

DOI:10.19956/j.cnki.ncist.2023.03.009

鲍俊文,赵少飞,李萍萍,刘子源.地震作用下边坡代表性滑动面识别及系统可靠度确定[J].华北科技学院学报,2023,20(3):60-64

BAO Junwen, ZHAO Shaofei, LI Pingping, LIU Ziyuan. Identification of representative sliding surfaces of slope under earthquake and evaluation of system reliability[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2023, 20(3): 60-64



移动扫码阅读

地震作用下边坡代表性滑动面识别 及系统可靠度确定

鲍俊文,赵少飞,李萍萍,刘子源

(华北科技学院,北京 东燕郊 065201)

摘 要: 在地震作用下边坡工程的失稳破坏是工程灾害的主要类型。对于一个地震作用下的黏性土边坡,采用拟静力方法简化水平地震作用,设计基本地震加速度变化范围为 $0.0 \sim 0.4g$,利用传统系统可靠度计算方法和基于 k -means 法识别代表性滑动面分别确定相应的边坡系统可靠度。结果表明:随着地震水平加速度的增加,边坡的系统失效概率呈非线性增加。由最不利单一滑动面计算的失效概率约是系统失效概率的 50%,以最不利单一滑动面的失效概率表示边坡的失效概率会明显高估边坡整体的安全,这表明计算系统失效概率的必要性。基于 k -means 法识别代表性滑动面所得系统可靠度方法的计算量明显降低,失效概率的精度略有降低但偏于安全。

关键词: 边坡;稳定性;地震作用;代表性滑动面识别;系统可靠度

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1672-7169(2023)03-0060-03

Identification of representative sliding surfaces of slope under earthquake and evaluation of system reliability

BAO Junwen, ZHAO Shaofei, LI Pingping, LIU Ziyuan

(North China Institute of Science and Technology, Yanjiao, 065201, China)

Abstract: The instability failure of slope engineering under earthquake is the main type of engineering disaster. For a cohesive soil slope under earthquake action, the pseudo-static method is adopted to simplify the horizontal seismic action, and the basic seismic acceleration is designed to vary from $0.0 \sim 0.4g$. The traditional system reliability calculation method and the representative sliding surfaces identified k -means method are used to determine the corresponding slope system reliability. The results show that the system failure probability of slope increases nonlinearly with the increase of seismic horizontal acceleration. The failure probability calculated by the most unfavorable single sliding surface is about 50% of the system failure probability. The failure probability of the most unfavorable single sliding surface will obviously overestimate the overall safety of the slope, which indicates the necessity of calculating the system failure probability. The calculation amount of

收稿日期:2023-02-27

作者简介:鲍俊文(1998-),男,辽宁丹东人,华北科技学院在读硕士研究生,研究方向:岩土工程安全。E-mail: 1072727220

@qq.com

the system reliability method based on k -means identification of representative sliding surfaces is significantly reduced, and the precision of failure probability is slightly reduced but safe.

Key words: slope; stability; earthquake; representative sliding surface recognition; system reliability

0 引言

地震作用下的边坡破坏是地震活动中常见的地震地质灾害类型,不仅数量多、规模大,而且危害性极大,常会对人类活动造成特别严重的损害^[1]。地震作用下边坡稳定性分析,主要采用拟静力方法^[2],即将地震作用简化为水平方向和垂直方向恒定的惯性力施加到边坡上,通过极限平衡等方法确定其安全系数。虽然拟静力法计算结果有一定误差,但因其计算简便、实用性较强,被广泛应用^[3]。由于土性参数往往变异性较大,而且随着空间位置不同而变化,应充分考虑这种不确定因素对地震作用下的边坡稳定性的影响。为了反映土参数的空间变化这一特点,需要采用随机场理论^[4]对边坡稳定性相关的土的物理、力学参数进行客观描述。目前,建立边坡随机场的方法包括局部平均法、中心点法、Karhunen-Loeve (K-L) 展开和协方差矩阵分解法等^[5]。史良胜等^[6]比较了这几类随机场离散方法,得出 K-L 展开方法在离散土体参数各向异性随机场方面具有较好的收敛性。

由于土体参数的不确定性等原因,边坡往往会沿多个潜在失稳滑面破坏^[7],即存在多个失效模式,此时采用单一临界滑面对边坡可靠度进行分析往往会极大地低估失效概率^[8]。为了能够更真实地反映边坡的安全水平,许多学者对多失效模式的边坡可靠度进行计算,即进行边坡系统可靠度的研究^[9-10]。应用边坡系统可靠度传统计算方法(以下简称“传统方法”)时,需分别计算出每个失稳滑面的可靠度,根据各个失效模式的串联关系得到。这种方法常常需要大量的计算且效率不高。而且部分潜在滑动面由于同时穿越相同土层,意味着它们相互之间具有相关性^[11]。这样一些潜在滑动面对边坡可靠度的贡献完全可以由其它滑动面有效代替,通常将这些可以代表其它滑动面贡献的滑动面称为这组滑动面中的代表性滑动面^[12]。因此,基于代表性滑动面进行边坡系统可靠度分析,可极大地提高计算效率,一些学者

尝试代表性滑动面对边坡系统可靠度进行分析^[10,12-14],但是,在筛选边坡代表性滑动面时需要提前选定相关系数阈值,并进行重复性计算,总体来说其计算过程较为繁琐且效率不高。为了解决这一不足,Wang 等^[15]和徐哲等^[16]尝试利用机器学习中的 k -means 聚类算法筛选出边坡代表性滑动面,结果表明 k -means 算法对于识别代表性滑动面比传统方法比较有效。然而,在地震作用下的边坡稳定性分析中,还没有研究如何有效确定代表性滑动面,并确定系统可靠度。

本文对一黏性土质边坡,采用拟静力法对地震作用进行简化,设计基本地震加速度从 0.0 到 0.4 g (g 为重力加速度),通过 K-L 展开离散黏聚力和内摩擦角生成边坡随机场,采用蒙特卡罗法计算地震作用下边坡各个潜在滑动面的失效概率,利用 k -means 法识别代表性滑动面进行系统可靠度计算,并与传统系统可靠度算法进行对比。

1 边坡代表性滑动面确定及系统可靠度计算

1.1 边坡代表性滑动面确定

聚类算法 k -means 是一种无监督学习,广泛应用于数据统计、机器学习及数据挖掘中。 k -means 算法简单而且计算速度快,其思想是选择几个聚类中心,然后将样本数据代入其中计算其与聚类中心的距离,不断重复直至满足收敛要求。 k -means 算法具体步骤^[19]如下:

- (1) 选取聚类个数 k 值。
- (2) 在数据 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 中随机选取 k 个数据,作为 k 个类别的均值 m_j 。
- (3) 计算每个数据点 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 到 $m_j (j = 1, 2, \dots, k)$ 的欧氏距离 d_{ij} 。对于某个数据点 x_i ,归类于最小值 d_{ij} 对应的第 j 类。
- (4) 计算各组内数据的均值 $m_j (j = 1, 2, \dots, k)$,作为这个组新的均值。
- (5) 循环第(3)、(4)步,直到先后两处均值点不变或差别在误差范围之内。

流程图如图 1 所示：

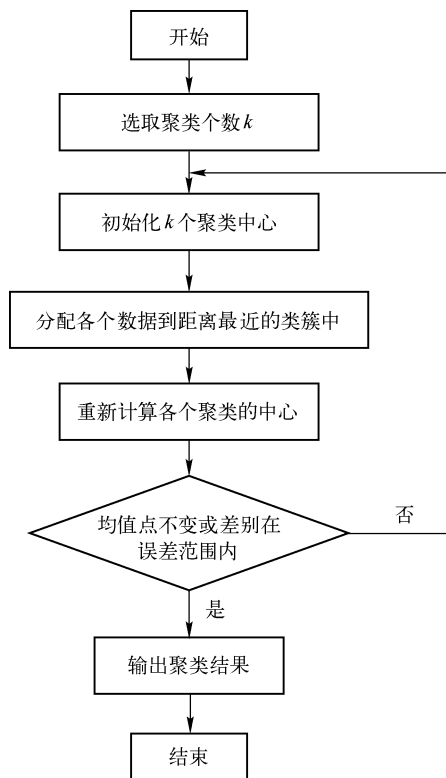


图 1 k -means 流程

1.2 边坡系统可靠度计算

边坡可以看成由多个子系统构成。由于边坡任意一条滑动面发生滑动,边坡整体就会发生破坏,因此将边坡整体当作一个串联系统进行系统可靠度的计算。

假设一个串联系统由 n 个子系统构成,串联系统的系统失效事件为 n 个子系统失效事件的并集,故

$$P(E) = P(E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n) \quad (1)$$

式(1)表明,当子系统失效事件彼此互斥时,串联系统的系统失效概率即为各子系统失效概率之和。串联系统不失效事件是每个子系统都不失效事件的交集,因此有

$$P(\bar{E}) = P(\bar{E}_1 \bar{E}_2 \dots \bar{E}_n) \quad (2)$$

如果各子系统失效事件之间是统计独立的,公式(2)可写为

$$P(\bar{E}) = P(\bar{E}_1)P(\bar{E}_2) \dots P(\bar{E}_n) \quad (3)$$

所以系统的失效概率可按下式计算：

$$1 - P(E) = \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i)) \quad (4)$$

$$P(E) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i)) \quad (5)$$

采用 k -means 聚类确定代表性滑动面的系统可靠度计算流程,计算流程如图 2 所示：

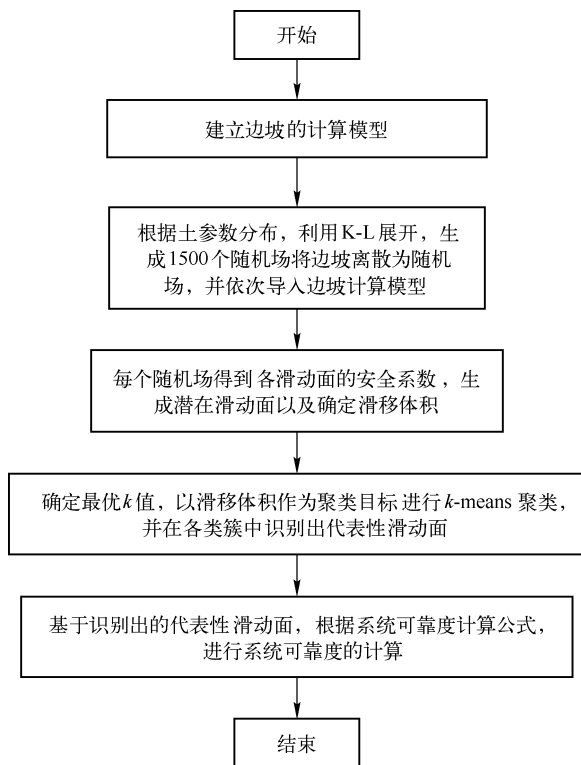


图 2 代表性滑动面的系统可靠度计算流程

2 算例分析

地震水平作用和竖向作用对边坡稳定性的影响是不同的,本研究重点在于分析边坡地震作用下边坡系统可靠度的影响,不考虑竖向地震作用的影响。设计基本地震加速度从 0.0 到 0.4 g,分别对应着无地震作用到抗震设防烈度 IX 度。

以某一黏性土质边坡为例,边坡高 h 为 10 m,高宽比为 1:2,坡脚以下 4 m 处为基岩,如图 3 所示。土的天然重度 γ 取 18 kN/m³,水位下有效重度 γ' 为 9 kN/m³。边坡的初始水位在坡顶下 4 m、坡底下 2 m 位置。

边坡中土的黏聚力、内摩擦角服从对数正态分布,均值 μ_c 为 10 kPa, μ_ϕ 为 25°,均方差 σ_c 为 1 kPa, σ_ϕ 为 2°,空间相关距离相同,水平相关距离 δ_h 为 40 m,垂直相关距离 δ_v 为 2 m。

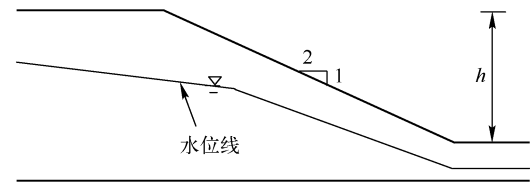


图 3 边坡计算模型

表 1 随机场条件下地震作用下边坡的安全系数

	设计基本地震加速度						
	0.00	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
土参数为常量	1.515	1.345	1.207	1.093	0.995	0.843	0.733
土参数空间变化	1.327	1.203	1.076	0.943	0.854	0.715	0.614

注:土参数空间变化计算的安全系数为均值。

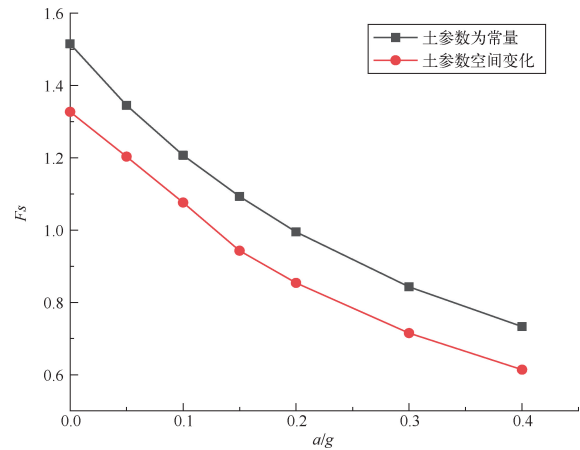


图 4 地震作用下边坡的安全系数

由表 1 和图 4 可知,在土参数随机变化时安全系数均值,在各种地震作用下都明显低于确定性条件下的安全系数。这是由于考虑了土壤空间变异性这一特点,使得安全系数降低。

在依据得到的各滑动面的滑移体积进行 k -means 聚类分析时,首先采用手肘法确定^[20]最优的 k 值。对应某个 k 值,误差平方和 SSE (sum of the squared errors)为

$$SSE = \sum_{j=1}^k (x_j - m_j)^2 \tag{6}$$

表 2 地震作用下边坡的失效概率 P_f (%)

滑动面选择	设计基本地震加速度						
	0.00	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
最不利单一滑动面	1.95	2.2	3.1	4.6	5.9	9.2	14.9
多滑动面	3.95	5.08	7.78	9.58	12.78	19.05	30.07
代表性滑动面($k=3$)	3.96	5.29	7.85	9.77	12.84	19.31	30.27
代表性滑动面($k=4$)	3.95	5.27	7.83	9.76	12.81	19.28	30.25
代表性滑动面($k=5$)	3.98	5.56	7.98	9.89	12.97	19.55	30.58
代表性滑动面($k=6$)	4.03	5.78	8.15	10.04	13.56	19.88	30.97

利用 K-L 展开,对黏聚力和内摩擦角分别进行离散,建立相应的参数随机场,导入边坡计算模型中。计算得到的各随机场边坡安全系数和其均值,与为土抗剪强度为常量时边坡安全系数对比,如表 1、图 4 所示。

其中, x_j 为属于 j 类的所有数据点。

为了确定最优 k 值,对各簇内的数据进行了误差分析结果如图 5 所示。图 5 表明,误差平方和 SSE 的拐点出现在 $k=4$,故此组数据的最优聚类数量为 4。

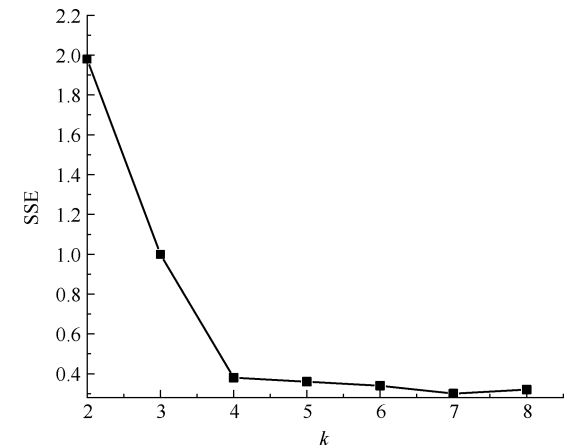


图 5 SSE 随 k 值变化 ($a=0.05g$)

对于这个算例,分别采用边坡的最不利单一滑动面、多滑动面传统方法和代表性滑动面计算的边坡系统失效概率,结果如表 2 和图 6 所示。

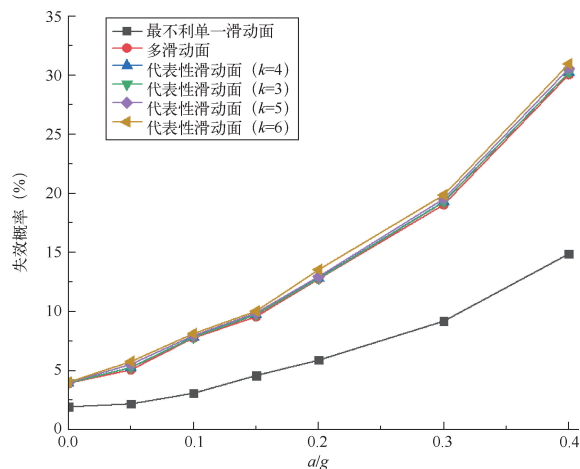


图 6 地震作用下边坡的失效概率 P_f (%)

如表 2 和图 6 结果所示,随着地震水平加速度的增加,边坡的系统失效概率呈非线性增加。在各种地震作用下,最不利单一滑动面的失效概率均小于相应的系统失效概率,约是系统失效概率的 50%,这表明根据最不利单一滑动面确定的失效概率明显高估了边坡的安全,这表明分析边坡系统失效概率的必要性。

表 2 和图 6 结果显示,代表性滑动面所得系统失效概率略高于传统方法计算结果,偏于安全,其中当聚类数为最优值 $k=4$ 时,最大误差为 6.1%。但是,代表性滑动面确定失效概率的计算量明显降低,本算例中代表性滑动面个数为 4,而按传统方法需要计算 96 个滑动面,计算量为传统方法计算量的 1/24。

3 结论

(1) 随着地震水平加速度的增加,边坡的系统失效概率呈非线性增加。由最不利单一滑动面计算的失效概率约是系统失效概率的 50%,以最不利单一滑动面的失效概率表示边坡的失效概率会明显高估边坡整体的安全,这表明计算系统失效概率的必要性。

(2) 采用代表性滑动计算地震作用下边坡系统可靠度方法,失效概率略高于考虑所有潜在滑动面的传统方法所得结果。虽然计算精度略有降低,但高估失效概率偏于安全。相较于传统方法,代表性滑动面计算边坡系统可靠度的计算量比传统方法显著降低。

参考文献:

[1] 张铎,吴中海,李家存,等. 国内外地震滑坡研究综述[J]. 地质力学学报,2013,19(3):225-241.

[2] 邓东平,李亮,赵炼恒. 地震作用下边坡稳定性分析的拟静力法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3578-3588.

[3] Chen C Y, Chen H W, Wu W C. Numerical modeling of interactions of rainfall and earthquakes on slope stability analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80: 524-535.

[4] Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11):1227-1246.

[5] Phoon K K, Huang S P, Quek S T. Implementation of Karhunen-Loeve expansion for simulation using a wavelet-Galerkin scheme[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17(3):293-303.

[6] 史良胜,杨金忠,陈伏龙,等. Karhunen-Loeve 展开在土性各向异性随机场模拟中的应用研究[J]. 岩土力学,2007(11):2303-2308.

[7] Oka Y, Wu T H. System reliability of slope stability[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 116(8):1185-1189.

[8] Jiang S H, Huang J, Griffiths D V, et al. Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: A state-of-the-art review[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141(1):141-160.

[9] 蒋水华,祁小辉,曹子君,等. 基于随机响应面法的边坡系统可靠度分析[J]. 岩土力学,2015,36(3):809-818.

[10] 褚雪松,王旭春,李亮,等. 基于代表性滑动面的边坡系统可靠度分析[J]. 煤炭学报,2014,39(6):1077-1083.

[11] Li L, Wang Y, Cao Z, et al. Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 53:95-105.

[12] 蒋水华,潘嘉铭,秦根泉. 基于代表性滑动面的空间变异土坡可靠度分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(5):768-773.

[13] Zhang W, Gu X, Han L, et al. A short review of probabilistic slope stability analysis considering spatial variability of geomaterial parameters[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2022, 7(4):249-270.

[14] Zhang J, Zhang L M, Tang W H. New methods for system reliability analysis of soil slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(7):1138-1148.

[15] Wang B, Liu L, Li Y, et al. Reliability analysis of slopes considering spatial variability of soil properties based on efficiently identified representative slip surfaces[J]. 岩石力学与岩土工程学报(英文版), 2020, 12(3):642-655.

[16] 徐哲,胡焕校,邓超. K-means 聚类神经网络在边坡稳定性评价中的应用探究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):198-204.

[17] 鲍俊文,胡欣宇,邢明源,等. 可靠度分析中拉丁超立方和传统舍选抽样法对比研究[J]. 华北科技学院学报,2021,18(3):81-84.

[18] GB50330—2013,建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[19] 杨善林,李永森,胡笑旋,等. K-MEANS 算法中的 K 值优化问题研究[J]. 系统工程理论与实践,2006(2):97-101.