

刘爱娟,崔玉龙,刘铁新.地震边坡动态临界加速度计算中抗剪强度参数概率分布分析[J].地震工程学报,2020,42(5):1179-1186.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1179

LIU Aijuan,CUI Yulong,LIU Tiexin.Probability Distribution of Shear Strength Parameters in Calculation of Dynamic Critical Acceleration of Seismic Slopes[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(5):1179-1186.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1179

## 地震边坡动态临界加速度计算中 抗剪强度参数概率分布分析

刘爱娟<sup>1</sup>, 崔玉龙<sup>2</sup>, 刘铁新<sup>3</sup>

(1. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610041; 2. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;  
3. 大连海事大学道路与桥梁研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 基于动态临界加速度计算地震边坡永久位移的方法应用了边坡分布的不均匀性, 不均匀分布程度影响着永久位移计算结果。研究 Newmark 滑块底部或潜在滑动面上抗剪强度参数的分布特征, 有利于了解地震过程中临界加速度的分布和变化过程, 为地震边坡永久位移计算参数选取提供依据。通过计算发现: 边坡土体标准差的线性关系比较微弱, 在缺乏实验数据时, 仅可参考使用; 黏聚力随机数个数达到 200 时所计算的永久位移数值不再有波动; 黏聚力无论设置为正态分布还是对数正态分布均不影响永久位移计算结果; 黏聚力标准差的数值大小对永久位移的大小和离散性影响很大。在地震边坡计算时, 尽量将其设置为符合正态分布; 尽量根据实测数据设定黏聚力标准差, 若缺乏实测资料, 可参考两者的线性关系并结合经验进行标准差设定。

**关键词:** 地震边坡; Newmark 永久位移; 动态临界加速度; 概率分布类型; 标准差

**中图分类号:** P642      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2020)05-1179-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1179

## Probability Distribution of Shear Strength Parameters in Calculation of Dynamic Critical Acceleration of Seismic Slopes

LIU Aijuan<sup>1</sup>, CUI Yulong<sup>2</sup>, LIU Tiexin<sup>3</sup>

(1. China Three Gorges Projects Development Co., Ltd, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;  
3. Highway and Bridge Engineering Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** The heterogeneity of cohesion distribution was applied in the calculation method of seismic slope permanent displacement based on dynamic acceleration, and the degree of uneven distribution affected the permanent displacement calculation results. Studying the distribution characteristics of shear strength parameters on the bottom of the Newmark sliding block or the potential sliding surface of slopes can clarify the distribution and change process of critical acceleration in seismic processes. Through calculation, it was found that the linear relationship between the

收稿日期:2018-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807267);安徽省高校自然科学重点研究项目(KJ2018A0075,KJ2017A094)

第一作者简介:刘爱娟,女,工程师,主要从事区域边坡地震危险性评价研究。E-mail:liuajuan333@126.com。

standard deviation of cohesion and the cohesion of soil slope is weak and can only be used for reference in the absence of experimental data. When the random number of cohesive forces reached 200, the calculated permanent displacement values no longer fluctuated. Setting the cohesion as a normal distribution or lognormal distribution had no effect on the permanent displacement calculation result. The standard deviation of cohesion had a great influence on the value and dispersion of permanent displacement. During the seismic slope calculation, the cohesion should be set as normal distribution as possible, and the standard deviation of cohesion should be set according to the measured data as much as possible. If there is no measured data, the standard deviation can be set by referring to the linear relationship between the two.

**Keywords:** seismic slope; Newmark permanent displacement; dynamic critical acceleration; types of probability distribution; standard deviation

## 0 引言

岩土体性质的空间分布存在着不均匀性,目前对于岩土体不均匀性的研究成果主要集中于沿边坡深度方向变化的模拟和应用,如边坡可靠性分析相关文献<sup>[1-8]</sup>中均应用了岩土体空间变异特征理论。

事实上,岩土体参数除了沿深度方向是逐渐变化的,在平面空间范围足够大时在边坡潜在滑动面上同样分布不均匀。利用这种不均匀性,结合 Newmark 永久位移理论,刘爱娟等<sup>[9]</sup>提出了一种可以模拟边坡临界加速度动态减小过程并进而计算出地震边坡永久位移的方法。该方法设定地震时边坡潜在滑动面(Newmark 滑块底面)上各质点的黏聚力符合某种概率分布类型,由此各质点具有不同的临界加速度。在地震作用过程中,临界加速度被地震加速度超过的质点其临界加速度丧失,由此逐步实现潜在滑动面上的总临界加速度随地震时程不断减小的过程。采用蒙特卡罗法模拟可能出现的质点黏聚力数值并编制 Matlab 计算程序,实现了边坡潜在滑动面上临界加速度的动态变化。

对于 Newmark 永久位移滑块模型来说,滑块底部即潜在滑动面上的岩土体参数决定着滑动面抗剪强度的大小。研究该位置黏聚力和摩擦角的分布特征,有利于了解地震过程中临界加速度的分布和变化过程,为选取地震边坡永久位移计算参数提供依据,为选取边坡稳定可靠性分析参数提供参考。由于动态临界加速度计算方法以滑块底部黏聚力及临界加速度在地震时程中所产生的变化为计算基础,所以在利用蒙特卡罗法生成黏聚力随机数时,需要明确黏聚力的概率分布类型和标准差。因此,本文列举了黏聚力概率分布形式与标准差的已有研究成果,并利用文献[9]中永久位移的计算方法加以算例分析,详细讨论了黏聚力概率分布形式和标准差

的不同计算结果和取用建议。

由于基于动态临界加速度计算地震边坡永久位移的方法只将黏聚力作为随机变量,而将内摩擦角视为常量,所以本文对抗剪强度参数概率分布和标准差的分析主要针对黏聚力。

## 1 既有抗剪强度参数研究成果及分析

### 1.1 概率分布类型研究成果及分析

抗剪强度参数黏聚力与内摩擦角的概率分布类型本应由实测资料确定,已有的实测资料主要是为工程建设而开展的岩土抗剪强度参数试验及成果分析,能够直接符合 Newmark 滑块底面范围内抗剪强度参数分布特征的实测数据还比较少。

对一定区域内岩土抗剪强度参数概率形式的实验研究已有很多,如文献[10-28],已经提出的分布类型有正态分布、对数正态分布、极值 I 型分布、韦布尔分布和 Beta 分布等形式。其中大多数研究成果显示黏聚力和摩擦角更多服从正态分布或对数正态分布。

《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》<sup>[29]</sup>中规定,当统计资料不充分时,人工材料抗剪参数可采用正态分布;岩土材料、地基与围岩材料抗剪参数可采用对数正态分布或其他分布。

从以上相关研究和标准可以看出,似乎岩土参数可以接受多种分布形式,出现这种情况的原因一方面在于样本数量较少确实会导致出现参数接受多种假设分布的情况;另一方面是不同学者的自身习惯和偏好影响了研究结果。

### 1.2 标准差研究成果及分析

对于正态分布和对数正态分布,需要确定抗剪强度参数的标准差。本文收集了土体黏聚力(文中的黏聚力平均值)及其标准差的研究文献<sup>[12,22,28,30-34]</sup>,

将其分布绘制在图 1 中。可以看出, 黏聚力与标准差的关系比较杂乱, 虽然标准差随黏聚力近似呈线性增长, 但其拟合优度  $R^2$  仅有 0.650 5, 不过在缺少实验数据的情况下, 可以参照拟合出的关系式进行标准差的选取。黏聚力和标准差相关性不明显现象的产生, 与样本的取样位置、样本数量等均有关系, 如平原地带土较均匀, 其黏聚力标准差比山区地带的要小。各文献的样本数量也有着较大差别, 样本数量较多的实例黏聚力标准差会更准确; 样本数量不充足的实例所统计得到的黏聚力标准差会与实际情况有较大偏差。

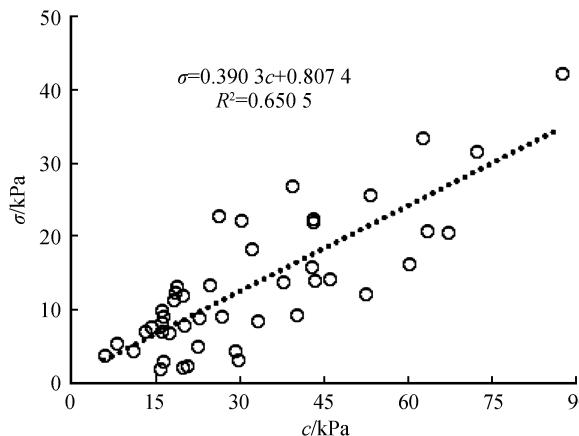


图 1 黏聚力标准差分布图

Fig.1 Standard deviation distribution of cohesion

实际计算中, 一般将边坡滑动面认为是 Newmark 滑块底面, 该区域面积的大小影响着岩土体参数变异性大小。边坡的面积越大, 该范围内的岩土体参数变异性越大; 面积越小, 则其变异性越小, 对于标准差这一直接体现参数变异特征的指标来讲, 其数值选取不能太大也不能太小, 选择时应该注重滑块计算的范围, 尽量选择同一边坡范围内的实验数据。一般来讲, 抗剪强度参数的概率分布标准差应由实验数据得出, 在缺乏实验数据时, 应参考其他类似资料并结合常用数据给出。

## 2 蒙特卡罗法随机数选取研究

### 2.1 蒙特卡罗法模拟原理

蒙特卡罗法又称为统计实验法或随机模拟法, 最早由 Von Neumann 和 Ulan 提出, 是用数学的方法模拟具有某种分布随机变量的抽样值, 以此来解决随机变量的运算问题。在模拟过程中, 只要模拟的次数足够多, 计算精度就能相对较高。蒙特卡罗法较多应用于边坡的稳定性可靠度分析中, 边坡的强度参数被视为符合某种概率分布形式而随机生

成, 如文献[21,35-39]均利用蒙特卡罗法对边坡可靠性进行了计算, 但这些文献都是在将单体边坡的抗剪强度参数视为某一值的基础上, 考虑其数值的波动性从而对抗剪强度参数做多次随机模拟生成, 并未考虑同一滑动面上不同位置参数的不均一性。

事实上, 在 Newmark 滑块理论中, 滑坡体被视为滑块, 滑块的抗剪强度参数在整个滑面上的分布也可看做符合某种概率分布。虽然滑面不同位置的抗剪强度参数大小与多种因素有关, 如岩性和风化程度的均匀性, 如果滑块面积过大抗剪强度参数的均匀性还会受到影响, 但在实际中同一边坡的表层覆盖层或边坡滑带土的力学参数可以认为符合某种概率分布, 能够以平均值和标准差来描述其概率特征。所以利用蒙特卡罗法随机模拟滑面上不同位置处不同大小的黏聚力是符合现实情况的。

### 2.2 黏聚力随机数个数确定

黏聚力随机数若取得较小, 则会造成所计算的永久位移差别较大, 但对于某一边坡, 其永久位移值应该固定于某一数值才有利于后续的计算和判断。因此, 对于黏聚力随机数个数的确定, 采用试算的方法观察随机数个数达到多大时所计算的永久位移值趋于稳定。试算时选定了一列地震时程曲线、一组滑块抗剪强度参数, 黏聚力概率分布形式选为正态分布, 分别设定了多个随机数个数, 计算结果绘制于图 2。可见当随机数个数达到 200 时所计算的永久位移数值不再有波动。结合以上分析, 可采用 1 000 作为黏聚力的随机数个数, 即认为每个计算滑块由 1 000 个具有不同黏聚力的滑块质点组成, 这也符合蒙特卡罗法的随机数思想。

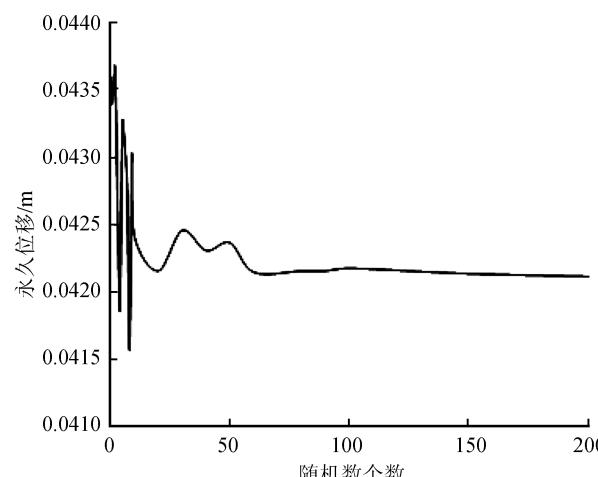


图 2 黏聚力随机数个数与永久位移关系图

Fig.2 Relation between the cohesion number of random numbers and the permanent displacement

### 3 黏聚力标准差确定

#### 3.1 计算方法与过程

为了判断哪种概率分布形式与哪个标准差数值更能符合岩土抗剪强度参数的分布特征并可应用于地震边坡的永久位移计算,本文选取集集地震3条地震波时程曲线进行永久位移计算和结果分析(图3)。对每条地震波时程曲线进行永久位移计算时分别假设黏聚力符合正态分布和对数正态分布两种类型,对每条地震波时程曲线求算40次永久位移值。由于边坡各参数和地震波时程曲线的不同组合会对计算结

果产生影响,有时还会出现位移为0或者无动态变化的情况,因此经过试算和选择,边坡参数设置为滑块厚5 m、坡角20°、重度21 kN/m<sup>3</sup>、摩擦角30°、黏聚力平均值30 kPa。根据2.2节的分析,生成黏聚力随机数个数设定为1 000。由于每次生成的黏聚力都具有随机性,虽然是同一条地震波时程曲线、同样的边坡参数和同样的黏聚力概率分布类型和同样的黏聚力标准差,计算40次的永久位移结果仍然各不相同,所以统计出40个永久位移的平均值并以此作为纵坐标,以黏聚力标准差(或对数黏聚力标准差)作为横坐标绘制图形,见图4;统计出40个永久位移的标准差

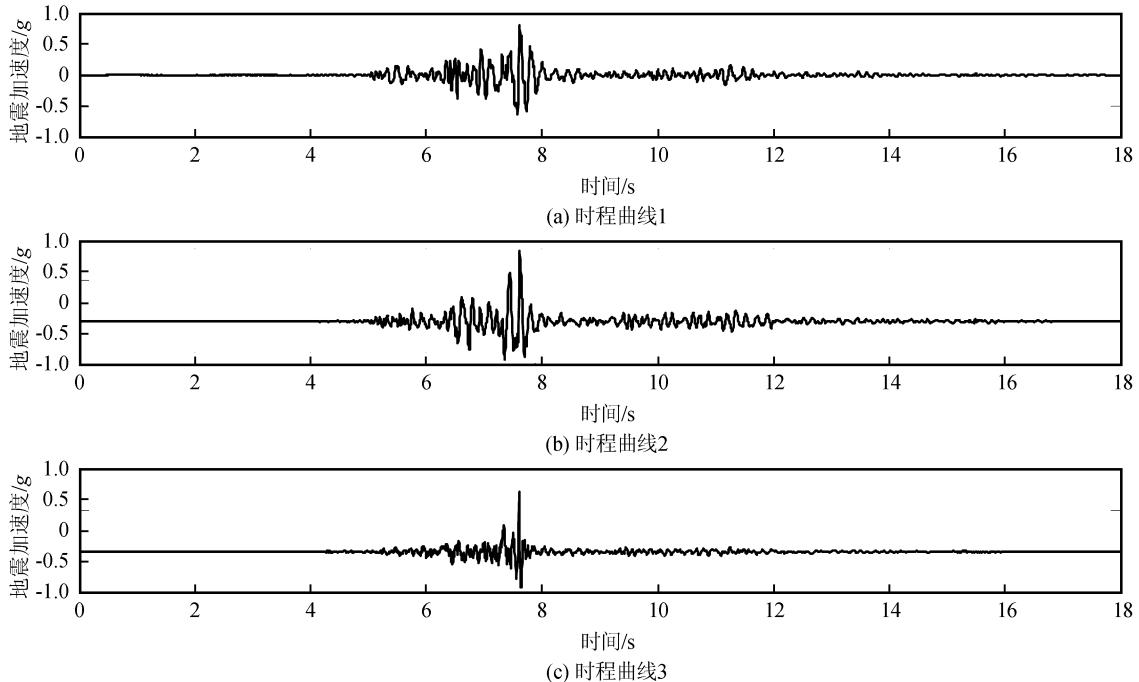


图3 台湾集集地震3条地震波时程曲线

Fig.3 Three seismic acceleration time history curves of Chichi, Taiwan earthquake

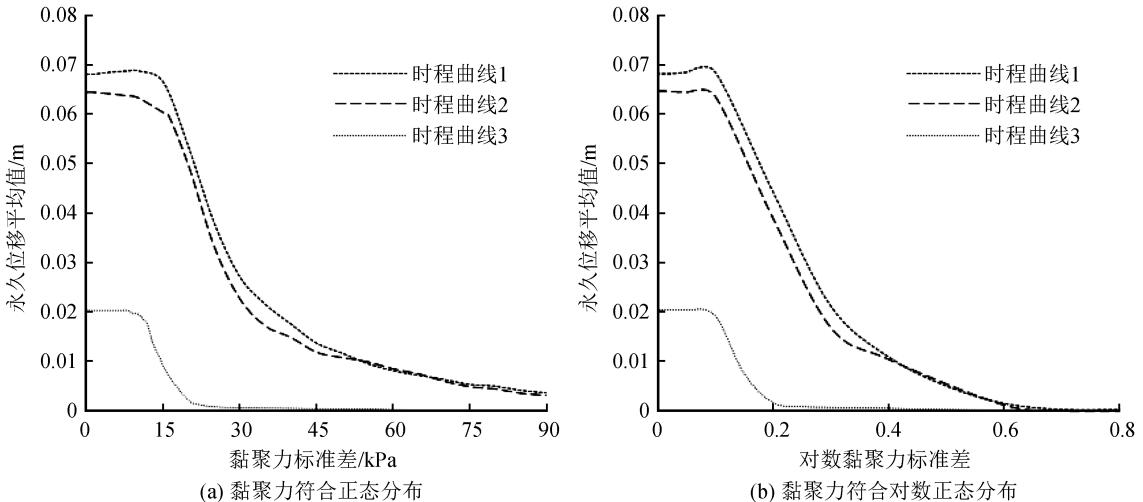


图4 永久位移平均值与黏聚力标准差关系图

Fig.4 Relationship between mean permanent displacement and standard deviation of cohesion

并以此作为纵坐标, 以黏聚力标准差(或对数黏聚力标准差)作为横坐标绘制图形, 见图 5。

### 3.2 结果分析

(1) 从图 4 可以看出, 随着黏聚力标准差或对数黏聚力标准差的增大, 永久位移在保持了定值一定范围后逐步减小, 减小幅度先剧烈后平稳。

曲线初始近似水平段的永久位移数值接近传统方法, 即将黏聚力视为无离散性时计算所得的永久

位移值。随着黏聚力标准差或对数黏聚力标准差的增大, 黏聚力离散性逐步增大, 黏聚力和临界加速度的动态减小效应表现逐渐明显, 永久位移也比传统计算方法有大大减小。在曲线的末端, 随着黏聚力标准差或对数黏聚力标准差的进一步增大, 黏聚力和临界加速度的离散性过大, 很多滑块质点临界加速度远远超出地震加速度, 导致根本没有位移产生, 因此, 永久位移曲线逐渐趋于 0。

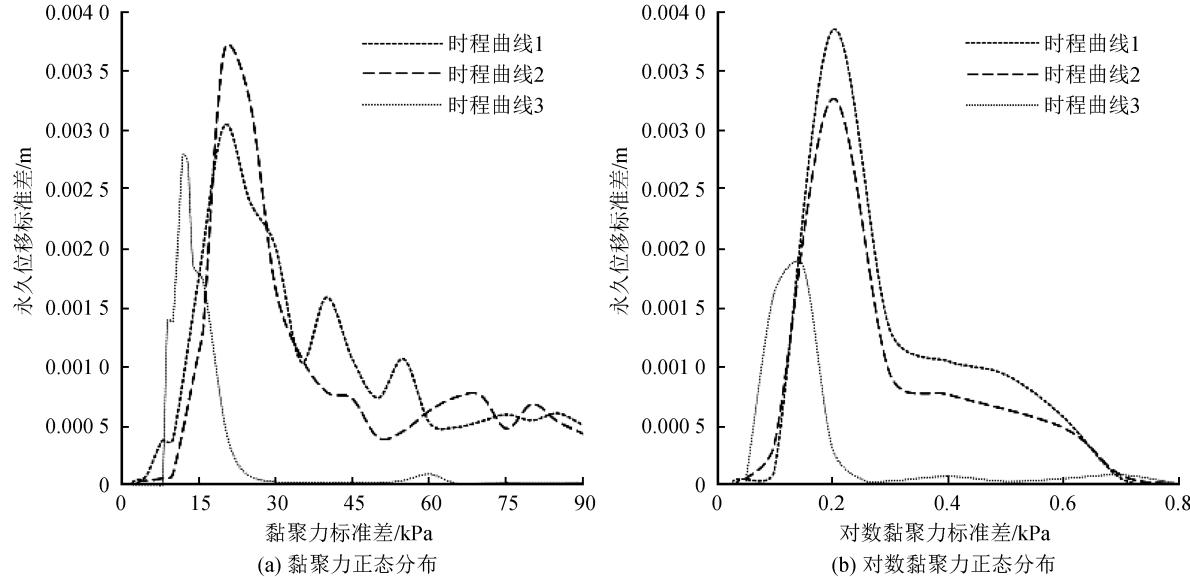


图 5 永久位移标准差与黏聚力标准差关系图

Fig.5 Relationship between standard deviation of permanent displacement and standard deviation of cohesion

(2) 比较图 4(a)和(b), 黏聚力无论是设置为正态分布还是对数正态分布, 永久位移曲线都表现出相同的变化过程。曲线变化明显的位置所对应的横坐标也有一定的规律性, 如黏聚力标准差从 20 kPa 开始, 永久位移逐渐趋于平缓, 此时对数黏聚力标准差基本对应于 0.2。这些规律可以从对数基本理论得到较好的解释, 因此, 从该项规律来看, 黏聚力概率分布类型设置为正态分布还是对数正态分布, 对永久位移计算结果并不会产生本质的影响。实际选择时可以根据工作的方便加以取舍。

(3) 从图 5 可以看出, 在黏聚力标准差或对数黏聚力标准差作为横轴的坐标系中, 永久位移标准差呈现中间大两边小的状态。

峰值左侧, 当黏聚力标准差或对数黏聚力标准差逐渐变小时, 所计算永久位移数值的离散性越来越小。当黏聚力无离散性即黏聚力标准差为 0 时, 计算 40 次的永久位移均为同一值。峰值右侧, 当黏聚力标准差或对数黏聚力标准差逐渐变大时, 所计算永久位移数值的离散性也越来越小, 黏聚力标准

差从约 30 kPa(对数黏聚力标准差 0.3)继续增大时, 所求永久位移标准差减小的幅度趋于平缓。

事实上, 由于本算例黏聚力平均值设置为 30 kPa, 曲线右侧尤其是黏聚力标准差超过 30 kPa(对数黏聚力标准差超过 0.3)时的情况不会发生, 因为现场边坡黏聚力标准差真实值一般达不到黏聚力平均值的大小。

从曲线平滑程度上看, 图 5(a)即黏聚力设置为正态分布时的曲线右侧出现了波动, 图 5(b)即黏聚力设置为对数正态分布时的曲线总体平滑性比较好, 但由于波动段出现在黏聚力标准差大于 30 kPa 即超过自身黏聚力平均值的区域, 所以可以不用考虑曲线波动带来的影响。

(4) 分别对比图 4(a)和图 5(a)、图 4(b)和图 5(b), 可以看出永久位移剧烈下降阶段即动态临界加速度表现充分的阶段与永久位移标准差峰值阶段基本对应相同的横坐标区间。也就是说临界加速度动态减小的效果明显时的黏聚力标准差, 也存在着所计算出的永久位移离散性较大的可能。因此设定

合适的黏聚力标准差对于动态临界加速度是否能实现动态减小有着重要作用。

从图上看,似乎设置黏聚力呈对数正态分布时永久位移标准差波动较小,但由于对数黏聚力标准差的数值较小,一般小于1,以此为平均值生成随机对数黏聚力时会有大量小于0的数据产生,这些小于0的对数黏聚力,无论是直接舍弃还是转换为正数参与计算都不太合适。因此,对于动态临界加速度计算黏聚力设置为正态分布更为合适。

(5) 黏聚力标准差的选择可综合考虑边坡范围、实验数据以及第2.2节的统计关系。但多数情况下缺乏实验数据,黏聚力标准差的选择就面临着较大的主观性,若标准差取值较小,则无法体现黏聚力应有的离散性,计算结果与黏聚力保持不变时相差不大,计算过程与结果不能体现黏聚力和临界加速度的动态变化,不易得出合理的位移结果值;若标准差取值过大,则黏聚力离散性较大,虽然能够在黏聚力和临界加速度变化曲线上表现出明显的减小趋势,但又可能与实际状况相差太大。本文第2.2节给出了黏聚力标准差与黏聚力值的近似关系,但由于所选取的数据源与边坡永久位移计算所要求的范围不能完全契合,因此仅做参考使用。

#### 4 结论与建议

(1) 边坡土体黏聚力标准差与黏聚力的关系受制于样本数据的来源不同和数量不足,其线性关系相对微弱,在缺乏实验数据时仅可参考使用。对于边坡力学参数,今后应注意数据收集整理工作,为地震边坡永久位移计算提供依据。

(2) 动态临界加速度计算方法中,黏聚力随机数个数达到200时所计算的永久位移数值不再有波动。因此,黏聚力随机数个数选取不应少于200,结合蒙特卡罗法随机数基本思想,建议取1 000作为黏聚力的随机数个数。

(3) 动态临界加速度计算方法中,黏聚力无论设置为正态分布还是对数正态分布均不影响永久位移计算结果。但考虑到设置为对数正态分布时,随机生成的黏聚力会出现负值,所以建议尽量选择正态分布作为边坡黏聚力的概率分布形式。

(4) 黏聚力标准差的大小对所计算边坡永久位移的大小和离散性影响很大。在计算时尽量根据实测数据进行设定,但在缺乏实测资料的情况下可参考两者的线性关系并结合经验进行设定。

#### 参考文献(References)

- [1] 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.  
LI Dianqing, JIANG Shuihua, ZHOU Chuangbing, et al. Reliability Analysis of Slopes Considering Spatial Variability of Soil Parameters Using Non-intrusive Stochastic Finite Element Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1413-1422.
- [2] 舒苏荀,龚文惠.考虑参数空间变异性的边坡模糊随机可靠度分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(9):93-97.  
SHU Suxun, GONG Wenhui. Fuzzy Random Reliability Analysis of Slopes Considering Spatial Variability of Soil Parameters [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(9): 93-97.
- [3] 杨继红,刘汉东,秦四清,等.考虑土性参数空间变异性的边可靠度分析[J].工程地质学报,2007,15(2):205-211.  
YANG Jihong, LIU Handong, QIN Siqing, et al. Reliability Analysis of Slope Stability Taking into Consideration of Spatial Variability of Soil Parameters [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 205-211.
- [4] 李典庆,祁小辉,周创兵,等.考虑参数空间变异性的无限长边坡可靠度分析[J].岩土工程学报,2013,35(10):1799-1806.  
LI Dianqing, QI Xiaohui, ZHOU Chuangbing, et al. Reliability Analysis of Infinite Soil Slopes Considering Spatial Variability of Soil Parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1799-1806.
- [5] 白桃,黄晓明,李昶.考虑土体参数空间变异性的边坡稳定性研究[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(12):2221-2226.  
BAI Tao, HUANG Xiaoming, LI Chang. Slope Stability Analysis Considering Spatial Variability of Soil Properties [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(12): 2221-2226.
- [6] 祁小辉,李典庆,周创兵,等.考虑土体空间变异性的边坡最危险滑动面随机分析方法[J].岩土工程学报,2013,35(4):745-753.  
QI Xiaohui, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Stochastic Analysis Method of Critical Slip Surfaces in Soil Slopes Considering Spatial Variability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 745-753.
- [7] 蒋水华,李典庆,周创兵,等.考虑参数空间变异性的非饱和土坡可靠度分析[J].岩土力学,2014,35(9):2569-2578.  
JIANG Shuihua, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Reliability Analysis of Unsaturated Slope Considering Spatial Variability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2569-2578.
- [8] 陈朝晖,雷坚,黄景华,等.考虑参数空间变异性的边坡稳定可靠性有限元极限分析[J].岩土工程学报,2018,40(6):985-993.  
CHEN Zhaohui, LEI Jian, HUANG Jinghua, et al. Finite Element Limit Analysis of Slope Stability Considering Spatial Variability of Soil Strengths [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 985-993.

- [9] 刘爱娟,郑路,刘铁新,等.考虑动态临界加速度的地震边坡永久位移研究[J].地震工程学报,2017,39(5):876-882.  
LIU Aijuan, ZHENG Lu, LIU Tiebin, et al. Study of Seismic Slope Permanent Displacements with Dynamic Critical Acceleration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39 (5):876-882.
- [10] 徐建平,胡厚田,张安松,等.边坡岩体物理力学参数的统计特征研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(4):382-386.  
XU Jianping, HU Houtian, ZHANG Ansong, et al. On Statistical Characteristics of Physical and Mechanical Parameters in Slope Rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4):382-386.
- [11] 杨凯,刘东升,易前应,等.重庆市岩石抗剪强度参数统计分析及应用[J].后勤工程学院学报,2008,24(2):18-21,36.  
YANG Kai, LIU Dongsheng, YI Qianying, et al. Parameter-Statistic Analysis and Application of Rock Shearing Strength in Chongqing[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2008, 24(2):18-21,36.
- [12] 陈炜韬,王玉锁,王明年,等.黏土质隧道围岩抗剪强度参数的概率分布及优化实例[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊2):3782-3787.  
CHEN Weitao, WANG Yusuo, WANG Mingnian, et al. Probability Distribution and Optimizing Example of Shear Strength Parameters of Surrounding Rock in Cohesive Soil Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp2):3782-3787.
- [13] 罗冲,殷坤龙,陈丽霞,等.万州区滑坡滑带土抗剪强度参数概率分布拟合及其优化[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9):1588-1593.  
LUO Chong, YIN Kunlong, CHEN Lixia, et al. Probability-Distribution Fitting and Optimization of Shear Strength Parameters in Sliding Zone along Horizontal-stratum Landslides in Wanzhou City[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9):1588-1593.
- [14] 张红琼.重庆地区滑带土抗剪强度参数概率统计分析[J].灾害与防治工程,2007(1):62-67.  
ZHANG Hongqiong. Probability Distribution Statistics Analysis of Shear Strength Parameters in Sliding Zone along Horizontal-Stratum Landslides in Chongqing City[J]. Disaster and Control Engineering, 2007(1):62-67.
- [15] 谭忠盛,高波,关宝树.隧道围岩抗剪强度指标  $c$ ,  $\tan\varphi$  的概率特征[J].岩土工程学报,1999,21(6):760-762.  
TAN Zhongsheng, GAO Bo, GUAN Baoshu. The Probabilistic Property of Shear Strength Parameters  $c$  and  $\tan\varphi$  for Rock Mass around the Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):760-762.
- [16] 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):37-40,45.  
CHEN Lihong, CHEN Zuyu, LIU Jinmei. Probability Distribution of Soil Strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (1):37-40,45.
- [17] 苏卫卫,黄宏伟,张洁.上海软粘土抗剪强度指标概率分布类型研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(增刊2):1695-1699.  
SU Weiwei, HUANG Hongwei, ZHANG Jie. Risk Analysis of the Underground Passage through Rail Transit Construction Scheme[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp2):1695-1699.
- [18] 刘雪梅.杭州土层抗剪强度指标概率分布模型研究[J].城市勘测,2009(3):155-157.  
LIU Xuemei. Studies on Probability Distribution of Shear Strength Indexes for Several Stratums in Hangzhou Area [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(3):155-157.
- [19] 鲁燕儿,刘勇.岩体错动带抗剪强度参数的 Beta 概率分布[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1250-1256.  
LU Yan'er, LIU Yong. Beta Probability Distribution of Shear Strength Parameters of Weakness Interlayers in Rockmass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6):1250-1256.
- [20] LUMB P. Safety Factors and the Probability Distribution of Soil Strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1970, 7(3): 225-242.
- [21] 赵寿刚,兰雁,沈细中,等.蒙特卡罗法在土质边坡可靠性分析中的应用[J].人民黄河,2006,28(5):65-66,73.
- [22] 范明桥.粘性填筑土强度指标  $\varphi, c$  的概率特性[J].水利水运科学研究,2000(1):49-53.
- [23] 刘春,白世伟,赵洪波.粘性土土性指标的统计规律研究[J].岩土力学,2003,24(增刊2):180-184.  
LIU Chun, BAI Shiwei, ZHAO Hongbo. Statistical Regularity Research of Physical and Mechanical Indexes of Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp2):180-184.
- [24] 陆澄,别社安.天津软土土性指标的统计关系及概率分布模型研究[J].水道港口,2013,34(2):163-168.  
LU Cheng, BIE She'an. Study on Statistical Relationship and Probability Distribution Model of Tianjin Soft Soil Index[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(2):163-168.
- [25] 郑铁轶,朱剑锋,刘干斌,等.宁波软土物理力学参数概率分布及相关性研究[J].中国科技论文,2013,8(5):367-373.  
ZHENG Yiyi, ZHU Jianfeng, LIU Ganbin, et al. Probability and Correlation between Physical and Mechanical Parameters of Soft Clays in Ningbo Rail Transit Engineering[J]. China Sciencepaper, 2013, 8(5):367-373.
- [26] 严春风,刘东燕,张建辉,等.岩土工程可靠度关于强度参数分布函数模型的敏感度分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):36-39.  
YAN Chunfeng, LIU Dongyan, ZHANG Jianhui, et al. The Susceptibility Analysis of Reliability for the Probability Distribution Types of Parameters in Strength Criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (1):36-39.
- [27] 张继周,缪林昌.岩土参数概率分布类型及其选择标准[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3526-3532.

- ZHANG Jizhou, MIAO Linchang. Types and Selection Criteria of Probability Distribution of Rock and Soil Parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Supp2): 3526-3532.
- [28] 李侃, 巨能攀. 基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 23-27.
- LI Kan, JU Nengpan. Integrated Application of Monte-Carlo Simulation for Landslide Reliability Analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 23-27.
- [29] 水利水电工程结构可靠度设计统一标准: GB50199-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Unified Standard for Reliability Design of Hydraulic Engineering Structures: GB50199-2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [30] 侯小强. 基于 Monte Carlo 法的滑坡稳定可靠性分析研究: 以玉树西航电站 H<sub>1</sub> 滑坡为例[J]. 城市道桥与防洪, 2014(11): 210-213, 32.
- HOU Xiaoqiang. Analysis and Study on Reliability of Landslide Stability Based on Monte Carlo Method[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(11): 210-213, 32.
- [31] 李先文. 南昌城区主要岩土层参数特性及其关联性分析研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [32] 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.
- GUI Yong, LUO Sihai, DENG Tongfa. Effect of Strength Parameters Statistical Property on Slope Stability Reliability[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(4): 67-76.
- [33] 周春梅, 殷坤龙. 滑坡破坏概率分析及其在浙江张村滑坡中的应用[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(2): 1-4, 13.
- ZHOU Chunmei, YIN Kunlong. Probability Analysis of Slope Failures and Its Application for Zhangcun Landslide, Zhejiang Province[J]. Safety and Environmental Engineering, 2004, 11 (2): 1-4, 13.
- [34] 姚晨辉, 魏江波, 任光明, 等. 考虑岩土体参数变异性的滑坡破坏概率分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 100-103.
- YAO Chenhui, WEI Jiangbo, REN Guangming, et al. The Failure Probability Analysis of Landslide Considering Variability of Soil Parameters[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(2): 100-103.
- [35] 桂勇, 邓通发, 罗嗣海, 等. 基于蒙特卡罗边坡稳定二元体系的建立与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1979-1986.
- GUI Yong, DENG Tongfa, LUO Sihai, et al. Establishment of Slope Stability Dual Index System Based on Monte Carlo Simulation and Its Application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1979-1986.
- [36] 薛建荣, 王俊, 孟冰. 基于蒙特卡罗法的堤防边坡稳定分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(6): 16-17, 20.
- XUE Jianrong, WANG Jun, MENG Bing.基于蒙特卡罗法的堤防边坡稳定分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(6): 16-17, 20.
- [37] 李亮, 褚雪松, 于广明. 蒙特卡罗法在边坡失效概率计算中的应用[J]. 青岛理工大学学报, 2012, 33(6): 6-9.
- LI Liang, CHU Xuesong, YU Guangming. Application of Monte-Carlo Method in the Calculation of Failure Probabilities of Soil Slopes[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2012, 33(6): 6-9.
- [38] 徐江, 杨更社, 刘慧. 基于蒙特卡洛模拟法的冻土边坡可靠度评价[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(增刊2): 1433-1437.
- XU Jiang, YANG Gengshe, LIU Hui. Evaluation of Permafrost Slope with Monte Carlo Simulation Method and Program Design[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(Supp2): 1433-1437.
- [39] 徐继伟, 辛全才, 穆全平, 等. 基于蒙特卡罗法的二岔口土坝边坡稳定分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 112-113.
- XU Jiwai, XIN Quancai, MU Quanping, et al. Based on the Monte Carlo Method of the two-fork mouth earth dam slope stability analysis[J]. People's Yellow River, 2010, 32(3): 112-113.