

重塑黄土直剪试验误差分析及对边坡 可靠性影响评价

胡长明¹, 田明辉¹, 朱武卫², 袁一力¹, 杨 晓², 侯旭辉¹, 柳明亮²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

摘要: 为通过室内快剪试验误差来源分析强度参数的随机特性, 比较了击实法和压样法对抗剪强度离散性的影响, 并在两种制样方式的基础上, 进行再现性试验, 通过对抗剪强度及正应力修正, 采用 Grubbs 准则检验可疑值, 求得了能反映强度参数随机特性的概率分布, 并使用 K-L 级数展开法离散强度参数正态随机场, 分析了两种制样方式对边坡可靠性的影响。研究表明: 压样法制样比击实法获得数据离散性更小, 使用再现性法能够体现强度参数的随机特性; 两种制样方法在边坡稳定性分析时安全系数接近, 由于击实法统计数据的离散性更大, 可靠性分析时比压样法产生更大的失效概率。

关键词: 直剪试验; 再现性法; Grubbs 准则; 随机有限元; 失效概率

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0159-07

Error analysis of remolded loess by direct shear test and evaluation of influence on slope reliability

HU Changming¹, TIAN Minghui¹, ZHU Wuwei²,

YUAN Yili¹, YANG Xiao², HOU Xuhui¹, LIU Mingliang²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Architecture Science Research Institute, Xi'an 710082, China)

Abstract: In order to analyze the random characteristics of strength parameters through the error sources of indoor fast shear test, the influence of compaction method and pressure sample method on the dispersion of shear strength was compared, and on the basis of the two sample preparation methods, the reproducibility test was carried out. Through the correction of shear strength and normal stress, the Grubbs criterion was used to test the suspicious values, and the probability distribution reflecting the random characteristics of strength parameters was obtained. The influence of two sample preparation methods on slope reliability is analyzed by using K-L series expansion method to discrete the normal random field of strength parameters. The results show that the discreteness of the data obtained by pressure sample method is smaller than that obtained by compaction method, and the reproducibility method can reflect the random characteristics of the strength parameters. The safety factors of the two sample preparation methods are close to each other in slope stability analysis. Due to the greater discreteness of statistical data of the compaction method, the failure probability of the pressure sample method is greater than that of the compaction method in reliability analysis.

Key words: direct shear test; reproducibility method; Grubbs criterion; stochastic finite element; failure probability

在岩土工程问题中, 测得真实的抗剪强度参数, 在边坡稳定性分析、土体变形预测中起着十分重要的作用^[1]。测量土体抗剪强度参数的室内试验有三轴试验和直剪试验^[2]。三轴试验能测得较真实的土体抗剪强度, 但是需要较高试验技巧。直剪试验因其操作简单快捷, 应用广泛, 但

由于剪切面应力分布不均匀等原因, 导致试验值较真实土体抗剪强度有一定差别。

抗剪强度参数受多种因素影响。张连杰等^[3]通过试验得出了膨胀土地区抗剪强度与含水量及上覆压力的拟合关系。申春妮等^[4]研究发现非饱和和 Q_2 黄土的黏聚力随吸力线性增加, 内摩擦角

收稿日期: 2023-04-30

修回日期: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(52178302); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JQ-375)

第一作者: 胡长明(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事施工技术与管理方面的教学和科研工作。E-mail: hu_tm@163.com

随吸力变化较小。许健等^[5]发现重塑黄土黏聚力随冻融周期、含水率及干密度变化明显,而内摩擦角无明显规律。Celal等^[6]发现抗剪强度随初始饱和度地降低而增大,且与之间呈非线性关系。Kang等^[7]研究表明,含水率相同时,随着干密度地增大,内摩擦角和黏聚力相对较大;当干密度相同时,随着含水率的增加,黏聚力和内摩擦角相对减小。然而,通过直剪试验研究抗剪强度参数,会因为试验过程不足产生相应的误差。肖景华等^[8]根据垂直压应力与减损应力测量不确定度的大小,给出了抗剪强度曲线拟合的方法。徐志伟等^[9]、刘海波等^[10]考虑到试验过程剪切面积减小的现象,提出了面积修正公式对试验数据进行改进。Feng^[11]基于剪切过程中剪切面积的变化,推导了考虑剪切面积变化的正应力和剪应力计算公式,在根土复合体直剪试验中使用改进计算方法得到的黏聚力高于原计算方法,但对内摩擦角的影响较小。余凯等^[12]通过理论推导认为剪切过程中有效剪切面上的正应力在逐渐减小,并给出了正应力修正方法。邹宗兴等^[13]对岩体直剪试验研究发现控制结构面倾斜的因子爬坡角 α 对试验误差影响较大,偏角 β 的影响可以忽略。然而,在实际试验过程中,单次试验不能避免制样、剪切过程中的偶然性误差,且强度参数为确定值,难以描述土性参数的空间变异性。因此,有必要从试验本身的误差出发,建立表征真实抗剪强度参数的方法。

本文以延安Q₃重塑黄土为研究对象,进行室内快剪试验,分析了两种制样方式对数据离散性的影响,并对剪切过程误差进行修正,使用再现性方法描述土性参数空间变异性,进而分析不同制样方式对边坡可靠性的影响。研究可为提高直剪试验准确性及对边坡可靠性评价提供一定的参考意义。

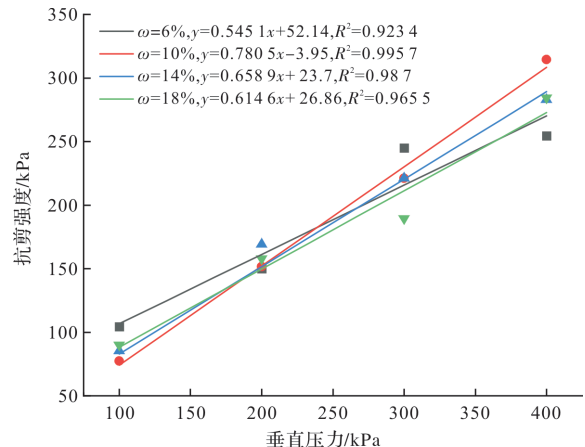
1 误差来源及处理方法

造成直剪试验数据离散性大的本质是土性参数的不确定性(或变异性)。一方面是土的固有变异性。对土体本身来说,由于其不同位置的形过程及方式不同,导致土性参数在空间位置上往往不同。二是系统的不确定性。由于制样偏差,试验误差等使试验结果与实际土性不完全一致^[14]。

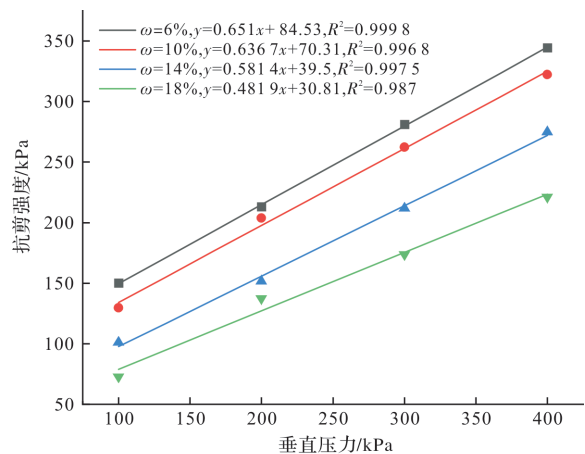
1.1 制样误差分析

对于系统的不确定性,制样方式是造成数据离散性大的主要原因,因此,选择合理的制样方

式是关键。《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[2]中重塑土样的制备方法有两种:击实法和压样法。以干密度 1.65 g/cm^3 试样为例,通过击实法与压样法制取含水率为6%,10%,14%,18%的试样进行直剪试验,拟合的剪应力与含水率关系曲线如图1所示。



(a) 击实法



(b) 压样法

图1 不同制样方式抗剪强度与含水率拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of shear strength and moisture content for different sample preparation methods

已有研究表明^[3,15],垂直压力不变时,随着含水率地增加,抗剪强度会降低。从图1(a)可知,通过击实法制样,各级压力下抗剪强度并不完全随着含水率的增加而降低,导致不同含水率抗剪强度拟合曲线出现交叉。图1(b)中,通过压样法制样,抗剪强度随着含水率的增加出现较好的规律性,四条拟合曲线没有出现交叉现象,并且其拟合度在一定程度上也高于击实法制样。

分析两者产生差异的原因:击实法是称量好所需用土,放入装有环刀的模具内进行分层击实,在一层击实过程中,该层土样各个部分受到的击

实能可能不相同,在分层击实过程中,每层土样所承受的击实能又有一定差别,这导致每层土样可能达不到设计的干密度。使用压样法制样,是将所需土量加入放有环刀的压样器内,以静压力将土样压紧到所需密度,土样各部分受到的压实压力一样,试样能达到较为均匀的干密度,最大程度保证了试验试样的一致性。选择压样法制样能获得更好的试验效果。

1.2 试验误差及修正

在使用击实法和压样法分别制作了干密度为 1.50、1.55、1.60、1.65、1.70、1.75 g/cm³,含水率为 6%、10%、14%、18%,共计 24 种不同干密度不同含水率的试验样品,每组试验制备四个剪切试样,分别在 100、200、300、400 kPa 的垂直压力下进行直剪试验。各干密度下,4 级压力中抗剪强度不符合随含水率增加而降低的变化规律的次数见表 1。

表 1 抗剪强度无规律次数统计

Tab. 1 Statistics of irregular times of shear strength

	干密度/g·cm ⁻³						不符合次数占比/%
	1.5	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	
击实法	2	3	2	3	2	1	54.17
压样法	0	1	0	0	1	0	8.33

由表 1 可知,击实法所得试验数据有高达 54.17% 不符合抗剪强度随含水率增加而降低的变化规律,数据离散性更大,并且压样法也有 8.33% 试验结果也出现了如图 1 所示不符合规律的现象,分析产生此现象的原因是土体的固有变异性导致。尽管压样法能够很大程度上获得更均匀的试样,但是在大量试验的情况下,试样本身变异性累积还是会引起实验数据离散性增加。

对于土的固有变异性,必须对实际土性参数进行统计分析才行。一方面,分析试验过程,随着剪切位移的增加,受剪的有效面积实际是在减小,其上的垂直应力也在一直在变化,可参考文献[12]。在实际计算过程中,把剪切面积和垂直应力看作是不变的,这就导致试验数据不是土体真实的抗剪强度,所以需要进行修正。另一方面,相对每个土样都是不相同的,进行某个含水率及干密度下的一次试验,从而确定其抗剪强度具有很大的不确定性,偶然性误差影响很大,所以有必要进行多次试验来获取具代表性的抗剪强度参数值。

1.2.1 抗剪强度及正应力修正

现有研究中,徐志伟等^[9-10,12]都得出了式(1)基于面积的抗剪强度修正公式。随着剪切过程的进行,有效面积在减小,抗剪强度相比于修正前的在增大。

$$\tau' = \frac{\tau A_0}{A_1} = \frac{CRA_0}{A_1} = CR\beta \quad (1)$$

$$\beta = \frac{A_0}{A_1} = \frac{\pi}{2\arccos \frac{s}{2r} - \sin 2\arccos \frac{s}{2r}} \quad (2)$$

式中: τ 为试样所受剪切应力, kPa; A_0 是初始剪切面积, mm²; A_1 是有效剪切面积, mm²; C 为测力计系数, kPa/0.01 mm; R 为测力计量表读数, 0.01mm; β 称为面积修正系数; r 为试样半径, mm; s 为剪切位移, mm。

对于正应力的修正,徐志伟等^[9-10]与余凯等^[12]看法不同。前者认为正应力同有效面积一样,修正系数也为 β 。后者通过力矩平衡分析,得出了式(3)正应力修正公式。笔者认为这样考虑正应力修正是比较合理的。因此,在试验结束后,应使用公式(1)、(3)分别进行抗剪强度和正应力修正,才能得到土体真实的抗剪强度参数。

$$\sigma' = \sigma_0 + \frac{CRI}{s} \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) = \sigma_0 + CR\beta_0 \quad (3)$$

$$\beta_0 = \frac{I}{s} \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) = \frac{I}{s} (1 - \beta) \quad (4)$$

式中: σ_0 是初始正应力, kPa; I 是剪切盒上部试样高度, 一般为 10 mm; β_0 为正应力修正系数。

1.2.2 再现性方法结果修正

单次试验受偶然性因素影响很大,通过再现性方法进行试验,最后拟合抗剪强度参数是有必要的。该方法具体思路如下:再现性方法,即重复做试验,获得不同干密度和含水率条件下的多组数据,通过排列组合经拟合获得多组抗剪强度参数值。在这个过程中,使用式(1)、式(3)进行修正,并采用 Grubbs 检验法检验可疑数据,确保所得结果能表征抗剪强度参数的随机特性。

(1) 试验结果

以干密度 1.65 g/cm³、含水率 14% 的试样为例,使用两种方法制样,分别在四级垂直压力下进行剪切,每种垂直压力下重复七次试验,对应硬化试样取剪切位移为 4 mm 时的剪应力,对应软化试样取峰值点时的剪应力。使用公式修正后抗剪强度值如表 2、表 3 所示(从小到大排列)。

表2 击实法抗剪强度试验值

Tab.2 Test value of shear strength by compression method

	垂直压力/kPa			
	100	200	300	400
抗剪强度 /kPa	53.01	112.93	191.22	245.29
	81.17	137.95	205.84	251.04
	82.83	140.5	209.91	252.75
	91.11	141.28	211.76	257.86
	98.61	154.39	216.68	262.99
	99.01	157.43	216.88	266.62
	106.65	164.14	221.03	268.77

表3 压样法抗剪强度试验值

Tab.3 Shear strength test value by pressure sample method

	垂直压力/kPa			
	100	200	300	400
抗剪强度 /kPa	69.22	146.78	208.22	239.58
	85.33	147.95	211.46	253.14
	90.26	152.60	212.40	256.00
	91.04	156.94	212.58	260.02
	98.89	163.62	214.29	262.92
	103.39	163.84	221.15	266.38
	105.64	165.31	222.14	270.36

(2) Grubbs 检验法

一组测量数据中, 如果个别数据偏离平均值很远, 那么称这个数据为“可疑值”。用 Grubbs 法判断, 能将“可疑值”从测量数据中剔除。

检验步骤为:

1) 计算平均值 μ 和标准 α 差;

2) 确定可疑值。将最大值和最小值与平均值比较, 选择差值绝对值最大的为可疑值;

3) 计算“可疑值”的 G 值, 公式如下:

$$G = (x_i - \mu) / \sigma \quad (5)$$

4) 定出检测水平 α , 那么置信概率 $p = 1 - \alpha$ (α 越小越严格); 根据 p 值和测量次数 n 查格拉布斯表得到临界值 $G(n)$;

5) 比较 G 和临界值 $G(n)$, 如果 $G > G(n)$, 则判定为异常值;

6) 在一个可疑值剔除后, 连续做格布拉斯检验继续对可疑值剔除至无剔除值。

(3) 检验结果分析

经过检验, 击实法下 100、200、300 kPa 每组数据中最小值为异常值, 400 kPa 下无异常值; 压样法下 100 kPa 和 400 kPa 垂直压力数据最小

值为异常值, 200 kPa 和 300 kPa 垂直压力下数据无异常值。将击实法与压样法实验数据检验前后的剪应力变异系数(组中数据标准差与均值之比)进行对比, 如图 2 所示。进行可疑值检验后, 两种制样方法下的抗剪强度变异系数都变小, 说明使用 Grubbs 检验法是有效的。同时压样法制样检验前后的剪应力变异系数基本比击实法制样的情况下要小, 进一步说明压样法在一定程度上比击实法能获得更加均匀的试样。

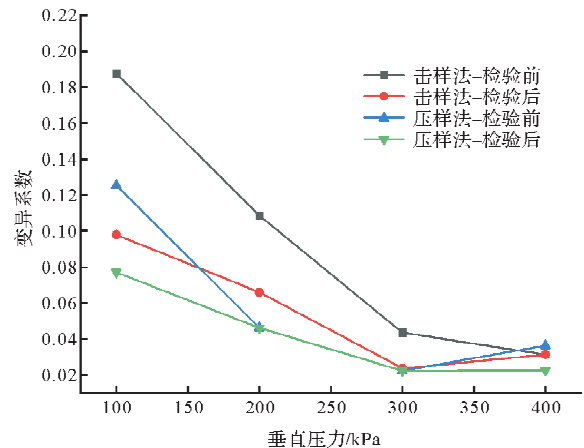
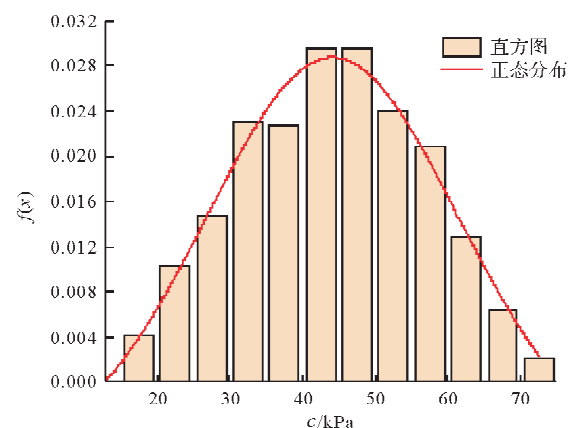


图2 检验前后结果对比

Fig.2 Comparison of results before and after inspection

(4) 拟合求参

对检验后的数据进行排列组合, 使用 Python 脚本应用最小二乘法拟合曲线, 击实法共求得 1 512 组 c 、 φ 值, 压样法求得 1 764 组 c 、 φ 值。 c 和 φ 的直方图及概率密度函数拟合曲线图如图 3、图 4 所示。使用再现性方法, 抗剪强度参数不再是单一值, 在一定干密度和含水率条件下, 经过数据拟合, 其满足正态分布的一组统计数据, 这不仅能考虑到制样及试验过程中各种误差的影响, 也能体现出土体固有的空间变异性, 能更好地应用于工程可靠性分析。



(a) c统计直方图

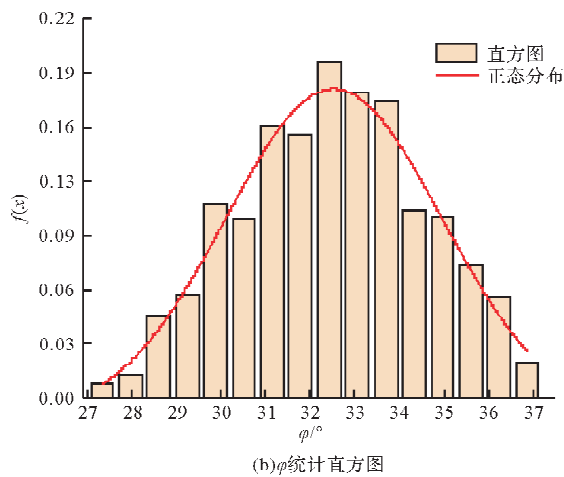
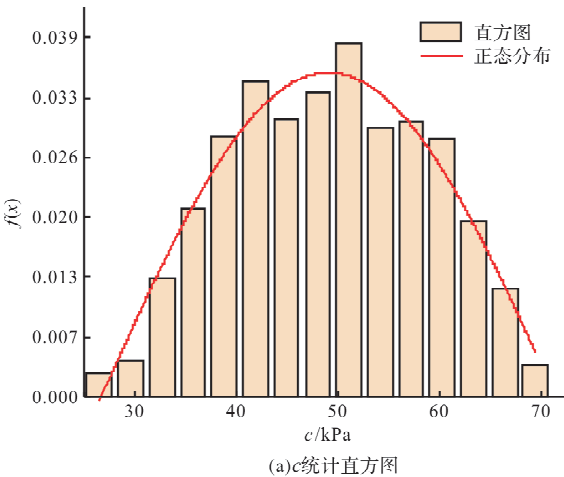
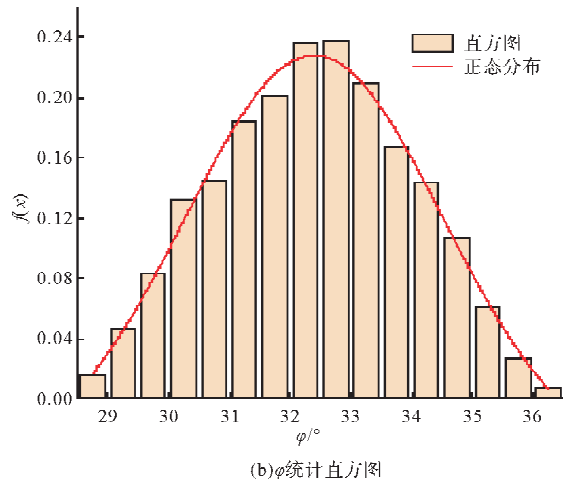


图 3 击实法 c 、 φ 的统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of c and φ by compaction method



(a) c 统计直方图



(b) φ 统计直方图

图 4 压样法 c 、 φ 的统计直方图

Fig. 4 Statistical histogram of c and φ by pressure sample method

2 算例分析

在岩土工程领域, 边坡稳定性可靠性分析是研究的热点问题. Tozato 等^[16] 基于三维极限平衡法提出了一种大范围暴雨诱发边坡失稳风险评估方法. 林毅斌^[17] 基于强度折减法建立三维有限元

模型, 分析了高寒高海拔地区露天矿边坡稳定性. 王桂林等^[18] 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. Wu 等^[19] 将一种先进的一阶二阶矩法与极限平衡法结合, 进行了考虑抗剪强度参数交叉相关随机场的高效边坡可靠度分析. Yuan 等^[20] 提出了基于二维随机场在曲线上局部平均化的简便边坡可靠度分析方法. 以上研究的岩土体参数均是基于实际工程取样试验获得, 或是假定参数. 本节将在误差修正的基础上, 分析不同制样方法产生的抗剪强度参数变异性对边坡可靠性的影响.

2.1 边坡稳定性分析

本节将强度折减法应用于 ABAQUS, 使用一均质土坡算例进行稳定性分析. 边坡高 40 m, 坡度为 50°, 具体边坡模型如图 5 所示. c 、 φ 分别取击实法和压样法下统计数据平均值, 具体计算参数如表 4 所示.

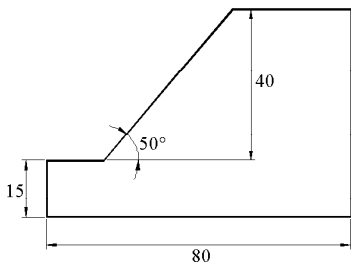


图 5 边坡模型

Fig. 5 Slope model

表 4 边坡土体计算参数

Tab. 4 Soil parameters of slope

	c/kPa	$\varphi/^\circ$	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E/MPa	μ
击实法	44.11	32.49	30	100	0.35
压样法	49.05	32.38			

使用 ABAQUS 建立有限元模型, 单元类型为 CPE4, 共划分了 1 553 个节点和 1 449 个单元, 土体采用理想弹塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 屈服准则; 边界条件设置为底部固定约束, 左右两侧限制水平位移; 模型施加自重荷载. 强度折减系数的变化范围为 0~2, 以数值计算不收敛作为边坡失稳判据. 通过计算, 使用击实法制样, 当安全系数 $F_s = 1.026$ 时, 数值计算不收敛, 使用压样法制样, 当 $F_s = 1.032$ 时, 数值计算不收敛. 由于两种制样方式下抗剪强度参数均值接近, 稳定性分析结果相差不大. 在不考虑土性参数的空间变异性时, 两种制样方式下此边坡均处于稳定状态.

2.2 边坡可靠性分析

岩土工程常用的可靠性分析方法有可靠度指标法、概率矩点估计法和随机有限元法等。随机有限元法是在传统有限元方法的基础之上发展起来随机的数值分析方法,是一种直观、精确、对非线性问题最有效的统计计算方法。因此,本文选用随机有限元法进行边坡可靠性分析。

2.2.1 K-L 级数展开法

随机有限元法需要进行随机场离散。K-L 级数展开法在随机场离散后所需随机变量的数目较少,并且计算精度和效率都较高,因此,本文采用 K-L 级数展开方法离散随机场。采用 K-L 级数展开方法离散随机场实质上是将土体参数随机场的离散转化为求解第 2 类 Fredholm 积分方程的特征值问题^[21],标准一维高斯随机场最终可离散为

$$H(x, \theta) = \mu + \sigma \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\chi) \xi(\theta) \quad (6)$$

式中: μ 是随机过程的均值; σ 是随机过程标准差; $\xi(\theta)$ 是独立标准正态随机变量。

本文将采用拉丁超立方抽样(LHS)方法产生独立标准正态随机向量的随机样本矩阵。通常情况下,为了提高模拟效率, K-L 级数展开法需要进行截断,取其前 M 项,学者们^[22]建议使用期望能比率因子进行截断项数的确定。本文取 $\epsilon \geq 95\%$ 作为 M 的取值标准。

2.2.2 随机有限元分析

分析模型选用稳定性分析模型,不考虑黏聚力和内摩擦角之间的相关性。由上节可知,两种制样方法下黏聚力和内摩擦角都服从正态分布,通过 K-L 级数展开法模拟为两个不相关二维高斯随机场,如式(7)所示。随机场参数取值如表 5 所示。

$$H_{c,\varphi}(x, y, \theta) = \mu_{c,\varphi} + \sigma_{c,\varphi} \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi(\theta) \quad (7)$$

表 5 随机场参数取值

Tab. 5 Random field parameter value

制样方式	强度参数	均值	标准差	l_h/m	l_v/m
击实法	c	44.11 kPa	12.3	40	4
	φ	32.49°	1.93		
压样法	c	49.05 kPa	9.66	40	4
	φ	32.38°	1.58		

定义失效概率为

$$P_f = \frac{N_f}{N_m} \times 100\% \quad (8)$$

式中: N_f 为安全系数小于 1 的次数; N_m 为总的蒙特卡洛(MCS)次数。

图 6 为考虑 c 、 φ 空间变异性时,两种制样方式下边坡失效概率随 MCS 次数的变化规律。MCS 次数为 3 000 次,由图可知,考虑抗剪强度参数空间变异性时,边坡存在失稳的风险。MCS 次数较少时,失效概率波动较大,随着 MCS 次数的增加,边坡失效概率总体呈减小的趋势,最后趋于稳定。击实法下失效概率稳定值在 64.5% 左右,压样法在 3.5% 左右,两者差距较大。再现性方法下 c 、 φ 的均值接近,但击实法制样均匀程度不如压样法,导致标准差相差较大,数据的离散性大,在边坡可靠性分析过程中,得出较高的失效概率,说明制样方式引起的不确定性对边坡可靠性评价有很大影响,建议选择压样法作为制样方法。

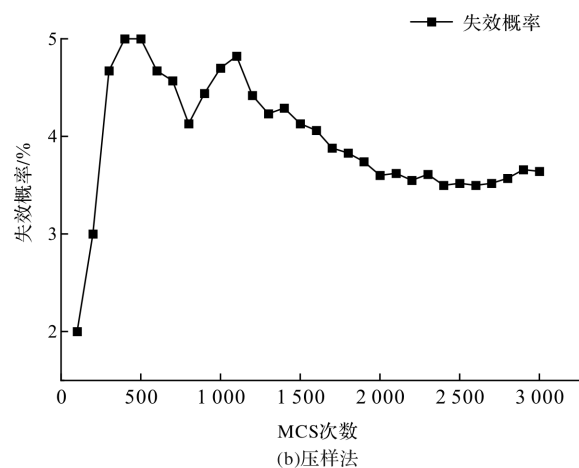
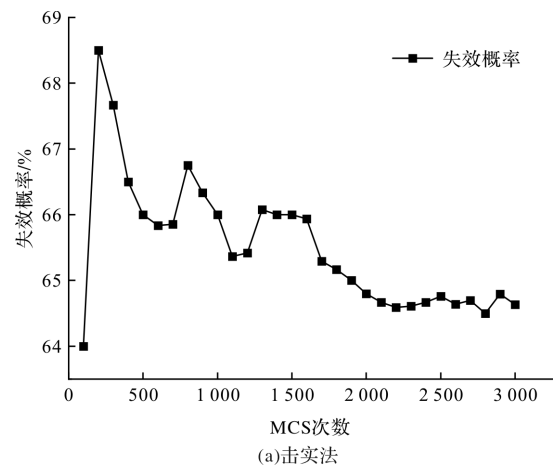


图 6 失效概率变化规律

Fig. 6 Failure probability variation law

3 结论

(1)使用静力压样法比人工击实法制样能够获得更为均匀的试样,得到更为符合一般规律的抗剪强度值,从而降低直剪试验数据离散性,获得更加可靠的强度参数值,建议使用压样法进行制样;

(2)使用再现性方法,并进行抗剪强度修正,以及使用 Grubbs 检验法对数据异常值进行检验,能进一步降低试验数据的离散性,在一定干密度和含水率下, c 、 φ 值是满足正态分布的一组统计数据,更能体现土性参数的随机特性;

(3)两种制样方法在边坡稳定性分析中安全系数接近;由于击实法制样的数据离散性较压样法更大,在可靠性分析中产生较高的失效概率,两种方法计算结果差异显著。

参考文献 References

- [1] TIETJE O, FITZE P, SCHNEIDER H. Slope stability analysis based on autocorrelated shear strength parameters[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(6): 1477-1483.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019 [S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for soil test method:GB/T 50123—2019 [S]. Beijing:China Planning Press 2019.
- [3] 张连杰,武雄,谢永,等. 含水量及上覆压力对重塑膨胀土抗剪强度的影响分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 138-143.
ZHANG Lianjie, WU Xiong, XIE Yong, et al. Influence of water content and overlying pressure on shear strength of remolded expansive soil[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 138-143.
- [4] 申春妮,方祥位,陈正汉. Q_2 黄土的非饱和直剪试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 724-728.
SHEN Chunni, FANG Xiangwei, CHEN Zhenghan. The unsaturated direct shear tests of Q_2 loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 724-729.
- [5] 许健,王掌权,任建威,等. 重塑黄土冻融过程抗剪强度劣化特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(2): 200-206.
XU Jian, WANG Zhangquan, REN Jianwei, et al. Experimental research on shear strength deterioration of remold loess under the freezing-thawing cycle[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 200-206.
- [6] UYETURK C E, HUVAJ N. Constant water content direct shear testing of compacted residual soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 691-703.
- [7] KANG Q R, XIA Y D, Li X S, et al. Study on the effect of moisture content and dry density on shear strength of silty clay based on direct shear test[J]. Advances in Civil Engineering, 2022(6): 1-9.
- [8] 肖景华,吴国永. 线性回归假设对土的抗剪强度指标的影响[J]. 工程技术研究, 2019, 4(1): 199-200.
XIAO Jinghua, WU Guoyong. Influence of linear regression hypothesis on shear strength index of soil[J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(1): 199-200.
- [9] 徐志伟,周国庆,刘志强,等. 直剪试验的面积校正方法及误差分析[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5): 658-662.
XU Zhiwei, ZHOU Guoqing, LIU Zhiqiang, et al. Correcting method and error analysis for sample area in direct shear test [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(5): 658-662.
- [10] 刘海波,张丽华,林大超,等. 直剪试验有效剪切面积动态变化的改进计算[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 503-506.
LIU Haibo, ZHANG Lihua, LIN Dachao, et al. The improved calculation of the dynamic changes of the effective shear area in the direct shear test[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(3): 503-506.
- [11] FENG G J. Direct shear test analysis of root-soil complex considering the change of shear surface area[J]. Ferroelectrics, 2021, 578(1): 140-151.
- [12] 余凯,姚鑫,张永双,等. 基于面积和应力修正的直剪试验数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 118-124.
YU Kai, YAO Xin, ZHANG Yongshuang, et al. Analysis of direct shear test data based on area and stress correction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 118-124.
- [13] 邹宗兴,唐辉明,刘晓,等. 制样误差对结构面直剪试验结果影响定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1664-1669.
ZOU Zongxing, TANG Huiming, LIU Xiao, et al. Quantitative study of structural plane direct shear test results influenced by sample preparation errors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1664-1669.
- [14] 倪万魁,韩启龙. 黄土土性参数的统计分析[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 62-67.
NI Wankui, HAN Qilong. Statistical analysis of physical and mechanical indexes of the typical loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 62-67.