

文章编号: 1673-5196(2021)02-0127-05

土体参数变异性对框架锚杆加固 黄土边坡可靠度影响分析

李 忠^{1,2}, 丁盛环^{1,2}, 叶帅华^{*1,2}

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了研究框架锚杆加固黄土边坡土体参数(黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ)变异性对边坡可靠指标的影响,以极限平衡理论为基础,依托边坡工程实例,利用 GeoStudio 2012 有限元软件,建立加固边坡计算模型,结合 Monte Carlo 试验模拟完成以上分析过程. 结果表明:当固定其中两个土体参数的变异系数,改变另一个参数的变异系数时, φ 的变异系数对边坡可靠指标的影响最大, γ 的变异系数对边坡可靠指标的影响最小;当固定其中一个参数的变异系数,使另外两个参数的变异系数同时变化时,内摩擦角 φ 和重度 γ 的变异系数同时变化时,对边坡可靠指标的影响最大,黏聚力 c 和重度 γ 的变异系数同时变化时对边坡可靠指标的影响最小.

关键词: 框架锚杆; 黄土边坡; 变异系数; 可靠指标

中图分类号: TU431 **文献标志码:** A

Effect of soil parameter uncertainty of loess slope reinforced by frame anchor on reliability

LI Zhong^{1,2}, DING Sheng-huan^{1,2}, YE Shuai-hua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the effect of soil parameters such as cohesion force (c), internal friction angle (φ) and density of the soil (γ) on the reliability index of loess slope strengthened by frame anchors, based on the limit equilibrium theory, relying on the slope engineering example, using GeoStudio 2012 finite element software, the calculation model of reinforced slope is established, and the above analysis process is completed by Monte Carlo test simulation. The results show that when the coefficient of variation of two parameters is fixed and the coefficient of variation of the other parameter is changed, the coefficient of variation of φ has the greatest influence on the reliability index of the slope, and the coefficient of variation of γ has the least influence on the reliability index of the slope. When fixing the coefficient of variation of one of the parameters and the coefficient of variation of the other two parameters change simultaneously, the coefficient of variation of the internal friction angle φ and the density of the soil γ simultaneously has the greatest influence on the reliability index of the slope. The coefficient of cohesion force c and density of the soil γ have the least influence on the reliability index of the slope.

Key words: frame anchor; loess slope; coefficient of variation; reliability index

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51508256), 甘肃省建设科技攻关计划项目(JK2015-5), 兰州市科技发展计划项目(2015-3-131)

通讯作者: 叶帅华(1983-), 男, 河南巩义人, 博士, 教授.

Email: yeshuaihua@163.com

框架锚杆支护结构作为新型的柔性支挡结构在支护黄土边坡上广泛使用. 周勇等^[1]对支护黄土边坡进行支护结构内力监测及坡体位移监测, 并通过数值模拟对比分析; 王邓崑等^[2]根据极限平衡理论和条分法, 将锚杆预应力的作用转化为了附加应力的作用; 朱彦鹏等^[3]以相似理论为基础, 通过室内模

型试验的方法,研究黄土地区框架预应力锚杆支护边坡的土压力分布规律;极限平衡法作为传统的计算方法,在工程实践中广泛应用,但是极限平衡法在计算边坡的稳定性时,通常计算得出一个确定的安全系数,不考虑影响边坡稳定性因素的随机性和变异性.在实际工程中,一个有很高安全系数的边坡可能比一个安全系数较低的边坡更容易失稳.为了更准确地分析边坡的稳定性问题,采用可靠度分析方法,分析参数的变异性对边坡稳定性的影响^[4].

目前已有学者就土体空间变异性对边坡可靠度的影响进行了研究.牛草原等^[5]通过蒙特卡洛模拟对某均质边坡进行失效概率计算,并探讨了土体抗剪强度参数(c, φ)对边坡失效概率的影响;张文生等^[6]基于 Monte Carlo 模拟分析土体强度参数(c, φ)变异系数与边坡稳定可靠指标 β 的非线性映射关系;李典庆等^[7]采用 Karhunen-Loeve 级数展开方法表征土体抗剪强度参数空间变异性,并以黏土边坡为例研究土体参数(c, φ)的变异性对边坡失效概率的影响;桂勇等^[8]研究了因边坡强度参数统计特性考虑不全面,使得边坡可靠性指标计算值偏小问题,并以全风化花岗岩土质高边坡为工程背景,分析了土性参数(c, φ)与可靠指标的关系;韩宪军等^[9]结合可靠度分析方法中的 Monte Carlo 法,通过 MATLAB 来实现土性参数中黏聚力系数 c 和内摩擦角 φ 对边坡可靠度指标 β 的影响.

不难看出,现有的研究中针对框架锚杆加固黄土边坡土体参数变异性对边坡可靠度的研究非常有限,而且只考虑土体参数(c, φ)的变异性对边坡可靠指标的影响,没有考虑土体重度 γ 的变异系数对边坡可靠指标的影响,综合考虑黄土重度 γ 的变异性对可靠指标的影响有待进一步的研究.

本次研究以框架锚杆加固某黄土边坡为工程背景,借助有限元软件 GeoStudio 中 Monte Carlo 模拟,详细分析黄土土体参数(c, φ, γ)单参数的变异性以及双参数的变异性对框架锚杆加固边坡可靠指标的影响,为黄土地区的边坡设计提供一定的理论指导.

1 边坡稳定性评估方式

可靠性指标是评估边坡是否稳定的一种方式.结构的可靠度用来表示结构在规定的条件下和规定的时间内完成预定功能的概率^[10].

结构的抗力表示为 R ,可变荷载表示为 $S(t)$,结构 t 时刻的功能函数可以表示为 $Z(t) = R - S(t)$,则在使用期 T 内结构的可靠度为

$$P_s = P\{Z(t) > 0, t \in [0, T]\} = P\{\min_{0 \leq t \leq T} [Z(t) > 0]\} = P\{\min_{0 \leq t \leq T} [R - S(t)] > 0\} = P\{R - S_T > 0\}$$

设结构功能函数 Z 的概率密度函数为 $f_Z(z)$,结构的失效概率可以表示为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz$$

一般情况下 Z 的分布取决于其包含的随机变量概率分布和功能函数的形式.假定 Z 服从正态分布,均值为 μ_Z ,标准差为 σ_Z ,失效概率为

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right] dz$$

作变换 $z = \mu_Z + \sigma_Z t$,则 $dz = \sigma_Z dt$,当 $z = 0$ 时 $t = -\mu_Z/\sigma_Z$; $z \rightarrow -\infty$ 时 $t \rightarrow -\infty$.所以上式可以表示为

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta),$$

其中可靠指标: $\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$

2 可靠度分析的蒙特卡洛法

一般的工程 N 为 5 000~10 000 次就可以满足工程评价的精度要求^[9],本次采用蒙特卡洛 6 000 次试验进行模拟计算.蒙特卡洛的本质是一种数值模拟过程,用这种方法进行失效概率计算时,需要对随机变量产生大量的样本值,然后对随机样本值进行组合,再去判断每种组合时构成的点最后落入可靠域还是失效域.计算 N 次模拟中结构失效的次数 N_f ,当随机变量的样本容量值非常大时,失效概率估计值趋于其精确结果 $\hat{P}_f = P_f$.

$$\hat{P}_f = N_f / N$$

3 工程实例分析

3.1 工程概况

甘肃省天水某住宅小区边坡支护.边坡高度为 12 m,边坡重要性系数为 1.0,边坡与水平面夹角 80° ,安全系数取 1.3,边坡土体参数见表 1,锚杆设计结果见表 2.

表 1 边坡土体参数
Tab. 1 Slope soil parameters

参数	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c /$ kPa	$\varphi /$ ($^\circ$)	$q_s /$ kPa
平均值	16.4	18.0	25.0	50.0

表 2 锚杆设计结果

Tab. 2 Design result of anchors

锚杆 层数	水平 间距 /m	竖向 间距 /m	锚固 体直 径/mm	钢筋 直径 /mm	自由 段长 度/m	锚固 段长 度/m	锚杆 总长 度/m
1	2.0	2.0	150	28	6	10	16
2	2.0	2.0	150	28	5	10	15
3	2.0	2.0	150	28	5	9	14
4	2.0	2.0	150	28	4	8	12
5	2.0	2.0	150	28	4	7	11
6	2.0	2.0	150	28	4	5	9

本设计遵循“安全可靠、技术可行、经济合理”的原则,根据黄土边坡支护的优化设计方案,选择框架锚杆支护结构,既安全又经济. 边坡支护剖面图如图 1 所示.

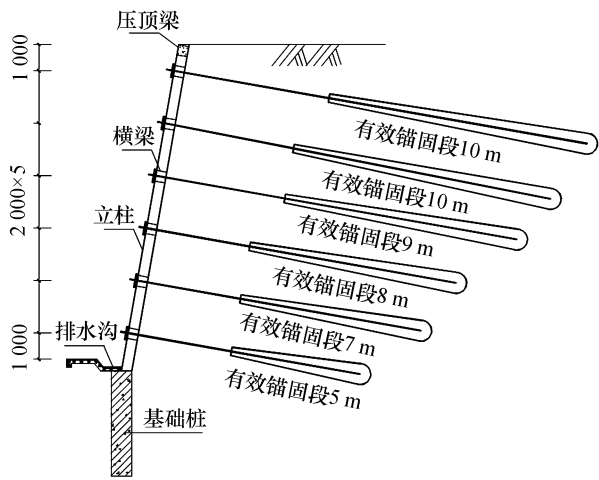


图 1 边坡支护剖面图

Fig. 1 Slope support profile

3.2 SLOPE/W 模块介绍

SLOPE/W 作为 GeoStudio 中的一个边坡稳定性分析模块,不仅适用于某一特定的问题,还能够用来分析预应力锚杆、土钉等结构加固土体的稳定性. SLOPE/W 包含一个广泛通用的运算法则用于概率分析,所有的输入变量都能被指定一种概率分布,然后利用 Monte Carlo 方法计算出安全系数的概率分布. 知道了安全系数的概率分布,可靠指标就能确定. 王维娜等^[11]利用 GeoStudio 软件对影响边坡稳定性的因素进行分析;王召磊等^[12]主要利用 GeoStudio 中的 SIGMA/W 模块和 SLOPE/W 模块,采用极限平衡法、有限元滑面应力法及有限元强度折减法对预应力锚索复合土钉墙进行基坑内部整体稳定性对比,结果发现三种方法安全系数比较接近.

3.3 分析类型的选取

GeoStudio 2012 中所提供的分析类型主要有: Bishop 法(满足力矩平衡,不满足静力平衡)、Janbu

法(不满足力矩平衡,满足静力平衡)、Morgenstern-Price 法(满足力矩平衡,满足静平衡)、Lowe-Karafiath 法(不满足力矩平衡,满足静力平衡)等,其中 Morgenstern-Price 还有以下的特点:

- 1) 考虑条间剪力和正应力;
- 2) 考虑了可供选择的多种条间力函数.

因此本文在数值模拟时选用的分析类型是 Morgenstern-Price 法.

Morgenstern-Price 法中条间剪应力可以用一个方程来表示:

$$X = E\lambda f(x)$$

式中: $f(x)$ 为函数; λ 为函数所用的百分数; E 为条间法向力; X 为条间切向力.

3.4 模型的建立

建立框架锚杆支护边坡有限元模型来分析土体参数变异性对黄土边坡可靠度的影响. 条间力函数选用半正弦函数, 滑移方向选择从左到右, 滑移面设定为进入和退出, 土体和锚杆的基本参数按表 1 和表 2 设置. SLOPE/W 分析中所有的问题都是单位厚度的平面问题, 因此所有的锚杆力都应该被分解成单位厚度的力. 在设置锚杆独立安全系数时选择否, 此种情况将直接采用输入的锚杆最大容许力进行计算, 而不考虑整体安全系数的折减.

模型的 X 轴最大设置 44 m, Y 轴最大设置 18 m, 模型计算结果如图 2 所示.

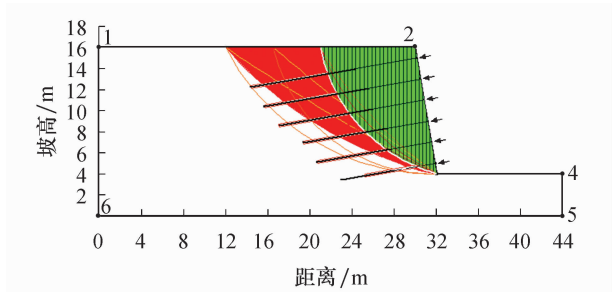


图 2 有限元模型计算结果图

Fig. 2 The result of finite element model calculation

4 数值计算结果分析

土体的主要物理力学指标: 土体重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ . 参考大量的土工试验得出, γ 、 c 、 φ 接近于正态分布. 文献[13]对甘肃天水等黄土地区 c 的变异系数 δ_c 、 φ 的变异系数 δ_φ 进行统计. 本次研究取统计值的中间区段, δ_c 取 0.1~0.4, δ_φ 取 0.10~0.18, γ 的变异系数 δ_γ 取 0.02~0.1^[14].

4.1 土体参数单一变量对可靠指标的影响

为了得到土体参数 γ 、 c 、 φ 的变异性对黄土边

坡稳定性的影响,模拟时先固定其中 2 个参数的变异系数,通过改变另 1 个参数的变异系数值来研究其对可靠指标的影响. 分析结果如图 3~5 所示. 图 3 中取 φ 的变异系数 $\delta_\varphi=0.1$, γ 的变异系数由 0.02 递增到 0.1; 图 4 中取 $\delta_c=0.1$, φ 的变异系数由 0.1 递增到 0.18; 图 5 中取 $\delta_\gamma=0.1$, c 的变异系数由 0.1 递增到 0.4.

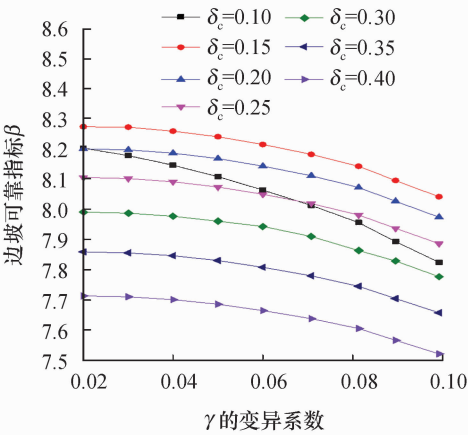


图 3 δ_γ 的变化对边坡可靠指标的影响($\delta_\varphi=0.1$)
Fig. 3 The influence of δ_γ change on the reliability index of slope ($\delta_\varphi=0.1$)

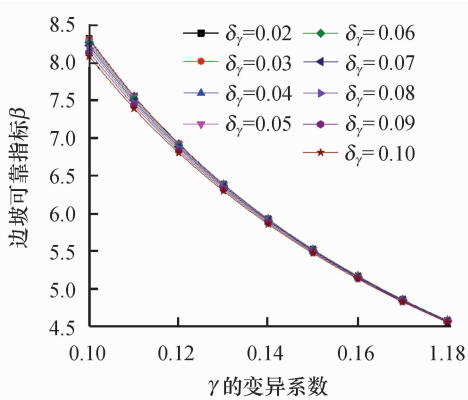


图 4 δ_φ 的变化对边坡可靠指标的影响($\delta_c=0.1$)
Fig. 4 The influence of δ_φ change on the reliability index of slope ($\delta_c=0.1$)

从图 3 可以看出 c 的变异系数和 φ 的变异系数为固定值时,随着 γ 的变异系数增大,边坡可靠指标减小. c 的变异系数为 0.15, φ 的变异系数为 0.1 时边坡的可靠性指标值最大. 随着 γ 的变异系数增大,边坡可靠性指标减少了 4.6%. c 的变异系数为 0.4 和 φ 的变异系数为 0.1 时,边坡的可靠性指标最小,边坡可靠性指标减少了 2.5%.

由图 4 可以得出随着 φ 的变异系数增大,边坡可靠性指标减小,且各曲线的变化接近一致. 边坡可靠性指标最大值为 8.321 9,最小值为 4.573 7,减少

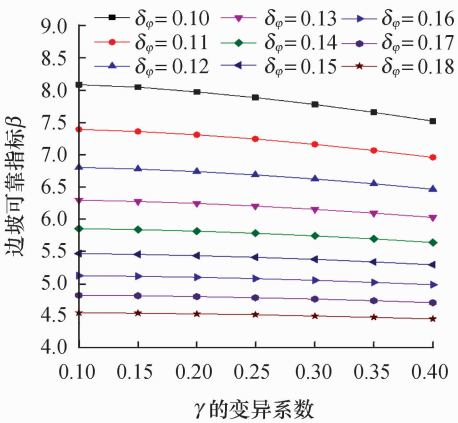


图 5 δ_c 的变化对边坡可靠指标的影响($\delta_\gamma=0.1$)
Fig. 5 The influence of δ_c change on the reliability index of slope ($\delta_\gamma=0.1$)

了 45.04%. 由此可得在研究黄土边坡可靠度的影响因素时,随机变量 φ 的变异性的影响是不容忽视的.

由图 5 可以看出,随着 c 的变异系数增大,边坡可靠性指标逐渐减小. γ 的变异系数为 0.1 且 φ 的变异系数为 0.1 时边坡的可靠性指标最大; γ 的变异系数为 0.1, φ 的变异系数为 0.18 时边坡的可靠性指标最小; φ 的变异系数为 0.1 时,边坡的可靠性指标从 8.086 2 减小到 7.521 7.

比较图 3~5 可得, φ 的变异系数对边坡可靠指标的影响 $> c$ 的变异系数对边坡可靠指标的影响 $> \gamma$ 的变异系数对边坡可靠指标的影响.

4.2 土体参数双变量对可靠指标的影响

在实际情况中,土体参数的变异性随空间变化而变化,为了更接近实际状态,研究土体 2 个参数的变异系数同时变化对边坡可靠指标的影响是非常有必要的.

分析时先固定其中 1 个参数的变异系数,使其为一定值,然后改变其余 2 个参数的变异系数,使其同时增大. 分析结果见表 3~5.

表 3 不同变异系数可靠度计算结果($\delta_\varphi=0.1$)
Tab. 3 Calculation results of different coefficient of variation reliability ($\delta_\varphi=0.1$)

变异系数	边坡可靠指标 β	标准偏差
$\delta_\gamma=0.02, \delta_c=0.10$	8.201 2	0.201 6
$\delta_\gamma=0.03, \delta_c=0.15$	8.093 1	0.202 9
$\delta_\gamma=0.04, \delta_c=0.20$	7.960 3	0.204 9
$\delta_\gamma=0.05, \delta_c=0.25$	7.806 3	0.207 8
$\delta_\gamma=0.06, \delta_c=0.30$	7.635 3	0.211 4
$\delta_\gamma=0.07, \delta_c=0.35$	7.450 9	0.215 7
$\delta_\gamma=0.08, \delta_c=0.40$	7.256 7	0.220 8

由表 3 可知,固定内摩擦角 φ 的变异系数为 0.1 时,重度 γ 的变异系数由 0.02 增大到 0.08,同时黏聚力 c 的变异系数由 0.1 增大到 0.4 时,边坡的可靠指标逐渐减小,但是可靠指标减小的幅度并不是很大,由 8.201 2 减小到 7.256 7,减少了 11.52%。由此可以看出,土体重度和黏聚力的变异系数同时增大时对边坡可靠指标的影响较小。

表 4 不同变异系数可靠度计算结果($\delta_\gamma=0.1$)
Tab. 4 Calculation results of different coefficient of variation reliability ($\delta_\gamma=0.1$)

变异系数	边坡可靠指标 β	标准偏差
$\delta_\varphi=0.10, \delta_c=0.10$	7.823 9	0.207 8
$\delta_\varphi=0.11, \delta_c=0.15$	7.114 7	0.228 5
$\delta_\varphi=0.12, \delta_c=0.20$	6.511 2	0.249 8
$\delta_\varphi=0.13, \delta_c=0.25$	5.993 7	0.271 6
$\delta_\varphi=0.14, \delta_c=0.30$	5.546 3	0.293 8
$\delta_\varphi=0.15, \delta_c=0.35$	5.156 7	0.316 4
$\delta_\varphi=0.16, \delta_c=0.40$	4.814 8	0.339 4

表 5 不同变异系数可靠度计算结果($\delta_c=0.1$)
Tab. 5 Calculation results of different coefficient of variation reliability ($\delta_c=0.1$)

变异系数	边坡可靠指标 β	标准偏差
$\delta_\varphi=0.10, \delta_\gamma=0.02$	8.201 2	0.222 1
$\delta_\varphi=0.11, \delta_\gamma=0.03$	7.443 7	0.222 1
$\delta_\varphi=0.12, \delta_\gamma=0.04$	6.809 5	0.242 9
$\delta_\varphi=0.13, \delta_\gamma=0.05$	6.271 1	0.263 9
$\delta_\varphi=0.14, \delta_\gamma=0.06$	5.808 6	0.285 3
$\delta_\varphi=0.15, \delta_\gamma=0.07$	5.407 0	0.306 8
$\delta_\varphi=0.16, \delta_\gamma=0.08$	5.055 1	0.328 7
$\delta_\varphi=0.17, \delta_\gamma=0.09$	4.744 1	0.350 8
$\delta_\varphi=0.18, \delta_\gamma=0.10$	4.467 4	0.351 1

由表 4 可知,使重度 γ 的变异系数为定值 0.1,随着黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的变异系数的增大,边坡可靠指标逐渐减小,由最大的 7.832 9 减小到 4.814 8,减小了 38.46%。

由表 5 可知,使黏聚力 c 的变异系数为定值 0.1,随着重度 γ 和内摩擦角 φ 的变异系数的增大,边坡可靠指标逐渐减小,由 8.201 2 减小到 4.467 4,减小了 45.52%。

综合表 3~5,内摩擦角 φ 的变异系数和重度 γ 的变异系数同时变化时对边坡可靠度的影响最大,黏聚力 c 的变异系数和重度 γ 的变异系数同时变化时对边坡可靠度的影响最小。

5 结论

以框架锚杆加固某黄土边坡为工程背景,以极

限平衡理论为基础,利用有限元软件 GeoSudio 2012 来研究土体参数 c 、 φ 、 γ 的变异性对边坡可靠指标的影响。针对框架锚杆加固黄土边坡得出如下的结论:

1) 土体参数黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 的变异系数对边坡可靠指标具有较大的影响,随着参数变异系数的增大,边坡可靠性指标逐渐减小。

2) 单参数变化时, φ 的变异系数对边坡可靠指标的影响> c 的变异系数对边坡可靠指标的影响> γ 的变异系数对边坡可靠指标的影响。

3) 双参数变化时, φ 和 γ 的变异系数同时变化时对边坡可靠度的影响> c 和 φ 的变异系数同时变化时对边坡可靠度的影响> c 和 γ 的变异系数同时变化时对边坡可靠度的影响。

参考文献:

[1] 周 勇,王旭日,朱彦鹏,等. 泥岩砂岩互层高边坡监测与数值模拟对比分析 [J]. 兰州理工大学学报,2018,44(1):109-115.

[2] 王邓崑,叶帅华,朱彦鹏. 考虑预应力作用的土钉复合锚杆支护结构的稳定性分析 [J]. 兰州理工大学学报,2015,41(1):122-127.

[3] 朱彦鹏,谷玉朝,李 忠. 框架预应力锚杆支护黄土边坡土压力分布模型试验 [J]. 兰州理工大学学报,2008,34(3):108-112.

[4] 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,2005,26(1):37-40.

[5] 牛草原,王乐华,许晓亮. 土体抗剪强度参数统计特性对边坡可靠性影响研究 [J]. 水利水电技术,2017,48(12):195-198.

[6] 张文生,罗 强,蒋兰潍,等. 基于可靠指标的土体强度参数变异特征及类型划分 [J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(增刊 2):4188-4204.

[7] 李典庆,蒋水华,周创兵,等. 考虑参数空间变异性的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法 [J]. 岩土工程学报,2013,35(8):1413-1422.

[8] 桂 勇,罗嗣海,邓通发. 强度参数统计特性对边坡稳定可靠性的影响 [J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(4):67-76.

[9] 韩宪军,张小强,张红艳. 基于 Monte-Carlo 法的边坡可靠性分析[J]. 河南城建学院学报,2014,23(6):9-12.

[10] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法 [M]. 大连:大连理工大学出版社,2003.

[11] 王维娜,葛文渊. 基于 GeoStudio 软件的边坡稳定性影响因素分析 [J]. 中国公路,2017,42(18):116-117.

[12] 王召磊,杨志银,张 俊. 基于 GeoStudio 的预应力锚索复合土钉墙稳定性分析 [J]. 工业建筑,2011,41(增刊 1):437-440.

[13] 李 萍,黄丽娟,李振江,等. 甘肃黄土高边坡可靠度研究 [J]. 岩土力学,2013,34(3):811-817.

[14] 苏 倩. 架预应力锚杆柔性支护结构的可靠度分析 [D]. 兰州:兰州理工大学,2013.