

文章编号:1674-2869(2018)04-0425-05

# 冻融对黄土边坡稳定性的影响

边晓亚<sup>1,2</sup>, 白俊龙<sup>2</sup>, 张 军<sup>1</sup>

1. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;
2. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074

**摘 要:**冻融对黄土边坡的稳定性影响较大。利用 MATLAB 软件生成图像研究冻融条件下土性参数随机场的变化情况,选取干容重为主要研究参数,并运用毕肖普法和牛顿迭代法计算安全系数,分析冻融条件下黄土边坡稳定性。结果表明,干容重对黄土边坡稳定性具有重要影响,冻融通过改变干容重大小来影响黄土边坡的稳定性;黄土干容重初始值较小时,冻融后干容重会增大,边坡安全系数增大边坡趋于稳定,黄土干容重初始值较大时,冻融后干容重会减小,边坡安全系数急剧减小边坡趋于不稳定;存在一个最优干容重即冻融后干容重大小不发生改变,此时黄土边坡稳定性受冻融的影响较小。

**关键词:**黄土;冻融;随机场;干容重;边坡稳定性

**中图分类号:**TU445 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.04.015

## Influence of Freeze-Thaw on Stability of Loess Slope

BIAN Xiaoya<sup>1,2</sup>, BAI Junlong<sup>2</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Taiyuan 030006, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Freeze-thaw has great influence on the loess slope stability. The changes of soil property after freeze-thaw were studied with random field model by MATLAB software. Dry bulk density was selected as the main parameter. Bishop method and Newton iteration method were used to calculate safety factor of loess slope. The results indicated that the dry bulk density plays an important role on the loess slope stability. The freeze-thaw influenced the loess slope stability by changing the dry bulk density. At the smaller initial value of dry bulk density of loess, the safety factor of the loess slope increased to make the loess slopes more stable with the dry bulk density increasing after freeze-thaw, while at the larger initial value of dry bulk density of loess, the safety factor of the loess slope decreased to make the loess slopes unstable with dry bulk density decreasing after freeze-thaw. There is an optimum dry bulk density that will not change after freeze-thaw, having less effect on the loess slope stability.

**Keywords:** loess; freeze-thaw; random field; dry bulk density; slope stability

冻融做为强风化过程,容易造成土体膨胀产生裂缝而改变土体的结构,对土体工程性质产生较大影响<sup>[1]</sup>。加拿大北部不列颠哥伦比亚 Mount Robson 公园一处泥石流的形成就是因为表层土经冻融后结构变得松散,加之融雪水与季节性冻土

融化水在冻结层顶部聚集而导致的边坡失稳<sup>[2]</sup>。因此,在季节性冻土区进行工程建设应充分考虑冻融循环对土体边坡稳定性的影响。

在边坡稳定性研究中经常通过建立随机场来分析问题。Zhu 等<sup>[3]</sup>研究了一种生成多变量交叉

收稿日期:2017-12-04

**基金项目:**国家自然科学基金(51708428);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金(KLTLR-Y14-4);  
武汉工程大学科学研究基金(K201723)

**作者简介:**边晓亚,博士,讲师。E-mail:bianxy@hust.edu.cn

**引文格式:**边晓亚,白俊龙,张军.冻融对黄土边坡稳定性的影响[J].武汉工程大学学报,2018,40(4):425-429.

相关随机场的通用方法,并对各向异性的波动和交变参数的各向异性进行了验证。杨勇等<sup>[4]</sup>针对西安黄土土性参数变化,通过建立随机场的方式研究了黄土土性参数相互之间的关系。杨勇等<sup>[5]</sup>还就相同地段土性参数的相关距离进行统计分布特性研究。安民等<sup>[6]</sup>通过研究西北黄土地区边坡设计选型问题,从空间分布上研究黄土土性相关距离分布情况。杨勇等<sup>[7]</sup>采用递推空间法计算了西安黄土的相关距离均值,分析均值变化的空间范围和黄土土性参数指标折减系数的变化情况。倪万魁等<sup>[8]</sup>通过建立土层随机场的方式,更加清晰地研究了黄土主要力学指标的变化规律。

土性参数变化是影响边坡稳定性的重要因素,廖红建等<sup>[9]</sup>在分析黄土边坡失稳的发生过程和破坏机制时,针对不同含水率的黄土边坡稳定性进行了分析。胡再强等<sup>[10]</sup>通过不同温度下的冻融循环研究了黄土的黏聚力和内摩擦角的变化规律,及黄土冻融条件下黄土强度的变化规律。Guo等<sup>[11]</sup>在研究某高速公路路基加宽一侧路堑边坡时,通过实地监测、室内试验与数值模拟,研究了冻融过程中边坡土体含水率随地温的变化规律、含水率对边坡土体物理力学指标以及边坡稳定的影响规律。武丹<sup>[12]</sup>通过开展室内试验,分析了冻融循环次数和冻结温度对路基原土和黄土填料抗剪强度的影响,并在黄土路基边坡稳定性分析中验证了试验结果的正确性。王掌权等<sup>[13]</sup>在反复冻融条件下研究了黄土边坡稳定性的变化情况,发现黄土边坡冻融滑裂面与季节冻融深度线近似重合。胡伟等<sup>[14]</sup>在研究冻融对兰州饱和黄土边坡稳定性时,发现了冻融前后安全系数随干容重变化的规律并对边坡稳定性进行了分析。

由于试验所选土样自身土性的不同、试验条

件及冻融循环方式和力学试验方式的差异等因素,对冻融循环作用的研究在力学性质的规律性总结方面存在差异,研究成果也比较分散,更没有统一公认的规律提出<sup>[15]</sup>。本文引入随机场工具,通过 MATLAB 软件对土性参数随机场变化的研究,了解冻融循环下土性参数的变化,再由土性参数的变化情况分析黄土边坡安全系数的变化情况,得出冻融对黄土边坡稳定性影响的规律。

1 试验原理与方法

已有研究表明岩土参数具有一定的概率统计特征。Lacasse 和 Nadim<sup>[16]</sup>研究得出黏土的不排水抗剪强度近似服从对数正态分布,砂土的内摩擦角近似服从正态分布,所以可通过概率分布统计的方式来研究岩土参数的变化。Vanmarcke<sup>[17]</sup>通过概率统计方法就土体剖面建立了土性参数的随机场模型,该方法对土性参数空间变异性的描述方式较直接的概率统计方式更加精确,所以随机场的引入对于研究土性参数变化是具有很强的理论和工程实际意义。数值法具有简单快捷的特点,是当前分析边坡稳定性问题最常用的方法,通过改变边坡的可变参数,Singh 等<sup>[18]</sup>找出了露天矿边坡的薄弱环节,并提出加以防治的重点。本文运用 MATLAB 软件进行数值模拟,通过产生随机数的方式,就相关土性参数进行模拟,并建立随机场来模拟土性参数的空间变化情况(数据来源于文献<sup>[14]</sup>,见表 1)。最后,利用毕肖普条分法和牛顿迭代法对黄土边坡进行稳定性计算<sup>[19]</sup>。计算时通过任意一点做求解函数的切线,以期得出一个无限接近于函数的解。应用此法计算能有效减小因随机数的使用所带来的误差,具体模拟试验流程见图 1。

表 1 边坡模型计算参数  
Tab. 1 Calculation parameters of slope model

土样	实验条件	干容重 / (kN/m <sup>3</sup> )	饱和含水量 / %	饱和土容重 / (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	回弹模量 / MPa	侧压力 系数	泊松比
1	未冻融	17.30	19.7	20.70	40.0	26.1	14.388	0.560	0.259
	-10℃冻,20℃融	17.09	19.7	20.45	15.0	28.3	10.001	0.526	0.345
2	未冻融	16.80	21.4	20.39	25.0	27.4	11.489	0.540	0.351
	-10℃冻,20℃融	16.62	21.4	20.16	18.0	28.5	8.280	0.523	0.343
3	未冻融	16.30	23.2	20.70	8.0	33.1	8.969	0.454	0.312
	-10℃冻,20℃融	16.23	23.2	19.98	12.5	32.5	5.164	0.463	0.316
4	未冻融	15.80	25.0	19.76	4.0	33.4	8.023	0.450	0.310
	-10℃冻,20℃融	15.86	25.0	19.84	11.0	33.6	5.137	0.447	0.309
5	未冻融	15.30	27.1	19.44	4.2	30.2	7.808	0.497	0.332
	-10℃冻,20℃融	15.42	27.1	19.60	4.6	31.1	6.646	0.483	0.326

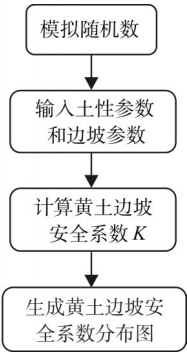


图1 边坡稳定性数值模拟流程

Fig. 1 Numerical simulation procedure for slope stability

2 土性参数分析

为研究影响边坡稳定性的主要因素,首先研究黏聚力、内摩擦角和回弹模量( $E_e$ )的变化。试验数据采用表1中的土样4,用MATLAB软件得到冻融前后土性参数变化图,见图2。由图2可知:冻融前干容重为 $15.80\text{ kN/m}^3$ 的土样在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环情况下,内摩擦角变化不大,黏聚力持续增大,回弹模量持续减小。黏聚力和回弹模量变化同步进行,增大或减小的规律具有一致性,且温度在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,两者变化不大。

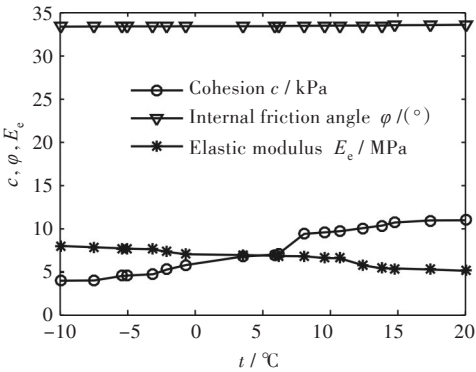


图2 冻融前后土性参数变化图

Fig. 2 Soil parameters before and after freeze-thaw

考虑到文献<sup>[14]</sup>中提到的冻融对土壤的干容重影响较特殊的情况,对冻融前后干容重的变化做进一步研究,结果见图3(a)。由图3(a)可以看出,冻融后土样1和土样2的干容重略微增大,土样3、土样4和土样5的干容重变小。因此,总体上冻融对不同土壤的干容重影响并没有一致性的规律可循,结果与初始干容重有很大关系。为使研究更具应用价值,对土样1、土样4及土样5的试验数据分别做模拟分析,由MATLAB软件生成如图3(b)所示的干容重随温度变化图,土样1的干容重在冻融前后有一定程度的减少,但是干容重小于

$17.30\text{ kN/m}^3$ 的土壤即土样4和土样5,在冻融前后干容重发生了一定程度的增加,由此可看出冻融对干容重的影响与土壤冻融前干容重本身的大小存在着一定关系。后文研究中着重考虑干容重变化对边坡稳定性的影响。

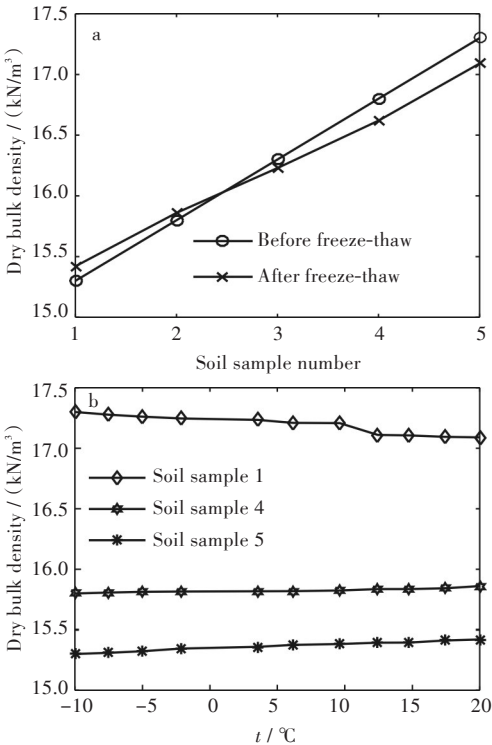


图3 土样干容重:(a)冻融前后变化情况, (b)随温度变化情况

Fig. 3 Dry bulk density of soil samples: (a) effect of freeze-thaw, (b) effect of temperature

3 边坡稳定性计算及分析

基于毕肖普法<sup>[20]</sup>建立随机场,则边坡的安全系数 $K$ 为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\alpha_i}} [W_i \tan \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \tag{1}$$

式(1)中: $W_i$ 为土条 $i$ 的重力; $l_i$ 为土条 $i$ 滑动面的弧长; $c_i$ 、 $\varphi_i$ 为滑动面的黏聚力及内摩擦角; $\alpha_i$ 为土条 $i$ 滑动面的法线与竖直线的夹角。

$$m_{\alpha_i} = \cos \alpha_i + (1/K) \tan \varphi_i \sin \alpha_i \tag{2}$$

采用牛顿迭代法来求解,先假定一个 $K$ 值由式(2)求得 $m_{\alpha_i}$ 值,再代入式(1)求出 $K$ 值。反复迭代,直至假定的 $K$ 值与求得的 $K$ 值相近为止。

在研究土性参数时,发现冻融前后黄土的干容重发生了反常变化,以下研究主要就干容重这一土性参数的变化对安全系数的影响进行分析。

研究采用表 1 中土样 1 的试验数据,生成安全系数分布图像。利用 MATLAB 软件,通过 plot 语言得出关于边坡稳定性的安全系数分布图,见图 4。由 MATLAB 计算数据分析得知:冻融前[图 4(a)],对于干容重为  $17.30\text{ kN/m}^3$  的边坡,最高点的  $K$  值为 1.831,即冻融前安全系数  $K_1=1.831$ ;冻融后[图 4(b)],最高点的  $K$  值为 1.331,即冻融后安全系数  $K_2=1.331$ 。由此得出:对初始干容重为  $17.30\text{ kN/m}^3$  的黄土边坡,经过  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冻融后,安全系数变小,即冻融循环使边坡不稳定。

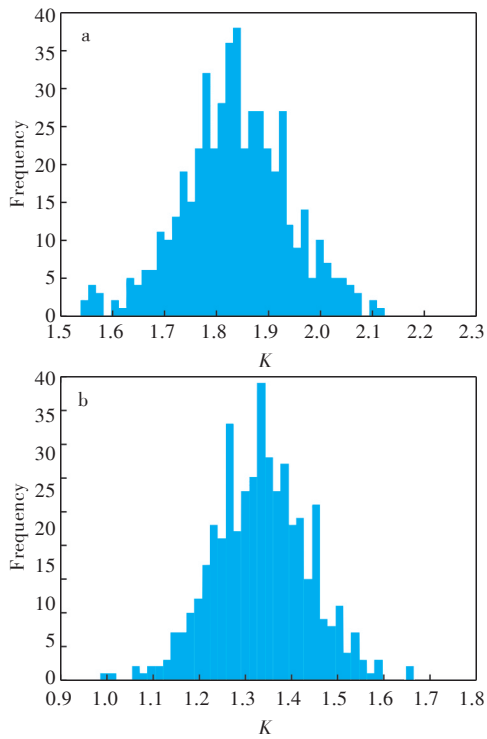


图 4 干容重为  $17.30\text{ kN/m}^3$  的黄土边坡安全系数分布图:  
(a)冻融前,(b)冻融后

Fig. 4 Distribution of safety factor of loess slope with  $17.30\text{ kN/m}^3$  dry density: (a) before freeze-thaw, (b) after freeze-thaw

采用相同的方法对表 1 中冻融前干容重分别为  $15.30\text{ kN/m}^3$ 、 $15.80\text{ kN/m}^3$  和  $16.80\text{ kN/m}^3$  黄土边坡进行分析,利用 MATLAB 计算分别得到各干容重边坡的安全系数,并绘制出柱状图,见图 5。

综上所述:在土壤干容重较小( $15.3\text{ kN/m}^3\sim 15.8\text{ kN/m}^3$ )的情况下,经冻融过后边坡的安全系数增大,边坡趋于稳定;在干容重较大( $16.8\text{ kN/m}^3\sim 17.3\text{ kN/m}^3$ )的情况下,经过冻融后边坡安全系数明显下降,边坡稳定性降低。上述结果表明,黄土边坡存在一个临界干容重(本文称为最优干容重),即冻融后干容重未发生明显的变化,此时边坡受冻融的影响最小。这与图 3(a)干容重的变化

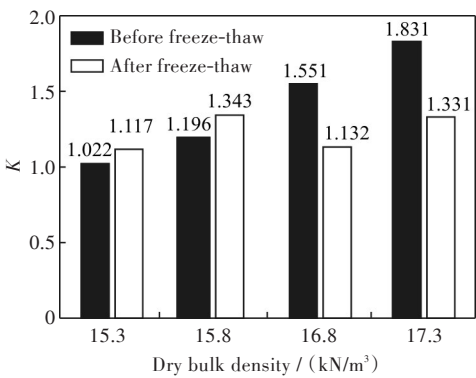


图 5 不同干容重下黄土边坡冻融前后安全系数  
Fig. 5 Safety factors of loess slopes with different dry bulk densities before and after freeze-thaw

规律相吻合。在忽略其他因素影响的前提下,经过冻融后黄土边坡的稳定性变化规律与土壤干容重的变化规律一致。因此,除黏聚力和内摩擦角外,干容重也应视为影响边坡稳定性的重要土性参数。

本文得出的结论与文献<sup>[14]</sup>运用 FLAC3D 软件模拟和强度折减系数法计算得出的数据以及结论基本吻合,利用不同的计算方法和软件进行数值模拟分析得到的数值差异并不明显,结论也完全一致,这也说明了该结论的正确性。

4 结 语

冻融对黄土土性参数有一定的影响,尤其对土的干容重影响较为特殊。本文通过建立随机场,运用不同的数值模拟软件进行计算,得到以下结论:

- 1)对于冻融前初始干容重较小的黄土边坡,冻融后干容重会有所增加,边坡安全系数也相应增大,边坡稳定性增强;
- 2)对于冻融前初始干容重较大的黄土边坡,冻融后边坡安全系数明显减小,边坡稳定性减弱;
- 3)存在一个最优干容重,对处在最优干容重的黄土边坡经过冻融后,土壤干容重不会发生明显改变,边坡稳定性受冻融的影响最小。通过相关研究找到最优干容重的准确数值,有望为黄土边坡的防治提供有力的理论依据,具有重要的工程实际意义。

参考文献:

[1] 沈珠江. 抗风化设计——未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 866-869.  
[2] GEERTSEMA M, HEES M V, CHIARLE M, et al.

Debris flow on a seasonally frozen rupture surface at Moose Lake, British Columbia [C]// Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change. Berlin: Springer International Publishing, 2014:263-270.

[3] ZHU H, ZHANG L M, XIAO T, et al. Generation of multivariate cross-correlated geotechnical random fields [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 86:95-107

[4] 杨勇, 范文, 张海峰, 等. 西安黄土土性参数随机场模型的适用性探讨[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 357-362.

[5] 杨勇, 张海峰, 范文, 等. 西安黄土土性相关距离的统计分布特性研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 160-165.

[6] 安民, 杨宏丽, 苏武斌. 西北黄土地区边坡设计选型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(6):66-71.

[7] 杨勇, 范文, 张海峰, 等. 用于计算西安黄土相关距离的空间范围的探讨[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 92-97.

[8] 倪万魁, 牛富俊, 刘东燕. 黄土土性的空间自相关性研究[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(2):4-8.

[9] 廖红建, 李涛, 彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7):1939-1944.

[10] 胡再强, 刘寅, 李宏儒. 冻融循环作用对黄土强度影响的实验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(2):14-18.

[11] GUO Y, SHAN W, JIANG H, et al. The Impact of freeze-thaw on the stability of soil cut slope in high-latitude frozen regions [C]// SHAN W, GUO Y, WANG F, et al. Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering. Berlin: Springer International Publishing, 2014:85-98.

[12] 武丹. 冻融循环作用对黄土路基性质及边坡稳定性的影响研究[D]. 太原:太原理工大学, 2017.

[13] 王掌权, 许健, 郑翔, 等. 反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2):15-21.

[14] 胡伟, 吕玉香, 姚晓亮, 等. 冻融循环对兰州黄土边坡稳定性的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 23(9):7214-7221.

[15] 刘寅. 冻融循环作用对黄土力学性质损伤的试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2013.

[16] LACASSE S, NADIM F. Uncertainties in characterising soil properties [C]// Uncertainty in the Geologic Environment: from Theory to Practice, Madison: ASCE, 1996:49-75.

[17] VANMARCKE E H. Random fields: analysis and synthesis[M]. Cambridge: MIT Press, 1983.

[18] SINGH T N, PRADHAN S P, VISHAL V. Stability of slopes in a fire-prone mine in Jharia Coalfield, India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(2): 419-427.

[19] 杨明, 张可能, 刘宇飞, 等. 基于 MATLAB 的均质土坡稳定可靠度的蒙特卡罗模拟[J]. 地质与勘探, 2009, 45(1):89-94.

[20] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

本文编辑:苗 变