

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.02.03

反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析

王掌权, 许 健, 郑 翔, 任建威
(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 春季冻土融化导致黄土地区边坡冻融灾害频繁发生, 因对其机理性研究的不足, 目前对此尚不能进行量化分析和预测。本文首先对西安 Q_3 原状黄土进行室内冻融试验, 研究冻融作用对其剪切强度的影响; 其次, 基于室内试验数据, 运用有限元强度折减法对黄土边坡冻融失稳特征进行数值计算分析。研究发现: 黄土试样粘聚力随冻融次数增加呈指数衰减趋势; 粘聚力随含水率增加表现出线性衰减特征且冻融后粘聚力与含水率的变化曲线近似重合; 内摩擦角无明显规律性变化。黄土边坡安全系数随冻融次数增加亦呈指数衰减趋势, 这与粘聚力随冻融次数的变化规律是一致的; 安全系数随冻融深度和冻融区初始含水率增加显著减小且降低幅度逐渐增加; 安全系数随坡度系数和放坡级数增加近似呈线性增加特征。黄土边坡冻融滑裂面与季节冻融深度线近似重合。

关键词: 黄土边坡; 冻融作用; 强度折减法; 安全系数

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)02-0015-07

Analysis on freezing-thawing stability of slope in loess region

WANG Zhangquan, XU Jian, ZHENG Xiang, REN Jianwei

(Xi'an University of Architecture and Technology, School of Civil Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The thawing of frozen soils in spring has caused the frequent freezing-thawing disaster for slope in loess regions. Moreover, the disaster can't be quantitatively analyzed and predicted, which is induced by the weak mechanism research. Based on that, the paper firstly carried out freeze-thaw test to study the influence of freeze-thaw action on the shear strength of xi'an Q_3 undisturbed loess. The results show that the cohesion of loess exponentially decreases with freezing and thawing times increasing. With the increase of water content, the cohesion linearly decreases, and has a approximately same variation after freezing and thawing. The internal friction angle has no obvious variation during the whole freezing-thawing process. The safety factor of loess slope also exponentially decreases with freezing and thawing times increasing, which is corresponding with the relationship between the cohesion and freezing-thawing times. With the increase of the freezing-thawing depth and water content in active layer, the safety factor decreases with a growing gradient. The safety factor linearly increases with the increase of slope coefficient and sloping steps. The freeze-thaw slip surface of the loess slope is approximately consistent with the seasonal freeze-thaw depth line.

Keywords: loess slope; freezing-thawing action; strength reduction method; safety factor

0 引言

黄土是一种在特定环境中形成的具有特殊性质的土^[1], 黄土边坡的稳定性及防护对策历来是工程建设中

特别关注的技术课题。对此, 已经有很多人开展了比较深入系统的研究^[2-4]。但由于黄土地区处于季节冻土区, 黄土边坡受季节冻融作用的影响显著, 每年春季发生的冻融灾害非常频繁。20 世纪 80 年代以来, 在季节性冻融

收稿日期: 2016-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478385, 51208409)

第一作者: 王掌权(1989-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与工程研究。E-mail: wzhangquan@qq.com

通讯作者: 许 健(1980-), 男, 山东泰安人, 博士, 副教授, 主要从事寒区岩土工程研究。E-mail: xujian@lzb.ac.cn

作用强烈的我国西北黄土高原地区,相继发生了洒勒山、古刘、龙西、黄茨等一系列重大滑坡灾害,造成巨大的生命财产损失。针对冻融作用对黄土体物理力学性质影响问题,前人对其进行了大量科学研究。周弘等^[5]以陕西富平重塑黄土为研究对象,利用变异性分析方法,对经历不同冻融循环次数后黄土物理性质指标进行了研究。叶万军等^[6]研究了冻融作用对超固结黄土和正常固结黄土物理力学性质的影响,揭示了冻融循环导致黄土边坡剥落病害产生的机理。王铁行等^[7]以非饱和原状黄土为试验对象,研究冻融循环对其剪切强度特性的影响。穆彦虎^[8]对经历不同冻融次数的压实黄土进行电镜扫描,探讨其微观结构与宏观性质之间的关系,揭示冻融循环对压实黄土结构影响的过程与机理。肖东辉^[9]等通过试验得出了冻融循环与黄土孔隙比及渗透性的关系。上述试验研究多以重塑(压实)或原状黄土为对象开展室内冻融试验,研究结果对揭示黄土体冻融特性有积极作用。但目前针对冻融期黄土边坡稳定性的研究尚处在起步阶段,研究者虽对冻融期黄土滑坡的影响因素进行了初步研究^[10-13],但只给出一些定性和经验性结论,尚不能很好的对黄土边坡冻融稳定性进行量化分析和预测。

基于此,本文以西安 Q₃ 原状黄土为对象开展室内冻融试验,研究冻融作用对黄土体强度的影响规律。然后基于室内试验数据,利用有限元强度折减法分析冻融作用对黄土边坡稳定性的影响。研究成果对规范寒区黄土边坡设计,预测黄土边坡冻融灾害,保证广大居民生命财产安全以及加快黄土地区城镇化进程等具有重要意义。

1 原状黄土冻融强度室内试验研究

为了研究冻融作用对黄土体抗剪强度的劣化作用,取西安市长安区某基坑工程原状 Q₃ 黄土。设计 5 种含水率,分别进行不同冻融循环次数下的室内直剪试验(表 1)。

表 1 试样种类
Table 1 Sample type

干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w / \%$	冻融次数 N	冻结温度 与时间	融化温度 与时间
1.7	15	0、2、5、10、20	-20℃, 12h	20℃, 12h
	16.5			
	18			
	19.5			
	21.0(饱和)			

1.1 粘聚力

1.1.1 冻融循环次数对粘聚力的影响

图 1 所示为粘聚力与冻融次数变化规律曲线。从图中可以看出,黄土试样的粘聚力均随冻融次数增加逐渐减小,但降低幅度逐渐减小。冻融循环 5 次后,试样粘聚

力趋于一个稳定数值,呈指数衰减趋势。分析其原因,主要是由于土颗粒周围水膜在低温下冻结,孔隙水结晶对土颗粒产生挤压作用力,破坏颗粒间联结作用,导致土体结构强度逐渐弱化,粘聚力降低。多次冻融后,黄土体结构强度趋于稳定的残余强度,粘聚力亦趋于稳定。

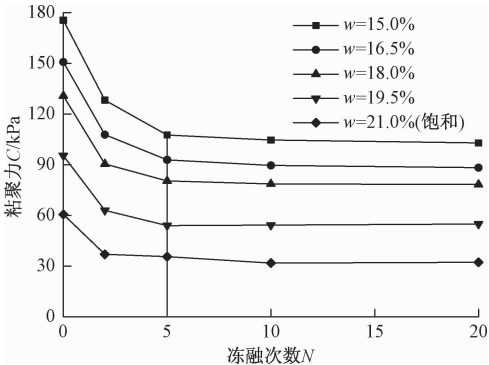


图 1 粘聚力与冻融次数关系曲线
Fig.1 The relationship between cohesion and freezing-thawing times

1.1.2 含水率对粘聚力的影响

图 2 给出原状黄土冻融过程粘聚力与含水率变化关系曲线。从图中可以看出,随着含水率增加,粘聚力表现出相似的变化规律,都呈现出线性衰减特征。分析其原因,含水率增加使得土颗粒之间结合水膜增厚,导致土体粘聚强度降低。此外,从图中还可以看出,由于冻融作用对黄土体结构强度造成损伤,随着冻融过程进行,土体强度趋于一个稳定的冻融残余强度数值(图 2),因而冻融后粘聚力与含水率的变化曲线近似重合。

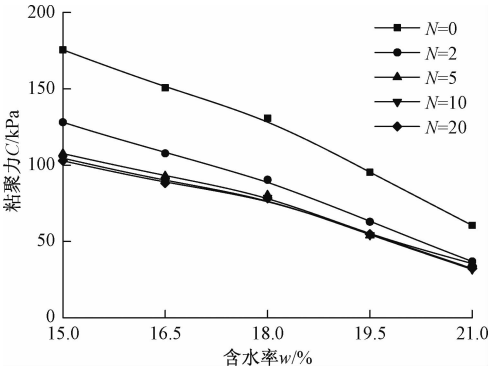


图 2 粘聚力与含水率关系曲线
Fig.2 The relationship between cohesion and water content

1.2 内摩擦角

图 3 所示为内摩擦角随冻融次数变化规律曲线。从图 3 中可以看出,试样内摩擦角随冻融次数变化呈现出波浪形变化趋势,且波动范围较小,波动幅度在 5°以内,无明显规律性变化。分析其原因,主要是因为影响黄土体内摩擦强度的主要因素是黄土颗粒之间的

接触面积和土颗粒形状,而冻融作用对以上因素并无明显影响。

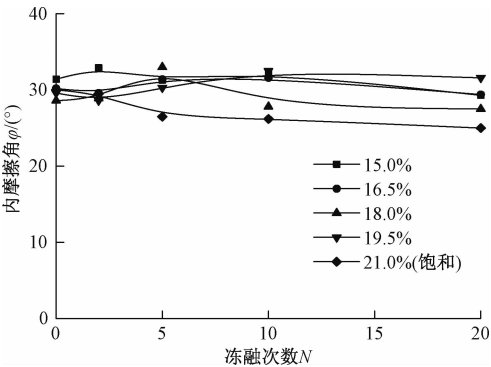


图 3 内摩擦角与冻融次数关系曲线

Fig.3 The relationship between internal friction angle and freezing-thawing times

2 黄土边坡冻融稳定性有限元强度折减法

近年来,随着力学理论的发展与计算技术的提高,有限元法在边坡稳定分析中备受重视,基于有限元的强度折减法更是得到较好的应用^[14]。与传统法相比,它能够模拟各种复杂地质、地貌条件下的边坡工程,而且不需要任何假设,便能够自动搜索出最危险滑裂面并计算出对应的最小安全系数,同时它还可以真实的反映出坡体失稳及塑性区的开展过程。目前研究者普遍采用有限元强度折减法对常温下边坡的稳定性进行分析,而利用该方法对冻融条件下边坡的稳定性进行分析尚缺乏研究。基于此,本文考虑黄土冻融过程抗剪强度劣化特性,建立起适合黄土边坡冻融稳定性的评价方法。

2.1 有限元强度折减法基本原理

首先对边坡土体抗剪强度参数 C 、 φ 按一定的系数 F_s 进行折减。然后,在外荷载保持不变的情况下,将抗剪强度参数 C' 、 φ' 代入边坡模型中进行数值分析。不断增大 F_s ,直到某一个折减系数下边坡土体发生失稳。记发生整体失稳前的折减系数值为边坡的安全系数 F_s ,即:边坡土体所能发挥的最大抗剪强度与边坡土体失稳时所产生的实际剪应力之比。

其中参数 C' 、 φ' 的算法如下式:

C' = C/F_s (1)

φ' = arctan(tanφ/F_s) (2)

2.2 失稳判据

目前,利用弹塑性有限元强度折减法分析边坡稳定性时,主要有三种失稳判据:(1)利用特征点(一般为坡顶点)处位移变化趋势作为边坡失稳判据^[15];(2)以边坡土

体等效塑性区贯通性作为边坡失稳判据^[16];(3)利用强度折减法进行边坡稳定性数值分析时,在规定的迭代次数内计算不能收敛^[17]。根据现有研究成果,三类判据在理论上具有统一性^[18]:以理想弹塑性理论为基础计算边坡稳定性,当边坡土体塑性区由坡脚贯通至坡顶时,边坡土体发生整体失稳,特征点位移也无限增长;从有限元计算表现来看,由于位移无限增长,因而无法迭代收敛。鉴于以有限元计算的收敛性作为边坡失稳判据更直接方便,本文以上述判据计算得到边坡稳定安全系数。

3 黄土边坡冻融稳定性算例

3.1 数值计算模型

黄土地区土质边坡数值计算模型见图 4,按照平面应变单元建立有限元模型,边界条件为左右两侧水平约束,下部固定,其余为自由边界。主要研究冻融次数 N 、冻融深度 h 、初始含水率 w 、坡度系数 m (边坡坡度 1:m)以及坡形(放坡级数)对边坡稳定性的影响,各影响因素具体水平因子见表 2。I~IV 区域为冻融影响区,每层厚度为 0.5 m,其含水率及力学参数受冻融作用的影响;V 为边坡土体未冻融区域,其含水率及力学参数均视为不受冻融作用的影响。下文进行计算分析时,各影响因素的变化均指冻融影响区 I~IV。

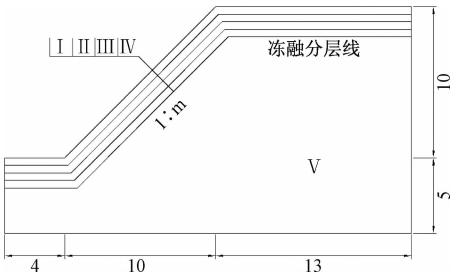


图 4 黄土边坡数值计算模型(单位:m)

Fig.4 The numerical model of loess slope

表 2 水平因子

Table 2 Level factor

影响因素	影响因子 1	影响因子 2	影响因子 3	影响因子 4	影响因子 5
冻融次数	0	2	5	10	20
冻融深度 h /m	0	0.5	1.0	1.5	2.0
初始含水率 w /%	15	16.5	18	19.5	21
坡度系数 m	0.5	0.75	1	1.25	1.5
坡形(放坡级数)	0	1	2	-	-

注:“-”表示不存在该因子;仅坡度系数为 0.5 及 0.75 的边坡考虑坡形对稳定性影响。

3.2 计算力学参数

依据前述原状黄土室内冻融循环抗剪强度试验数据(图 1~图 3),并类比其它类似岩土体的物理力学参数取值,综合确定本文的计算参数。基于前述内摩

擦角冻融过程试验数据分析(图3),内摩擦角随冻融次数变化呈波浪形变化趋势,但波动范围较小。因而

计算分析过程中内摩擦角 φ 取试验数据统计分析的平均值,取值为 29.01° 。其它力学参数具体见表3。

表3 计算力学参数表

Table 3 Calculating mechanical parameters

冻融次数 N	含水率 $w/\%$	粘聚力 C/kPa	弹性模量 E/MPa	冻融次数 N	含水率 $w/\%$	粘聚力 C/kPa	弹性模量 E/MPa
0	15	175.6	90	10	15	104.6	40
	16.5	150.8	75		16.5	89.6	33
	18	130.8	62.5		18	78.6	27.5
	19.5	95.4	52		19.5	54.3	23
	21	60.6	45		21	31.8	18
2	15	128.2	60	20	15	102.9	40
	16.5	107.8	50		16.5	88.3	33
	18	90.5	42		18	78.3	27.5
	19.5	63	34		19.5	54.9	23
	21	37	28		21	32.3	18
5	15	107.6	45				
	16.5	92.9	37.5				
	18	80.4	31.25				
	19.5	54	26				
	21	35.6	20				

3.3 计算结果分析

3.3.1 冻融次数对边坡稳定性的影响

图5所示为冻融次数对边坡稳定性的影响。从图中可以看出,黄土边坡安全系数随冻融次数增加逐渐减小,但降低幅度逐渐减小,最终维持在一个稳定数值,呈指数衰减趋势。这与前述黄土体粘聚力随冻融

次数的变化规律是一致的(图6)。分析其原因,安全系数主要决定于冻融过程黄土抗剪强度劣化特性。由前述黄土室内冻融循环抗剪强度试验数据分析,冻融过程粘聚力随冻融次数增加呈指数衰减的变化规律,而冻融作用对内摩擦角无明显影响。因而冻融过程黄土边坡安全系数与粘聚力表现出相似的变化规律。

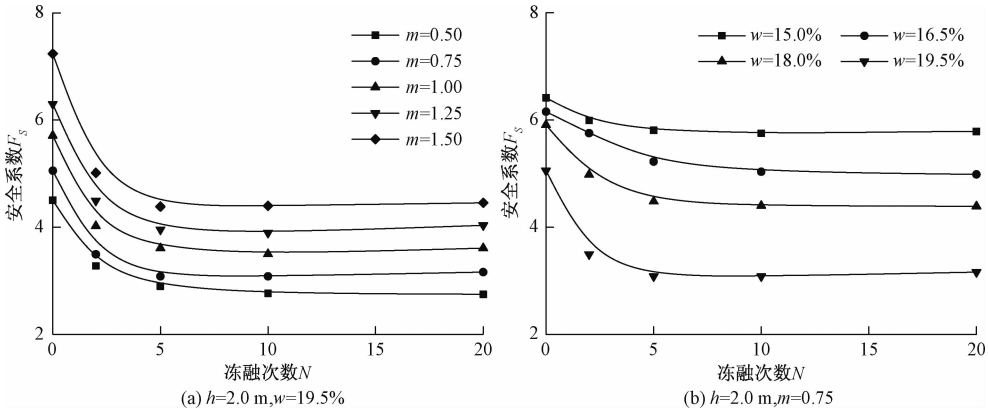


图5 安全系数与冻融次数关系曲线

Fig.5 The relationship between safety factor and freezing-thawing times

3.3.2 冻融深度对边坡稳定性的影响

图7所示为黄土边坡安全系数与冻融深度关系曲线。从图中可以看出,冻融深度增加导致边坡安全系数明显减小且衰减速率有增大趋势。这主要是因为冻融深度增加导致黄土边坡土体冻融损伤范围增大,从而加速了边坡失稳过程。从图中还可以看出,随着冻融区含水量增加,安全系数随冻融深度的衰减幅值和速率越大,这说明冻融过程含水量差异对黄土边坡安全系数的影响是十分显著的。

3.3.3 冻融区初始含水率对边坡稳定性的影响

图8给出黄土边坡土体冻融区初始含水率对安全系数的影响规律曲线。从图中可以看出,随冻融区土体初始含水率增加,安全系数显著减小且降低幅度逐渐增加。分析其原因,由前述黄土冻融过程抗剪强度室内试验数据分析,粘聚力随含水量增加表现出线性衰减的变化特征(图2),导致黄土体抗剪强度急剧降低,从而使得边坡安全系数大大降低。

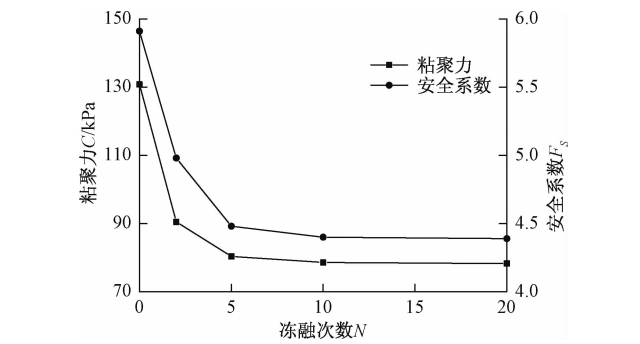


图 6 粘聚力与安全系数随冻融次数变化规律曲线 ($w=18\%$)

Fig. 6 The law of cohesion and safety factor varying with freezing-thaw times ($w=18\%$)

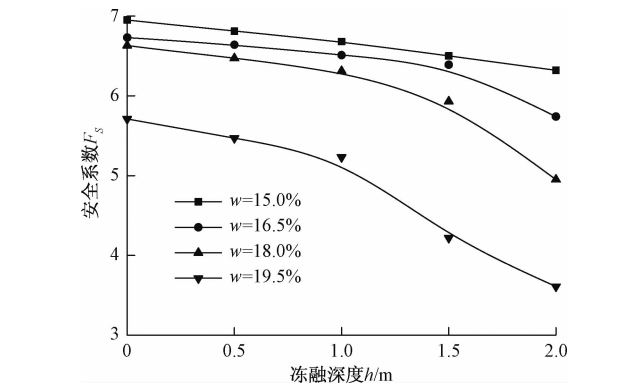


图 7 安全系数与冻融深度关系曲线 ($m=1.0, N=20$)

Fig. 7 The relationship between safety factor and freeze-thaw depth ($m=1.0, N=20$)

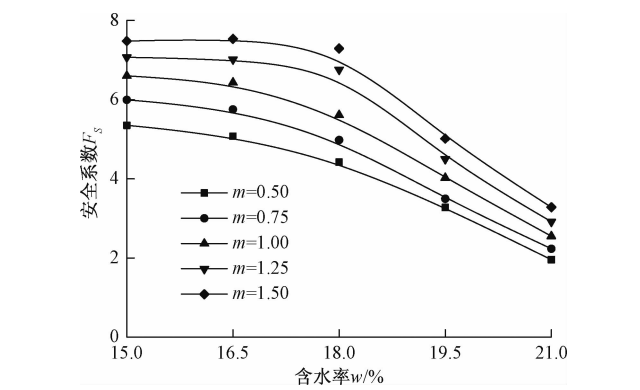


图 8 安全系数与含水率关系曲线 ($N=2, h=2.0\text{ m}$)

Fig. 8 The relationship between safety factor and water content ($N=2, h=2.0\text{ m}$)

3.3.4 坡度系数对边坡稳定性的影响

图 9 给出坡度系数对黄土边坡稳定性影响规律曲线。从图中可以看出,随坡度系数增加,安全系数表现出相似的变化规律,都呈现出线性增加特征。这说明边坡坡度变化对边坡稳定安全系数的影响是十分显著的,减缓坡度是防止寒区黄土边坡发生冻融灾害的有效工程处置措施。从图中还可以看出,冻融后安全系数随坡度系数的变化规律曲线近似重合,这是由于冻融过程黄

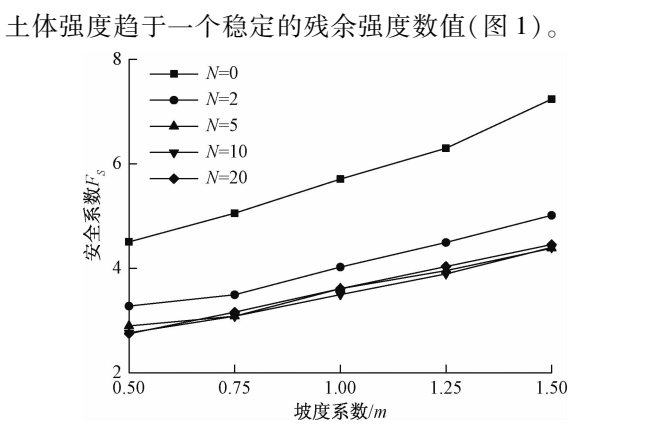


图 9 安全系数与坡度系数关系曲线 ($h=2.0\text{ m}, w=19.5\%$)

Fig. 9 The relationship between safety factor and slope coefficient ($h=2.0\text{ m}, w=19.5\%$)

3.3.5 坡形对边坡稳定性的影响

图 10 给出黄土边坡安全系数与坡形关系曲线。从图中可以看出,安全系数随边坡放坡级数增加近似呈线性增加特征。这表明在高大边坡中部设置分级平台,分级放坡,从而改变边坡坡形亦是防止寒区黄土边坡发生冻融灾害的一种有效工程处置措施。

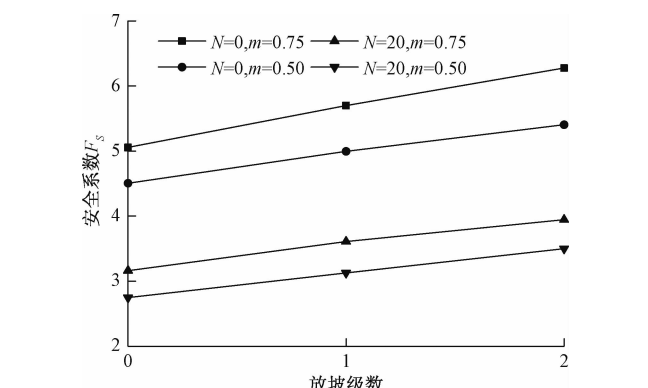


图 10 安全系数与坡形关系曲线 ($h=2.0\text{ m}, w=19.5\%$)

Fig. 10 The relationship between safety factor and slope form ($h=2.0\text{ m}, w=19.5\%$)

3.3.6 黄土边坡冻融失稳特征

图 11 所示为黄土边坡冻融失稳等效塑性区云图。图 11(a) 为未冻融边坡失稳特征,其滑裂面形状符合常规粘性土边坡圆弧滑动面的特征。图 11(b) ~ (d) 为冻融后黄土边坡失稳特征。由图可见,与常温下边坡失稳特征不同的是,黄土边坡冻融滑裂面与季节冻融深度线近似重合。分析其原因,春融季节黄土边坡表面冻融活动层土体冰晶融化,土体疏松,粘聚力降低,抗剪强度大大下降。因而在具有很好的临空面及边坡表面没有阻挡物的条件下,沿着冻融活动层界面易产生浅层冻融滑塌灾害。

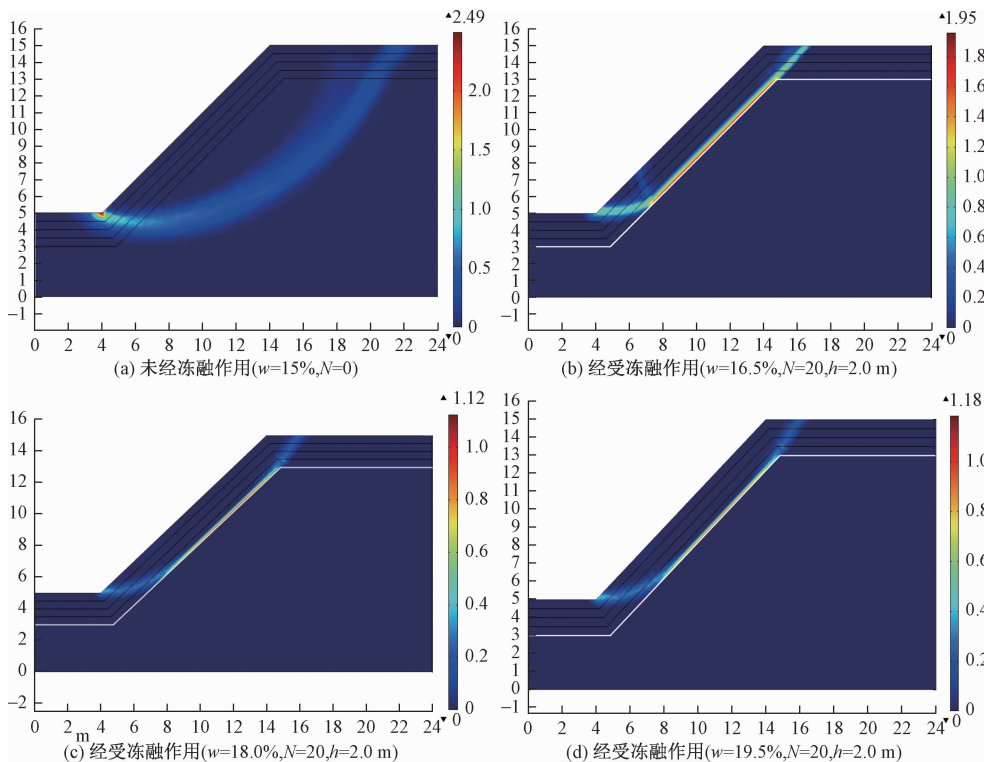


图 11 黄土边坡冻融失稳等效塑性区云图 ($m = 1.0$, 白色实线表示冻融深度线)

Fig. 11 Equivalent plastic plot of freezing-thawing stability for loess slope ($m = 1.0$)

4 结论

(1) 黄土试样粘聚力随冻融次数增加逐渐减小, 且降低幅度逐渐减小, 最终维持在一个稳定数值, 呈指数衰减趋势; 粘聚力随含水率增加表现出线性衰减特征且冻融后粘聚力与含水率的变化曲线近似重合; 内摩擦角随冻融次数变化呈现出波浪形变化趋势, 无明显规律性变化。

(2) 黄土边坡安全系数随冻融次数增加亦呈指数衰减趋势, 这与黄土体粘聚力随冻融次数的变化规律是一致的; 安全系数随冻融深度和冻融区初始含水率增加显著减小且降低幅度逐渐增加; 安全系数随坡度系数和放坡级数增加近似呈线性增加特征。

(3) 春融季节黄土边坡表面冻融活动层土体冰晶融化, 土体疏松, 粘聚力降低, 抗剪强度大大下降。在具有很好的临空面及边坡表面没有阻挡物的条件下, 沿着冻融活动层界面易产生浅层冻融滑塌灾害。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社出版发行, 1996.
- LIU Zudian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1996.

- [2] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 288 - 292.
- XU Ling, DAI Fuchu, KUANG Guolin, et al. Analysis of some special engineering-geological problems of loess landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 288 - 292.
- [3] 刘悦, 黄强兵. 黄土路堑边坡开挖变形机理的离心模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 59 - 62.
- LIU Yue, HUANG Qiangbing. Centrifuge model test on the deformation mechanism of loess cut slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 59 - 62.
- [4] 李荣建, 郑文, 刘军定, 等. 考虑初始结构性参数的结构性黄土边坡稳定性评价[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 144 - 150.
- LI Rongjian, ZHENG Wen, LIU Junding, et al. Evaluation of stability of structural loess slope considering initial structural parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 144 - 150.
- [5] 周泓, 张泽, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土基本物理性质变异性研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 162 - 168.
- ZHOU Hong, ZHANG Ze, QIN Qi, et al. Research on

- variability of basic physical properties of loess under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 162–168.
- [6] 叶万军, 杨更社, 彭建兵, 等. 冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 199–205.
- YE Wanjun, YANG Gengshe, PENG Jianbing, et al. Test research on mechanism of freezing-thawing cycle resulting in loess slope spalling hazards in luochuan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 199–205.
- [7] 王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱和和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2378–2382.
- WANG Tiehang, LUO Shaofeng, LIU Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2378–2382.
- [8] 穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919–1925.
- MU Yanhu, MA Wei, LI Guoyu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919–1925.
- [9] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1192–1198.
- XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze, et al. Research on the Lanzhou loess's permeabilities changing with freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1192–1198.
- [10] 罗东海. 冻融期黄土滑坡试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- LUO Donghai. Experiment for loess landslide of freezing-thawing[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [11] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide disaster in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou Press, 2006.
- [12] 王宁, 毛云程, 张德文, 等. 冻融循环对季节冻土区黄土路堑边坡的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011(4): 79–84.
- WANG Ning, MAO Yuncheng, ZHANG Dewen, et al. The influence of freeze-thaw cycles on loess cutting slope in seasonal frozen regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011(4): 79–84.
- [13] 王念秦, 姚勇. 季节冻土区冻融期黄土滑坡基本特征与机理[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 163–166.
- WANG Nianqin, YAO Yong. Characteristics and mechanism of Landslides in loess during freezing-thawing periods in seasonally frozen ground regions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 163–166.
- [14] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 243–256.
- CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 243–256.
- [15] 林杭, 曹平, 宫凤强. 位移突变判据中监测点的位置和位移方式分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 9(9): 1433–1438.
- LIN Hang, CAO Ping, GONG Fengqiang. Analysis of locations and displacement modes of monitoring points in displacement mutation criteria[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 9(9): 1433–1438.
- [16] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1–8.
- LUAN Maotian, WU Yajun, NIAN Tingkai. A Criterion for Evaluating Slope Stability Based on Development of Plastic Zone by Shear Strength Reduction FEM[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(3): 1–8.
- [17] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332–336.
- ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, ZHANG Yufang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332–336.
- [18] 裴利剑, 屈本宁, 钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3337–3341.
- PEI Lijian, QU Benning, QIAN Shanguang. Uniformity of slope instability criteria of strength reduction with FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3337–3341.