

- 国林业出版社, 2002.
- ZHAO Renjie, YU Yunshui. Bamboo plywood technology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House 2002.
- [5] 王凯. 竹材在土木建筑工程上的应用[J]. 北京木材工业, 1996(3): 3-7.
- WANG Kai. The application of bamboo in civil engineering [J]. Beijing wood industry, 1996(3): 3-7.
- [6] 王爱民. 钢框竹胶板组合模板在单层工业厂房中的应用[J]. 中外建筑, 2005(3): 122-123.
- WANG Aimin. Combination of steel frame and bamboo veneer template in the application of single industrial. [J]. Chinese and foreign construction, 2005(3): 122-123.
- [7] 田黎敏, 郝际平, 寇跃峰. 喷涂保温材料-原竹骨架组合墙体抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018(6): 102-109.
- TIAN Limin, HAO Jiping, KOU Yuefeng, et al. Research on seismic behavior of bamboo framing walls with sprayed thermal insulation material[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 102-109.
- [8] 郝际平, 寇跃峰, 田黎敏, 等. 基于竹材含水率的喷涂多功能环保材料-原竹黏结界面抗滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018(7): 154-161.
- HAO Jiping, KOU Yuefeng, TIAN Limin, et al. Experimental study on anti-slip behavior of multi-functional environmental material-bamboo interface based on moisture content of bamboo [J]. Journal of Building Structures, 2018(7): 154-161.
- [9] 田轲. 原竹骨架轻质材料组合楼板抗弯性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- TIAN Ke. Study on bending capacity of original bamboo skeleton lightweight composite floor slab[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: GJ/T 70-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of basic properties of construction mortar: GJ/T 70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [11] 中华人民共和国建设部. 建筑用竹材物理力学性能试验方法: JG/T199-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo used in building: JG/T199-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [12] 中华人民共和国建设部. 木结构设计规范: GB 50005-2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for the design of timber structures: GB 50005-2003[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [13] 周乾. 竹材混凝土空心楼板受力性能研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- ZHOU Qian. The research and analysis of bamboo concrete hollow floor slab stress performance [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: 50009-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

(编辑 桂智刚)

# 黄土地区边坡冻融剥落病害机理及稳定性分析

许 健<sup>1</sup>, 郑 翔<sup>1</sup>, 张 辉<sup>2</sup>

1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 通过现场调研、室内冻融试验及计算分析开展了黄土边坡冻融剥落病害机理及稳定性的研究。结果表明: 冻融剥落病害分为表层冻融剥蚀、冻融层状剥落及微型冻融崩塌。随着冻融次数的增加, 粘聚力呈指数衰减趋势; 随着含水率的增加, 粘聚力显著减小且在经历冻融后与含水率的变化曲线近似重合; 而随着冻融次数的增加, 内摩擦角并无明显变化, 随含水率增加, 内摩擦角呈线性衰减特征, 但衰减幅度不大。安全系数随冻融次数增加亦呈指数衰减趋势, 随剥落体含水率增加显著降低且冻融后安全系数与含水率的变化曲线近似重合, 随冻融深度增加呈指数衰减趋势且含水率很高时其指数变化规律不明显。

**关键词:** 黄土边坡; 冻融作用; 剥落; 安全系数

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0477-08

## Analysis on mechanism and stability of freeze-thaw spalling disease for slope in loess region

XU Jian<sup>1</sup>, ZHENG Xiang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>

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

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The paper studied mechanism and stability of freeze-thaw spalling disease through field investigation, indoor freeze-thaw test and computational analysis. The results show that the freeze-thaw spalling disease can be divided into freeze-thaw erosion of slope surface, freeze-thaw layer spalling and small freeze-thaw collapse. The cohesion exponentially decreases as freezing, and thawing times increase. With the increase of water content, the cohesion decreases greatly and has an approximately same variation after freezing and thawing. The internal friction angle has no obvious variation as the freezing and thawing times increase. With the increase of water content, the internal friction angle linearly decreases, but it has a small attenuation amplitude. The safety factor also exponentially decreases as the freezing and thawing times increase. As the water content of spalling mass increase, the safety factor decreases greatly and has an approximately same variation after freezing and thawing. The safety factor exponentially decreases with the increase of freezing-thawing depth and the exponential change law is not obvious for the spalling mass with high water content.

**Key words:** loess slope; freeze-thaw action; spalling; safety factor

黄土是一种在特定环境中形成的具有特殊性质的土, 黄土边坡坡面剥落破坏作为边坡破坏的一个类型较早被人们注意。对此, 已经有很多研究学者开展了比较深入系统的研究<sup>[1-7]</sup>。这些研究主要针对常温下黄土边坡剥落病害的类型、特征、影响因素及发育规律进行深入分析。但黄土地区多为季节冻土区, 因此黄土边坡受季节冻融的影响较大, 尤其在每年春季都会频繁发生冻融剥落病害。冻融对黄土体物理力学性质的破坏, 已有众多学者研究。毕贵权等<sup>[8]</sup>研究了冻融循环对黄土体物理力学性质的影响规律; 王铁行等<sup>[9]</sup>探究了冻

融循环作用后非饱和原状黄土剪切强度参数的劣化机理; 周弘等<sup>[10]</sup>通过变异性分析, 研究了不同冻融循环次数后重塑黄土物理性质指标的变化规律; 董晓宏等<sup>[11]</sup>研究了冻融过程中重塑黄土强度特性劣化规律; 李国玉<sup>[12]</sup>对冻融后压实黄土的工程性质进行试验研究; 连江波<sup>[13]</sup>和肖东辉<sup>[14]</sup>等通过试验研究了冻融循环作用对黄土孔隙比及渗透性的影响; 许健<sup>[15]</sup>等以西安 Q<sub>3</sub> 重塑黄土为研究对象, 对经受冻融作用后的黄土试样进行电镜扫描试验和直剪试验, 研究了重塑黄土冻融过程中微观结构和剪切强度变化规律。上述研究多是通过

收稿日期: 2017-03-08

修改稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478385, 51208409)

第一作者: 许 健(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事寒区岩土工程研究。E-mail: xujian@xauat.edu.cn

开展室内冻融试验,研究黄土体的物理性质指标及强度劣化机理,相应的研究成果对进一步探究黄土的冻融特性具有指导意义,但目前关于黄土边坡冻融剥落稳定性的研究资料非常少<sup>[16-18]</sup>,尚不能准确地量化分析和预测黄土边坡冻融剥落稳定性。

因此,首先对黄土地区边坡冻融剥落病害进行现场调研,初步探讨黄土边坡冻融剥落病害的成因、类型及发育特征;然后开展室内冻融试验,进一步研究黄土体强度受冻融作用的影响规律;最后结合现场调研内容和室内试验数据,推导适合黄土边坡冻融剥落稳定性分析的计算公式并对典型黄土边坡剥落体冻融过程稳定性演化规律进行力学分析。

## 1 黄土边坡冻融剥落病害现场调研

为深入研究黄土地区边坡冻融剥落病害产生机理及特征,课题组分别于2012年12月份(冬季)和2013年3月份(春季)到陕北黄土地区进行现场调研。根据现场调研资料,黄土地区边坡冻融剥落病害主要可分为三类。

### 1.1 边坡表层冻融剥蚀

图1(a)所示为黄店复线黄土边坡表层冻融剥蚀,位于黄陵县城西侧,属黄土残垣沟壑地貌特征。病害特征表现为坡面冻融剥蚀,分析其原因主要是冬季冻结过程冻胀力破坏了边坡表层土体结构,春融季节升温融化时土体结构强度不可回复,反复冻融作用导致表皮土体强度大大弱化,最终导致边坡表层土体产生冻融剥蚀。

图1(b)为延川县城某居民区黄土边坡表层冻融剥蚀,属黄土高原沟谷地貌。病害特征表现为边坡表层大面积冻融剥蚀,冻融剥蚀程度较一般边坡严重。分析其原因,该边坡位于群众生活区,居民生活废水由坡面或管道渗入边坡土体内部而使得边坡土体含水率较大,经过反复冻融作用后表层土体产生大面积冻融剥蚀破坏。

### 1.2 边坡冻融层状剥落

图2(a)所示为黄陵县中立石油加油站黄土塬侧边坡冻融层状剥落,属黄土高原沟谷川道地区。病害特征表现为边坡表层冻融层状剥落。这主要是由于该边坡位于居民生活区,大量居民生活用水渗入边坡土体内部,使得边坡土体内部含水率较高。冬季冻结作用下边坡土体内部水分向表层迁移,表层土体含水率进一步增大。春季土体融化时,冰晶融水迁移到一定位置聚集,形成冰水

交界面,该交界面土体强度急剧弱化,因而当边



(a) 黄店复线边坡表层冻融剥蚀



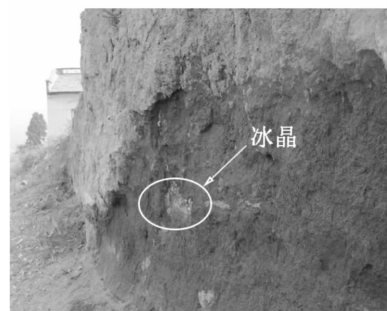
(b) 延川县城某居民区边坡表层冻融剥蚀

图1 黄土边坡表层冻融剥蚀

Fig. 1 Loess slope surface erosion under freeze-thaw cycles



(a) 黄陵县中立石油加油站边坡冻融层状剥落



(b) 宝鸡市金陵河水泥厂区边坡冻融层状剥落



(c) 甘泉县城某基坑开挖边坡冻融层状剥落

图2 黄土边坡冻融层状剥落

Fig. 2 Freeze-thaw layer spalling of loess slope

坡表面没有阻挡物且具有很好的临空面时将沿冰水界面产生冻融层状剥落病害。

图 2(b)所示为宝鸡市金陵河水泥厂区某自然边坡冻融层状剥落, 属黄土高原梁峁沟谷区。病害特征为冻融层状剥落且可清晰观察到剥落面上的白色冰晶。这是由于边坡土体局部区域含水率较高, 冻结过程由于水分迁移作用边坡表层含水量大大增加而强度大幅度降低, 春融季节沿冰水界面产生层状剥落。

图 2(c)为甘泉县城某基坑开挖边坡冻融层状剥落。病害特征为边坡表层大面积冻融层状剥落, 剥落程度较一般边坡严重。分析其原因, 该基坑边坡亦位于居民生活区, 一方面居民生活用水渗入坡体内部增大了土体含水率; 另一方面, 该基坑为放坡开挖, 边坡开挖面较大且坡面没有防护措施, 因而冬季冰雪融水及春季雨水大量渗入坡体内部, 从而表层土体容重增大且强度大幅度降低, 最终产生冻融层状剥落。

1.3 边坡小型冻融崩塌

图 3 所示为绥德县田庄镇黄土沟谷边坡冻融崩

塌, 病害特征为边坡小型冻融崩塌。主要原因是该边坡位于河流一级阶地, 崩塌体内部本身含水率较大, 由于冻融过程黄土体本身结构强度的劣化特性及水分迁移作用, 边坡表层局部区域抗剪强度大大降低, 从而产生小型的黄土冻融崩塌灾害。



图 3 黄土边坡小型冻融崩塌

Fig. 3 Small freezing-thawing collapse of loess slope

2 室内冻融试验研究

2.1 试验材料

试验所用黄土土样陕西省西安市未央区某基坑内, 属于  $Q_3$  黄土。试验用土的基本物理指标如表 1 所示。

表 1 试验用土基本物理指标

Tab. 1 Basic physical indexes of test soil

| 干密度 $\rho_d / g \cdot cm^{-3}$ | 液限 $w_L / \%$ | 塑限 $w_P / \%$ | 塑性指数 $IP$ | 颗粒组成 / %               |                              |                        |
|--------------------------------|---------------|---------------|-----------|------------------------|------------------------------|------------------------|
|                                |               |               |           | $\leq 0.005\text{ mm}$ | $0.005 \sim 0.075\text{ mm}$ | $\geq 0.075\text{ mm}$ |
| 1.3                            | 30.9          | 18.1          | 12.8      | 22                     | 65                           | 13                     |

2.2 试样制备

将大块原状土样削成  $7\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高) 的小块土样。取部分小块土样称重, 通过自然风干减湿或滴水增湿的方法, 保证土样平均含水率分别达到 16.5%、20.5%、24%、29% 和 32.5%; 然后, 将减湿或增湿后的小块土样分别放入不同的保湿缸中, 保证水分均化时间大于 96 h; 根据《土工试验方法标准》, 将水分均化的小块土样削制成直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm 的环刀样。

2.3 试验方案

为了构造出一个不补(散)水的密闭环境, 故将制备好的试样用保鲜膜包裹严密; 同时将此试样用密封袋进行密封处理以便于观察冻融对试样破坏特征; 随后置于恒温试验箱内进行冻融循环试验。为了保证冻融时试样水分迁移尽量最少, 因此本次冻融试验设计为封闭系统下的多向快速冻融循环试验。冻融循环具体操作过程为: 低温

-20℃条件下冻结 12 h, 高温 +20℃条件下融化 12 h; 冻融循环次数为: 0、1、3、5、7、10、20。待试验结束后, 依据《土工试验方法标准》, 对冻融后土样进行直剪试验, 分别施加垂直压力 100 kPa、200 kPa、300 kPa 及 400 kPa, 测定出土样的粘聚力和内摩擦角。

2.4 试验结果

2.4.1 粘聚力

图 4 给出粘聚力随冻融次数变化规律曲线。由图可见, 不同含水率下的原状黄土试样粘聚力均随冻融次数增加而逐渐减小, 同时降低幅度也逐渐减小, 最终维持在稳定值, 整体呈指数衰减趋势。主要原因是环绕在土颗粒周围的水膜在低温下被冻结成冰, 随着冰晶的生长, 周围土体颗粒不断被挤压, 土颗粒间联结作用失效, 导致土体结构强度逐渐弱化, 从而粘聚力降低。经历多次冻融循环作用后, 黄土体结构强度趋于稳定的残余强度, 粘聚力也趋于稳定。

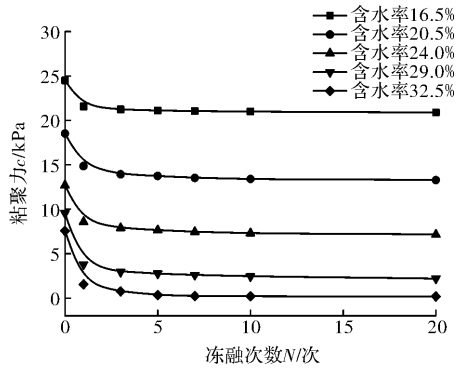


图4 粘聚力与冻融次数关系曲线

Fig. 4 Relationship between cohesion and freezing-thawing times

图5所示为冻融过程中黄土体粘聚力随含水率变化规律曲线。从图中不难看出,含水率对粘聚力影响显著,粘聚力随含水率增加显著减小。这是因为,一方面含水率的增加增厚了土颗粒之间结合水膜,导致粘聚力降低;另一方面土体含水率越大,自由水含量就越高,冻结时冻胀力越大,土颗粒之间的粘聚力破坏效果越明显。此外,由于冻融作用导致黄土体结构强度破坏,随着冻融循环次数增加,土体强度向着稳定的冻融残余强度数值(图4)靠近,这就导致多次冻融作用后粘聚力与含水率的关系曲线走向近似一致。

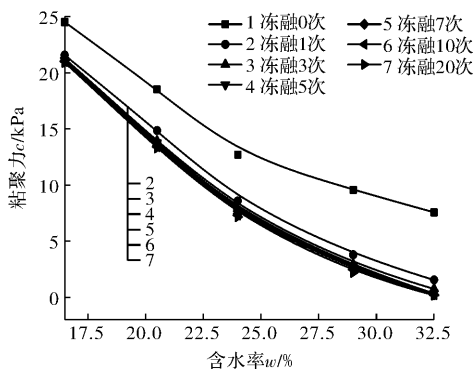


图5 粘聚力与含水率关系曲线

Fig. 5 Relationship between cohesion and water content

#### 2.4.2 内摩擦角

图6为内摩擦角与冻融次数关系曲线。由图可见,试样内摩擦角随着冻融次数增大而略微增大,最终增加量约 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ,变化量不大,这样就可以认为冻融次数对内摩擦角影响不大。究其原因,是因为影响黄土体摩擦强度的主要因素是黄土颗粒之间的接触面积及其形状,而冻融作用对上述因素没有明显影响。

图7所示为内摩擦角随含水率变化规律曲线。

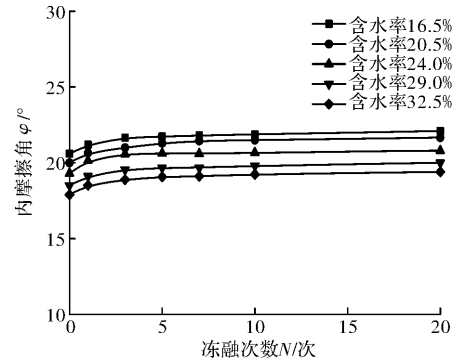


图6 内摩擦角与冻融次数关系曲线

Fig. 6 Relationship between internal friction angle and freezing-thawing times

由图可见,试样内摩擦角随含水率增加表现出相似的变化规律,都呈线性衰减的特征,但衰减幅度不大。这是由于含水率增加一定程度上降低了黄土颗粒之间的摩擦强度,导致内摩擦角有一定降低。但由前述分析,冻融作用对黄土内摩擦角无明显影响,因而内摩擦角随含水率增加其衰减幅度不大。

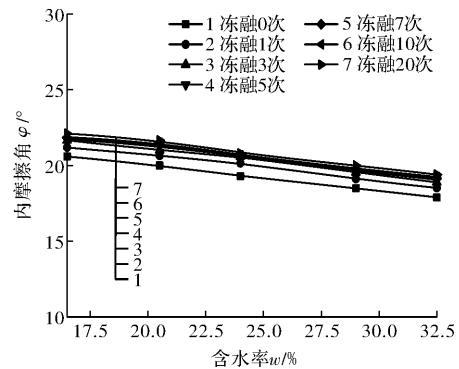


图7 内摩擦角与含水率关系曲线

Fig. 7 Relationship between internal friction angle and water content

### 3 冻融剥落稳定性计算分析

#### 3.1 计算模型

根据前述黄土边坡冻融剥落现场调研情况及已有研究成果<sup>[1]</sup>,黄土边坡坡度大于 $60^{\circ}$ 的高陡坡受重力作用影响易产生冻融块体剥落病害,因而其计算模型可简化为基于条分法的刚体极限平衡模型,如图8所示。基本假定如下:

(1)EDC段为折线滑动面;BD、AE均为竖直线;基于土体摩尔-库伦极限平衡破坏准则,重力型块体剥落其滑动面CD与水平面的夹角 $\beta=45^{\circ}+\varphi/2$ ;ED面为冻融界面,与边坡坡面平行。

(2)土条间作用力忽略不计。

(3)发生剥落黄土边坡地下水位较深, 暂不考虑地下水的影响。

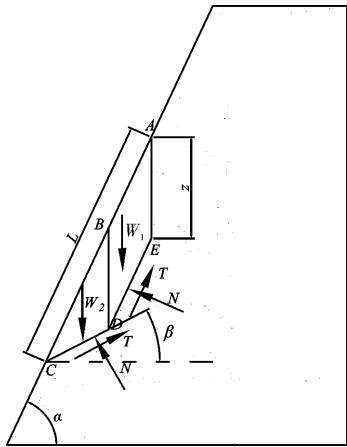


图 8 黄土边坡冻融剥落计算模型

Fig. 8 The calculation model of freeze-thaw spalling for loess slope

由图 8, 冻融深度为  $h=z\cos\alpha$ , 根据图示几何关系可得以下关系式:

$$\frac{z}{\sin(\alpha-\beta)} = \frac{BC}{\sin(90^\circ+\beta)} = \frac{CD}{\sin(90^\circ-\alpha)} \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$BC = \frac{z\cos\beta}{\sin(\alpha-\beta)} \quad (2)$$

$$CD = \frac{z\cos\alpha}{\sin(\alpha-\beta)} \quad (3)$$

三角形 BCD 的面积:

$$S_{BCD} = \frac{1}{2}BD \cdot CD \sin(90^\circ+\beta) = \frac{1}{2}z \cdot \frac{z\cos\alpha}{\sin(\alpha-\beta)} \cos\beta \quad (4)$$

四边形 ABDE 的面积:

$$S_{ABCE} = (L-BC)z\sin(90^\circ-\alpha) = (L-\frac{z\cos\beta}{\sin(\alpha-\beta)})z\cos\alpha \quad (5)$$

土条的自重为(假定纵向宽度为 1):

$$W_1 = \gamma S_{BCD} = \frac{1}{2}\gamma z \cdot \frac{z\cos\alpha}{\sin(\alpha-\beta)} \cos\beta \quad (6)$$

$$W_2 = \gamma S_{ABCE} = \gamma(L-\frac{z\cos\beta}{\sin(\alpha-\beta)})z\cos\alpha \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为剥落体的容重,  $\text{kN/m}^3$ .

下滑力为

$$F_{\text{下滑力}} = W_1 \sin\alpha \cdot \phi + W_2 \sin\beta \quad (8)$$

抗滑力为

$$F_{\text{抗滑力}} = (c \cdot DE + W_1 \cos\alpha \tan\varphi) \cdot \phi + c \cdot CD + W_2 \cos\beta \tan\varphi \quad (9)$$

式中:  $\phi = \cos(\alpha-\beta) - \sin(\alpha-\beta)\tan\varphi$ ;

$c$  为冻融后滑动面 DE 和 CD 上的粘聚力;  $\varphi$  为冻融后滑动面 DE 和 CD 上的内摩擦角。

安全系数 K 最终可表示为

$$K = \frac{F_{\text{抗滑力}}}{F_{\text{下滑力}}} = \frac{(c \cdot DE + W_1 \cos\alpha \tan\varphi) \cdot \phi + c \cdot CD + W_2 \cos\beta \tan\varphi}{W_1 \sin\alpha \cdot \phi + W_2 \sin\beta} \quad (10)$$

3.2 计算工况

冻融剥落稳定性分析主要研究冻融次数  $N$ 、冻融深度  $h$  及初始含水率  $w$  对剥落体稳定性的影响, 各影响因素具体水平因子见表 2, 共完成 175 个工况的计算分析。

表 2 水平因子  
Tab. 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 | 影响因子 6 | 影响因子 7 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 冻融次数 $N$ /次 | 0      | 1      | 3      | 5      | 7      | 10     | 20     |
| 冻融深度 $h$ /m | 0.2    | 0.4    | 0.6    | 0.8    | 1.0    | —      | —      |
| 含水率 $w$ /%  | 16.5   | 20.5   | 24.0   | 29.0   | 32.5   | —      | —      |

注: “—”表示不存在该因子。

3.3 计算力学参数

黄土边坡剥落体含水率及力学参数受冻融作用的影响, 本文的计算参数确定是依据前述室内冻融循环抗剪强度试验数据(图 4-7), 同时参考其它类似岩土体的物理力学参数取值。基于前述现场调研结果, 黄土边坡发生冻融剥落时, 表层土

体含水率往往较高, 达到或接近饱和状态, 因而计算模型中剥落体的重度  $\gamma$  近似按饱和重度取值, 取为  $20 \text{ kN/m}^3$ ; 黄土边坡坡度为  $80^\circ$ 。不同工况的  $c$ 、 $\varphi$  值取自前述室内冻融试验结果, 具体见表 3。

表 3 计算参数表

Tab. 3 Calculating parameters

| 冻融次数 $N$ /次 | 含水率 $w$ /% | 粘聚力 $c$ /kPa | 内摩擦角 $\varphi$ /° | 冻融次数 $N$ /次 | 含水率 $w$ /% | 粘聚力 $c$ /kPa | 内摩擦角 $\varphi$ /° |
|-------------|------------|--------------|-------------------|-------------|------------|--------------|-------------------|
| 0           | 16.5       | 24.5         | 20.6              | 7           | 16.5       | 21.04        | 21.81             |
|             | 20.5       | 18.52        | 20                |             | 20.5       | 13.52        | 21.44             |
|             | 24.0       | 12.69        | 19.3              |             | 24.0       | 7.45         | 20.6              |
|             | 29.0       | 9.56         | 18.5              |             | 29.0       | 2.6          | 19.68             |
|             | 32.5       | 7.56         | 17.89             |             | 32.5       | 0.23         | 19.11             |
| 1           | 16.5       | 21.56        | 21.19             | 10          | 16.5       | 21           | 21.87             |
|             | 20.5       | 14.85        | 20.65             |             | 20.5       | 13.4         | 21.5              |
|             | 24.0       | 8.58         | 20.15             |             | 24.0       | 7.3          | 20.67             |
|             | 29.0       | 3.79         | 19.11             |             | 29.0       | 2.45         | 19.8              |
|             | 32.5       | 1.55         | 18.52             |             | 32.5       | 0.2          | 19.24             |
| 3           | 16.5       | 21.23        | 21.66             | 20          | 16.5       | 20.88        | 22.11             |
|             | 20.5       | 13.93        | 21                |             | 20.5       | 13.28        | 21.66             |
|             | 24.0       | 7.89         | 20.58             |             | 24.0       | 7.15         | 20.8              |
|             | 29.0       | 2.95         | 19.55             |             | 29.0       | 2.2          | 20                |
|             | 32.5       | 0.75         | 18.89             |             | 32.5       | 0.18         | 19.4              |
| 5           | 16.5       | 21.1         | 21.73             |             |            |              |                   |
|             | 20.5       | 13.75        | 21.29             |             |            |              |                   |
|             | 24.0       | 7.65         | 20.62             |             |            |              |                   |
|             | 29.0       | 2.76         | 19.66             |             |            |              |                   |
|             | 32.5       | 0.34         | 19.07             |             |            |              |                   |

3.4 计算结果分析

3.4.1 冻融次数对剥落体稳定性的影响

图 9 所示为冻融次数对安全系数的影响. 从图中可以看出, 安全系数随着冻融次数的增加而逐渐减小, 但其降低幅度也逐渐减小, 最终趋于稳定, 整体趋势呈指数衰减. 这与上述黄土体粘聚力随冻融次数的变化趋势是一致的(图 10). 原因是冻融过程中黄土的抗剪强度劣化特性是决定安全系数的主要因素. 分析黄土室内冻融循环抗剪强度试验数据, 冻融过程粘聚力随冻融次数增加呈指数衰减的趋势变化, 而内摩擦角受冻融作用影响较小, 这就导致冻融过程中黄土边坡剥落体安全系数与粘聚力的变化规律相似. 值得注意的是, 当含水率较高时(29%和 32.5%), 随着冻融次数增加, 安全系数  $K < 1$ , 边坡发生剥落破坏.

3.4.2 含水率对剥落体稳定性的影响

图 11 所示为黄土边坡剥落体稳定性安全系数随含水率的变化规律曲线. 从图中可以看出, 含水率对剥落体安全系数影响显著, 安全系数随剥落体初始含水率增加显著降低. 这是因为粘聚力

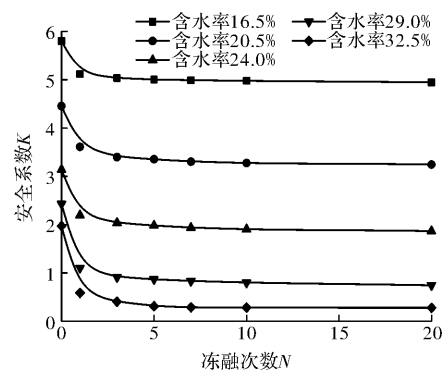


图 9 安全系数随冻融次数变化规律 ( $h=0.2\text{ m}$ )

Fig. 9 The law of safety factor varying with freezing-thawing times ( $h=0.2\text{ m}$ )

随含水量增加迅速减小(图 5), 导致黄土体抗剪强度急剧降低, 从而使得安全系数大大降低. 此外, 从图中还可以看出, 冻融后安全系数与含水率的变化曲线近似重合, 这与前述粘聚力随含水率的变化规律是一致的.

3.4.3 冻融深度对剥落体稳定性的影响

图 12 所示为黄土边坡剥落体安全系数与冻融深度变化规律曲线. 由图可见, 剥落体安全系数

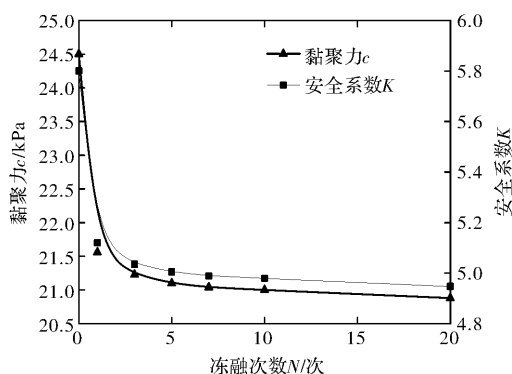


图10 粘聚力与安全系数随冻融次数变化规律曲线  
( $w=16.5\%$ ,  $h=0.2\text{ m}$ )

Fig. 10 The law of cohesion and safety factor varying with freezing-thawing times ( $w=16.5\%$ ,  $h=0.2\text{ m}$ )

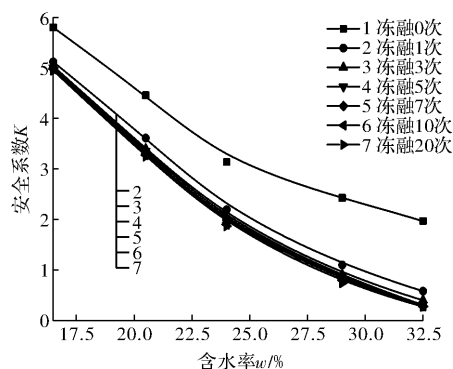


图11 安全系数随含水率变化规律( $h=0.2\text{ m}$ )

Fig. 11 The law of safety factor varying with water content ( $h=0.2\text{ m}$ )

随冻融深度增加呈指数衰减趋势,逐渐趋于一个稳定数值。这主要是因为黄土边坡剥落体冻融损伤范围随着冻融深度增加而增大,从而导致黄土边坡的剥落和失稳过程加快。从图中还可以看出,随着冻融深度的不断加深,安全系数  $K$  接近或小于1,黄土边坡达到极限稳定状态,黄土边坡开始或已经发生剥落破坏。值得注意的是,含水率很高时(32.5%),由于剥落体本身抗剪强度很低,因而安全系数随冻融深度指数变化规律不明显,安全系数  $K \ll 1$ ,黄土边坡已发生剥落破坏。

## 4 结论

(1)黄土地区边坡冻融剥落病害主要有三类:表层冻融剥蚀、冻融层状剥落及小型冻融崩塌;冻融剥落病害的主要原因是边坡土体局部区域含水量较高,由于冻融过程黄土体本身结构强度的劣化特性及水分迁移作用,边坡表层土体抗剪强度大大降低,从而产生冻融剥落病害。

(2)随着冻融次数增加,黄土试样粘聚力呈指数衰减趋势;粘聚力随含水率增加显著减小且冻融后粘聚力与含水率的关系曲线基本相同。内摩

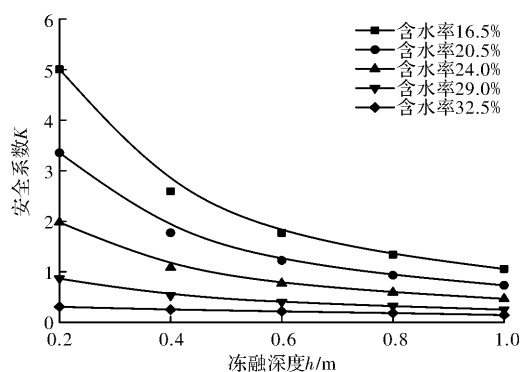


图12 安全系数随冻融深度变化规律( $N=5$ )

Fig. 12 The law of safety factor varying with freeze-thaw depth ( $N=5$ )

擦角随冻融次数增加略有增大但没有显著变化;内摩擦角随含水率增加呈线性衰减特征,但衰减幅度不大。

(3)随着冻融次数增加,黄土边坡安全系数也呈指数衰减趋势,这与黄土体粘聚力随冻融次数的变化规律相一致;含水率较高时,随冻融次数增加,安全系数  $K < 1$ ,边坡发生剥落破坏。安全系数随剥落体初始含水率增加显著降低且冻融后安全系数与含水率的变化曲线近似重合。随冻融深度增加,安全系数呈指数衰减趋势;当含水率很高时,安全系数随冻融深度指数没有明显变化,安全系数  $K \ll 1$ ,边坡已发生剥落破坏。

## 参考文献 References

- [1] 叶万军,杨更社,常中华,等.黄土边坡剥落病害的发育特征及其发育程度评价[J].工程地质学报,2011,19(1):37-42.  
YE Wanjun, YANG Gengshe, CHANG Zhonghua, et al. Characteristics of development state of spalling hazard in loess slope and its evaluation method [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1): 37-42.
- [2] 方鹏.黄土边坡剥落病害处治技术研究[D].西安:长安大学,2007.  
FANG Peng. Study on the punishment technology of flake in loess side slope [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [3] 李亚兰.黄土边坡坡面稳定性及防治措施研究[D].西安:长安大学,2005.  
LI Yalan. Study on the prevention strategies and stability of loess slope surface [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [4] 郭利平,叶万军,方鹏,等.开挖扰动导致黄土边坡产生剥落病害的机理分析[J].西安科技大学学报,2010,30(4):462-465,470.  
GUO Liping, YE Wanjun, FANG Peng, et al. Mechanism of spalling hazard in loess slope induced by excavation disturbance [J]. Journal of Xi'an University of



- Science and Technology, 2010, 30(4): 462-465, 470.
- [5] 胡雄韬. 甘肃省黄土地区路堑边坡防护[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(2): 112-114.
- HU Xiongtao. Protections for loess cutting side slopes in Gansu Province [J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(2): 112-114.
- [6] 段钊, 赵法锁, 陈新建. 陕北黄土高原区崩塌发育类型及影响因素分析: 以吴起县为例[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(6): 142-149.
- DUAN Zhao, ZHAO Fasuo, CHEN Xinjian. Types and influencing factors of collapse development in loess plateau region of North Shaanxi: a case study of Wuqi County [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(6): 142-149.
- [7] 叶万军, 赵志鹏, 杨更社, 等. 土体含水状态对黄土边坡剥落病害产生的影响[J]. 中国公路学报, 2015, 28(7): 18-24.
- YE Wanjun, ZHAO Zhipeng, YANG Gengshe, et al. Influence of soil moisture state on loess slope spalling hazards [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(7): 18-24.
- [8] 毕贵权, 张侠, 李国玉, 等. 冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 114-117.
- BI Guiquan, ZHANG Xia, LI Guoyu, et al. Experiment of impact of freezing-thawing cycle on physico-mechanical properties of loess [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(2): 114-117.
- [9] 王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱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.
- [10] 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.
- [11] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 887-893.
- DONG Xiaohong, ZHANG Aijun, LIAN Jiangbo, et al. Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 887-893.
- [12] 李国玉, 马巍, 李宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 5-7.
- LI Guoyu, MA Wei, LI Ning, et al. Experimental research on impact of freezing and thawing on geotechnical properties of compacted loess [J]. Journal of Water Research and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 5-7.
- [13] 连江波, 张爱军, 郭敏霞, 等. 反复冻融循环对黄土空隙比及渗透性的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(12): 55-58.
- LIAN Jiangbo, ZHANG Aijun, GUO Minxia, et al. Influence of iterative freezing-thawing on void ratio and permeability coefficient of loess [J]. Yangtze River, 2010, 41(12): 55-58.
- [14] 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.
- [15] 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 remolded loess under the freezing-thawing cycle [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 200-206.
- [16] 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.
- [17] 马世雄. 冻融作用对黄土边坡剥落影响的试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- MA Shixiong. Experimental study of freezing-thawing to spalling of loess slope [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [18] 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.
- WANG Zhangquan, XU Jian, ZHENG Xiang, et al. Analysis on freezing-thawing stability of slope in loess region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2): 15-21.

(编辑 桂智刚)