1}$;

(5) 将步骤(1)~(4)中调整的参数更换为内摩擦角的对应值,计算内摩擦角分项系数 $\gamma_\varphi = m_\varphi / m_{\varphi1}$;

步骤(2)标准差的调整使 β_0 增加到了 β_D ,步骤(3)均值的调整又使 β_D 恢复到了 β_0 ,这两步表明标准差的调整与均值的调整等价,此即上文所说通过均值的调整,可以降低以标准差表征的参数变异性带来的不确定性影响,这也正是分项系数设计所要达到的效果。

4 算例说明

4.1 算例

下面采用 Hoek^[12]曾研究的一个岩质边坡算例(如图3所示)来说明强度分项系数标准差反馈标定法的实现过程。

该边坡安全系数可按式计算:

$$F = \frac{cA + [W(\cos\psi_p - \alpha \sin\psi_p) - U] \tan\varphi}{W(\sin\psi_p + \alpha \cos\psi_p)} \quad (11)$$

其中:

$$A = \frac{H}{\sin\psi_p} \quad (12)$$

$$W = \frac{\gamma_r H^2}{2} (\cot\psi_p - \cot\psi_f) \quad (13)$$

$$U = \frac{\gamma_w z_w^2}{4 \sin\psi_p} \quad (14)$$

式中: H 为边坡垂直高度; W 为滑坡体重量; A 为滑面作用面积; U 为地下水压力; z_w 为地下水深; α 为地震加速度系数; γ_r 为岩石的重度; γ_w 为水的重度; ψ_f 为坡面倾角; ψ_p 为节理面倾角; F 为安全系数。

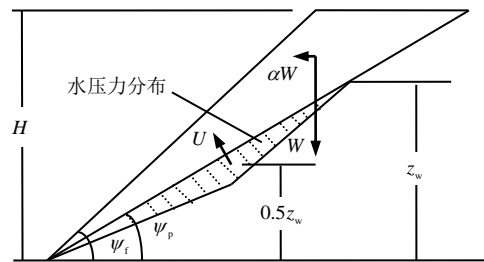


图3 算例示意图

Fig.3 Illustration of the case study

极限状态方程可表示为

$$F - 1 = 0 \quad (15)$$

可靠度指标采用 FORM 法计算,计算公式如下:

$$\beta = \min_{x \in \Omega} \sqrt{(x - m)^T C^{-1} (x - m)} \quad (16)$$

式中: x 为一组随机变量构成的向量; m 为它们的均值; C 为协方差矩阵; Ω 为极限状态面上的随机变量构成的集合。

4.2 输入参数

算例输入的确定性参数如表1所示。随机参数分布形式为对数正态分布,为计算简便,暂不考虑强度参数间的相关性。为观察标准差反馈标定法的效果,对于均值相同的一组参数,设计不同的标准差,分别进行反馈标定,考察所得分项系数对于标准差的反映情况。随机参数设计见表2中的2~4列(从左至右,下同),其中。暂定目标可靠度 $\beta_D = 3$,实际使用过程中可根据相关规范取值,本例仅用于说明标准差反馈标定法的效果。

表1 算例确定性输入参数

Table 1 Input deterministic parameters

边坡垂直高度	坡面倾角 ψ_f	节理面倾角 ψ_p	岩石重度 γ_r	水重度 γ_w	地下水深 z_w	地震加速度系数 α
H / m	$/(^\circ)$	$/(^\circ)$	$/(kN/m^3)$	$/(kN/m^3)$	$/m$	
60	50	35	26	10	30	0.08

4.3 计算结果讨论

算例计算结果见表 2 所示。下面分别讨论强度参数标准差与分项系数的关系，以及标准差反馈标定法与验算点校核法的对比情况。

4.3.1 强度参数标准差与分项系数的关系

分项系数的主要作用是为了确定材料强度参数设计值，承担着反映材料参数不确定性的任务，而材料参数的不确定性则由参数的标准差来衡量，标准差越大，意味着参数的离散性越大，反映其不确定性的分项系数也越大。保持强度参数均值和其中一项的标准差不变，考察另一参数的分项系数随该参数标准差的变化情况，根据表 2 的计算结果，分别绘制分项系数随内摩擦系数标准差和黏聚力标准差变化的曲线。由图 4 可知，当黏聚力标准差保持不变时，内摩擦系数的分项系数随标准差的增加而增加。同样，由图 5 可知，当内摩擦系数标准差保持不变时，黏聚力的分项系数也是随标准差的增加而增加。显然，由标准差反馈标定法得到的分项系数可以反映参数的离散性。

值得注意的是，当某一参数的标准差保持不变时，另一参数的标准差变化会影响该参数分项系数的大小。以表 2 中的计算结果为例，考察黏聚力标

准差为 21 kPa 的情况，随着内摩擦系数标准差的减小，反馈得到的黏聚力分项系数也随之减少。由此可见，标准差反馈标定法得到的分项系数所反映的是强度参数组成的随机向量整体的离散性。

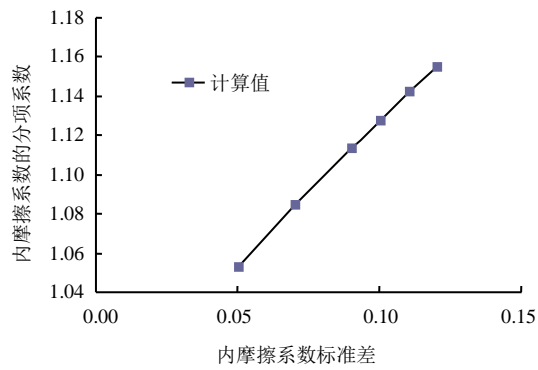
4.3.2 标准差反馈标定法与验算点校核法的对比

对上节所述 20 组参数使用验算点校核法计算分项系数，所得结果如表 2 所示。由该表可知，验算点校核法得到的分项系数比标准差反馈标定法得到的分项系数要大，部分差别接近 50%。将强度参数标准值除以验算点分项系数得到设计强度参数后，由设计强度参数计算得到的安全系数均为 1，这就意味着视所有边坡均处于极限平衡状态，边坡不提供多余的抗力。这种处理在某些情况下可能夸大参数变异性所带来的不确定性影响，导致工程治理费用的增加。出现夸大的原因在于，验算点法校核分项系数时，没有将目标可靠度纳入计算。Baecher 等^[3]虽然也提到了要根据目标可靠度校核分项系数，但给出的校核公式也不包含目标可靠度指标。这意味着验算点分项系数仅与边坡当前可靠度有关，而与设计要求无关。标准差反馈标定法因为在校核过程中引进了目标可靠度，避开了上述问题。

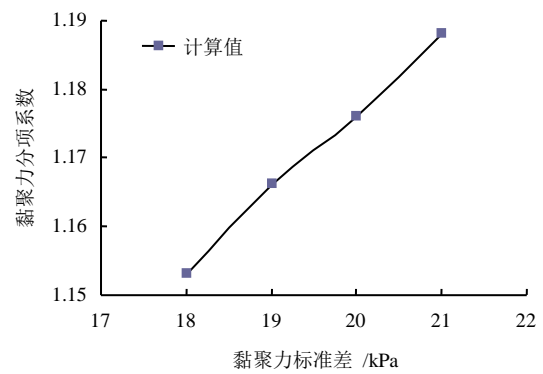
表 2 强度分项系数标准差反馈标定计算结果
Table 2 Partial factors calibrated by standard deviation feedback method

序号	标准差		当前可靠度 β_0	标准差调整		均值调整		分项系数		均值调整后的安全系数	均值调整后的可靠度	验算点强度参数		验算点法分项系数		设计强度参数		验算点分项系数/反馈标定分项系数/%	
	$\tan\varphi$	c/kPa		$\tan\varphi$	c/kPa	$\tan\varphi$	c/kPa	$\tan\varphi$	c			$\tan\varphi$	c/kPa	$\tan\varphi$	c	$\tan\varphi$	c/kPa	$\tan\varphi$	c
1	0.10	20	1.994	0.024	7.73	0.623	86.0	1.124	1.163	1.125	0.737	0.571	73.42	1.225	1.362	0.571	73.42	105	121
2	0.11	20	1.897	0.024	5.40	0.615	85.0	1.138	1.176	1.111	0.596	0.562	75.01	1.246	1.333	0.562	75.01	106	117
3	0.12	20	1.807	0.024	1.76	0.607	84.3	1.153	1.186	1.099	0.479	0.553	76.46	1.266	1.308	0.553	76.46	107	113
4	0.10	21	1.936	0.010	7.73	0.621	85.1	1.127	1.175	1.118	0.656	0.576	72.61	1.215	1.377	0.576	72.61	104	123
5	0.12	21	1.759	0.010	1.76	0.606	83.6	1.155	1.196	1.094	0.426	0.558	75.64	1.254	1.322	0.558	75.64	105	114
6	0.11	21	1.844	0.010	5.40	0.613	84.2	1.142	1.188	1.105	0.527	0.560	75.38	1.251	1.327	0.560	75.38	106	116
7	0.09	20	2.099	0.024	9.75	0.632	87.2	1.108	1.147	1.141	0.906	0.582	71.69	1.203	1.395	0.582	71.69	105	126
8	0.09	21	2.035	0.010	9.75	0.629	86.3	1.113	1.159	1.133	0.808	0.587	70.89	1.193	1.411	0.587	70.89	103	127
9	0.07	20	2.338	0.024	13.40	0.651	90.5	1.075	1.105	1.179	1.352	0.606	67.72	1.156	1.477	0.606	67.72	105	137
10	0.07	21	2.257	0.010	13.40	0.646	89.4	1.084	1.119	1.168	1.200	0.607	67.47	1.153	1.482	0.607	67.47	103	137
11	0.07	19	2.420	0.033	13.40	0.656	91.8	1.067	1.089	1.192	1.525	0.601	68.50	1.165	1.460	0.601	68.50	107	137
12	0.07	18	2.510	0.040	13.40	0.661	93.0	1.059	1.075	1.204	1.703	0.602	68.27	1.162	1.465	0.602	68.27	108	138
13	0.05	21	2.512	0.010	16.60	0.665	93.1	1.053	1.074	1.209	1.726	0.638	62.36	1.097	1.604	0.638	62.36	102	152
14	0.05	20	2.612	0.024	16.60	0.672	94.5	1.042	1.058	1.224	1.959	0.639	62.16	1.095	1.609	0.639	62.16	104	154
15	0.05	19	2.717	0.033	16.60	0.679	96.0	1.031	1.042	1.240	2.216	0.630	63.65	1.111	1.571	0.630	63.65	107	152
16	0.05	18	2.830	0.040	16.60	0.687	97.6	1.019	1.025	1.257	2.517	0.631	63.46	1.109	1.576	0.631	63.46	108	155
17	0.09	19	2.167	0.033	9.75	0.635	88.2	1.102	1.134	1.150	1.014	0.577	72.53	1.214	1.379	0.577	72.53	107	125
18	0.09	18	2.238	0.040	9.75	0.639	89.2	1.095	1.121	1.160	1.137	0.578	72.30	1.211	1.383	0.578	72.30	108	126
19	0.11	19	1.953	0.033	5.40	0.617	85.8	1.135	1.166	1.118	0.669	0.557	75.87	1.257	1.318	0.557	75.87	108	116
20	0.11	18	2.015	0.040	5.40	0.620	86.7	1.129	1.153	1.126	0.757	0.558	75.66	1.255	1.322	0.558	75.66	109	117

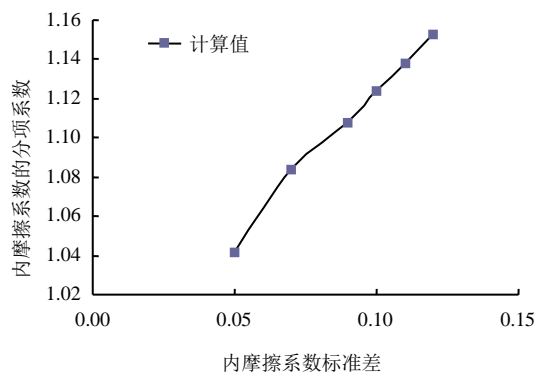
注：1~20 中 $\tan\varphi$ 均值均为 0.7， c 均值均为 100，目标可靠度 β_0 均为 3，验算点法安全系数均为 1。



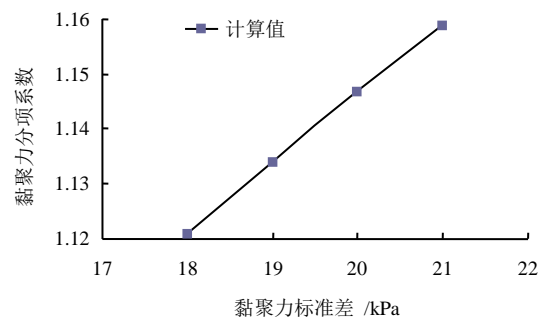
(a) 黏聚力标准差为 21 kPa



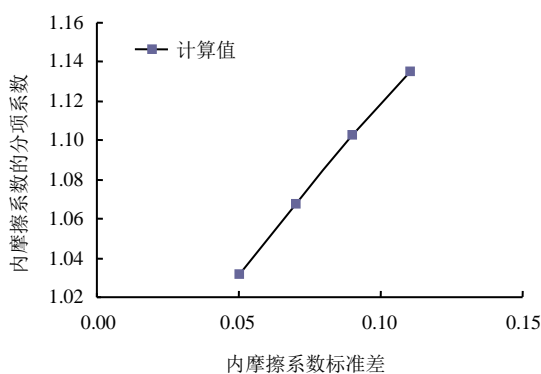
(a) 内摩擦系数标准差为 0.11



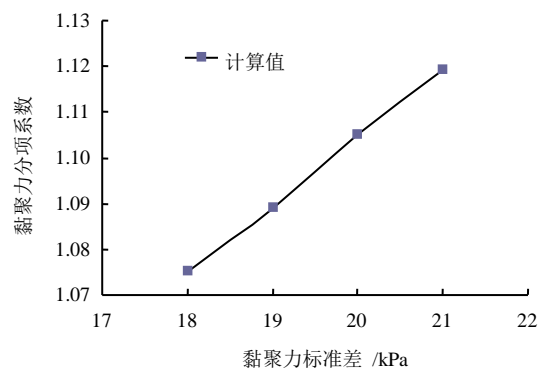
(b) 黏聚力标准差为 20 kPa



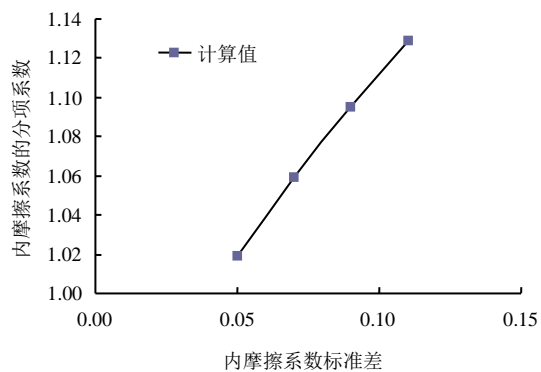
(b) 内摩擦系数标准差为 0.09



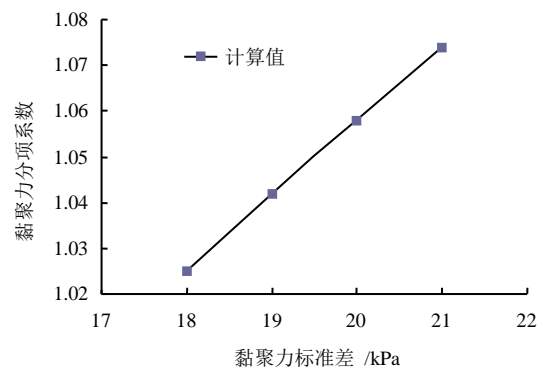
(c) 黏聚力标准差为 19 kPa



(c) 内摩擦系数标准差为 0.07



(d) 黏聚力标准差为 18 kPa



(d) 内摩擦系数标准差为 0.05

图 4 节理面内摩擦系数标准差与分项系数的关系
Fig4 Relationships between the frictions and partial factors

图 5 节理面黏聚力标准差与分项系数的关系
Fig.5 Relationships between the cohesions and partial factors

5 结论与展望

(1) 提出了岩土材料强度参数分项系数的标准差反馈标定法, 其思想内涵是: 寻找与参数变异性等效的均值调整, 通过均值的调整, 降低参数变异性带来的不确定性影响。

(2) 建立了标准差反馈标定法的工作步骤, 并通过算例说明了该方法的实现过程。算例结果表明, 当某一强度参数标准差保持不变时, 另一强度参数的分项系数随其标准差的增加而增加, 说明由标准差反馈标定法得到的分项系数可以反映参数的离散性。

(3) 将标准差反馈标定法的风项系数与验算点校核法得到的风项系数进行了对比分析, 指出标准差反馈标定法与验算点校核方法的差别在于是否考虑目标可靠度, 前者的标定方法更合理。

(4) 虽然标准差反馈标定法的理论依据较为充分, 但具体工作方面仍然存在一些问题。比如, 所得到的风项系数没有考虑参数敏感性的问题, 也没有考虑强度参数空间变异性的影响。如果希望通过该方法得到可作为规范标准参考的风项系数, 还需要做进一步的深入研究。

参考文献

- [1] 陈立宏, 王玉杰, 陈祖煜, 等. 国外岩土工程极限状态设计方法的进展[C]//水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 290—313.
CHEN Li-hong, WANG Yu-jie, CHEN Zu-yu, et al. Progress of limit state design method in geotechnical engineering abroad[C]//Proceedings of the Symposium on Risk Analysis and Reliability Based Design for Water Resources and Hydropower Projects. Beijing: China Water Power Press, 2010: 290—313.
- [2] GULVANESEAN H, CALGARO J A, HOLICKÝ M. Eurocode—Basis of structural design[J]. **Civil Engineering**, 1990, 144(6): 8—13.
- [3] BAECHEER G B, CHRISTIAN J T. Reliability and statistics in geotechnical engineering[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [4] 陈文, 陈立宏, 孙平. 岩土材料性能风项系数的标定[C]//水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 314—335.
CHEN Wen, CHEN Li-hong, SUN Ping. Calibration of partial factors of shear strength parameters of geotechnical materials[C]//Proceedings of the Symposium on Risk Analysis and Reliability Based Design for Water Resources and Hydropower Projects. Beijing: China Water Power Press, 2010: 314—335.
- [5] 陈祖煜, 陈立宏, 王玉杰, 等. 滑坡和建筑物抗滑稳定分析中的可靠度分析和风项系数设计方法[C]//水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展, 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 27—39.
CHEN Zu-yu, CHEN Li-hong, WANG Yu-jie, et al. Reliability analysis and partial factor design methods for slope stability[C]//Proceedings of the Symposium on Risk Analysis and Reliability Based Design for Water Resources and Hydropower Projects. Beijing: China Water Power Press, 2010: 27—39.
- [6] 中国电力企业联合会. GB 50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
China Electricity Council. GB50199—94 Unified design standard for reliability of hydraulic engineering structures[S]. Beijing: China Planning Press, 1994.
- [7] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Risk assessment in geotechnical engineering[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [8] 吴振君, 王水林, 汤华, 等. 边坡可靠度分析的一种新的优化求解方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 713—718.
WU Zhen-jun, WANG Shui-lin, TANG Hua, et al. A new optimization approach for slope reliability analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 713—718.
- [9] LOW B K, TANGW H. Efficient reliability evaluation using spreadsheet[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1997, 123(7): 749—752.
- [10] KULHAWY F H. Improving geotechnical uncertainty evaluation in reliability-based design[M]//Engineering Geology for Society and Territory. New York: Springer International Publishing, 2015: 343—346.
- [11] ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. A new interpretation for the polyaxial strength effect of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47: 496—501.
- [12] HOEK E. Practical rock engineering [EB/OL]. <https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner/books>, 2016-01-10.